

核技术利用建设项目
晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心
环境影响报告书
(公示稿)



福建省晋江文旅集团有限公司

2025 年 12 月

核技术利用建设项目
晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心
环境影响报告书



建设单位名称：福建省晋江文旅集团有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）：柯惠玲



通讯地址：福建省泉州市晋江市青阳街道陈村社区崇德路 267 号金融
广场 1 期 1 号楼 10-11 层

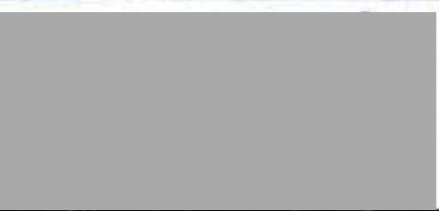
邮政编码：362200

联系人：翁挺

电子邮箱：

联系电话：

编制单位和编制人员情况表

项目编号	3ey71t		
建设项目名称	晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心		
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）	福建省晋江文旅集团有限公司		
统一社会信用代码	9135058206226137X1		
法定代表人（签章）	柯惠玲		
主要负责人（签字）	曾怀宇		
直接负责的主管人员（签字）	曾亮亮		
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
许慧萍	2014035110350000003512110052	BH 009725	
2. 主要编制人员			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
金潇	审核	BH 013175	
许慧萍	主持编制	BH 009725	
严源	审定	BH 013174	
罗欣	全文	BH 009733	



许慧萍 00038

持证人签名:

Signature of the Bearer

管理号: 2014035110350000003512110052
File No.

姓名: 许慧萍
Full Name
性别: 女
Sex
出生年月: 1984. 01
Date of Birth
专业类别: /
Professional Type
批准日期: 2014年5月25日
Approval Date

签发单位盖章:

Issued by

签发日期: 2014 年 11 月 13 日

Issued on



本证书由中华人民共和国人力资源和社会保障部、环境保护部批准颁发。它表明持证人通过国家统一组织的考试,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.



Ministry of Human Resources and Social Security
The People's Republic of China



Ministry of Environmental Protection
The People's Republic of China

编号: HP 00015976
No.

目录

1	概述	1
1.1	项目名称、地点	1
1.2	项目概况	1
1.2.1	建设单位概况	1
1.2.2	项目背景、意义	2
1.2.3	本次环评内容	3
1.2.4	产业政策、规划等符合性分析	8
1.2.5	周围环境概况	14
1.2.6	核技术利用现状	21
1.3	编制依据	21
1.3.1	法律、法规和规章	21
1.3.2	技术导则、标准	22
1.3.3	其它文件、资料	23
1.4	评价标准	24
1.4.1	剂量限值和剂量约束值	24
1.4.2	辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	25
1.4.3	工作场所放射性表面污染控制水平	27
1.4.4	非密封放射性物质工作场所分级	27
1.4.5	核医学科患者出院的管理要求	28
1.4.6	放射性三废控制要求	28
1.4.7	其他标准	35
1.5	评价范围和保护目标	35
1.5.1	评价范围	35
1.5.2	环境保护目标	37
2	自然环境与社会环境状况	41
2.1	地理位置	41
2.2	自然环境状况	41
2.2.1	地形地貌	41
2.2.2	地质	41
2.2.3	气候气象	42
2.2.4	水文	42
2.2.5	土壤	43
2.3	社会环境概况	43
2.3.1	人口数量	43
2.3.2	经济发展	44
2.3.3	医疗卫生	44
2.3.4	交通	44
2.4	环境质量和辐射现状	45
2.4.1	环境天然放射性水平	45
2.4.2	辐射环境质量现状调查与评价	45

2.5	场址适宜性评价	50
3	工程分析与源项	51
3.1	项目规模与基本参数	51
3.2	工艺设备及工作原理	53
3.2.1	质子治疗系统	53
3.2.2	硼中子俘获治疗装置	65
3.2.3	直线加速器	74
3.2.4	后装治疗机	77
3.2.5	大孔径 CT	80
3.2.6	放射性药物制备及动物实验	82
3.2.7	核素诊断	97
3.2.8	核素治疗	105
3.3	辐射源项分析	106
3.3.1	施工期污染源项	107
3.3.2	质子治疗系统	107
3.3.3	硼中子俘获治疗装置	142
3.3.4	直线加速器	151
3.3.5	后装治疗机	151
3.3.6	大孔径 CT	151
3.3.7	回旋加速器（制备放射性药物）	151
3.3.8	非密封放射性物质	158
4	辐射安全与防护设施	159
4.1	质子治疗系统	159
4.1.1	场所布局与分区	159
4.1.2	辐射屏蔽	171
4.1.3	人身安全联锁系统	178
4.1.4	场所辐射监测系统	189
4.1.5	通风系统	192
4.1.6	放射性三废治理	194
4.2	硼中子俘获治疗装置	198
4.2.1	场所布局与分区	198
4.2.2	人流物流	201
4.2.3	辐射屏蔽	207
4.2.4	人身安全联锁系统	212
4.2.5	场所辐射监测系统	224
4.2.6	通风系统	225
4.2.7	放射性三废治理	227
4.3	直线加速器、后装治疗机	234
4.3.1	场所布局与分区	235
4.3.2	辐射屏蔽	235
4.3.3	安全联锁及辐射监测系统	238
4.3.4	后装机贮源器、卡源处理措施	245
4.3.5	通风系统	246

4.3.6	放射性三废	248
4.4	大孔径 CT	248
4.4.1	场所布局与分区	248
4.4.2	辐射屏蔽	249
4.4.3	安全联锁及防护措施	249
4.4.4	通风系统	250
4.5	放药制备及动物实验	250
4.5.1	场所布局与分区	250
4.5.2	人流物流	253
4.5.3	辐射屏蔽及防护用品	256
4.5.4	人身安全联锁系统	258
4.5.5	场所辐射监测系统	268
4.5.6	放射性三废	271
4.6	核素诊断	279
4.6.1	场所布局与分区	279
4.6.2	人流物流	279
4.6.3	辐射屏蔽及防护用品	283
4.6.4	辐射安全措施	284
4.6.5	辐射监测	285
4.6.6	放射性三废	286
4.7	核素治疗	290
4.7.1	场所布局与分区	290
4.7.2	人流物流	292
4.7.3	辐射屏蔽及防护用品	299
4.7.4	辐射安全措施	303
4.7.5	辐射监测系统	303
4.7.1	放射性三废	306
4.8	服务期满后的环境保护措施	312
5	环境影响分析	313
5.1	建设阶段环境影响分析	313
5.2	正常运行的环境影响分析	314
5.2.1	质子治疗系统	314
5.2.2	硼中子俘获治疗装置	338
5.2.3	直线加速器	353
5.2.4	后装治疗机	365
5.2.5	放药制备及动物实验	370
5.2.6	核素诊断	375
5.2.7	核素治疗	377
5.3	事故工况的环境影响分析	381
5.3.1	射线装置误照射事故	381
5.3.2	冷却水泄漏事故	383
5.3.3	后装机卡源事故	383
5.3.4	非密封放射性物质工作场所事故	384

6	辐射安全管理	386
6.1	辐射安全与环境保护管理机构	386
6.1.1	机构和人员	386
6.1.2	辐射工作人员管理	386
6.2	辐射安全管理规章制度	387
6.3	辐射监测	387
6.3.1	工作场所监测	388
6.3.1	环境监测	389
6.3.2	个人剂量监测	390
6.3.3	监测设备	390
6.4	辐射事故应急预案	391
6.5	申请者从事辐射工作能力评价	391
6.5.1	辐射安全与环境保护管理	391
6.5.2	辐射工作人员培训	392
6.5.3	工作场所的安全防护措施	392
6.5.4	个人防护用品及监测仪器	393
6.5.5	规章制度	393
6.5.6	辐射事故应急	394
6.5.7	放射性三废治理	394
6.6	环保投资一览表	394
6.7	竣工环保验收一览表	395
7	利益-代价分析	397
7.1	利益分析	397
7.2	代价分析	397
7.3	正当性分析	398
8	公众参与	399
9	结论与建议	399
9.1	结论	399
9.1.1	项目工程概况	399
9.1.2	实践的正当性	399
9.1.3	选址、布局合理性分析	399
9.1.4	辐射安全与防护措施	400
9.1.5	辐射环境影响分析	400
9.1.6	放射性三废排放和处理	400
9.1.7	辐射安全管理	401
9.1.8	总结	401
9.2	建议	401
	附件 1 建设单位营业执照	402
	附件 2 福建省投资项目备案证明	403
	附件 3 环评委托书	404
	附件 4 建设工程规划许可证	405
	附件 5 辐射环境现状监测报告	407

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心

建设地点：福建省泉州市晋江市罗山街道社店社区晋江市医院西北角

建设性质：新建

建设单位：福建省晋江文旅集团有限公司

建设规模：晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心总占地面积 7317.32 平方米，总建筑面积 25958.27 平方米，地上三层、地下一层。核技术利用建设内容包括 1 套质子治疗系统、1 套硼中子俘获治疗装置、3 台直线加速器、1 台后装治疗机、2 台大孔径 CT、1 个用于制备 PET 放射性药物及小动物实验的乙级非密封源场所（使用 1 台回旋加速器、1 台小动物 PET/CT、1 台小动物 SPECT/CT）、1 个用于核素诊断的乙级非密封源场所（使用 1 台 PET/CT、1 台 SPECT/CT）、1 个用于核素治疗的乙级非密封源场所（16 间核素病房）。

项目投资：项目总投资 44990.1585 万元，其中环保投资 8500 万元，约占总投资 18.89%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

本项目建设单位为福建省晋江文旅集团有限公司（以下简称“晋江文旅集团”，营业执照见附件 1），系晋江市属国有企业，于 2018 年 5 月改革重组，下辖新丝路实业公司、清新文旅公司等 12 家全资子公司，紫帽开发建设公司、国家体育城市公司 2 家控股企业，8 家参股企业。晋江文旅集团秉承与城市一起成长的发展理念，主要致力于文旅、体育、康养、教育、地产等版块的项目建设运营，积极构建轻重资产运营双

轨并行、多板块业务联动发展的经营格局，着力打造国内知名的文旅产业综合服务运营商，为人们创造“既有诗和远方，又有运动健康”的美好生活。

1.2.2 项目背景、意义

2016年8月，中共中央政治局召开会议审议并通过了“健康中国2030”规划纲要，该规划指出“坚持正确的卫生与健康工作方针，以提高人民健康水平为核心，发展健康产业为重点，把健康融入所有政策，全方位、全周期保障人民健康。“健康中国”战略已经明确把肿瘤的防治列为未来我国国民健康主要目标之一。目前，我国的大健康产业正处在快速发展阶段，据国家卫健委预测，到2030年我国大健康产业规模将超过16万亿人民币，卫生总费用支出的占比将接近发达国家GDP约10%的比重。截止到2022年，我国的健康产业市场规模已经达到10万亿元，占我国GDP总量的8.2%，我国大健康产业发展势头非常稳健、潜力非常巨大。未来10-15年里，我国会持续不断的丰富医疗服务资源、提高医疗技术水平、提升人民的健康理念和素养。其中肿瘤放射治疗的一些前沿性的科学技术将迎来质的改变，实现从学习国外、赶超欧美再到引领全球地位的过程，粒子医疗服务也会跟上世纪90年代的普通光子放疗一样，经历从“看病贵”到“看得起”的改变，预计到2035年，粒子治疗不会再是老百姓眼中的“高端医疗”，而是可以普遍惠及到每一位需要该项治疗技术的癌症患者。可以说“健康中国”战略将推动我国粒子治疗服务进入“新时代”。

癌症是严重危害人类健康的重大慢性疾病，根据国家癌症中心最新癌症统计数据，2022年我国恶性肿瘤发病例约482.47万人，总死亡人数约257.42万人。其中发病前五位的癌种分别为肺癌、结直肠癌、甲状腺癌、肝癌、胃癌；死亡前五位的恶性肿瘤为肺癌、肝癌、胃癌、结直肠癌、食管癌。同时，恶性肿瘤的发生“男女有别”。在男性群体中，前五大高发癌症依次是肺癌、结直肠癌、肝癌、胃癌和食管癌；而在女性群体中，最常见的癌症是肺癌，其次是乳腺癌、甲状腺癌、结直肠癌和宫颈癌。当前我国癌症治疗水平与美国等国家相比还有较大差距。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。

晋江市作为泉州南翼国家高新区的重要组成部分，近年来致力于培育新质生产力，重点布局医疗健康产业。为提高区域医疗基础设施保障，带动放疗学科的发展，提升癌症放疗领域的医疗水平，深化推进“健康晋江”建设，晋江市人民政府提出建设晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心（以下简称“示范中心”），并成立了项目调度指挥部。根据《企业国有资产监督管理暂行条例》，非营利法人不履行出资人职责，晋江文旅集团属晋江市国有资本投资运营有限责任公司下属国企，作为本项目建设单位，履行国有资产出资人职责，负责项目前期规划设计、建设管理等工作。项目建成后，将委托专业运营公司对示范中心进行运营管理，由运营公司申请辐射安全许可证。项目选址晋江市医院西北角，与现有医疗资源深度融合，旨在打造集研发、治疗、产业化为一体的一站式肿瘤先进粒子治疗示范中心。通过整合医院床位资源，提升区域肿瘤治疗能力。通过引入国际领先的肿瘤治疗技术，提升晋江乃至福建省的医疗服务质量，辐射东南沿海地区，打造国家肿瘤区域医疗中心，具有显著的示范意义和战略价值。该项目已完成立项备案，项目代码为 2306-350582-04-01-393394，备案编号为闽发改备[2023]C050443 号，备案证明见附件 2。

1.2.3 本次环评内容

示范中心的非放环评，建设单位已委托厦门大学规划设计研究院有限公司编制了《晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心环境影响报告表》（污染影响类），并于 2025 年 1 月 20 日获得泉州市生态环境局的批复（泉晋环评〔2025〕表 17 号）。

本项目核技术利用建设内容包括在质子治疗区使用 1 套质子治疗系统（Ⅰ类射线装置）和 8 个定位用 X 射线球管（Ⅲ类射线装置）；在硼中子治疗区使用 1 套硼中子俘获治疗装置（Ⅱ类射线装置）；在放疗科使用 3 台直线加速器（Ⅱ类射线装置）和 1 台后装治疗机（含一枚 Ir-192 放射源）；在影像科使用 2 台大孔径 CT（Ⅲ类射线装置）；在一层设 1 个用于放射性药物制备及动物实验的乙级非密封放射性物质工作场所（以下简称“非密封源场所”），在其中使用 1 台回旋加速器（Ⅱ类射线装置）、1 台小动物 PET/CT（Ⅲ类射线装置）和 1 台小动物 SPECT/CT（Ⅲ类射线装置）；在一

层设 1 个用于核医学显像诊断的乙级非密封源场所，在其中使用 1 台 PET/CT（Ⅲ类射线装置）和 1 台 SPECT/CT（Ⅲ类射线装置）；在三层设 1 个用于核素治疗的乙级非密封源场所，含 16 间核素病房。具体见表 1-1~表 1-4。

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》，本项目应编制环境影响报告书。建设单位委托中国原子能科学研究院开展辐射环评相关工作（委托书见附件 3）。

表 1-1 晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心的核技术利用建设内容一览表

序号	核技术利用建设内容	数量	类别	主要参数	区域	楼层
1	质子治疗系统	1	I 类射线装置	240MeV、500nA	质子治疗区	一层
2	定位用 X 射线球管	8	III类射线装置	150kV、1000mA		
3	硼中子俘获治疗装置	1	II类射线装置	2.6MeV、20mA	硼中子治疗区	
4	回旋加速器（制备 PET 放射性药物）	1	II类射线装置	16MeV、0.06mA	放药制备及动物实验区	
5	小动物 PET/CT	1	III类射线装置	80kV、0.7mA		
6	小动物 SPECT/CT	1	III类射线装置	80kV、0.7mA		
7	生产、使用非密封放射性物质	1	乙级非密封源场所	/		
8	PET/CT	1	III类射线装置	140kV、666mA	核素诊断区	
9	SPECT/CT	1	III类射线装置	140kV、440mA		
10	使用非密封放射性物质	1	乙级非密封源场所	/		
11	使用非密封放射性物质	1	乙级非密封源场所	/	核素治疗区	三层
12	直线加速器	3	II类射线装置	6MV、840Gy/h	放疗科	负一层
13	后装治疗机 （含一枚 Ir-192 放射源）	1	III类放射源	3.7×10 ¹¹ Bq （10Ci）		
14	大孔径 CT	2	III类射线装置	150kV、1300mA	影像科	二层

表 1-2 本项目射线装置情况表

序号	装置名称	型号	技术参数（最大）	类别	数量/台	使用场所
1	质子治疗系统	ProRays® PLUS	240MeV、500nA	I 类	1	一层质子治疗区
2	X 射线球管	待定	150kV、1000mA	Ⅲ类	8	
3	硼中子俘获治疗装置（BNCT）	NeuRays	2.6MeV、20mA	Ⅱ类	1	一层硼中子治疗区
4	回旋加速器	MedRays® V16	16MeV、0.06mA	Ⅱ类	1	

序号	装置名称	型号	技术参数（最大）	类别	数量/台	使用场所
5	小动物 PET/CT	Madiclab PSA SPECT/CT	80kV、0.7mA	III类	1	一层放药制备及动物实验区
6	小动物 SPECT/CT	Madiclab PSA094	80kV、0.7mA	III类	1	
7	PET/CT	待定	140kV、666mA	III类	1	一层核素诊断区
8	SPECT/CT	待定	140kV、440mA	III类	1	
9	直线加速器	uRT-linac 506c	6MV、840Gy/h	II类	3	负一层放疗科
10	大孔径 CT	待定	150kV、1300mA	III类	2	二层影像科

表 1-3 本项目放射源情况表

核素	半衰期	总活度（Bq）×枚数	放射源类别	数量	用途	场所
Ir-192	74.0d	3.7E+11	III 类	1	后装治疗机	负一层后装机房

表 1-4 本项目非密封放射性物质情况表

场所名称	用途	核素	半衰期	来源	用途	贮存方式与地点	状态	毒性分组	毒性因子	操作方式	操作因子	日最大操作量/Bq	日等效最大操作量/Bq	年工作天数	年最大操作量/Bq
一层放药制备及动物实验区	放药制备	¹⁸ F	109.8min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	9.64E+09	9.64E+07	250	2.41E+12
		¹¹ C	20.39min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹³ N	10.0min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹⁵ O	2.0min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	9.25E+09	9.25E+07	50	4.63E+11
		⁶⁴ Cu	12.7h	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	3.72E+09	3.72E+07	50	1.86E+11
		⁶⁸ Ga	68.3min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.94E+09	5.94E+07	50	2.97E+11
		⁸⁹ Zr	78.41h	自制	药物制备	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	1.65E+09	1.65E+08	50	8.23E+10
		^{99m} Tc	6.02h	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	1.15E+10	1.15E+08	50	5.75E+11
		⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc 发生器	—	外购	药物制备	手套箱	液体	中毒	0.1	源的贮存	100	3.70E+10	3.70E+07	50	1.85E+12
	动物实验	¹⁸ F	109.8min	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		⁶⁴ Cu	12.7h	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		⁶⁸ Ga	68.3min	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		⁸⁹ Zr	78.41h	自制	诊断实验	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	9.07E+08	9.07E+07	50	4.53E+10
		^{99m} Tc	6.02h	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		¹²³ I	13.2h	外购	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
¹²⁴ I		4.18d	外购	诊断实验	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+08	50	1.12E+11	
¹⁷⁷ Lu		6.73d	外购	治疗实验	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	1.32E+10	1.32E+09	50	6.59E+11	
总计													2.46E+09	/	
非密封放射性物质工作场所级别：乙级（2E+07 ~ 4E+09Bq）															
一层核素诊断区	核素诊断	¹⁸ F	109.8min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	很简单操作	10	7.40E+09	7.40E+06	250	1.85E+12
		¹¹ C	20.39min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹³ N	10.0min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹⁵ O	2.0min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	9.25E+09	9.25E+07	50	4.63E+11
		⁶⁴ Cu	12.7h	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	1.48E+09	1.48E+07	50	7.40E+10

场所名称	用途	核素	半衰期	来源	用途	贮存方式与地点	状态	毒性分组	毒性因子	操作方式	操作因子	日最大操作量/Bq	日等效最大操作量/Bq	年工作天数	年最大操作量/Bq
		⁶⁸ Ga	68.3min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	3.70E+09	3.70E+07	50	1.85E+11
		⁸⁹ Zr	78.41h	自制	显像诊断	储源间	液体	中毒	0.1	简单操作	1	7.40E+08	7.40E+07	50	3.70E+10
		^{99m} Tc	6.02h	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	很简单操作	10	9.25E+09	9.25E+06	50	4.63E+11
	总计												3.46E+08	/	
	非密封放射性物质工作场所级别：乙级（2E+07 ~ 4E+09Bq）														
三层核素治疗区	核素治疗	¹³¹ I	8.02d	外购	甲功测定	储源室	液体	中毒	0.1	简单操作	1	3.70E+06	3.70E+05	250	9.25E+08
		¹³¹ I	8.02d	外购	甲亢治疗	储源室	液体	中毒	0.1	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+08	250	1.39E+12
		¹³¹ I	8.02d	外购	甲癌治疗	储源室	液体	中毒	0.1	简单操作	1	2.78E+10	2.78E+09	100	2.78E+12
		¹⁷⁷ Lu	6.73d	外购	治疗	储源室	液体	中毒	0.1	简单操作	1	1.85E+09	1.85E+08	50	9.25E+10
	总计												3.52E+09	/	
	非密封放射性物质工作场所级别：乙级（2E+07 ~ 4E+09Bq）														

1.2.4 产业政策、规划等符合性分析

1.2.4.1 产业政策符合性分析

本项目属于《产业结构调整指导目录》（2024 年本）中**鼓励类**第六条第 4 项——同位素、加速器及辐照应用技术开发、第十三条第 4 项——高端医疗器械创新发展以及第三十七条第 1 项——医疗服务设施建设的范畴。因此，本项目建设符合国家相关产业政策。

1.2.4.2 规划符合性分析

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》指出：推进国家组织药品和耗材集中带量采购使用改革，发展高端医疗设备。2016 年中共中央政治局会议上审议通过的《“健康中国 2030”规划纲要》中，也多次提出将重大疾病防治、癌症诊治工作作为重要目标，加强医药技术创新发展以及医药体系的完善。

根据《晋江市世纪大道片区控制性详细规划》与《晋江市国土空间总体规划（2021-2035 年）》，本项目用地属医疗卫生用地，符合土地利用规划相关要求。项目已于 2025 年 3 月 4 日获得晋江市自然资源局颁发的建设工程规划许可证（建字第 3505822025GG0058573 号，见附件 4）。

因此，本项目的建设与国家及地方的医疗卫生事业相关规划是相符的。

1.2.4.3 “三线一单”符合性分析

本项目为核技术利用建设项目，主要污染源为射线装置引起的瞬发辐射、感生放射性以及放射源产生的 β/γ 射线。项目采取了辐射屏蔽、安全联锁、辐射监测、三废处理等充分的辐射防护和安全措施，能够有效降低项目对周边环境和人员的影响，放射性三废均得到有效控制，预测的屏蔽体外剂量率和人员受照剂量均满足国家相关标准要求。

根据《泉州市人民政府关于实施“三线一单”生态环境分区管控的通知》（泉政文〔2021〕50号），项目与“三线一单”及生态环境分区管控的符合性分析如下。

（1）生态保护红线

根据泉州市生态保护红线图（图 1-1），项目不涉及自然保护区、重要湿地、饮用水源一级保护区、生态红线，与生态保护红线要求相符。

（2）环境质量底线

根据晋江市人民政府发布的《2023 年晋江市环境质量状况公报》，项目所在地环境空气优良率 99.5%， NO_2 $17\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， O_3 （90%位） $119\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2023 年晋江市区空气污染综合指数 2.48，同比去年上升 0.29，上升率 13.2%。2023 年晋江市国考断面埭埔断面整体水质Ⅲ类，省控小流域九十九溪乌边港桥断面、湖漏溪鲤鱼穴断面水质为Ⅳ类，湖漏溪杭边村断面水质为Ⅴ类，均达上级考核要求；饮用水源地（南高干渠田洋取水口）水质保持良好，水质达到 GB3838-2002《地表水环境质量标准》Ⅲ标准，水质达标率 100%。2023 年晋江城市区域噪声共设置监测点位 128 个，昼间监测均值为 56.5 分贝，城市区域环境噪声总体水平等级为三级，评价结果为“一般”。夜间监测均值为 49.4 分贝，质量等级为三级，评价结果为“一般”。

根据《2024 年福建省生态环境状况公报》，全省辐射环境质量总体良好。环境 γ 辐射剂量率处于天然本底涨落范围内。空气中天然放射性核素活度浓度处于本底水平，人工放射性核素活度浓度未见异常。全省 12 条主要河流、重点湖泊（水库）、地下水、近岸海域海水和海洋生物中天然放射性核素活度浓度处于本底水平，人工放射性核素活度浓度未见异常。土壤中天然放射性核素活度浓度处于本底水平，人工放射性核素活度浓度未见异常。

本项目为核技术利用项目，产生的少量放射性废气经通风系统统一收集后排放；产生的少量放射性废水经统一收集暂存后经监测达标排放至示范中心污水管网；产生的少量放射性固体废物集中暂存，满足清洁解控要求后作为非放射性固废处理。综上所述，项目对周边环境产生影响较小，不会突破当地环境质量底线。

（3）资源利用上线

本项目建设采用了高效的节能技术和可再生能源利用方案，降低了能源消耗和运营成本，对能源、水、土地等资源的消耗利用符合资源利用上线的要求。

（4）环境准入

根据福建省生态环境分区管控数据应用平台查询结果，项目位于泉州市晋江市重点管控单元，单元编码 ZH35058220007，名称为晋江市重点管控单元 4，见图 1-2、图 1-3。项目与生态环境分区管控有关要求符合性分析情况见表 1-5。

综上，项目均满足泉州市“三线一单”（生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单）及生态环境分区管控有关要求。

1.2.4.4 “三区三线”管控方案符合性分析

根据《晋江市国土空间总体规划（2021-2035 年）》，本项目位于集成电路产业园，项目所在区域不占用城镇空间、农业空间和生态空间，项目评价范围不在城镇开发边界、永久基本农田保护红线、生态保护红线三条控制线范围内，符合“三区三线”相关规定。

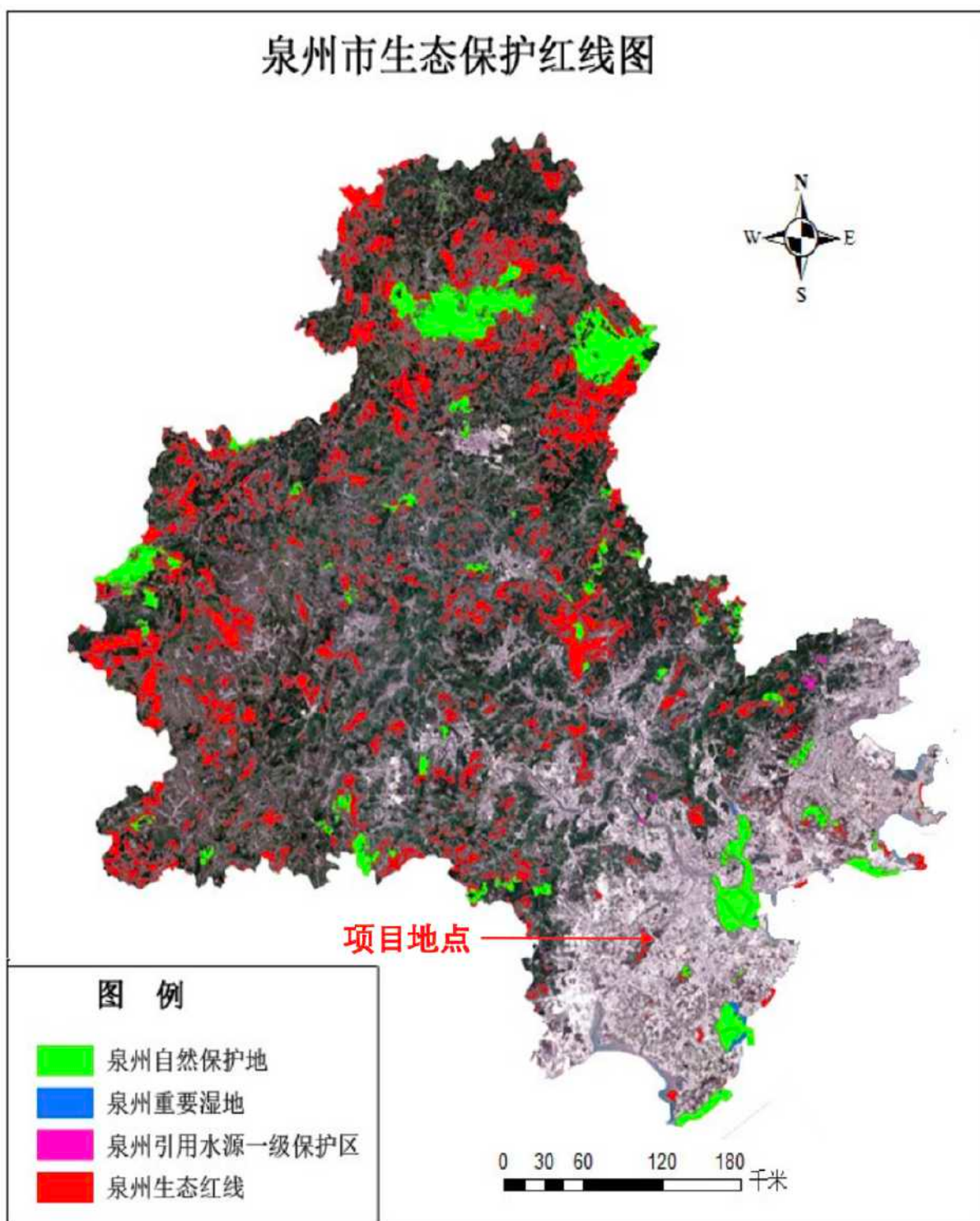


图 1-1 项目与泉州市生态保护红线位置示意图

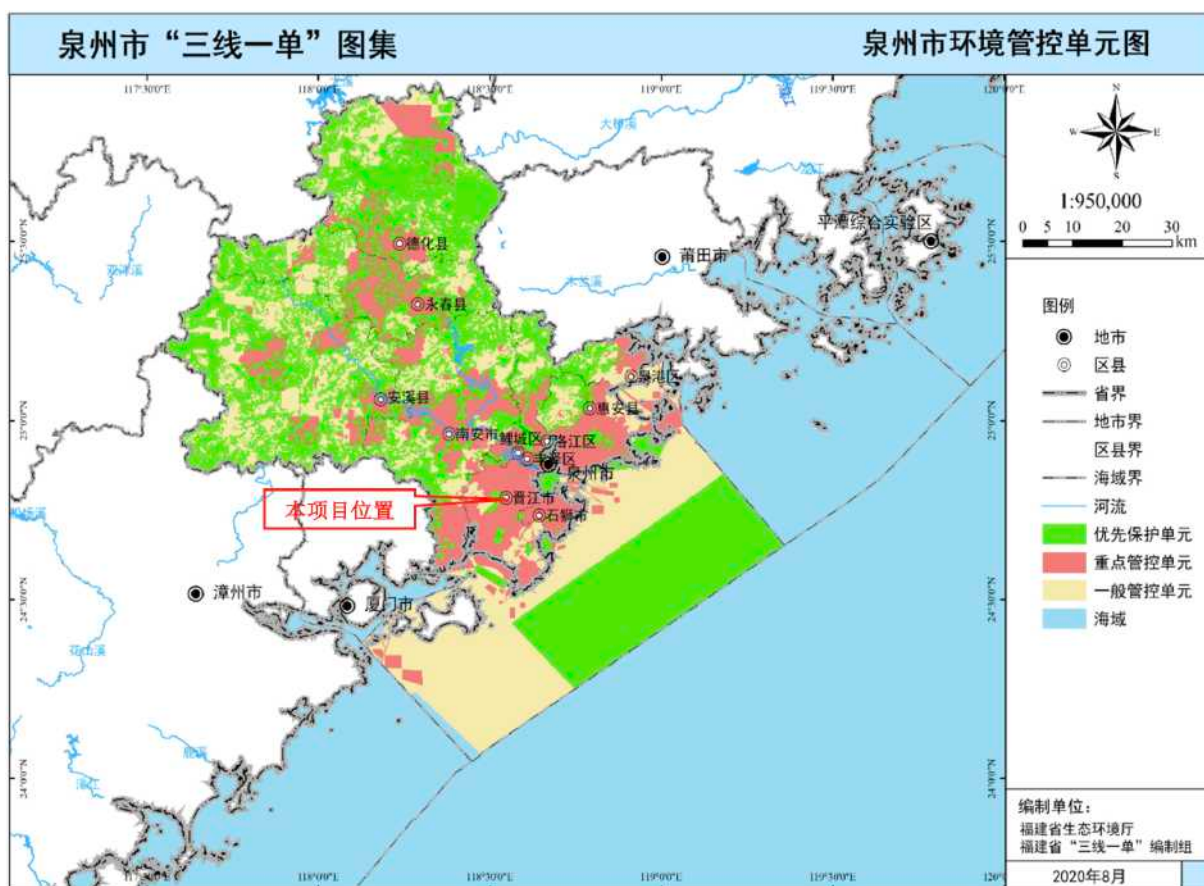


图 1-2 本项目在泉州市环境管控单元位置示意图



图 1-3 本项目所属管控单元查询结果截图

表 1-5 本项目与环境管控单元准入要求符合性分析

环境管控单元编码	环境管控单元名称	管控单元类别	管控要求		项目对应情况	符合性分析
ZH35058220007	晋江市重点管控单元 4	重点管控单元	空间布局约束	1.严禁在人口聚集区新建涉及化学品和危险废物排放的项目，城市建成区内现有有色等污染较重的企业应有序搬迁改造或依法关闭。城市主城区内现有有色等重污染企业环保搬迁项目须实行产能等量或减量置换。 2.新建高 VOCs 排放的项目必须进入工业园区。	1.本项目不属于危险化学品生产企业、有色等污染较重的企业。 2.项目为核技术利用项目，不涉及高 VOCs 排放。	符合
			污染物排放管控	1.在城市建成区新建大气污染型项目，二氧化硫、氮氧化物排放量应实行 1.5 倍削减替代。 2.加快单元内污水管网的建设工程，确保工业企业的所有废（污）水都纳管集中处理，鼓励企业中水回用。 3.制革、合成革与人造革建设项目新增污染物排放量，应实行化学需氧量不低于 1.2 倍、氨氮不低于 1.5 倍的削减替代。	1.项目为核技术利用项目，不涉及二氧化硫、氮氧化物大量排放，不属于大气污染型项目。 2.项目所在单元设有污水管网，项目产生的少量放射性废水经统一收集暂存后，经检测达标排放至示范中心污水管网，可确保所有废（污）水都纳管集中处理。 3.项目为核技术利用项目，不属于制革、合成革与人造革建设项目。	符合
			环境风险防控	单元内现有化学原料和化学制品制造业、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业等具有潜在土壤污染环境风险的企业，应建立风险管控制度，完善污染治理设施，储备应急物资。应定期开展环境污染治理设施运行情况巡查，严格监管拆除活动，在拆除生产设施设备、构筑物 and 污染治理设施活动时，要严格按照国家有关规定，事先制定残留污染物清理和安全处置方案。	项目企业不属于化学原料和化学制品制造业、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业等具有潜在土壤污染环境风险的企业。项目针对产生的少量放射性三废均设有污染治理设施/措施，设有辐射事故/事件应急预案，储备有应急物资，能够落实环境风险防控。	符合
			资源开发效率要求	高污染燃料禁燃区内，禁止使用高污染燃料，禁止新建、改建、扩建燃用高污染燃料的设施。	本项目为核技术利用项目，不涉及高污染燃料。	符合

1.2.5 周围环境概况

本项目建设地点位于福建省泉州市晋江市罗山街道社店社区晋江市医院西北角，地理位置见图 1-4，周围环境见图 1-5，总平图见图 1-6，示范中心内核技术利用项目所在各层的平面示意图见图 1-7 至图 1-10。

由图 1-6 可知，示范中心东侧主要为晋江市医院已建成的康复理疗中心、妇幼健康服务大楼、停车场等；东北侧为绿地（预留发展用地）、污物转运中心等；西南侧为示范中心主出入口、车道等；西侧为停车场、管理楼等；西北侧为停车场出入口。



图 1-4 本项目地理位置图

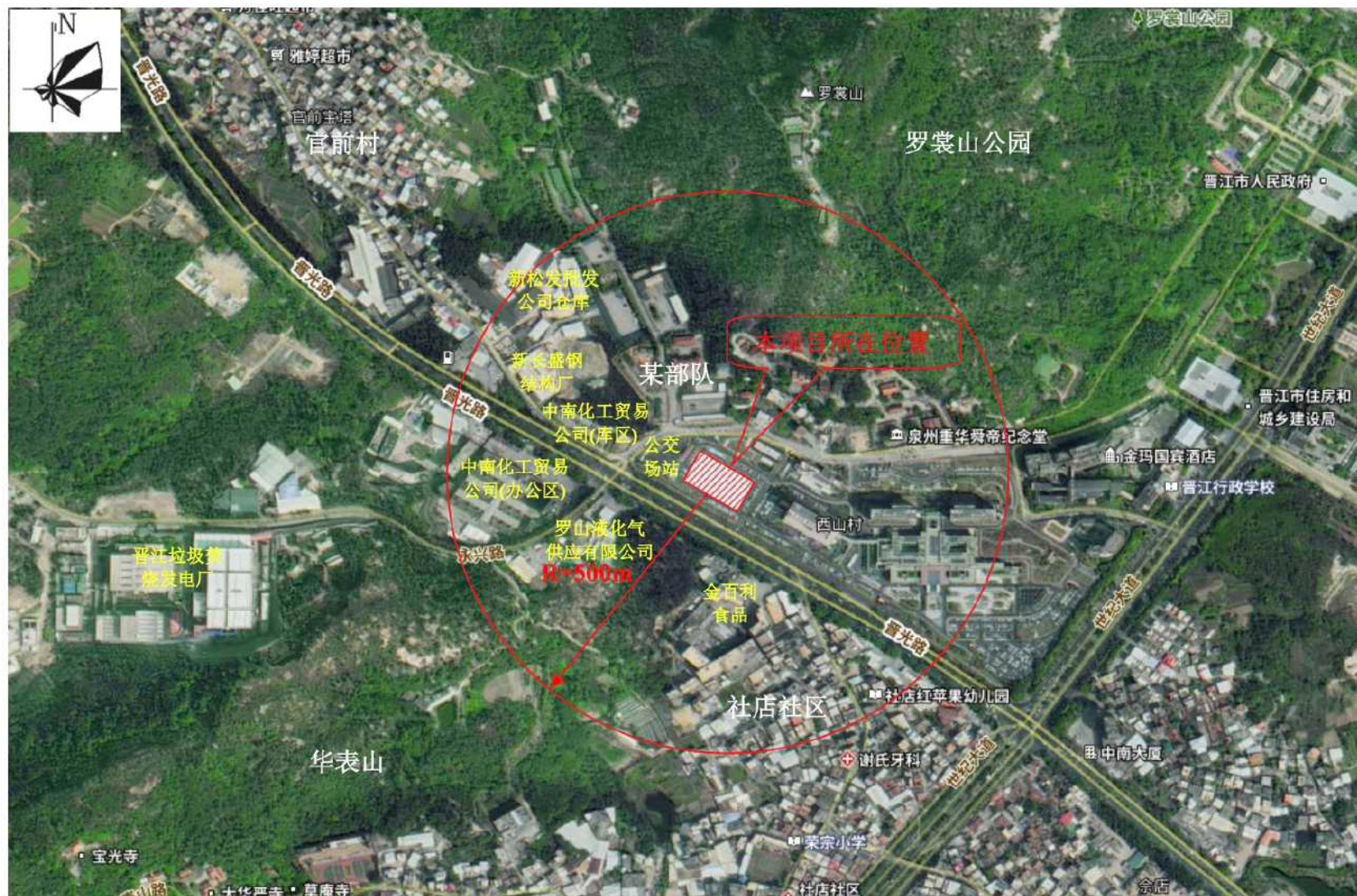


图 1-5 本项目周边环境图

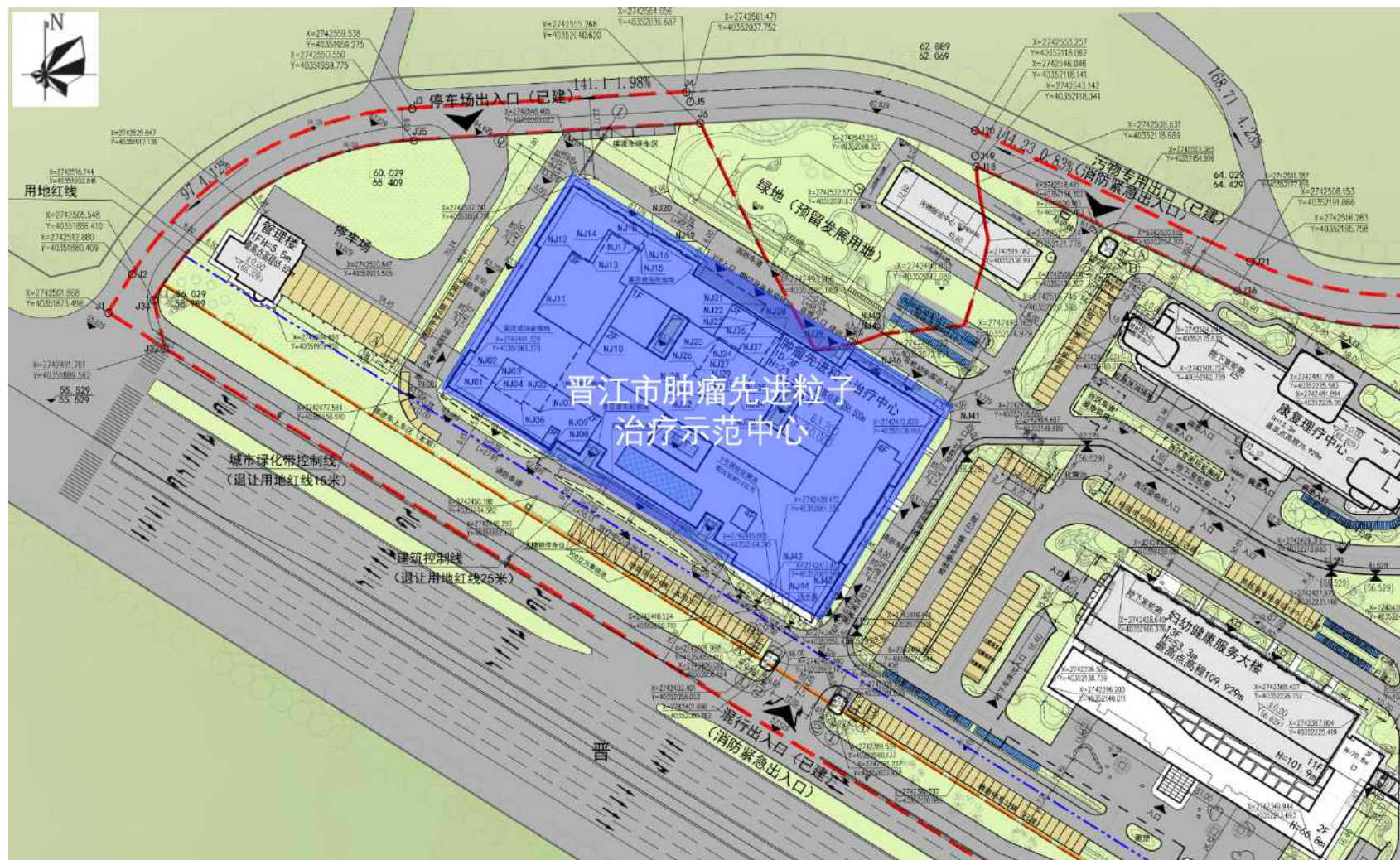


图 1-6 项目总平面图

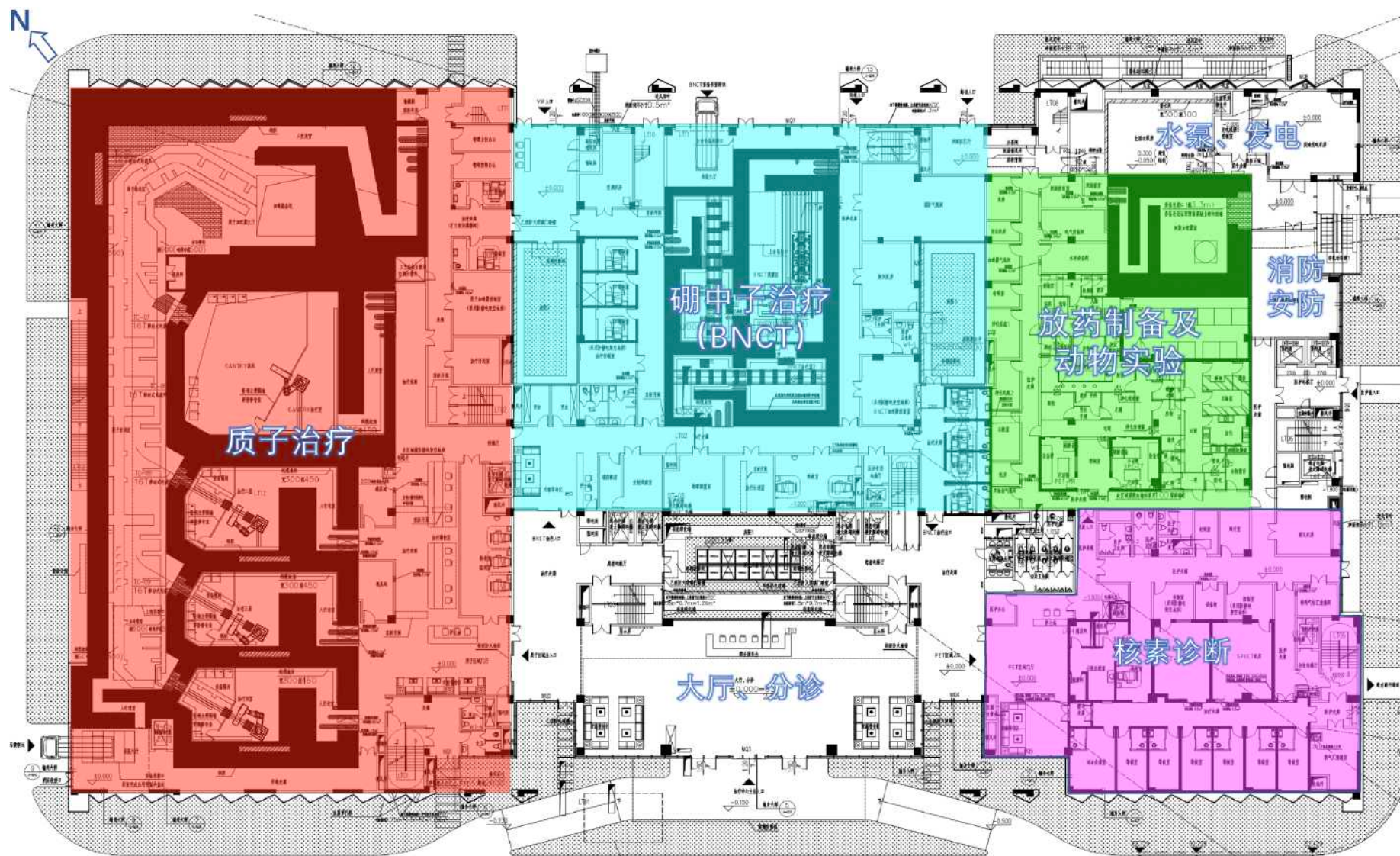


图 1-7 示范中心一层平面布局图

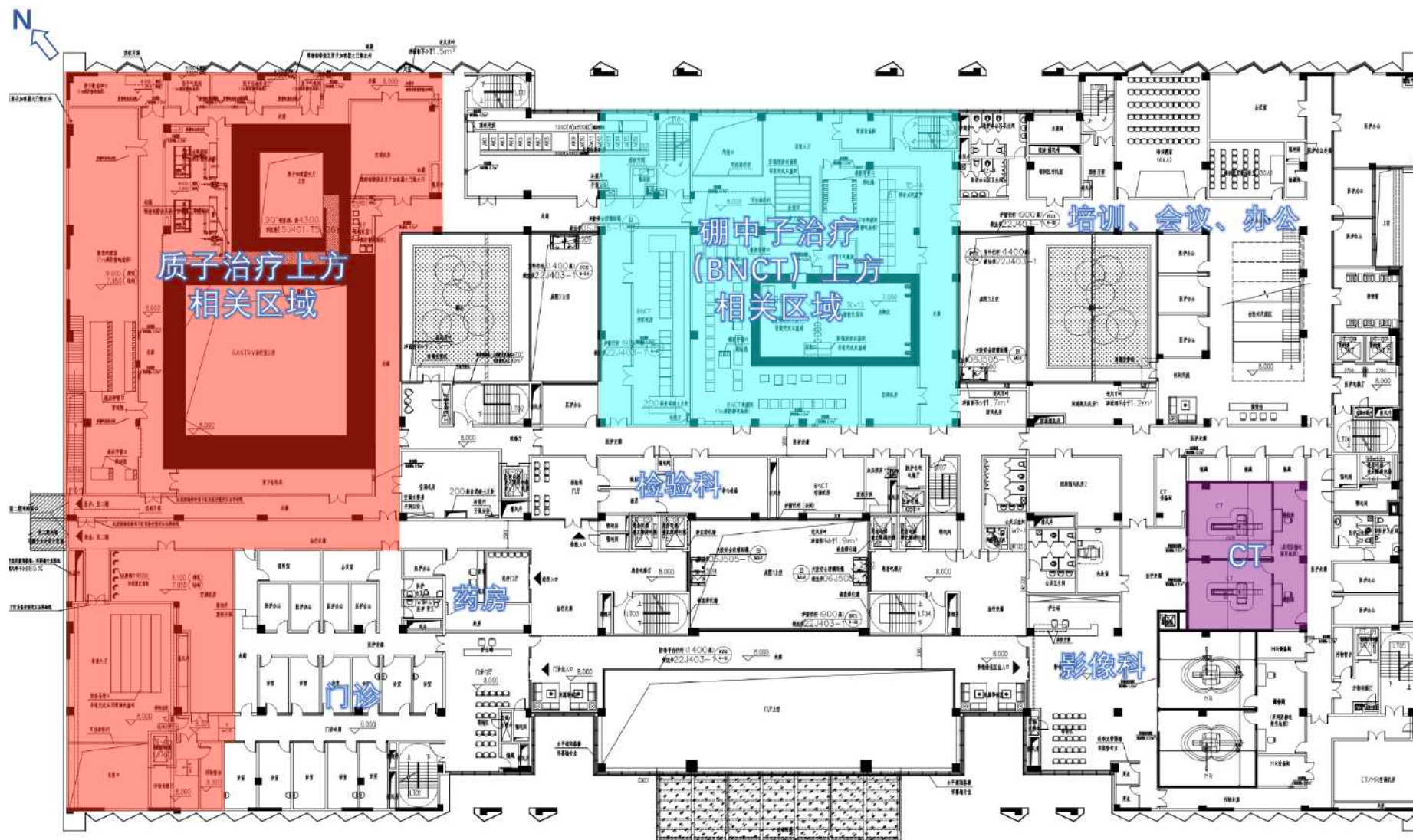


图 1-8 示范中心二层平面布局图

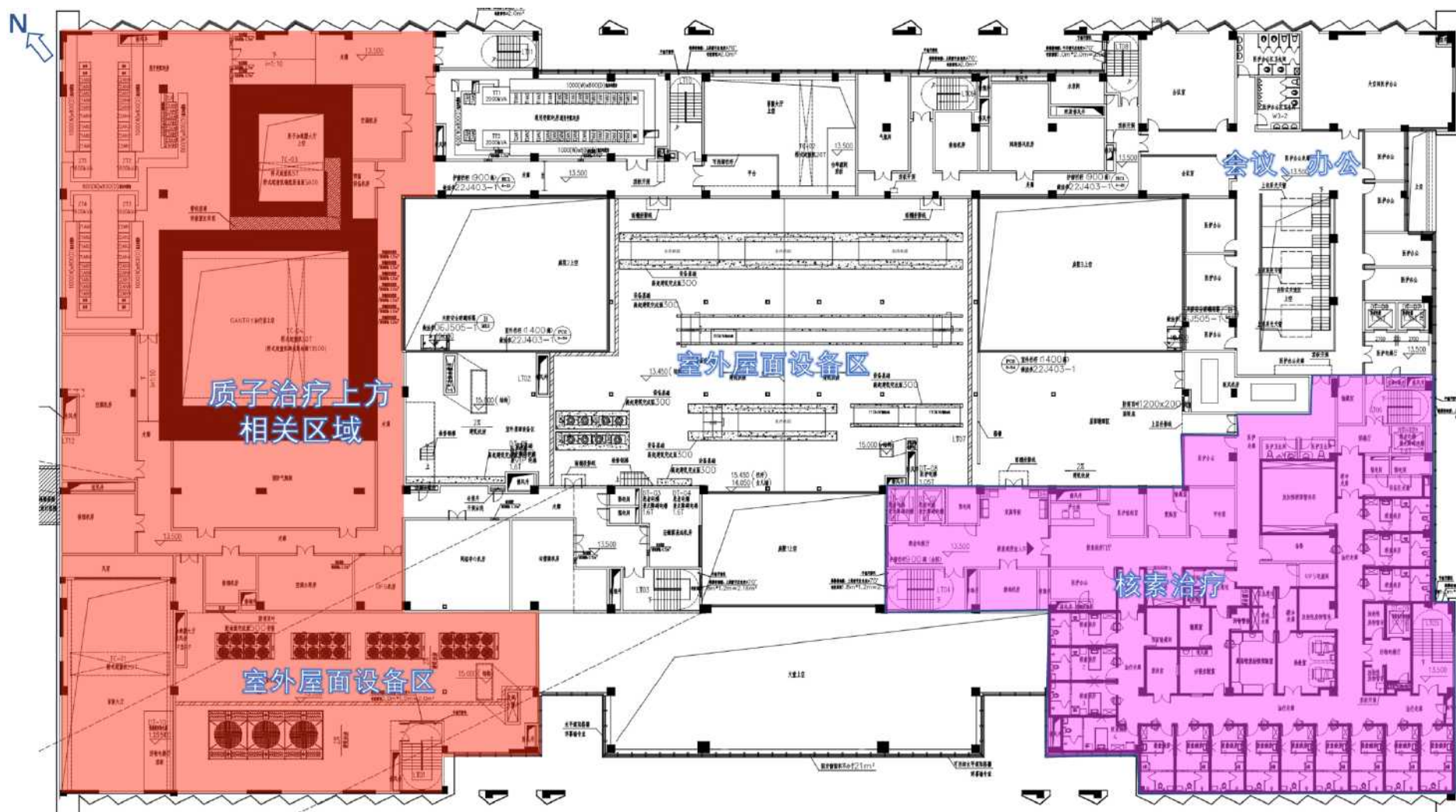


图 1-9 示范中心三层平面布局图

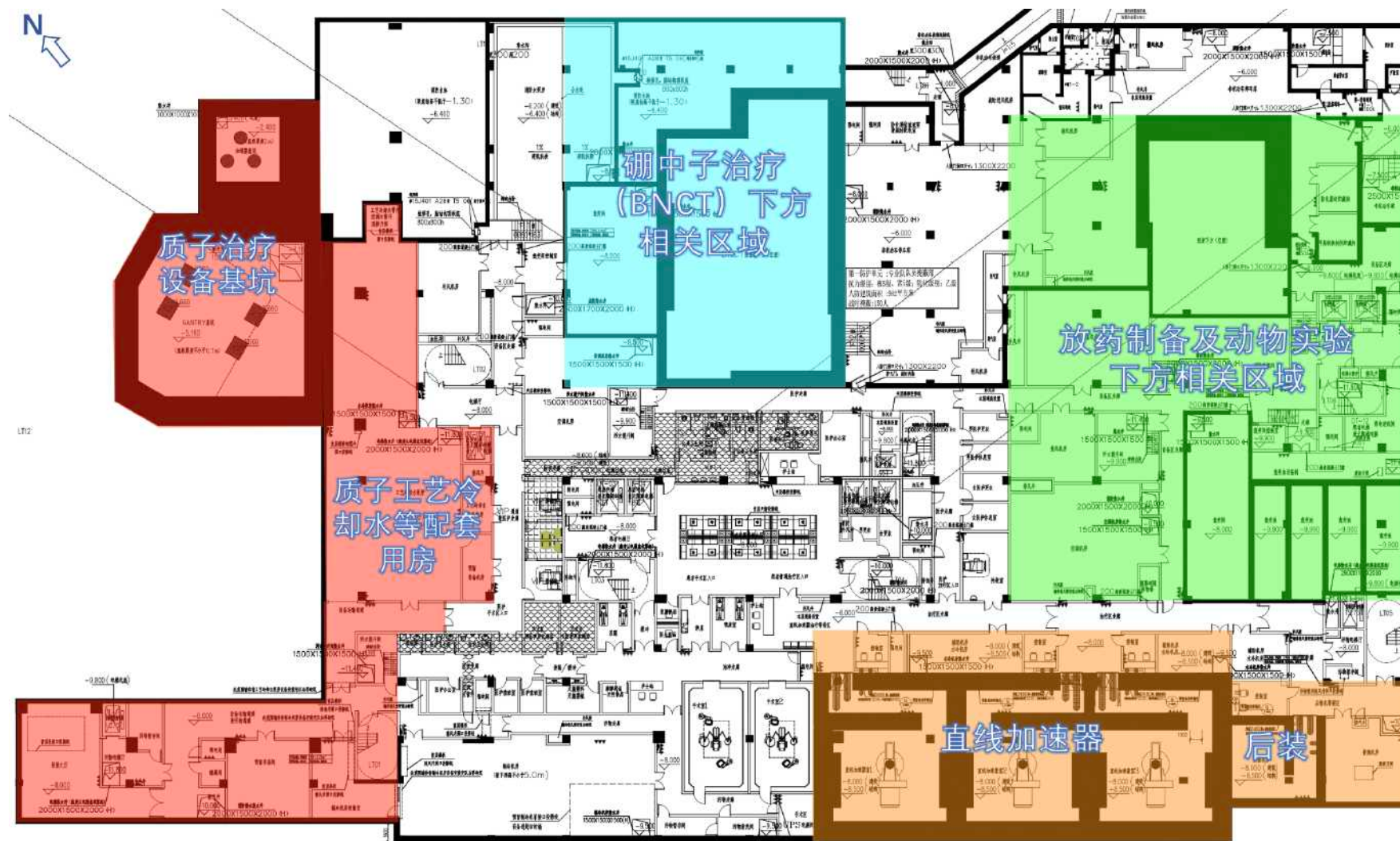


图 1-10 示范中心负一层平面布局图

1.2.6 核技术利用现状

本项目为建设单位首次申请开展的核技术利用建设项目。本项目建成后，将向生态环境主管部门申请辐射安全许可证。

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) 《关于发布放射源分类办法的公告》（国家环境保护总局公告2005年第62号，自2002年12月23日施行）；
- (8) 《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）；
- (9) 《放射性废物安全管理条例》（国务院令第612号，2012年3月1日施行）；

- (10) 《建设项目环境保护管理条例》（国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日施行）；
- (11) 《建设项目环境影响评价分类管理名录》（生态环境部令 第 16 号，2021 年 1 月 1 日施行）；
- (12) 《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（2023 年 12 月 27 日国家发展改革委令第 7 号公布）；
- (13) 《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）；
- (14) 《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）；
- (15) 《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 日施行）；
- (16) 《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）；
- (17) 《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（国家核安全局，辐射函[2023]20 号，2023 年 9 月 13 日）；
- (18) 《泉州市人民政府关于实施“三线一单”生态环境分区管控的通知》（泉政文〔2021〕50 号，泉州市人民政府，2021 年 11 月 2 日。

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) 《粒子加速器辐射安全与防护规定》（GB 5172—2025 代替 GB 5172—85，2026 年 5 月 1 日起实施）；
- (3) 《操作开放型放射性物质的辐射防护规定》（GB11930-2010）；
- (4) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；

- (5) 《环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）；
- (6) 《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）；
- (7) 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）；
- (8) 《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）；
- (9) 《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；
- (10) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；
- (11) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ 1326-2023）；
- (12) 《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）；
- (13) 《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）；
- (14) 《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）；
- (15) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；
- (16) 《职业性内照射个人监测规范》（GBZ 129-2016）；
- (17) 《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）；
- (18) 《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）；
- (19) 《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）；
- (20) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分： γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）；
- (21) 《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）。

1.3.3 其它文件、资料

- (1) NCRP. Report NO.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP,2005.
- (2) NCRP. Report NO.151. Structural shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma- Ray Radiotherapy facilities. NCRP,2005.
- (3) IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001.
- (4) 李德平，潘自强主编.辐射防护手册 第1分册 辐射源与屏蔽[M].北京：原子能出版社.1987.
- (5) 李德平，潘自强主编.辐射防护手册 第3分册 辐射安全[M].北京：原子能出版社.1990.
- (6) 方杰主编.辐射防护导论[M].北京：原子能出版社.1991.
- (7) 夏益华主编.高等电离辐射防护教程[M].哈尔滨工程大学出版社. 2010 年.
- (8) 《晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心环境影响报告表（污染影响类）》，2024 年 12 月；
- (9) 《泉州市生态环境局关于晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心环境影响报告表的批复》，泉晋环评〔2025〕表 17 号，2025 年 1 月 20 日；
- (10) 建设单位提供的与本项目相关的设计资料等其他技术资料。

1.4 评价标准

1.4.1 剂量限值 and 剂量约束值

1.4.1.1 剂量限值

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

(1) 职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

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

2) 任何一年中的有效剂量，50mSv。

（2）公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

1) 年有效剂量，1mSv；

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

1.4.1.2 剂量约束值

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 1-6HJ 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》 (HJ 1188-2021)	一般情况下，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。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）及《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020），本项目放射治疗、放射诊断辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平列于表 1-7。

表 1-7 本项目放射治疗、放射诊断辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

装置名称	辐射工作场所位置描述		剂量率控制水平， $\mu\text{Sv/h}$
		居留因子 $T > 1/2$	≤ 2.5

质子治疗系统、 硼中子俘获治疗 装置、直线加速 器、回旋加速 器、后装治疗机	机房四周屏蔽墙体、入口防护 门、机房顶板外表面 30cm 处	居留因子 $T \leq 1/2$	≤ 10
	机房底板外表面与土壤交界处*		$\leq 5 \times 10^3$
X 射线球管、CT 机	机房的四周屏蔽墙、机房顶部、底板和防护门外		≤ 2.5

注：*根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 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”作为放射治疗工作场所底板外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

本项目不同场所的居留因子执行《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）附录 A 表 A.1 中的规定：

表 1-8 不同场所的居留因子

场所	居留因子（T）		示例
	典型值	范围	
全居留	1	1	管理人员或职员办公室、治疗计划区、治疗控制室、护士站、咨询台、有人护理的候诊室以及周边建筑物中的驻留区域
部分居留	1/4	1/2~1/5	1/2：相邻的治疗室、与屏蔽室相邻的病人检查室 1/5：走廊、雇员休息室、职员休息室
偶然居留	1/16	1/8~1/40	1/8：各治疗室门 1/20：公厕、自动售货区、储藏室、设有座椅的户外区域、无人护理的候诊室、病人滞留区域、屋顶、门岗室 1/40：仅有来往行人车辆的户外区域、无人看管的停车场、车辆自动卸货/卸客区域、楼梯、无人看管的电梯

本项目非密封放射性物质工作场所屏蔽体外剂量率按 HJ 1188-2021 的有关规定执行：

“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 $\mu\text{Sv/h}$ ，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 $\mu\text{Sv/h}$ 。”

“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 $\mu\text{Sv/h}$ ，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 $\mu\text{Sv/h}$ 。”

“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 $\mu\text{Sv/h}$ 。”

根据《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（国家核安全局，辐射函[2023]20号，2023年9月13日），HJ 1188-2021 第 6.1.5 节的规定具体含义为：

1.控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子 $\geq 1/2$ ），周围剂量当量率应小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。

2.控制区内工作人员较少停留或无需到达的场所（人员居留因子 $< 1/2$ ），如给药/注射室防护门外、给药后患者候诊室防护门外、核素治疗住院病房防护门外以及核医学科患者走廊等位置，周围剂量当量率应小于 10 $\mu\text{Sv/h}$ 。

表 1-9 本项目非密封放射性物质工作场所剂量率控制水平

工作场所	区域	周围剂量当量率控制水平
非密封放射性物质工作场所	控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处（人员居留因子 $\geq 1/2$ ）	$< 2.5\mu\text{Sv/h}$
	屏蔽墙外人员偶尔居留的设备间等区域（人员居留因子 $< 1/2$ ）	$< 10\mu\text{Sv/h}$
	放射性药物分装的箱体、通风柜、注射窗等设备外表面 30cm 处人员操作位	$< 2.5\mu\text{Sv/h}$
	放射性药物分装箱体非正对人员操作位表面	$< 25\mu\text{Sv/h}$
	固体放射性废物收集桶外表面 30cm 处	$< 2.5\mu\text{Sv/h}$

1.4.3 工作场所放射性表面污染控制水平

本项目非密封放射性物质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 1-10。

表 1-10 非密封放射性物质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 非密封放射性物质工作场所分级

根据 GB18871-2002 附录 C 中表 C1，应按表 1-11 将非密封源工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级。放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量（Bq）与该核素毒性组别修正因子的积除以与操作方式有关的修正因子所得的商。

表 1-11 非密封源工作场所的分级

级	日等效最大操作量/Bq
甲	$>4 \times 10^9$
乙	$2 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$
丙	豁免活度值以上 $\sim 2 \times 10^7$

根据《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函〔2016〕430 号），常见的放射性药品生产、使用场所日等效操作量核算中操作因子的选取：

- （1）利用钼锝发生器淋洗 Tc-99m 放射性药物时，Mo-99 的操作视为贮存；
- （2）放射性药品生产中，分装、标记等活动视为“简单操作”；
- （3）医疗机构使用 F-18、Tc-99m 相关活动视为“很简单的操作”，使用 I-131 相关活动视为“简单操作”。

1.4.5 核医学科患者出院的管理要求

核医学科接受 ^{131}I 治疗患者出院的管理要求按《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）7.2.1 小节的规定执行，距离患者体表 1m 处的周围剂量当量率不大于 $25\mu\text{Sv/h}$ 方可出院。

1.4.6 放射性三废控制要求

1.4.6.1 放射性废气控制要求

1.4.6.1.1 放射治疗机房放射性废气控制要求

本项目放射治疗机房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，本项目放射治疗机房放射性废气的管理还按照 GBZ 121-2020 执行，具体如下：

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

1.4.6.1.2 核医学等非密封放射性物质工作场所放射性废气控制要求

本项目核医学等非密封放射性物质工作场所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。”

根据《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（国家核安全局，辐射函[2023]20 号，2023 年 9 月 13 日），关于独立通风要求，核医学标准第 6.3.4 节规定，手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统。单独的排风系统意为手套箱、通风橱等设备的排风管道在汇入“主排风管道前”的部分，应独立设置，防止发生气体回流和交叉污染。经过滤后的气体汇入到一个主管道中排放不违反标准要求。

1.4.6.2 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、硼中子俘获治疗装置的活化冷却水以及放药制备及动物实验、核素诊断、核素治疗场所的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 1-12），方可排放。

表 1-12 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，活化冷却水需同时满足 GB 18871-2002 中的豁免水平方可排放。根据 GB 18871-2002，相关核素的豁免水平列于表 1-13。

表 1-13 活化冷却水中相关核素的豁免水平

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

1.4.6.2.1 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。”

1.4.6.2.2 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：

a) 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；

b) 所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（含碘-131 核素的暂存超过 180 天），监测结果经审管部门认可后，按照 GB18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10Bq/L。

根据《关于核医学标准相关条款咨询的复函》（国家核安全局，辐射函[2023]20 号，2023 年 9 月 13 日），关于槽式衰变池中含碘-131 放射性废水排放，含碘-131 放射性废水可按照下列任意一种方式进行排放：

（一）根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》第 8.6.2 条规定，经监管部门确认单次排入普通下水道的废水中碘-131 活度不超过 1ALlmin（9E+5 贝可），每月排放的废水中碘-131 总活度不超过 10ALlmin（9E+6 贝可）。

（二）暂存 180 天后，衰变池废水可以直接排放。

（三）暂存不满 180 天但监测结果表明碘-131 活度浓度已降至不高于 10 贝可/升水平，也可直接排放。医院应做好相关排放记录。”

1.4.6.3 放射性固体废物控制要求

1.4.6.3.1 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体废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。

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

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

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

表 1-14 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。

1.4.6.3.2 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/cm²、 β 表面污染小于 0.8 Bq/cm² 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。”

1.4.7 其他标准

1.4.7.1 X 射线设备机房使用面积、单边长度要求

《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中对 X 射线设备机房使用面积、单边长度的要求列于表 1-15。

表 1-15 X 射线设备机房（照射室）使用面积、单边长度要求

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
双管头 X 射线设备、CT 机	30	4.5
单管头 X 射线设备	20	3.5

1.4.7.2 X 射线设备机房屏蔽防护铅当量厚度要求

《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中对 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求列于表 1-16。

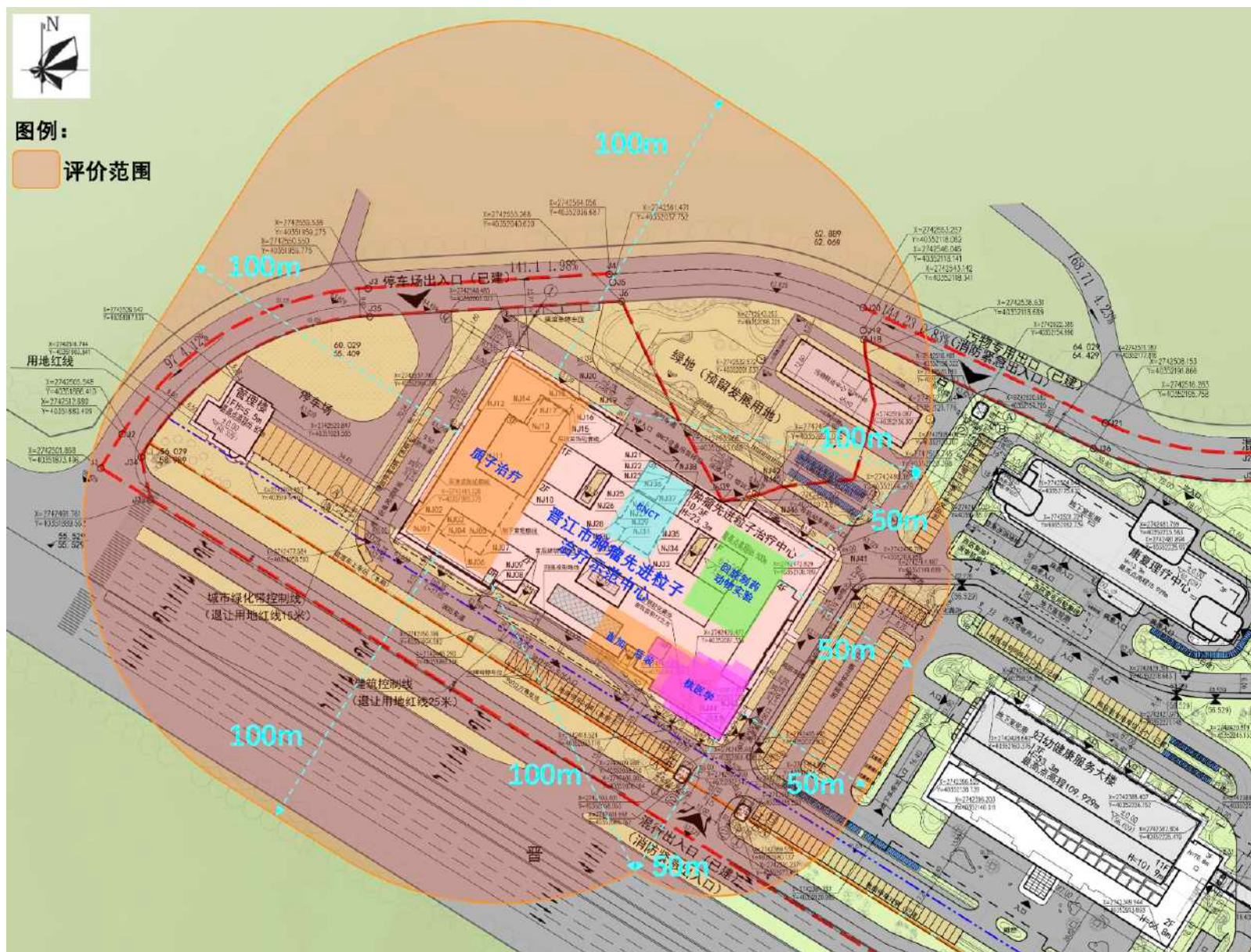
表 1-16 X 射线设备机房屏蔽防护铅当量厚度要求

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
标称 125kV 以上的摄影机房	3.0	2.0
CT 机	2.5	

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

本项目的核技术利用建设内容包括：使用Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类射线装置，使用Ⅲ类放射源，乙级非密封放射性物质工作场所。根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）相关规定，本项目质子治疗系统电离辐射环境影响评价范围取质子治疗系统辐射工作场所屏蔽体向外 100m 的范围，其余辐射工作场所评价范围取屏蔽体外 50m 的范围，见图 1-11。



1.5.2 环境保护目标

本项目电离辐射评价范围内无自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象，无居民小区、学校等环境敏感点。评价范围内的保护目标为评价范围内的辐射工作人员和公众，公众主要包括示范中心其他医护人员、陪同家属、院内和附近道路的流动人员，具体如下。

表 1-17 本项目质子治疗系统周围环境及保护目标情况

楼层	方位	距离/m	周围环境情况	类型	规模
一层	控制区内	/	质子加速器大厅、束流传输线、旋转束治疗室、固定束治疗室	职业	35 人
	东南	0~10	质子加速器控制室、治疗操作区、办公室、治疗计划室、护士站、模具间等		
	西南	0~6	污物走廊、吊装大厅、货梯兼污物电梯等		
二层	东南	0~8	空调机房、质子压缩机室、走廊等		
	西南	0~3	质子备件库		
	西北	0~15	走廊、能选电源室、质子功率源间等		
	东北	0~5	质子数据中心、质子气瓶间、质子压缩机室、质子气瓶间、走廊等		
三层	东南	0~5	空调机房		
	西南	0~31	消防气瓶间、走廊、排烟机房、空调水泵房、UPS 机房、室外屋面设备区等		
	西北	0~15	走廊、空调机房、质子变配电房		
	东北	0~5	走廊		
一层	东南	10~90	庭院、硼中子俘获治疗区、放药制备及动物实验区等	公众	约 50 人
		90~100	示范中心内部室外区域、道路		流动人员
	西南	6~40	示范中心内部室外区域、道路		流动人员
		40~100	晋光路、人行道等		流动人员
	西北	0~100	示范中心内部绿化带、车道、地面停车场、管理楼等		约 50 人
	东北	0~30	示范中心内部室外区域、道路		流动人员
		30~100	道路、人行道、污物转运中心等		流动人员
二层	东南	0~100	走廊、检验科、医护办公室、培训室、会议室、影像科等		约 100 人
	西南	0~100	门诊、药房、办公室等		约 100 人
三层	东南	0~100	室外屋面设备区、排烟机房、走廊、办公室、会议室、核素治疗病房等		约 100 人
	西南	0~100	网络中心机房、基站机房等		约 10 人
负一层	东南	0~100	补风机房、走廊、空调机房、非机动车停车库、贮藏室、直加机房、后装治疗机房等		约 100 人
	西南	0~100	预留设备间、制冷机房控制室、制冷机房、手术区等		约 100 人

表 1-18 本项目其余核技术利用建设内容的周围环境及保护目标情况

场所名称	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
负一层 直线加速器室 1~3	内部	/	直线加速器室 1~3	职业	22
	北	0~23	控制室、治疗区走廊、辅助机房、水冷机房、强电间、抢救室、医护走廊、医护更衣、医护休息室等		
	东	0~15	后装机房及其控制室、预留设备间等		
	北	0~50	楼梯、电梯、走廊、空调机房、排风机房、补风机房、预留设备机房、非机动车停车库等	公众	约 50
	东	0~15	走廊、后装机等候区、楼梯等	公众	约 5
		15~50	土层	/	/
	西	0~50	手术室 2、手术室 1、手术区、污物走廊、护士站、医护值班室、办公室、制冷机房、预留设备间、楼梯等	公众	约 20
	南	0~50	土层	/	/
	上	相邻	车道、家属等候区、核素诊断区入口及门厅、运动负荷室、等候室、患者走廊等	公众	约 20
	下	相邻	土层	/	/
负一层 后装机房	内部	/	后装机房	职业	22
	北	0~10	控制室、辅助机房、水冷机房、治疗走廊等		
	东	0~7	预留设备间		
	西	0~37	直线加速器室 3~1		
	北	0~50	治疗区走廊、衰变池设备间、强电间、患者电梯、楼梯等	公众	约 20
	东	7~50	土层	/	/
	西	37~50	手术室 2、手术室 1、手术区、污物走廊等	公众	约 10
	南	0~50	土层	/	/
	上	相邻	核素诊断区等候室、留观室	公众	约 5
	下	相邻	土层	/	/
一层 硼中子治疗区	内部	/	BNCT 装置区、BNCT 治疗室 1、BNCT 治疗室 2 等	职业	15
	东	0~14	医护走廊、BNCT 加速器控制室、治疗走廊、留观室、新风机房等		
	南	0~8	治疗走廊、护士站、硼药配药、注射观察室、物理测量室、治疗计划室、抢救室、医护电梯、楼梯等		
	西	0~8	走廊、治疗控制室等		
	北	0~5	吊装大厅、走廊等		
	上	相邻	BNCT 电源间、数据中心、气瓶间、变配电房、空调机房、吊装大厅等		
	下	相邻	空调机房、衰变间等		

	东	0~50	走廊、消防气瓶间、库房、空压机房、材料室、示教室、放药制备及动物实验区等	公众	约 20
	南	0~30	走廊、庭院、综合服务台、大厅、分诊等	公众	约 50
		30~50	车道、人行道等	公众	流动
	西	0~50	走廊、庭院、质子治疗区等	公众	约 20
	北	0~50	走廊、车道、人行道、绿地（预留发展用地）	公众	流动
一层 放药制备 及动物实 验区	内部	/	回旋加速器室、控制室、前室、电气设备间、水冷设备间、一更、二更、缓冲区、准备间、热室房间、质控室、实验室、小动物 PET-CT、小动物 SPECT 室、小动物 PET-MR 室、放化实验区等	职业	8
	东	0~10	柴油发电机房、走廊、消防兼安防控制室、楼梯、电梯等	公众	约 10
		10~50	车道、人行道、地面停车场等	公众	流动
	南	0~37	核素诊断区等	公众	约 30
		37~50	车道、人行道等	公众	流动
	西	0~50	走廊、庭院、BNCT 治疗区等	公众	约 30
	北	0~8	生活水泵房、走廊、控制室等	公众	约 5
		8~50	走廊、车道、人行道、绿地（预留发展用地）	公众	流动
	上	相邻	走廊、培训兼示教室、医护办公室、交流区、接待台、接待室、医护电梯厅、CT 机房、CT 设备间、储藏室等	公众	约 50
	下	相邻	预留设备机房、设备区走廊、排风机房等	公众	约 10
一层 核医学 诊断区	内部	/	分装注射室、储源间、急救室、固废间、PET-CT 机房、SPECT 机房、控制室、运动负荷室、等候室、留观室、患者走廊等	职业	
	东	0~50	人行道、车道、地面停车场等	公众	流动
	南	0~50	人行道、车道、门卫室等	公众	流动
	西	0~50	诊断区门厅、大厅、分诊、综合服务台、家属等候区等	公众	约 50
	北	0~50	放药制备及动物实验区	公众	约 10
	上	相邻	影像检查区门厅、MR 机房、操作间、MR 设备间、走廊、CT/MR 空调机房等	公众	约 10
	下	相邻	直线加速器室 3、后装机房、控制室、预留设备间、治疗区走廊等	公众	约 10
二层 CT 机房 1、2	内部	/	CT 机房	职业	6
	东	0~11	操作间、医护走廊、医护办公室等		
	南	0~17	MR 机房、MR 设备间、MR 操作间、污物走廊等	公众	约 10

	西	0~50	治疗走廊、抢救室、护士站、卫生间、患者电梯厅等	公众	约 30
	北	0~37	储藏室、接待台、交流区、医护办公室、培训兼示教室等	公众	约 50
	上	相邻	甲功室、走廊、放射性被服暂存库、备餐区等	公众	约 10
	下	相邻	材料室、走廊、控制室、设备间等	公众	约 10
三层 核素治疗 区	内部	/	储源室、分装给药室、服药室、高活性放射性实验室、急救室、核素病房、治疗走廊、放射性废物暂存间、放射性被服暂存库、甲功室、敷贴室等	职业	11
	西	0~50	设备用房、排烟机房、患者电梯厅、基站机房、运营商机房等	公众	约 20
	北	0~38	新风机房、屋面晾晒区、医护走廊、医护办公室区等	公众	约 50
	上	相邻	屋面、压缩空气机房、真空吸引机房、氧气汇流排室等	公众	约 2
	下	相邻	影像检查区	公众	约 30

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

本项目位于福建省泉州市晋江市罗山街道社店社区晋江市医院西北角。晋江市地处福建东南沿海，位于北纬 $24^{\circ}30'44''\sim 24^{\circ}54'21''$ ，东经 $118^{\circ}24'56''\sim 118^{\circ}41'10''$ 之间。东临台湾海峡，西和南安市接壤，南与金门隔海相望，北同鲤城区、丰泽区毗邻，东北与石狮相连，境内陆地面积 649 平方千米；三面临海，海岸线长 122 千米，海域面积 6345 平方千米。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

晋江市全境地形比较平缓，主要以平原和丘陵为主。平原主要位于东北部靠近泉州湾和西南部围头湾一带。丘陵则大小分布在各个地方，海拔均比较低。海拔较高的山峰有北部紫帽山和中部灵源山。晋江最高点在紫帽山，海拔 517.8 米。地貌成因属复式的地堑地垒构造。北东向主干断裂通过地段，地貌上表现为侵蚀一剥蚀的阶地及断块丘陵分布区。东侧的滨海断裂，东断块上升，地貌上表现为条带状低丘；西断块下降，地势较为低平，也成为条带状分布。北东向地貌条带，受活动性较大的北西向断裂的切割，在引张的应力作用下，形成断陷区，成为堆积地貌发育的空间，故较大的堆积地貌也呈北西走向。地堑多形成平原、台地，地垒形成丘陵或残丘。地势由西北向东南倾斜。由此地势向泉州湾、台湾海峡、围头澳方向下降，具有西北向东南海滨倾斜的趋势。地貌类型以台地、平原、丘陵为主，台地占市域面积 67.3%。

2.2.2 地质

晋江市大地构造属“闽东滨海加里东隆起带”（或称“闽东滨海台拱”）的一部分。中生代燕山运动剧烈，断裂构造发育是晋江市最主要的构造形式，北东向断裂多为压性兼具扭性，北西向断裂多为张性。新构造运动较强烈。断裂构造以北东向断裂为主，

自西北向东南主要的有：罗裳山—灵源山断裂（长乐—诏安断裂带主干断裂）、灵秀山断裂、深沪—金井断裂（长乐—诏安断裂带滨游所裂），北西向断裂也有明显的形迹，主要为紫山—乌石埔（亭店）断裂和社店断裂等。

晋江市的地层较为简单，除平原、河谷和海湾区的第四纪覆盖层外，有侏罗系上统的火山岩系及晚侏罗系的侵入岩。所见的岩石有南园组火成岩、燕山期花岗岩、变岩类的变粒岩、片岩、混合岩。

2.2.3 气候气象

晋江市属亚热带海洋性季风气候。盛行风向季节更替，季风气候显著，热量丰富，日照充足，气候暖热，夏长不酷热，冬短无严寒，秋温高于春温。年平均气温在 20~21℃，在地区分布上具有由东南沿海向西北内地略为递升的特点。常年最热月为 7 月，月平均气温 27.5~29.4℃；最冷月为 1 月，月平均气温 11.5~12.9℃。降水量累年平均 911.7~1231.0 毫米，降水强度以 7~8 月最大，11 月至翌年 1 月为最小。受季风影响，全年除夏季以西南风为主外，其他季节以东北风为主。夏季日照多，秋、冬日照少，累年平均日照≥6 小时的日数 198.4 天，占全年总日数的 54.4%。

2.2.4 水文

晋江市除晋江、九十九溪、九溪外，其他 26 条溪河均发源于市境的丘陵、台地，河源近流短，流程 5 千米以上的仅 9 条，且自成单元向东、向南独流入海。溪河总长度为 171.22 千米，河道浅窄，河网密度大。流域面积在 20 平方千米以上主要河流有九十九溪、梧垵溪、湖漏溪、阳溪、坝头溪和加塘溪等。

晋江流经市域北部，市境内长约 14 千米，流域面积约 70 平方千米，是山美~金鸡灌区的引水河道。平均流量为 163 秒立方米，径流系数为 68.6%。夏季水量最多，春季多于秋季，冬季最少。年最大洪峰流量出现于 7~9 月台风季节。

晋江市境内有龙湖、虺湖两大淡水湖。

晋江市地下水较贫乏，水质较好。除池店、陈埭等乡（镇）滨海地区矿化度大于 1 克/升的微咸半咸水外，其余都属矿化度小于 1 克/升的中性水。富孔隙潜水区分布于冲

积海积、风积海积和河谷平原，孔隙涌水量 40—100 吨/日、米，为地下水丰水区。中等孔隙潜水区，分布于部分河谷平原和一级台地区，孔隙涌水量 20—40 吨/日、米。弱孔隙裂隙潜水区分布于一、二级台地，孔隙涌水量上部小于 5 吨/日、米，下部为 5—25 吨/日、米，系地下水缺水區。弱裂隙潜水区分布于丘陵、三级台地，孔隙涌水量 0—10 吨/日、米，系地下水严重缺水區。晋江市地下水在池店、陈埭、蚶江至深沪湾一带及滨海平原，水位埋深为 0.3—2.2 米，属中等丰水区；台地、丘陵地带地下水水位埋深在 2~4 米，最深达 6.5 米，属缺水區。

2.2.5 土壤

晋江市土壤分为 6 个土类、14 个亚类、27 个土属、57 个土种。砖红壤性红壤分布面积最大，遍布于全县丘陵、台地。红壤土类分布于紫帽山及高丘地带，常见为酸性岩红壤。潮土多分布于溪河两岸及河汊发育的平原地带，是由冲积物发育而成的土类。风沙土俗称“赤沙土”，分布于滨海地区，是非地带性的隐域型土壤。盐土分布于滨海潮间带及局部滨海平原地区。水稻土分布面积仅次于砖红壤性红壤，是境内最主要的农业土壤，多发育于冲积、海积以及坡积、残积地区。海拔 50 米以下为水稻土、潮土、风沙土、咸土。海拔 400 米以下为侵蚀赤红壤、粗骨性赤红壤、薄赤沙土等，海拔 400 米以上为酸性岩红壤。

2.3 社会环境概况

截至 2022 年 10 月，晋江市下辖 6 个街道、13 个镇。

2.3.1 人口数量

截至 2023 年，晋江市常住人口数为 208 万人，常住人口城镇化率为 70.21%。全年人口出生率为 6.71‰，死亡率为 6.40‰，自然增长率为 0.31‰。2023 年末户籍人口数中男性 64.00 万人，占 50.7%，女性 62.29 万人，占 49.3%，男女性别比例为 102.8:100。泉州市第七次全国人口普查中，在全市总人口中，0~15 岁人口占比 18.33%，16~59 岁人口占比 71.57%，60 岁及以上人口占比 10.10%，65 岁及以上人口占比 6.69%。

截止 2024 年 10 月，晋江市常住人口 250 万。

2.3.2 经济发展

晋江市以实体经济为支撑，加快建设现代化经济体系，锻造发展新优势。传统产业高新化、新兴产业集群化、现代服务业专业化，培育出 51 家上市企业、54 家省级以上“专精特新”、18 家制造业单项冠军、国家高新技术企业 647 家。晋江市经济总量长期占泉州市的 1/4，连续 28 年保持福建县域经济首位；在中国县域经济竞争力排名中也一直位居前列。围绕上市头部企业，晋江市形成了超 2000 亿的鞋服产业集群、超千亿的纺织产业集群，以及食品、建材两个超 500 亿产业集群。工业产值亿元以上的企业达 1159 家。

2023 年，晋江市实现地区生产总值 3363.50 亿元，总量分别占全省、泉州市的 6.2%和 27.6%。其中，第一产业增加值 22.88 亿元，第二产业增加值 1968.67 亿元，第三产业增加值 1371.95 亿元。三次产业增加值占地区生产总值的比重，第一产业为 0.7%，第二产业为 58.5%，第三产业为 40.8%。全年人均地区生产总值 161863 元，比上年增长 6.2%。

2.3.3 医疗卫生

截至 2023 年，晋江市共有医疗卫生机构 1206 家。三级公立医疗机构 3 家，二级公立医疗机构 7 家，其他镇卫生院 8 家，街道社区卫生服务中心 6 家，经济开发区卫生服务中心 1 家，第三医院 1 家，市疾控中心 1 家，卫生监督所 1 家，卫生进修学校 1 家，急救中心 1 家，市口腔医院 1 家。民营医疗机构 554 家，社区卫生服务站 109 家，村卫生所 512 家。编制床位 5488 张，实有床位 7778 张。各类卫技人员 9439 人，其中，执业（助理）医师 3849 人，注册护士 3676 人，药剂师 495 人，技师（含检验人员）564 人，卫生监督员 41 人，其他卫生技术人员 814 人。

2.3.4 交通

晋江市立足城市发展特点，注重各种交通运输方式的相互融合和立体衔接，围绕动车站建成快速疏解公路，围绕机场建成机场连接线，围绕港口建成横九线，逐步把

综合运输建设推到前端。截至 2022 年 9 月，晋江市拥有国家一类航空口岸、对台直航骨干机场（泉州晋江国际机场）、国家一类开放口岸深沪码头、对台贸易码头围头码头、福厦高铁（晋江客货运站）、沈海高速公路、泉三高速公路、福厦高速、晋长高速公路、324 国道等海陆空交通体系。

2.4 环境质量和辐射现状

2.4.1 环境天然放射性水平

根据《2022 年全国辐射环境质量报告》（生态环境部辐射环境监测技术中心，2023 年 7 月发布），福建省环境 γ 辐射剂量率监测结果见表 2-1。

表 2-1 2022 年福建省环境 γ 辐射剂量率监测结果，单位：nGy/h

监测项目	年均值范围
环境 γ 辐射剂量率连续自动监测（9 个自动站）	82.9~111.7
环境 γ 辐射剂量率累积监测（9 个点位）	97.0~131
备注：测量结果包含仪器对宇宙射线响应值。	

2.4.2 辐射环境质量现状调查与评价

2.4.2.1 监测内容

根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征，本次评价选取的监测对象如下：

电离辐射：环境 γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率；

土壤：铍-7、钠-22、总 β 放射性。

监测报告见附件 5。

2.4.2.2 取样监测点位

项目监测点位见图 2-1。点位位于项目场址周围，能够反映场址及邻近环境的辐射环境现状。因此，点位布设是符合相关标准规定的。

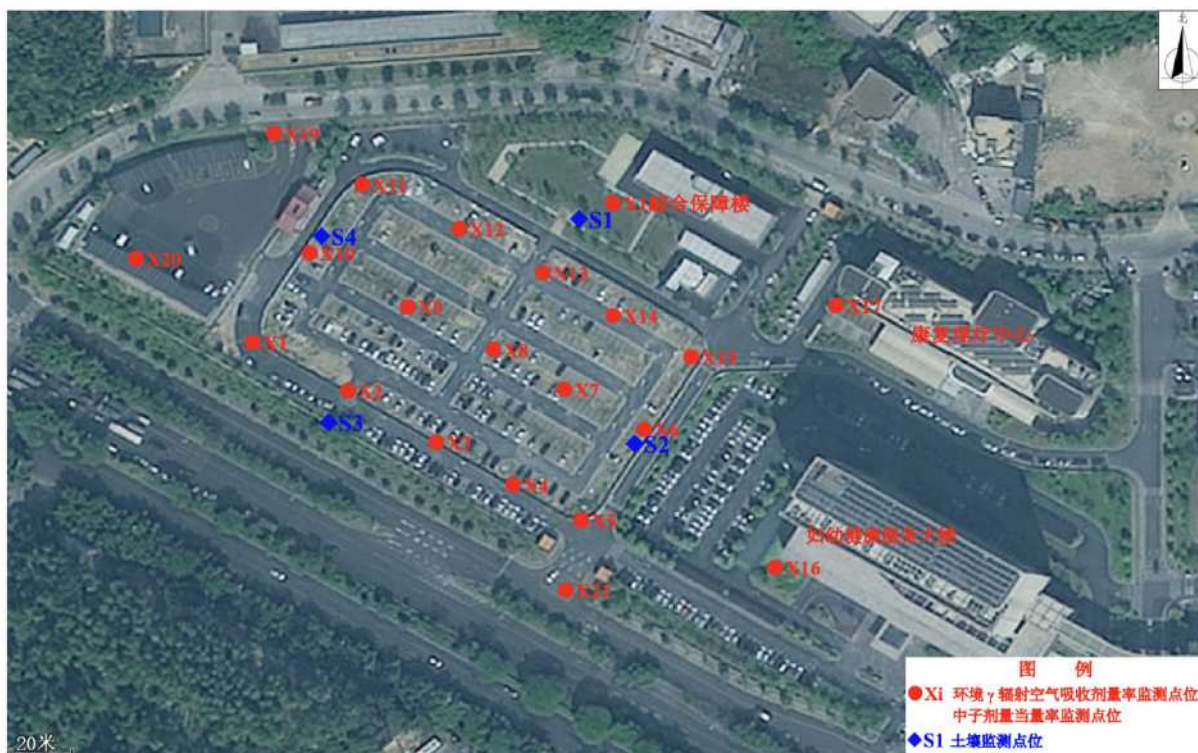


图 2-1 监测点位示意图

2.4.2.3 监测设备和监测依据

2.4.2.3.1 监测设备

本次使用的监测仪器设备详见表 2-2。现场监测时间为 2024 年 11 月 26 日，分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

表 2-2 监测仪器信息表

监测类别	监测项目		仪器名称及编号
电离辐射	1	环境 γ 辐射空气吸收剂量率	FH40G-X+FHZ672E-10 便携式 X、 γ 辐射周围剂量当量率仪 (F346) GM8910 手持气象仪 (F287)
	2	中子剂量当量率	AT1117M/ATKN 中子周围剂量当量仪 (F389)
土壤	3	铍-7	LBE5030 低本底宽能高纯锗 γ 谱仪 (F040)
	4	钠-22	
	5	总 β 放射性	LB770 流气式低本底 α 、 β 测量仪 (10 道) (F137)

2.4.2.3.2 监测依据

监测采用的标准依据见表 2-3。

表 2-3 监测依据

监测类别	监测项目		依据的标准（方法名称）及编号（含年号）	检出限	单位
电离辐射	1	环境 γ 辐射空气吸收剂量率	HJ 1157-2021 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》	1	nGy/h
	2	中子剂量当量率	GB/T14318-2019 《辐射防护仪器 中子周围剂量当量率仪》	0.1（测定下限）	μ Sv/h
土壤	3	铍-7	GB/T 16145-2022 《环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法》	/	Bq/g
	4	钠-22		/	Bq/g
	5	总 β 放射性	HJ 899-2017 《水质 总 β 放射性的测定 厚源法》	/	Bq/g

2.4.2.4 质量保证措施

本项目监测单位是通过计量认证资质的单位，监测程序严格按照质量管理体系文件的要求执行。现场检测、采样与实验室分析均使用相应的国家或行业标准。检测和实验室人员持有上岗合格证，每年参加国内比对和盲样考核。检测分析仪器均经过计量部门检定，使用前经过校准或检验，确保检测分析结果的可靠性和可溯源性。测量过程中的记录表格统一规范，记录清楚、详细、准确，需更正的按规范要求进行。检测报告进行三级审核，即测量人进行自审、校核人校核和批准人审核，确保结果的准确可靠。

- 1) 检测工作按质量管理文件规范化、程序化进行。
- 2) 质量负责人组织制定质量控制工作计划、监督检查质量控制计划等，并监督其实施，保证整个监测工作处于受控状态。
- 3) 所有参加检测的工作人员均经过专业技术培训，取得合格证后方可持证上岗。
- 4) 根据制定《比对和验证工作计划》，确定内部的检测比对的项目和人员，内部比对结果经技术负责人审核确认，确保各项检测工作的质量。
- 5) 积极组织参加实验室之间和外部全国性比对验证活动，确保检测技术的水平，全部比对验证的记录和资料按要求归档管理。
- 6) 检测仪器设备按要求定期检定、校准；两次检定或校准之间进行期间核查。
- 7) 内审员按照质量控制计划负责定期督促检查监测人员的检测工作，保证检测数据的准确性和可靠性。

- 8) 检测报告或总结报告经检测人员、质量负责人、技术负责人三级审核，确保报告质量。
- 9) 检测所用的检测、分析、测量方法按国标、行业标准选用；非标标准经技术确认后方能使用。
- 10) 档案管理员负责投标文件、合同、检测报告等相关文件的归档管理。

根据 HJ 61-2021《辐射环境监测技术规范》规定要求，并按制定的辐射监测方案，进行环境样品采集。采集的样品须有代表性，能够反映采样点的环境，采样量除保证分析测量用以外，应有足够的余量，以备复查，同时在样品采集过程中应严防交叉污染。

1) 样品运输

样品运输前，采样人员对样品进行分类密封包装。样品运输中有采样人员负责，防止样品破损和泄漏。

2) 样品接收

样品运输至实验室后，由样品受理员按规定的要求，对样品规格、数量等进行核实，并在《样品受理单》中加以记录，进行样品收样登记，同时编上样品唯一性标识号。

3) 样品流转

检测人员从样品受理员处领取《样品流转单》和经编号的样品，根据《样品流转单》上要求的监测项目进行样品监测工作。样品的流转和制备等所有过程中，都应做好标识的转移工作，以保证样品识别的唯一性。

4) 样品存放

样品监测完毕后，监测人员将监测后样品及多余样品交样品受理员保管，样品受理员将样品放置于专用放射性样品留样柜内，保存期为 3 个月。

5) 样品处置

样品放置满 3 个月后，样品统一由样品受理员视监测结果情况，送本单位的放射性废物暂存库暂存或统一集中处理。

2.4.2.5 监测结果

2.4.2.5.1 土壤

根据辐射环境本底监测项目内容委托监测，获得土壤样品中总 β 测量、Be-7、Na-22 的检测 results 见表 2-4。

表 2-4 土壤样品检测结果

监测点位	监测项目 采样深度	铍-7 (Bq/g)	钠-22 (Bq/g)	总 β 放射性 (Bq/g)
S1 拟建肿瘤先进粒子治疗中心 大楼用地东北侧边界土壤	0~0.2m	<0.0115	<0.00160	0.615
S2 拟建肿瘤先进粒子治疗中心 大楼用地东南侧边界土壤	0~0.2m	<0.00749	<0.00120	1.49
S3 拟建肿瘤先进粒子治疗中心 大楼用地西南侧边界土壤	0~0.2m	<0.0119	<0.000639	1.16
S4 拟建肿瘤先进粒子治疗中心 大楼用地西北侧边界土壤	0~0.2m	<0.00667	<0.000937	0.657

2.4.2.5.2 电离辐射

按照辐射环境本底监测项目委托监测，获得电离辐射监测结果见下表 2-9。

表 2-5 电离辐射监测结果

监测点位		环境 γ 辐射空气吸收剂量率 (nGy/h)	中子剂量当量率 (μ Sv/h)
		测量结果 $\pm$ 标准偏差	测量结果
拟建肿瘤先进粒子治疗中心大楼用地范围	X1	103 $\pm$ 2	<0.1
	X2	103 $\pm$ 1	<0.1
	X3	103 $\pm$ 2	<0.1
	X4	105 $\pm$ 1	<0.1
	X5	107 $\pm$ 1	<0.1
	X6	109 $\pm$ 2	<0.1
	X7	107 $\pm$ 3	<0.1
	X8	105 $\pm$ 2	<0.1
	X9	104 $\pm$ 2	<0.1
	X10	108 $\pm$ 2	<0.1
	X11	104 $\pm$ 2	<0.1
	X12	110 $\pm$ 1	<0.1
	X13	104 $\pm$ 2	<0.1
	X14	103 $\pm$ 2	<0.1
	X15	104 $\pm$ 2	<0.1
拟建肿瘤先进粒子治疗中心大楼东南侧妇幼健康服务 大楼	X16	106 $\pm$ 2	<0.1

监测点位		环境 γ 辐射空气吸收剂量率 (nGy/h)	中子剂量当量率 (μ Sv/h)
		测量结果 $\pm$ 标准偏差	测量结果
拟建肿瘤先进粒子治疗中心大楼东北侧康复理疗中心	X17	117 $\pm$ 2	<0.1
拟建肿瘤先进粒子治疗中心大楼北侧绿地（预留发展用地）	X18	104 $\pm$ 2	<0.1
拟建肿瘤先进粒子治疗中心大楼西北侧停车场出入口	X19	104 $\pm$ 2	<0.1
拟建肿瘤先进粒子治疗中心大楼西侧管理楼	X20	105 $\pm$ 2	<0.1
拟建肿瘤先进粒子治疗中心大楼南侧混行出入口	X21	112 $\pm$ 3	<0.1

注：①环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果已扣除仪器对宇宙射线的响应，响应值为 9.5nGy/h；本项目监测仪器使用 ^{137}Cs 作为校准参考辐射源，监测结果换算系数取 1.20Sv/Gy，将周围剂量当量转换为空气比释动能。

②“<X”表示中子剂量当量率测定值低于仪器测定下限，其中“X”表示仪器测定下限。

2.5 场址适宜性评价

本项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响射线装置稳定运行和安全使用的颠覆性因素。

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

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

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

晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心总占地面积 7317.32 平方米，总建筑面积 25958.27 平方米，地上三层、地下一层。

本项目核技术利用建设内容包括在质子治疗区使用 1 套质子治疗系统（I 类射线装置）和 8 个定位用 X 射线球管（III 类射线装置）；在硼中子治疗区使用 1 套硼中子俘获治疗装置（II 类射线装置）；在放疗科使用 3 台直线加速器（II 类射线装置）和 1 台后装治疗机（含一枚 Ir-192 放射源）；在影像科使用 2 台大孔径 CT（III 类射线装置）；在一层设 1 个用于放射性药物制备及动物实验的乙级非密封放射性物质工作场所（以下简称“非密封源场所”），在其中使用 1 台回旋加速器（II 类射线装置）、1 台小动物 PET/CT（III 类射线装置）和 1 台小动物 SPECT/CT（III 类射线装置）；在一层设 1 个用于核医学显像诊断的乙级非密封源场所，在其中使用 1 台 PET/CT（III 类射线装置）和 1 台 SPECT/CT（III 类射线装置）；在三层设 1 个用于核素治疗的乙级非密封源场所，含 16 间核素病房。各分项内容及所在楼层详见下表。

表 3-1 晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心的核技术利用建设内容一览表

序号	核技术利用建设内容	数量	类别	主要参数	区域	楼层
1	质子治疗系统	1	I 类射线装置	240MeV、500nA	质子治疗区	一层
2	定位用 X 射线球管	8	III类射线装置	150kV、1000mA		
3	硼中子俘获治疗装置	1	II类射线装置	2.6MeV、20mA	硼中子治疗区	
4	回旋加速器（制备 PET 放射性药物）	1	II类射线装置	16MeV、0.06mA	放药制备及动物实验区	
5	小动物 PET/CT	1	III类射线装置	80kV、0.7mA		
6	小动物 SPECT/CT	1	III类射线装置	80kV、0.7mA		
7	生产、使用非密封放射性物质	1	乙级非密封源场所	/		
8	PET/CT	1	III类射线装置	140kV、666mA	核素诊断区	
9	SPECT/CT	1	III类射线装置	140kV、440mA		
10	使用非密封放射性物质	1	乙级非密封源场所	/		
11	使用非密封放射性物质	1	乙级非密封源场所	/	核素治疗区	三层
12	直线加速器	3	II类射线装置	6MV、840Gy/h	放疗科	

序号	核技术利用建设内容	数量	类别	主要参数	区域	楼层
13	后装治疗机 (含一枚 Ir-192 放射源)	1	III类放射源	$3.7 \times 10^{11} \text{Bq}$ (10Ci)		负一层
14	大孔径 CT	2	III类射线装置	150kV、1300mA	影像科	二层

3.2 工艺设备及工作原理

3.2.1 质子治疗系统

3.2.1.1 装置组成

本项目质子治疗系统以超导等时性质子回旋加速器为束流源头，配置四个治疗终端，采用笔形束扫描的束流配送方式，通过能量选择系统调节束流能量以改变治疗深度，通过调整治疗头扫描磁铁磁场改变笔形束扫描位置。治疗系统根据每名患者的治疗计划逐点精确控制质子束流位置和剂量，实现对患者靶区的照射治疗。质子治疗系统主要参数见表 3-2。

表 3-2 质子治疗系统主要技术指标

项目	数值/方案
型号/系列	ProRays® PLUS
加速器主体	SC 系列质子回旋加速器
加速器最大引出能量	240 MeV
加速器最大引出流强	500 nA
加速频率	≤80 MHz
治疗时能量范围	70 ~ 220 MeV
治疗时流强范围	0 ~ 3 nA
最大照射野	30 cm × 40 cm（固定束流）
	25 cm × 25 cm（旋转束流）
年最大出束时间, h	1833.33（含治疗、QA）
图像引导系统	每间治疗室配套使用 2 个 X 射线球管，4 间治疗室共计 8 个。 单个球管最大管电压 150 kV，最大管电流 1000 mA。

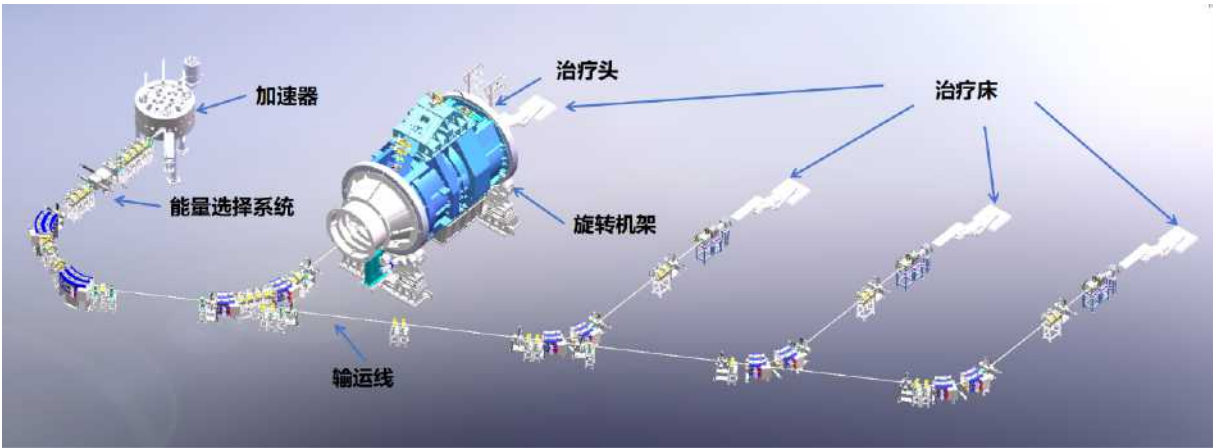


图 3-1 质子治疗系统结构示意图

3.2.1.2 工作原理

本项目质子治疗系统主要包括加速器子系统和治疗子系统两大部分。加速器子系统的主加速器系统通过高压对高纯度氢气进行电离，形成等离子体态的质子、电子混合体。在高频电场的作用下，等离子体态中的质子从主加速器系统中的离子源单元中被引出。质子束流进入电磁场耦合的回旋加速环境，在垂直稳态磁场下形成回旋路径，通过高频系统腔体的加速间隙进行加速。当质子最高能量达到 240MeV 时（此时质子速度约为 60% 的光速），利用主加速器系统的引出单元引出符合参数要求的质子束流到加速器主机外。随后束流进入能量选择系统，根据治疗子系统需要的能量（70 至 220MeV）对束流进行降能、选择和约束，并通过束流输运系统对束流进行偏转、聚焦后配送至治疗子系统的治疗头单元，通过治疗头进行束流的调制、射程调节、剂量监测，最终用于治疗癌症患者工作。

建设质子治疗系统是目前国内外恶性肿瘤和癌症医疗的主要发展方向。传统的质子治疗系统存在造价高、占地大、建设时间长等缺点。本项目质子治疗系统以 SC 系列质子回旋加速器为质子束流配送的“心脏”，采用高度一体化集成技术，配置有 360 度旋转机架、笔形束扫描治疗头、图像影像系统等先进质子治疗系统装备技术，具有整机性能高、系统体积紧凑和占地面积小的优势，助力国产自主创新研发高端医疗装备发展。

本项目 SC 系列质子回旋加速器是质子治疗系统的束流“源头”，是关键核心设备之一，可为质子治疗系统提供最高能量不超过 240MeV、流强不超过 500nA 的质子束流。SC 系列质子回旋加速器采用超导磁体励磁和低温制冷系统，从而缩小加速器整体尺寸和运行功耗。

本项目的主要设备结构包括：SC 系列质子回旋加速器、能量选择系统、束流输运系统、旋转机架系统、治疗头系统、图像引导系统、患者摆位系统、激光定位系统。

由 SC 系列质子回旋加速器引出的最高 240 MeV、最大 500 nA 质子束流，首先通过能量选择系统调节到 70 至 220 MeV 之间，再经过束流传输线传输至各个治疗室终端。对于旋转束治疗室，配置有大型旋转机架，以带动旋转束输运线的 360°转动，再

经由机架上的治疗头 X\Y 扫描磁铁扫描后，在治疗等中心点处形成大小为 25 cm×25 cm 治疗的射野。对于固定束治疗室，则直接通过固定机架上的治疗头 X\Y 扫描磁铁扫描后，在治疗等中心点处形成大小为 30 cm×40 cm 治疗的射野。在束流输运线上，配置有不同规格型号的二极磁铁、四极磁铁、校正磁铁、束诊元件以及电源、真空、水冷等配套元器件，供束流通过、监测使用。

3.2.1.2.1 加速器子系统

3.2.1.2.1.1 主加速器系统

本项目主加速器系统使用的加速器主机为 SC 系列质子回旋加速器，属于等时性回旋加速器，采用内离子源，通过固定磁场和交变电场将质子束流从离子源引出后不断回旋加速，其旋转半径随着能量的增加而不断增大，束流由 keV 级能量顺时针旋转最终加速到最高 240MeV，通过引出系统引出。

SC 系列质子回旋加速器由离子源单元、磁铁单元、射频单元、引出单元、束测单元和真空单元等组成，主要结构见图 3-2。各组成部分描述如下。

（1）离子源系统：使气体分子在电磁场作用下电离，可从中引出粒子束流，为加速器提供被加速的粒子。SC 系列质子回旋加速器采用内部冷阴极离子源。

（2）主磁铁系统：在回旋加速器中，超导磁铁为粒子提供磁场，超导线圈通过电源系统进行供电，从而进行通电励磁，磁化磁铁系统单元形成磁通回路，产生磁场，为粒子束的引导提供所需的磁场强度及磁场位形。磁铁单元主要包括上铁轭盖板、铁轭腰、下铁轭盖板、扇形磁极、线圈。

（3）射频系统：储存来自高频功率源的能量，为带电粒子提供回旋加速所必须的高频电场，同时也为束流的注入提供必要的电场条件。射频系统通常与中心区系统共同作用，中心区将带电粒子从离子源中引出，由中心区的垂直偏转板将粒子引出到加速区，使束流从准静止状态加速到具有一定能量的低能状态。

（4）引出系统：引出系统的 ESD（静电偏转板）是控制束流垂直方向的运动，将能量已经达到需求值的束流通过偏转板偏向加速器外侧，进而引出加速器。MC（磁通道）是用来聚焦质子，使质子束（束流）按照设计轨迹引出加速器装置。

(5) 束测系统：质子治疗装置中主加速器系统束流测量的关键部件，通过拦截/非拦截式测量。在测量的过程中获取回旋加速器中不同径向位置的束流流强和位置等信息，为加速器的调试、试运行、参数优化、故障排查等过程提供依据。

(6) 真空系统：为了加速器稳定的工作性能和减少由于残留气体引起的束流损失，需要真空单元。真空单元主要由离子源真空、主真空室、真空泵、真空阀门、真空测量规以及安全联锁等组成。

(7) 水冷系统：维持加速器设备的正常运行，如线圈的冷却、射频腔的冷却、离子源水冷等。

(8) 回旋控制系统：控制单元主要包括以下功能：各部件的本地控制、总控制系统、安全互锁以防止操作失误、加速器运行过程逻辑关系控制、故障诊断和报警、人机对话，实现设备的操作及参数的设置和调整、主要参数测量与触摸屏显示等。

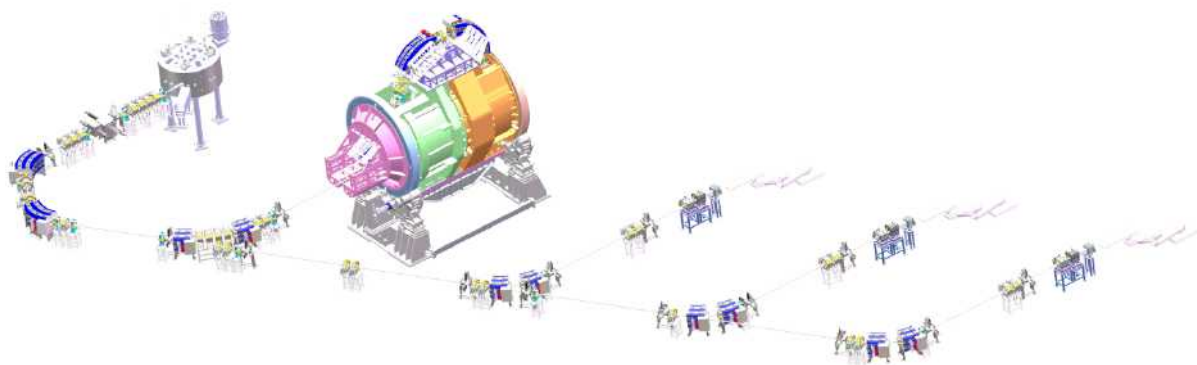


图 3-2 本项目 SC 系列质子回旋加速器主要结构示意图

3.2.1.2.1.2 能量选择系统

质子治疗时要根据肿瘤本身深度和厚度选用不同能量的质子，由于 SC 系列质子回旋加速器引出的质子能量是固定的，因此在 SC 系列质子回旋加速器和治疗室之间设置一个能量选择系统，其主要结构示意图见下图。

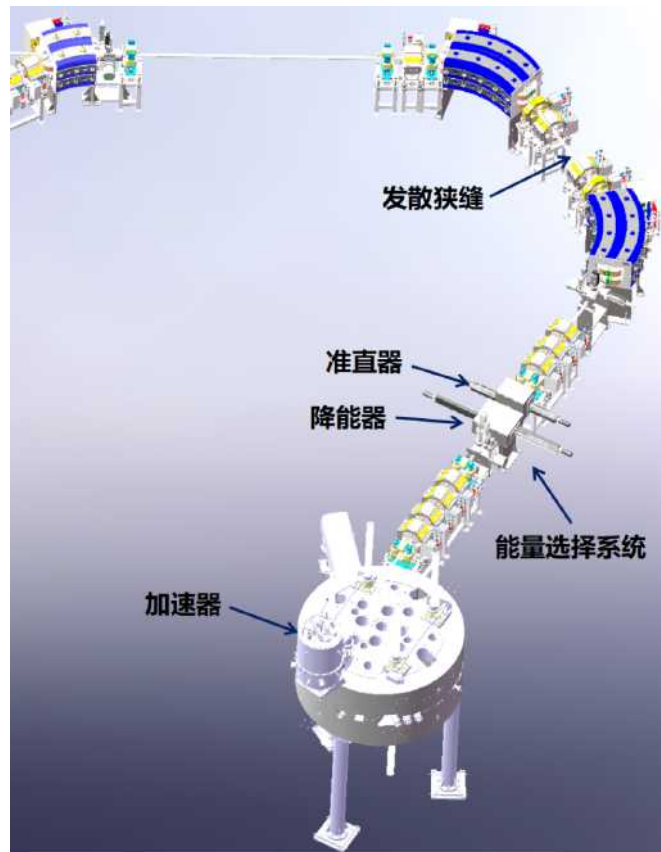


图 3-3 能量选择系统结构示意图

(1) 降能器

降能器材质一般为高密度各向同性石墨，当质子通过降能器时，降能器厚度越厚质子能量降低越多，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 SC 系列质子回旋加速器引出的最高能量为 240 MeV 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 70~220 MeV 之间连续可调的不同能量的质子束流。降能器由一对楔形石墨块组成，质子束穿越楔形石墨块时，依据楔形石墨有效厚度的不同实现对穿越质子束能量的控制。

(2) 准直器

准直器位于降能器后方，目的是限制经过降能器后发散的束流。其由三个尺寸、孔径不同的分准直器共同组成，其中准直器 1 和准直器 3 共同决定了经过准直器后束流的品质，准直器 2 用于阻挡杂散粒子。

(3) 流强调制狭缝

流强调制狭缝用于调节束流流强。其通常配合超导回旋加速器中心束流偏转板使用，超导回旋加速器中心束流偏转板可以实现对束流流强 nA 级别的流强粗调，而流强调制狭缝可以实现 0.1nA 级别的流强细调。流强调制狭缝位于四极磁铁组之后，束流经过传输线上游的四极磁铁后被扩束。此时通过控制流强调制狭缝宽度以刮去部分束流，从而能够实现精确调节束流流强的目的。

(4) 动量选择狭缝

动量选择狭缝主要作用是为了剔除动量分散范围之外的束流。通过在色散函数最大的地方放置动量选择狭缝，控制狭缝的宽度就可以选择所需的动量分散范围。动量分散狭缝处于对称传输线结构的中心，由于动量分散狭缝放置处为色散函数为平顶区，且色散函数足够大，从而能够精确地控制通过束流动量分散的大小。

3.2.1.2.1.3 束流运输系统

束流运输系统用于将加速器产生的质子束流输送到患者治疗部位。沿束流运输线管道放置四极磁铁、二级磁铁、校正磁铁、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，二级磁铁用于改变束流的方向，校正磁铁用于纠正质子束流在系统安装时产生的偏离，真空泵和监测器以及其他一些附属设备能保证射线达到治疗患者的要求。

3.2.1.2.2 治疗子系统

本项目质子治疗系统治疗终端包括旋转束治疗系统和固定束治疗系统。旋转束治疗系统内含有旋转机架、旋转束治疗头、图像引导系统、激光定位系统、患者摆位系统、旋转束治疗控制系统，能够让质子束流环绕卧姿患者进行转动，可实现 360° 旋转。固定束治疗系统内含有固定机架、固定束治疗头、图像引导系统、激光定位系统、患者摆位系统、固定束治疗控制系统，能够让质子束流以固定方向出射。

3.2.1.2.2.1 旋转束治疗室

旋转束治疗室通过旋转机架使治疗头围绕治疗等中心点旋转，以实现不同治疗角度的照射。旋转束治疗室可用于实现对多部位肿瘤（脑肿瘤、乳腺癌、胸部肿瘤、腹

部肿瘤等)的质子放射治疗。旋转束治疗室各部件主要功能见下表。旋转束治疗室布局图见图 3-4。

表 3-3 旋转束治疗室各部件功能

二级子系统	序号	部件名称	主要功能描述
旋转治疗室	1	旋转机架系统	在质子治疗系统中起到了关键的治疗头定位、稳定、支撑和安全保障的作用，确保治疗的精确性和有效性
	2	旋转束治疗头系统	将加速器引出的质子的束流性能(能量、流强、截面、位置、能散、发射度、时间结构等)转换成治疗所要求的束流(剂量)性能(能量调制度、照射野、后沿下降、横向半影等)，并引导束流在所需角度实施扫描照射，满足个体化治疗的需求，从而提高治疗效果，减少治疗对健康组织的不良影响
	3	图像引导系统	一种利用图像处理和计算机视觉技术的智能系统，旨在帮助医师在放射治疗过程中更精确地定位肿瘤并进行精准照射，以提高治疗效果并减少对周围正常组织的损伤
	4	患者摆位系统	在医疗环境中为患者治疗提供摆位支持(俯卧和仰卧治疗)和辅助的一种设备和工具，其在粒子治疗中起着至关重要的摆位定位辅助治疗的作用，医疗团队在治疗期间借助机械臂的精度定位来实现患者精准治疗，同时保证治疗安全
	5	激光定位系统	一种用于放射治疗过程中的定位和照射辅助的设备，有着精确度高、操作简便、安全可靠等特点。通过激光技术提供给医师一个可视化的参考，与图像引导系统配合对患者治疗位置进行定位和标记，确保患者在等中心位置的准确、重复摆位

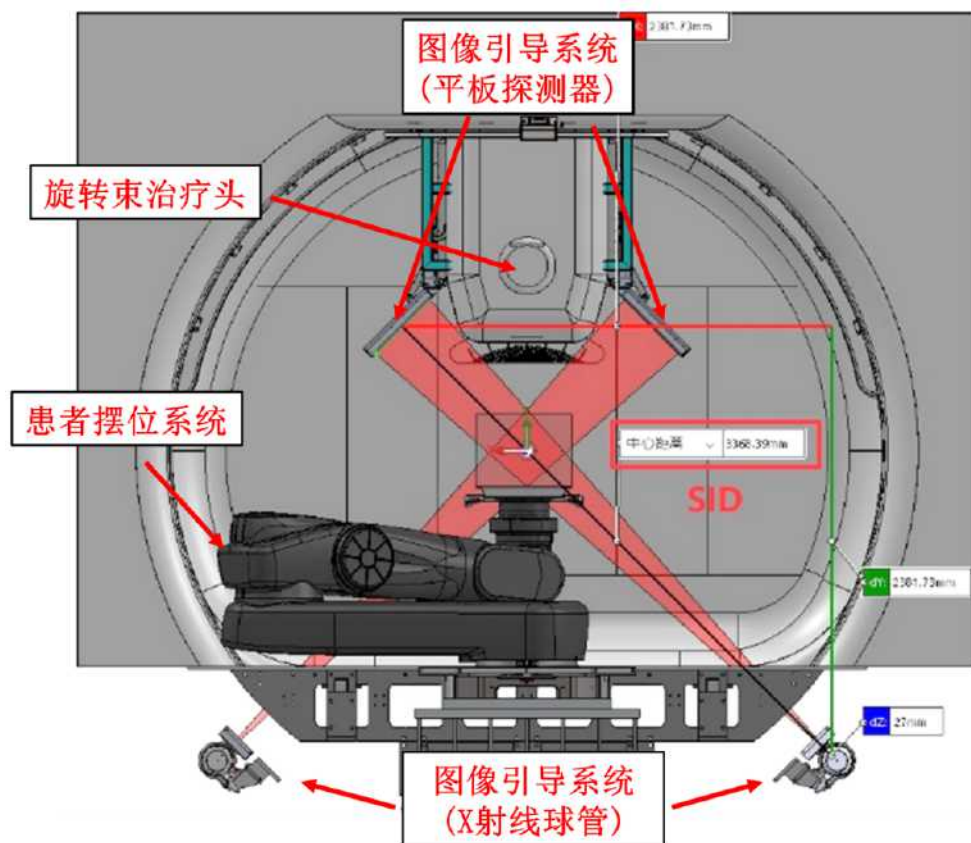


图 3-4 旋转束治疗室布局示意图

3.2.1.2.2.2 固定束治疗室

固定束治疗室主要用于头颈部肿瘤患者和前列腺肿瘤患者的质子放射治疗。治疗室内安装有水平治疗头，并安装了图像引导系统、患者摆位系统、激光定位系统以提供更多功能。固定束治疗室各部件主要功能见下表。固定束治疗室水平面布局图见图 3-5。

表 3-4 固定束治疗室各部件功能

二级子系统	序号	部件名称	主要功能描述
固定治疗室	1	固定机架系统	在质子治疗系统中起到了关键的治疗头定位、稳定、支撑和安全保障的作用，确保治疗的精确性和有效性
	2	固定束治疗头系统	将加速器引出的质子的束流性能（能量、流强、截面、位置、能散、发射度、时间结构等）转换成治疗所要求的束流（剂量）性能（能量调制度、照射野、后沿下降、横向半影等），并引导束流实施扫描照射，满足个体化治疗的需求，从而提高治疗效果，减少治疗对健康组织的不良影响
	3	图像引导系统	一种利用图像处理和计算机视觉技术的智能系统，旨在帮助医师在放射治疗过程中更精确地定位肿瘤并进行精准照射，以提高治疗效果并减少对周围正常组织的损伤

二级子系统	序号	部件名称	主要功能描述
	4	患者摆位系统	在医疗环境中为患者治疗提供摆位支持（俯卧和仰卧治疗）和辅助的一种设备和工具，其在粒子治疗中起着至关重要的摆位定位辅助治疗的作用，医疗团队在治疗期间借助机械臂的精度定位来实现患者精准治疗，同时保证治疗安全
	5	激光定位系统	一种用于放射治疗过程中的定位和照射辅助的设备，有着精确度高、操作简便、安全可靠等特点。通过激光技术提供给医师一个可视化的参考，与图像引导系统配合对患者治疗位置进行定位和标记，确保患者在等中心位置的准确、重复摆位

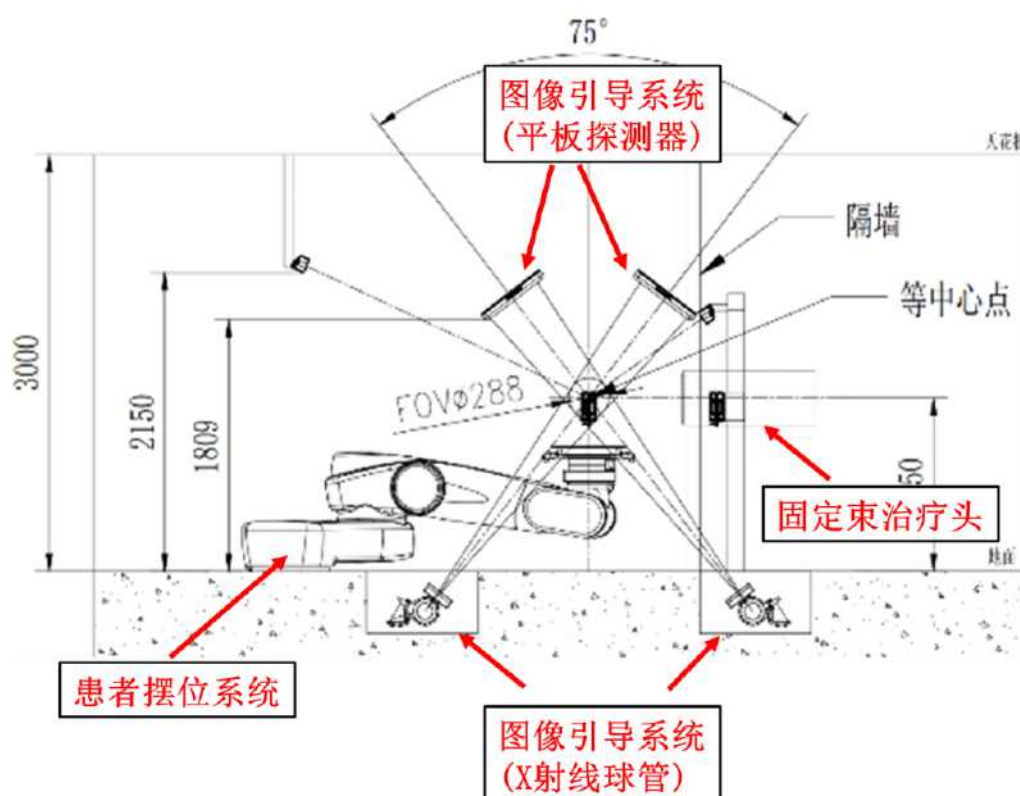


图 3-5 固定束治疗室布局示意图

3.2.1.2.2.3 图像引导系统

旋转束治疗室和固定束治疗室内均安装图像引导系统，该系统采用交角立体平面成像技术，通过计算机控制两组由 kV 级（诊断级）X 射线球管组件、高压发生器、平板探测器、曝光控制器组成的成像硬件系统，对患者的解剖结构或外部植入标记进行两个方向的透视投影，取得一对交角 X 射线投影图像。将所获取的标准 X 射线图像与计划 CT 的数字重建射线照片（DRR）进行比较，再通过将这些图像与图像之间进行配

准，精确探测出患者（病灶）在放疗设备上的六维摆位误差，据此引导放疗设备移动患者摆位系统，校正患者位置，实现对患者在治疗前的精确定位。

整个图像引导系统由高压发生器、X 射线球管组件、固定限束器、平板探测器、电气控制柜、隔离变压器、工作站等设备组成。每个 X 射线球管的最大管电压 150kV，最大管电流为 1000mA，由高压发生器提供高压电源到 X 射线球管上，X 射线球管发出 X 射线到动态平板探测器上形成图像。动态平板探测器包括有效探测面积 42.7 cm×42.7 cm 非晶硅探测器，能够生成高分辨率数字图像，满足质子治疗中图像使用的要求。

3.2.1.3 治疗流程

本项目质子治疗系统治疗工作流程如下：

（A）诊断：患者经医师会诊，判断其符合质子治疗适应症后（诊断、治疗正当性判断），由质子治疗科室医师、物理师、技师联合讨论，制定治疗预案并预约定位时间和治疗时间。

（B）模拟定位：对于首次预约质子治疗的患者，需要在示范中心二层影像科的 CT 机房利用模拟定位 CT 机对于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。本环节主要的辐射污染源为模拟定位 CT 机开机出束产生的 X 射线。

（C）制定治疗计划：医师在患者医学影像图中进行肿瘤轮廓勾画、区域分割等操作。物理师据此制定治疗计划和各种治疗参数，如照射次数、照射方向、照射剂量等。利用治疗计划系统软件对治疗计划进行进一步优化，生成治疗数据和文件，最终得出一个完整的治疗计划方案。治疗数据和文件通过肿瘤信息系统生成用于照射的束流参数文件，保存在数据库内。

（D）质量认证（QA）：每名患者的治疗计划在正式使用前，为确保治疗安全，都需进行一次治疗前的计划验证，即利用治疗计划方案中规定的设备运行参数对装置进行水箱模拟治疗，再实测其治疗参数，再和治疗计划中规定的治疗参数进行比较，若差值在允许容差内，则允许正式用于患者治疗。一次治疗计划验证的过程与一次正式的治疗过程基本一致。

(E) 患者摆位：对患者身份进行验证后，治疗计划系统根据患者 ID 调取束流参数文件并核验其正确性，在首次治疗前，医师、技师带领患者与物理师一起进入治疗室，依据治疗计划对患者进行摆位。

(F) 位置验证：技师在控制台通过图像引导系统根据患者的体位和位置进行精准定位。本环节主要的辐射污染源为图像引导系统开机出束产生的 X 射线。

(G) 质子治疗：质子治疗头出束开始照射，同时治疗计划系统记录患者实际照射剂量数据。照射完成后，治疗计划系统保存实际照射剂量数据文件。本环节主要的辐射污染源为质子治疗过程中产生的质子、中子、 γ 射线、活化空气、活化冷却水、活化结构部件和患者活化。

(H) 治疗结束解除摆位：患者治疗结束后，技师进入治疗机房内，对患者解除摆位并协助其离开机房，为下一个患者治疗做准备。该环节在治疗室内进行，由技师全程操作。

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 3-6、表 3-5。

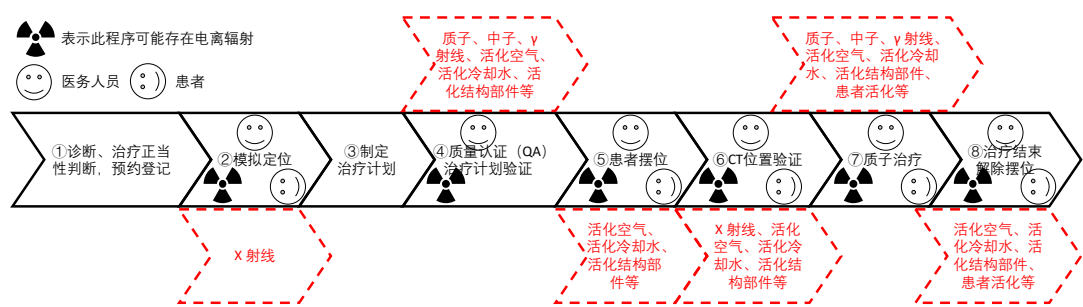


图 3-6 质子治疗系统工作流程及主要产污环节图

表 3-5 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
CT 模拟及定位、治疗室内 X 射线球管定位	X 射线
质子加速器运行	质子、中子、 γ 射线、活化空气、活化冷却水、活化结构部件
束流引出系统运行	
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（计划验证阶段包括活化 QA 水箱，不产生患者活化）、活化冷却水
治疗室内解除摆位	活化空气、活化结构部件、患者活化

3.2.1.4 工作规划及人员配置

3.2.1.4.1 工作规划

本项目质子治疗系统的年使用规划及出束时间见表 3-6。治疗及 QA 年出束总时长为 1833.33h。

表 3-6 质子治疗系统的年使用规划及出束时间

序号	内容	单位	治疗室 1	治疗室 2	治疗室 3	治疗室 4
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	3	3	3	3
2	每室每天治疗时间	h/d/室	15	15	15	15
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	45	45	45	45
4	每室每年治疗天数	d/a/室	250	250	250	250
5	每室每年治疗人次	人次/a/室	11250	11250	11250	11250
6	每人平均治疗次数	次/人	30	30	30	30
7	每室每年治疗人数	人/a/室	375	375	375	375
8	每人次治疗平均出束时间	min/人次	2	2	2	2
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	1.5	1.5	1.5	1.5
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	375	375	375	375
11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	83.33	83.33	83.33	83.33
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	9.17	9.17	9.17	9.17
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	458.33	458.33	458.33	458.33
14	年总出束时间	h/a	1833.33			

3.2.1.4.2 人员配置

根据国家卫健委发布的《“十四五”甲类大型医用设备配置准入标准》（国卫财务发〔2023〕18 号），本项目应具备该准入标准中规定的专业技术人员资质和能力。配置多个治疗室质子的：放射治疗专业医师不少于 12 名，其中从事放疗专业 10 年以上并取得高级专业技术职称者不少于 4 名；放射治疗物理专业人员不少于 8 名，其中从事放疗专业 5 年以上并取得高级专业技术职称者不少于 3 名；技师不少于 10 名；护士数量与开展服务相匹配。上述高级专业技术职称人员从事调强放射治疗（IMRT）经验不少于 5 年。应具备相应技术实力的设备维护、维修医学工程保障人员，其中：配置质子设备的不少于 2 名。应具备辐射防护专业技术人员，其中：配置质子设备的不少于 1 名。

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。”

综上，本项目质子治疗系统辐射工作人员的配备计划如下表所示。

表 3-7 本项目质子治疗系统辐射工作人员配备计划

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医师	问诊、制定治疗方案、急救等	诊室、医师办公室、抢救室	12	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	8	每天两班，每班 8h
技师	模拟定位、摆位、解除摆位等	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	10	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	2	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	2	每天两班，每班 8h
注册核安全工程师	辐射防护管理	办公室	1	每天 1 班，每班 8h
总计	——	——	35	——

3.2.2 硼中子俘获治疗装置

3.2.2.1 装置组成及原理

硼中子俘获治疗（Boron Neutron Capture Therapy, BNCT）的原理是通过质子加速器产生的质子束与锂靶发生相互作用产生初级中子源，再经束流整形系统慢化和整形后形成可用于患者治疗的超热中子（平均能量 4~5keV），与注入患者肿瘤细胞内的¹⁰B 相互作用，产生 α 粒子和反冲锂核对癌细胞起到杀伤作用。该技术治疗范围约 10 微米，可精准破坏癌细胞 DNA 而不损伤正常组织。

本项目使用的硼中子俘获治疗装置由质子加速器系统（含 ECR 离子源、RFQ 加速器系统、中能传输段）、2 个靶站系统、2 个硼中子治疗室组成。系统组成示意图 3-7。装置基本参数见表 3-8。

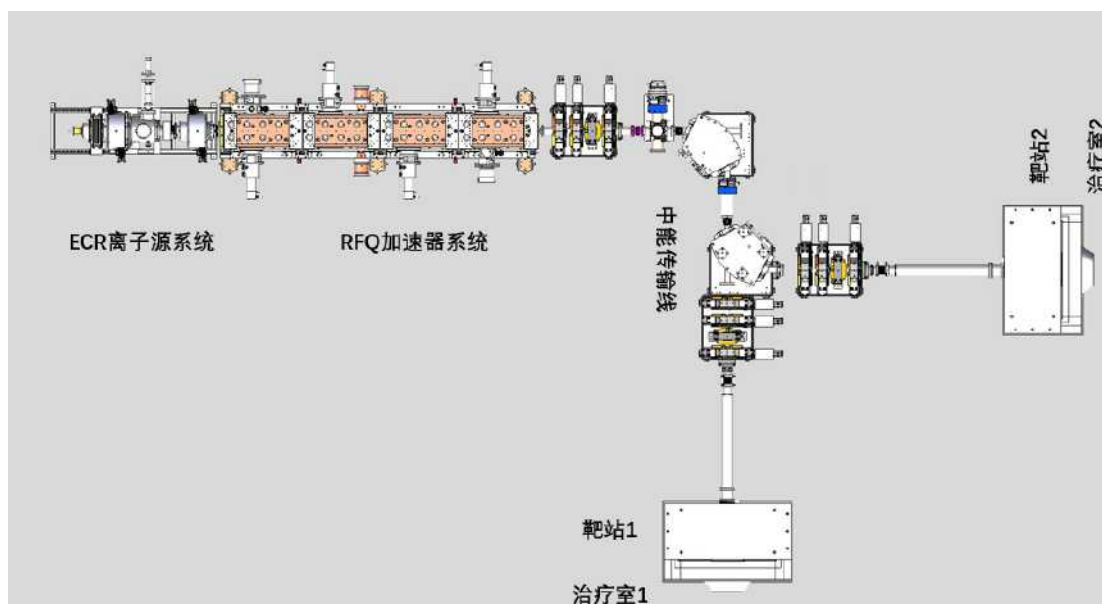


图 3-7 硼中子俘获治疗装置结构示意图

表 3-8 硼中子俘获治疗装置基本参数

项目	数值/方案
型号/系列	NeuRays
加速器主体	射频四极加速器
加速粒子	质子
最大能量 (MeV)	2.6
最大流强 (mA)	20
靶材	锂
打靶后中子产额, n/s	2.18×10^{13}
束流整形出口处中子产额, n/s	2.54×10^{11}
束流整形出口处中子通量, $\text{n/cm}^2/\text{s}$	1.65×10^9

NeuRays 硼中子俘获治疗装置的加速器系统主要包括质子加速器系统、靶站系统、调试系统、换靶系统。具体如下：

(1) 质子加速器系统

质子加速器系统包含 ECR 离子源及低能输线系统、RFQ 加速器系统、中能传输线系统。图 3-8、图 3-9、图 3-10 分别给出了加速器中的离子源、RFQ 和中能传输段等核心部件的工作原理图。ECR 离子源关键部件微波发生装置将氢气剥离产生强流质子，质子高电压形成低能 30-50keV 的质子束流，经过低能传输线，进入 RFQ 腔体，在 RFQ 腔体中质子束经过空间交变的高频电场，被加速至 2.6MeV，进入中能传输段。质

子束在中能传输段经四级磁铁组，再通过二级偏转磁铁调制后引导至束流终端打靶。
加速器主要技术参数见表 3-9。

表 3-9 本项目硼中子俘获治疗装置加速器技术参数

名称	加速粒子	最大能量（MeV）	最大流强（mA）
射频四极加速器	质子	2.6	20

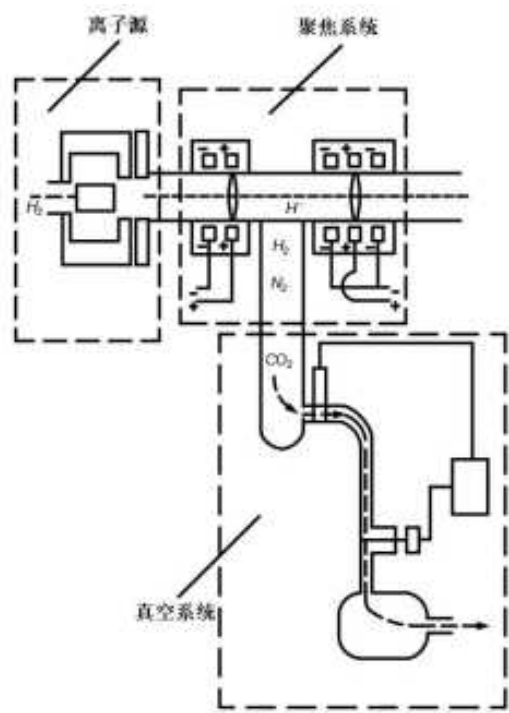


图 3-8 离子源工作原理示意图

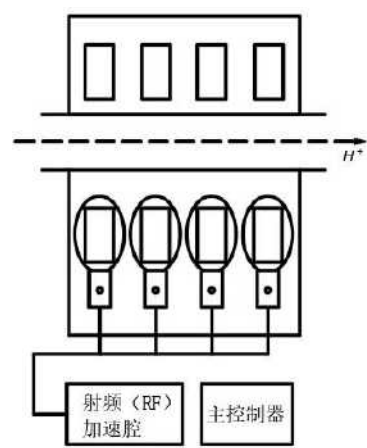


图 3-9 RFQ 工作原理示意图

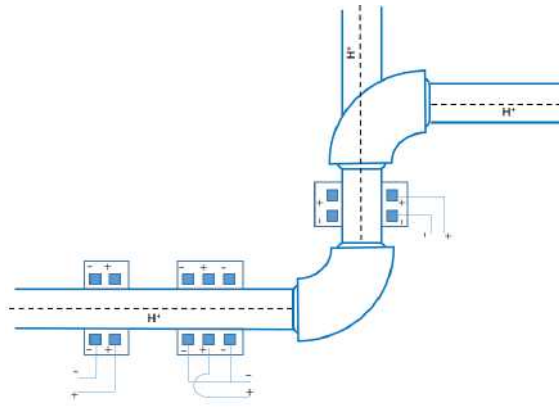


图 3-10 中能传输段工作原理示意图

（2）靶站系统

靶站系统主要由靶部件和束流整形部件组成，内嵌于加速器大厅和硼中子治疗室之间的混凝土墙内。每间硼中子治疗室各配备一套靶站系统。

① 靶部件

靶部件为旋转靶结构，用于产生初级中子，主要材料为圆形铜基体，外镀锂层。质子束通过束流管道轰击靶表面的锂镀层产生中子，单靶辐照最大时间为 20000mA·h，累计照射 1000 小时后需更换，寿期末靶部件（含电机）转运至放射性废物暂存间进行暂存。

为展平靶面功率分布，靶采用偏心旋转结构。整个打靶过程，束流绝对位置不变，靶面随靶体旋转，转速 0~1200 转/分钟，实现束斑平均功率在靶面上的环形均匀分布，相关结构图见图 3-11。旋转靶盘为夹层式结构，上下层铜板与中间微流道层组成铜基体，锂靶覆盖于铜基体上层。

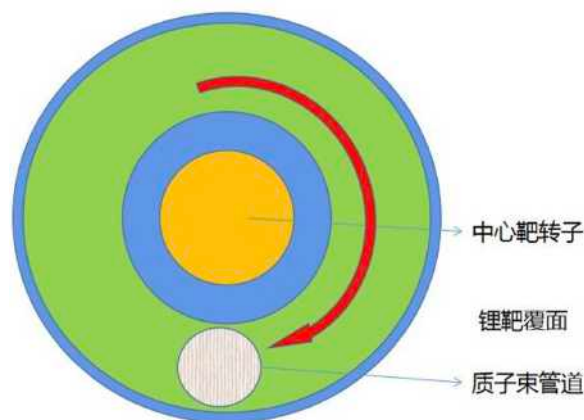
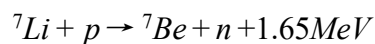


图 3-11 质子打靶结构示意图

运行期间强流低能质子束与靶件中的 ${}^7\text{Li}$ 发生核反应 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ ，反应式如下：



反应 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 为吸热反应，质子阈能为 1.88MeV。2.6MeV 质子入射 ${}^7\text{Li}$ 靶产生的初级中子能谱见下图，产生的初级中子主要能量在 40keV-0.9MeV 之间，质子打靶时单质子中子产额为 1.75×10^{-4} ，同时对应每质子作用产生 1.75×10^{-4} 个 ${}^7\text{Be}$ 原子。

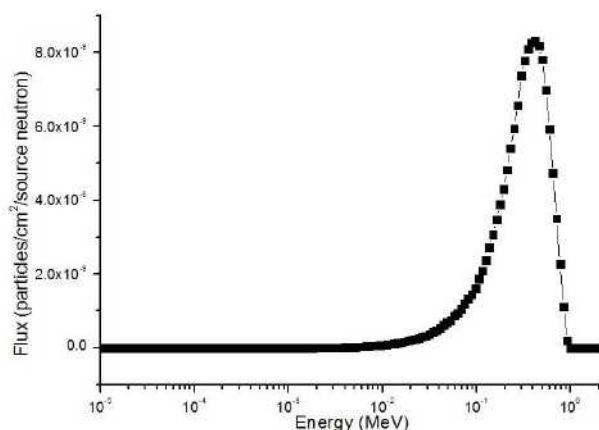


图 3-12 2.6MeV 质子入射 ${}^7\text{Li}$ 靶产生的中子能谱图

② 束流整形部件

束流整形系统对初级中子进行慢化和整形，从而得到中子能量在 0.5eV~40keV 的超热中子，供 BNCT 系统治疗使用，同时可满足快中子成分、热中子成分以及 γ 射线应尽可能低的要求。

束流整形系统主要包括慢化体、反射体、屏蔽体与准直体，布置于旋转靶部件周围，其中慢化体采用 MgF_2 ，该材料对热中子、超热中子反应截面小而对快中子散射截面大，同时慢化过程产生较少的 γ 射线；反射体采用铅材料，将散射的超热中子反射回慢化区和准直区；屏蔽体采用含硼聚乙烯；准直体为含硼聚乙烯的锥形束流引出孔。面向治疗室设置前向铅屏蔽层。系统结构示意图见图 3-13。

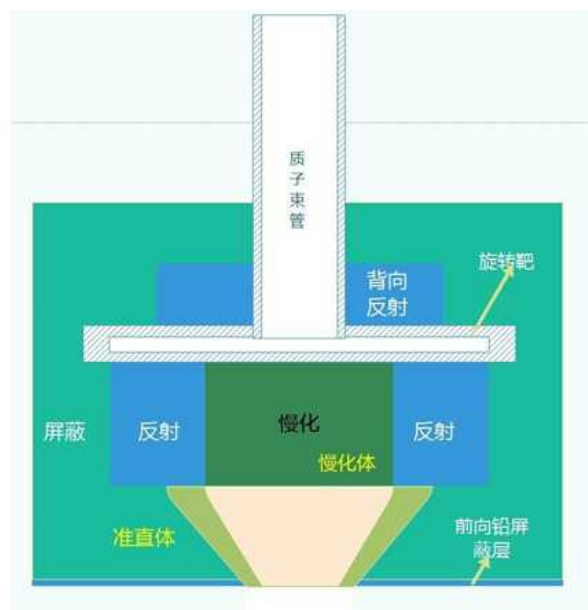


图 3-13 硼中子俘获治疗装置靶站结构示意图

(3) 调试系统 (dump)

束流调试系统为铜制材料的束流接收器，核心功能为接收质子并导出热量。为最大程度减小系统活化，采用水冷铜靶结构。调试过程中，最大流强为 4mA，质子能量为 2.6 MeV。调试系统累积运行时间约为 50 小时。为满足热量导出要求，束流收集器可采用平板式结构或锥形结构，如下图所示。

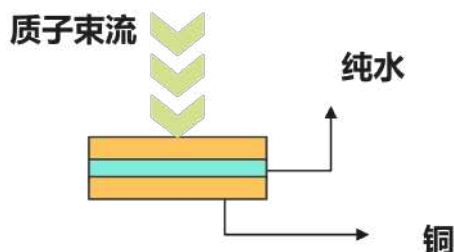


图 3-14 调试系统示意图

(4) 换靶系统

靶站定期更换（预计可达最大照射工况为 20000 mAh），预计一年更换一次，每年产生 2 个废靶。换靶系统用于废弃靶站的更换。换靶系统主要由天车和换靶机器人组成。天车用于靶件、加速器设备等的吊装。靶站达到工作寿期后，由设备供应商辐射工作人员利用远距离操作螺杆连接天车与待更换靶件上的吊环，通过天车吊装，将

废弃靶件整体吊起后卸入废靶暂存间，由换靶机器人运输至封装桶中。换靶过程主要涉及治疗室、加速器大厅相对应的区域。

单靶贮存衰变时间为3年，3年后吊出，经有资质单位监测后低于解控水平后，委托有资质的单位处置或申请作为普通固废处理。废靶暂存间最大可放置20个废靶，空间上能满足废靶贮存需求。

3.2.2.2 束流损失分析

本项目硼中子俘获治疗装置的初级粒子为质子，质子最大能量2.6 MeV，最大束流20 mA；质子撞击靶站中的靶物质后发生核反应产生中子和光子，中子和光子为次级粒子；产生的中子通过靶站内的慢化体调控后照射到人体需要被治疗的位置，人体内被活化的物质以及靶站中被活化的靶物质均为感生放射性核素。

表 3-10 硼中子俘获治疗装置束流损失参数一览表

工况	损失部位	能量, MeV	束流强度, mA	损失流强, mA	靶材料	损失方式
离子源调试	低能传输线 法拉第筒/ 束流闸	0.035	40	35	铜	打靶损失
治疗工况	靶终端	2.6	20	20	锂	打靶损失

3.2.2.3 工作流程及产物环节分析

BNCT两间治疗室可独立开展治疗工作，但不能同时运行出束，每次仅一间治疗室出束治疗，治疗的流程相同，具体如下：

（A）诊断：病人将前期的治疗和诊断结果发送给医院，经专家评定后方可进行硼中子俘获治疗；医生向病人告知可能受到的辐射危害及可能出现的副作用。

（B）患者筛查：病人进入医院后进行常规检查和筛查，重点考量BPA（硼苯丙氨酸，BNCT治疗中常用的含硼药物载体）在患者体内的富集程度以及持续给药情况下肿瘤部位和正常组织内的BPA浓度差异，获取 ^{10}B 化合物的浓度分布图像。

（C）治疗方案确定：靶区确定及治疗计划设计，根据患者的影像情况进行靶区的勾画，然后通过治疗计划系统进行治疗计划的设计。由医生根据患者的实际情况进行

治疗方案确定，包括治疗使用照射剂量、治疗次数；每次治疗的治疗时间和治疗照射时患者的位置及其与束线的角度等。

(D) 治疗前准备：根据病人的体型预制固定支架用于治疗时的固定；硼中子俘获治疗前，病人首先进入注射观察室注射硼药，根据拟治疗时间提前 2 小时开始注射硼药。注射硼药后等候约 90 分钟后进入治疗室摆位区进行预摆位、非照射部位的防护、固定和位置确认。

(E) 摆位和位置验证：治疗技师将患者放置在治疗床上，进入硼中子治疗室进行摆位固定，摆位时间不超过 10 分钟。摆位完成后，由治疗技师操作图像引导定位系统对患者进行定位。

(F) 治疗实施：根据前期所得的药物动力学分析，等到肿瘤位置的 BPA 浓度达到可照射的浓度阈值后，正式开启硼中子俘获治疗工作流程，进行中子照射治疗，平均单次治疗时间 30 分钟。加速器出束治疗期间，加速器工程师和治疗技师分别在加速器控制室和治疗控制室工作。BNCT 加速器年总出束时间 1500 小时。在该环节中，周围辐射工作人员主要受到中子、 γ 射线、活化气体和部件的辐射影响。

(G) 术后转运：治疗结束后 10 分钟内治疗室不进入，10 分钟后治疗技师进入治疗室将患者从治疗床上转移到移动病床上，操作时间约 2 分钟。在该环节中，技师主要受到活化部件和人体活化的影响。医院严格控制治疗技师术后转运工作时间，以减少感生放射性的影响。

(H) 术后观察与休养：患者离开治疗室后转运至留观室，进行恢复休息与监督观察，2 小时后可离开硼中子俘获治疗区，进入医院住院部或离开医院。在该环节中，病人身体组织会产生一定的感生放射性（主要是 γ 射线污染）和含放射性的排泄物。

本项目硼中子俘获治疗的工艺流程及产污环如下图所示。

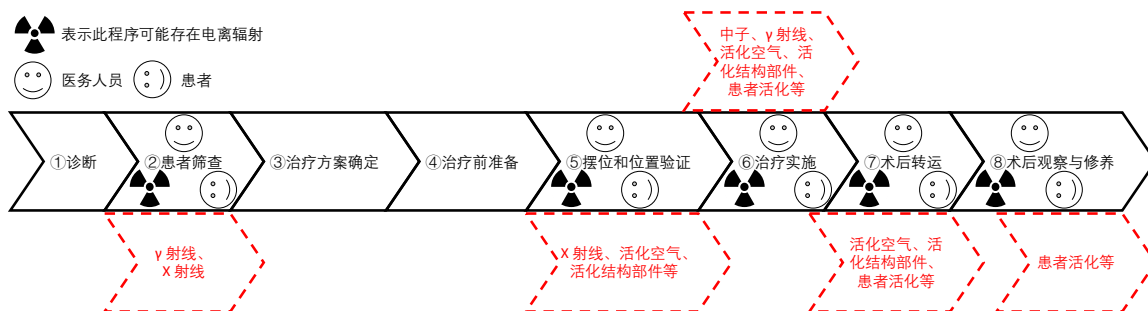


图 3-15 硼中子俘获治疗流程及产污环节示意图

3.2.2.4 工作规划及人员配置

3.2.2.4.1 工作规划

本项目硼中子俘获治疗装置的年使用规划及出束时间见下表。

表 3-11 硼中子俘获治疗装置的年使用规划及出束时间

序号	内容	单位	治疗室 1	治疗室 2
1	每室每小时治疗人次	人次/h/室	1	1
2	每室每天治疗时间	h/d/室	4	4
3	每室每天治疗人次	人次/d/室	4	4
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	1000	1000
6	每人平均治疗次数	次/人	1	1
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	1000	1000
8	每人治疗平均出束时间*	min/人次	30	30
9	每室每天治疗出束时间	h/d/室	2	2
10	每室每年治疗出束时间	h/a/室	500	500
11	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	250	250
12	每室每周治疗+QA 出束时间	h/w/室	15	15
13	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	750	750
14	年总出束时间	h/a	1500	

*备注：每人治疗出束时间范围约为 15~45 分钟，平均 30 分钟。

3.2.2.4.2 人员配置

本项目硼中子俘获治疗装置辐射工作人员的配备计划如下表所示。

表 3-12 硼中子俘获治疗装置辐射工作人员配备计划

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	诊断, 治疗方案制定, 治疗计划设计批准, 治疗过程监督	治疗计划室、治疗控制室、VIP 等候室、留观室	4	一天 2 人轮班
物理师	治疗计划制定、治疗计划验证、QA/QC	治疗计划室、治疗控制室、治疗室	4	4 人轮班, 2 人一组
治疗技师	肿瘤患者的摆位与治疗	治疗控制室、治疗室	4	4 人轮班, 2 人一组
护士	患者转移、硼浓度测量, 患者引导	注射观察室、治疗室、VIP 等候室、留观室	4	4 人轮班, 2 人一组
工程师	加速器设备的运行、维护和维修	加速器控制室、加速器大厅 (停束后)、治疗室 (停束后)、各类机柜机房 (停束后)	4	4 人轮班, 2 人一组
总计			20	/

3.2.3 直线加速器

3.2.3.1 装置组成及工作原理

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韧致辐射, 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。直线加速器主要构成包括: ①加速系统, ②辐射系统, ③剂量检测系统, ④机架及治疗床运动系统, ⑤电气控制系统, ⑥温控及充气系统。本项目拟用直线加速器外观示意图见图 3-16, 医用直线加速器结构见图 3-17, 直线加速器的主要技术指标见表 3-2。



图 3-16 直线加速器外观示意图

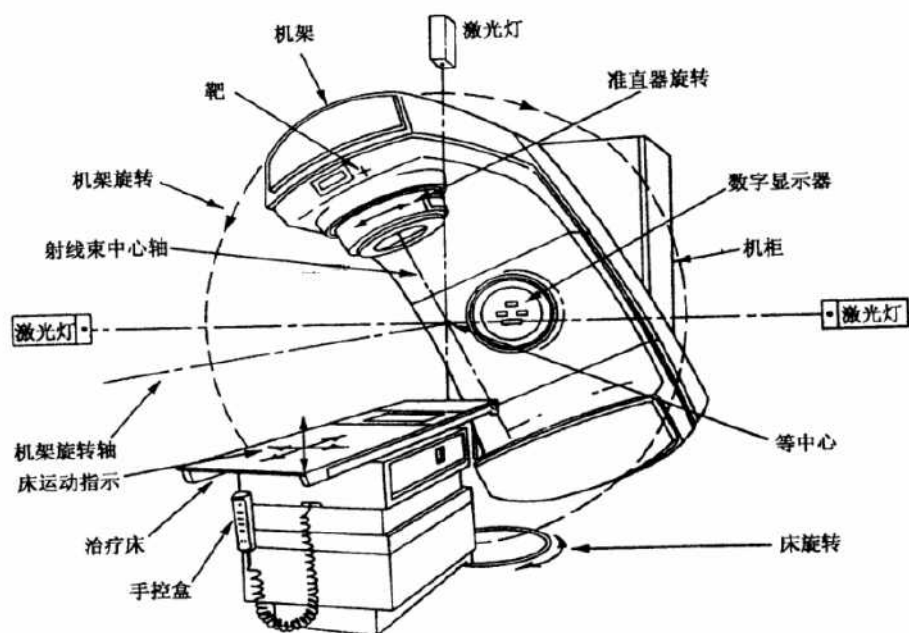


图 3-17 常见医用直线加速器结构示意图

表 3-13 主要技术指标

射线装置名称	电子直线加速器	
厂家	上海联影医疗科技股份有限公司	
型号	uRT-linac 506c	
X 射线最大能量	6MV	
剂量率	最大输出剂量率	1400cGy/min (840Gy/h)
	常规 X 射线最大剂量率 (FF)	600MU/min (360Gy/h)
	非均整 X 射线最大剂量率 (FFF)	1400MU/min (840Gy/h)
	无电子线治疗模式	
最大照射野	40cm×40cm	
有用线束最大张角	28°	
源轴距 SAD	100cm	
等中心高度	128cm	
机架旋转角度	-362°~182°，单弧最大旋转角度：544°	
一体化 CT	最大管电压 140kV，最大管电流 420mA	
数量	3	
工作场所	直加机房 1、2、3	

3.2.3.2 治疗流程

直线加速器具体治疗流程如下：

- 1) 接收病人：对病人进行登记，进行临床检查，经医生诊断和治疗正当性判断后，根据肿瘤分期、分型确定治疗方案，与放疗科预约登记，确定模拟定位治疗的时间；
- 2) 制模：为方便患者治疗定位，用热塑体模在相应治疗部位按照病人身体轮廓进行塑形；
- 3) 模拟定位：在大孔径 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；
- 4) 勾画靶区 TPS 制定治疗计划：勾出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内，加速器是否有相应的转床、碰床等机械限值，移床等坐标设置是否正确；
- 6) 病人摆位：摆位前认真查对病人信息、照射条件及摆位要求，调整治疗床高度，严格按照摆位要求实施摆位；
- 7) 实施治疗：根据放疗计划，运用有关技术实施精确照射；
- 8) 结束治疗：病人离开治疗室，摆位人员进行下一个患者的摆位准备。

3.2.3.3 工作规划及人员配置

3.2.3.3.1 工作规划

本项目直线加速器的年使用规划及出束时间见表 3-6。

表 3-14 直线加速器的年使用规划及出束时间

序号	内容	单位	直加 1	直加 2	直加 3
1	每室每天常规治疗人次	人次/d/室	24	24	24
2	每人次常规治疗平均出束时间	min/人次	2	2	2
3	每室每天调强治疗人次	人次/d/室	56	56	56
4	每人次调强治疗平均出束时间	min/人次	3	3	3
5	每室每天治疗人次	人/室	80	80	80
6	每室每年治疗天数	天/a/室	250	250	250
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	20000	20000	20000
8	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	100	100	100

9	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	1000	1000	1000
10	年总出束时间	h/a	3000		

3.2.3.3.2 人员配置

本项目直线加速器、后装治疗机和大孔径 CT 均属于放疗科设备，共用一套辐射工作人员，配备计划见表 3-15。

表 3-15 本项目放疗科辐射工作人员配备计划

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、急救室	4 人	每天两班，8h/班
物理师	制定并验证治疗计划，定期质控等	物理师办公室、直加机房及控制室、后装机房及控制室	4 人	每天两班，8h/班
技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	CT 模拟定位机房及控制室、直加机房及控制室、后装机房及控制室、技师办公室	8 人	每天两班，8h/班
护士	治疗准备、注射、护理等	CT 模拟定位机房及控制室、注射室、护士站	4 人	每天两班，8h/班
工程师	设备日常运维	设备间、工程师办公室	2 人	每天两班，8h/班
总计			22 人	/

3.2.4 后装治疗机

3.2.4.1 装置组成

后装治疗是放射治疗的一种方法，后装是预先在病人需要治疗的部位正确地放置施源器，然后采用自动或手动控制，将贮源器内放射源输入施源器内实施治疗的技术。本项目后装治疗属近距离放疗，治疗时依照临床要求，使 γ 放射源在人体自然腔、管道或组织间驻留而达到预定的剂量及其分布的治疗手段，后装治疗具有放射源强度小、治疗距离短、局部剂量高、周边剂量迅速跌落的特点，主要治疗不同部位的肿瘤以及手术难以切净而周围又有重要脏器限制外照射剂量的患者，如胰腺、胆管、膀胱癌、直肠癌及头颈部恶性肿瘤等。后装治疗机包括施源器、贮源器和源传输系统以及控制系统。施源器是一个直径为毫米级的管状物，由不锈钢制成，管内可装球形的放射源，并有气动通道。贮源器和源传输系统包括源分类机、主贮源室、源分配

器、中间贮源室、阀门和传输管道。控制系统由计算机、电视监视系统和打印系统组成。

本项目后装治疗机拟采用 ^{192}Ir 放射源，装源活度 $3.7\times10^{11}\text{Bq}(10\text{Ci})$ ，主要用于腔内、组织间等放射治疗。常见后装治疗机外观示意图如下：



图 3-18 常见后装治疗机外观示意图

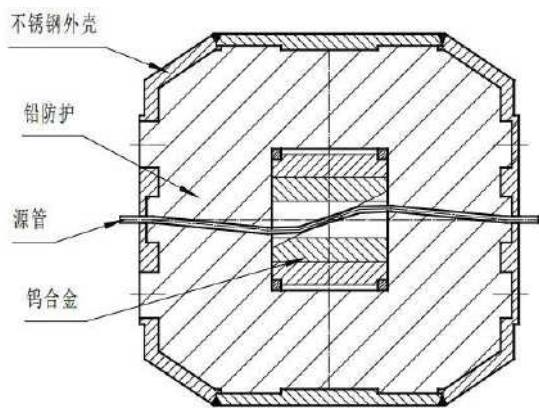


图 3-19 Ir-192 放射源贮源器结构示意图

贮源器是贮存后装治疗用放射源的容器，一般由外而内分别为不锈钢外壳、铅屏蔽层和钨合金屏蔽层（贮源器结构示意图如上图所示），保证贮源器没有伽马射线泄漏的直接路径。贮源器包括供运输（或暂存）放射治疗源用的运输贮源器和供后装机配套用的工作贮源器，工作贮源器位于后装机机体中央。运输（或紧急/维修）贮源器用于放射源的运输、在放射源不能进入后装机的贮源器，或在维修后装机驱动机械部分时，临时存放放射源，运输贮源器由设备供货厂家提供并同放射源一起更换。

后装机拟使用放射源参数见表 3-2。

表 3-16 后装机拟使用放射源参数

核素	出厂活度	放射源类别	数量	用途	场所
^{192}Ir	$3.7\times10^{11}\text{Bq}(10\text{Ci})$	III 类	1	放射治疗	负一层后装机房

3.2.4.2 治疗流程

本项目后装治疗机治疗流程如下：

- 1) 病人经医生诊断、治疗正当性判断后，预约登记，确定模拟定位和治疗时间；
- 2) 预约病人通过大孔径 CT 进行肿瘤定位，确认肿瘤的具体位置和形状；
- 3) 确定肿瘤位置和形状后，物理师根据医生给出的治疗剂量，通过治疗计划系统制定治疗计划；
- 4) 治疗前，工作人员进入机房调整接管并检查设备情况；
- 5) 病人进入机房，固定体位，连接施源器；
- 6) 确认除病人外无人滞留，离开机房，关好门；
- 7) 按规定操作机器，先进行假源模拟治疗，无误后，出真源治疗；
- 8) 按照治疗方案调整好出束时间、剂量；
- 9) 开始将放射源送到病灶，出束治疗；
- 10) 治疗结束，将放射源退回储源位，关机、开门，病人离开治疗室。

3.2.4.3 后装机装源换源相关说明

后装机使用 1 枚放射源 ^{192}Ir ，其半衰期为 74 天。根据常规诊疗计划，本项目放射源使用达到 1.5 个半衰期时需更换，即 111 天更换一次，每年更换 3 次，产生 3 枚废放射源。更换放射源之前院方将先到当地生态环境部门进行备案，待备案完成后再联系厂家进行放射源的更换，由厂家安排换源及换源后的整机调试。贮源容器供运输和使用时贮存放射源，更换放射源时，厂家使用新的贮源容器运输放射源至后装机治疗室内，连同贮源容器一起置换，即换源的过程就是贮源容器的置换过程，退役的放射源连同原贮源容器一起运输至设备厂家进行回收处置。更换放射源全程由厂家专业人员按国家相关规定负责操作完成，医院工作人员不直接参与放射源的更换操作，仅监督辅助厂家专业人员按国家相关规定进行更换操作。

3.2.4.4 工作规划及人员配置

3.2.4.4.1 工作规划

本项目后装治疗机的年使用规划及出束时间见表 3-6。

表 3-17 后装治疗机的年使用规划及出束时间

序号	内容		单位
1	每天治疗人次	10	人次/d
2	每人次平均照射时间	10	min/人次
3	每周治疗天数	5	d
4	每年治疗天数	250	d
5	每年 QA 出束时间	10	h
6	年总出束时间	427	h

3.2.4.4.2 人员配置

本项目直线加速器、后装治疗机和大孔径 CT 均属于放疗科设备，共用一套辐射工作人员，配备计划见表 3-15。

3.2.5 大孔径 CT

3.2.5.1 装置组成

大孔径 CT 主要用于放射治疗的模拟定位。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。

现代的大孔径 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。常见大孔径 CT 如下图所示。大孔径 CT 技术参数见表 3-2。



图 3-20 常见大孔径 CT 外观示意图

表 3-18 大孔径 CT 技术参数

品牌型号	数量	最大管电压，管电流	工作场所
待定	2	150kV，1300mA	CT 机房

3.2.5.2 工作流程

本项目大孔径 CT 工作流程如下：

- 1) 登记候诊：对受检者进行登记、候诊。
- 2) 确定诊断部位：根据受检者的实际情况确定放射诊断的部位和照射野的大小，并根据受检者的年龄、性别等确定放射诊断的电压、电流和照射时间。
- 3) 摆位准备：摆位前认真查对受检者信息、照射条件及摆位要求，并为受检者和陪检者（如需陪检）佩戴防护用品，摆位结束后，放射工作人员等非患者离开机房，并关闭防护门。
- 4) 实施照射：根据第 2 步确定的诊断条件，对患者、受检者进行照射。
- 5) 照射结束：解除摆位，进行下一个患者、受检者的摆位准备。

3.2.5.3 工作规划及人员配置

3.2.5.3.1 工作规划

质子治疗系统年治疗约 1500 人，硼中子俘获治疗装置年治疗约 4000 人，直加年治疗约 6000 人，后装年治疗约 2500 人，每名患者治疗前需做一次模拟定位，则每年共需要进行模拟定位 14000 人。大孔径 CT 的年使用规划如下：

表 3-19 大孔径 CT 年使用计划

序号	内容	单位
----	----	----

1	每天照射人次	60	人次/d
2	每人次平均照射时间	1	min/人次
3	每周工作天数	5	d
4	每年工作天数	250	d
5	每年 QA 出束时间	1	h
6	年总出束时间	251	h

3.2.5.3.2 人员配置

本项目直线加速器、后装治疗机和大孔径 CT 均属于放疗科设备，共用一套辐射工作人员，配备计划见表 3-15。

3.2.6 放射性药物制备及动物实验

3.2.6.1 放药制备规划

核素诊断区规划使用 8 种放射性核素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行显像诊断，前 7 种核素由回旋加速器生产， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 计划由 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗自制或外购。根据目前的规划，放射性核素 ^{18}F 周一到周五每天都安排诊断，因此 ^{18}F 年工作天数约 250 天。 ^{18}F 一天分两次制备，上午一次（6:30~8:00），下午一次（12:30~13:30）； ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 一周内每天轮流安排一种核素进行显像诊断，该 7 种核素年工作天数各约 50 天，均于上午（7:00~8:00）制备。操作回旋加速器打靶制备核素，每次约 30min，则合计回旋加速器运行约 400h/a，见表 3-20。考虑到项目运行后的实际工作需要，可能增加每日操作的核素种类，因此本次评价计算日等效操作量时，保守按所有核素都安排在同一天操作考虑，见表 3-21。

表 3-20 回旋加速器制备核素工作规划

核素	靶物质	单次打靶时间, h	制备产额, Bq/次	年打靶次数, 次	年出束时间, h
^{18}F	H_2^{18}O	0.5	9.64E+09	500	250
^{11}C	N_2+O_2	0.5	5.55E+09	50	25
^{13}N	H_2O	0.5	5.55E+09	50	25
^{15}O	N_2+O_2	0.5	9.25E+09	50	25
^{64}Cu	^{64}Ni	0.5	3.72E+09	50	25
^{68}Ga	^{68}Zn	0.5	5.94E+09	50	25
^{89}Zr	^{89}Y	0.5	1.65E+09	50	25
年总出束时间, h					400

表 3-21 放药制备及动物实验区非密封放射性物质情况表

场所名称	用途	核素	半衰期	来源	用途	贮存方式与地点	状态	毒性分组	毒性因子	操作方式	操作因子	日最大操作量/Bq	日等效最大操作量/Bq	年工作天数	年最大操作量/Bq
一层放药制备及动物实验区	放药制备	¹⁸ F	109.8min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	9.64E+09	9.64E+07	250	2.41E+12
		¹¹ C	20.39min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹³ N	10.0min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹⁵ O	2.0min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	9.25E+09	9.25E+07	50	4.63E+11
		⁶⁴ Cu	12.7h	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	3.72E+09	3.72E+07	50	1.86E+11
		⁶⁸ Ga	68.3min	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.94E+09	5.94E+07	50	2.97E+11
		⁸⁹ Zr	78.41h	自制	药物制备	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	1.65E+09	1.65E+08	50	8.23E+10
		^{99m} Tc	6.02h	自制	药物制备	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	1.15E+10	1.15E+08	50	5.75E+11
		⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc 发生器	—	外购	药物制备	手套箱	液体	中毒	0.1	源的贮存	100	3.70E+10	3.70E+07	50	1.85E+12
	动物实验	¹⁸ F	109.8min	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		⁶⁴ Cu	12.7h	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		⁶⁸ Ga	68.3min	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		⁸⁹ Zr	78.41h	自制	诊断实验	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	9.07E+08	9.07E+07	50	4.53E+10
		^{99m} Tc	6.02h	自制	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		¹²³ I	13.2h	外购	诊断实验	手套箱	液体	低毒	0.01	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+07	50	1.12E+11
		¹²⁴ I	4.18d	外购	诊断实验	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	2.24E+09	2.24E+08	50	1.12E+11
		¹⁷⁷ Lu	6.73d	外购	治疗实验	手套箱	液体	中毒	0.1	简单操作	1	1.32E+10	1.32E+09	50	6.59E+11
	总计												2.46E+09	/	
	非密封放射性物质工作场所级别：乙级（2E+07 ~ 4E+09Bq）														

3.2.6.2 回旋加速器制备放射性药物

3.2.6.2.1 回旋加速器装置组成

制备 PET 用放射性核素的回旋加速器，其工艺原理是在回旋加速器中通过交变电场加速质子从而使质子获得必要的能量，高速运动的质子轰击靶物质产生核反应生成放射性核素。放射性核素通过气动自动传输装置传输到化学合成器进行合成、检测、标定，最终成为所需要的放射性药物。在加速器运行过程中，通过改变靶物质可以获得不同的放射性核素供临床和科研应用。本项目使用的医用回旋加速器主要技术指标列于表 3-22。

表 3-22 本项目医用回旋加速器的主要技术参数

名称	医用回旋加速器
型号	MedRays® V16
加速粒子	H ⁺
最大能量, MeV	16
额定电流, mA	0.06
用途	制备 PET 放射性药物

本项目使用的医用回旋加速器主要结构包括主磁铁系统、高频与低电平系统、离子源、束流引出系统等，各系统具体描述如下。

表 3-23 医用回旋加速器系统组成及作用

系统名称	组成及作用
主磁铁系统	采用立式布局、紧凑型直边扇形叶片加常温线圈设计，在回旋加速器中常温线圈通过电源系统供电，从而通电励磁产生磁场，并磁化直边扇形磁极、底座、盖板，由底座、盖板至回轭形成磁通回路为粒子束的引导提供所需的磁场强度及磁场位形。
高频与低电平系统	通过高度精密的射频功率源和控制机制，调节电磁场的频率、幅值和相位，以调谐匹配加速器的工作频率、加速电压分布，确保束流的加速过程高效而稳定。其中谐振腔储存来自功率源的能量，为带电粒子提供回旋加速所必须的高频电场，同时也在中心区为束流的引入提供必要的电场条件。
离子源	采用冷阴极潘宁负氢离子源，离子源安装在回旋加速器的中心区域，并且离子源引出口的中心必须位于回旋加速器的中心平面上。潘宁源是一种往复震荡电子激发的电子碰撞型离子源，它的放电腔由阴极、对阴极、阳极筒构成。在离子源辉光放电产生的电子在电磁场的作用下在阴极与对阴极之间往复振荡并与阳极腔内的气体分子碰撞，碰撞后的气体分子不断被电离并通过阳极腔引出口引出，继而被高频电场俘获从而在回旋加速器内共振加速。

束流引出系统	对于加速 H ⁻ 离子的医用回旋加速器，用剥离引出的方式可以实现几乎 100%的引出效率，有利于获得强流束。经过加速后的 H ⁻ 离子经过碳膜后变为 H ⁺ 离子并在磁场作用下偏转出加速器实现引出。
真空系统	主要由真空室模块、真空泵模块和真空测量模块组成从而实现真空的获得和测量。
水冷系统	水冷循环系统将一定温度的冷却水送至各个热负载，包括高频功率源、谐振腔、磁铁线圈、磁铁电源、靶和离子源等，以确保加速器的正常运行。同时，为了避免管路结垢、腐蚀、漏电等现象的发生，水冷系统还需采用去离子过滤设备以使冷却水保持较低的电导率。
气动系统	用于将打靶后产生的放射性产物从目标室安全、高效地运输到化学合成仪或其他后续处理设备中。该系统由多个关键组成部分构成：首先是气源供应系统，提供稳定且高纯度的压缩气体，作为驱动传输的动力来源；其次是过滤与净化装置，用于去除气体中的颗粒物和水分，确保气体质量不受污染。传输管道系统采用耐腐蚀材料制成，具备良好的气密性和耐压能力，以防止泄漏或破裂，并设计成一定的直径和长度，连接回旋加速器的目标室和化学合成仪。控制阀与调节装置则用于精确控制气体的流速、压力和流向，可手动或自动操作，确保传输过程的安全性和可控性。此外，监控与报警系统通过压力传感器和流量计实时监测气动系统的运行状态，在出现压力过高或泄漏时及时发出警报并采取紧急措施。屏蔽与防护装置则用于减少放射性产物对环境的辐射影响，通常包括铅层包裹等设计，并配备净化装置以去除排放气体中的放射性颗粒或其他污染物。
控制系统	采用 EPICS 分布式控制架构，即控制任务由分布在网络上的多台计算即共同完成，大量的实时作业由前端计算机承担。控制系统主要由控制软件模块、计算机模块、PLC 模块和安全联锁模块。操作人员通过控制软件模块实现设备启动、任务分发、进程控制和界面监测等。计算机模块包括上位机和前端计算机用以实现控制台和子系统层级的实时控制任务。
靶系统	为了实现 PET 用放射性同位素制备，需要在加速器引出处匹配相应的靶以及相应的传输系统。靶系统主要有液体靶模块、固体靶模块、气体靶模块以及配套的靶送料和传输模块和水冷模块组成。

3.2.6.2.2 回旋加速器制备放射性药物工作流程

1) 回旋加速器的计算机遥控开机操作流程

回旋加速器的计算机遥控开机流程如下图所示。

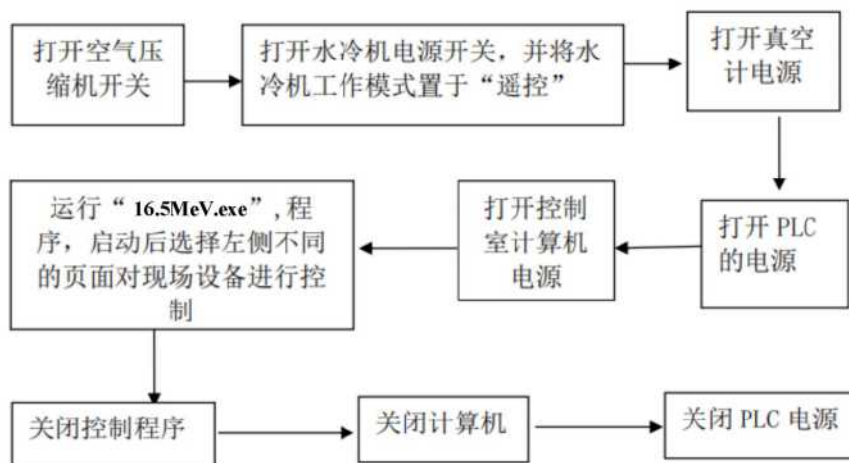


图 3-21 回旋加速器计算机控制系统操作流程

2) 制备放射性药物工作流程

本项目拟使用的回旋加速器，是一套完整的、全自动的正电子药物制备系统，回旋加速器可完成临床上所需要的 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 等放射性核素，其中 ^{18}F 是目前临床使用标记示踪剂最多的正电子放射性核素。回旋加速器制备放射性药物的工作流程分为核素制备、药物合成与分装、药物质控、药物运输四个部分。

①核素制备

药物合成人员提前一天根据动物实验及核医学科预定的药物数量和药物种类，安排第二天的核素制备量。在核素制备前对回旋加速器进行调试，设置相应参数。根据制备核素的种类，准备对应的靶材料，不同核素的制备原理基本相同，只是所需的靶材料不同。回旋加速器运行期间，工作人员不进入回旋加速器机房内，仅在控制室操作。

a. 填充靶：制备 ^{18}F 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{68}Ga 采用液态靶，制备 ^{11}C 采用气态靶，制备 ^{64}Cu 、 ^{89}Zr 采用固态靶，均是在屏蔽体外通过管道利用自动加样装置装入靶腔。

b. 打靶制备核素：靶材料传输至回旋加速器靶位后，由工作人员在控制室操作回旋加速器系统，以一定的束流轰击靶物质，制备核素。

c. 核素输送：回旋加速器制备结束后，通过预装在靶线地沟内的专用管道系统，利用高压在氦气的推动下自动传输到热室的药物合成柜内，并进行靶腔清洗，再利用高纯氦气将放射性核素输送管道吹干。制备每种放射性核素的靶材料和核反应见下表。

表 3-24 制备放射性核素的靶材料和核反应

序号	放射性核素	靶材料	靶材料类型	核反应
1	^{18}F	$\text{H}_2\text{ }^{18}\text{O}$	液体靶	$^{18}\text{O}[p, n]^{18}\text{F}$
2	^{11}C	$\text{N}_2 + \text{O}_2$	气体靶	$^{14}\text{N}[p, a]^{11}\text{C}$
3	^{13}N	$\text{H}_2 \text{ O}$	液体靶	$^{18}\text{O}[p, a]^{13}\text{N}$
4	^{68}Ga	^{89}Y	固体靶	$^{68}\text{Zn}[p, n]^{68}\text{Ga}$
5	^{89}Zr	^{89}Y	固体靶	$^{89}\text{Y}[p, n]^{89}\text{Zr}$
6	^{64}Cu	^{64}Ni	固体靶	$^{64}\text{Ni}[p, n]^{64}\text{Cu}$
7	^{15}O	$\text{N}_2 + \text{O}_2$	气体靶	$^{15}\text{N}[p, n]^{15}\text{O}$

制备的核素的主要参数见表 3-25。

表 3-25 制备的放射性核素参数一览表

核素	半衰期	衰变模式	毒性	α/β 最大能量/MeV	光子能量/MeV	周围剂量当量率常数 (裸源) $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$
C-11	20.39min	β^+ 、EC	低毒	0.96(+)	0.511	0.148
N-13	10.0min	β^+ 、EC	低毒	1.19(+)	0.511	0.148
O-15	2.0min	β^+ 、EC	低毒	1.72(+)	0.511	0.148
F-18	109.8min	β^+ 、EC	低毒	0.63(+)	0.511	0.143
Cu-64	12.7h	β^- 、 β^+ 、EC	低毒	0.65(+)	0.511, 1.346	0.029
Ga-68	68.3min	β^+ 、EC	低毒	1.9(+)	0.511	0.134
Zr-89	78.41h	β^+ 、EC	中毒	0.395(+)	0.917, 0.511	0.194

备注：参数来自 GBZ120-2020 及 ICRP 核素软件(DECADATA)。

②药物合成、分装

化学合成系统包括合成分装模块以及相应的仪器设备，用于合成和分装放射性药物，全程采用计算机全自动控制，无需人工干预。

a.回旋加速器机房的放射性核素制备完成后，通过氦气吹扫，通过专门的防护管道系统传输到热室的相应模块箱中。

b.核素在洁净合成模块中合成过程中，均采用计算机程序自动控制，无需人员干预。

c.放射性药物在洁净合成模块合成完成后，进入同一模块箱的药物分装模块，药物在自动分装模块中将根据预先设计的程序，经高效除菌过滤膜过滤被收集在安瓿瓶中，自动掉入专用的铅防护罐中，罐子的盖子为卡扣盖子，不易松动。装有放射性药物的铅防护罐通过热室的净化传递窗，传递到质控室等其它区域。

放射性药物合成和分装工作结束后，工作人员完成清场、监测后离开热室。

③ 药物质控

药物制备完成后，工作人员进入热室将成分装模块内装有少量（约 0.1mCi）质检用药物的铅罐取出，经传递窗送至质控室进行质量检验。质控室设通风橱（手套箱），工作人员在通风橱内将待检药物注射器吸取微量抽检样品，检验药物的 pH 值和性状，经检验满足《中华人民共和国药品管理法》（2019 年 12 月 1 日起施行）、《放射性药品管理办法》（2022 年修订）等相关法律法规要求后，方开展后续工作。

④ 药物运输

放射性药品质检合格后，工作人员从分装热室中取出铅罐（分装热室分为上下两层，药物分装好后，分装热室下层打开、上层关闭，铅罐从下层取出，工作人员不会与放射性物质直接接触）。分装好的药物储存在铅罐中，通过传递窗运至缓冲间，由专人采用小推车经药物运输通道运至动物实验或核素诊断场所。

3.2.6.3 核素发生器制备放射性药物

本项目使用的 ^{99m}Tc 由外购的 ^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器淋洗自制，每支的活度按 37GBq/支（约 1Ci/支）考虑，淋洗地点位于一层放药制备区的热室房间。

^{99}Mo - ^{99m}Tc 发生器（钼锝发生器）是一种利用母体核素 ^{99}Mo 通过放射性衰变产生子体核素 ^{99m}Tc 的放射性同位素分离装置。其工作原理基于色层吸附与离子交换技术，核心过程包括：

（1）母体固定：将高比活度的 ^{99}Mo 以钼酸根离子（ $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ ）形式吸附于酸性氧化铝（ Al_2O_3 ）色谱柱上，形成牢固的化学键合，确保母体核素在淋洗过程中不被洗脱。

（2）衰变生成： ^{99}Mo 通过 β^- 衰变（半衰期约 66 小时）转变为激发态的 ^{99m}Tc ，并以高锝酸根离子（ $^{99m}\text{TcO}_4^-$ ）形式存在于柱床孔隙溶液中。

（3）选择性洗脱：利用 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 与氧化铝吸附剂亲和力显著低于 $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ 的特性，采用无菌生理盐水（0.9% NaCl）作为淋洗剂，在负压或大气压驱动下实现子体核素的有效分离与收集，获得高纯度、高比活度的 ^{99m}Tc 放射性药物溶液。

（4）循环使用：洗脱后柱内剩余 ^{99}Mo 继续衰变再生 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，经过一定时间（约 6—24 小时）后活度恢复至可再次淋洗的水平，实现多次“挤奶”式提取，直至 ^{99}Mo 活度降至规定下限。

该装置结构紧凑、操作简便、产物品控稳定，是目前核医学临床获取 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的首选方式，广泛应用于单光子发射计算机断层显像（SPECT）及相关放射性药物制备。

典型的钼锝发生器内部构造见图 3-22。

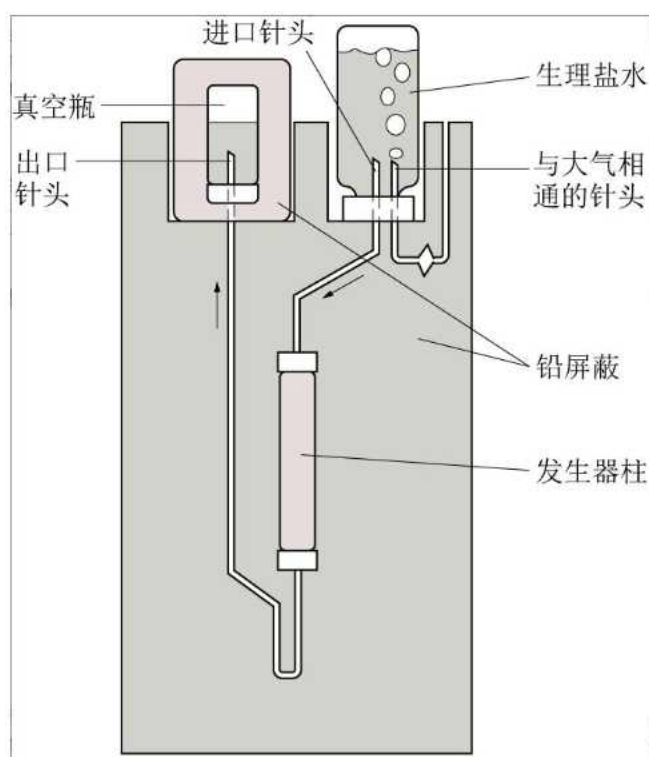


图 3-22 典型钼锝发生器内部结构图

3.2.6.4 放药制备产污环节分析

回旋加速器制备放射性药物的整个过程（打靶、合成、分装）为计算机全自动控制，工作人员不参与操作，只是监控整个过程的执行情况（其中打靶过程人员位于回旋加速器控制室，合成、分装时人员位于热室操作台）；在质控环节由工作人员通过通风橱操作，用毛细吸管取出待检药物进行检验。结合工作原理，回旋加速器制备放射性药物的流程及产污环节如下图所示：

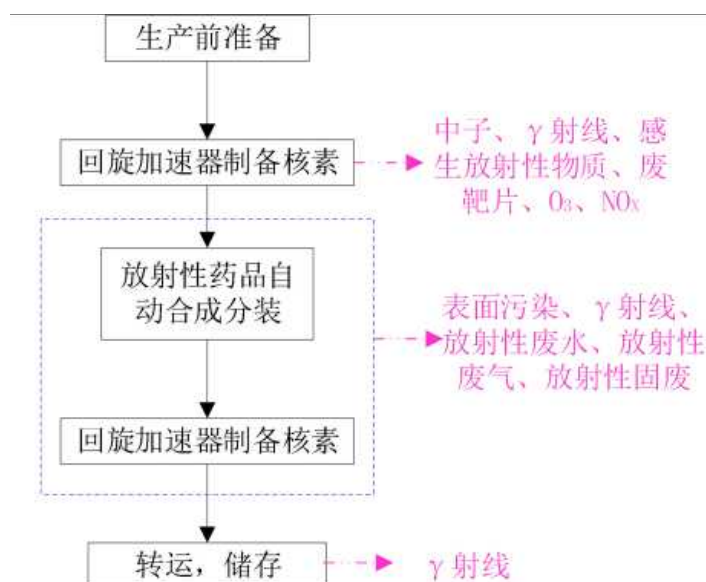


图 3-23 回旋加速器制备放射性药物工作流程及产污示意图

回旋加速器在制备核素的同时伴随产生大量中子，成为瞬时辐射源，由于高能带电粒子直接轰击加速器有关部件导致有关原件被活化从而产生中子活化产物，中子在慢化吸收过程中产生高能射线和放射性废物，另外回旋加速器长期运行会产生废靶。加速器室内的空气受中子照射后生成放射性活化气体，主要有 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 等感生放射性物质，以及回旋加速器在开机时会产性少量的非放射性有害气体，主要是臭氧和氮氧化物。

对于放射性药物合成（淋洗）、分装、质控过程：

- I、核素衰变发出 β 射线以及因发生正电子湮灭而产生的 γ 射线；
- II、药物的挥发以及质检过程中产生含放射性核素的废气；
- III、操作过程中，可能会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾污，造成放射性表面污染；
- VI、医务人员去污、应急洗消、场所清洗时可能产生少量放射性废水；
- IV、作业产生废棉签、口罩、手套等放射性固废。

3.2.6.5 动物实验内容及规划

本项目拟在一层的动物实验区开展动物实验，日等效操作量见表 3-21。

1) 总体工作流程

动物实验总体工作流程如下图所示：

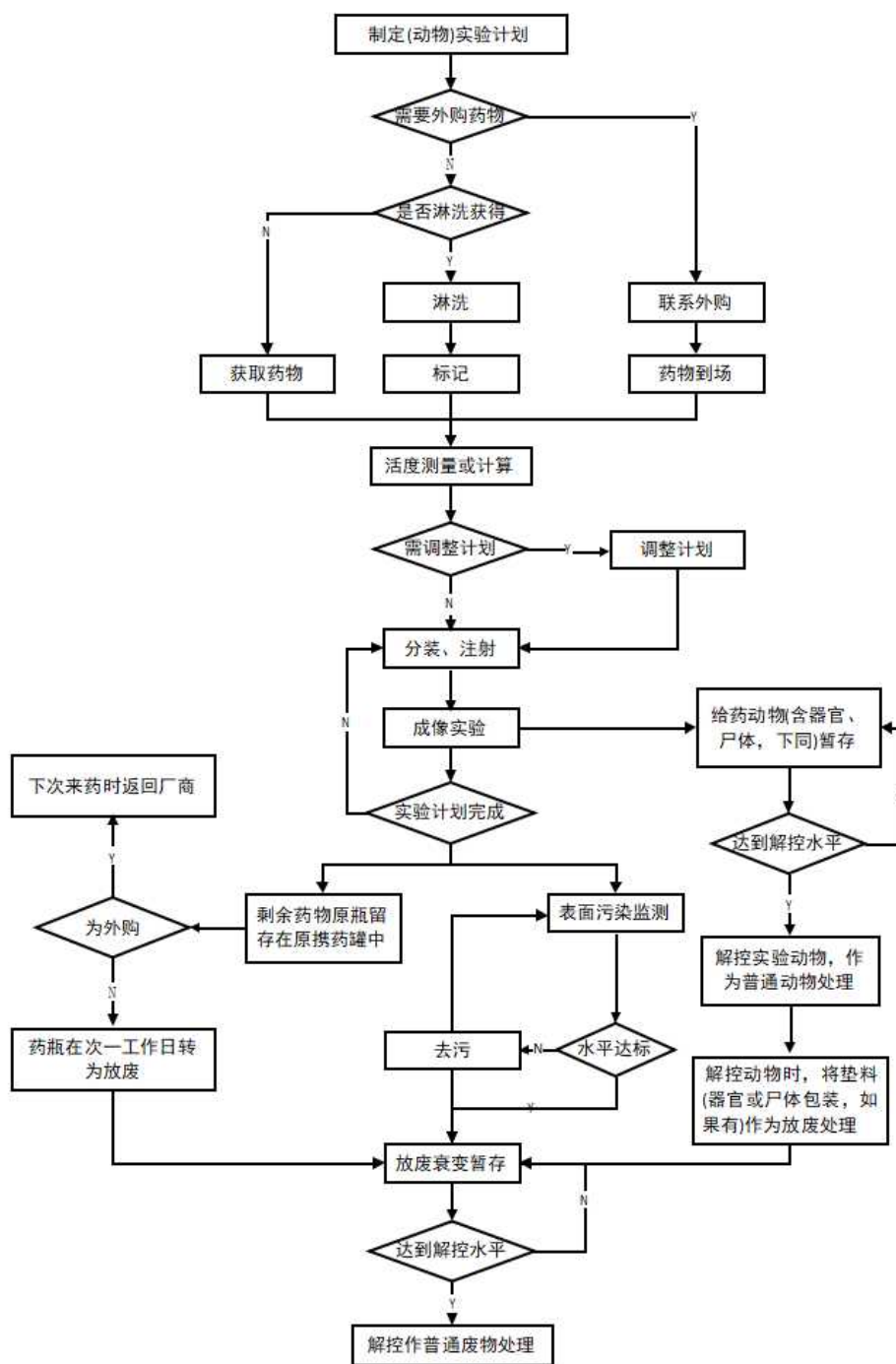


图 3-24 动物实验总体工作流程示意图

动物实验拟使用的核素清单如下：

表 3-26 动物实验拟使用的核素清单

核素名称	半衰期	衰变模式	毒性分组	α/β 最大能量, MeV	光子能量, MeV	周围剂量当量率常数(裸源), $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$	核素用途	核素来源
F-18	1.83h	β^+ , EC	低毒	0.63 (+)	0.511	0.143	诊断	自制

核素名称	半衰期	衰变模式	毒性分组	α/β 最大能量, MeV	光子能量, MeV	周围剂量当量率常数(裸源), $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$	核素用途	核素来源
Cu-64	12.7h	β^- , β^+ , EC	低毒	0.65 (+)	0.511,1.346	0.029	诊断	自制
Ga-68	68.3min	β^+ , EC	低毒	1.9 (+)	0.511	0.134	诊断	自制
Zr-89	78.4h	β^+ , EC	中毒	0.395 (+)	0.917,0.511	0.194	诊断	自制
Tc-99m	6.02h	同质异能跃迁	低毒	—	0.140	0.0303	诊断	自制/外购
I-123	13.2h	EC	低毒	—	0.027,0.159, 0.529	0.061	诊断	外购
I-124	4.18d	β^+ , EC	中毒	0.9736	0.511,0.603, 1.691	0.185	诊断	外购
Lu-177	6.73d	β^-	中毒	0.2058	0.2084	—	治疗	外购

动物实验拟使用的设备信息如下：

表 3-27 动物实验拟使用的设备信息

序号	名称	类别	品牌型号	数量	最大管电压，最大管电流
1	小动物 SPECT-CT	III	Madiclab PSA SPECT/CT	1	80kV，0.7mA
2	小动物 PET-CT	III	Madiclab PSA094	1	80kV，0.7mA

动物实验拟使用的设备的工作负荷如下：

表 3-28 动物实验拟使用的设备的工作负荷

设备名称	单次扫描照射时长	每天最多照射次数，次	年工作天数，d
小动物 SPECT-CT	SPECT 45min、CT 10min	20	200
小动物 PET-CT	PET 30min、CT 10min	20	200

2) 实验规划及各实验内容：

对于创新药物，在非临床研究阶段需要采用热药开展研究，内容包括药效学、药代动力学和毒理学中制剂安全性研究。其中体内肿瘤的抑制、候选药物的药代动力学、候选药物制剂安全性毒性研究和影像实验需要在动物实验室进行，其中：

①体内肿瘤抑制作用研究，仅涉及表 3-26 中的治疗核素，日最大操作量 100mCi。

②候选药物药代动力学研究，包含候选药物在动物体内的生物分布研究（正常大鼠和荷瘤大鼠）、放射性血药曲线研究和放射代谢产物研究，涉及表 3-26 中所有核素，日最大操作量 30mCi。

③候选药物制剂安全性毒性研究，包含主动过敏、被动过敏和血管刺激性研究，治疗核素日最大操作量 226mCi，诊断核素日最大操作量为 22.6mCi（不涉及 ^{89}Zr ）。

④影像实验，仅涉及表 3-26 中的诊断核素，日最大操作量 8mCi。

具体各个动物实验所需核素操作量和操作方式见下表。

表 3-29 动物实验放射性同位素操作量和操作方式清单

实验名称	操作方式		日最大操作量, mCi	
			治疗核素	诊断核素
体内肿瘤抑制作用	荷瘤鼠30只, 10只/组, 分别1.0、2.5或5.0mCi/只静脉给药, 约每周给药一次, 持续三周。测量肿瘤大小的变化以评估肿瘤抑制效果。		100	不涉及
候选药物药代动力学	正常大鼠生物分布	大鼠54只, 250μCi/只静脉给药。分别在给药后9个时间点处死 (n=6)。进行解剖, 收集组织样本, 计算动物各组织器官中的放射性浓度。(89Zr核素用于药物筛选研究, 不作为上市药物核素, 实验动物数量可减少或分次开展实验。)	13.5	13.5 (89Zr<5)
	荷瘤大鼠生物分布	荷瘤大鼠36只, 250μCi/只静脉给药。分别在给药后6个时间点处死 (n=6)。进行解剖, 收集组织样本和肿瘤, 计算动物各组织器官和肿瘤中的放射性浓度。(89Zr核素用于药物筛选研究, 不作为上市药物核素, 实验动物数量可减少或分次开展实验。)	9	9 (89Zr<5)
	放射性血药曲线研究	大鼠6只, 250μCi/只静脉给药。分别在给药后9个时间点取血, 测血液中的放射性计数。	1.5	1.5
	放射代谢产物研究	大鼠6只, 静脉给药1mCi/只, 分别收集血液和尿液 (给药后5个时间点) 样品。按照相应处理方法进行前处理得到待测样品, 对待测样品进行放射性HPLC分析, 测得的HPLC谱图及与原型药的HPLC比对分析。根据HPLC的测定结果来分析供试品在体内的转化情况。(89Zr核素用于药物筛选研究, 不作为上市药物核素, 实验动物数量可减少或分次开展实验。)	6	6 (89Zr<5)
	小计		30	30 (89Zr<16.5)
候选药物制剂安全性毒性	主动过敏试验	取健康豚鼠24只, 分为阴性对照组、阳性对照组和供试品组共3组。各组动物分别给予相应的物质0.5ml进行致敏, 隔日腹腔注射, 共3次。末次致敏后14天和21天, 每组分别选取一半动物, 以2倍体积致敏浓度供试品足跖静脉注射。观察记录激发即刻至激发后30 min的过敏反应症状。 根据过敏反应评分标准评判供试品有无过敏反应及过敏反应强度。	20	2 不涉及89Zr
	被动过敏试验	取健康豚鼠24只, 先取6只制作致敏血清, 各组动物 (每组2只) 分别给予相应的物质0.5ml进行致敏, 隔日腹腔注射, 共3次。末次致敏后第14天, 将豚鼠采血, 分离血清备用。将各组抗血清稀释成4个浓度。剩余豚鼠脱毛处按顺序皮内注射血清, 每点注射0.1 ml, 共4点(脊柱两侧)。 皮下注射4 h后, 各被动致敏组动物静脉注射与致敏剂量相同的激发抗原加等量的0.5%伊文思蓝染料共1ml。给药	6	0.6 不涉及89Zr

实验名称	操作方式		日最大操作量, mCi	
			治疗核素	诊断核素
血管刺激性试验	30 min后处死各组豚鼠，剪取背部皮肤，测量皮肤内层的蓝斑直径，评判供试品有无被动过敏反应。			
	取健康家兔8只，分为2组，一组单次给药，一组连续给药3天。每只动物右侧耳缘静脉给予供试品2.5ml/只，左侧耳缘静脉给予同体积对照，于末次给药后72h及继续恢复14天结束后各处死1/2只动物，收集组织，进行组织病理学检查。		200	20 不涉及 ⁸⁹ Zr
	小计		226	22.6
影像实验	将小鼠施以异氟烷麻醉后，通过尾静脉注射放射性药物。将约 100~200 μCi 放射性药物从尾静脉注入小鼠体内，分别于给药后 2~240 min，将麻醉状态下的小鼠放置在具有防护功能的样品盒中通过传递窗传送至动物影像室由工作人员置于小动物舱内，摆位合适后，工作人员离开机房在控制室进行 PET/CT或SPECT扫描，显像时间一般为 5~15 min。扫描结束后，工作人员将小鼠处死收集暂存于冷冻运放射性废物间。		不涉及	8

3.2.6.6 动物饲养及实验后的处置

1) 小动物饲养

动物给药后，暂养在动物饲养室笼具内，笼具是一个相对密封的塑料盒，通过专用的排气和供气管道与笼具向连接，笼具的结构可有效的防止实验动物逃逸，具体结构见下图。笼具内的动物每两天喂养一次，每次时长约 20min。动物实验室管理人员进入饲养室时要穿戴好洁净服、口罩、铅防护服等防护用品，离开动物实验室时应进行检测，确定无污染后，方可离开。



图 3-25 动物饲养笼示例照片

2) 小动物处理

小动物处理：小动物进入暂养在动物暂存室→实验需要使用小动物时通过传递窗转移至动物实验室注射室→注射放射药物→三种实验：①麻醉→进行 PET/CT、SPECT-CT 扫描→将小鼠转处死→将小鼠收集后贮存在冷冻放射性废物间冰柜内；②将小鼠转移至药物筛选实验室麻醉后处死进行解剖→使用 γ -计数器对各组织器官进行计数测量→最后将小鼠使用过和未使用的组织按要求收集后贮存在冷冻放射性废物间冰柜内。③暂养在动物暂存室→观察放射性药物对肿瘤的抑制情况或其他生物反应情况→最后将小鼠处死收集后贮存在冷冻放射性废物间冰柜内。

3) 放射性固废处理

①放射性固体废物分类收集：在各工作场所放射性废物桶→转移至放射性废物间废物桶内密封暂存→包装表面标记核素种类和存储时间→衰变超过半衰期最长核素十个半衰期后→经检测符合清洁解控水平后按照一般医疗废物处理→登记到废物解控台账中（包括核素种类、检测结果、解控重量、实施人员等信息）。

②处死的小动物和组织器官装袋密封→包装表面标记核素种类、时间和操作人员等信息→冰柜内储存衰变（外加铅皮防护）→衰变超过半衰期最长核素十个半衰期后→经检测符合清洁解控水平后按照一般医疗废物交有资质单位处理→登记到废物解控台账中（包括核素种类、检测结果、解控重量、实施人员等信息）。

③收集动物饲养垫料（含排泄物）→密封包装，包装表面标记核素种类、时间和操作人员等信息→暂存在放射性废物间中→衰变超过半衰期最长核素十个半衰期后→经检测符合清洁解控水平后按照一般医疗废物交有资质单位处理→登记到废物解控台账中（包括检测结果核素种类、检测结果、解控重量、实施人员等信息）。

3.2.6.7 人员配置

表 3-30 放药制备及动物实验辐射工作人员配备计划

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
扫描设备控制	扫描控制	操作室（监督区）	2	轮班
动物实验操作	实验动物处理（为实验动物建立静脉通道(冷)、放药推注（热）、动物摆位（热）、转运成像后给药实验动物(热)至动物暂养室）	静脉通道（实验动物处理台） 放药推注（机房或实验动物处理台） 动物摆位（机房） 转运成像后给药实验动物至暂养室（机房->动物暂养室）	4	轮班
药物分装	药物分装	回旋加速器的药物分装热室进行药物分装	2	与临床共用

3.2.7 核素诊断

3.2.7.1 非密封放射性物质使用情况

表 3-31 核素诊断使用的非密封放射性物质情况表

场所名称	用途	核素	半衰期	来源	用途	贮存方式与地点	状态	毒性分组	毒性因子	操作方式	操作因子	日最大操作量/Bq	日等效最大操作量/Bq	年工作天数	年最大操作量/Bq
一层核素诊断区	核素诊断	¹⁸ F	109.8min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	很简单操作	10	7.40E+09	7.40E+06	250	1.85E+12
		¹¹ C	20.39min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹³ N	10.0min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	5.55E+09	5.55E+07	50	2.78E+11
		¹⁵ O	2.0min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	9.25E+09	9.25E+07	50	4.63E+11
		⁶⁴ Cu	12.7h	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	1.48E+09	1.48E+07	50	7.40E+10
		⁶⁸ Ga	68.3min	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	简单操作	1	3.70E+09	3.70E+07	50	1.85E+11
		⁸⁹ Zr	78.41h	自制	显像诊断	储源间	液体	中毒	0.1	简单操作	1	7.40E+08	7.40E+07	50	3.70E+10
		^{99m} Tc	6.02h	自制	显像诊断	储源间	液体	低毒	0.01	很简单操作	10	9.25E+09	9.25E+06	50	4.63E+11
	总计												3.46E+08	/	
	非密封放射性物质工作场所级别：乙级（2E+07 ~ 4E+09Bq）														

3.2.7.2 装置组成

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 3-32。

表 3-32 本项目核素诊断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

1) PET、CT 及 PET/CT 原理简介

PET 其全称是正电子发射型计算机断层扫描显像仪(positron emission tomography, 简称 PET)，PET/CT 显像检查原理是通过正电子核素或其标记的示踪剂，示踪动物内特定生物物质的生物活动，采用多层、环形排列于发射体周围的探头，由体外探测示踪剂正电子湮灭辐射所产生的光子，然后将获得的信息，通过计算机处理，以解剖影像的形式及其相应的生理参数，显示靶器官或病变组织的状况，借此诊断疾病，又称为生化显像或功能分子显像，是目前唯一可以在活体分子水平完成生物学显示的影像技术；同时结合应用高档多排 CT 技术进行精确定位，可精确地提供靶器官的解剖和功能双重信息，并能够独立完成多排螺旋 CT 的临床显像，大大提高临床使用价值。

正电子发射是放射性核素衰变的方式之一。这类核素在自发的从不稳定状态向基态衰变过程中，从核内释放出与普通电子一样但电荷相反的电子，即正电子。正电子是一种反物质，从核内放出后很快与环境中的自由电子碰撞湮灭，转化为一对方向相反、能量为 0.511MeV 的 γ 光子。在这对光子飞行方向上对置一对探测器，便可以几乎同时接受到这两个光子，并可推定光子发射（即正电子发射）源点在两探头间连线上。通过环绕 360°排列的多组配对探头，经探头对之间符合线路检验判定每只探头信号时间耦合性，排除其他来源射线的干扰，得到探头对连线上的一维信息，再用滤波反投射方式，将信号按探头对的空间位置向中心点反投射，便可形成与探头组连线轴平行的断层正电子发射示踪剂分布图像。本项目拟用正电子核素为 F-18。

CT 是一种利用 X 射线从多个角度对人体内部结构进行成像的技术。它能够生成横截面图像，这些图像可以组合起来形成三维模型。CT 提供的信息可显示机体组织脏器解剖结构的改变，发现病变并可以确定其范围及周围组织脏器的毗邻关系。

PET/CT 是把 PET 和 CT 联合在一起，通过 PET 扫描和 CT 扫描重建，联合扫描，使两者的硬件和软件有机地融合在一起。CT 的球管发射 X 射线，穿透人体组织，探测器在对侧获得数据来重建结构图像；同时又提供给 PET 作为衰减校正的参数，在此基础上再进行 PET 图像的重建，因此所显示的图像为两者图像的融合的结果，即细胞的代谢图像和所处的解剖位置图像，一次检查可快速了解全身的整体情况。

PET/CT 示例图见图 3-26。



图 3-26 PET/CT 示例图

2) SPECT、CT 及 SPECT/CT 原理简介

SPECT 即单光子发射型计算机断层显像（Single photon emission computed tomography，简称 SPECT）。SPECT 是在 γ 照相机的基础上发展起来的核医学影像设备，它实际上是在一台高性能 γ 照相机的基础上增加了探头旋转装置和图像重建的计算机软件系统，因此其基本机构主要由探头、旋转运动机架、计算机及其辅助设备等三大部分构成，其中 SPECT 的探头结构也由准直器、晶体、光导、光电倍增管组成。SPECT 的探头借助运动机架围绕身体或受检器官旋转 360° 或 180° 进行完全角度或有限角度的放射性探测，从多角度、多方位采集一系列平面影像，然后利用专用的计算机软件处理重建为三维数据，根据需要可获得脏器的水平切面、冠状切面、矢状

切面或任一角度的体层影像，清除了不同体层放射性的重叠干扰，可以单独观察某一体层内的放射性分布，这不仅有利于发现较小的异常和病变，还使得局部放射性核素定量分析进一步精确。SPECT 同时兼有平面显像、动态显像、断层显像和全身显像的功能，因而成为当今临床核医学的主流设备。

CT 是一种利用 X 射线从多个角度对人体内部结构进行成像的技术。它能够生成横截面图像，这些图像可以组合起来形成三维模型。CT 提供的信息可显示机体组织脏器解剖结构的改变，发现病变并可以确定其范围及周围组织脏器的毗邻关系。

SPECT/CT 是将 SPECT 和 CT 这两种设备安装在同一个机架上，两种显像技术的定位坐标系统相互校准，在两次扫描期间受检者处于同一个检查床上且保持体位不变，可防止因受检者移位产生的误差，在一定程度上也解决了时间配准的问题。通过 SPECT/CT 图像融合技术，可以将 SPECT 灵敏反映体内组织器官生理、生化和功能的变化与 CT 提供的精确的解剖结构信息相结合，真正实现了功能、代谢、生化影像与解剖结构影像的实时融合，为临床提供了更加全面、客观、准确的诊断依据。不仅如此，CT 提供的图像数据还可用于 SPECT 的衰减校正，有效提高 SPECT 的图像质量。本项目的 SPECT 显像主要使用单光子核素 Tc-99m。

SPECT/CT 示例图见图 3-27。



图 3-27 SPECT/CT 示例图

3.2.7.3 工作流程及产污环节

1) PET/CT 工作流程

具体工作流程如下：

- ①预约检查，PET/CT 中心接收患者，并告知患者诊断过程存在的辐射危害；
- ②医生根据病情确定使用核素的剂量；
- ③病人通过注射将放射性药物 ^{18}F -FDG 药剂摄入。在药品摄入过程中存在 γ 射线，同时会产生放射性固废(注射器、棉球、一次性手套等)；
- ④病人在候诊室内候诊 20min；
- ⑤病人进入 PET-CT 机房通过仪器进行器官显像和病情检查。整个检查过程大约要 15min，检查完毕后无异常情况后续前往留观室。
- ⑥病人在留观室停留 10~15min，之后从患者出口离开 PET/CT 中心。

PET/CT 工作流程以及产污环节如下图所示。

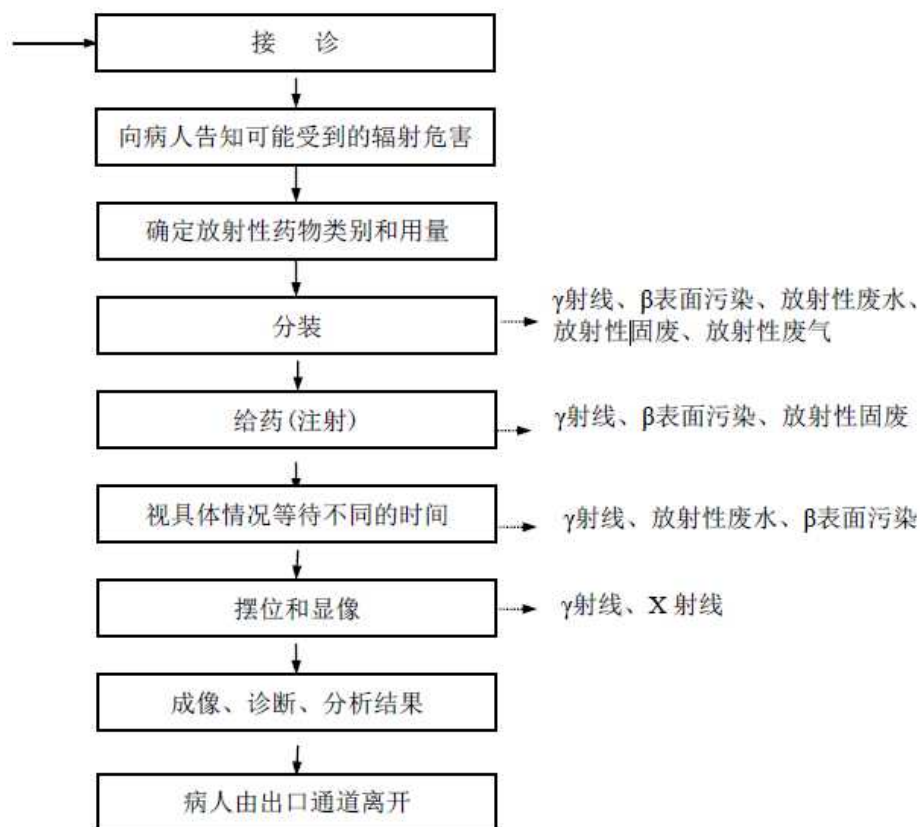


图 3-28 PET/CT 工作流程以及产污环节图

2) SPECT/CT 工作流程

具体工作流程如下：

- ①预约检查，SPECT/CT 中心接收患者，并告知患者诊断过程存在的辐射危害；
- ②医生根据病情确定使用核素的剂量；

- ③病人通过注射将放射性药物 ^{99m}Tc 药剂摄入。在药品摄入过程中存在 γ 射线，同时会产生放射性固废(注射器、棉球、一次性手套等)；
- ④病人先到运动负荷室进行检查前准备，在候诊室内候诊 20min；
- ⑤病人进入 SPECT/CT 机房通过仪器进行器官显像和病情检查。整个检查过程大约要 30min，检查完毕后无异常情况前往留观室。
- ⑥病人在留观室停留 20-25min，之后从患者出口离开 SPECT/CT 中心。
- SPECT/CT 工作流程以及产污环节如下图所示。

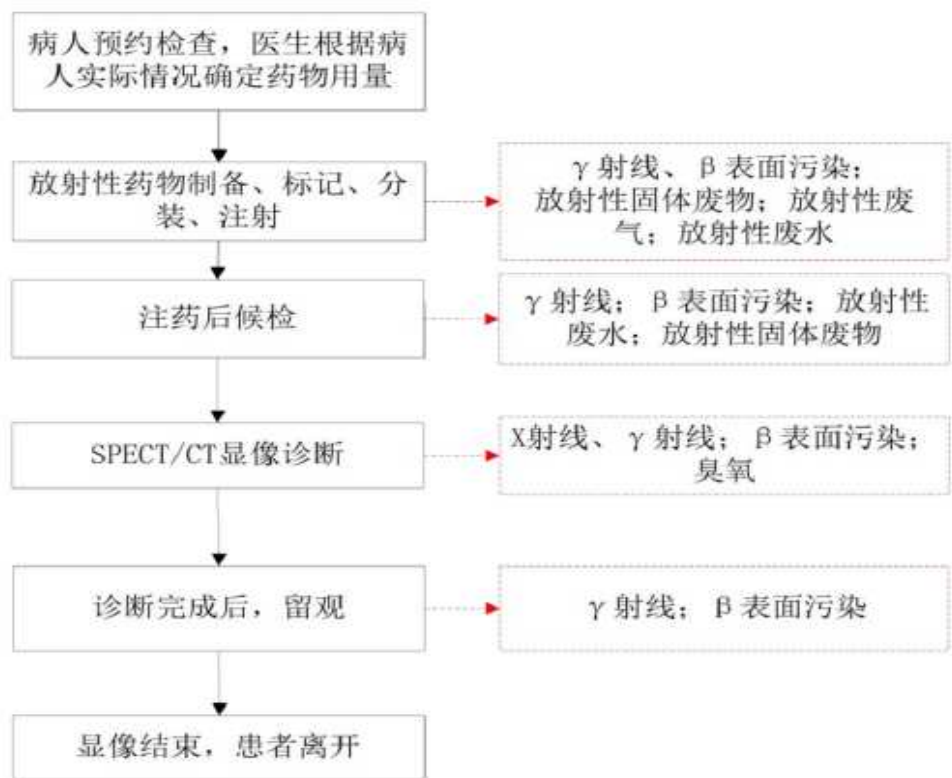


图 3-29 SPECT/CT 工作流程以及产污环节图

3.2.7.4 PET/CT 校准流程

本项目拟计划通过 3 种方式校准 PET/CT。①每日开机进行无源日常校准，保证设备正常运行进行；②直接使用 ^{18}F 药物进行校准，一般一周进行一次；③使用 ^{68}Ge 进行校准，一般为半年一次。根据校准需要，本项目拟配备 1 枚密封源 ^{68}Ge 校准源，活度为 $7.4 \times 10^7 \text{Bq}$ ，属于 V 类放射源。校准源为棒源，实物图片如下图，校准源特性见下表。

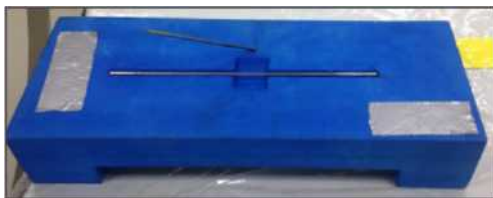


图 3-30 PET/CT 棒源实物图（示例）

表 3-33 PET/CT 校准源特性

核素名称	衰变类型及分支比	主要 γ 、X 射线能量 (keV) 与绝对强度 (%)	物理半衰期	毒性组分
^{68}Ge	ϵ (100)	XK_{β} : 10.3 (5.45) $\text{XK}_{\alpha 2}$: 9.22482 (13.07) $\text{XK}_{\alpha 1}$: 9.25174 (25.6)	270.8d	中毒组

备注: ^{68}Ge 参数取自《简明放射性同位素应用手册》中 4.2 同位素表。

密封校准源 ^{68}Ge 拟放置在铅防护罐内并置于校准源室内的保险柜中，铅防护罐的铅当量一般为 10mmPb。校准源室防护门设置门锁，日常管理做到双人双锁，钥匙分别由 PET/CT 两名工作人员保管。

需要校准时，技师将含密封校准源铅罐运至 PET/CT 机房内，打开铅罐后采用机械夹子将校准源放在检查床上即退出机房，到控制室内准备对设备进行校准。技师与校准源接触时其间距大于 1 m。使用结束后，工作人员将校准源放回储源铅罐，运回校准源室保险柜内，上锁并登记使用台账。校准源的使用过程快速、准确。校准源使用过程中不产生放射性废物，在整个操作过程中，校准源释放出 γ 射线对周边人员造成辐射影响。

^{18}F 校准过程与受检者显像检查相比，对环境和工作人员的辐射影响是很小的，因此，本分析使用密封源进行校准产生的辐射影响。质控通常选择在没有受检者的时候进行，具体操作流程见下图。

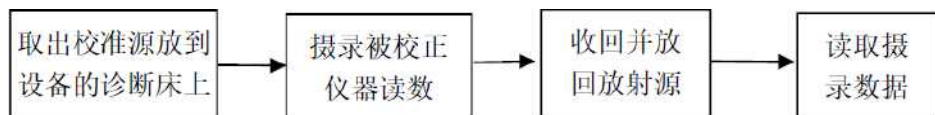


图 3-31 PET/CT 设备质控流程图

3.2.7.5 工作规划及人员配置

表 3-34 核素诊断核素使用规划

设备名称	使用核素	单次最大用量，mCi	单次最大用量，Bq	日最大接诊量，人	年工作天数，天	年最大接诊量
------	------	------------	-----------	----------	---------	--------

PET/CT	^{18}F	10	3.70E+08	20	250	5000
	^{11}C	15	5.55E+08	10	50	500
	^{13}N	15	5.55E+08	10	50	500
	^{15}O	25	9.25E+08	10	50	500
	^{64}Cu	4	1.48E+08	10	50	500
	^{68}Ga	10	3.70E+08	10	50	500
	^{89}Zr	2	7.40E+07	10	50	500
SPECT/CT	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	25	9.25E+08	10	50	500

表 3-35 核素诊断扫描设备工作负荷

设备名称	单次扫描时长, min	每年最多照射人次, 人	年最大出束时间, h
PET/CT	15	8000	2000
SPECT/CT	30	500	250

表 3-36 核医学科辐射工作人员配备计划

岗位类别	工作内容	工作地点	人数	排班计划
医生	制定检查方案, 审核影像诊断报告; 评估患者适应症及禁忌症; 管理放射性药物使用剂量及用药安全。	阅片室	2	轮班
技师	操作 PET-CT、SPECT-CT 设备, 完成图像采集; 设备日常维护与质量控制; 协助病人摆位治疗。	PET-CT 控制室, 机房; SPECT-CT 控制室, 机房	4	轮班
护士	患者预约与宣教(辐射防护告知); 放射性药物静脉注射(如 ^{18}F -FDG、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记药物); 监测患者注射后反应及辐射防护措施。	分装注射室	4	轮班

3.2.8 核素治疗

3.2.8.1 核素使用情况

核素治疗主要指利用开放型放射性药物对病变部位进行靶向性内照射治疗。本项目主要使用 ^{131}I 、 ^{177}Lu 开展核素治疗。

^{131}I 治疗主要针对甲亢和甲癌患者。患者口服含 ^{131}I 的药物, 利用该核素易在甲状腺组织内富集的特点, 通过 ^{131}I 衰变发出的 β 射线破坏病变组织细胞而达到治疗的目的。根据 ICRP 94 号出版物, 服用放射性碘治疗后的排放情况, 施予活度的大约 55% 是在治疗后最初 24h 排出, 22% 在第 2 个 24h 排出, 6% 在第 3 个 24h 排出。

核素治疗项目放射性核素使用量见下表。

表 3-37 核素治疗项目放射性核素使用量一览表

甲功测定、甲亢治疗、甲癌治疗、 ¹⁷⁷ Lu 治疗						
项目	单人平均用量 (MBq)	日诊疗 最大人数	日最大操作 量 (Bq)	日等效最大操 作量 (Bq)	一年诊断/治疗 的病人数量	年最大操作 量 (Bq)
甲功 测定	0.185(5μCi)	20	3.70E+06	3.70E+05	5000	9.25E+08
甲亢 治疗	555(15mCi)	10	5.55E+09	5.55E+08	2500	1.39E+12
甲癌 治疗	5550(150mCi)	5	2.78E+10	2.78E+09	500	2.78E+12
¹⁷⁷ Lu 治疗	1850(50mCi)	1	1.85E+09	1.85E+08	50	9.25E+10
合计	/	/	/	3.52E+09	/	/

备注：1.甲功测定、甲亢治疗安排在周一至周五，每天最多分别给药 20 人、10 人；

2.甲癌治疗集中在每周一、周四给药，每天最多给药 5 人；

3. ¹⁷⁷Lu 治疗每周给药一次，每天 1 人。

3.2.8.2 工作规划及人员配置

表 3-38 核素病房辐射工作人员规划

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、查房、急救等	诊室、医生办公室、急救室、病房	3 人	每天两班，8h/班
技师	分装、活度测量、给药等	储源室、分装注射室、技师办公室、甲功测定室	2 人	每天一班，8h/班
护士	治疗准备、注射、护理等	护士站、分装注射室、病房	6 人	每天三班，8h/班

表 3-39 核素病房辐射工作人员情况以及工作负荷一览表

甲功测定、甲亢治疗、甲癌治疗项目				
工艺名称	岗位配置	人员数量	操作内容	操作时间
分装药物	技师	1	药品分装，2 人轮岗	60s/次
指导甲功测定服药	技师	1	指导甲功测定服药，2 人轮岗	30s/次
指导甲亢、甲癌服药	技师+护士	2	在分装注射室通过摄像头观察，并通过语音系统指导患者在隔壁服药室服药，需 2 人（技师+护士）同时在场指导病人服药	60s/次
¹⁷⁷ Lu 治疗项目				
工艺名称	岗位配置	人员数量	操作内容	操作时间
注射药物	护士	1	给患者注射药剂	60s/次

3.3 辐射源项分析

3.3.1 施工期污染源项

(1) 噪声

施工期噪声主要来自混凝土搅拌作业、浇筑辅助器材拆卸作业、防护工程施工、装修工程施工以及设备拆机、安装等几个阶段，主要噪声源为施工机械、混凝土搅拌机等各种建筑施工机械运转时的噪声以及建筑材料运输过程中的交通噪声，另外还有突发性、冲击性、不连续性的敲打撞击噪声。

(2) 废水

施工期废水主要来自两个方面：一是施工泥浆废水，二是施工人员的生活废水，施工泥浆废水主要来自混凝土养护、砌砖保湿。

(3) 固体废物

固体废物主要是建筑垃圾和施工人员的生活垃圾。

(4) 扬尘

本项目在施工期各种施工将产生地面扬尘，另外机械和运输车辆作业时排放废气和扬尘，但这些方面的影响仅局限在施工现场附近区域。

综上，施工期主要环境影响评价因子为：噪声、扬尘、施工废水、生活污水、生活垃圾和建材垃圾。

3.3.2 质子治疗系统

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

3.3.2.1 瞬发辐射源

3.3.2.1.1 瞬发辐射场分析

对于质子治疗系统，在质子束流形成、加速、传输和引出等过程中，都会发生束流的损失。损失的质子撞击在装置的结构部件，会与部件材料中的原子核发生核反应。

质子治疗系统从同步加速器引出的质子最高能量为 240MeV，治疗终端输出的能量在 70MeV~240MeV 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 射线球管出束期间，会产生 X 射线，也是质子治疗期间瞬发辐射场的组成部分。

3.3.2.1.2 各环节束流损失分析

按照设备供应商所提供的数据，本项目质子治疗系统主要的束流损失点主要分布在 SC 系列质子回旋加速器、能量选择系统的降能器、准直器和治疗室终端，具体见表 3-40 及图 3-32~图 3-34。

表 3-40 质子治疗系统束流损失表

工况	序号	损失部位	能量, MeV	损失流强, nA	靶材料	损失方式
调试工况	1	静电偏转板	240	180	Mo/Ti	集中损失
	2	磁通道 1	240	90	Fe	集中损失

工况	序号	损失部位	能量, MeV	损失流强, nA	靶材料	损失方式
	3	补偿磁通道 1	240	90	Fe	集中损失
	4	法拉第筒	240	540	Cu	集中损失
220 MeV 治疗工况	1	静电偏转板	240	15.1515	Mo/Ti	集中损失
	2	磁通道 1	240	7.5758	Fe	集中损失
	3	补偿磁通道 1	240	7.5758	Cu	集中损失
	5	降能器	240	3.0475	C	集中损失
	6	准直器	220	29.9546	Cu	集中损失
	7	流强调制狭缝	220	0	W	集中损失
	8	动量分散狭缝前束流 传输段	220	0	06Cr19Ni10 不锈钢	均匀损失
	9	动量分散控制狭缝	220	9.4205	W	集中损失
	10~13	治疗室等中心点	220	3.0319	H ₂ O	集中损失
150 MeV 治疗工况	1	静电偏转板	240	166.6667	Mo/Ti	集中损失
	2	磁通道 1	240	83.3333	Fe	集中损失
	3	补偿磁通道 1	240	83.3333	Cu	集中损失
	5	降能器	240	115.9917	C	集中损失
	6	准直器	150	373.0281	Cu	集中损失
	7	流强调制狭缝	150	0	W	集中损失
	8	动量分散狭缝前束流 传输段	150	0.172	06Cr19Ni10 不锈钢	均匀损失
	9	动量分散控制狭缝	150	9.9550	W	集中损失
	10~13	治疗室等中心点	150	0.96	H ₂ O	集中损失
70 MeV 治 疗工况	1	静电偏转板	240	166.6667	Mo/Ti	集中损失
	2	磁通道 1	240	83.3333	Fe	集中损失
	3	补偿磁通道 1	240	83.3333	Cu	集中损失
	5	降能器	240	178.145	C	集中损失
	6	准直器	70	317.4932	Cu	集中损失
	7	流强调制狭缝	70	0	W	集中损失
	8	动量分散狭缝前束流 传输段	70	1.7446	06Cr19Ni10 不锈钢	均匀损失
	9	动量分散控制狭缝	70	2.4641	W	集中损失
	10~13	治疗室等中心点	70	0.153	H ₂ O	集中损失

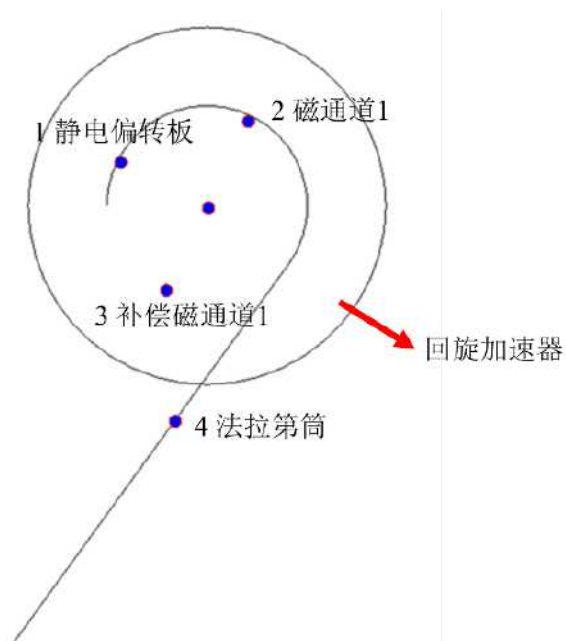


图 3-32 加速器内部束流损失示意图

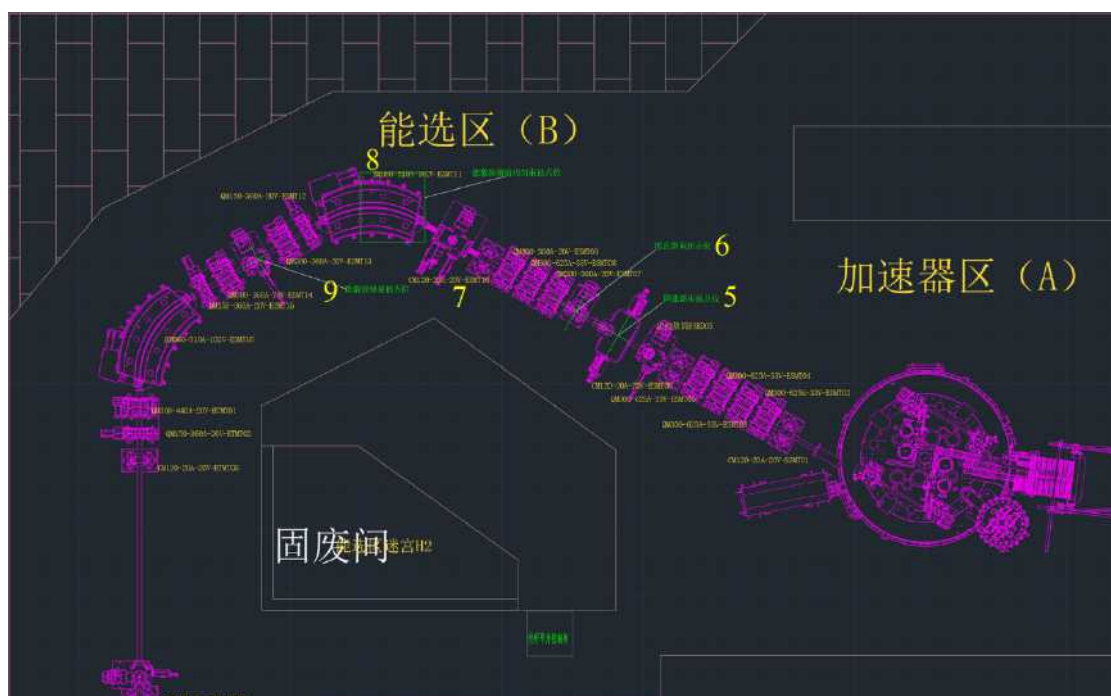


图 3-33 加速器大厅束流损失位置和方向示意图

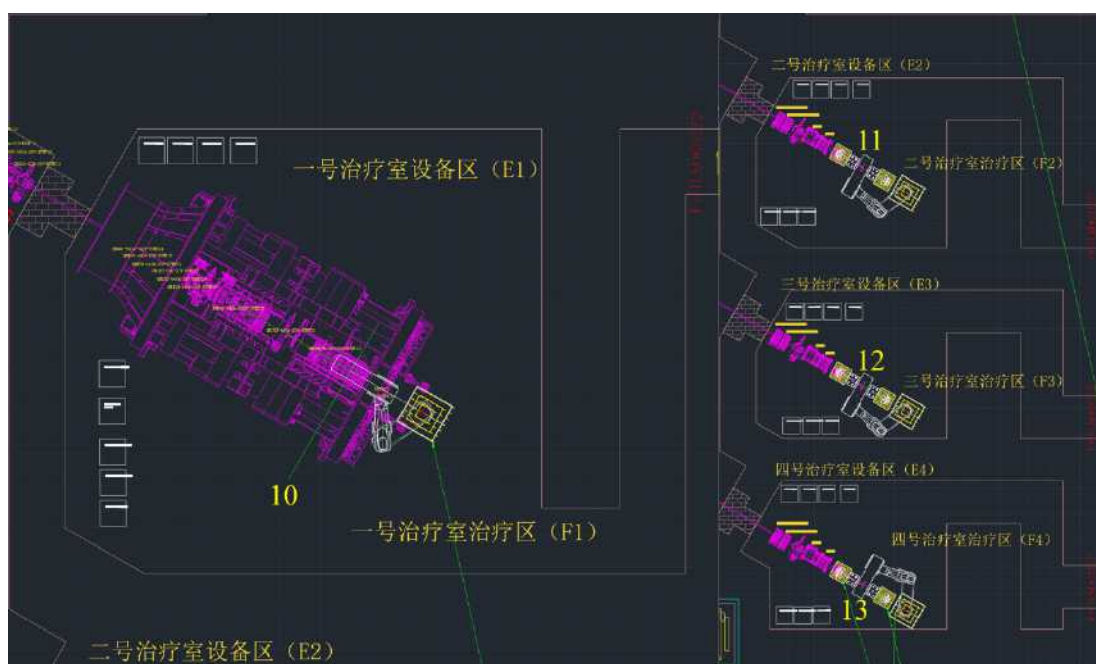


图 3-34 治疗室束流损失位置和方向示意图

3.3.2.1.3 辐射场源项估算

3.3.2.1.3.1 FLUKA 程序

本次评价中，在对辐射场源项进行估算时，主要采用 FLUKA 程序，通过该程序模拟不同能量的质子与不同材质的靶体作用的中子和光子能谱及其角分布。

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

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

3.3.2.1.3.2 中子能谱

根据对质子治疗系统瞬时辐射场的分析结果，其瞬发辐射场起决定性作用的是中子。中子产额、能谱和角分布与质子的能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。FLUKA 程序模拟的质子打铁靶和水靶产生的辐射场如图 3-35 和图 3-36 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。

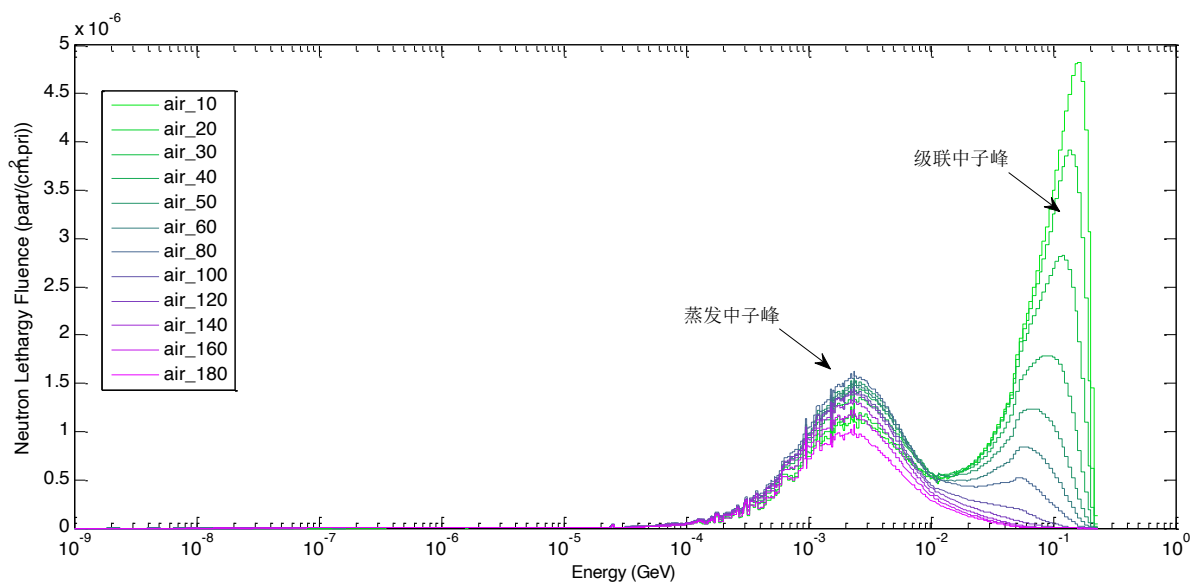


图 3-35 质子打铁靶产生的中子能谱角分布

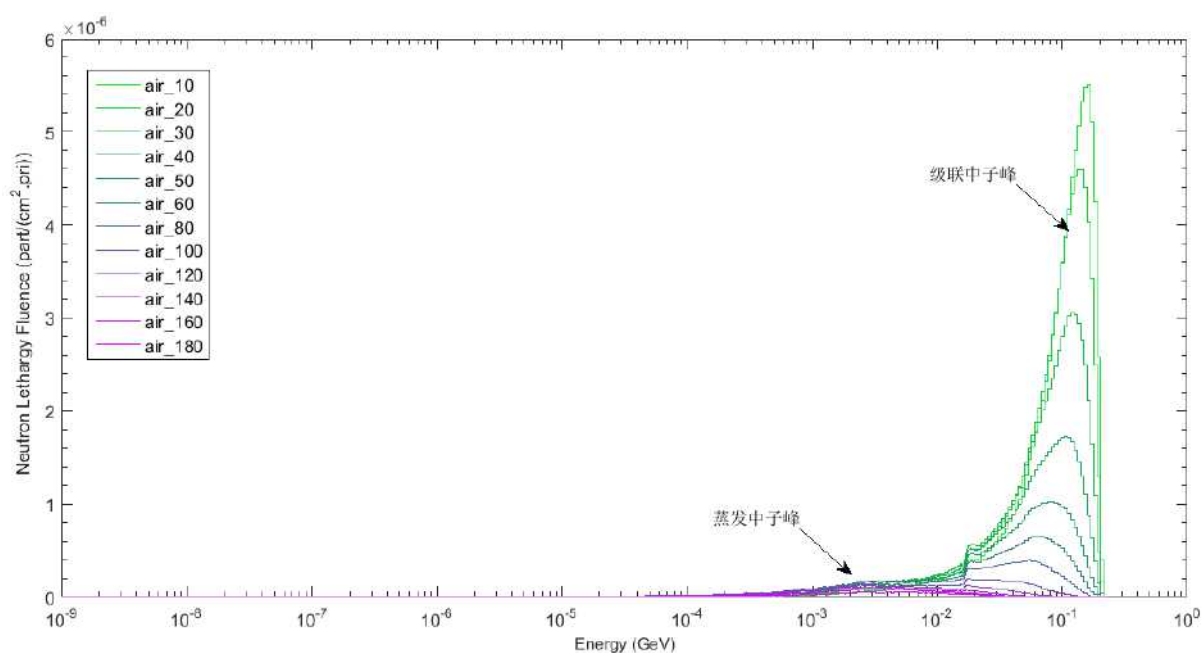


图 3-36 质子打水靶产生的中子能谱角分布

3.3.2.1.3.3 光子能谱

利用 FLUKA 程序模拟了建设单位质子打铁靶和水靶产生的光子能谱，如图 3-37 和图 3-38 所示。从角分布来看，光子几乎是各向同性的。无论是打铁靶和水靶，谱峰出现在 1MeV~10MeV 之间。

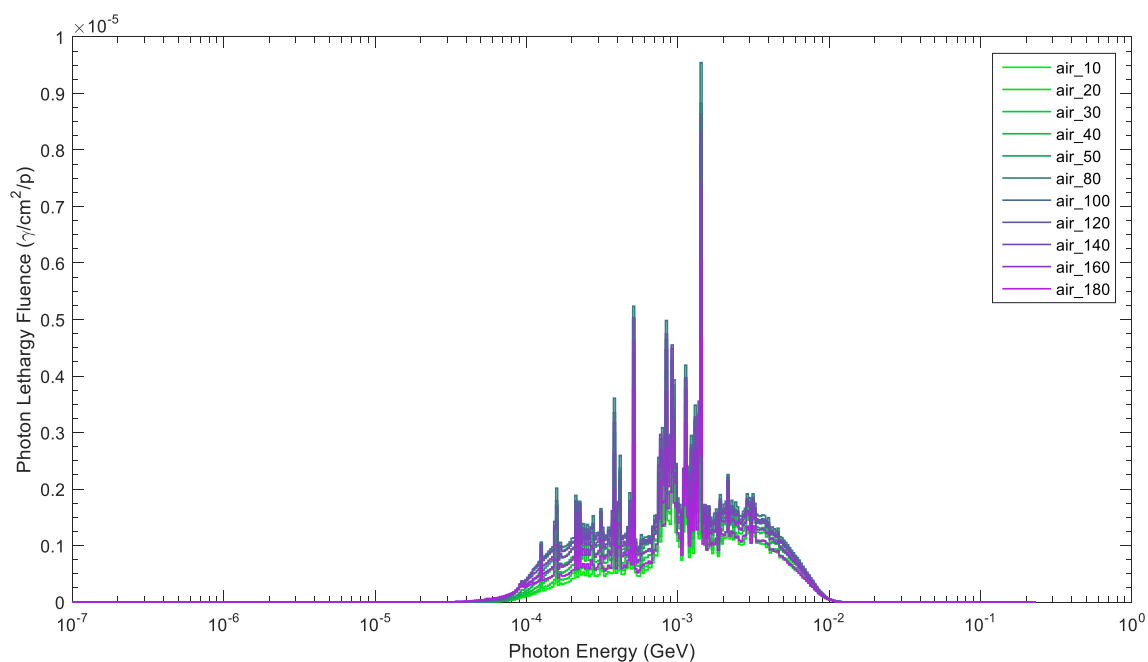


图 3-37 质子打铁靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

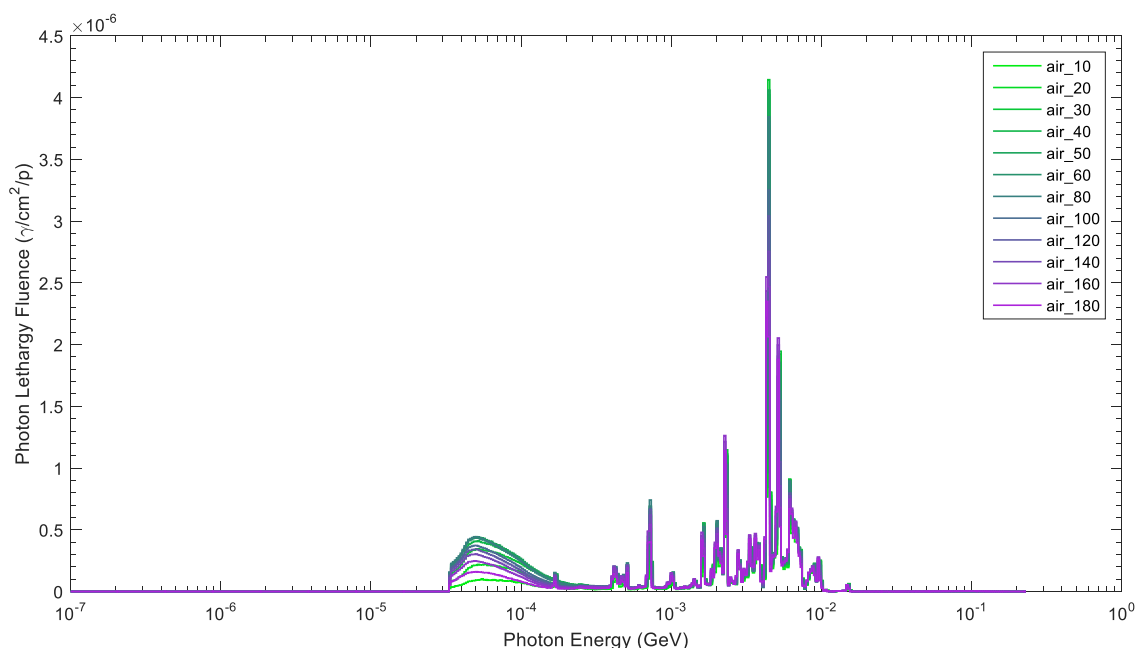


图 3-38 质子打水靶距靶 1m 处的光子能谱角分布

3.3.2.2 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，天空反散射剂量的主要成分为中子，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 3-41。由表 3-41 可知，质子治疗系统加速器大厅和旋转束治疗室顶板上方为屋面，剂量率大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，需要考虑中子反散射影响。

表 3-41 质子治疗系统各区域顶板外剂量率

关注点	位置及周围环境	剂量率计算结果, $\mu\text{Sv/h}$
12	质子加速器大厅顶板上方（屋面）	4.91
23	质子束线区顶板上方（能选电源室）	0.03
RG5	旋转束治疗室顶板上方（屋面）	8.25
R7	固定束治疗室顶板上方（医师诊室、办公室）	0.58

本次评价利用 NCRP NO.144 报告第 331 页 Stapleton 公式对质子治疗系统顶板上方区域的中子天空反散射进行计算，具体公式如下。各计算参数的取值列于表 3-42，计算结果列于表 3-43。

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

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

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

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

h 为常数，取值 40m；

r 为源到关注点的距离，m；

λ 为与中子能量上限对应的空气的中子有效吸收长度，m；

Q 为穿透屋顶屏蔽达到顶板外表面的中子个数，n/h；

d 为源到顶板外表面的距离，m；

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

$H(d,t)$ 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 3-42 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 P330 Fig.6.5，能量保守按 240MeV 考虑

d, m	17.25m	CAD 图纸测量
g, Sv·m ²	取值为 1.24E-14	文献《ACCELERATOR SKYSHINE:TYGER,TYGER,BURNING BRIGHT》 (Particle Accelerator,1994,vol.44(1),pp1-15,GEOFFREY B.STAPLETON)表 4, 保守取质子能量 240MeV, 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 3-41	FLUKA 程序计算

表 3-43 不同距离 r 处天空反散射造成的剂量率

距离 r, m	H(r), Sv/h	
	质子加速器大厅顶板	旋转束治疗室顶板
25	3.31E-07	5.57E-07
50	1.63E-07	2.75E-07
100	6.05E-08	1.02E-07

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 5.57E-07Sv/h, 该处由于天空反散射造成的公众年受照剂量为 2.55E-02mSv (室外区域居留因子 T=1/40, 年受照时间 t 取质子治疗系统年出束时间 1833.33h)。

3.3.2.3 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加速器停机后, 需要进入加速器大厅进行检查、维护维修操作的工作人员以及进入治疗室内对患者进行摆位或解除摆位等操作的摆位人员。本次评价主要对质子治疗系统空气、冷却水、结构部件、QA 水箱、治疗后患者、土壤和地下水的感生放射性进行分析评价。

根据本项目束流损失表, 质子束流能量主要有 240 MeV、220 MeV、150 MeV 和 70 MeV 等。在对感生放射性进行计算时, 分别取各束流损失点可能出现的最大束流损失能量和最大束流损失强度进行保守计算。用于活化计算的束流损失源项见表 3-44。

表 3-44 本项目质子治疗系统活化计算束流损失参数一览表

工况	序号	损失部位	能量, MeV	损失流强, nA	靶材料	损失方式
----	----	------	------------	-------------	-----	------

调试工况	1	静电偏转板	240	180	Mo+Ti	集中损失
	2	磁通道 1	240	90	Fe	集中损失
	3	补偿磁通道 1	240	90	Fe	集中损失
	4	法拉第筒	240	540	Cu	集中损失
治疗工况	1	静电偏转板	240	166.6667	Mo+Ti	集中损失
	2	磁通道 1	240	83.3333	Fe	集中损失
	3	补偿磁通道 1	240	83.3333	Cu	集中损失
	5&6	降能器&准直器	240	500	C+W	集中损失
					Cu	集中损失
	7	流强调制狭缝	220	0	W	集中损失
	8	动量分散狭缝前束流传输段	220	0	06Cr19Ni10 不锈钢	均匀损失
	9	动量分散控制狭缝	220	10	W	集中损失
	10~13	治疗室等中心点	220	3	H ₂ O/ Tissue soft/ PMMA+H ₂ O	集中损失

3.3.2.3.1 空气的感生放射性

质子治疗系统运行期间初级粒子或次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、 (γ, n) 反应和高能中子散裂反应等产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素如 ^3H 和 ^7Be ，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素，具体见表 3-45。

表 3-45 空气活化产生的主要放射性核素

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

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告。

3.3.2.3.1.1 空气感生放射性静态饱和浓度

本次评价利用 FLUKA 程序计算了不考虑通风的情况下，停机后机房内空气感生放射的活度和浓度。质子治疗系统辐射工作场所划分为加速器大厅和束流传输线、旋转束治疗室、固定束治疗室，体积分别为 2740m³、3882m³、330m³，计算条件为：①加速器大厅和束流传输线区，使用活化计算治疗工况束损（具体见表 3-44），连续出束 1833.33h（主要空气活化核素中 Ar-41 半衰期最长，为 1.83h，连续出束 1833.33h 约为 Ar-41 半衰期的一千倍，浓度计算结果已达到静态饱和）；②治疗室以最保守的治疗条件 220MeV、3nA 的束流（具体见表 3-44）连续治疗 2min（计算结果可偏保守地反映每次治疗结束后，治疗室内的空气活化情况）。计算结果列于表 3-46。

表 3-46 空气感生放射性停机时刻活度及浓度计算结果

活化核素	停机时刻活度 (Bq)			停机时刻浓度 (Bq/m ³)		
	加速器大厅和束流传输线	旋转束治疗室	固定束治疗室	加速器大厅和束流传输线	旋转束治疗室	固定束治疗室
C-11	1.51E+08	3.90E+04	9.24E+03	5.51E+04	1.00E+01	2.80E+01
N-13	1.53E+08	1.09E+05	2.08E+04	5.58E+04	2.80E+01	6.31E+01
O-15	1.03E+08	2.00E+05	4.93E+04	3.75E+04	5.15E+01	1.49E+02
Ar-41	1.85E+08	3.55E+03	1.57E+03	6.75E+04	9.16E+01	4.75E+00
总计	5.92E+08	3.51E+05	8.09E+04	2.16E+05	9.04E+01	2.45E+02

3.3.2.3.1.2 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度

质子治疗系统运行期间，加速器大厅、束流传输线以及执行治疗任务的治疗室均保持通风系统开启状态，换气次数均为 4 次/小时。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻各场所内空气感生放射性动态饱和浓度可由下式计算。计算结果列表 3-47。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} C_{sat} \quad (\text{公式 3.3.2.3.1.2-1})$$

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/m³；

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

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

r_1 为正常运行时房间内的换气次数， s^{-1} 。

表 3-47 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度计算结果

核素	动态饱和浓度， Bq/m^3
^{11}C	1.86E+04
^{13}N	2.85E+04
^{15}O	3.13E+04
^{41}Ar	5.85E+03
总计	8.43E+04

备注：按加速器大厅和束流传输线的静态饱和浓度计算而得。

3.3.2.3.1.3 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下式计算。

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

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

式中，

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

t 为质子治疗系统年运行时间， s ；

R_t 为质子治疗系统正常运行状态下的通风速率， cm^3/s ；

保守将加速器大厅和束流传输线的饱和浓度作为各区域的饱和浓度考虑，由此可计算得出质子治疗系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量和年均排放速率，列于表 3-48。

表 3-48 质子治疗系统运行每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率

核素	年排放量， Bq	年平均排放速率， Bq/s
^{11}C	9.48E+11	3.01E+04

核素	年排放量, Bq	年平均排放速率, Bq/s
^{13}N	1.45E+12	4.61E+04
^{15}O	1.59E+12	5.04E+04
^{41}Ar	3.02E+11	9.59E+03
总计	4.29E+12	1.36E+05

3.3.2.3.2 冷却水的感生放射性

根据《加速器保健物理》(H.W.帕特森, R.H.托马斯), 高能中子与冷却水中的氧发生散裂反应, 主要可能产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 等放射性核素, 各放射性核素的参数见表 3-49。其中, ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 的半衰期很短, 装置停机后, 这些核素将迅速衰变, 浓度也会很快降低。因此, 冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 。

表 3-49 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}
^3H	12.3a	1.78E-09
^7Be	53.1d	1.51E-07
^{11}C	20.4min	5.67E-04
^{13}N	9.97min	1.16E-03
^{15}O	2.04min	5.67E-03

本项目共有 4 个冷却水回路, 涉及活化的冷却水有 2 路, 其中回路 1 用于冷却加速器内部的 RF 腔、静电偏转板、束测、分子泵、离子源等部件; 回路 3 主要用于冷却束流传输线上的法拉第筒(兼阻挡器)、二极磁铁、四极磁铁、降能器、准直器等部件。保守考虑两个回路中冷却水总量约为 3 m^3 。

本次评价利用 FLUKA 程序对回旋加速器和束流传输线 2 个冷却水回路中的感生放射性进行了模拟计算, 冷却水计算模型见图 3-39, 计算时使用的参数如下:

- (1) 束流损失: 使用活化计算治疗工况束损, 连续出束 1833.33 h。
- (2) 模型简化: 回旋加速器内部设置一管状水体, 体积约 20 L; 降能器和准直器外部包裹一层水壳, 体积约 0.2 L; 能选区束线下方 25 cm 处设置一水柱, 体积约 200 L。

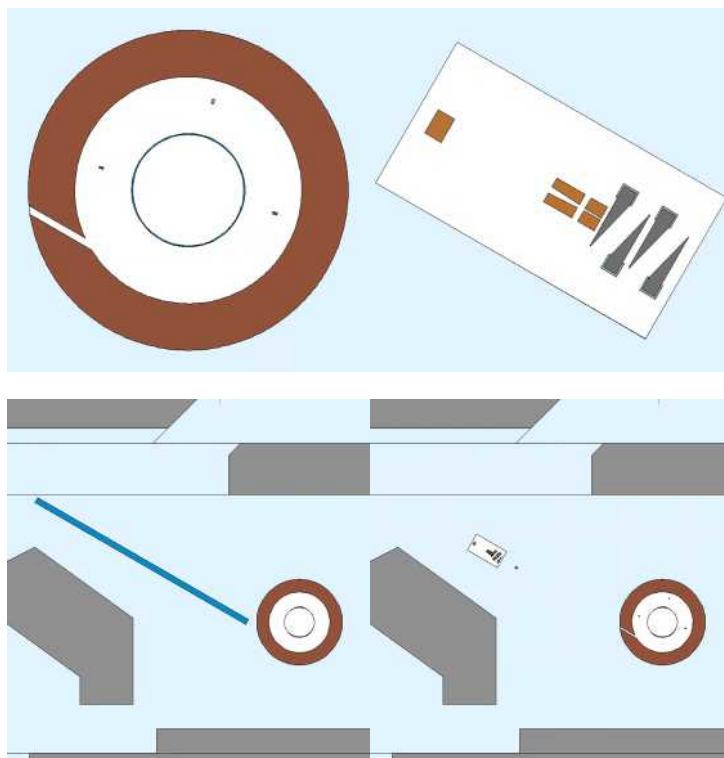


图 3-39 冷却水计算模型

加速器连续出束 1833.33 h 后，冷却水中活化核素活度浓度计算结果见表 3-50。

表 3-50 冷却水活化计算结果

活化核素	回旋加速器冷却水饱和活度 (Bq)	束流传输线冷却水饱和活度 (Bq)	总饱和活度 (Bq)	饱和浓度 (Bq/m ³)
H-3	4.05E+05	9.91E+06	1.03E+07	3.44E+06
Be-7	2.39E+06	1.59E+08	1.61E+08	5.37E+07
C-11	1.10E+07	6.44E+08	6.55E+08	2.18E+08
N-13	1.55E+06	8.49E+07	8.64E+07	2.88E+07
O-15	3.00E+07	1.50E+09	1.53E+09	5.11E+08
总计	4.54E+07	2.40E+09	2.45E+09	8.15E+08

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修时或事故情况下发生泄漏时才需要排放。

本项目设有冷却水集水井，用于暂存维修时更换下来冷却水的或冷却水管泄漏出来的冷却水。质子治疗系统维修时更换下来冷却水的或冷却水管泄漏出来的冷却水经地漏收集排入冷却水集水井内。

冷却水集水井内的冷却水经一定时间暂存后，短半衰期核素 ¹¹C、¹³N、¹⁵O 等将迅速衰变，浓度也很快降低，因此只需考虑半衰期较长的 ³H 和 ⁷Be。对冷却水集水井内

的冷却水取样分析其 ^3H 和 ^7Be 的含量，监测达标并经生态环境主管部门同意后方可排入院内污水管网。

3.3.2.3.3 结构部件的感生放射性

结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。质子治疗系统产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如回旋加速器（Fe）、静电偏转板（Ti、Mo）、磁通道 1（Fe）、补偿磁通道 1（Fe）、降能器（C、W）、准直器（Cu）、动量分散控制狭缝（W）等。相关实验研究表明，停机后被活化部件中的核素主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

计算方法：根据质子治疗系统的主要的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序，计算了质子治疗系统连续运行 1833.33 小时后，停机时刻回旋加速器、降能器、准直器等主要束流损失部位的感生放射性饱和活度。统计了半衰期大于 1 h，停机时刻活度大于 $1\text{E}+04\text{ Bq}$ 的放射性核素。同时给出了停机不同时刻活化部件表面 30 cm 处剂量率。结果如下。

（1）回旋加速器

表 3-51 回旋加速器（Fe）感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度（Bq）
1	^3H	12.3221	y	$2.47\text{E}+08$
2	^7Be	53.3	d	$1.13\text{E}+08$
3	^{18}F	109.734	m	$1.36\text{E}+07$
4	^{22}Na	2.6019	y	$2.32\text{E}+05$
5	^{24}Na	14.9578	h	$6.84\text{E}+06$
6	^{28}Mg	20.915	h	$1.58\text{E}+05$
7	^{31}Si	157.24	m	$1.08\text{E}+07$
8	^{33}P	25.35	d	$2.80\text{E}+07$
9	^{32}P	14.267	d	$6.04\text{E}+07$
10	^{35}S	87.35	d	$2.59\text{E}+07$
11	^{38}S	170.3	m	$1.72\text{E}+05$
12	^{37}Ar	35.01	d	$1.88\text{E}+08$
13	^{39}Ar	268	y	$1.60\text{E}+05$
14	^{41}Ar	109.61	m	$1.29\text{E}+07$
15	^{42}K	12.359	h	$2.10\text{E}+08$
16	^{43}K	22.28	h	$6.24\text{E}+07$
17	^{47}Ca	4.536	d	$3.40\text{E}+06$
18	^{45}Ca	162.61	d	$7.42\text{E}+07$
19	^{48}Sc	43.71	h	$2.22\text{E}+08$

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
20	⁴⁷ Sc	3.3491	d	8.94E+08
21	⁴⁶ Sc	83.808	d	1.11E+09
22	⁴⁴ Sc	4.042	h	3.09E+09
23	⁴⁴ Sc	58.62	h	1.55E+09
24	⁴³ Sc	3.891	h	7.53E+08
25	⁴⁵ Ti	184.8	m	2.89E+09
26	⁴⁴ Ti	59.1	y	2.14E+06
27	⁴⁸ V	15.974	d	1.73E+10
28	⁴⁹ V	330	d	4.66E+09
29	⁴⁸ Cr	21.56	h	6.99E+08
30	⁵¹ Cr	27.7004	d	4.91E+10
31	⁵⁴ Mn	312.1	d	1.52E+10
32	⁵² Mn	5.591	d	2.13E+10
33	⁵⁶ Mn	2.5788	h	2.19E+10
34	⁵⁹ Fe	44.495	d	2.07E+09
35	⁵² Fe	8.273	h	1.05E+09
36	⁵⁵ Fe	2.756	y	1.31E+10
37	⁵⁶ Co	77.236	d	4.53E+09
38	⁵⁵ Co	17.53	h	2.85E+09
39	⁶¹ Co	1.65	h	1.43E+04
40	⁵⁷ Co	271.8	d	9.67E+07
41	⁵⁸ Co	70.883	d	2.29E+07
42	⁵⁸ Co	8.856	h	2.18E+07
43	⁵⁶ Ni	6.081	d	1.58E+05
44	⁵⁷ Ni	35.6	h	8.46E+05
总计				1.65E+11

表 3-52 停机不同时刻，距离回旋加速器表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离回旋加速器表面 30 cm 处剂量率 (μSv/h)
1	0	401.46
2	12 h	161.40
3	24 h	150.68
4	2 d	140.58
5	7 d	104.64
6	30 d	47.32
7	6 m	17.79
8	1 a	11.48

(2) 静电偏转板

表 3-53 静电偏转板电极 (Ti) 感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	³ H	12.3221	y	3.53E+07
2	⁷ Be	53.3	d	4.41E+07
3	¹⁸ F	109.734	m	1.03E+07
4	²² Na	2.6019	y	7.49E+05
5	²⁴ Na	14.9578	h	1.45E+07

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
6	²⁸ Mg	20.915	h	1.72E+06
7	³¹ Si	157.24	m	5.65E+07
8	³² Si	163.3	y	1.16E+04
9	³³ P	25.35	d	1.46E+08
10	³² P	14.267	d	2.97E+08
11	³⁵ S	87.35	d	1.20E+08
12	³⁸ S	170.3	m	8.90E+05
13	³⁷ Ar	35.01	d	7.06E+08
14	³⁹ Ar	268	y	4.97E+05
15	⁴¹ Ar	109.61	m	4.72E+07
16	⁴² Ar	32.9	y	4.65E+04
17	⁴² K	12.359	h	5.20E+08
18	⁴³ K	22.28	h	1.67E+08
19	⁴⁷ Ca	4.536	d	1.08E+07
20	⁴⁵ Ca	162.61	d	1.31E+08
21	⁴⁸ Sc	43.71	h	3.19E+08
22	⁴⁷ Sc	3.3491	d	2.87E+09
23	⁴⁶ Sc	83.808	d	1.40E+09
24	⁴⁴ Sc	4.042	h	3.77E+09
25	⁴⁴ Sc	58.62	h	1.90E+09
26	⁴³ Sc	3.891	h	1.09E+09
27	⁴⁵ Ti	184.8	m	2.50E+09
28	⁴⁴ Ti	59.1	y	2.29E+06
29	⁴⁸ V	15.974	d	5.22E+08
30	⁴⁹ V	330	d	1.73E+07
31	⁴⁸ Cr	21.56	h	1.00E+05
32	⁵¹ Cr	27.7004	d	1.06E+06
总计				1.67E+10

表 3-54 停机不同时刻，距离静电偏转板电极表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离静电偏转板电极表面 30 cm 处剂量率 (μSv/h)
1	0	35587.28
2	12 h	17742.02
3	24 h	15103.59
4	2 d	12715.42
5	7 d	7573.21
6	30 d	4323.32
7	6 m	1070.10
8	1 a	239.82

表 3-55 静电偏转板束流切割板 (Mo) 感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	³ H	12.3221	y	1.27E+06
2	⁷ Be	53.3	d	3.43E+05

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
3	¹⁸ F	109.734	m	1.43E+04
4	⁴⁷ Sc	3.3491	d	1.43E+04
5	⁶⁴ Cu	12.7007	h	5.74E+04
6	⁶¹ Cu	3.339	h	1.43E+04
7	⁶⁵ Zn	243.93	d	5.59E+04
8	⁷² Ga	14.025	h	1.43E+04
9	⁶⁷ Ga	3.2615	d	4.45E+05
10	⁶⁶ Ga	9.304	h	1.87E+05
11	⁶⁸ Ga	67.843	m	3.90E+05
12	⁷¹ Ge	11.42	d	1.60E+06
13	⁶⁸ Ge	271.04	d	8.92E+04
14	⁶⁹ Ge	38.9	h	6.60E+05
15	⁷⁸ As	90.7	m	1.43E+04
16	⁷⁶ As	26.24	h	8.61E+04
17	⁷³ As	80.3	d	1.39E+06
18	⁷⁴ As	17.78	d	2.45E+05
19	⁷² As	26	h	2.06E+06
20	⁷¹ As	65.3	h	1.16E+06
21	⁷⁵ Se	119.779	d	2.08E+06
22	⁷² Se	8.4	d	9.45E+05
23	⁷³ Se	7.18	h	1.47E+06
24	⁷⁶ Br	16.16	h	6.96E+06
25	⁷⁵ Br	96.7	m	2.91E+06
26	⁸³ Br	2.374	h	1.43E+04
27	⁸² Br	35.284	h	2.84E+04
28	⁷⁷ Br	57.04	h	1.18E+07
29	⁷⁷ Kr	71.25	m	7.15E+06
30	⁷⁶ Kr	14.8	h	2.41E+06
31	⁷⁹ Kr	34.96	h	2.17E+07
32	⁸¹ Rb	4.571	h	3.91E+07
33	⁸³ Rb	86.2	d	3.27E+07
34	⁸⁴ Rb	32.82	d	2.54E+06
35	⁸⁶ Rb	18.671	d	4.05E+05
36	⁸⁹ Sr	50.56	d	1.68E+05
37	⁹¹ Sr	9.68	h	1.43E+04
38	⁹² Sr	2.61	h	1.43E+04
39	⁸³ Sr	32.41	h	6.27E+07
40	⁸⁵ Sr	64.849	d	6.37E+07
41	⁸⁵ Sr	67.63	m	1.33E+07
42	⁸⁰ Sr	106.3	m	5.87E+06
43	⁸² Sr	25.35	d	4.46E+07
44	⁹¹ Y	58.56	d	7.04E+05
45	⁹⁰ Y	64.046	h	3.26E+06
46	⁹⁰ Y	3.232	h	1.63E+06
47	⁹³ Y	10.17	h	1.58E+05
48	⁹² Y	3.54	h	3.01E+05
49	⁸⁶ Y	14.74	h	1.45E+08
50	⁸⁵ Y	2.67	h	5.45E+07

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
51	⁸⁵ Y	4.9	h	3.49E+07
52	⁸⁸ Y	106.626	d	3.40E+07
53	⁸⁷ Y	79.89	h	1.77E+08
54	⁸⁷ Y	13.38	h	2.91E+07
55	⁹⁷ Zr	16.749	h	1.87E+05
56	⁹⁵ Zr	64.032	d	8.64E+05
57	⁸⁷ Zr	1.68	h	1.19E+08
58	⁸⁶ Zr	16.5	h	7.63E+07
59	⁸⁹ Zr	78.364	h	2.24E+08
60	⁸⁸ Zr	83.4	d	9.42E+07
61	⁹⁷ Nb	72.1	m	2.47E+07
62	⁹¹ Nb	680	y	5.22E+04
63	⁹¹ Nb	60.86	d	5.48E+07
64	⁹⁶ Nb	23.35	h	2.29E+07
65	⁹⁵ Nb	34.991	d	3.24E+07
66	⁹⁵ Nb	3.61	d	2.14E+07
67	⁸⁹ Nb	2.03	h	6.29E+07
68	⁸⁹ Nb	66	m	5.19E+07
69	⁹⁰ Nb	14.6	h	1.99E+08
70	⁹⁹ Mo	65.936	h	2.25E+07
71	⁹³ Mo	6.85	h	7.76E+07
72	⁹⁰ Mo	5.56	h	5.37E+07
73	⁹³ Tc	2.78	h	2.32E+07
74	⁹⁴ Tc	293	m	1.46E+07
75	⁹⁵ Tc	19.258	h	1.59E+07
76	⁹⁵ Tc	61.94	d	9.01E+06
77	⁹⁶ Tc	4.27	d	2.05E+07
78	⁹⁵ Ru	1.6073	h	7.17E+04
79	⁹⁷ Ru	2.8376	d	2.87E+04
总计				2.04E+09

表 3-56 停机不同时刻，距离静电偏转板束流切割板表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离静电偏转板束流切割板表面 30 cm 处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
1	0	6620.26
2	12 h	3405.25
3	24 h	2600.58
4	2 d	1753.40
5	7 d	770.63
6	30 d	392.29
7	6 m	211.85
8	1 a	88.37

(3) 磁通道 1

表 3-57 磁通道 1 (Fe) 感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	³ H	12.3221	y	2.41E+07
2	⁷ Be	53.3	d	2.27E+07
3	¹⁸ F	109.734	m	2.67E+06
4	²² Na	2.6019	y	8.09E+04
5	²⁴ Na	14.9578	h	1.39E+06
6	²⁸ Mg	20.915	h	5.74E+04
7	³¹ Si	157.24	m	3.99E+06
8	³³ P	25.35	d	9.86E+06
9	³² P	14.267	d	2.18E+07
10	³⁵ S	87.35	d	8.58E+06
11	³⁸ S	170.3	m	4.30E+04
12	³⁷ Ar	35.01	d	5.80E+07
13	³⁹ Ar	268	y	4.17E+04
14	⁴¹ Ar	109.61	m	2.98E+06
15	⁴² K	12.359	h	4.51E+07
16	⁴³ K	22.28	h	1.38E+07
17	⁴⁷ Ca	4.536	d	4.88E+05
18	⁴⁵ Ca	162.61	d	1.19E+07
19	⁴⁸ Sc	43.71	h	2.31E+07
20	⁴⁷ Sc	3.3491	d	1.16E+08
21	⁴⁶ Sc	83.808	d	1.53E+08
22	⁴⁴ Sc	4.042	h	5.90E+08
23	⁴⁴ Sc	58.62	h	2.97E+08
24	⁴³ Sc	3.891	h	1.63E+08
25	⁴⁵ Ti	184.8	m	5.04E+08
26	⁴⁴ Ti	59.1	y	4.24E+05
27	⁴⁸ V	15.974	d	2.01E+09
28	⁴⁹ V	330	d	4.57E+08
29	⁴⁸ Cr	21.56	h	9.05E+07
30	⁵¹ Cr	27.7004	d	3.55E+09
31	⁵⁴ Mn	312.1	d	5.60E+08
32	⁵² Mn	5.591	d	1.54E+09
33	⁵⁶ Mn	2.5788	h	2.19E+08
34	⁵⁹ Fe	44.495	d	9.98E+04
35	⁵² Fe	8.273	h	8.77E+07
36	⁵⁵ Fe	2.756	y	3.68E+08
37	⁵⁶ Co	77.236	d	1.81E+08
38	⁵⁵ Co	17.53	h	1.43E+08
39	⁵⁷ Co	271.8	d	5.89E+06
40	⁵⁸ Co	70.883	d	1.65E+06
41	^{58m} Co	8.856	h	1.57E+06
42	⁵⁶ Ni	6.081	d	2.87E+04
43	⁵⁷ Ni	35.6	h	1.43E+05
总计				1.13E+10

表 3-58 停机不同时刻，距离磁通道 1 表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离磁通道 1 表面 30 cm 处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
1	0	41623.61
2	12 h	21695.95
3	24 h	20412.58
4	2 d	18650.87
5	7 d	13059.61
6	30 d	4821.90
7	6 m	874.81
8	1 a	417.06

(4) 补偿磁通道 1

表 3-59 补偿磁通道 1 (Fe) 感生放射性模拟结果

	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	^3H	12.3221	y	2.39E+07
2	^7Be	53.3	d	2.33E+07
3	^{18}F	109.734	m	2.78E+06
4	^{22}Na	2.6019	y	6.69E+04
5	^{24}Na	14.9578	h	1.74E+06
6	^{28}Mg	20.915	h	1.29E+05
7	^{31}Si	157.24	m	3.86E+06
8	^{33}P	25.35	d	9.82E+06
9	^{32}P	14.267	d	2.04E+07
10	^{35}S	87.35	d	8.21E+06
11	^{38}S	170.3	m	1.43E+04
12	^{37}Ar	35.01	d	5.83E+07
13	^{39}Ar	268	y	4.17E+04
14	^{41}Ar	109.61	m	3.17E+06
15	^{42}K	12.359	h	4.58E+07
16	^{43}K	22.28	h	1.33E+07
17	^{47}Ca	4.536	d	3.16E+05
18	^{45}Ca	162.61	d	1.18E+07
19	^{48}Sc	43.71	h	2.44E+07
20	^{47}Sc	3.3491	d	1.14E+08
21	^{46}Sc	83.808	d	1.51E+08
22	^{44}Sc	4.042	h	5.88E+08
23	$^{44\text{m}}\text{Sc}$	58.62	h	2.96E+08
24	^{43}Sc	3.891	h	1.66E+08
25	^{45}Ti	184.8	m	5.04E+08
26	^{44}Ti	59.1	y	4.20E+05
27	^{48}V	15.974	d	2.00E+09
28	^{49}V	330	d	4.56E+08
29	^{48}Cr	21.56	h	9.09E+07
30	^{51}Cr	27.7004	d	3.56E+09
31	^{54}Mn	312.1	d	5.60E+08
32	^{52}Mn	5.591	d	1.54E+09
33	^{56}Mn	2.5788	h	2.21E+08

	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
34	⁵⁹ Fe	44.495	d	7.99E+04
35	⁵² Fe	8.273	h	8.61E+07
36	⁵⁵ Fe	2.756	y	3.67E+08
37	⁵⁶ Co	77.236	d	1.82E+08
38	⁵⁵ Co	17.53	h	1.42E+08
39	⁵⁷ Co	271.8	d	5.88E+06
40	⁵⁸ Co	70.883	d	1.54E+06
41	⁵⁸ Co	8.856	h	1.46E+06
42	⁵⁶ Ni	6.081	d	1.43E+04
43	⁵⁷ Ni	35.6	h	2.30E+05
总计				1.13E+10

表 3-60 停机不同时刻，距离补偿磁通道 1 表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离补偿磁通道 1 表面 30 cm 处剂量率 (μSv/h)
1	0	39063.96
2	12 h	20084.09
3	24 h	18805.04
4	2 d	17126.71
5	7 d	11950.36
6	30 d	4506.40
7	6 m	866.65
8	1 a	405.39

(5) 降能器

表 3-61 降能器齿 (C) 感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	³ H	12.3221	y	9.30E+08
2	⁷ Be	53.3	d	4.96E+10
总计				5.05E+10

表 3-62 降能器基座 (W) 感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	³ H	12.3221	y	1.01E+07
2	⁷ Be	53.3	d	1.69E+04
3	²⁴ Na	14.9578	h	1.34E+04
4	⁵⁶ Mn	2.5788	h	1.34E+04
5	⁵⁹ Fe	44.495	d	5.60E+04
6	⁶¹ Co	1.65	h	2.68E+04
7	⁶⁵ Ni	2.5175	h	5.36E+04
8	⁶⁶ Ni	54.6	h	1.21E+05
9	⁶⁷ Cu	61.81	h	2.95E+05

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
10	⁶⁴ Cu	12.7007	h	1.34E+04
11	⁷² Zn	46.5	h	1.21E+05
12	⁷³ Ga	4.87	h	2.15E+05
13	⁷² Ga	14.025	h	2.55E+05
14	⁷⁷ Ge	11.211	h	3.53E+04
15	⁷⁸ Ge	87	m	6.70E+04
16	⁷⁵ Ge	82.78	m	2.68E+05
17	⁷¹ Ge	11.42	d	1.33E+04
18	⁷⁷ As	38.79	h	2.95E+05
19	⁷⁸ As	90.7	m	2.41E+05
20	⁷⁶ As	26.24	h	1.21E+05
21	⁷³ As	80.3	d	2.59E+04
22	⁷⁴ As	17.78	d	3.82E+04
23	⁷² As	26	h	1.34E+04
24	⁷³ Se	7.18	h	1.16E+04
25	⁸³ Br	2.374	h	3.08E+05
26	⁸² Br	35.284	h	1.46E+05
27	⁸⁸ Kr	2.803	h	4.02E+04
28	⁸⁷ Kr	76.09	m	1.20E+05
29	⁸⁵ Kr	4.48	h	1.94E+05
30	⁸³ Rb	86.2	d	3.08E+04
31	⁸⁴ Rb	32.82	d	8.59E+04
32	⁸⁶ Rb	18.671	d	2.90E+05
33	⁸⁹ Sr	50.56	d	1.48E+05
34	⁹¹ Sr	9.68	h	1.72E+05
35	⁹² Sr	2.61	h	1.21E+05
36	⁹¹ Y	58.56	d	2.20E+05
37	⁹⁰ Y	64.046	h	2.29E+05
38	⁹⁰ Y	3.232	h	1.14E+05
39	⁹³ Y	10.17	h	2.15E+05
40	⁹² Y	3.54	h	2.82E+05
41	⁸⁸ Y	106.626	d	4.20E+04
42	⁸⁷ Y	79.89	h	4.00E+04
43	^{87m} Y	13.38	h	1.34E+04
44	⁹⁷ Zr	16.749	h	5.36E+04
45	⁹⁵ Zr	64.032	d	9.05E+04
46	⁸⁷ Zr	1.68	h	1.34E+04
47	⁸⁹ Zr	78.364	h	1.30E+04
48	⁹⁷ Nb	72.1	m	3.08E+05
49	⁹⁶ Nb	23.35	h	2.28E+05
50	⁹⁵ Nb	34.991	d	1.78E+05
51	⁹⁵ Nb	3.61	d	8.81E+04
52	⁹⁹ Mo	65.936	h	2.55E+05
53	¹⁰⁵ Ru	4.44	h	1.07E+05
54	¹⁰⁶ Ru	371.8	d	1.06E+04
55	¹⁰³ Ru	39.247	d	1.79E+05
56	¹⁰⁵ Rh	35.341	h	2.14E+05
57	¹⁰⁹ Pd	13.437	h	1.47E+05

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
58	¹¹² Pd	21.027	h	1.34E+04
59	¹¹¹ Ag	7.421	d	4.00E+04
60	¹¹² Ag	3.15	h	5.36E+04
61	¹¹³ Ag	5.37	h	6.78E+04
62	¹¹⁷ Cd	2.503	h	1.34E+04
63	¹¹⁷ Cd	3.437	h	1.34E+04
64	¹¹⁵ Cd	53.4	h	1.96E+04
65	¹¹⁷ Sb	2.8	h	1.34E+04
66	¹²³ I	13.2229	h	2.68E+04
67	¹²⁶ I	12.93	d	1.32E+04
68	¹²⁹ Cs	32.13	h	1.34E+04
69	¹⁴⁹ Gd	9.28	d	1.23E+04
70	¹⁵³ Tb	2.34	d	4.02E+04
71	¹⁵⁶ Tb	5.35	d	1.12E+04
72	¹⁵⁵ Tb	5.32	d	1.34E+04
73	¹⁵³ Dy	6.42	h	1.34E+04
74	¹⁵⁵ Dy	9.92	h	1.34E+04
75	¹⁵⁹ Dy	145.3	d	9.87E+04
76	¹⁵⁷ Dy	8.14	h	5.36E+04
77	¹⁶¹ Ho	2.48	h	7.78E+05
78	¹⁶⁰ Er	28.58	h	3.49E+05
79	¹⁵⁸ Er	2.26	h	4.02E+04
80	¹⁶³ Er	75	m	2.29E+06
81	¹⁶¹ Er	3.21	h	7.37E+05
82	¹⁶⁵ Er	10.36	h	7.56E+06
83	¹⁶⁶ Tm	7.7	h	1.58E+07
84	¹⁶⁵ Tm	30.06	h	7.49E+06
85	¹⁶³ Tm	1.81	h	2.18E+06
86	¹⁶⁸ Tm	93.1	d	9.89E+04
87	¹⁶⁷ Tm	9.28	d	2.70E+07
88	¹⁷⁰ Tm	128.4	d	3.17E+04
89	¹⁷² Tm	63.6	h	2.68E+04
90	¹⁶⁶ Yb	56.7	h	1.53E+07
91	¹⁶⁹ Yb	32.015	d	6.67E+07
92	¹⁶⁴ Yb	75.8	m	3.78E+06
93	¹⁷⁵ Yb	4.1615	d	6.70E+04
94	¹⁷⁸ Yb	74	m	4.02E+04
95	¹⁷⁷ Yb	1.911	h	2.68E+04
96	¹⁷³ Lu	1.37	y	5.79E+07
97	¹⁷² Lu	6.702	d	3.66E+07
98	¹⁷⁴ Lu	3.31	y	1.56E+05
99	¹⁷⁴ Lu	142	d	9.74E+05
100	¹⁷⁷ Lu	6.6472	d	9.38E+05
101	¹⁷⁷ Lu	160.35	d	2.43E+05
102	¹⁷⁹ Lu	4.59	h	6.43E+05
103	¹⁷¹ Lu	8.25	d	2.27E+08
104	¹⁶⁹ Lu	34.06	h	8.12E+07
105	¹⁷⁰ Lu	2.01	d	1.47E+08

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
106	¹⁷⁰ Hf	16.01	h	1.32E+08
107	¹⁷¹ Hf	12.1	h	2.11E+08
108	¹⁸¹ Hf	42.39	d	1.05E+07
109	¹⁷⁵ Hf	70.67	d	7.23E+08
110	¹⁷³ Hf	23.6	h	5.78E+08
111	¹⁷² Hf	1.87	y	2.85E+07
112	¹⁸⁴ Hf	4.12	h	2.13E+06
113	¹⁸³ Hf	1.019	h	5.03E+06
114	¹⁸⁰ Ta	8.154	h	3.04E+08
115	¹⁸² Ta	114.804	d	1.70E+08
116	¹⁷⁷ Ta	56.56	h	2.66E+09
117	¹⁷⁶ Ta	8.08	h	2.04E+09
118	¹⁷⁹ Ta	1.815	y	3.45E+08
119	¹⁷⁸ Ta	2.41	h	3.27E+09
120	¹⁷³ Ta	3.14	h	4.99E+08
121	¹⁷⁵ Ta	10.5	h	1.30E+09
122	¹⁷⁴ Ta	1.08	h	8.96E+08
123	¹⁸⁴ Ta	8.7	h	1.82E+08
124	¹⁸³ Ta	5.1	d	4.03E+08
125	¹⁸⁷ W	23.8	h	1.35E+09
126	¹⁸⁵ W	74.9	d	1.47E+09
127	¹⁸¹ W	120.96	d	2.13E+09
128	¹⁷⁶ W	2.5	h	1.61E+09
129	¹⁷⁷ W	132	m	2.07E+09
130	¹⁷⁸ W	21.6	d	2.98E+09
131	¹⁸⁶ Re	3.7185	d	1.05E+07
132	¹⁸² Re	64.2	h	2.77E+08
133	^{182m} Re	14.14	h	2.77E+08
134	¹⁸³ Re	70	d	2.48E+08
135	¹⁸¹ Re	19.95	h	8.40E+08
136	¹⁸⁴ Re	35.43	d	9.35E+07
137	^{184m} Re	168	d	2.96E+07
138	¹⁸² Os	22.04	h	6.70E+04
139	¹⁸³ Os	13	h	2.31E+04
140	^{183m} Os	9.9	h	2.01E+04
141	¹⁸⁵ Os	92.95	d	2.32E+04
总计				2.79E+10

表 3-63 停机不同时刻，距离降能器表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离降能器表面 30 cm 处剂量率 (μSv/h)
1	0	46181.31
2	12 h	4551.62
3	24 h	3684.76
4	2 d	3082.46
5	7 d	2533.71
6	30 d	1805.17

7	6 m	294.18
8	1 a	54.46

(6) 准直器

表 3-64 准直器 (Cu) 感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	³ H	12.3221	y	1.50E+08
2	⁷ Be	53.3	d	4.22E+07
3	¹⁸ F	109.734	m	2.86E+06
4	²² Na	2.6019	y	2.88E+04
5	²⁴ Na	14.9578	h	1.32E+06
6	³¹ Si	157.24	m	1.15E+05
7	³³ P	25.35	d	2.89E+05
8	³² P	14.267	d	5.60E+05
9	³⁵ S	87.35	d	3.06E+05
10	³⁷ Ar	35.01	d	1.77E+06
11	⁴¹ Ar	109.61	m	2.73E+05
12	⁴² K	12.359	h	3.97E+06
13	⁴³ K	22.28	h	1.19E+06
14	⁴⁷ Ca	4.536	d	1.87E+05
15	⁴⁵ Ca	162.61	d	1.52E+06
16	⁴⁸ Sc	43.71	h	7.17E+06
17	⁴⁷ Sc	3.3491	d	2.29E+07
18	⁴⁶ Sc	83.808	d	2.05E+07
19	⁴⁴ Sc	4.042	h	3.73E+07
20	^{44m} Sc	58.62	h	1.88E+07
21	⁴³ Sc	3.891	h	7.10E+06
22	⁴⁵ Ti	184.8	m	2.85E+07
23	⁴⁴ Ti	59.1	y	1.74E+04
24	⁴⁸ V	15.974	d	2.51E+08
25	⁴⁹ V	330	d	8.97E+07
26	⁴⁸ Cr	21.56	h	6.11E+06
27	⁵¹ Cr	27.7004	d	1.45E+09
28	⁵⁴ Mn	312.1	d	7.17E+08
29	⁵² Mn	5.591	d	6.75E+08
30	⁵⁶ Mn	2.5788	h	7.98E+08
31	⁵⁹ Fe	44.495	d	2.02E+08
32	⁵² Fe	8.273	h	2.41E+07
33	⁵⁵ Fe	2.756	y	6.26E+08
34	⁵⁶ Co	77.236	d	3.56E+09
35	⁵⁵ Co	17.53	h	6.95E+08
36	⁶¹ Co	1.65	h	1.59E+09
37	⁶⁰ Co	5.271	y	1.48E+08
38	⁵⁷ Co	271.8	d	4.24E+09
39	⁵⁸ Co	70.883	d	1.17E+10
40	⁵⁸ Co	8.856	h	1.11E+10
41	⁶⁵ Ni	2.5175	h	5.12E+08
42	⁶⁶ Ni	54.6	h	1.15E+05

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
43	⁶³ Ni	100.8	y	1.85E+07
44	⁵⁶ Ni	6.081	d	1.22E+08
45	⁵⁷ Ni	35.6	h	1.03E+09
46	⁶⁷ Cu	61.81	h	5.02E+05
47	⁶⁴ Cu	12.7007	h	3.30E+10
48	⁶¹ Cu	3.339	h	3.57E+10
49	⁶² Zn	9.193	h	4.36E+09
50	⁶⁵ Zn	243.93	d	5.19E+08
51	⁶⁷ Ga	3.2615	d	1.32E+06
52	⁶⁶ Ga	9.304	h	2.87E+06
53	⁶⁸ Ga	67.843	m	1.35E+06
总计				1.14E+11

表 3-65 停机不同时刻，距离准直器表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离准直器表面 30 cm 处剂量率 (μSv/h)
1	0	159094.43
2	12 h	36129.12
3	24 h	31070.05
4	2 d	28037.26
5	7 d	24388.91
6	30 d	18561.49
7	6 m	5106.01
8	1 a	1427.90

(7) 动量分散控制狭缝

表 3-66 动量分散控制狭缝 (W) 感生放射性模拟结果

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
1	³ H	12.3221	y	1.10E+07
2	⁷ Be	53.3	d	1.81E+04
3	¹⁸ F	109.734	m	1.43E+04
4	²⁴ Na	14.9578	h	1.15E+05
5	³³ P	25.35	d	1.26E+04
6	⁴¹ Ar	109.61	m	2.87E+04
7	⁴³ K	22.28	h	1.43E+04
8	⁴⁷ Ca	4.536	d	7.17E+04
9	⁴⁸ Sc	43.71	h	4.30E+04
10	⁴⁷ Sc	3.3491	d	1.00E+05
11	⁵⁶ Mn	2.5788	h	5.74E+04
12	⁵⁹ Fe	44.495	d	1.40E+05
13	⁶¹ Co	1.65	h	1.87E+05
14	⁶⁵ Ni	2.5175	h	2.44E+05
15	⁶⁶ Ni	54.6	h	1.58E+05
16	⁶⁷ Cu	61.81	h	5.31E+05
17	⁶⁴ Cu	12.7007	h	5.74E+04
18	⁷² Zn	46.5	h	1.87E+05

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
19	⁷³ Ga	4.87	h	3.73E+05
20	⁷² Ga	14.025	h	4.02E+05
21	⁶⁷ Ga	3.2615	d	4.30E+04
22	⁶⁶ Ga	9.304	h	1.43E+04
23	⁶⁸ Ga	67.843	m	8.61E+04
24	⁷⁷ Ge	11.211	h	4.34E+04
25	⁷⁸ Ge	87	m	7.17E+04
26	⁷⁵ Ge	82.78	m	5.31E+05
27	⁷¹ Ge	11.42	d	1.42E+05
28	⁷⁷ As	38.79	h	5.60E+05
29	⁷⁸ As	90.7	m	5.17E+05
30	⁷⁶ As	26.24	h	5.31E+05
31	⁷³ As	80.3	d	9.70E+04
32	⁷⁴ As	17.78	d	2.72E+05
33	⁷² As	26	h	4.30E+04
34	⁷¹ As	65.3	h	2.87E+04
35	⁷⁵ Se	119.779	d	9.74E+04
36	⁷² Se	8.4	d	1.43E+04
37	⁷³ Se	7.18	h	1.24E+04
38	⁷⁶ Br	16.16	h	1.43E+04
39	⁷⁵ Br	96.7	m	1.43E+04
40	⁸³ Br	2.374	h	5.31E+05
41	⁸² Br	35.284	h	6.52E+05
42	⁷⁷ Br	57.04	h	1.29E+05
43	⁸⁸ Kr	2.803	h	1.29E+05
44	⁸⁷ Kr	76.09	m	1.85E+05
45	⁸⁵ Kr	4.48	h	3.87E+05
46	⁷⁹ Kr	34.96	h	8.61E+04
47	⁸¹ Rb	4.571	h	9.92E+04
48	⁸³ Rb	86.2	d	1.84E+05
49	⁸⁴ Rb	32.82	d	3.91E+05
50	⁸⁶ Rb	18.671	d	7.97E+05
51	⁸⁹ Sr	50.56	d	4.94E+05
52	⁹¹ Sr	9.68	h	2.58E+05
53	⁹² Sr	2.61	h	8.63E+04
54	⁸³ Sr	32.41	h	5.74E+04
55	⁸⁵ Sr	64.849	d	1.27E+05
56	⁸⁵ Sr	67.63	m	1.15E+05
57	⁸² Sr	25.35	d	3.76E+04
58	⁹¹ Y	58.56	d	5.42E+05
59	⁹⁰ Y	64.046	h	5.48E+05
60	⁹⁰ Y	3.232	h	2.73E+05
61	⁹³ Y	10.17	h	2.58E+05
62	⁹² Y	3.54	h	4.31E+05
63	⁸⁶ Y	14.74	h	8.58E+04
64	⁸⁸ Y	106.626	d	2.07E+05
65	⁸⁷ Y	79.89	h	3.28E+05
66	⁸⁷ Y	13.38	h	1.58E+05

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
67	⁹⁷ Zr	16.749	h	7.17E+04
68	⁹⁵ Zr	64.032	d	2.10E+05
69	⁸⁷ Zr	1.68	h	1.43E+04
70	⁸⁹ Zr	78.364	h	1.53E+05
71	⁸⁸ Zr	83.4	d	2.02E+04
72	⁹⁷ Nb	72.1	m	4.59E+05
73	⁹¹ Nb	60.86	d	3.75E+04
74	⁹⁶ Nb	23.35	h	3.16E+05
75	⁹⁵ Nb	34.991	d	5.83E+05
76	⁹⁵ Nb	3.61	d	3.18E+05
77	⁹⁰ Nb	14.6	h	1.43E+04
78	⁹⁹ Mo	65.936	h	4.59E+05
79	⁹³ Mo	6.85	h	2.87E+04
80	⁹⁵ Tc	19.258	h	1.47E+04
81	⁹⁶ Tc	4.27	d	1.70E+05
82	¹⁰⁵ Ru	4.44	h	1.00E+05
83	¹⁰⁶ Ru	371.8	d	1.52E+04
84	¹⁰³ Ru	39.247	d	2.87E+05
85	⁹⁷ Ru	2.8376	d	2.87E+04
86	¹⁰⁵ Rh	35.341	h	4.45E+05
87	¹⁰² Rh	207.3	d	1.13E+04
88	¹⁰¹ Rh	4.34	d	4.30E+04
89	¹⁰⁰ Rh	20.5	h	7.11E+04
90	¹⁰⁹ Pd	13.437	h	1.72E+05
91	¹¹² Pd	21.027	h	8.61E+04
92	¹⁰³ Pd	17	d	8.23E+04
93	¹¹¹ Ag	7.421	d	1.43E+05
94	¹¹² Ag	3.15	h	1.29E+05
95	¹¹³ Ag	5.37	h	6.08E+04
96	¹⁰⁵ Ag	41.29	d	3.10E+04
97	¹⁰³ Ag	65.8	m	1.43E+04
98	¹¹⁷ Cd	2.503	h	1.43E+04
99	^{117m} Cd	3.437	h	1.43E+04
100	¹¹⁵ Cd	53.4	h	4.18E+04
101	^{115m} Cd	44.6	d	1.08E+04
102	¹¹¹ In	2.8048	d	7.17E+04
103	¹¹³ Sn	115.08	d	1.52E+04
104	¹²¹ Sn	27.05	h	2.07E+04
105	¹¹⁹ Sb	38.2	h	7.17E+04
106	¹²² Sb	2.69413	d	1.43E+04
107	¹²¹ Te	19.27	d	4.65E+04
108	¹²¹ I	2.12	h	1.43E+04
109	¹²³ I	13.2229	h	2.87E+04
110	¹²⁶ I	12.93	d	1.41E+04
111	¹²⁵ Xe	16.962	h	1.43E+04
112	¹²⁷ Xe	36.344	d	3.30E+04
113	¹²⁷ Cs	6.25	h	1.43E+04
114	¹³¹ Cs	9.688	d	4.12E+04

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
115	¹³¹ Ba	11.52	d	4.26E+04
116	¹³⁴ Ce	3.22	d	2.87E+04
117	¹³⁷ Ce	9.11	h	1.43E+04
118	¹³⁷ Pr	1.28	h	1.43E+04
119	¹⁴² Sm	72.48	m	1.43E+04
120	¹⁴⁵ Eu	5.93	d	4.42E+04
121	¹⁴⁶ Eu	4.61	d	2.87E+04
122	¹⁴⁹ Eu	93.1	d	2.62E+04
123	¹⁴⁹ Gd	9.28	d	7.04E+04
124	¹⁵¹ Gd	124.5	d	7.36E+04
125	¹⁵³ Gd	240.41	d	3.78E+04
126	¹⁴⁸ Tb	60	m	2.03E+04
127	¹⁵¹ Tb	17.609	h	1.55E+05
128	¹⁵⁰ Tb	3.48	h	3.59E+04
129	¹⁵³ Tb	2.34	d	2.01E+05
130	¹⁵² Tb	17.48	h	2.04E+05
131	¹⁵⁴ Tb	21.5	h	1.77E+04
132	^{154m} Tb	9.994	h	1.43E+04
133	^{154m2} Tb	22.7	h	1.43E+04
134	¹⁵⁶ Tb	5.35	d	1.20E+04
135	¹⁵⁵ Tb	5.32	d	2.44E+05
136	¹⁵² Dy	2.38	h	1.02E+05
137	¹⁵³ Dy	6.42	h	1.29E+05
138	¹⁵⁵ Dy	9.92	h	2.15E+05
139	¹⁵⁹ Dy	145.3	d	7.00E+05
140	¹⁵⁷ Dy	8.14	h	7.32E+05
141	¹⁶¹ Ho	2.48	h	5.90E+06
142	¹⁶⁹ Er	9.39	d	1.43E+04
143	¹⁶⁰ Er	28.58	h	3.44E+06
144	¹⁵⁸ Er	2.26	h	1.26E+06
145	¹⁶³ Er	75	m	1.65E+07
146	¹⁶¹ Er	3.21	h	5.81E+06
147	¹⁶⁵ Er	10.36	h	3.71E+07
148	¹⁶⁶ Tm	7.7	h	6.47E+07
149	¹⁶⁵ Tm	30.06	h	3.71E+07
150	¹⁶³ Tm	1.81	h	1.62E+07
151	¹⁶⁸ Tm	93.1	d	1.24E+05
152	¹⁶⁷ Tm	9.28	d	9.45E+07
153	¹⁶⁶ Yb	56.7	h	6.40E+07
154	¹⁶⁹ Yb	32.015	d	1.61E+08
155	¹⁶⁴ Yb	75.8	m	2.36E+07
156	¹⁷⁵ Yb	4.1615	d	2.87E+04
157	¹⁷⁷ Yb	1.911	h	1.43E+04
158	¹⁷³ Lu	1.37	y	7.07E+07
159	¹⁷² Lu	6.702	d	4.35E+07
160	¹⁷⁴ Lu	3.31	y	6.70E+04
161	^{174m} Lu	142	d	4.18E+05
162	¹⁷⁷ Lu	6.6472	d	2.56E+05

序号	活化核素	半衰期		停机时刻活度 (Bq)
163	^{177m} Lu	160.35	d	6.45E+04
164	¹⁷⁹ Lu	4.59	h	2.87E+04
165	¹⁷¹ Lu	8.25	d	3.88E+08
166	¹⁶⁹ Lu	34.06	h	2.00E+08
167	¹⁷⁰ Lu	2.01	d	2.84E+08
168	¹⁷⁰ Hf	16.01	h	2.71E+08
169	¹⁷¹ Hf	12.1	h	3.78E+08
170	¹⁸¹ Hf	42.39	d	2.54E+06
171	¹⁷⁵ Hf	70.67	d	6.20E+08
172	¹⁷³ Hf	23.6	h	7.12E+08
173	¹⁷² Hf	1.87	y	4.12E+07
174	¹⁸⁴ Hf	4.12	h	6.46E+05
175	¹⁸³ Hf	1.019	h	6.89E+05
176	¹⁸⁰ Ta	8.154	h	8.52E+07
177	¹⁸² Ta	114.804	d	4.52E+07
178	¹⁷⁷ Ta	56.56	h	1.63E+09
179	¹⁷⁶ Ta	8.08	h	1.46E+09
180	¹⁷⁹ Ta	1.815	y	1.60E+08
181	¹⁷⁸ Ta	2.41	h	1.68E+09
182	¹⁷³ Ta	3.14	h	6.62E+08
183	¹⁷⁵ Ta	10.5	h	1.15E+09
184	¹⁷⁴ Ta	1.08	h	9.30E+08
185	¹⁸⁴ Ta	8.7	h	4.21E+07
186	¹⁸³ Ta	5.1	d	1.09E+08
187	¹⁸⁷ W	23.8	h	3.79E+08
188	¹⁸⁵ W	74.9	d	6.24E+08
189	¹⁸¹ W	120.96	d	8.54E+08
190	¹⁷⁶ W	2.5	h	1.26E+09
191	¹⁷⁷ W	132	m	1.41E+09
192	¹⁷⁸ W	21.6	d	1.58E+09
193	¹⁸⁶ Re	3.7185	d	1.10E+07
194	¹⁸⁸ Re	17.004	h	4.30E+04
195	¹⁸² Re	64.2	h	2.19E+08
196	¹⁸² Re	14.14	h	2.19E+08
197	¹⁸³ Re	70	d	1.85E+08
198	¹⁸¹ Re	19.95	h	6.85E+08
199	¹⁸⁴ Re	35.43	d	7.16E+07
200	¹⁸⁴ Re	168	d	2.27E+07
201	¹⁸¹ Os	106	m	5.02E+04
202	¹⁸² Os	22.04	h	5.74E+04
203	¹⁸³ Os	13	h	9.90E+04
204	^{183m} Os	9.9	h	8.61E+04
205	¹⁸⁵ Os	92.95	d	1.24E+04
总计				1.90E+10

表 3-67 停机不同时刻，距离动量分散控制狭缝表面 30 cm 处剂量率水平

序号	停机时间	距离动量分散控制狭缝表面 30 cm 处剂量率 (μ Sv/h)
----	------	--

1	0	7394.65
2	12 h	2763.22
3	24 h	1859.31
4	2 d	1162.48
5	7 d	439.32
6	30 d	182.93
7	6 m	79.39
8	1 a	58.62

3.3.2.3.4 土壤和地下水的感生放射性

根据 FLUKA 程序的计算结果可知，各区域底板外表面与土壤边界处的剂量率均低于 5mSv/h，本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

3.3.2.3.5 治疗室内患者的感生放射性

患者感生放射性是由于患者自身组织与质子束流相互作用产生，以半衰期在半小时内的短寿命核素 ^{11}C 、 ^{13}N 和 ^{15}O 为主。根据质子治疗系统的治疗流程，工作人员需要在治疗室内对患者进行摆位/解除摆位。由于解除摆位时，工作人员处于治疗室内且近距离接触刚受到照射的患者，因此需计算分析此时治疗室内患者感生放射性强度，以此确定摆位前有无必要等待合适时间再进入治疗室对患者解除摆位，并评估治疗后患者带有的感生放射性对技师的辐射影响。

本项目共建设 1 间旋转束治疗室、3 间固定束治疗室，每间治疗室在满负荷运行的情况下，每天治疗 15 h，每小时规划治疗 3 名患者。因此，平均每 20 min 需对患者进行摆位/解除摆位一次。解除摆位时，工作人员处于治疗室内且近距离接触刚受到照射的患者，因此，需计算此时治疗室内患者感生放射性强度，以此确定摆位前有无必要等待合适时间再进入治疗室对患者解除摆位，并评估治疗后患者带有的感生放射性对摆位人员和周围陪护人员的辐射影响。

3.3.2.3.5.1 计算条件

治疗室内患者感生放射性的计算条件如下：

（1）采用治疗室终端最保守的束流条件：束流能量为 220 MeV，束流强度为 3 nA，连续治疗 2 min。

(2) 人体组织等效靶成分采用文献《Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling》中推荐的 ICRP 标准软组织成分，列于表 3-68。靶采用直径 30 cm，厚度 35 cm 的圆柱形状。

表 3-68 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

3.3.2.3.5.2 计算结果

结合实际治疗情况，以最保守的治疗条件 220 MeV、3 nA 的束流连续治疗 2 min，假设患者不移动，分别计算了停机时长为 0 min、5 min、10 min、30 min、60 min 和 180 min 时，治疗室内整体和仅患者的剂量率分布情况，具体见图 3-40、图 3-41；统计了距离患者表面 50 cm 处的剂量率，具体见表 3-69。

表 3-69 单次治疗后患者表面 50cm 处感生放射性剂量率随停机时间的变化， $\mu\text{Sv/h}$

序号	停机时间 (min)	距离患者表面 50 cm 处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	
		治疗室内	仅患者
1	0	179.19	175.01
2	5	24.16	23.55
3	10	5.54	5.41
4	30	0.49	0.48
5	60	0.103	0.098
6	180	0.005	0.003

由计算结果可知，停机 5min 后患者体表 50cm 处剂量率最高为 24.16 $\mu\text{Sv/h}$ 。

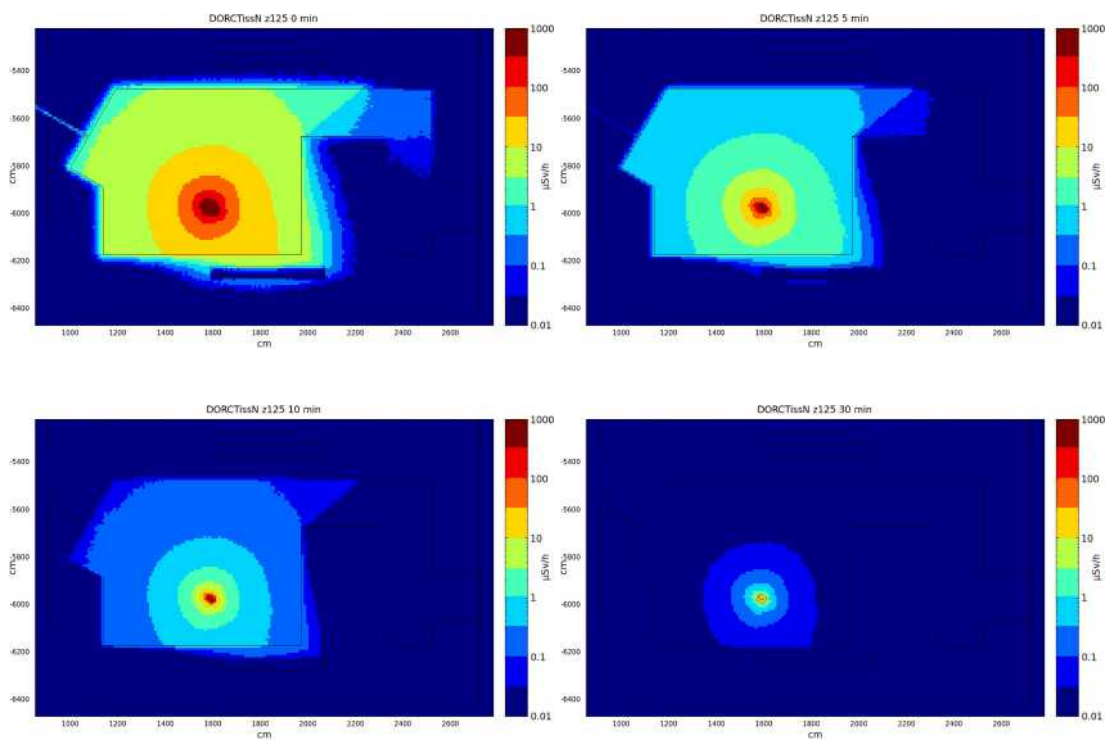


图 3-40 停机 0、5、10、30 min 时治疗室内剂量率分布

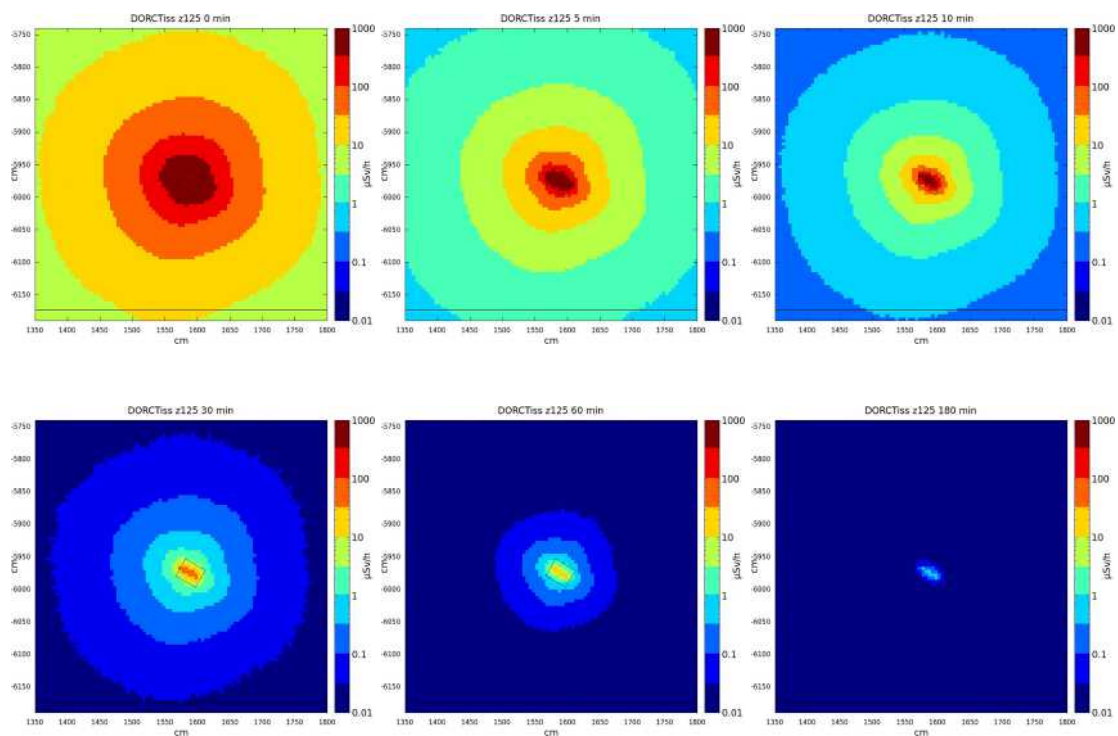


图 3-41 停机 0、5、10、30、60、180 min 时患者周围剂量率分布

3.3.2.3.6 QA 水箱的感生放射性

QA 及计划验证阶段使用的 QA 水箱可能产生感生放射性，建模参数如下：

(1) 采用治疗室终端最保守的束流条件：束流能量为 220 MeV，束流强度为 3 nA，4 间治疗室，每室每天 QA 20 min，每年 250 个工作日。

(2) 靶采用外部尺寸 675 × 645 × 560 mm、外壳厚 15 mm 的亚克力 (PMMA)，内部填充纯水。

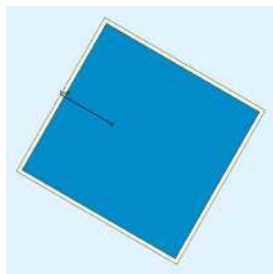


图 3-42 QA 水箱活化计算模型图

结合实际 QA 情况，以最保守的 QA 条件 220 MeV、3 nA 的束流连续照射 250*20*4 min (333.3 h)，停机时刻感生放射性核素活度和活度浓度计算结果见表 3-70。可以看出 QA 水箱的感生放射性核素的活度浓度均低于豁免水平。

表 3-70 QA 水箱感生放射性计算结果

介质	材料	活化核素	半衰期	停机时刻活度 (Bq)	停机时刻活度浓度 (Bq/g)	豁免活度 (Bq)	豁免活度浓度 (Bq/g)
外壳	PMMA	H-3	12.32 y	3.94E+04	1.23E+00	1.0E+09	1.0E+06
		Be-7	53.3 d	2.63E+06	8.23E+01	1.0E+07	1.0E+03
水体	水	H-3	12.32 y	4.78E+05	2.27E+00	1.0E+09	1.0E+06
		Be-7	53.3 d	2.40E+07	1.14E+02	1.0E+07	1.0E+03
		C-14	5686 y	2.85E+02	1.36E-03	1.0E+07	1.0E+04
		F-18	109.734 min	3.92E+05	1.86E+00	1.0E+06	1.0E+01

3.3.3 硼中子俘获治疗装置

本项目的初级粒子为质子，质子最大能量 2.6MeV，运行最大束流 20 mA；质子撞击靶站中的靶物质后发生核反应产生中子和光子，中子和光子为次级粒子；产生的中子通过靶站内的慢化体调控后照射到人体需要被治疗的位置。装置运行过程中的辐射影响主要为瞬发辐射以及空气、冷却水、结构部件（主要为靶站）以及患者的感生放射性。

3.3.3.1 瞬发辐射源项分析

离子源产生的质子被射频四极加速器加速后所能达到最高能量为 2.6MeV。加速器系统主材为铜与铁。质子入射铁靶、铜靶的非弹性散射截面如图所示图 3-43、图 3-44、图 3-45。从图中可知，2.6MeV 的质子与铁、铜的非弹性散射截面均很小，分别约为 10mb 和 7.5mb。加速器前级束流损失小（最大值为 10W/m）、能量低，与物质相互作用的次级辐射可忽略不计。

综上，能量为 2.6MeV 的质子偏转与加速器管的管壁或偏转磁铁发生碰撞时，它们的相互作用以库伦电场相互作用为主，与加速管或偏转磁铁的材料发生核反应产生的中子概率极低，几乎可忽略。

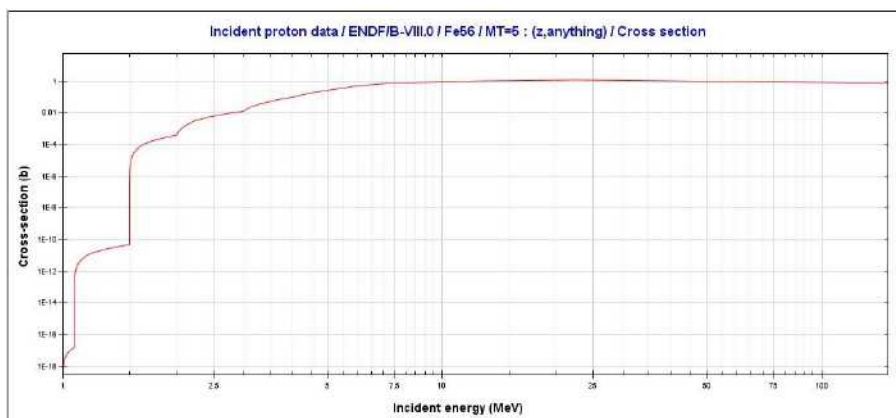


图 3-43 质子与 Fe-56 核反应截面

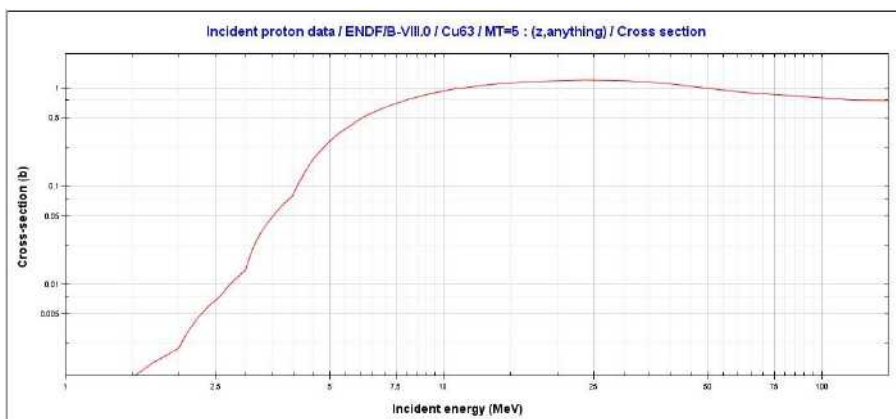


图 3-44 质子与 Cu-63 核反应截面

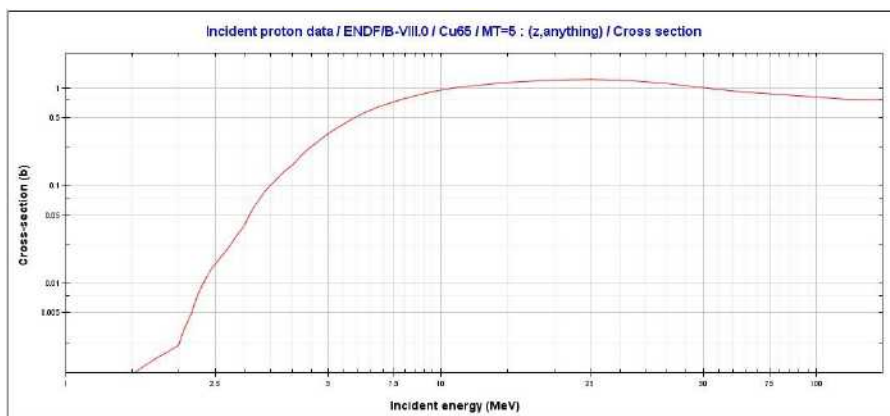


图 3-45 质子与 Cu-65 核反应截面

3.3.3.2 感生放射性分析

3.3.3.2.1 空气的感生放射性

本项目硼中子俘获治疗装置加速器室内空气受照射后可能生成放射性活化气体。由于本项目的次级辐射场主要为热中子和超热中子辐射场，空气活化核素主要为空气中的 ^{41}Ar 通过热中子俘获反应 $^{40}\text{Ar} (n, \gamma) ^{41}\text{Ar}$ 生成。基于蒙特卡洛模拟计算程序 MCNPX，在质子束流能量 2.6MeV、束流强度 20 mA 的最大运行工况下，加速器机房和治疗室中几个典型核素的产生速率计算结果见下表。

表 3-71 空气中放射性核素产额，atoms（原子数）/s

位置	H-3	C-14	Ar-41
治疗室核素产生率	1.35E-05	0.94E+04	3.24E+06
加速器大厅核素产生率	4.03E-06	1.35E+04	0.83E+06

核素活度与核素产生率和照射时间的关系为：

$$A_t = v (1 - e^{(-\lambda t)})$$

式中：

A_t ：加速器连续运行 t 时间后的核素活度，Bq；

v ：活化核素产生速率，atoms/s；同时可表征长期辐照下的饱和活度，Bq；

λ ：核素衰变常数，s；

t : 加速器连续运行时间, s。

根据核素活度与核素产生率和照射时间的关系, 本项目最大工况条件下, 向环境排放量的核素活度见下表。从表中可知, 单间治疗室开展 1 次治疗工作, 选取照射时间 t 为 30 分钟, 主要排放核素为 ^{41}Ar , 排放量保守估算为 $6.73\text{E}+05\text{Bq}$; 全年出束 1500h, ^{41}Ar 的排放量为 $2.02\text{E}+09\text{Bq}$, 年排放速率为 $6.41\text{E}+01\text{Bq/s}$; 其余核素活化水平极低, 影响可忽略。

表 3-72 1 间治疗室 1 次治疗产生的活化空气的核素活度

核 素	H-3	C-14	Ar-41
治疗室活化核素活度, Bq	4.33E-11	6.53E-05	5.33E+04
加速器大厅活化核素活度, Bq	1.29E-11	9.33E-05	1.36E+05
合 计, Bq	5.60E-12	1.59E-04	6.73E+05

表 3-73 全年出束 1500h 产生的活化空气的核素总活度及年排放速率

核 素	H-3	C-14	Ar-41
治疗室活化核素活度, Bq	1.30E-07	1.96E-01	1.60E+08
加速器大厅活化核素活度, Bq	3.88E-08	2.80E-01	4.08E+08
合 计, Bq	1.68E-08	4.76E-01	2.02E+09
年排放速率, Bq/s	5.33E-16	1.51E-08	6.41E+01

3.3.3.2.2 冷却水的感生放射性

本项目 BNCT 装置的冷却水系统由一回路、二回路和三回路三个子系统组成。

一回路冷却水系统, 主要功能为冷却靶站, 并将热量交换至二回路冷却水系统。靶站一回路系统内总水量约 40 L。一回路水箱和一回路换热器均位于加速器大厅内, 水箱容积为 60 L。该系统为闭式循环水系统, 冷却介质为去离子水, 预计每月更换一次, 按一个月最多工作日 23 天、每天最多 8 小时, 即月最大照射时间 184 小时估算, 年产生废水量 0.48 m^3 。靶站更换时, 一回路水临时全部收集至一回路水箱中, 待靶站更换完毕后重新泵入回路中, 循环使用。

二回路冷却水系统，主要功能为带走质子加速器 and 一回路冷却水系统内的热量，并交换至三回路冷却水系统。该系统为封闭式水系统，冷却介质为去离子水，设计运行工况下，冷却水在回路内循环运行，不排放。

三回路冷却水系统，主要功能为带走二回路水的热量，将二回路水的热量经空冷却塔机组释放至最终热阱空气，不涉及活化。

本项目 BNCT 加速器质子最高能量仅为 2.6 MeV，质子加速器冷却水（二回路冷却水）的放射性可忽略不计，且运行寿期内不排放。

靶站的去离子冷却水（一回路冷却水）处于强中子场内，被中子照射后将产生感生放射性。根据靶站结构，为简化建模并得到保守计算结果，建立如图 3-46 所示的 MCNPX 计算模型。图中黄色区域为铜，绿色区域为锂，网格区为冷却水层。根据一回路水更换计划，保守考虑按质子能量 2.6 MeV、流强 20 mA、连续照射 184 小时进行计算。表 3-74 给出了单靶站冷却水活化计算结果。

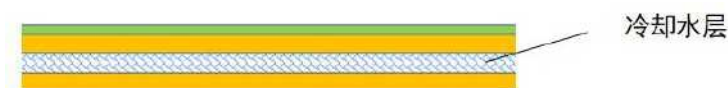


图 3-46 冷却水分析模型图

表 3-74 冷却水活化计算结果

核素	半衰期	连续照射 184 小时后活度, Bq	停止照射 20 天后总活度, Bq
H-3	12.3 年	4.16	4.16
O-19	27 秒	1.00×10^4	\

由计算结果可知，靶站一回路冷却水总水量为 40 L，停止照射 20 天后，一回路冷却水中 H-3 放射性总活度为 4.16 Bq，对应体积活度约 0.104 Bq/L，O-19 衰变殆尽。

3.3.3.2.3 靶站的感生放射性

本项目硼中子治疗装置的加速器会定期更换靶，靶站预计辐照时间为 30000mA-hr，按照每年运行 250 天、每间治疗室每天开机 4 小时、质子束流强度按最大强度 20mA 计，每年每间治疗室均需要更换靶站 1 次，两间治疗室每年共产生 2 个废靶。

锂靶及其附属物（锂靶、铜基体、铝壳等）首先发生质子核反应 $\text{Li-7}(\text{p}, \text{n})\text{Be-7}$ ，产生的中子与靶站材料发生俘获反应。靶站照射后的主要放射性产物有 Be-7、Cu-64、Cu-66、Al-28、Mn-56、Zn-69、Si-31、Mg-27、Fe-59、Zn-71、Cr-55 和 Ti-51，保守考虑照射 1000h（每天连续照射 4 小时后停机 20 小时，循环累积照射 250 天），上述放射性核素的产生量及暂存 7 天和 3 年后的活度见下表。

表 3-75 靶站放射性核素活度一览表

核素名称	半衰期	累积照射活度, Bq	暂存 7 天后活度, Bq	暂存 3 年后活度, Bq
Be-7	53.22d	3.55E+12	3.24E+12	2.27E+06
Cu-64	12.7h	1.72E+11	1.79E+07	/
Cu-66	5.12min	1.70E+11	/	/
Al-28	6.57min	1.54E+11	/	/
Mn-56	2.5798h	2.12E+09	5.19E-11	/
Zn-69	56.33min	2.12E+08	/	/
Si-31	2.622h	4.79E+07	2.47E-12	/
Mg-27	9.485min	3.62E+07	/	/
Fe-59	44.5d	5.55E+06	4.98E+06	2.16E-01
Zn-71	2.45min	2.50E+07	/	/
Cr-55	3.497min	1.23E+07	/	/
Ti-51	5.77min	1.00E+07	/	/

从上表可见，靶站经过 7 天冷却，Cu-66、Al-28、Mn-56、Zn-69、Si-31、Mg-27、Zn-71、Cr-55、Ti-51 活度有明显衰减；经过 3 年冷却，剩下主要核素为 Be-7 和 Fe-59，均低于 GB 18871 的豁免水平，其他核素可忽略。因此，更换下的靶站经过 3 年暂存衰变，经有资质单位检测低于解控水平后，可申请作为非放射性固废处置。

3.3.3.2.4 患者的感生放射性

患者感生放射性是由于患者自身组织与中子束流相互作用产生，以 Na-24、Cl-38、K-42、Mg-27 放射性核素为主，主要考虑患者人体的感生放射性，及其排泄物、呕吐物等排出液体的感生放射性。

3.3.3.2.4.1 患者人体感生放射性

根据硼中子治疗装置的使用规划，每次照射时间平均为 30 分钟，最大为 45 分钟。由于解除摆位时，治疗技师处于治疗室内且近距离接触刚受到照射的患者，因此需计算分析此时治疗室内患者感生放射性，以确定有无必要等待合适时间再进入治疗室对患者解除摆位，并评估治疗后患者带有的感生放射性对治疗技师的辐射影响。

治疗室内患者感生放射性的计算条件如下：

（1）采用治疗室终端最保守的束流条件：中子束流能量为 0.5 eV ~ 40 keV 超热中子，流强 2×10^{11} n/s，连续治疗 45 min；

（2）人体以直径 30 cm、高 170 cm 的圆柱近似；研究表明硼中子俘获治疗病人的感生放射性主要由 Na-24 控制，Na-24 通过 Na-23 中子俘获产生，考虑到病人受照部位主要是头部及人体头部 Na-23 的密度较人体其他组织大，人体材料以 ICRP 推荐的头部组分作为输入，其组分见下表。

表 3-76 ICRP 推荐的人体头部组分

密度 1.03 g/cm ³	
元素	质量分数，%
H	11.0667
C	12.542
N	1.328
O	73.7723
Na	0.184
Mg	0.015
P	0.354
S	0.177
Cl	0.236
K	0.31
Ca	9×10^{-3}
Fe	5×10^{-3}
Zn	1×10^{-3}
总计	100

假设病人不动，计算得到不同停机时刻 0 min、5 min、10 min、30 min、1 h、2 h 病人身上产生的主要放射性核素的活度。忽略人体自吸收，并将人体考虑为一个放射

性点源，通过伽马常数的方法计算得到不同时刻离病人 50 cm 远处的剂量率水平。计算公式如下式所示：

$$H=\Gamma*S/r^2$$

式中：H 为关注点 r 处的剂量率； Γ 为伽马常数，单位为(mSv/h)/MBq；S 为放射性核素活度；r 为关注点到源的距离，单位为 m。

下表给出了病人体内产生的主要放射性核素的活度。

表 3-77 BNCT 病人体内产生主要放射性核素活度

主要核素	停机不同时刻的放射性核素的活度/Bq					
	0 min	5 min	10 min	30 min	1 h	2 h
Na-24	3.00E+06	2.98E+06	2.98E+06	2.94E+06	2.86E+06	2.74E+06
Cl-38	7.20E+06	6.60E+06	6.00E+06	4.20E+06	2.40E+06	7.80E+05
Mg-27	7.20E+05	5.40E+05	3.80E+05	8.60E+05	9.40E+03	1.16E+02
K-42	7.93E+05	7.87E+05	7.87E+05	7.73E+05	7.47E+05	7.07E+05

表 3-78 主要放射性核素的伽马常数

核素	伽马常数/(mSv/h)/MBq
Na-24	5.12×10^{-4}
Cl-38	1.912×10^{-4}
Mg-27	1.448×10^{-4}
K-42	3.846×10^{-5}

下表给出了由上述公式计算得到的不同停机时刻病人体表 0.5m 处的剂量率水平。

表 3-79 BNCT 病人体表 0.5m 处的剂量率

主要核素	由上述公式计算得到的病人体表 0.5m 处的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$					
	0 min	5 min	10 min	30 min	1 h	2 h
Na-24	6.15	6.10	6.10	6.02	5.86	5.61
Cl-38	5.51	5.05	4.59	3.21	1.83	0.597
Mg-27	0.417	0.313	0.220	0.498	5.45E-03	6.73E-05
K-42	0.122	0.121	0.121	0.119	0.115	0.109

合计	12.2	11.6	11.0	9.87	7.80	6.32
----	------	------	------	------	------	------

3.3.3.2.4.2 患者排出液体感生放射性

本项目硼中子俘获治疗装置的质子能量 2.6 MeV、流强 20 mA，患者会产生感生放射性，同样患者排泄物、呕吐物等也具有感生放射性。尿液产生感生放射性核素的反应主要为： $^{37}\text{Cl}(\text{n}, \gamma)^{38}\text{Cl}$ 、 $^{41}\text{K}(\text{n}, \gamma)^{42}\text{K}$ 、 $^{23}\text{Na}(\text{n}, \gamma)^{24}\text{Na}$ ，尿液元素组成见下表。

表 3-80 尿液元素组成

元素	O	H	N	Cl	C	Na	K	P
百分比	86.2	11.0	1.0	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1

利用 MCNP 计算尿液感生放射性，保守假设尺寸与人体模型一致的尿液模型位于出束口处，束流考虑为最大运行工况，在患者接受最长 45 分钟的治疗照射过程中，等效尿液活度浓度见下表。

表 3-81 BNCT 患者尿液模型的感生放射性活度浓度

核素	半衰期	治疗结束时刻活度浓度, Bq/L	治疗后2 h活度浓度, Bq/L
^{38}Cl	37.24 min	2.12×10^5	2.30×10^4
^{42}K	12.36 h	4.40×10^3	3.94×10^3
^{24}Na	14.959 h	0.70×10^5	6.31×10^4

保守假设治疗结束后患者立即排尿，尿液排入 BNCT 的衰变池内，排出时刻及衰变 10 天后各核素活度浓度如表 3-82 所示。

表 3-82 BNCT 患者排泄物废水的感生放射性活度浓度

核素	半衰期	排泄物废水活度浓度, Bq/L	排泄物废水衰变 10 天后活度浓度, Bq/L
^{38}Cl	37.24 min	2.12E+04	\
^{42}K	12.36 h	4.40E+02	6.30E-04
^{24}Na	14.959 h	6.91E+03	1.03E-01
总计			1.03E-01

依据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）要求，所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放。由上表可知，排泄物废水

在衰变池中静置衰变 10 天后，总 β 活度约为 0.103 Bq/L，已满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）规定的排放限值（总 α ：1 Bq/L、总 β ：10 Bq/L），在衰变池暂存衰变 30 天后，可解控排入示范中心污水处理站。

3.3.4 直线加速器

本项目电子直线加速器机房 X 射线最高能量为 6MV，不需要考虑感生放射性，无放射性三废产生。

3.3.5 后装治疗机

本项目后装治疗机使用放射源 Ir-192，不需要考虑感生放射性，旧放射源由放射源厂家回收，无放射性三废产生。

3.3.6 大孔径 CT

本项目大孔径 CT 不产生放射性三废，主要存在的危害因素为空气吸收 X 射线能量并通过电离作用产生的臭氧和氮氧化物。

3.3.7 回旋加速器（制备放射性药物）

加速器运行时产生的辐射场主要包括两类，一类为加速器的运行时由初级束及其打靶产生的次级束构成的“瞬发辐射”，另一类为加速器停机后活化核素产生的“缓发辐射”。瞬发辐射的特点是能量高、辐射强，远高于缓发辐射，决定了对加速器机房的屏蔽厚度的设计要求，但随着加速器的停机而完全消失。缓发辐射主要来自加速器部件、设备冷却水、机房内空气被主束或次级粒子轰击产生的活化产物，在加速器停机后依然存在，对于一台屏蔽良好的加速器，它是辐射工作人员受照剂量的主要来源。

3.3.7.1 瞬发辐射源

初级质子束全损失在靶上，限制在加速器内部，对周围环境产生的影响不大，而次级束穿透能力强，会穿过加速器、墙体对周围人员造成照射。因此瞬发辐射关注的

主要是次级辐射。次级束成分复杂，包括质子、α 粒子、电子、中子、光子等各种粒子，其中，中子、光子无论是产生的量还是其是穿透能力均远大于其他粒子，只要能把中子、光子屏蔽，其他粒子也可以被屏蔽，因此次级辐射主要考虑中子、光子。

加速器运行时，束流几乎全部损失在靶上（最大能量 16MeV、最大损失流强 60μA），束流损失和使用的靶材料如下表所示。

表 3-83 医用回旋加速器打靶情况表

靶物质	用途	核反应	单次打靶时间，h	年打靶次数，次	年出束时间，h
¹⁴ N ₂	制备 ¹¹ C	¹⁴ N(p,α) ¹¹ C	5min	20	76.7
水	制备 ¹³ N	¹⁶ O(p,α) ¹³ N	1h	75	
重氧水	制备 ¹⁸ F	¹⁸ O(p,n) ¹⁸ F	10min	20	28.3
⁶⁸ Zn(NO ₃) ₃ 溶液或 ⁶⁸ Zn 金属膜	制备 ⁶⁸ Ga	⁶⁸ Zn(p,n) ⁶⁸ Ga	0.5h	50	
⁶⁴ Ni 金属膜	制备 ⁶⁴ Cu	⁶⁴ Ni(p,n) ⁶⁴ Cu	1.5h	10	20
⁸⁹ Y 金属膜	制备 ⁸⁹ Zr	⁸⁹ Y(p,n) ⁸⁹ Zr	0.1h	50	
铜靶	回收质子束	/	/	/	保守考虑连续运行 500h
年出束时间总计，h					625

对于质子回旋加速器，在质子束流形成、加速、准直和引出等过程中，都会发生束流损失。质子与物质相互作用，以原子电离和激发过程为主，同时穿过原子核的库仑势垒，进原子核内部，发生核内级联，通过（p，n）、（p，pn）、（p，2n）、（p，α）、（p，γ）等核反应产生瞬发中子、γ 光子和其他粒子。

在产生的次级粒子中，不论是产生的量还是穿透能力均远小于中子，带电粒子因电离作用迅速停止，γ 光子在经过屏蔽材料时大都被吸收，γ 辐射场较中子辐射场低 1~2 个数量级。因此，打靶产生的辐射场主要为次级中子，通过比较中子产额即可得出不同靶的次级中子辐射大小。

其中 ¹¹C 和 ¹³N 的制备是通过（p，α）反应，显然相较其他靶材中子产额低。其余的核素均通过（p，n）反应获得，在每个核反应中都会产生一个中子。参考日本住友关于不同靶材在辐照过程中产生辐射剂量水平的报告，通过以下公式对中子产额进行计算：

物理产额

$$Y^{EOIB} = [\frac{Bq}{\mu Ah}] \tag{1}$$

产生核素的数量

$$\text{No. of nuclei} = \frac{A[\text{Bq}]}{\lambda[\text{s}^{-1}]} \quad (2)$$

中子产额

$$Y^{EOIB} \left[\frac{\text{Bq}}{\mu\text{Ah}} \right] \times \frac{1}{\lambda[\text{s}^{-1}]} \times \frac{1}{3600} = \left[\frac{\text{No. of nuclei}}{\mu\text{As}} \right] \equiv \left[\frac{\text{neutron}}{\mu\text{As}} \right] = \Phi \quad (3)$$

实际上除了通过重氧水制备 ^{18}F 外，其他反应中质子不会被完全阻止在靶材料中，只有一部分束流会参与反应，但从保守考虑，先均以厚靶进行评估。

依据 IAEA 官网 (<https://www-nds.iaea.org/medical/index.html>) 中提供的物理产额进行计算，结果如下表所示。

表 3-84 放药制备过程中子产额计算表

放射性核素	16 MeV 物理产额 (MBq/μAh)	半衰期(min)	中子产额
F-18	5.08E+03	110	1.34E+10
Cu-64	6.40E+02	762	1.17E+10
Ga-68	9.23E+03	68	1.51E+10
Zr-89	9.43E+01	4704	1.07E+10

可以看出在这种保守的假设下， ^{68}Zn 制备 ^{68}Ga 的中子产额最高，其次是重氧水制备 ^{18}F 。而根据文献调研，通常质子打重氧水靶产生的次级中光子辐射最强，同时得知实际制备时 ^{68}Zn 靶厚仅约 300μm。为进一步验证，在 FLUKA 中采用模拟计算，以最高能量 16MeV 质子模拟计算打重氧水、 ^{68}Zn 和调试用铜靶产生的剂量分布，模拟计算结果如图 3-47、图 3-48、图 3-49 所示，由结果看出，重氧水靶产生的周围剂量当量率最高。

综上，本项目回旋加速器应以质子打重氧水靶进行屏蔽计算及瞬发影响分析。

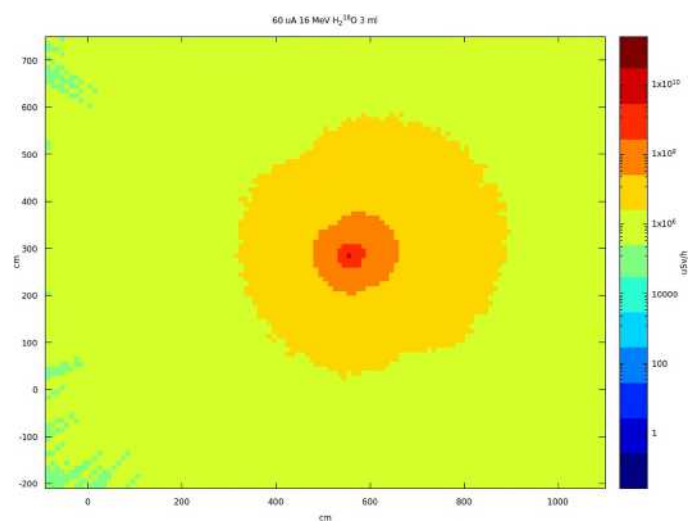


图 3-47 16MeV 质子打重氧水产生的剂量分布图

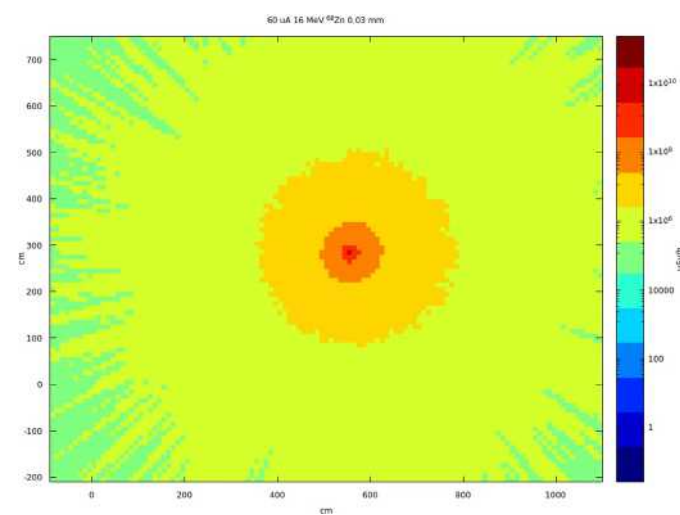


图 3-48 16MeV 质子打 ^{68}Zn 产生的剂量分布图

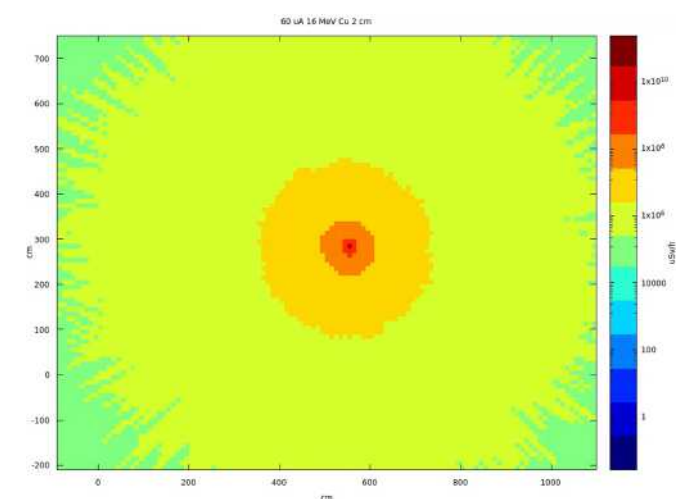


图 3-49 16MeV 质子打调试用铜靶产生的剂量分布图

3.3.7.2 感生放射性

对于能量较高的质子加速器，感生放射性常常是辐射工作人员受照剂量的主要原因。对于本项目加速器，感生放射性主要是加速器主束（质子束）与加速器部件以及产生的次级中子、 γ 光子与加速器部件、设备冷却水及加速器机房内的空气相互作用引起的。其辐射水平取决于加速粒子的能量、种类、流强、加速器运行时间、冷却时间和被照材料性质等诸多因素。对于本次医用回旋加速器打靶制备正电子核素，由于每次打靶制备正电子核素的时间很短（5min-1.5h），且半衰期长的核素达到饱和放射性的时间较长，对于单次运行时间该类半衰期较长的放射性核素产额一般都很低，其主要产生短半衰期核素，而半衰期短的核素衰变非常快，从而导致缓发辐射剂量场在较短的时间内便衰减到较低的水平，其与加速器调试过程中一直打铜靶相比其产生的感生放射性影响小很多，因此本项目主要考虑医用回旋加速器调试过程中（铜靶和铝靶）的感生放射性影响。

3.3.7.2.1 空气的感生放射性

加速器运行期间初级粒子或次级粒子与辐照加速器机房中空气分子的直接核反应是空气活化核素的主要来源。这种空气中活化的放射性核素一般是短寿命的，核素的放射性衰变和空气的稀释，使放射性浓度非常快地降低到较低的水平。空气中活化的放射性核素主要通过热中子俘获、 $(n, 2n)$ 、 (γ, n) 反应和散裂反应而产生。本项目加速器产生的活化核素主要有 ^3H 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等。它们对人体的危害是 β 、 γ 放射性气体浸没外照射和吸入引起的内照射。

采用蒙卡程序，对医用回旋加速器机房内空气的感生放射性进行模拟计算，计算模型如下图所示，计算输入为：

质子束能量：保守采用加速器最大能量 16MeV 进行计算；

靶子参数：铜靶，半径 5cm，厚度 3cm；

质子束流强：铜靶上束流损失取靶子最大束流损失流强 60 μA ；

辐照方案：连续照射 500h（年最大运行时间）。

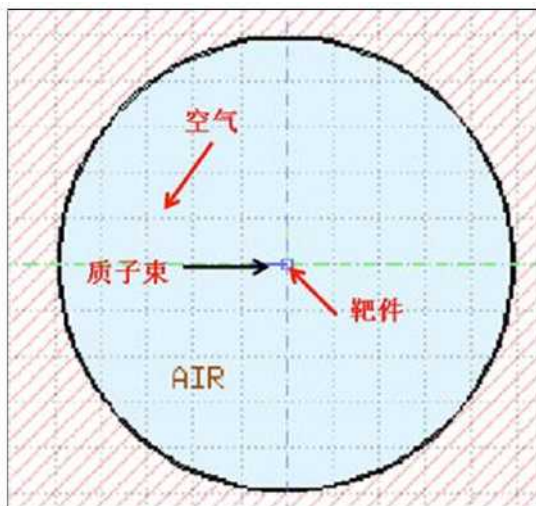


图 3-50 空气活化计算模型示意图

计算得到回旋加速器机房内空气中的感生放射性核素的活度浓度见下表。

表 3-85 最大工况下医用回旋加速器机房空气中活化核素活度计算结果

机房	活化核素	核素半衰期	加速器机房核素活度浓度 Bq/m ³
医用回旋加速器 机房	H-3	12.33a	1.41E+00
	N-13	9.965m	6.40E+03
	O-15	122.2s	1.29E+03
	Ar-41	109.34m	6.59E+02
总活度浓度, Bq/m ³			8.35E+03

由于本项目加速器开机时机房内的通风系统一直是开启的，因此实际工作中空气中的活化气体将小于上表中的浓度，以上表的活化浓度计算人员剂量是保守的。

3.3.7.2.2 冷却水的感生放射性

本项目医用回旋加速器的冷却水主要用于回旋加速器运行时对铜靶件的冷却。采用蒙卡程序，对医用回旋加速器冷却水的感生放射性进行模拟计算，计算模型如下图所示，计算输入为：

质子束能量：保守采用加速器最大能量 16MeV 进行计算；

靶子参数：铜靶，半径 5cm，厚度 3cm；冷却水半径 5cm，体积取回路中的总冷却水量 1m³；

质子束流强：铜靶上束流损失取加速器最大流强 60μA；

辐照方案：连续照射 500h（年最大运行时间）。

计算得到连续照射后停机冷却 0s 的冷却水活化核素浓度见下表。

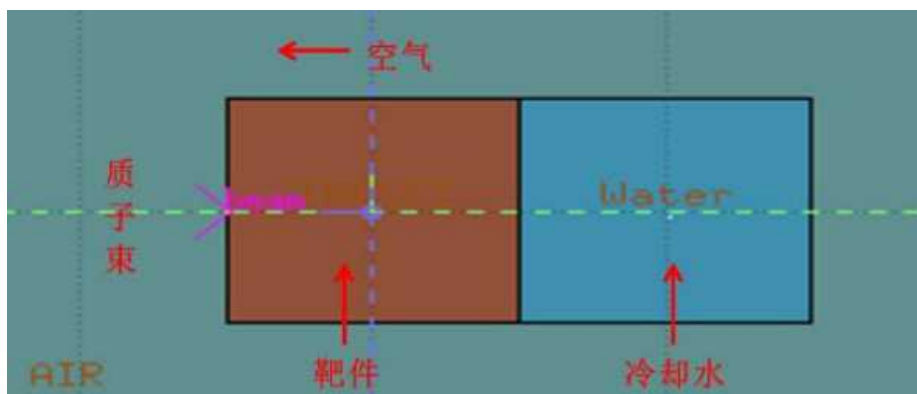


图 3-51 冷却水活化计算模型示意图

表 3-86 冷却水活化计算结果

加速器机房	活化核素	核素半衰期	运行 1 年后核素活度浓度 Bq/L
医用回旋加速器机房	H-3	12.33a	6.30E-01
	N-13	9.965min	8.73E+01
	O-15	122.2s	1.07E+03

3.3.7.2.3 结构部件的感生放射性

对于本项目医用回旋加速器，其可能产生的活化部件主要为靶件（铜靶）和剥离膜支架（铝靶、石墨），铜靶半径为 5cm，厚度为 3cm，剥离膜支架的尺寸取 1cm×1cm×1cm，在靶件被辐照的同时，剥离膜支架也同时被辐照。由于石墨的(p, n)反应阈能为 19.6MeV，16MeV 的质子轰击石墨靶件不会产生中子，因此剥离膜支架只考虑铝靶。每次换靶前需冷却 2 周左右，人员方可进入进行更换靶操作。采用蒙卡程序，对医用回旋加速器结构部件的感生放射性进行模拟计算，计算输入为：

质子束能量：保守采用加速器最大能量 16MeV 进行计算；

靶子参数：铜靶，半径 5cm，厚度 3cm；剥离膜支架（铝靶），1cm x 1cm x 1cm；

质子束流强：铜靶上束流损失取 60 μA；

辐照方案：连续照射 500h（年最大运行时间）。

计算得到部件活化后的核素种类、活度浓度等结果见下表。由表中可知大部分核素均为短半衰期核素，在经过两周的冷却后对环境可能会有影响的主要为 Zn-65（半衰期 244d）。

表 3-87 医用回旋加速器部件中活化核素及活度

部件	活化核素	半衰期	总活度	
			冷却 0s	冷却 2 周
靶件（铜靶）	Zn-62	9.26h	2.21E+10	2.15E-01
	Cu-62	9.673min	8.81E+10	2.19E-01
	Co-62	1.5min	9.30E+05	0
	Zn-63	38.47min	5.56E+11	0
	Cu-64	12.7h	1.37E+10	1.49E+02
	Zn-65	244d	1.86E+08	1.79E+08
	Ni-65	2.5h	2.39E+07	0
	Cu-66	5.12min	7.08E+08	0
剥离膜支架（铝靶）	Si-27	4.16s	9.08E+11	0
	Mg-27	9.458min	2.45E+08	0
	Al-28	2.2414min	1.13E+07	0

3.3.8 非密封放射性物质

本项目非密封放射性物质工作场所主要的辐射源项为： β/γ 射线。辐射途径主要为操作核素对工作人员的外照射影响内照射影响，可能造成手和皮肤的污染。同时会产生放射性废液（实验过程产生的放射性药物废液）和放射性固体废物（如离心管、注射器、手套等）以及极少量的放射性废气。

4 辐射安全与防护设施

4.1 质子治疗系统

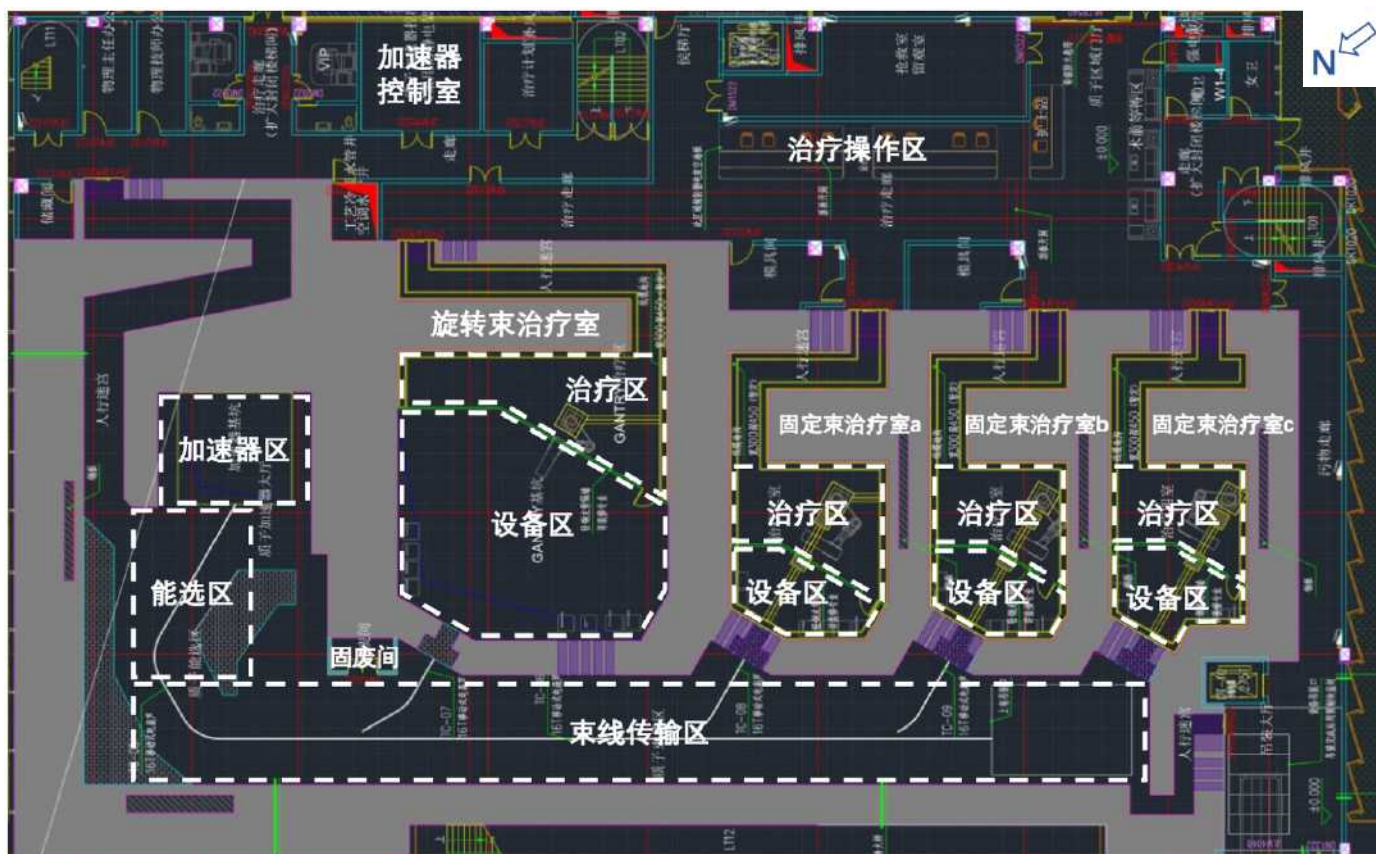
4.1.1 场所布局与分区

4.1.1.1 场所布局

本项目质子治疗系统的主要功能区域布局在示范中心一层，从北到南依次为加速器大厅（内含加速器区、能选区、固废间、束线传输区）、1间旋转束治疗室（内含设备区、治疗区）及3间固定束治疗室（序号分别为a、b、c，每间内含设备区、治疗区），在治疗走廊东侧为加速器控制室（控制回旋加速器）、治疗操作区（控制各治疗室）等，见图4-1。质子治疗系统的配套功能用房布局在负一层至三层，主要包括质子功率源间、质子数据中心、能选电源间、工艺冷却水间等。各层布局情况具体见表4-1及图4-5~图4-6。

表 4-1 本项目质子治疗系统布局

楼层	房间、区域名称
一层	加速器大厅（内含加速器区、能选区、固废间、束线传输区）、1间旋转束治疗室（内含设备区、治疗区）、3间固定束治疗室（序号分别为a、b、c，每间内含设备区、治疗区）、质子加速器控制室（控制回旋加速器）、治疗操作区（控制各治疗室）、护士站、抢救室、留观室、物理主任办公室、物理技师办公室、VIP等候室、治疗计划室、模具间、储藏室、质子区域出入口等
二层	质子加速器大厅上空、旋转束治疗室上空、质子功率源间、能选电源室、质子数据中心、质子气瓶间、质子压缩机室、空调机房、质子备件库、吊装大厅等
三层	质子加速器大厅上空、旋转束治疗室上空、质子变配电房、空调机房、排烟机房等
负一层	加速器基坑、旋转束治疗室基坑、集水井、工艺冷却水间等
屋面层	不上人屋面、设备吊装口、排风井、排烟井等



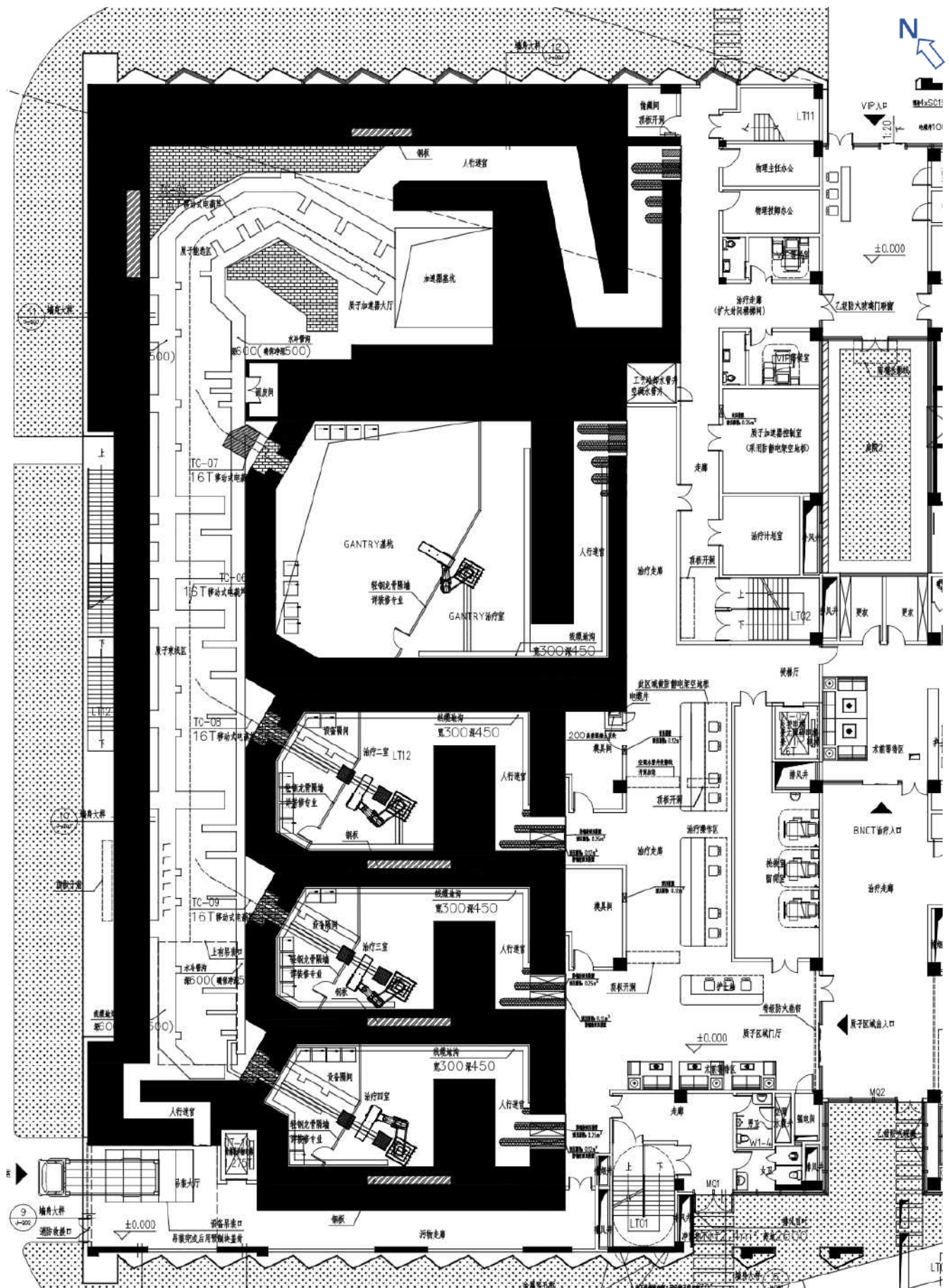
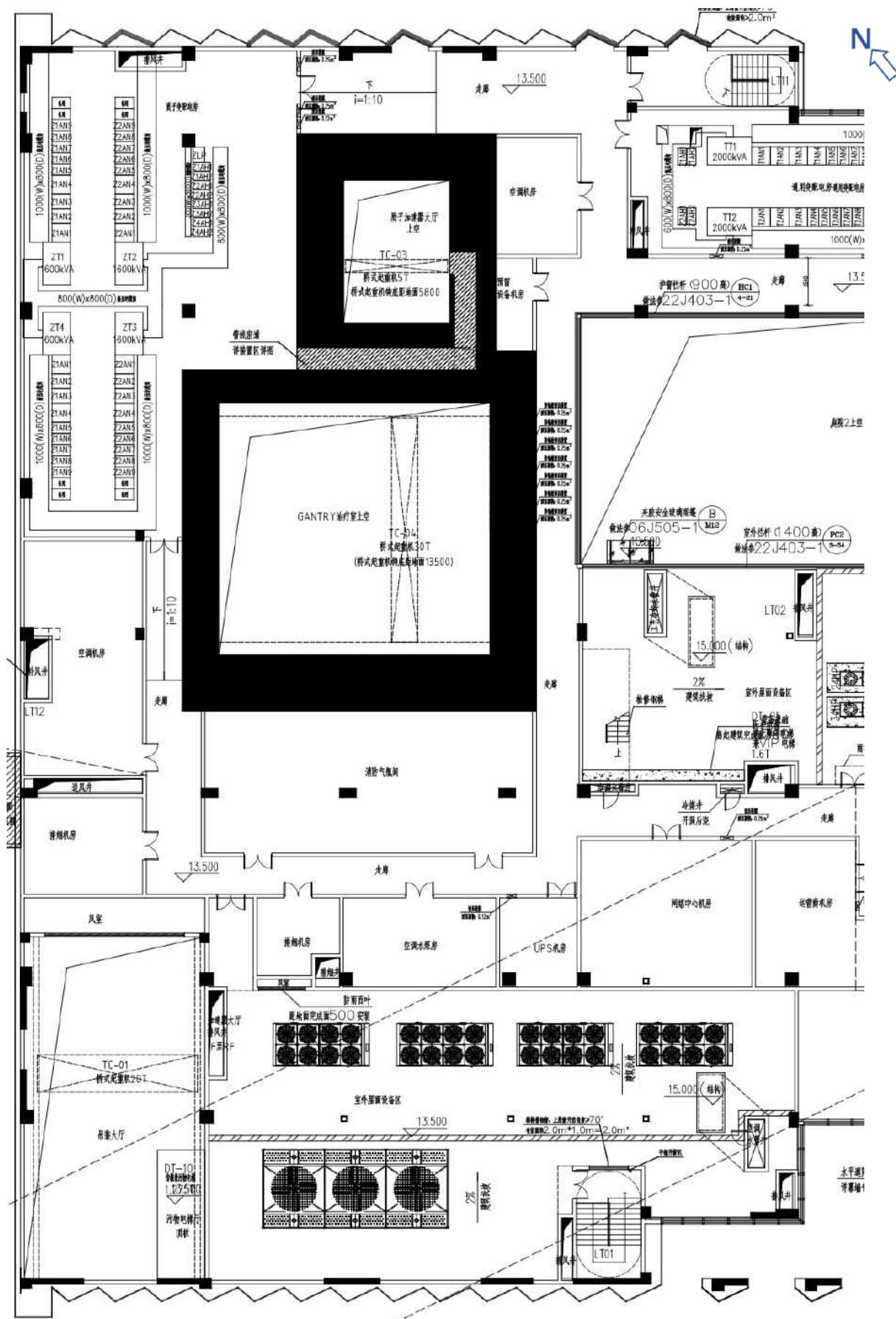


图 4-2 质子治疗区一层平面布局图



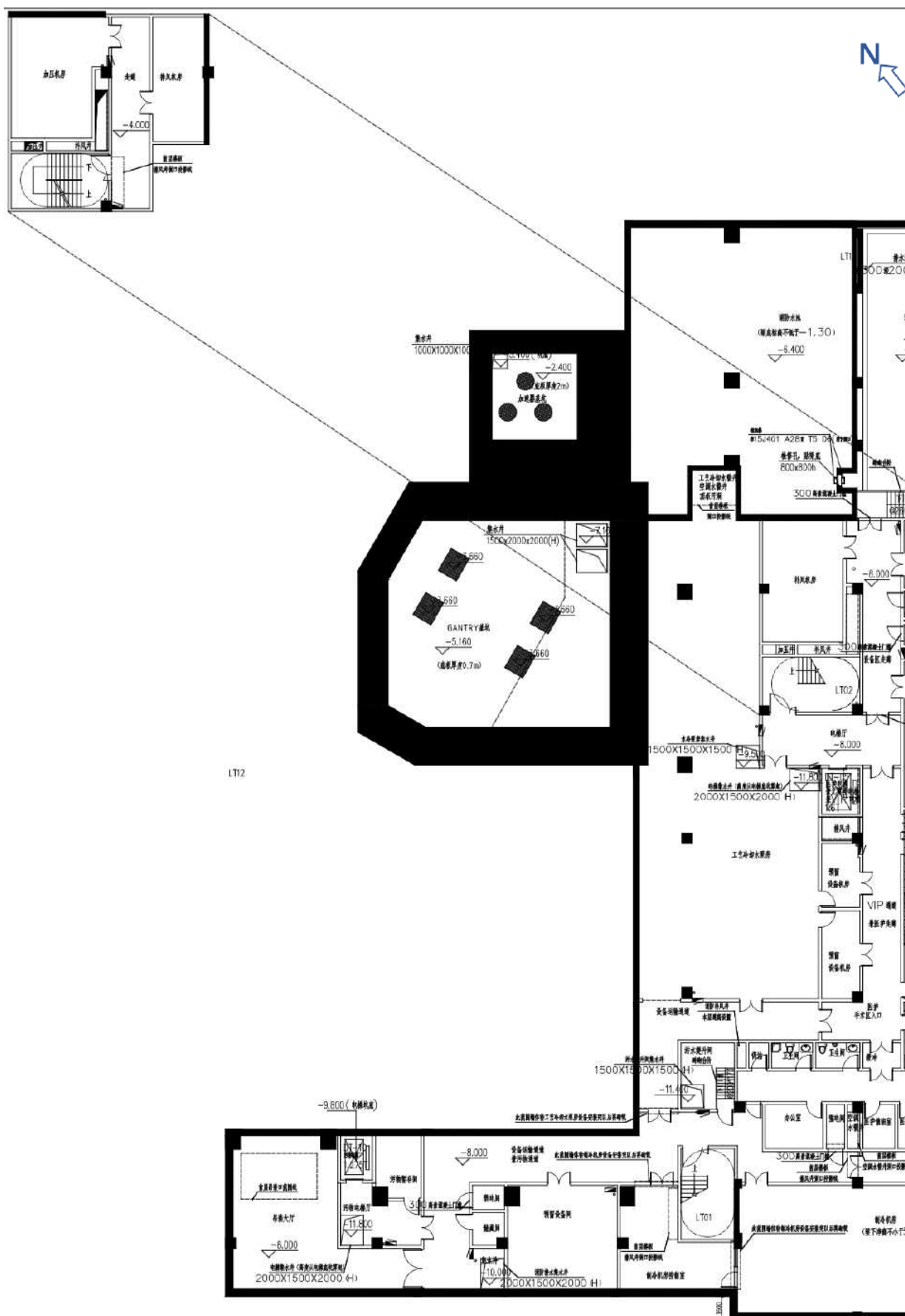


图 4-5 质子治疗区负一层平面布局图

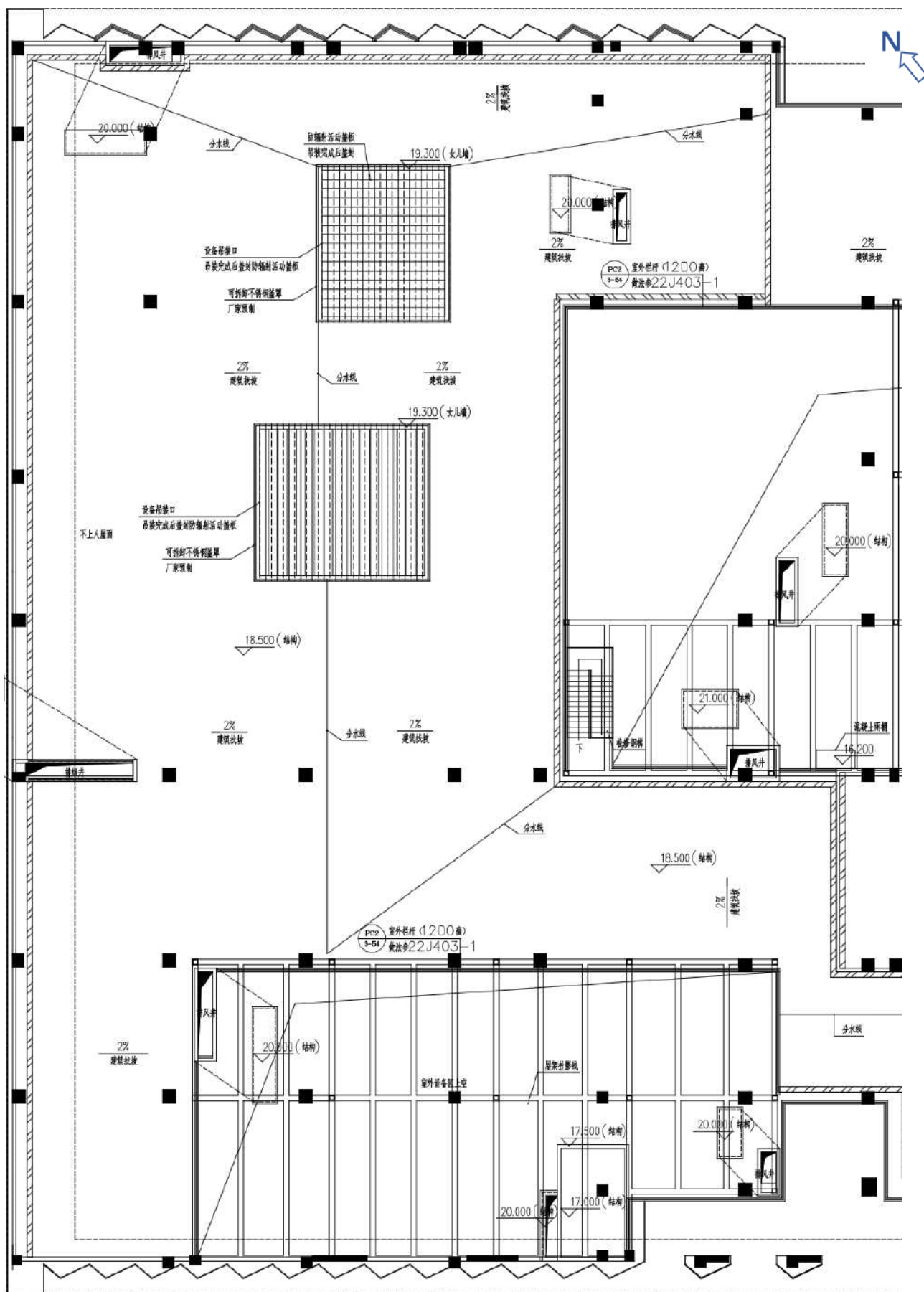


图 4-6 质子治疗区屋面层平面布局图

4.1.1.2 辐射工作场所分区

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

质子治疗系统辐射工作场所分区见图 4-7~图 4-10，具体如下：

（1）控制区：加速器大厅（内含加速器区、能选区、固废间、束线传输区）、1 间旋转束治疗室（内含设备区、治疗区）、3 间固定束治疗室（序号分别为 a、b、c，每间内含设备区、治疗区）；

（2）监督区：上述控制区屏蔽体外相邻的本项目工作场所，包括模具间、走廊、质子加速器控制室、治疗操作区、护士站、抢救室、留观室、物理主任办公室、物理技师办公室、VIP 等候室、治疗计划室、储藏室、质子区域出入口等。

控制区管理要求：控制区入口处明显位置张贴电离辐射警告标志（如图 4-11 所示），并给出辐射水平指示，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，必要时佩戴个人剂量报警仪。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，定期审查监督区的条件，以确定是否需要采取防护措施和做出安全规定，或是否需要更改监督区的边界。

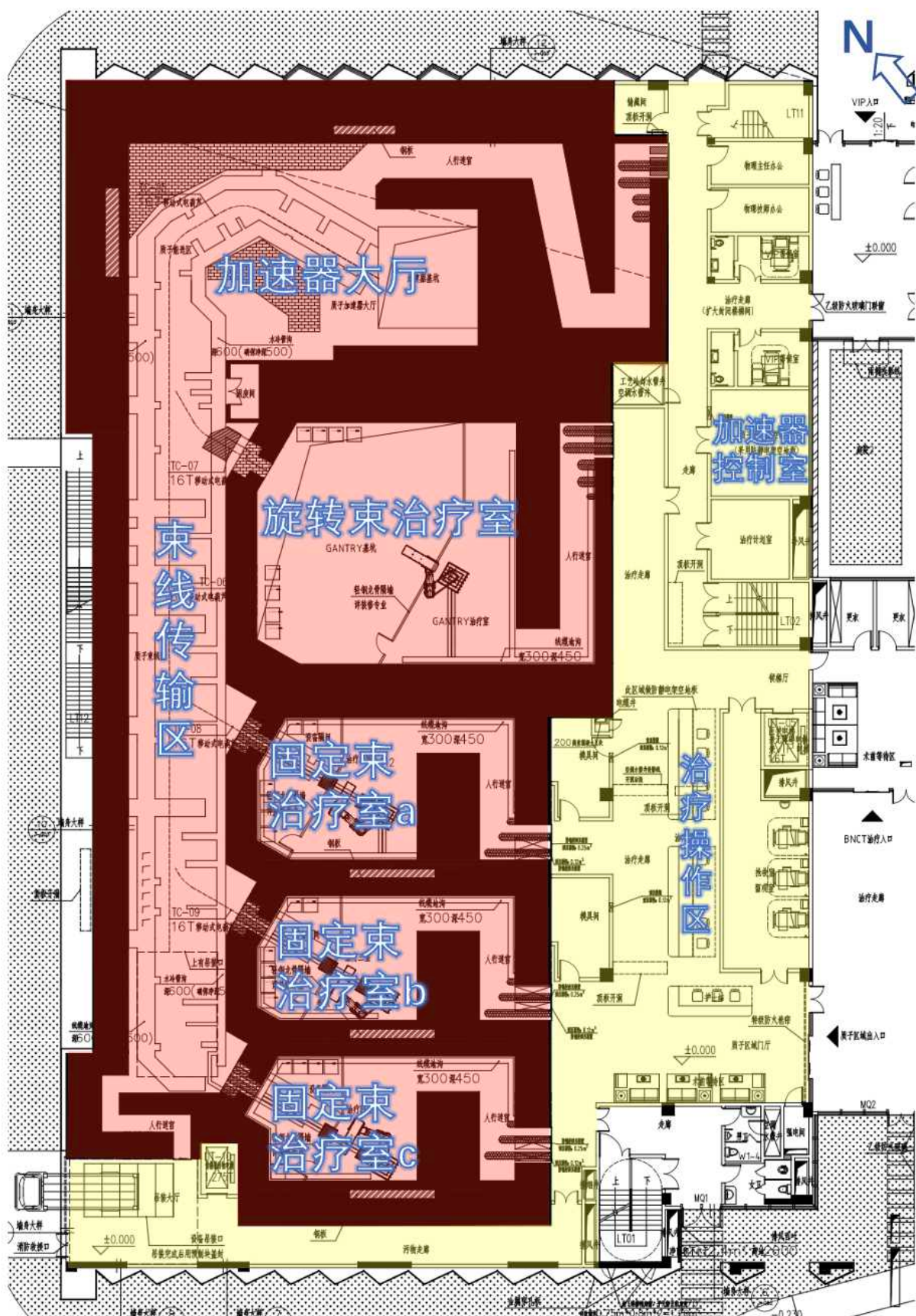


图 4-7 质子治疗系统辐射工作场所分区示意图（一层）

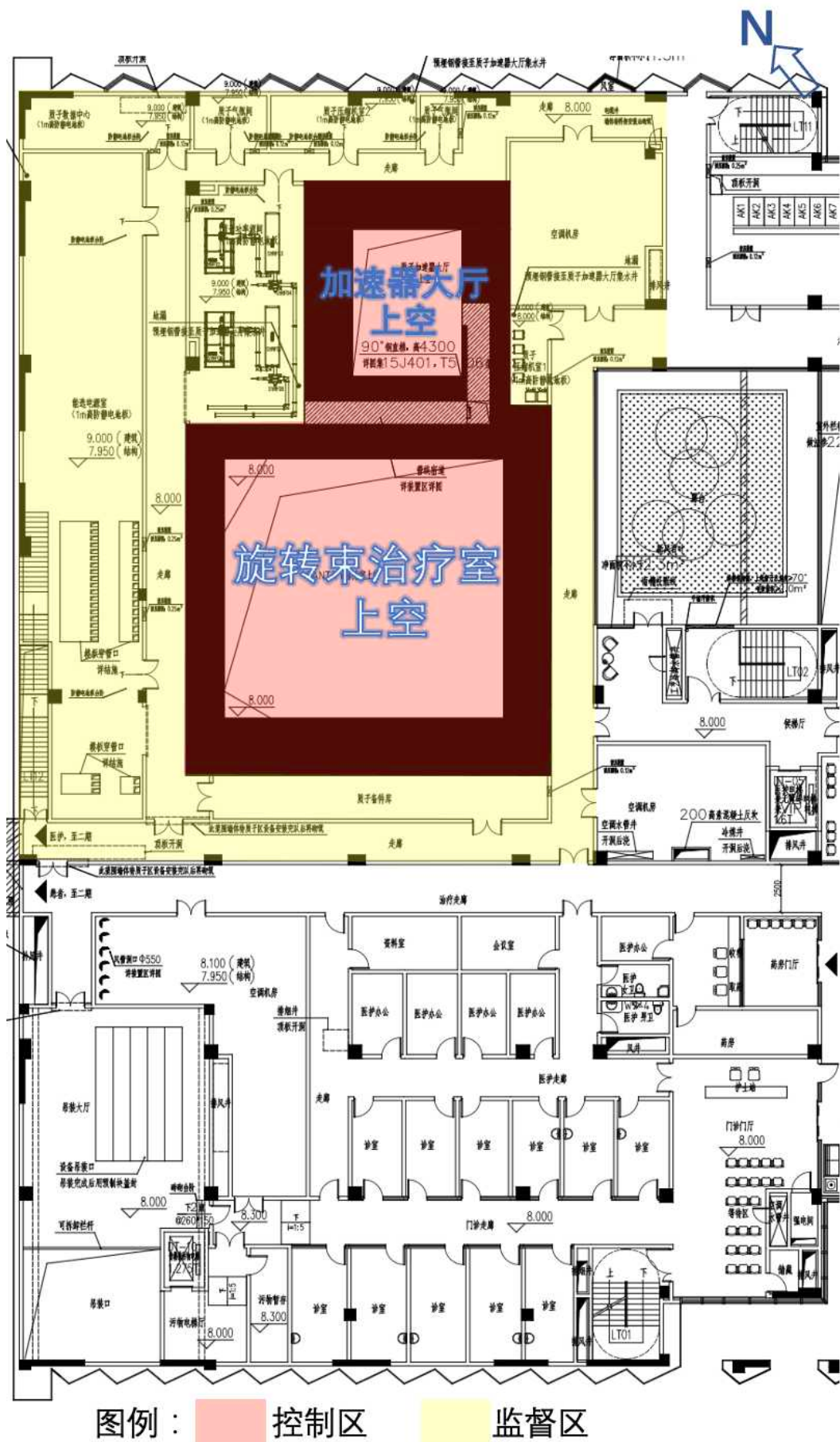


图 4-8 质子治疗系统辐射工作场所分区示意图 (二层)

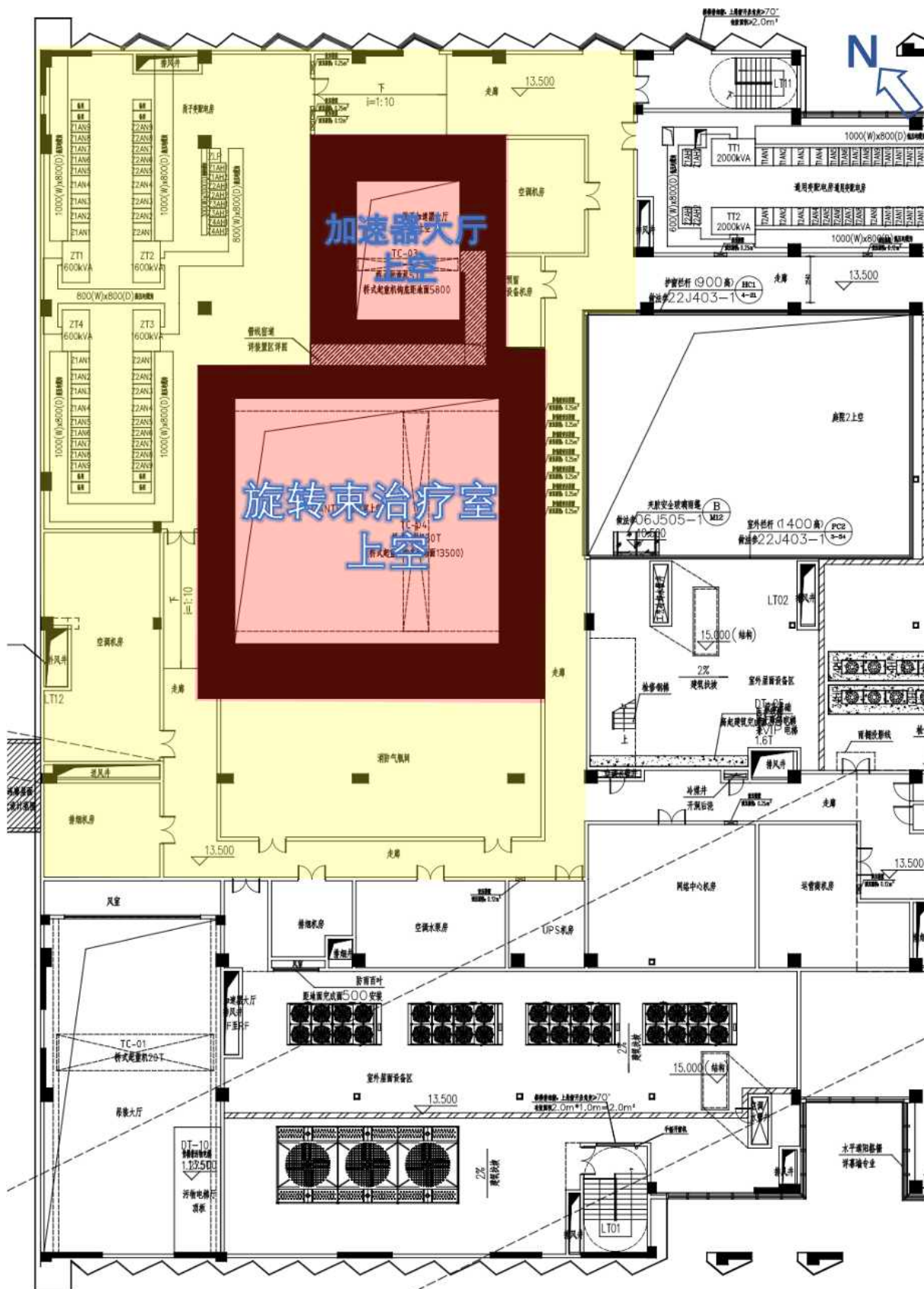
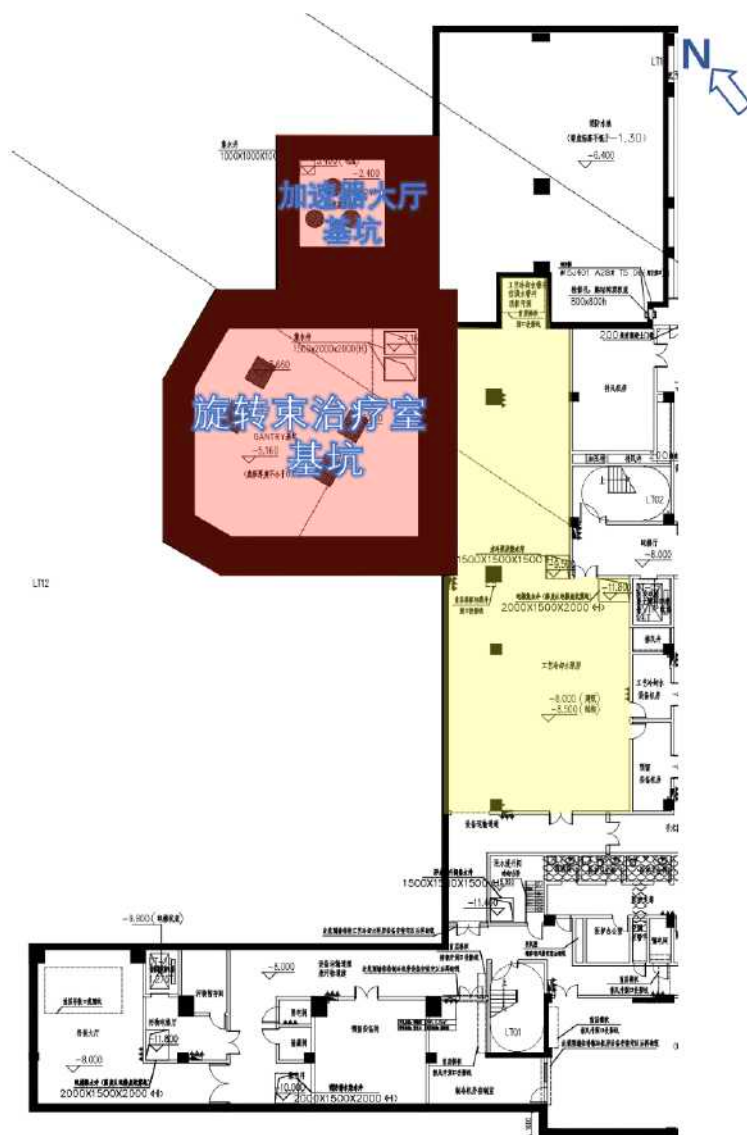
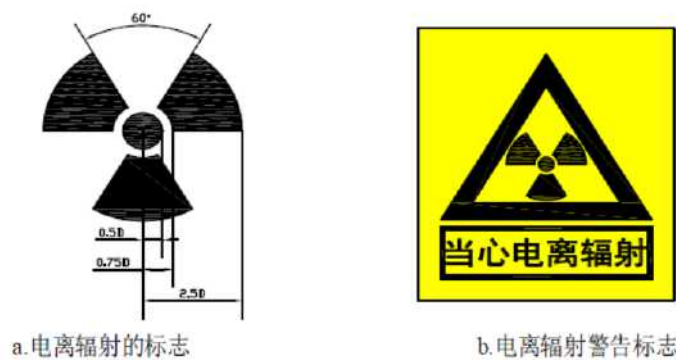


图 4-9 质子治疗系统辐射工作场所分区示意图（三层）



图例：控制区 监督区

图 4-10 质子治疗系统辐射工作场所分区示意图（负一层）



a. 电离辐射的标志

b. 电离辐射警告标志

图 4-11 辐射工作场所警告标志示意图

4.1.1.3 布局合理性分析

由图 1-7 至图 1-10 可知，质子治疗区一层东侧为硼中子俘获治疗区等，东南侧为大厅分诊区，东北、西、南侧为示范中心室外绿化带；二层东侧为庭院上空，南侧主要为门诊、药房、检验科等，西侧和北侧无相邻建筑；三层东侧为庭院上空，南侧为室外屋面设备区，西侧和北侧无相邻建筑；负一层基坑东侧为工艺水冷用房、消防水池等，南、西、北侧均为土层。

由表 4-1 与图 4-2~图 4-6 可知，本项目质子治疗系统主要功能区设置在一层，房间功能布局紧凑，设置了质子治疗主出入口和物理隔离，与其他各医疗单元之间分隔明确，不会相互穿插和干扰。机房设有迷道，紧邻场所的四侧屏蔽墙体、防护门和屋顶无办公室等人员长居留场所。

与 HJ1198-2021 对标的相关情况见表 4-2，由表 4-2 可知本项目质子治疗系统的布局满足标准要求。从满足安全诊疗和辐射安全防护的角度来看，该区域的布局是合理的。

表 4-2 质子治疗系统的选址与布局与 HJ1198-2021 相关要求对比

标准名称	标准要求		本项目情况
《放射治疗辐射安全与防护要求》 (HJ1198-2021)	5.1 选址与布局	5.1.1 放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。	本项目质子治疗系统位于示范中心大楼建筑内，示范中心不属于民居、写字楼和商住两用的建筑物。
		5.1.2 放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。	本项目质子治疗系统位于示范中心大楼建筑内部西侧一端，避开了儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，符合标准要求。

4.1.2 辐射屏蔽

4.1.2.1 设计标准

质子治疗系统工作场所辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

(1) 年剂量约束值

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）的相关规定：本项目职业照射的剂量约束值为 5mSv/a，公众照射的剂量约束值为 0.1mSv/a。

(2) 屏蔽体外剂量率控制水平

质子治疗系统辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平列于表 1-7。

4.1.2.2 屏蔽设计

质子治疗系统辐射工作场所屏蔽设计方案如表 4-3 所示，采用普通混凝土（密度不低于 2.35g/cm³）作为主要的屏蔽材料，具体设计情况见表 4-3、图 4-12~图 4-15。

表 4-3 质子治疗系统辐射工作场所屏蔽设计及周围环境情况

区域	屏蔽体	材质、厚度	周围环境
加速器大厅	北侧墙	3500 mm 混凝土+局部内嵌 500 mm 钢板	室外草地
	西侧墙	3500 mm 混凝土+局部内嵌 800 mm 钢板	室外草地
	西北侧后砌墙	在北墙基础上增加 C30 混凝土砌块：北侧厚度 1500 mm ~ 5430 mm	西侧墙、北侧墙
	北侧迷道内墙	1680 mm 混凝土	迷道
	南侧墙	3500 mm / 4300 mm 混凝土	旋转束治疗室
	东侧迷道内墙 1	3000 mm ~ 4700 mm 混凝土	迷道
	东侧迷道内墙 2	1300 mm ~ 2900 mm 混凝土	迷道
	东侧迷道外墙	1000 mm 混凝土	储藏间、走廊
	能选区顶板	4000 mm 混凝土	能选电源室、功率源间、数据中心、气瓶间、压缩机室、走廊
	迷道顶板	2500 mm 混凝土	空调机房、走廊
	底板	2000 mm 混凝土	土壤、消防水池
加速器大厅上空	防护门	7 cm 聚乙烯	走廊
	北侧墙	2500 mm 混凝土	走廊
	西侧墙	2500 mm 混凝土	功率源间、配电房
	南侧墙	2500 mm 混凝土	迷道、旋转束治疗室上空
	东侧墙	2500 mm 混凝土	压缩机室、空调机房
	顶板	2500 mm 混凝土	楼顶

区域	屏蔽体	材质、厚度	周围环境
加速器大厅基坑	北侧墙	1500 mm 混凝土	土壤
	西侧墙	1500 mm 混凝土	土壤
	南侧墙	5300 mm 混凝土	旋转束治疗室基坑
	东侧墙	3500 mm 混凝土	消防水池
	底板	2000 mm 混凝土	土壤
束线传输区	西侧墙	2000 mm 混凝土	室外草地
	东侧墙	1700 mm 混凝土	各治疗室
	南侧迷道内墙	1200 mm 混凝土	迷道
	南侧迷道外墙	1500 mm 混凝土	吊装大厅
	顶板	2500 mm 混凝土	吊装大厅、医护走廊、治疗走廊、空调机房、能选电源室、走廊
	底板	2000 mm 混凝土	土壤
	防护门	普通门	走廊
旋转束治疗室	北侧墙	3500 mm / 4300 mm 混凝土	加速器大厅
	西侧墙	1700 mm 混凝土	束线传输区
	南侧墙	3000 mm 混凝土	固定束治疗室 a
	东侧迷道内墙	2400 mm 混凝土	迷道
	东侧迷道外墙	1000 mm 混凝土	治疗走廊
	迷道顶板	2500 mm 混凝土	走廊
	防护门	7 cm 聚乙烯	走廊
旋转束治疗室上空	北侧墙	1800 mm / 4300 mm 混凝土	迷道、加速器大厅上空、功率源间、配电房
	西侧墙	2000 mm 混凝土	走廊、配电房
	南侧墙	3000 mm 混凝土	质子备件库、消防气瓶间
	东侧墙	2500 mm 混凝土	走廊
	顶板	2500 mm 混凝土	楼顶
旋转束治疗室基坑	北侧墙	2500 mm/ 5300 mm 混凝土	土壤/加速器大厅基坑
	西侧墙	2000 mm 混凝土	土壤
	南侧墙	2500 mm 混凝土	土壤
	东侧墙	2500 mm 混凝土	工艺冷却水泵房
	底板	2000 mm 混凝土	土壤
固定束治疗室 a	北侧墙	3000 mm 混凝土	旋转束治疗室
	西侧墙	1700 mm 混凝土	束线传输区
	南侧墙	2000 mm 混凝土+局部内嵌 500 mm 钢板	固定束治疗室 b
	东侧迷道内墙	3500 mm 混凝土	迷道
	东侧迷道外墙	2000 mm 混凝土	模具间、治疗走廊
	顶板	2500 mm 混凝土	质子备件库、医护走廊、治疗走廊
	底板	2000 mm 混凝土	土壤
	防护门	7 cm 聚乙烯	走廊
	北侧墙	2000 mm 混凝土+ 500 mm 钢板	固定束治疗室 a

区域	屏蔽体	材质、厚度	周围环境
固定束治疗室 b	西侧墙	1700 mm 混凝土	束线传输区
	南侧墙	2000 mm 混凝土+局部内嵌 500 mm 钢板	固定束治疗室 c
	东侧迷道内墙	3500 mm 混凝土	迷道
	东侧迷道外墙	2000 mm 混凝土	模具间、治疗走廊
	顶板	2500 mm 混凝土	空调机房、走廊、医护办公
	底板	2000 mm 混凝土	土壤
	防护门	7 cm 聚乙烯	走廊
固定束治疗室 c	北侧墙	2000 mm 混凝土+ 500 mm 钢板	固定束治疗室 b
	西侧墙	1700 mm 混凝土	束线传输区、污物电梯
	南侧墙	2500 mm 混凝土+ 局部内嵌 500 mm 钢板	污物走廊
	东侧迷道内墙	3500 mm 混凝土	迷道
	东侧迷道外墙	2000 mm 混凝土	治疗走廊
	顶板	2500 mm 混凝土	门诊走廊、诊室
	底板	2000 mm 混凝土	设备运输通道兼污物通道、污物暂存间
	防护门	7 cm 聚乙烯	走廊

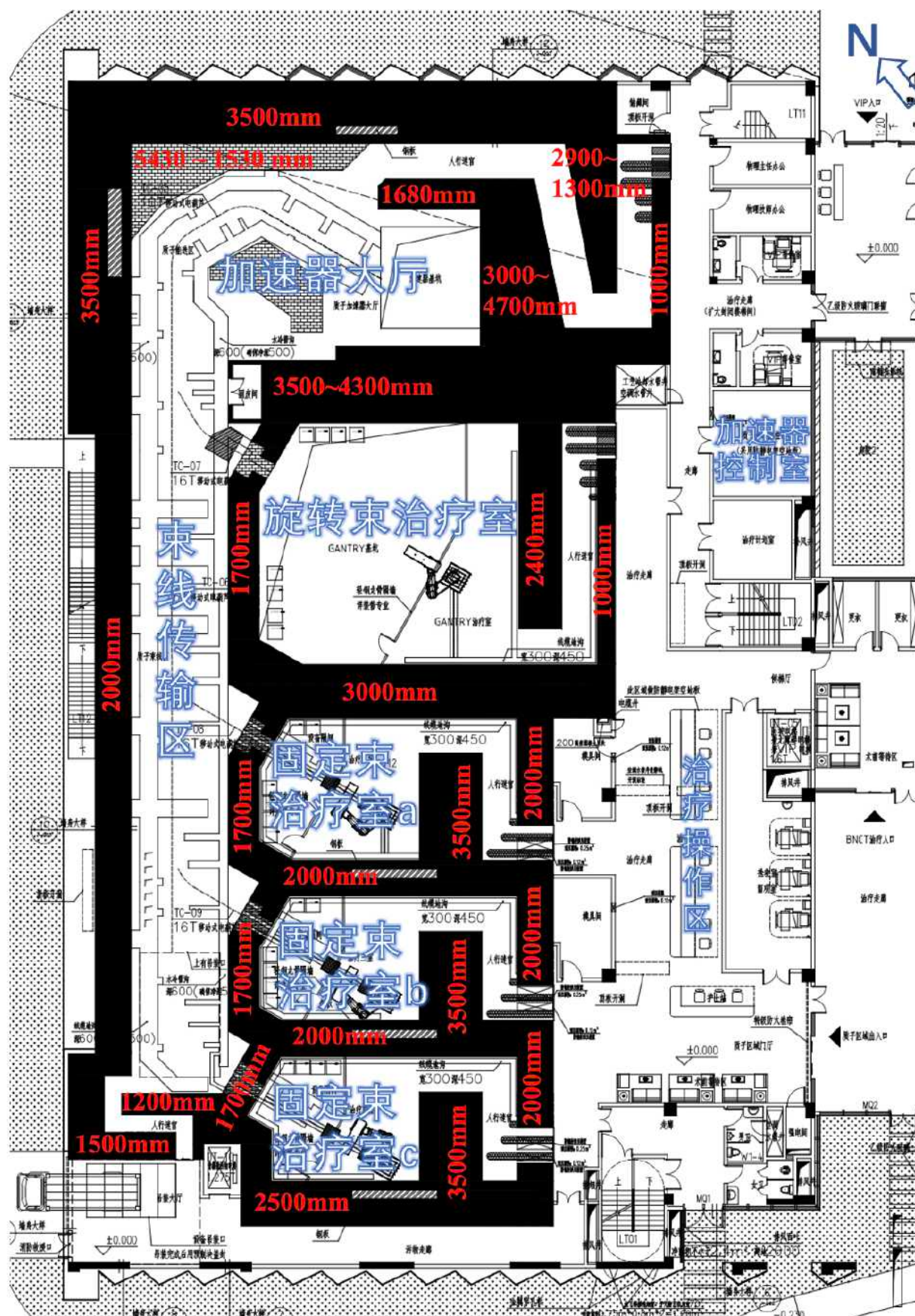


图 4-12 质子治疗系统屏蔽体厚度示意图（一层）

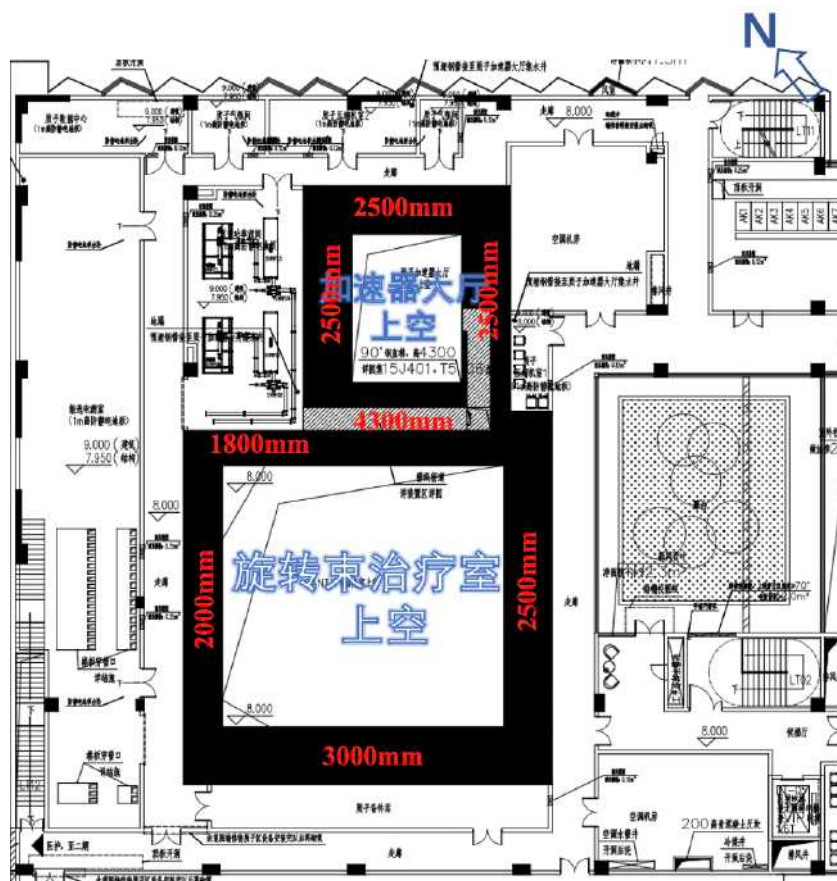


图 4-13 质子治疗系统屏蔽体厚度示意图 (二层)

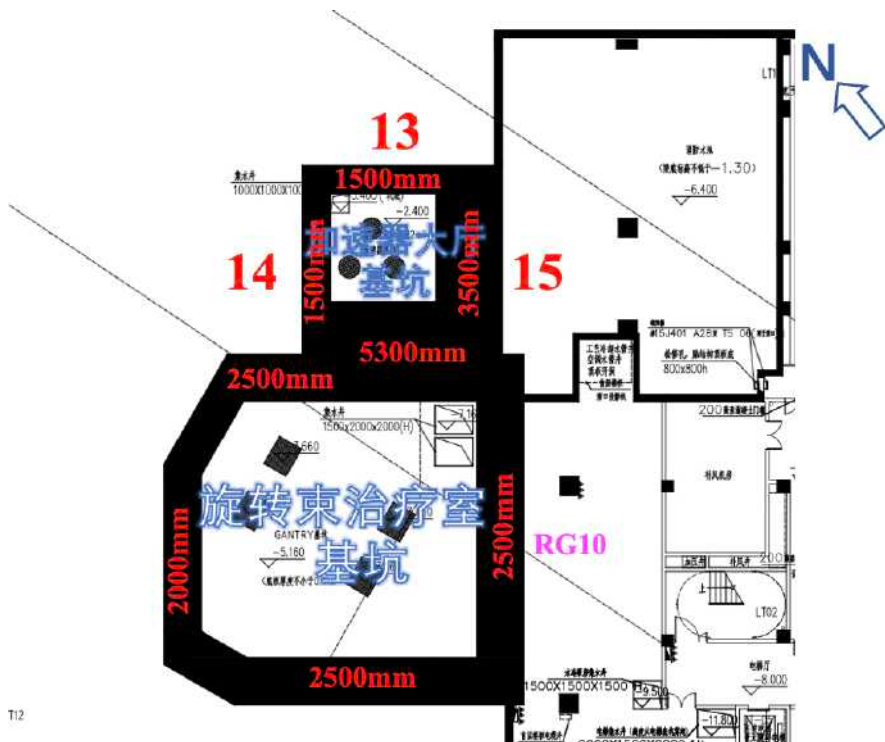


图 4-14 质子治疗系统屏蔽体厚度示意图 (二层)

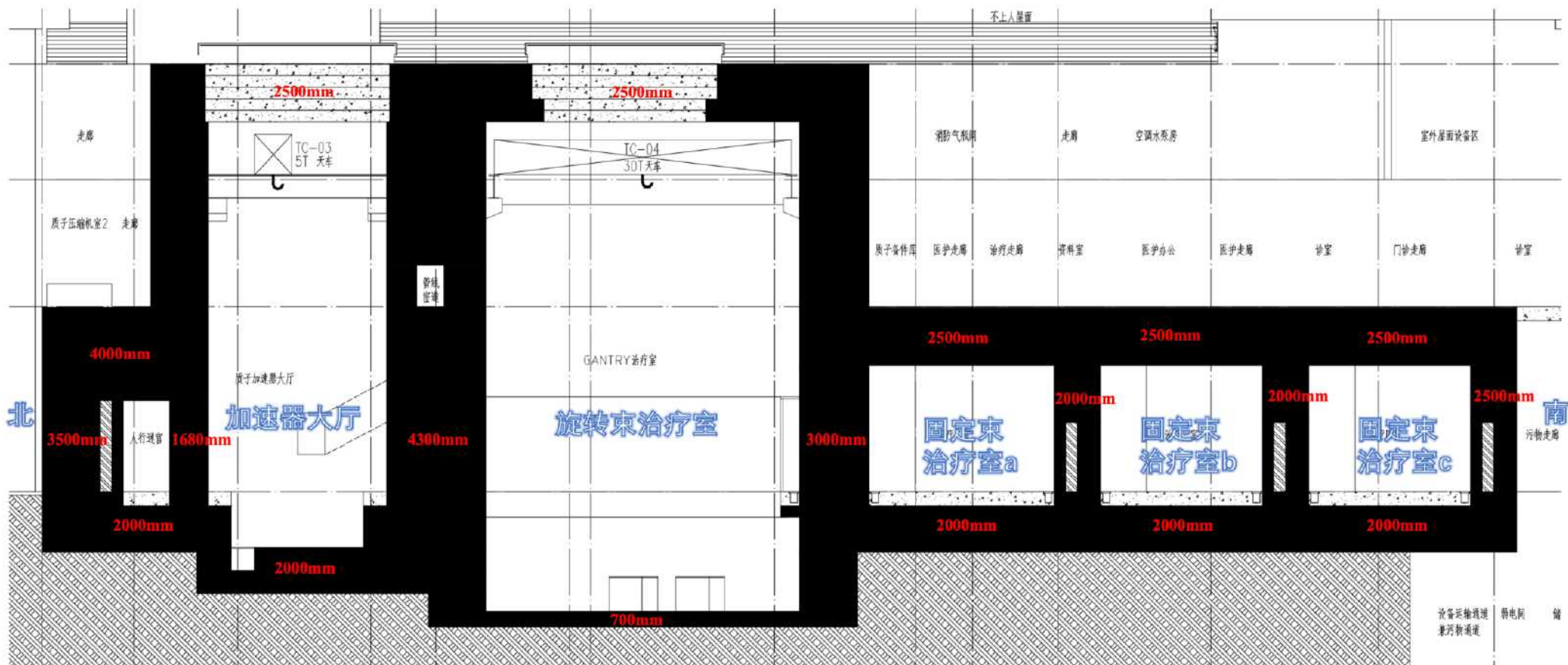


图 4-15 质子治疗系统屏蔽体厚度示意图（南北向剖面）

4.1.3 人身安全联锁系统

4.1.3.1 设计准则

质子治疗系统人身安全联锁系统的设计准则如下：

- （1） 简单可靠：系统设计要力求在简洁基础上保证运行可靠性及稳定性。
- （2） 最优切断：当加速器处于“准备”或“运行”状态时，安全联锁系统在加速器中央控制系统联锁逻辑中具有最优先的权力切断加速器束流。
- （3） 失效保护：当安全联锁系统关键设备失效时，系统有相应的应急保护措施来保障工作人员的人身安全。
- （4） 冗余：系统关键设备要采取冗余设计，以保障系统的可靠性、减少系统故障时间并预留有进一步改进的余地。
- （5） 纵深防护：在设计系统时要充分考虑并合理安排辐射安全设施设备的联锁逻辑，实现对工作人员人身安全的交叉纵深防护。
- （6） 自我巡检：系统能对所属联锁设备的工作状态进行巡检，并能将巡检结果实时显示，如在巡检过程中发现设备工作异常则生成报警事件并通知工作人员进行处理；
- （7） 以人为本：安全联锁系统是在保障工作人员人身安全的基础上兼顾加速器的运行安全，此外系统要具备人性化的特点——联锁逻辑简洁合理、操作简单、维护方便、人机交互性好。

4.1.3.2 系统结构和功能

本项目质子治疗系统辐射安全联锁系统主要由集中数据管理、中央 PLC 控制、网络通信及现场设备等部分组成，其架构如图 4-16 所示。

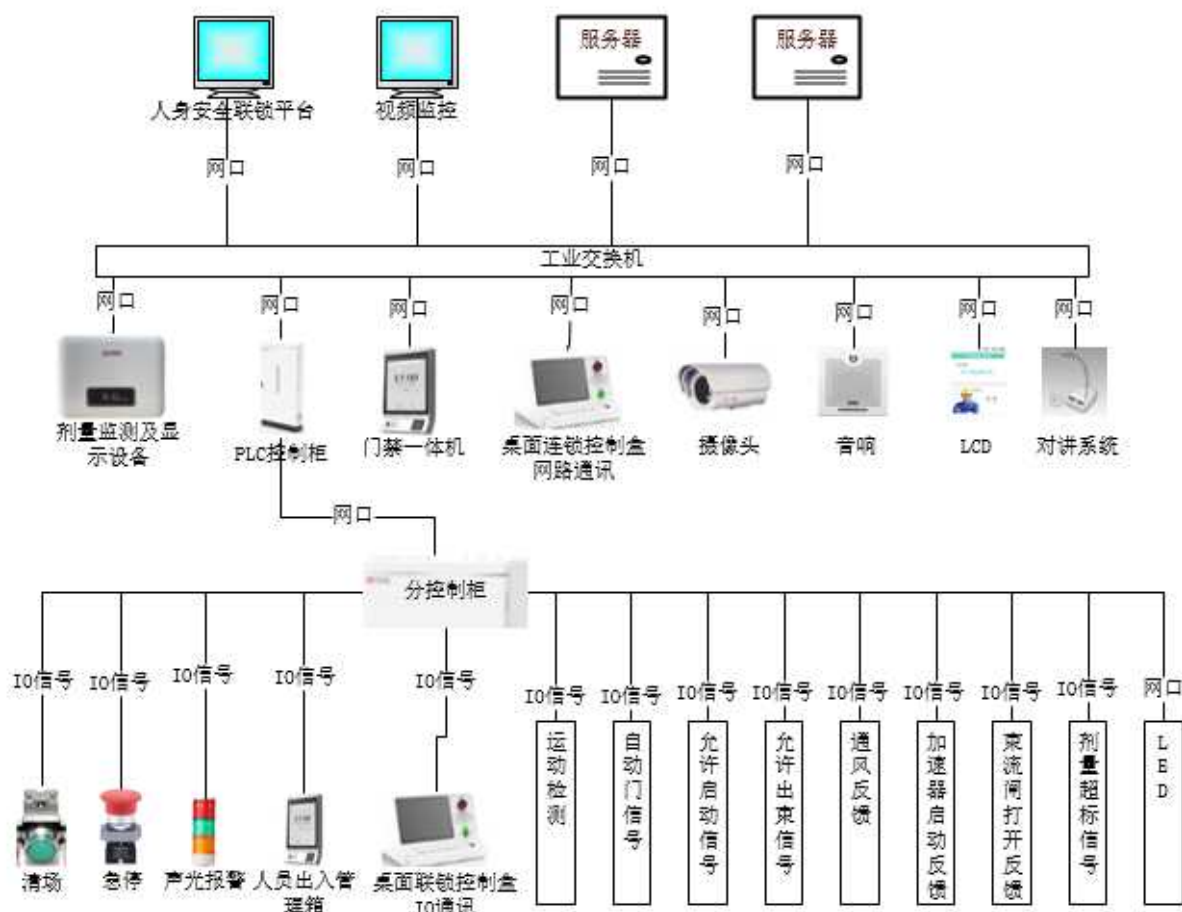


图 4-16 安全联锁系统结构示意图

4.1.3.3 系统组成

本项目质子治疗系统辐射安全联锁系统包含的主要联锁设备有联锁门（门机联锁）、声光报警装置、状态指示灯、LCD 信息展示屏、清场搜索（巡检）按钮、急停按钮、剂量联锁、桌面联锁控制盒、人员出入管理箱、紧急开门开关和智能化系统，各功能如下：

4.1.3.3.1 联锁门（门机联锁）

在控制区的出入口以及控制区内部布置有联锁门，门上安装有门限位开关。在加速器出束前，门位置开关参与实现清场功能，清场人员需要依次按下清场按钮并且关闭联锁门；在加速器出束过程中，门位置开关与清场功能联动，联锁门被打开会立即触发急停功能。

加速器区、固定治疗室、旋转治疗室和输运线区入口处的联锁门具备延时联锁功能，能够根据需要设定延时时间。加速器出束后，在延时时间内，联锁门无法打开，防止人员在区域辐射剂量较高的情况下误入。

4.1.3.3.2 声光报警装置

加速器大厅、束线区以及各治疗室等区域内部都安装声光信号指示，各状态的信号指示示例如下，其中治疗室在常规治疗流程中无蜂鸣报警（考虑到患者的心理状态，治疗室只有光信号）：

- （1）开始清场后，所有报警器黄灯闪烁，语音提示或蜂鸣器频响 1 次/s；
- （2）联锁建立时，所有报警器红灯闪烁，语音提示或蜂鸣器长鸣；
- （3）加速器运行时，所有报警器红灯闪烁，语音提示或蜂鸣器经过一段时间后结束；
- （4）加速器停止供束，所有报警器绿灯常亮。

4.1.3.3.3 状态指示灯

防护门上方装有门头 LED 警示屏，根据加速器运行状态、清场状态、紧急停机按钮、联锁门状态综合判断安全状态，输出管制模式，显示指定文字示例如下（具体会根据场所功能相应调整）：

- （1）当清场启动时，LED 屏显示“清场启动，限制进入”，黄色字体；
- （2）当联锁建立、加速器停机时，LED 屏显示：“准备供束，禁止进入”，红色字体；
- （3）当加速器运行时，LED 屏显示“正在供束，禁止进入”，红色字体；
- （4）当加速器停机时，LED 屏显示：“停止供束，控制进入”，绿色字体。

在防护门外还安装三色警示灯，辅助显示加速器大厅及各治疗室的出束、清场、停束和正常状态。

4.1.3.3.4 LCD 信息展示屏

LCD 信息展示屏安装于各控制区出入口，其与控制系统联动，可显示区域联锁状态、辐射水平、内部人员情况等信息。

4.1.3.3.5 清场搜索（巡检）按钮

清场搜索按钮安装于加速器大厅、束线区、各治疗室的墙壁，用于清场时的确认，清场搜索按钮上有状态指示灯，指示当前按钮是否被按下。设备运行前，巡检人员须对区域进行清场，以确保无人员滞留。清场时，巡检人员须在规定时间内按预定顺序依次按下全部清场按钮，正确操作后清场生效，超时或未按规定顺序执行，清场无效，需重新清场。当清场生效时，才允许加速器出束。联锁状态建立后门打开，清场失效，需重新清场。

4.1.3.3.6 急停按钮

急停按钮安装于加速器大厅、束线区、各治疗室的墙壁以及控制台上的桌面联锁控制盒，当其被按下后，束流立即切断，在紧急情况下使用。急停按钮设计为红色，旁边写有使用说明，并有自锁功能，被按下后只有到现场才能进行复位操作。急停按钮全部复位后，才允许加速器出束。

4.1.3.3.7 剂量联锁

在加速器大厅、束线区、各治疗室、防护门外和加速器控制室内设置剂量探头，当剂量率高于预设阈值时立即报警。加速器设置门-剂量联锁，正常运行期间，辐射剂量率测量结果高于设定值时，各防护门不能从外面打开，防止人员误入。

4.1.3.3.8 桌面联锁控制盒

桌面式联锁控制盒分为两种，其中位于加速器控制室的集成了总控钥匙开关、区域授权开关、急停按钮、联锁状态指示等功能，用于加速器大厅联锁操作控制及加速器出束控制；位于治疗操作区的主要用于给出治疗室联锁建立后的准许出束信号。

4.1.3.3.9 人员出入管理箱

在加速器大厅防护门处安装人员出入管理箱，可进行人员权限识别和进出管理。当进入加速器大厅时，需拔下桌面联锁控制盒上的钥匙，并将此钥匙插入人员出入管理箱的钥匙开关处，此后经权限识别才可触发开门动作。门内安装无条件开门按钮，按下按钮，屏蔽门可自动打开。

对于治疗室，为方便医护人员和患者出入，采用门禁系统控制。

4.1.3.3.10 紧急开门按钮

在加速器大厅、束线区和各治疗室的出入口门外，设有紧急开门按钮，该按钮设在人员不易触碰的位置和高度，仅在紧急情况下用于打开各控制区的门。

4.1.3.3.11 电离辐射警告标志

在控制区（加速器区、固定治疗室、旋转治疗室、输运线区等）入口和监督区入口处适当位置设置电离辐射警告标志。

4.1.3.3.12 智能化系统

迷宫入口安装摄像机用于对进出控制区的人员进行人员监测并进行抓拍，把抓拍的图片上传到辐射防护联锁平台。加速器大厅、治疗室内安装多个摄像头，在控制室可以实时查看内部情况。

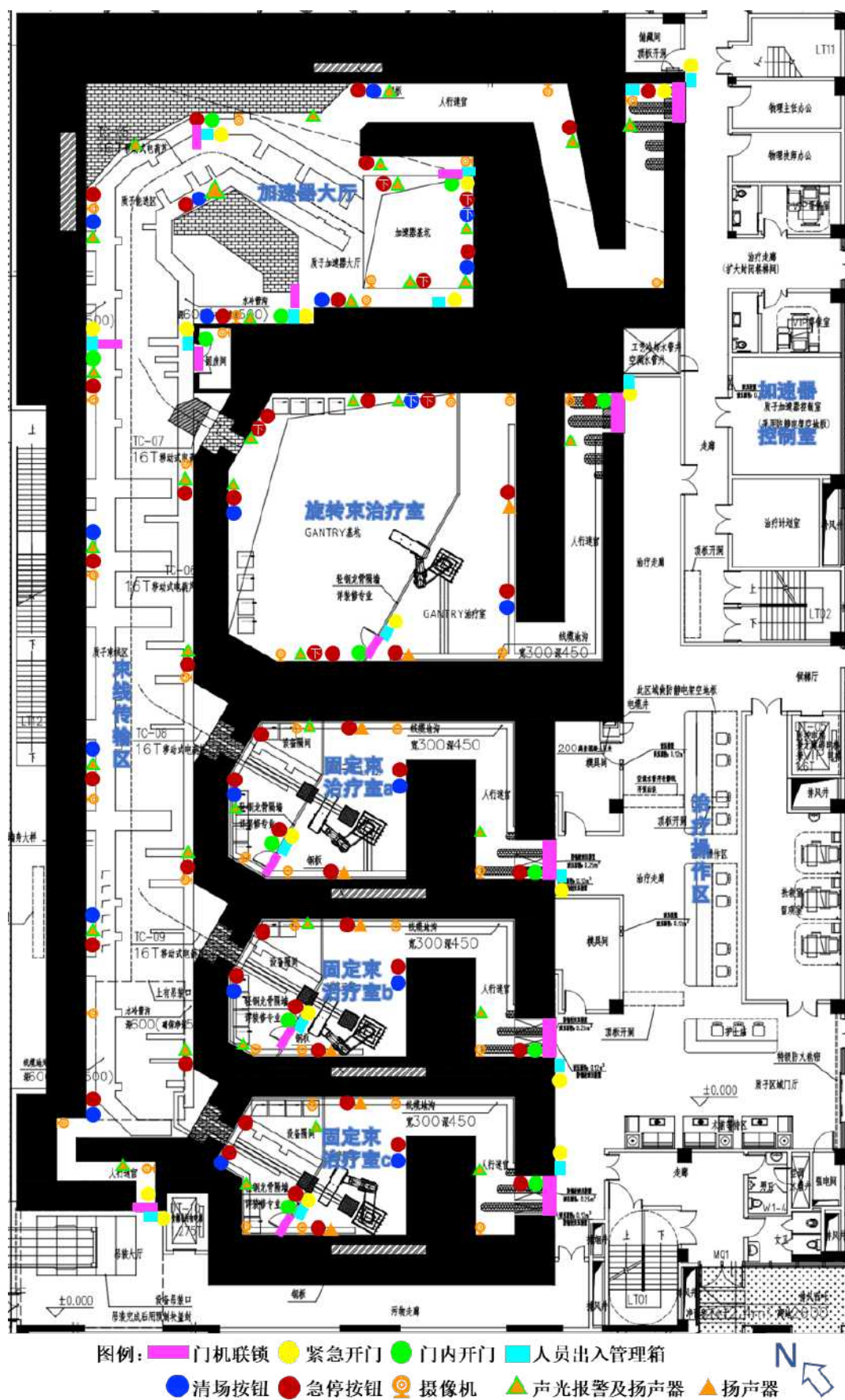
在旋转治疗室、固定治疗室以及对应的控制台处设置双向对讲系统，方便医护人员与患者进行实时交流。

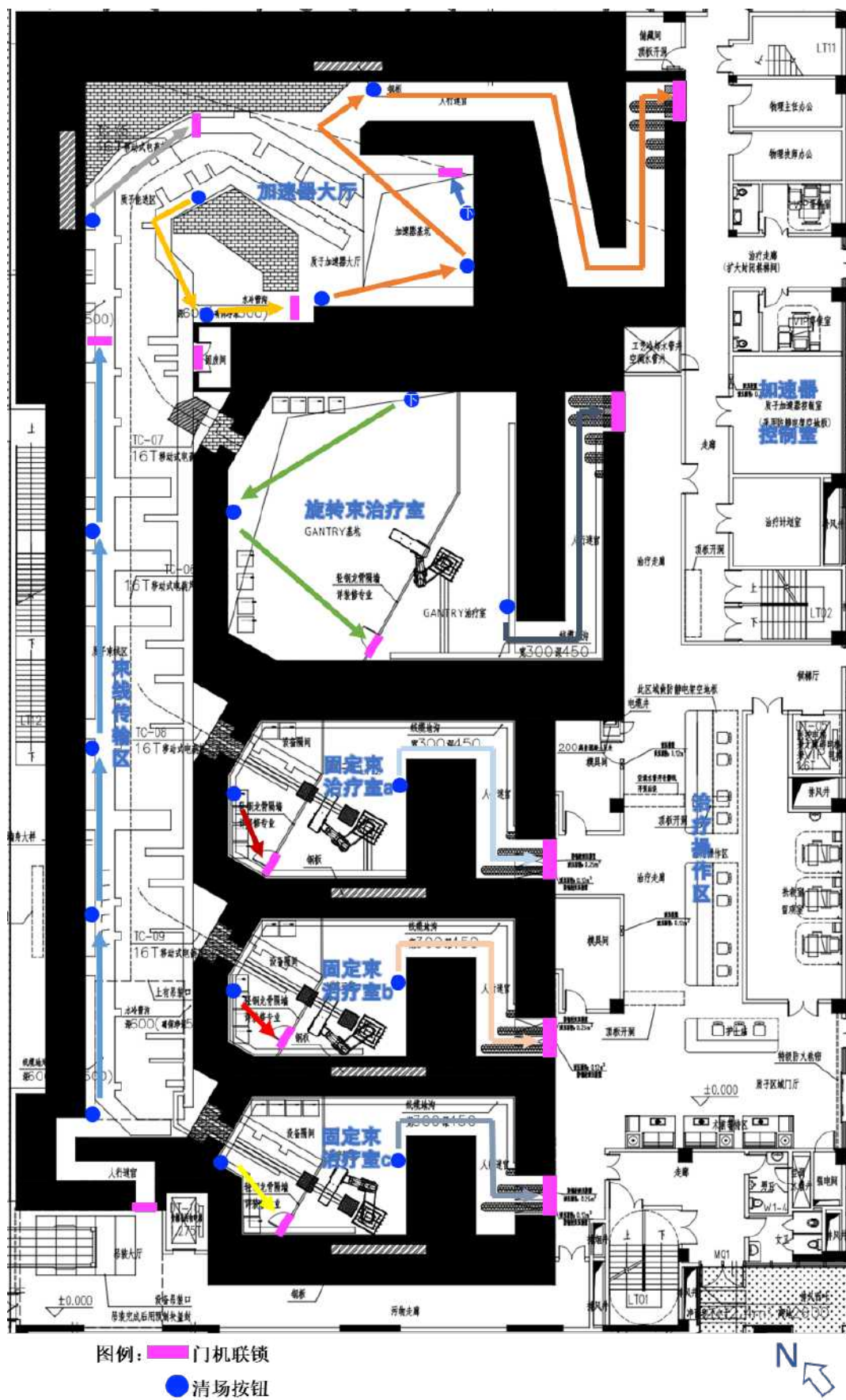
本项目质子治疗系统辐射安全联锁设施点位数量统计见，点位布置见图 4-18。

表 4-4 质子治疗系统安全联锁设备数量表，单位：个

设备名称	加速器大厅 及束线区	旋转束 治疗室	固定束 治疗室 a	固定束 治疗室 b	固定束 治疗室 c
控制区边界联锁门	2	1	1	1	1
内部分区联锁门	5	1	1	1	1

设备名称	加速器大厅 及束线区	旋转束 治疗室	固定束 治疗室 a	固定束 治疗室 b	固定束 治疗室 c
门口警示灯	2	1	1	1	1
LCD 信息展示屏	2	1	1	1	1
门头 LED 警示屏	2	1	1	1	1
人员出入管理箱	7	2	2	2	2
紧急开门按钮	7	2	2	2	2
门内开门按钮	7	2	2	2	2
清场按钮	一层: 10 地坑: 1	一层: 2 地坑: 1	2	2	2
急停按钮	一层: 19 地坑: 3	一层: 8 地坑: 3	7	7	7
声光报警	23	6	3	3	3
扬声器	23	8	5	5	5
摄像机	19	5	5	5	5





4.1.3.4 联锁逻辑

4.1.3.4.1 加速器请求出束逻辑

加速器主要有两种状态，未开启状态和允许出束状态（加速器已经运行但还未出束，治疗控制系统发出命令可以随时出束）。

加速器的束流请求出束逻辑如图 4-19 所示。

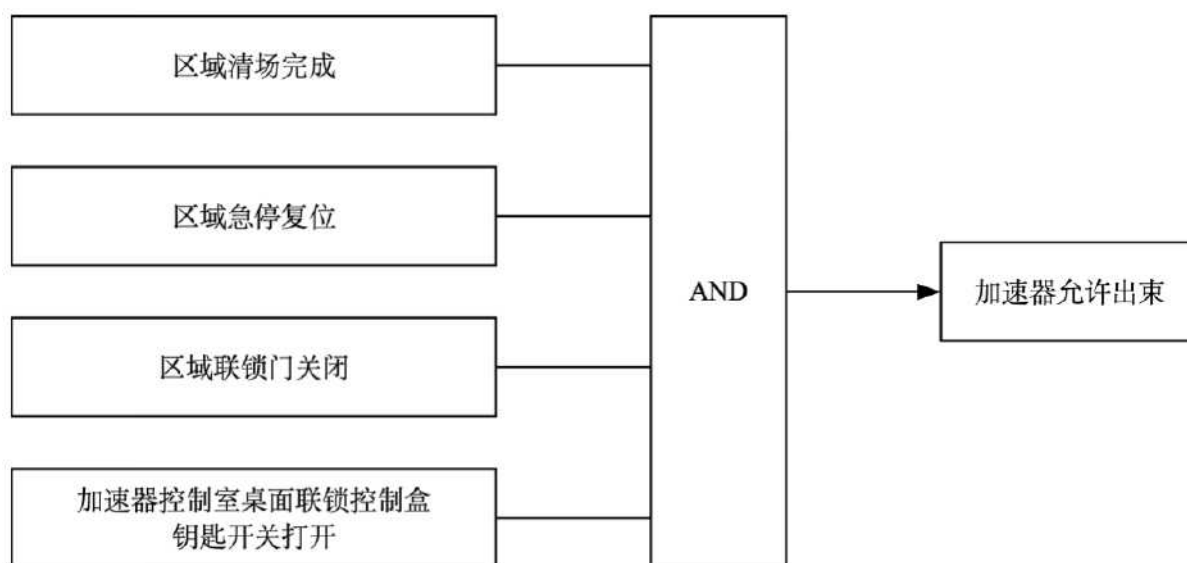


图 4-19 质子加速器允许出束控制逻辑图

4.1.3.4.2 治疗室请求出束逻辑

各治疗室相互独立，各治疗室之间无联锁关系。治疗室的束流请求出束逻辑如图 4-20 所示。

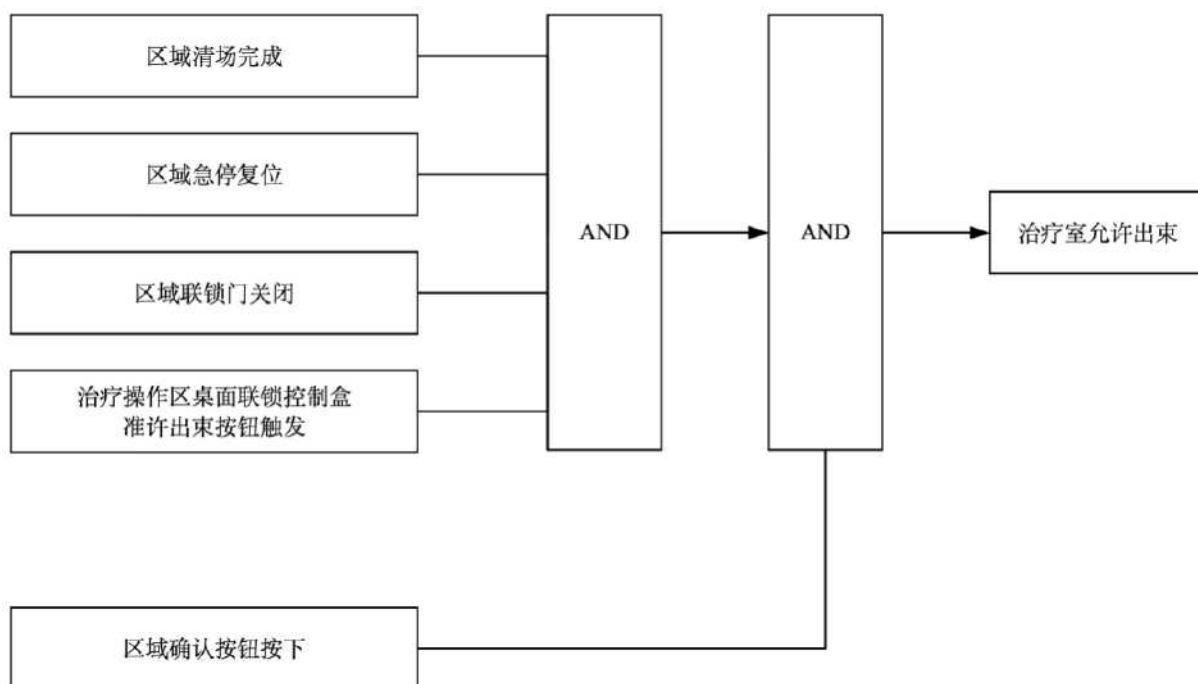


图 4-20 治疗室出束控制逻辑图

4.1.3.4.3 人员进入加速器大厅控制逻辑

医院的辐射工作人员不会进入加速器大厅，只有加速器系统的工程师方可进入。加速器停机后才准许人员进入机房，正常情况下只有以下条件全部满足时，人员方能打开联锁门进入机房：停止供束、人员出入管理箱钥匙为开、权限识别成功、区域剂量率低于设定阈值，紧急情况时当紧急开门按钮触发时可直接不受限制进行开门。

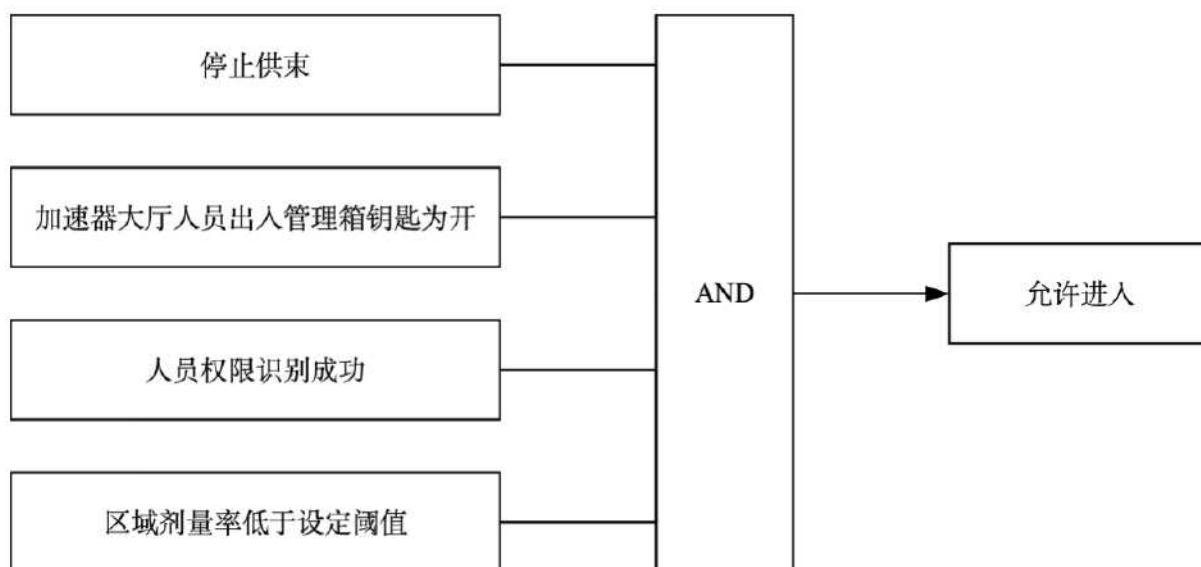


图 4-21 人员进入加速器大厅控制逻辑图

4.1.3.4.4 人员进入治疗室控制逻辑

治疗室准许人员进入的条件：束流切断设备关闭、权限识别成功、剂量率低于阈值。人员进入治疗室的控制逻辑见图 4-22。

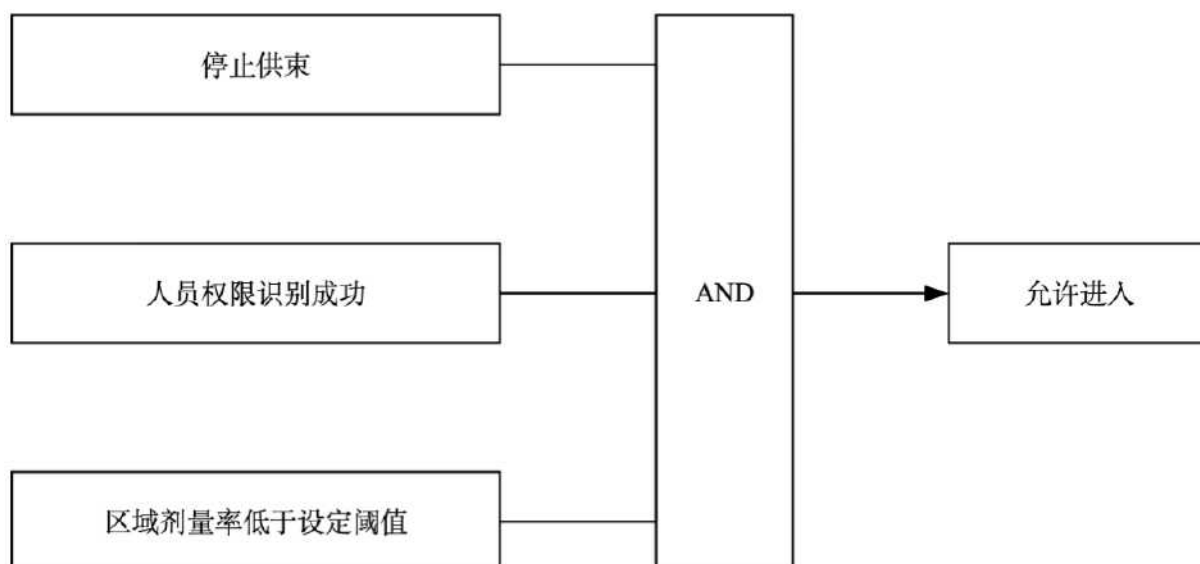


图 4-22 人员进入治疗室控制逻辑图

4.1.3.4.5 清场流程

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。为方便对控制区内部进行清场搜索，将加速器大厅、束流传输区以及各治疗室按建筑布局或区域功能分为若干子区，各子区之间设有联锁门，每个联锁门上也设有门限位装置，门的状态纳入安全联锁系统监控。任一子区的清场状态被破坏，都需要对该子区重新进行清场；清场状态未被破坏则无需重新清场。大区域内的所有子区清场完成后，大区域清场才算完成。每个区域的搜索必须在规定时间内完成，如果超时则本次搜索清场无效，需要重新启动搜索。清场流程见图 4-22。清场搜索巡检路线见图 4-18。

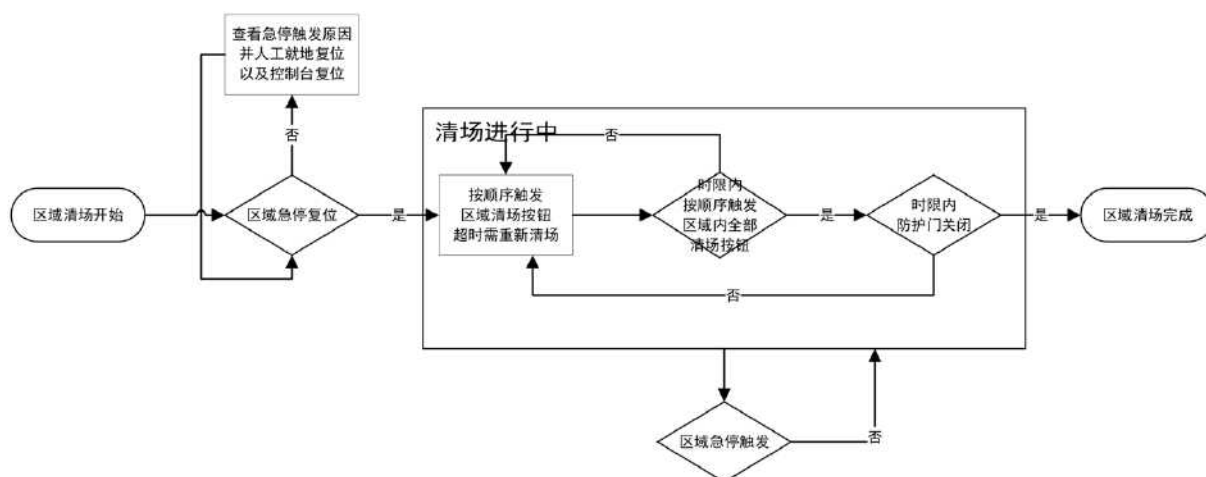


图 4-23 清场流程图

4.1.4 场所辐射监测系统

本项目质子治疗系统设置了场所辐射监测系统，区域固定监测设备主要包括电离室 γ 探测器、塑料闪烁体 γ 探测器、宽能中子探测器、就地显示单元、监控计算机及数据服务器，监测数据除本地显示外，并同步上传至服务器实现数据存储、交互，位于控制室的监测计算机对所有监测数据远程、实时、集中显示，系统架构示意图见图 4-24。

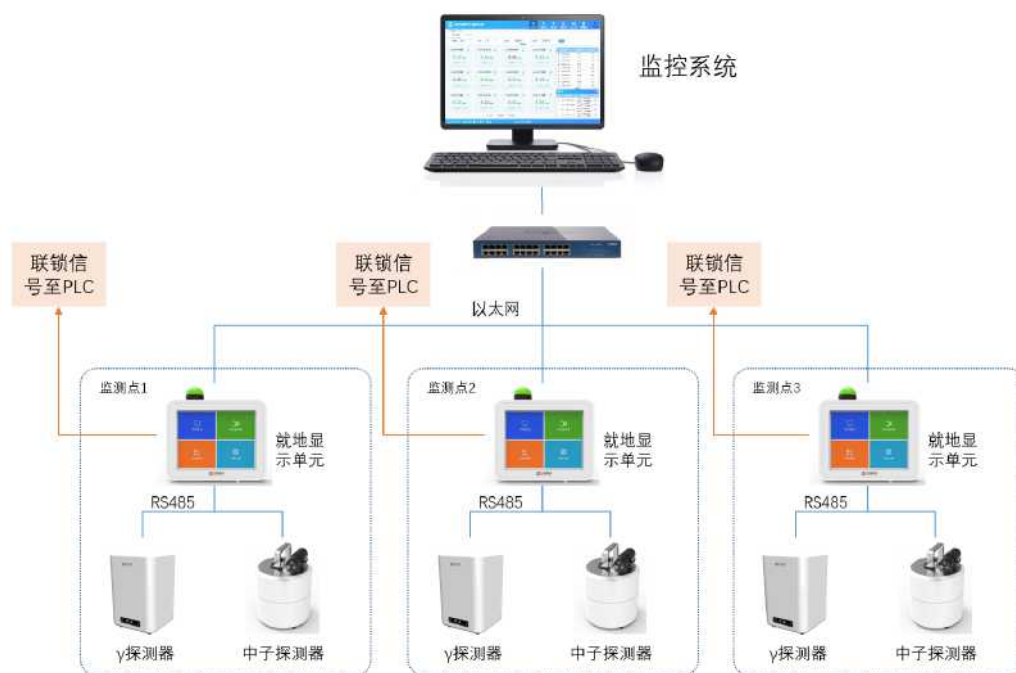


图 4-24 质子治疗系统场所辐射监测结构示意图

对于固定监测，有两类位置是重点监测对象，一类是高辐射水平场所的出入口，例如控制区迷道，这类位置的监测点可以让工作人员在进入高辐射水平场所之前先了解场所内的辐射场强度，避免加速器开机时误入造成的过量照射，同时实现剂量连锁；另一类是邻近高辐射水平场所人员活动密集的位置，例如控制室，有人长时间在其中工作，需要实时监测辐射剂量率，确保工作环境安全。根据以上原则，并结合项目工作人员活动分布情况以及辐射场特点，固定式辐射监测点位见图 4-25。

（1）控制区内辐射剂量率监测点位设置情况

加速器大厅迷道内入口、加速器附近、固废间、束线区以及每间治疗室的迷道内入口共布置了 11 组宽能中子和 γ 电离室探测器，实时监测机房内伽马剂量率水平及实现剂量连锁，工作人员可通过门外就地显示单元或 LCD 信息展示屏查看机房内实时剂量率，以判断加速器是否开机及停机后机房内活化水平。

（2）防护门外辐射剂量率监测点位设置情况

防护门外各放置 1 组宽能中子和 γ 闪烁体探测器，共 6 组，用于监测房间出束时各防护门口口的剂量率水平，配备就地显示单元显示门口和屋内探测器读数。

（3）加速器控制室内辐射剂量率监测点位设置情况

工作人员大部分时间位于加速器控制室，因此在加速器控制室设置 1 个宽能中子和 1 个 γ 电离室探测器实时监测场所内中子、伽马剂量率水平，配备就地显示单元本地显示探测器读数，当剂量率超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，发出报警信号。

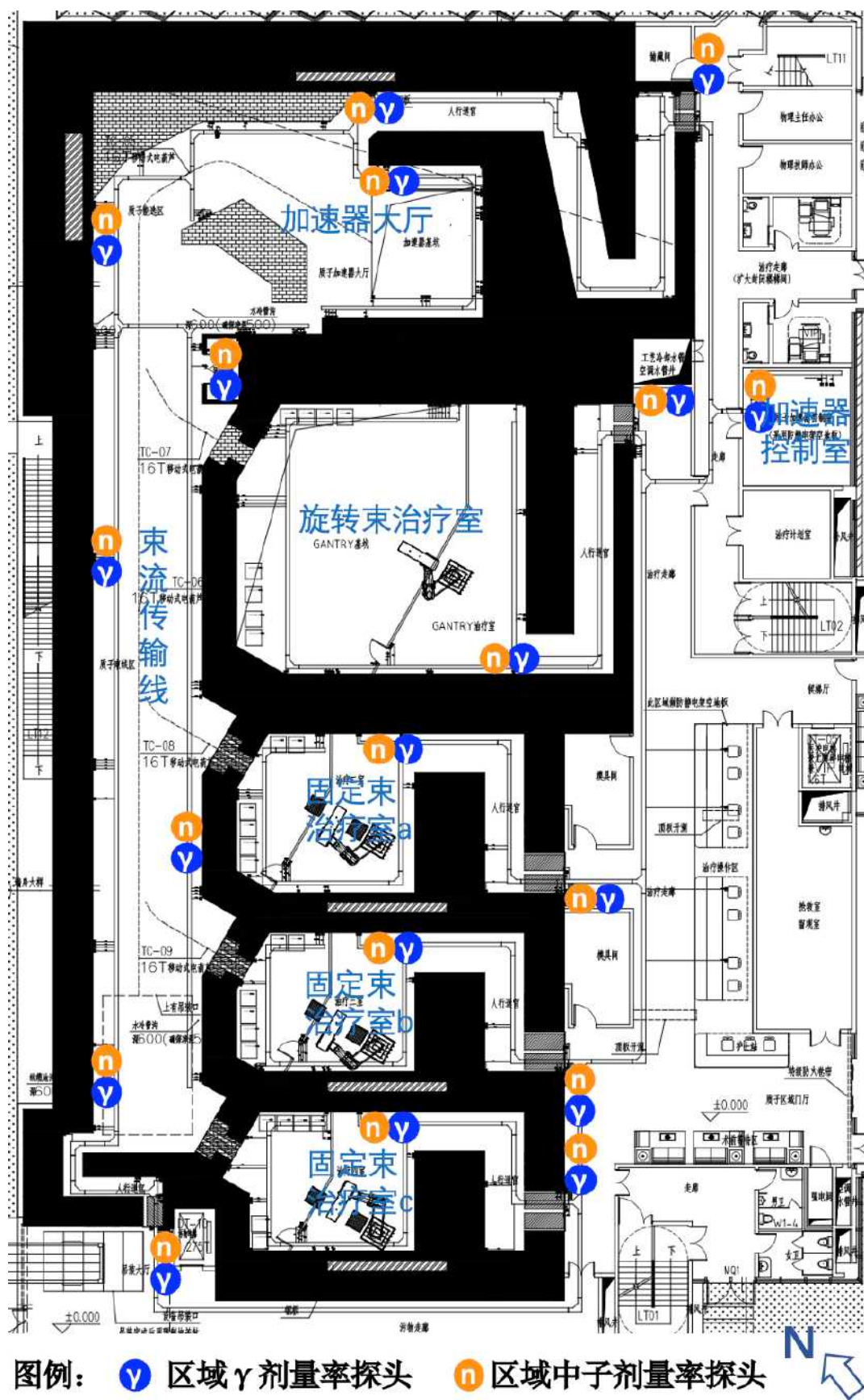


图 4-25 质子治疗系统场所辐射监测点位示意图

4.1.5 通风系统

质子加速器大厅、束线区及各治疗室均设计了通风系统，设计参数见表 4-5。各区域采用上送下排的方式，对角设置，新风口位于吊顶处，排风口距地面高 30cm，换气次数不低于 4 次/h，符合 HJ 1198-2021、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示范中心屋面总排风口排放到室外，排风高度约 23m，位置见图 4-27。考虑到感生放射性气体基本均为短半衰期核素，且经过大气的稀释扩散作用，正常运行情况下不会对周围环境及人员造成明显的辐射影响。

表 4-5 质子治疗系统工作场所通风系统设计参数表

区域名称	区域体积, m ³	新风量, m ³ /h	排风量, m ³ /h	换气次数, 次/h
加速器大厅及束线区	2740	8900	11000	4
旋转束治疗室	3882	14000	16000	4
固定束治疗室	330	1200	1400	4

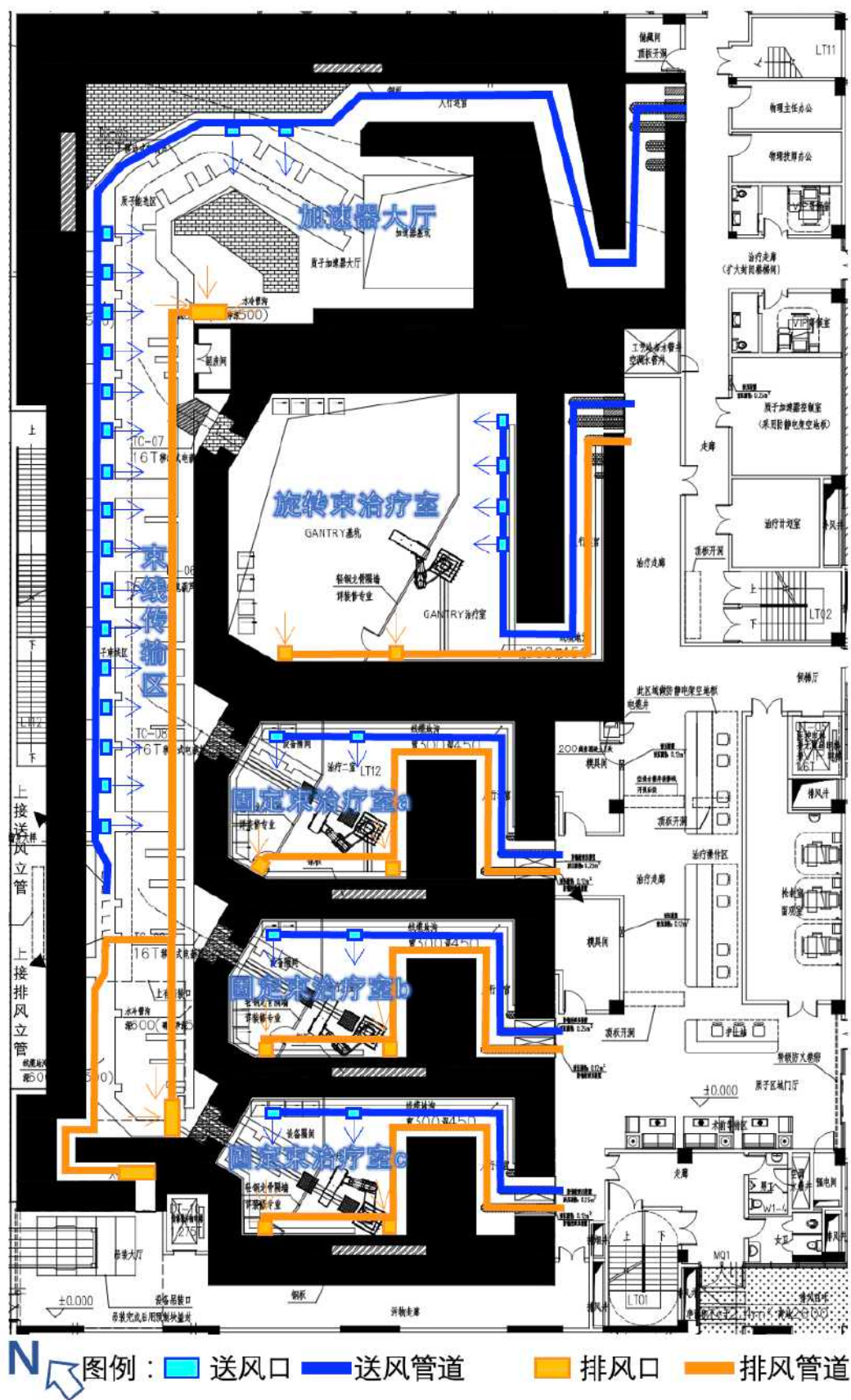


图 4-26 质子治疗机房送排风管道走向示意图

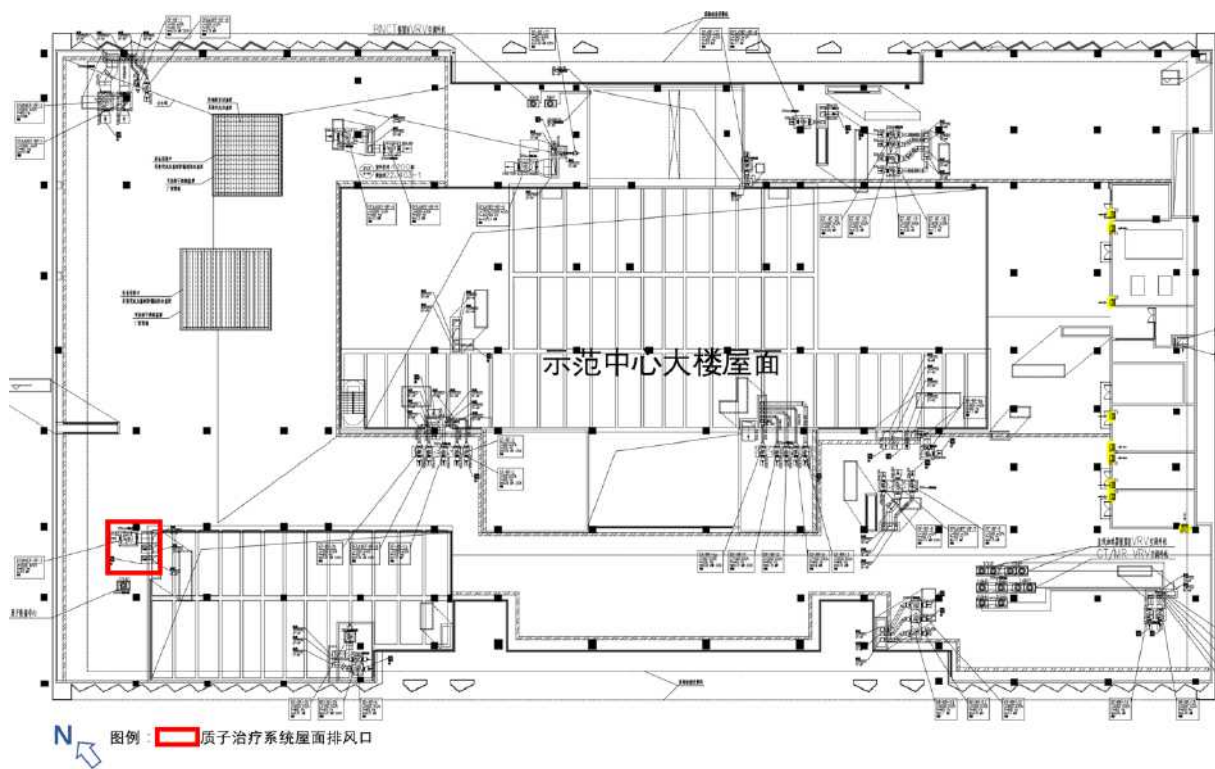


图 4-27 质子治疗系统屋面排风口位置示意图

4.1.6 放射性三废治理

4.1.6.1 放射性废气及其处理措施

(1) 废气来源

根据第三章的分析，质子治疗系统运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为 ^{13}N ($T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$)、 ^{15}O ($T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$)、 ^{11}C ($T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$) 和 ^{41}Ar ($T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$)。质子治疗系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量和年均排放速率见表 3-48。

(2) 废气处理措施

质子治疗系统运行产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。质子治疗系统工作场所各区域均设有通风系统，装置运行过程中产生的感生放射性气体最终由质子治疗机房顶部排入环境。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，结合第五章的计算结果，其对环境的影响很小。

4.1.6.2 放射性废液及其处理措施

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

旋转束治疗室内负一层地坑设置2个冷却水集水井（1个贮存池和1个应急池），两个池内尺寸均为1.5m（长）×2.0m（宽）×2.0m（深），有效容积均为 5.4m^3 。加速器大厅负一层地坑设置1个冷却水集水井作为应急池，池内尺寸为1.0m（长）×1.0m（宽）×1.0m（深），有效容积为 0.9m^3 。三个集水井的位置见图4-28。

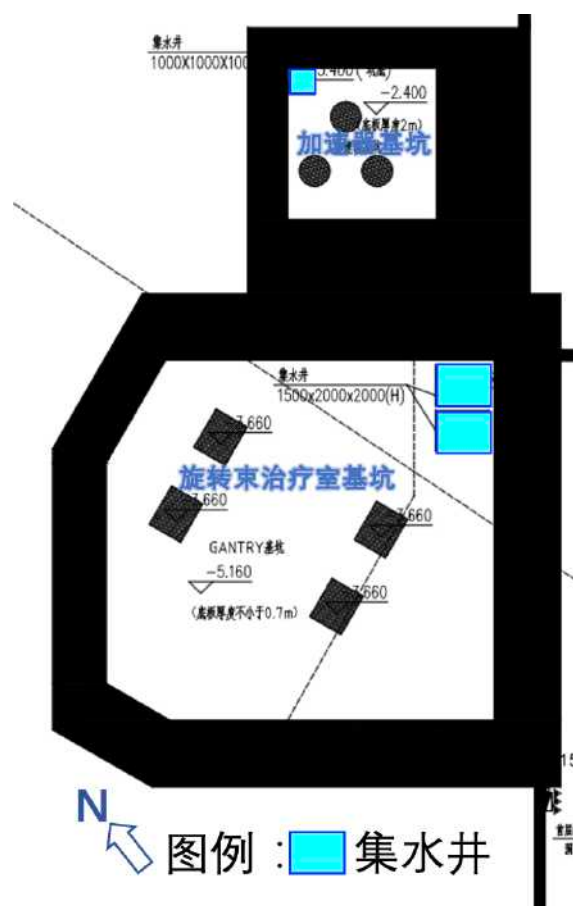


图 4-28 集水井位置示意图

本项目共有4个冷却水回路，其中2个可能含放射性冷却水，回路1用于冷却加速器内部的RF腔、静电偏转板、束测、分子泵、离子源等部件；回路3主要用于冷却束流传输线上的法拉第筒（兼阻挡器）、二极磁铁、四极磁铁、降能器、准直器等部

件。保守考虑两个回路中冷却水总量约为 3 m^3 。正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，系统长时间运行后因水质下降需要更换这部分去离子水，更换时冷却水一次性排入冷却水贮存池。冷却水系统运行期间，如系统发生漏水或出现异常运行情况，可将冷却水排至应急池。加速器大厅、束线区、固定束治疗室、旋转束治疗室和水冷室（回路 1 和回路 3 围堰内）均设置设有地漏，如发生冷却水泄漏，泄漏的冷却水通过地漏经排水管进入应急池。加速器大厅地坑应急池中收集到的冷却水可通过管道排至旋转束治疗室地坑的应急池中。贮存池和应急池容量均为 5.4 m^3 ，足够存放系统中的冷却水。

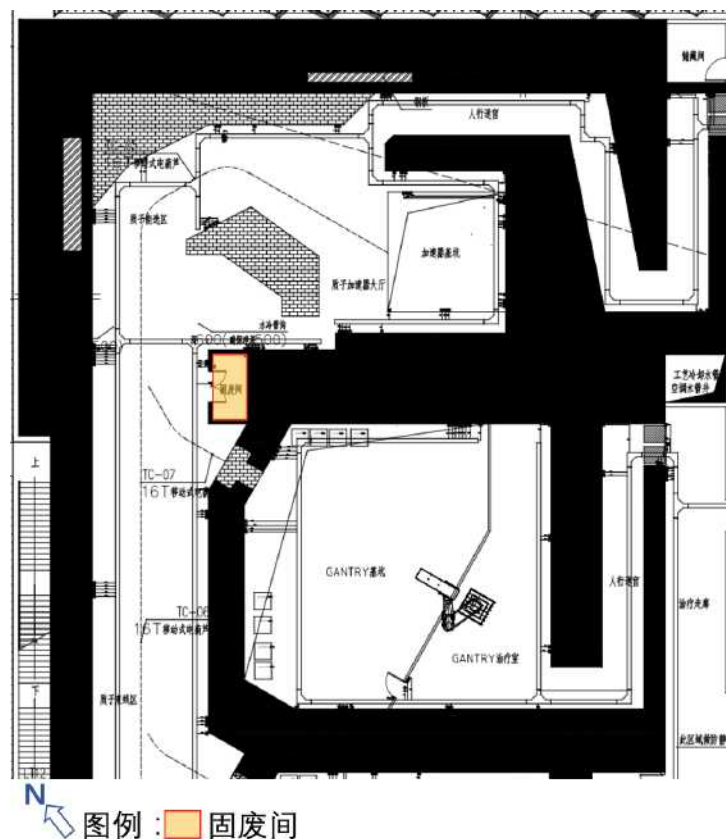
贮存池及应急池上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须委托资质单位在取样口检测，当检测结果满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）中总 β 不超过 10Bg/L 的限值，以及《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中的排放限值 ALImin 的要求（即每月排放的总活度不超过 10ALImin ，每次排放的活度不超过 1ALImin ），经审管部门确认后，直接排入示范中心污水管网。

根据《泉州市生态环境局关于晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心环境影响报告表的批复》（泉晋环评〔2025〕表 17 号），经衰变处理后的含放射性废水、普通医疗废水及经预处理后的生活污水一同经晋江市医院污水处理站处理达到 GB18466-2005《医疗机构水污染物排放标准》表 2 预处理标准、GB/T31962-2015《污水排入城镇下水道水质标准》表 1 中 A 等级标准及晋江仙石污水处理厂进水水质要求后通过市政管道排入晋江仙石污水处理厂处理。

4.1.6.3 放射性固体废物及其处理措施

放射性固体废物主要来自加速器运行、维修过程中产生的废活化元器件、废冷却水过滤滤芯及离子交换树脂等。固体废物中活化核素包括了元器件活化、衰变后产生的大量短半衰期核素和 Co-60、Ni-59、Fe-55、Mn-54、Na-22 等半衰期较长的核素，还有来自滤芯和离子交换树脂中吸附的冷却水中杂质活化的核素 Co-60、Mn-54 等和树脂中残留冷却水所含的 H-3 和 C-14 等。收集后放射性固体废物应参考《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》（GB11928-1989）相关要求进行分类、包装，同时根据

辐射剂量率监测结果存放至固废间中，固体废物在固废间中存放一段时间后，大多数核素活度已降至较低的水平。



定期委托有资质的单位对固废间内的放射性固体废物进行检测和分析，对于满足清洁解控要求的固体废物，报审管部门备案和认可后，按一般固体废物相关要求处置。对于不满足解控要求的放射性固体废物，委托有资质的单位处置。

4.2 硼中子俘获治疗装置

4.2.1 场所布局与分区

本项目将硼中子治疗辐射工作场所进行分区管理，将需要专门防护手段或安全措施的区域设为控制区，将控制区周围需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域设为监督区。详细分区见表 4-6、图 4-30 至图 4-32。

表 4-6 硼中子治疗辐射工作场所分区

分区		房间/区域名称
控制区	一层	BNCT 装置区、治疗室 1、治疗室 2、抢救室、留观室、VIP 等候室
	二层	废靶暂存间
	地下一层	衰变间（含衰变池）
监督区	一层	BNCT 加速器控制室、治疗控制室、术前等待区、硼药配药室、注射观察室、物理测量室、治疗计划室、治疗走廊、医护走廊、吊装大厅等
	二层	BNCT 电源间、数据中心、吊装大厅、气瓶间、功率源间、走廊、空调机房等
	地下一层	衰变间控制室、衰变池设备间

各区域的管理措施如下：

（1）控制区

a. 进入 BNCT 控制区的防护门均与加速器出束系统联锁，防护门上设运行状态指示灯，防护门在打开状态下加速器无法开机，加速器在开机期间打开防护门，加速器自动停止出束。

b. 对于加速器大厅、治疗室的防护门设置门禁系统，只有授权人员方有权限进入，辐射工作人员进入时佩戴个人剂量计和报警仪。防护门显著位置张贴电离辐射警示标志。

c. 患者等待区的防护门显著位置张贴电离辐射警示标志。辐射工作人员必须进入时，佩戴个人剂量计和报警仪。

d. 废靶暂存间盖板需用天车吊装打开，天车操作人员不在废靶暂存间区域进行操作。进入废靶暂存间的防护门常闭、上锁，钥匙与加速器控制主控钥匙捆绑，只有加速器停机拔出主控钥匙后才能用于打开废靶暂存间的门。

e. 衰变间设置双人双锁，两名辐射工作人员同时使用不同的两把钥匙才能打开进入。门口显著位置张贴电离辐射警示标志。

(2) 监督区

各出入的门上均设置门禁系统，只有授权的人员才允许进入相应的工作区域。人员进入监督区时需佩戴个人剂量计。



图 4-30 硼中子治疗辐射工作场所分区图（一层）

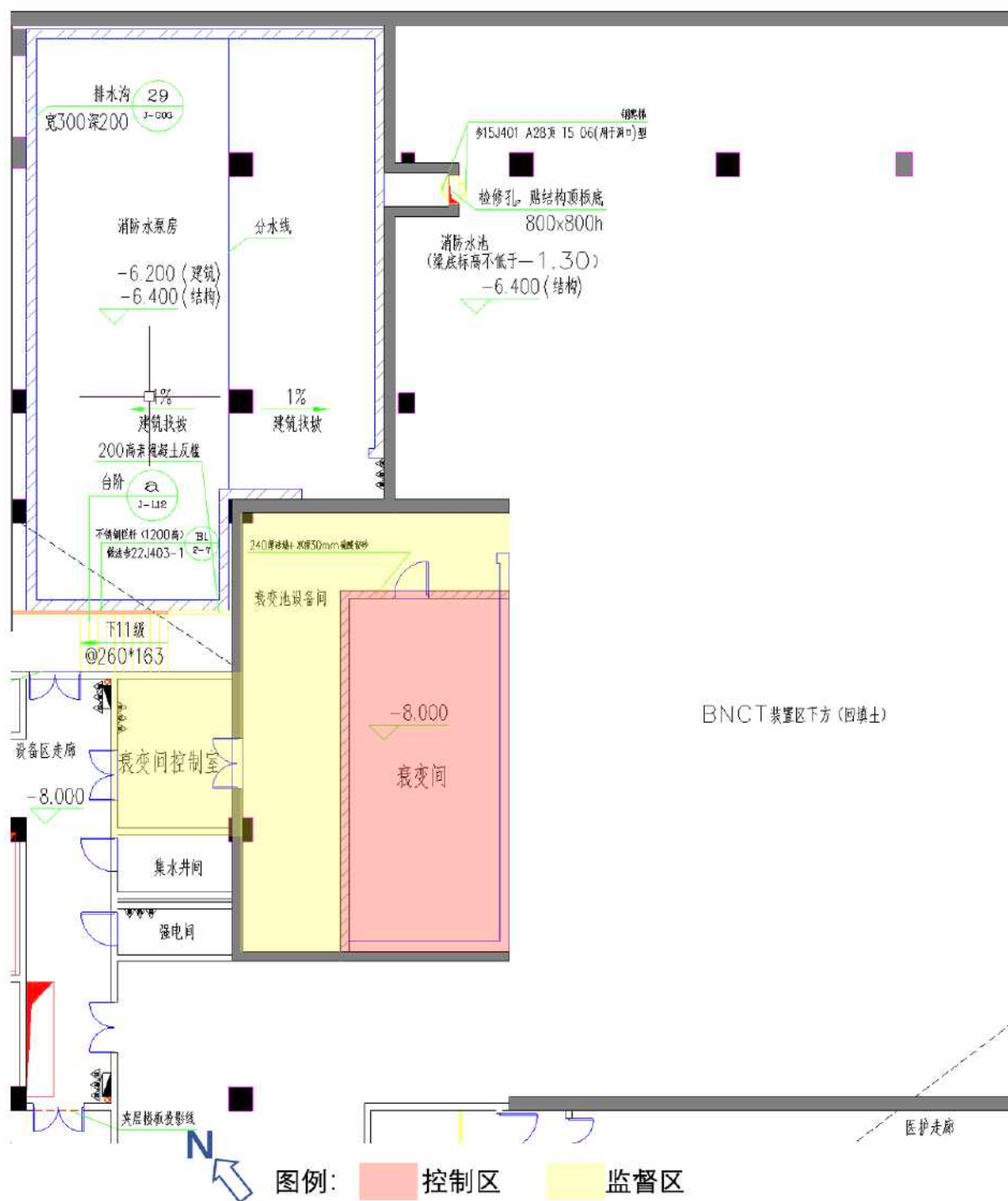


图 4-32 硼中子治疗辐射工作场所分区图 (地下一层)

4.2.2 人流物流

本项目硼中子治疗的人流物流路径描述如下:

(1) 运维工作人员路线：从北侧运维入口进入，沿医护走廊，进入 BNCT 加速器大厅或加速器控制室等工作区域。运维路线见图 4-33。

(2) 医护人员路线：从南侧医护专用电梯厅等入口到达 BNCT 治疗区，沿治疗走廊，进入护士站、硼药配药室、注射观察室、物理测量室、治疗计划室、等候室、BNCT 治疗室、抢救室、留观室等，除治疗技师外其他工作人员与治疗患者基本无交叉，医护人员通过与治疗后患者错开时间经过治疗走廊来尽量避免不必要的照射。医护路线见图 4-33。

(3) 患者流线：普通患者经 BNCT 治疗入口进入→治疗前于术前治疗等候区等候→听到叫号后，患者进入注射观察室进行静脉注射硼药并候诊→候诊约 2h 后，进行硼浓度检测→若体内药物浓度达到治疗要求后，进入治疗室内完成摆位并接受治疗→治疗完成后进入留观室→待患者感生放射性降至本底水平后从 BNCT 治疗出口离开。VIP 患者从西北侧 VIP 出入口进入→经 VIP 走廊进入 VIP 等候室→在等候室内接受硼药注射后等待约 2h 后，进行硼浓度检测→若体内药物浓度达到治疗要求后，进入治疗室内完成摆位并接受治疗→治疗完成后回到原 VIP 等候室→待患者感生放射性降至本底水平后从 VIP 出入口离开。患者路线见图 4-34。

(4) 废靶流线：靶站一年更换一次，每年产生 2 个废靶，准备更换的靶站在结束照射冷却 7 天后更换。更换靶站时，工作人员远程控制二层废靶暂存间内单轨吊，用定制专用吊具，将上下三层盖板打开，再将一层的废靶吊出，放置于轨道下方的无轨电动平车后移到废靶暂存间内的指定区域暂存。废靶贮存衰变 3 年后，沿图 4-35 中的黑色箭头路线，经吊装口吊出。废靶流线与医护人员、患者无交叉。废靶流线见图 4-35。

(5) 其它放射性固废流线：除废靶外的其它放射性固废由运维人员从加速器大厅经医护走廊、治疗走廊、医护专用电梯厅移至地下一层，出医护专用电梯厅后，向西经医护走廊进入设备区走廊，转移至衰变间内的固定位置暂存。转移的时间避开治疗时间，与医护人员、患者无交叉。其它放射性固废流线见图 4-36、图 4-37。

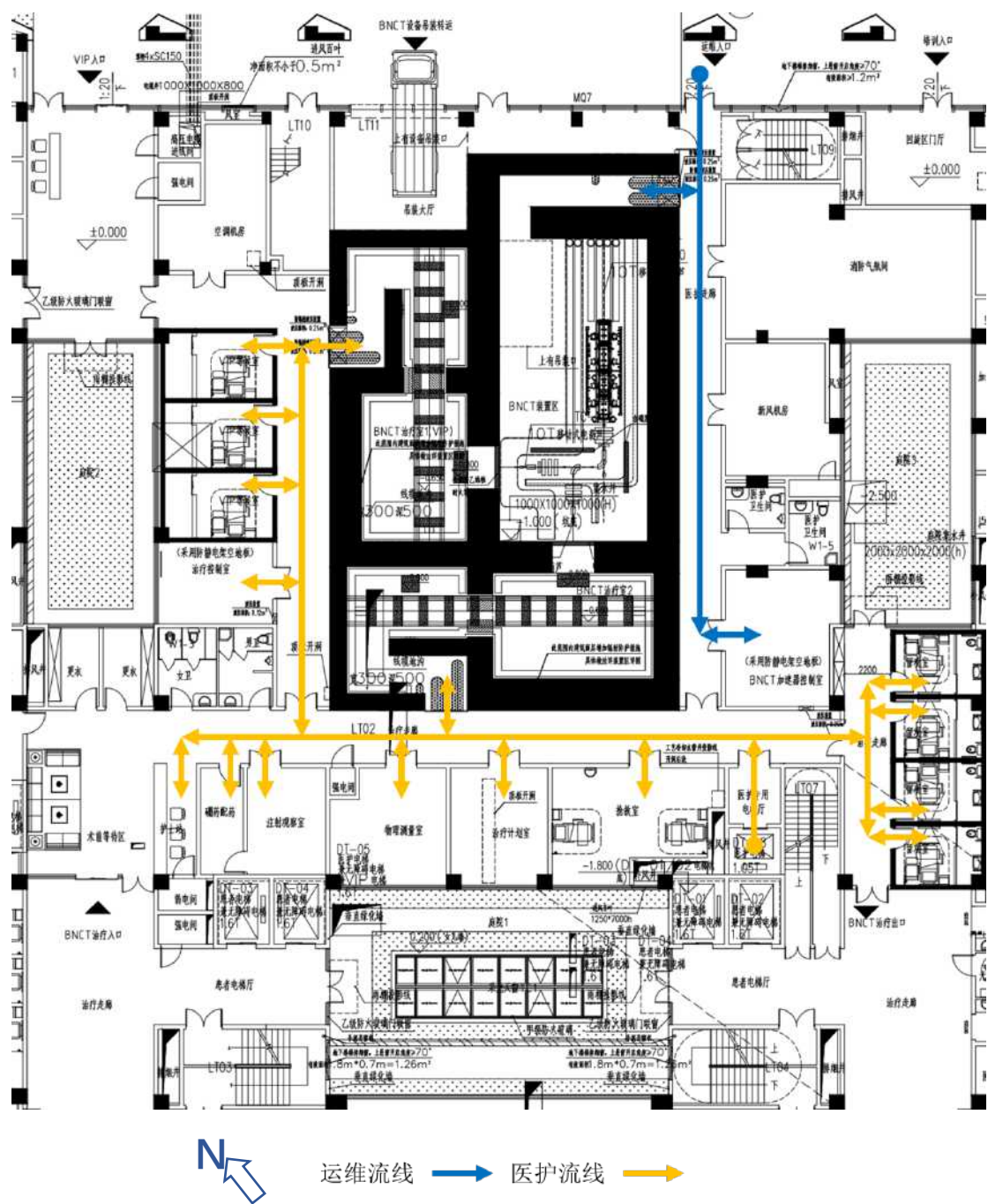
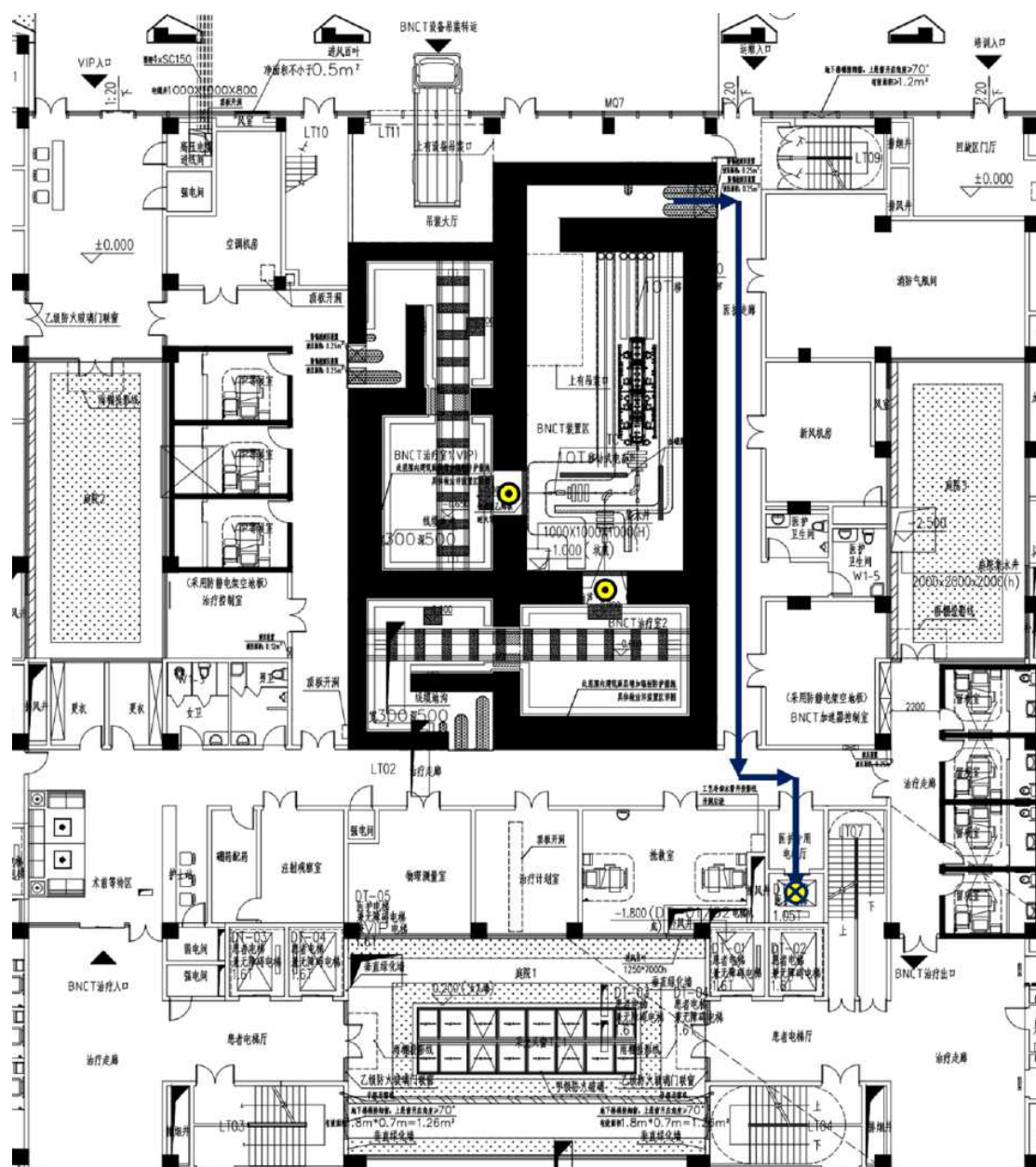


图 4-33 BNCT 运维人员及医护人员流线示意图



其他固废
流线

图 4-36 BNCT 其它放射性固废流线示意图 1

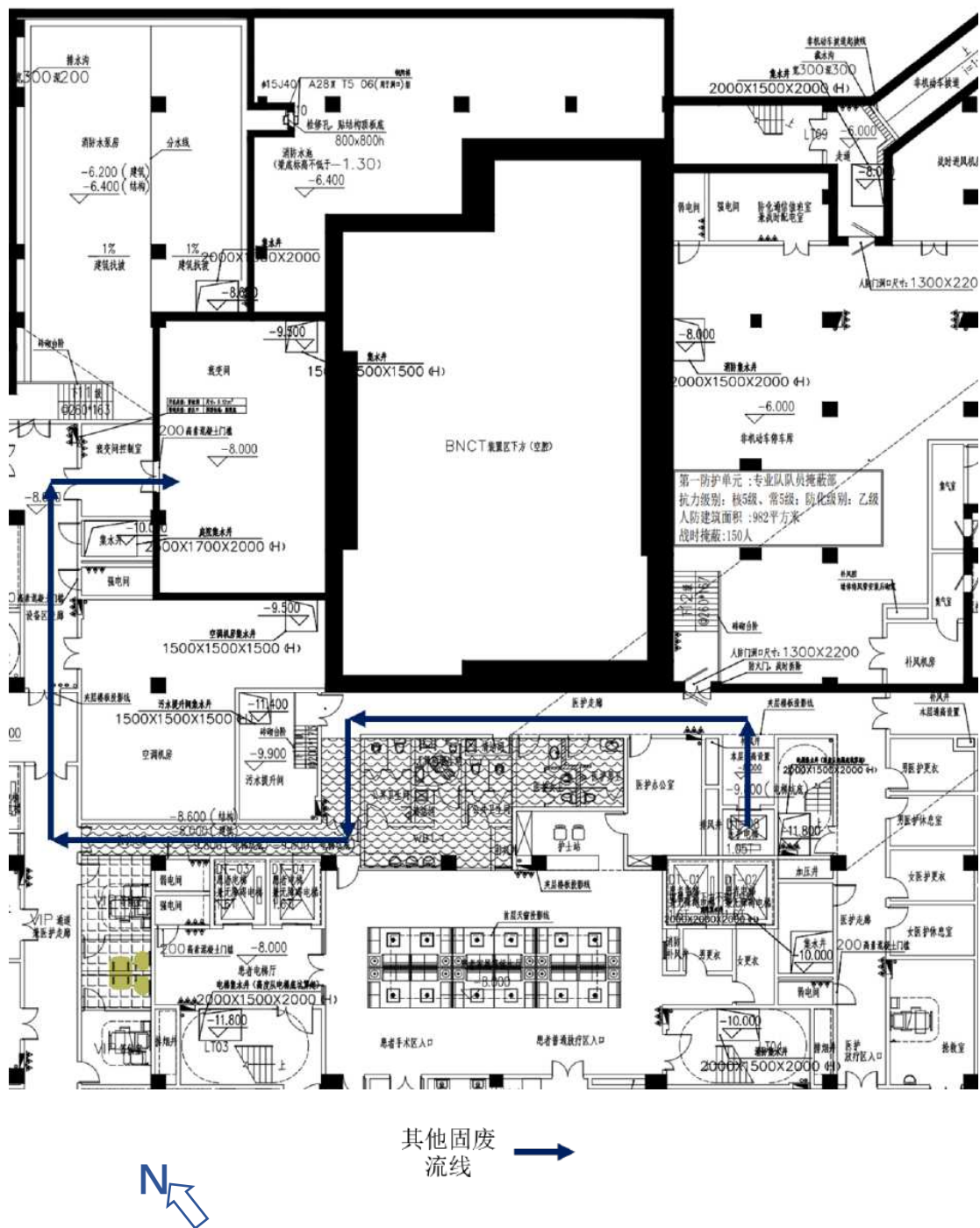


图 4-37 BNCT 其它放射性固废流线示意图 2

4.2.3 辐射屏蔽

硼中子俘获治疗装置屏蔽体设计参数见表 4-7、图 4-38~图 4-43，其中：

1) 治疗室主室紧贴四周墙面贴 2 mm 厚铅板，出束口所在墙面贴 9 mm 厚含硼聚乙烯 (PEB, 20wt%B₄C)，其余墙面贴 20 mm 厚 PEB (20wt%B₄C)，正对出束口的墙面再

局部贴 30 mm 厚 PEB (20wt%B₄C)，以束流中心左右对称，长 4000 mm，下至地面，上至 2500 mm；

2) 治疗室顶板贴 20 mm 厚 PEB (20wt%B₄C)；

3) 大厅内加局部屏蔽 PEB (20wt%B₄C)尺寸分别为 20 cm * 300 cm * 250 cm、20 cm * 240 cm * 250 cm，具体位置见图 4-40；

4) 大厅顶部管道维持管道尺寸不变将部分普混改为 PEB (20wt%B₄C)，水平方向 PEB 板厚度 10 cm，见图 4-41；

5) V 型穿墙管道内部后砌部分用 PEB (20wt%B₄C) 封堵，结构示意见图 4-42；

6) 迷道屏蔽门为带联锁装置的 PEB (20wt%B₄C) + 低碳钢门，结构示意见图 4-42。

表 4-7 硼中子俘获治疗装置屏蔽体设计参数表

区域	屏蔽体	材质、厚度	室内尺寸	周围环境
加速器大厅	南侧墙	1500 mm 混凝土	室内长×宽×高： 14200 mm × 7000 mm × 4500 mm 迷道宽×高： 1500 mm × 4500 mm 迷道出口门洞尺寸： 1500 mm × 2200 mm	治疗室 2 主室
	西侧墙	1500 mm 混凝土		治疗室 1 主室、吊装大厅
	东侧墙	1000 mm 混凝土		医护走廊
	北侧迷道内墙	1000 mm 混凝土		加速器大厅迷道
	北侧迷道外墙	1000 mm 混凝土		消防通道
	防护门	80 mm 含硼聚乙烯 (20wt%B ₄ C) + 100 mm 低碳钢		医护走廊
	防护门上方墙体	1000 mm 混凝土		医护走廊
	顶板	1500 mm 混凝土		废靶间、BNCT 气瓶间、BNCT 功率源间、吊装大厅、预留设备间
	底板	1500 mm 混凝土		BNCT 装置区下方 (空腔)
治疗室 1 主室	东侧墙	1500 mm 混凝土*	室内长×宽×高： 7000 mm × 5000 mm × 4500 mm	加速器大厅
	北侧墙	1200 mm 混凝土*		治疗室 1 摆位区
	南侧墙	1200 mm 混凝土*		治疗室 2 摆位区
	西侧墙	1500 mm 混凝土*		治疗走廊
治疗室 1 摆位区	东侧墙	1500 mm 混凝土	室内门洞尺寸： 2000 mm × 4500 mm	加速器大厅
	北侧墙	800 mm 混凝土		吊装大厅

区域	屏蔽体	材质、厚度	室内尺寸	周围环境
	西侧迷道内墙	800 mm 混凝土	摆位区长×宽×高： 5700 mm × 3100 mm × 4500 mm	治疗室 1 迷道
	西侧迷道外墙	800 mm 混凝土		治疗走廊、楼梯间
	防护门	20 mm 含硼聚乙烯 (20wt%B ₄ C) + 60 mm 低碳钢		治疗走廊
治疗室 1	顶板	1500 mm 混凝土*	迷道宽×高： 2000 mm × 4500 mm 1800 mm × 4500 mm	废靶区、BNCT 电源间、BNCT 数据中心、吊装大厅
	底板	1500 mm 混凝土	迷道出口门洞尺寸： 2000 mm × 2200 mm	BNCT 装置区下方（空腔）
治疗室 2 主室	北侧墙	1500 mm 混凝土*	室内长×宽×高： 7600 mm × 5000 mm × 4500 mm	加速器大厅
	西侧墙	1200 mm 混凝土*		治疗室 2 摆位区
	东侧墙	1200 mm 混凝土*		医护走廊
	南侧墙	1500 mm 混凝土*		治疗走廊
治疗室 2 摆位区	北侧墙	1200 mm 混凝土	室内门洞尺寸： 2000 mm × 4500 mm	治疗室 1 主室
	西侧墙	800 mm 混凝土		治疗走廊
	南侧迷道内墙	800 mm 混凝土	摆位区长×宽×高： 5700 mm × 3400 mm × 4500 mm	治疗室 2 迷道
	南侧迷道外墙	800 mm 混凝土		治疗走廊
	防护门	20 mm 含硼聚乙烯 (20wt%B ₄ C) + 60 mm 低碳钢		治疗走廊
治疗室 2	顶板	1500 mm 混凝土*	2000 mm × 4500 mm 1800 mm × 4500 mm	废靶区、BNCT 电源间
	底板	1500 mm 混凝土	迷道出口门洞尺寸： 2000 mm × 2200 mm	BNCT 装置区下方（空腔）

注：混凝土*表示墙面有增加屏蔽材料，详见上文 1) 文字描述。

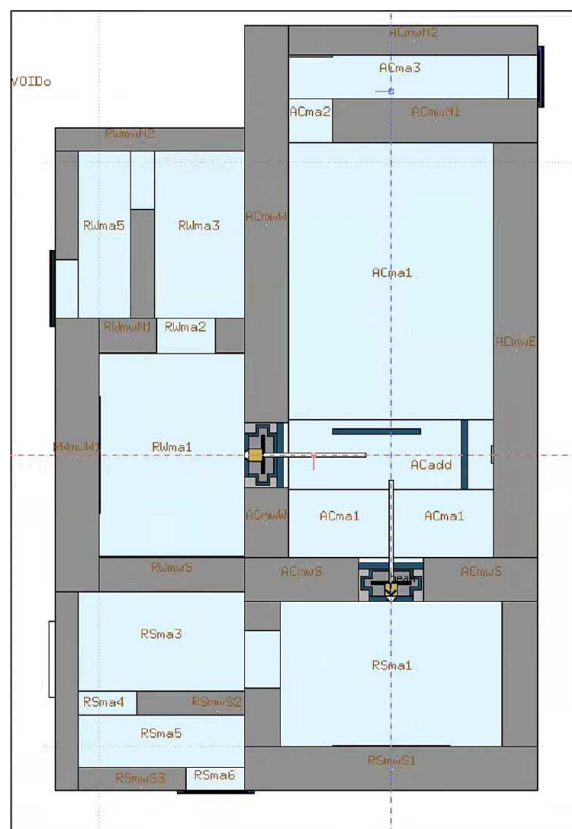


图 4-38 BNCT 屏蔽体束线高度（1.3 m）处平面图

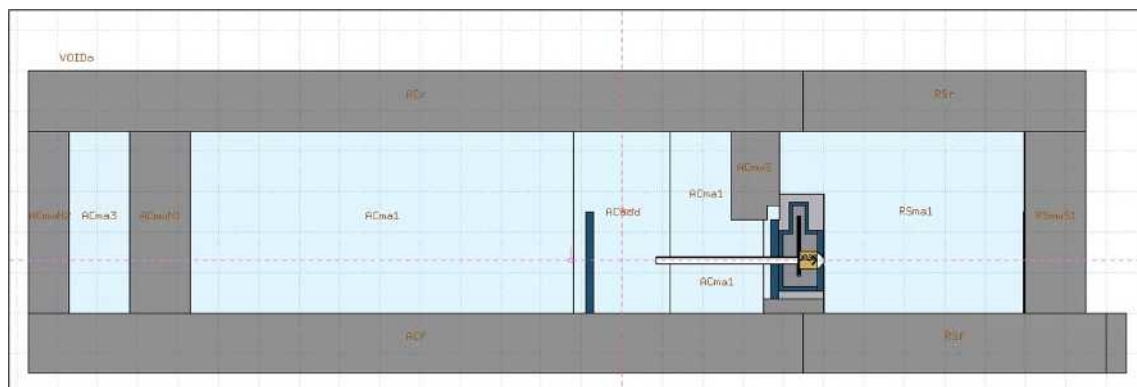
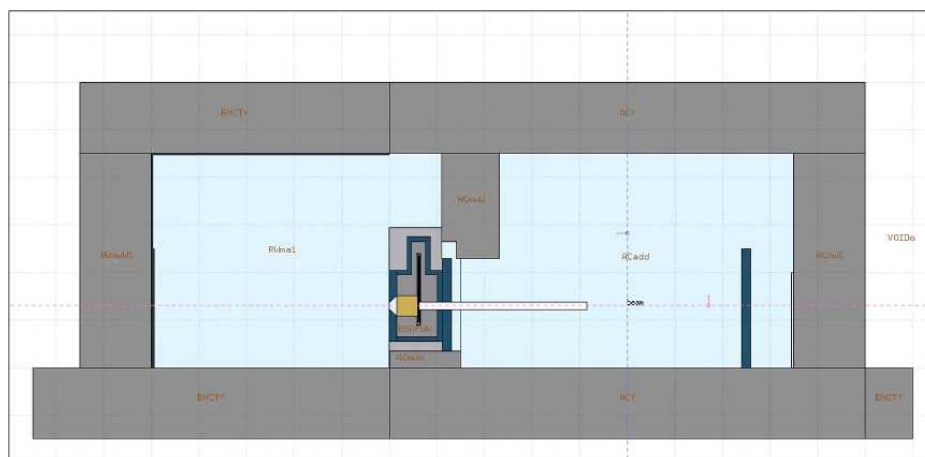


图 4-39 BNCT 屏蔽体剖面图（上图东西向，下图南北向）

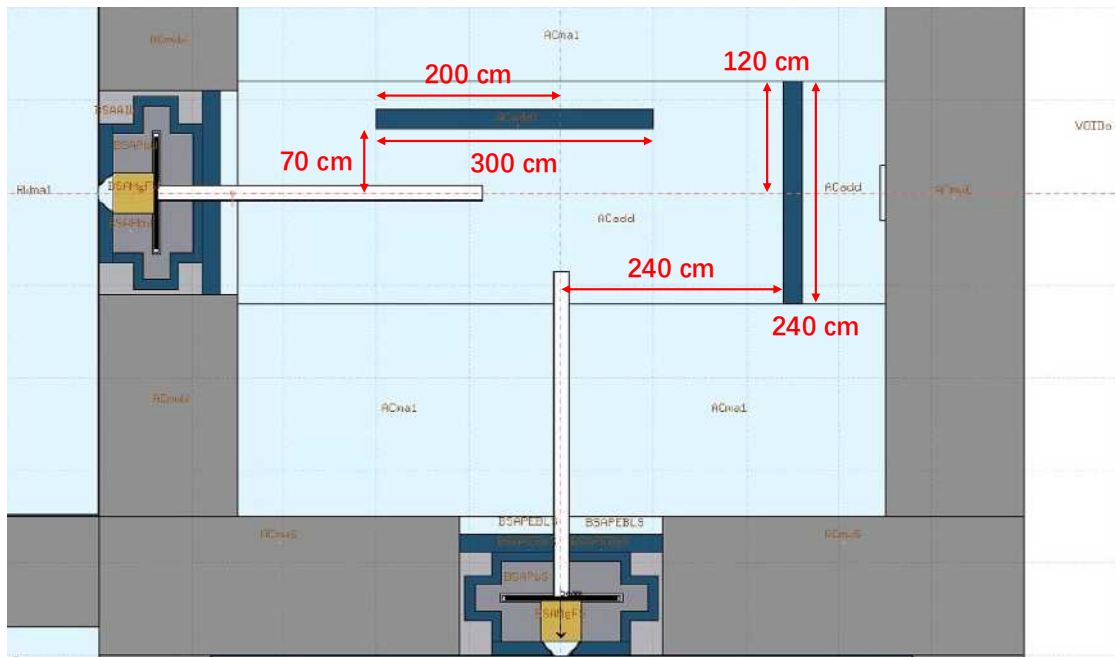


图 4-40 BNCT 加速器大厅局部屏蔽位置平面图

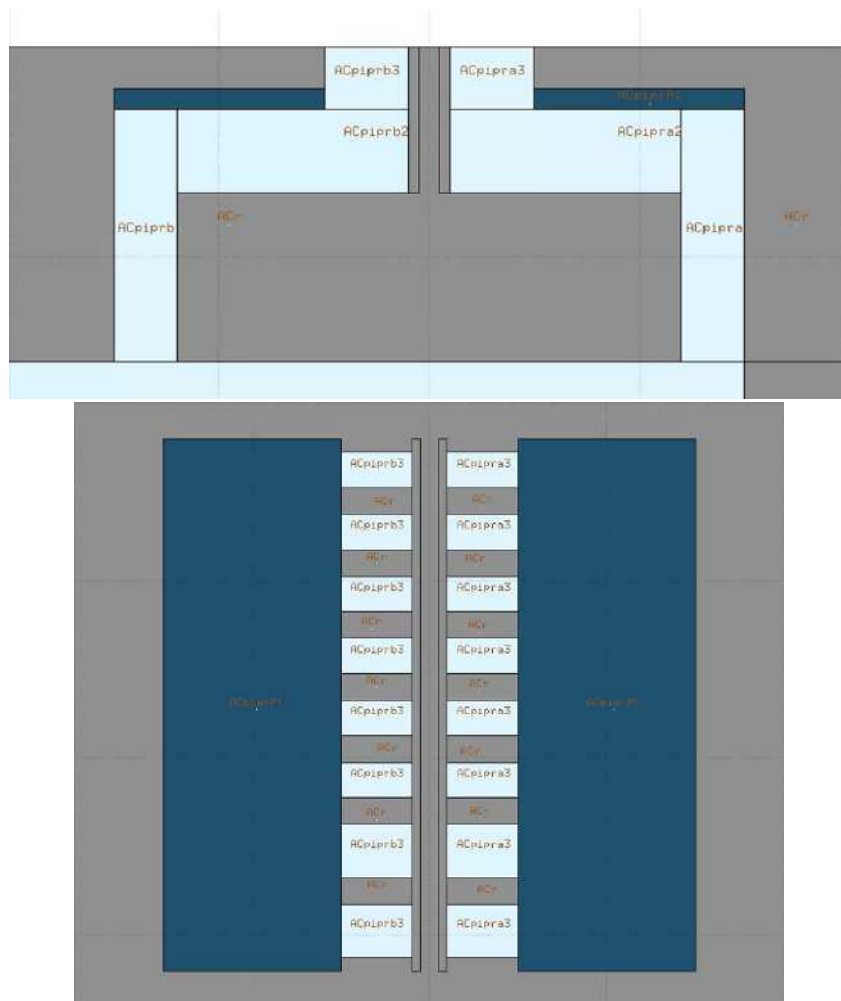


图 4-41 BNCT 加速器大厅顶部管道屏蔽补偿示意图（上图剖面，下图平面）

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

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

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

4.2.4.1 系统结构和功能

本项目硼中子俘获治疗系统辐射安全联锁系统主要由集中数据管理、中央 PLC 控制、网络通信及现场设备等部分组成，其架构如图 4-44 所示。

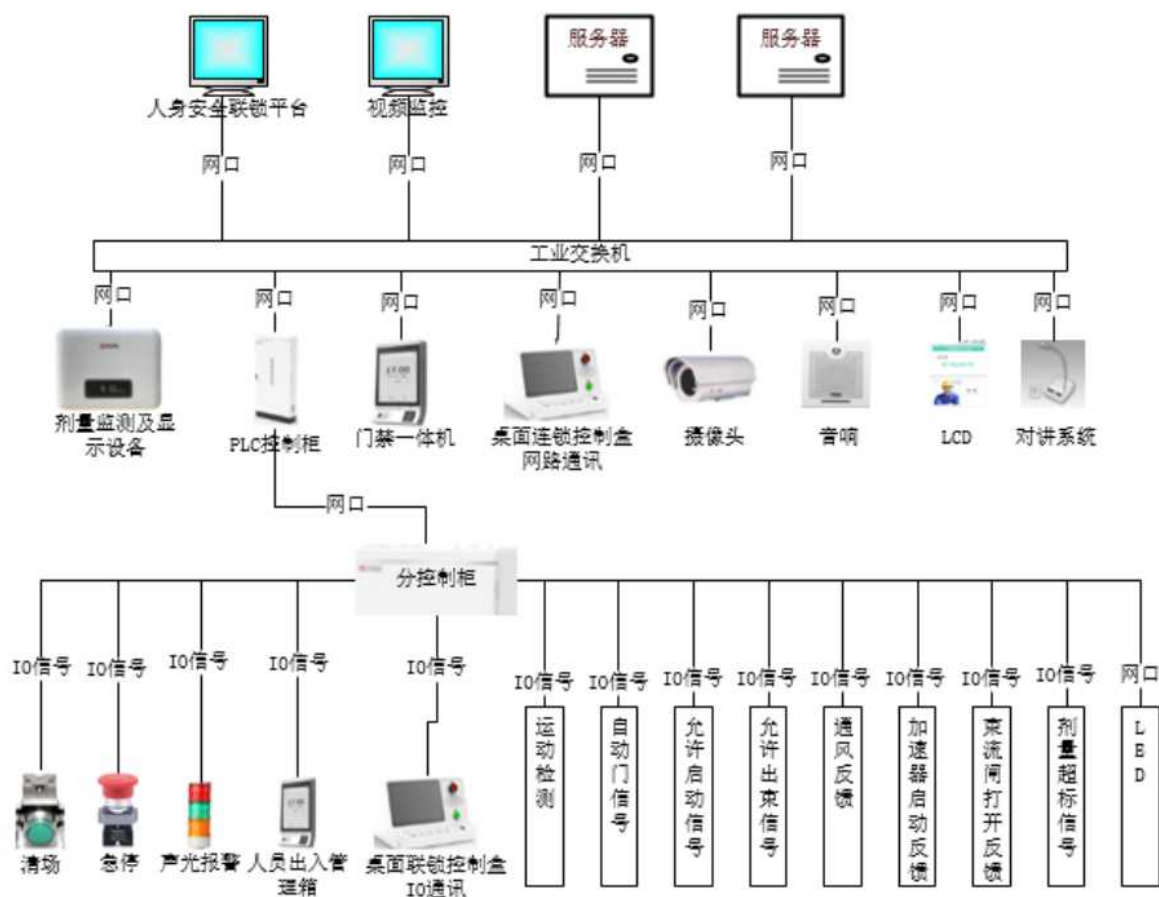


图 4-44 安全联锁系统结构示意图

4.2.4.2 系统组成

本项目硼中子俘获治疗装置辐射安全联锁系统包含的主要联锁设备有联锁门（门机联锁）、声光报警装置、状态指示灯、LCD 信息展示屏、清场搜索（巡检）按钮、急停按钮、剂量联锁、桌面联锁控制盒、人员出入管理箱、紧急开门开关和智能化系统，各功能描述如下。

4.2.4.2.1 联锁门（门机联锁）

在加速器大厅和治疗室的出入口布置有联锁门，门上安装有门限位开关。在加速器出束前，门位置开关参与实现清场功能，清场人员需要依次按下清场按钮并且关闭联锁门；在加速器出束过程中，门位置开关与清场功能联动，联锁门被打开会立即触发急停功能。

联锁门具备延时联锁功能，能够根据需要设定延时时间。加速器出束后，在延时时间内，联锁门无法打开，防止人员在区域辐射剂量较高的情况下误入。

4.2.4.2.2 声光报警装置

加速器大厅及各治疗室内部装有声光信号指示，各状态的信号指示示例如下，其中治疗室在常规治疗流程中无蜂鸣报警（考虑到患者的心理状态，治疗室只有光信号）：

- （1）开始清场后，所有报警器黄灯闪烁，语音提示或蜂鸣器频响 1 次/s；
- （2）联锁建立时，所有报警器红灯闪烁，语音提示或蜂鸣器长鸣；
- （3）加速器运行时，所有报警器红灯闪烁，语音提示或蜂鸣器经过一段时间后结束；
- （4）加速器停止供束，所有报警器绿灯常亮。

4.2.4.2.3 状态指示灯

防护门上方装有门头 LED 警示屏，根据加速器运行状态、清场状态、紧急停机按钮、联锁门状态综合判断安全状态，输出管制模式，显示指定文字示例如下（具体会根据场所功能相应调整）：

- （1）当清场启动时，LED 屏显示“清场启动，限制进入”，黄色字体；
- （2）当联锁建立、加速器停机时，LED 屏显示：“准备供束，禁止进入”，红色字体；
- （3）当加速器运行时，LED 屏显示“正在供束，禁止进入”，红色字体；
- （4）当加速器停机时，LED 屏显示：“停止供束，控制进入”，绿色字体。

在防护门外还安装三色警示灯，辅助显示加速器大厅及各治疗室的出束、清场、停束和正常状态。

4.2.4.2.4 LCD 信息展示屏

LCD 信息展示屏安装于加速器大厅和治疗室的出入口，其与控制系统联动，可显示区域联锁状态、辐射水平、内部人员情况等信息。

4.2.4.2.5 清场搜索（巡检）按钮

清场搜索按钮安装于加速器大厅、各治疗室的墙壁，用于清场时的确认，清场搜索按钮上有状态指示灯，指示当前按钮是否被按下。设备运行前，巡检人员须对区域进行清场，以确保无人员滞留。清场时，巡检人员须在规定时间内按预定顺序依次按下全部清场按钮，正确操作后清场生效，超时或未按规定顺序执行，清场无效，需重新清场。当清场生效时，才允许加速器出束。联锁状态建立后门打开，清场失效，需重新清场。

4.2.4.2.6 急停按钮

急停按钮安装于加速器大厅、各治疗室的墙壁以及控制台上的桌面联锁控制盒，当其被按下后，束流立即切断，在紧急情况下使用。急停按钮设计为红色，旁边写有使用说明，并有自锁功能，被按下后只有到现场才能进行复位操作。急停按钮全部复位后，才允许加速器出束。

4.2.4.2.7 剂量联锁

在加速器大厅、各治疗室和控制室内等位置设置剂量探头，当剂量率高于预设阈值时立即报警。加速器设置门-剂量联锁，正常运行期间，辐射剂量率测量结果高于设定值时，各防护门不能从外面打开，防止人员误入。

加速器控制室、治疗控制室以及治疗室 1 墙外的剂量探测器的联锁阈值设置为 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，超出阈值触发安全联锁，停止出束。

屏蔽体内的剂量探测器不设置联锁阈值。显示数值小于 10 $\mu\text{Sv/h}$ 工作人员可正常进入（与开门权限联锁）。

4.2.4.2.8 桌面联锁控制盒

桌面式联锁控制盒分为两种，其中位于加速器控制室的集成了总控钥匙开关、区域授权开关、急停按钮、联锁状态指示等功能，用于加速器大厅联锁操作控制及加速

器出束控制；位于治疗治疗控制室的主要用于给出治疗室联锁建立后的准许出束信号。

4.2.4.2.9 人员出入管理设备

在加速器大厅联锁门处安装人员出入管理箱，可进行人员权限识别和进出管理。当进入加速器大厅时，需拔下桌面联锁控制盒上的钥匙，并将此钥匙插入人员出入管理箱的钥匙开关处，此后经权限识别才可触发开门动作。门内安装无条件开门按钮，按下按钮，屏蔽门可自动打开。

对于治疗室，为方便医护人员和患者出入，采用门禁系统控制。

4.2.4.2.10 紧急开门按钮

在加速器大厅和各治疗室的出入口门外，设有紧急开门按钮，该按钮设在人员不易触碰的位置和高度，仅在紧急情况下用于打开各控制区的门。

4.2.4.2.11 电离辐射警告标志

在控制区入口和监督区入口处适当位置设置电离辐射警告标志。

4.2.4.2.12 智能化系统

迷道入口安装摄像机用于对进出控制区的人员进行人员监测并进行抓拍，把抓拍的图片上传到辐射防护联锁平台。加速器大厅、治疗室内安装多个摄像头，在控制室可以实时查看内部情况。

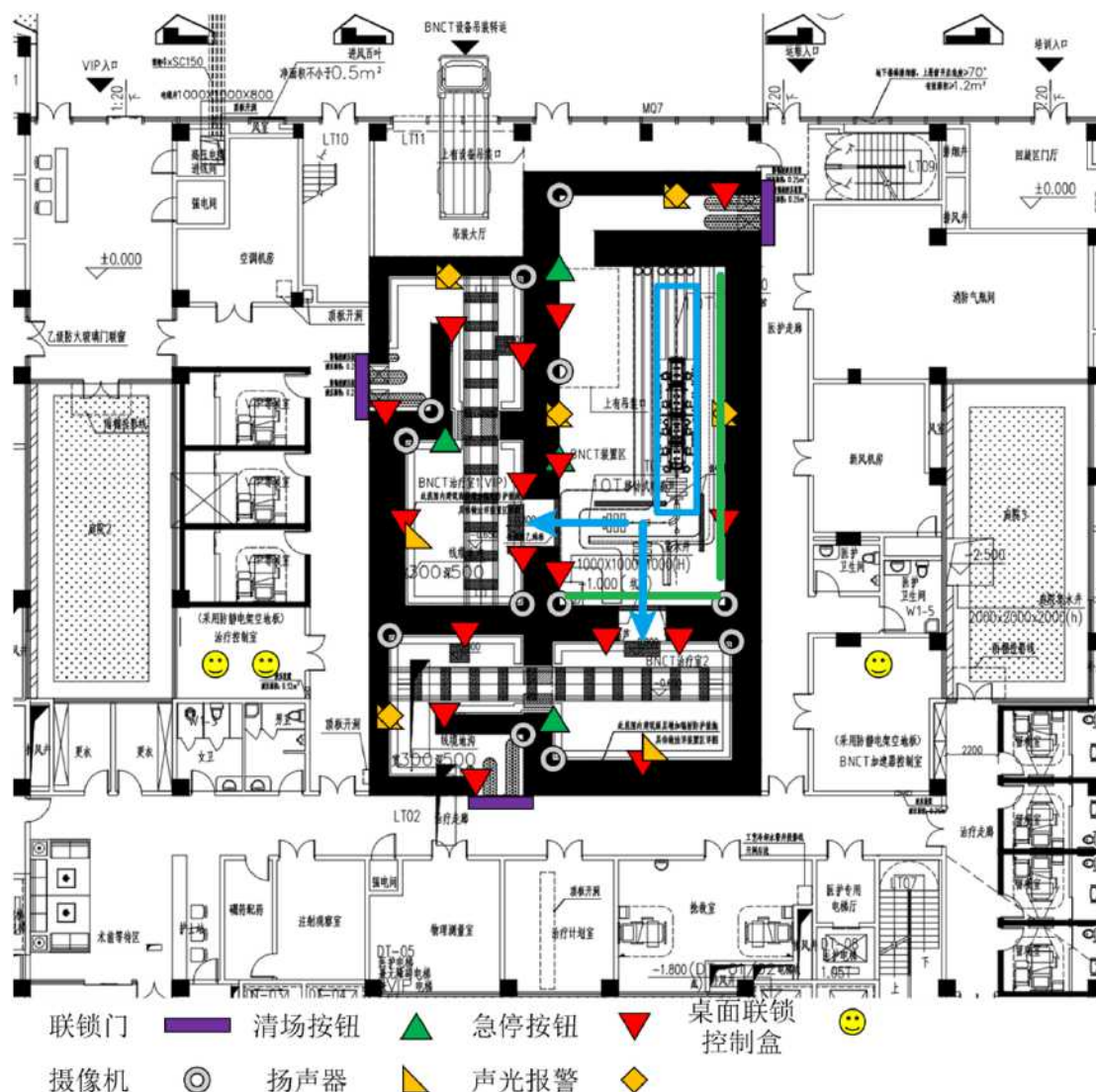
在各治疗室以及治疗控制室内对应的控制台处设置双向对讲系统，方便医护人员与患者进行实时交流。

4.2.4.2.13 小结

本项目硼中子俘获治疗装置辐射安全联锁设施点位数量统计见表 4-8，各设备点位分布示意图见图 4-45，清场搜索路线见图 4-46。

表 4-8 本项目 BNCT 工作场所安全联锁设备数量一览表，个

设备名称	加速器大厅	治疗室 1	治疗室 2
联锁门	1	1	1
门口警示灯	1	1	1
LCD 信息展示屏	1	1	1
门头 LED 警示屏	1	1	1
人员出入管理设备	1	1	1
紧急开门按钮	1	1	1
门内开门按钮	1	1	1
清场按钮	2	1	1
急停按钮	5	6	6
声光报警	3	1	1
扬声器	3	2	2
摄像机	4	4	4



*联锁门均配有：门口警示灯、LCD 信息显示屏、门头 LED 警示屏、人员出入管理设备、紧急开门按钮、门内开门按钮

图 4-45 本项目 BNCT 工作场所安全联锁设备布置示意图

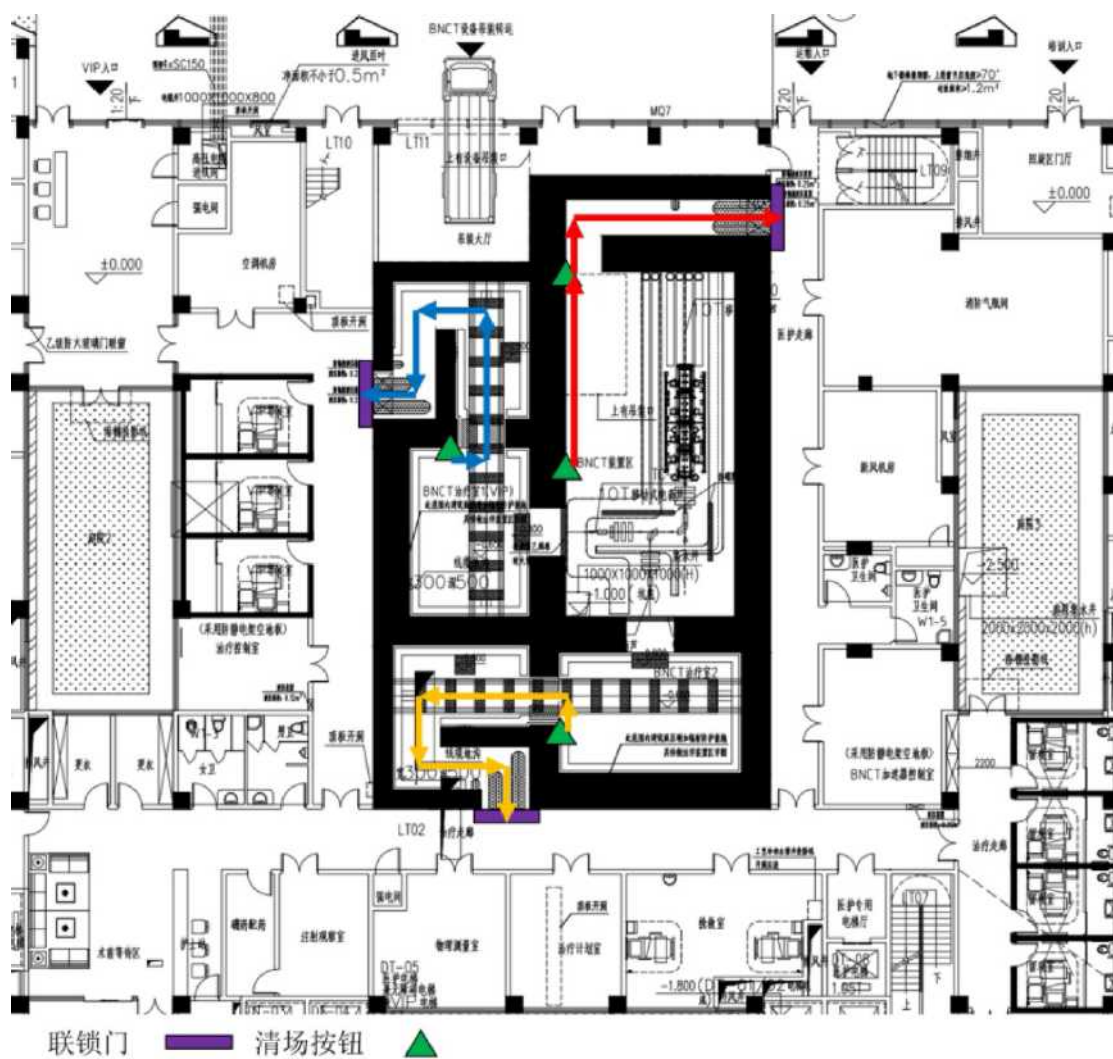


图 4-46 本项目 BNCT 工作场所清场搜索巡检路线示意图

4.2.4.3 联锁逻辑

4.2.4.3.1 加速器请求出束逻辑

加速器主要有两种状态，未开启状态和允许出束状态（加速器已经运行但还未出束，治疗控制系统发出命令可以随时出束）。加速器的束流请求出束逻辑见下图。

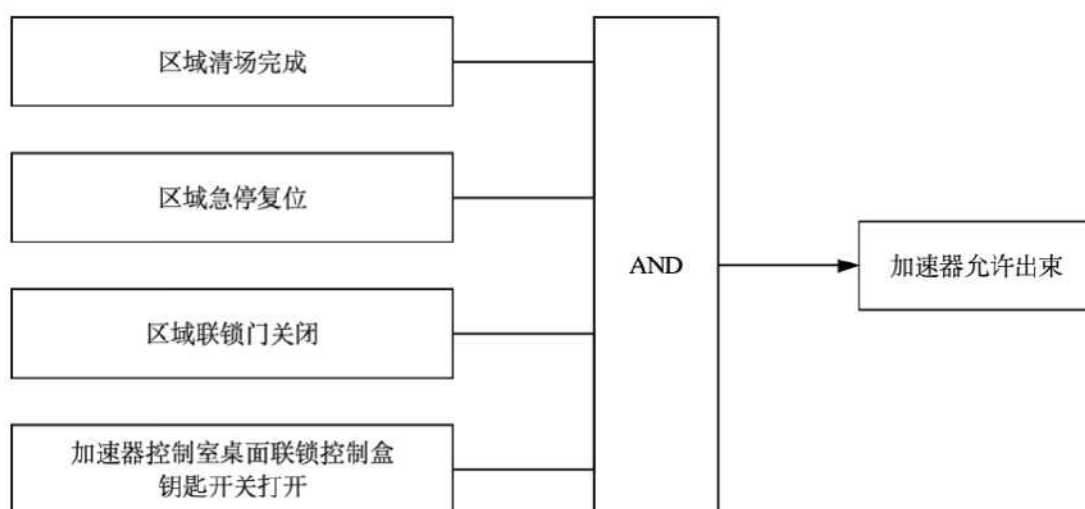


图 4-47 BNCT 质子加速器允许出束控制逻辑图

4.2.4.3.2 治疗室请求出束逻辑

各治疗室相互独立，各治疗室之间无联锁关系。治疗室的束流请求出束逻辑见下图。

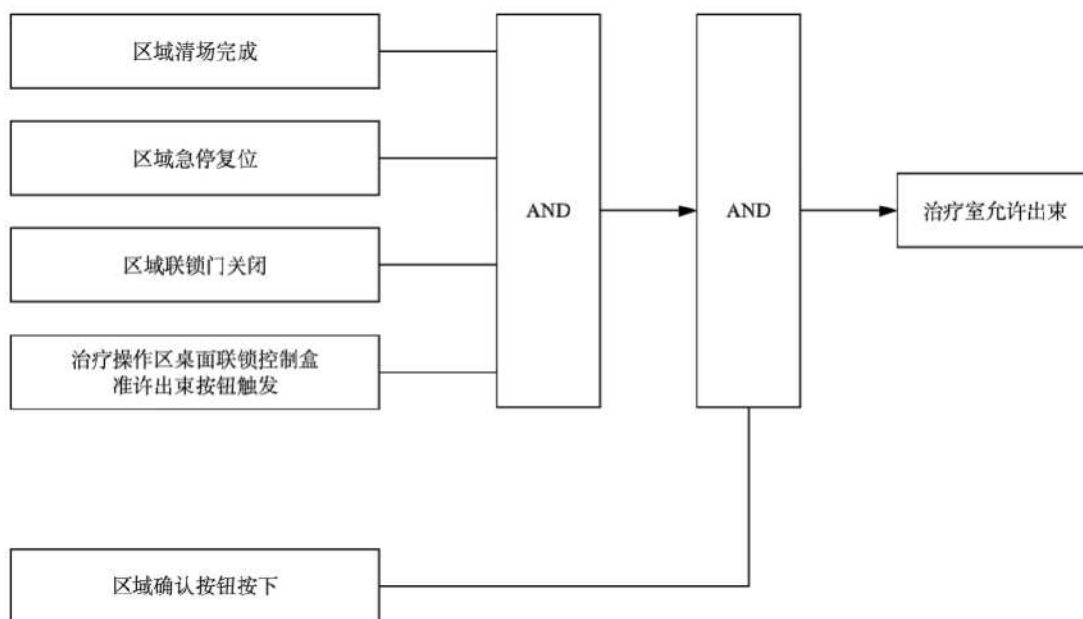


图 4-48 BNCT 治疗室出束控制逻辑图

4.2.4.3.3 人员进入加速器大厅控制逻辑

医院的医护人员不会进入加速器大厅，只有加速器系统的工程师方可进入。加速器停机后才准许人员进入机房，正常情况下只有以下条件全部满足时，人员方能打开联锁门进入机房：停止供束、人员出入管理箱钥匙为开、权限识别成功、区域剂量率低于设定阈值，紧急情况时当紧急开门按钮触发时可直接不受限制进行开门。

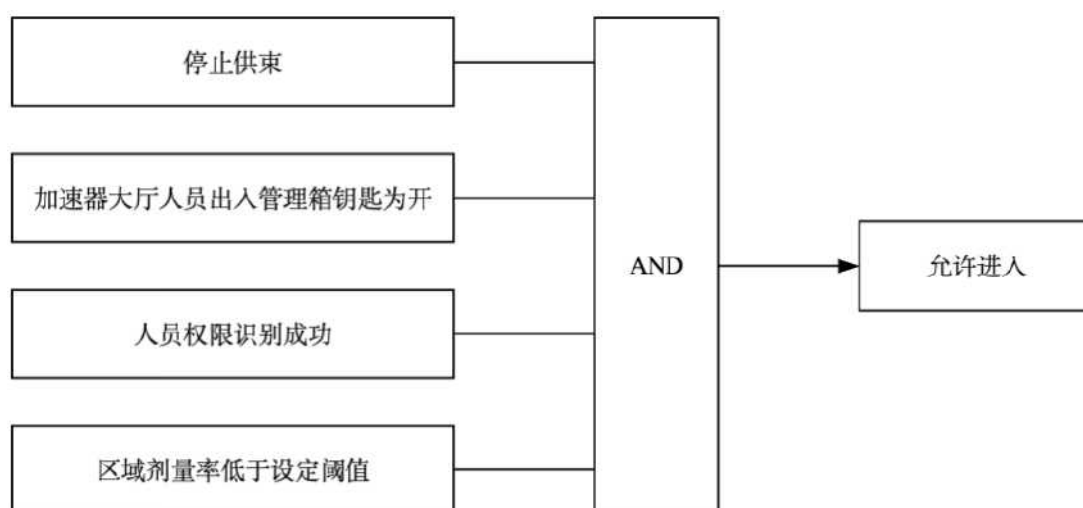


图 4-49 BNCT 人员进入加速器大厅控制逻辑图

4.2.4.3.4 人员进入治疗室控制逻辑

治疗室准许人员进入的条件：束流切断设备关闭、权限识别成功、剂量率低于阈值。人员进入治疗室的控制逻辑见下图。

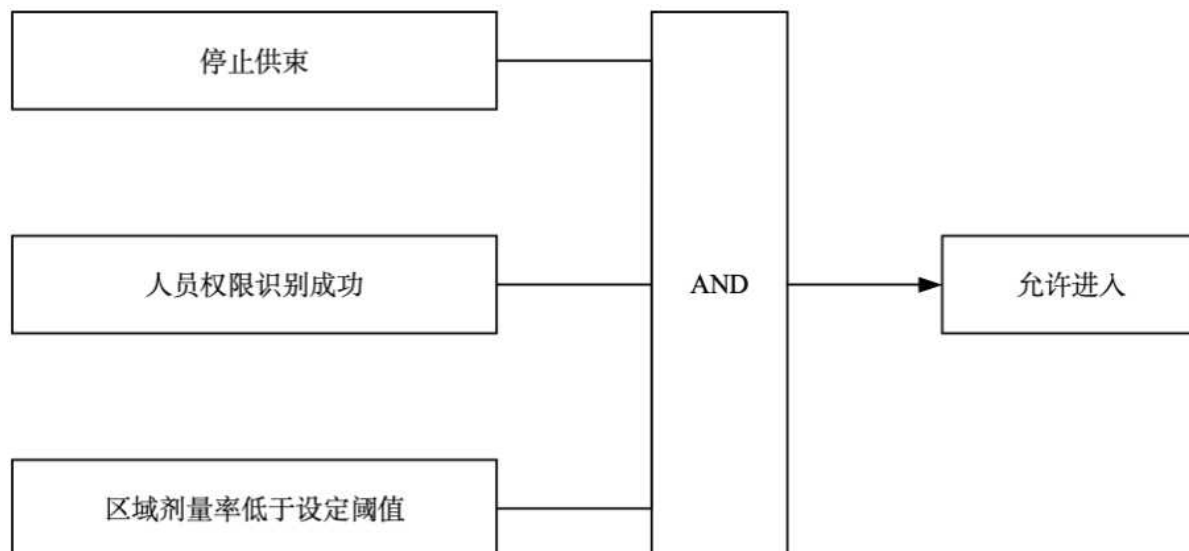


图 4-50 BNCT 人员进入治疗室控制逻辑图

4.2.4.3.5 清场搜索逻辑

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。任一区域的清场状态被破坏，都需要对该区域重新进行清场；清场状态未被破坏则无需重新清场。每个区域的搜索必须在规定时间内完成，如果超时则本次搜索清场无效，需要重新启动搜索。清场搜索巡检路线见图 4-46。清场搜索逻辑见下图。

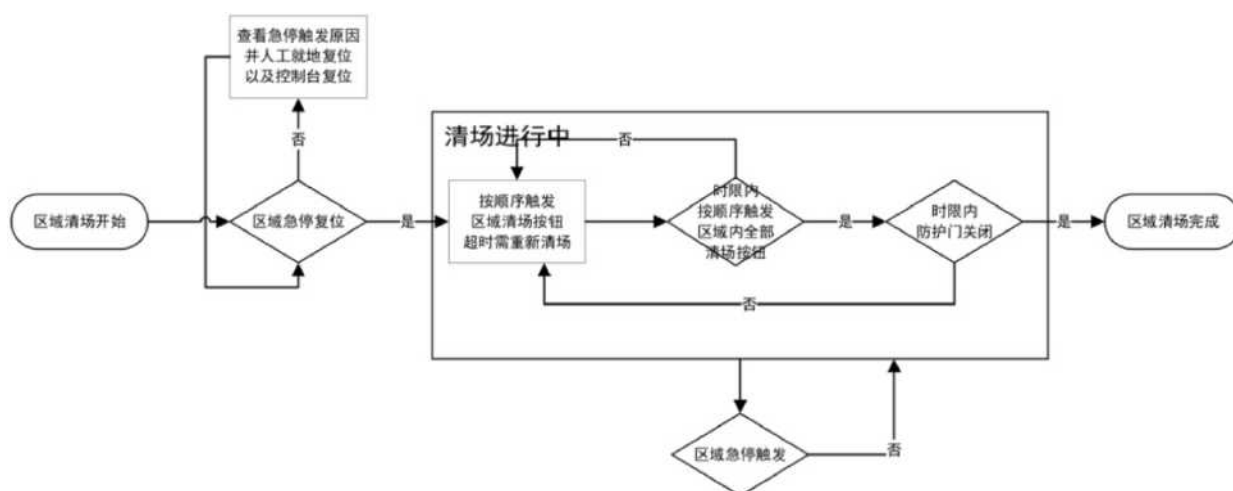


图 4-51 BNCT 清场搜索逻辑图

4.2.5 场所辐射监测系统

BNCT 设置有场所辐射监测系统，在加速器大厅、各治疗室和控制室内等位置设置剂量探头，当剂量率高于预设阈值时立即报警。加速器设置门-剂量联锁，正常运行期间，辐射剂量率测量结果高于设定值时，各防护门不能从外面打开，防止人员误入。

加速器控制室、治疗控制室以及治疗室 1 墙外的剂量探测器的联锁阈值设置为 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，超出阈值触发安全联锁，停止出束。

屏蔽体内的剂量探测器不设置联锁阈值。显示数值小于 10 $\mu\text{Sv/h}$ 工作人员可正常进入（与开门权限联锁）。

剂量探头数量见下表。

表 4-9 本项目 BNCT 工作场所辐射监测探头数量一览表，个

区域	光子探头数量	中子探头数量
加速器大厅	2	2
加速器控制室	1	1
治疗室 1	2	2
治疗室 2	2	2
治疗室控制室	1	1
治疗室西侧走廊	1	1
总计	9	9

剂量探头位置见下图。

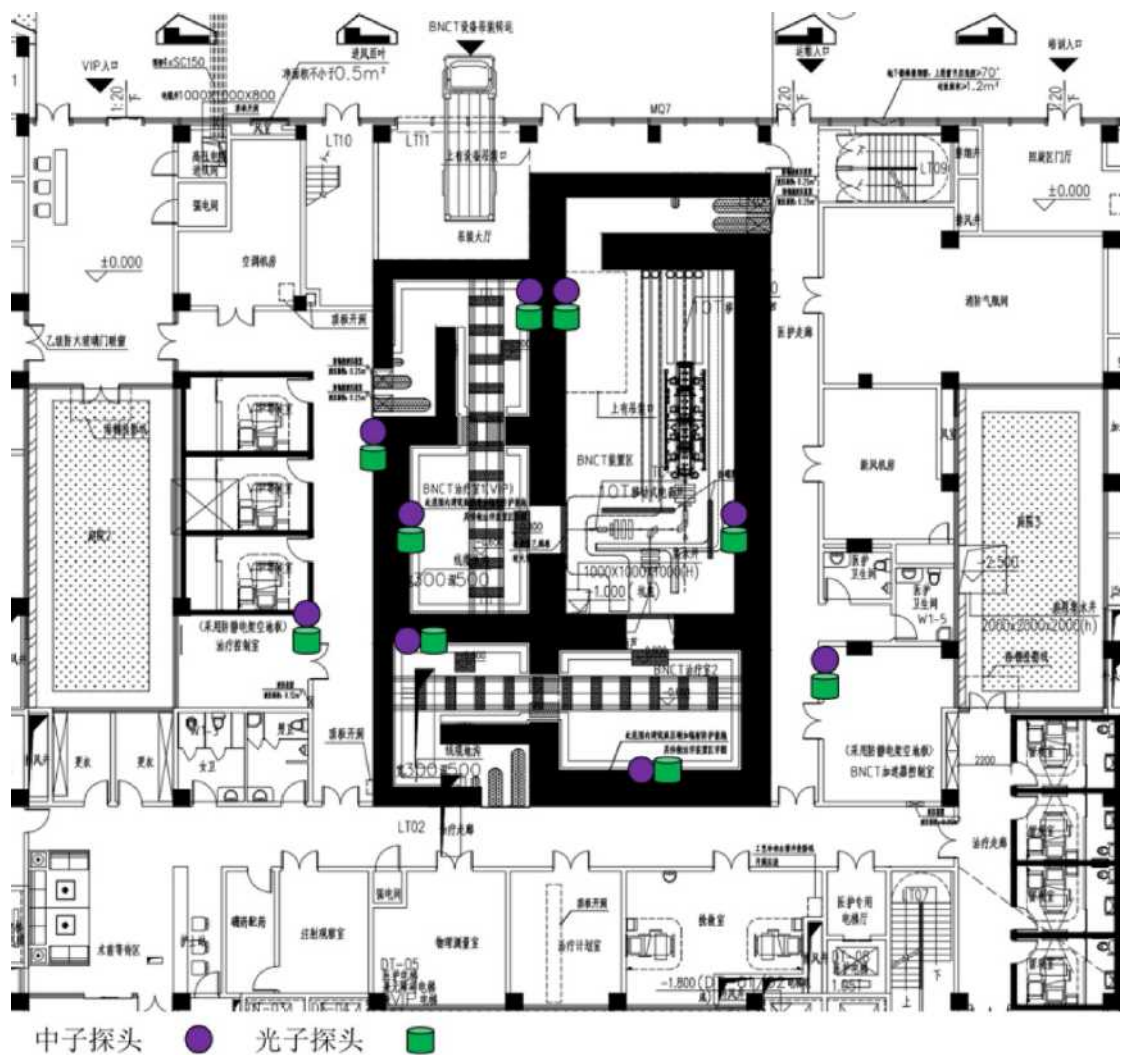


图 4-52 辐射剂量监测探头点位图

4.2.6 通风系统

硼中子俘获治疗装置通风系统设计参数见表 4-10。治疗室进风口、排风口位置及换气次数均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“上进下排，对角设置”、“放射治疗机房通风换气次数应不小于 4 次/h”的要求，可保持各机房内良好通风。

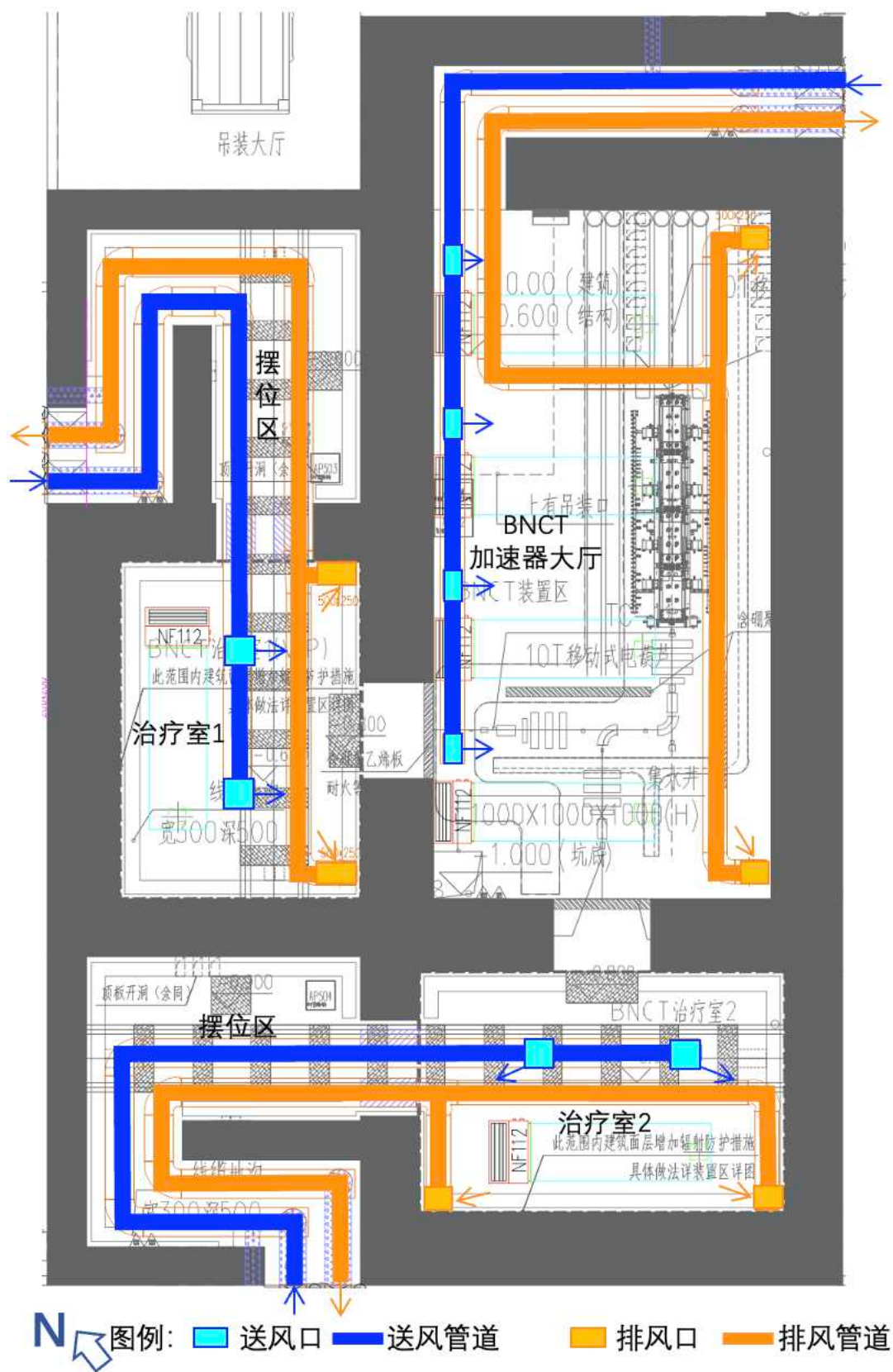


图 4-53 BNCT 通风系统送排风管道布局图

表 4-10 硼中子俘获治疗装置通风系统设计参数表

区域名称	区域体积, m ³	新风量, m ³ /h	排风量, m ³ /h	换气次数, 次/h
加速器大厅	600	5000	5500	9.1
治疗室 1 (含摆位区)	276	4000	4400	16
治疗室 2 (含摆位区)	284	4000	4400	15.5
VIP 等候室	47.4	100	130	2.1
留观室	35.1	150	200	5.6
抢救室	138	900	800	6.5
衰变间	400	3500	4000	10
废靶间	518.7	3000	3500	6.7

注：表中区域均为控制区。

4.2.7 放射性三废治理

4.2.7.1 放射性废气

(1) 来源

根据第三章的分析, BNCT 运行期间将产生感生放射性气体, 主要核素产生量见表 3-73。由结果可知, 空气感生放射性主要考虑 ^{41}Ar ($T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$)。

(2) 处理措施

本项目 BNCT 设置有机排风系统, 2 间治疗室的换气次数均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021) 中“换气次数不少于 4 次/h”的要求。装置运行过程中产生的感生放射性气体最终由屋面排入环境。考虑到其排入大气后的扩散和稀释, 其对环境的影响很小。

4.2.7.2 放射性废水

(1) 来源

硼中子俘获治疗装置的放射性废水主要考虑靶体的冷却水及患者产生的废水。靶站冷却水活化计算结果见表 3-74, 年产生废水量最多 0.48 m³; 患者排出尿液的活化计算结果见表 3-82。

（2）处理措施

1) 活化冷却水

BNCT 冷却水系统设置水量检测仪器，发生泄漏引起系统水量减少时，系统报警。BNCT 加速器大厅的角落处设置地漏，大厅地面形成一定坡度，在冷却水泄漏时能依靠重力自行流入地漏，将收集的冷却水汇入集水井暂存。集水井容积为 1m^3 ，可容纳两倍以上的一回路废水年最大排放量。

活化冷却水经暂存后，排放前需对集水井中冷却水进行取样分析，满足标准后方可排入示范中心污水管网，并对每次排放进行记录存档。

2) 患者废水

留观室内患者的排泄物、呕吐物及冲洗水等废液排入负一层的衰变间的衰变池中。衰变池为 1 套 3 池并联式衰变箱，箱体采用不锈钢材料，每个箱体容积均为 15m^3 。衰变箱及其连接管道均采用不锈钢材质。衰变池前端设置 2 个 2m^3 的沉淀池。衰变池设有取样口，废水排放前必须取样检测达标后方可排放。

衰变池运行原理如下：

（1）三个衰变池并联，编号分别为 1#、2#、3#，交替使用。

（2）放射性废水经沉淀池首先进入 1#池，此时，另两个衰变池进水口和三个衰变池的出水口全部处于关闭状态。

（3）当 1#池液面达到设定液位时，关闭 1#进水阀，开启 2#进水阀，污水进入 2#池。

（4）当 2#池液面达到设定液位时，关闭 2#进水阀，开启 3#进水阀，污水进入 3#池。

（5）当 3#池液面到设定液位时，1#排水阀开启，排水泵工作。当液位传感器感知到 1#池液位排空后，关闭 3#进水阀，同时打开 1#进水阀。

（6）当 1#池再次感知到液位达到设定液位时，2#排水阀开启，排水泵工作；当感知到液体已排空后，2#排水阀关闭，1#进水阀关闭，2#进水阀打开；如此循环。

(7) 此系统终端控制器为一组彩色触摸屏，一般情况下所有动作均自动执行，但如需人工控制可进入手动界面控制全部执行器的动作；同时，此人机终端可反映本系统一切内容，如故障、报警及排放记录等。

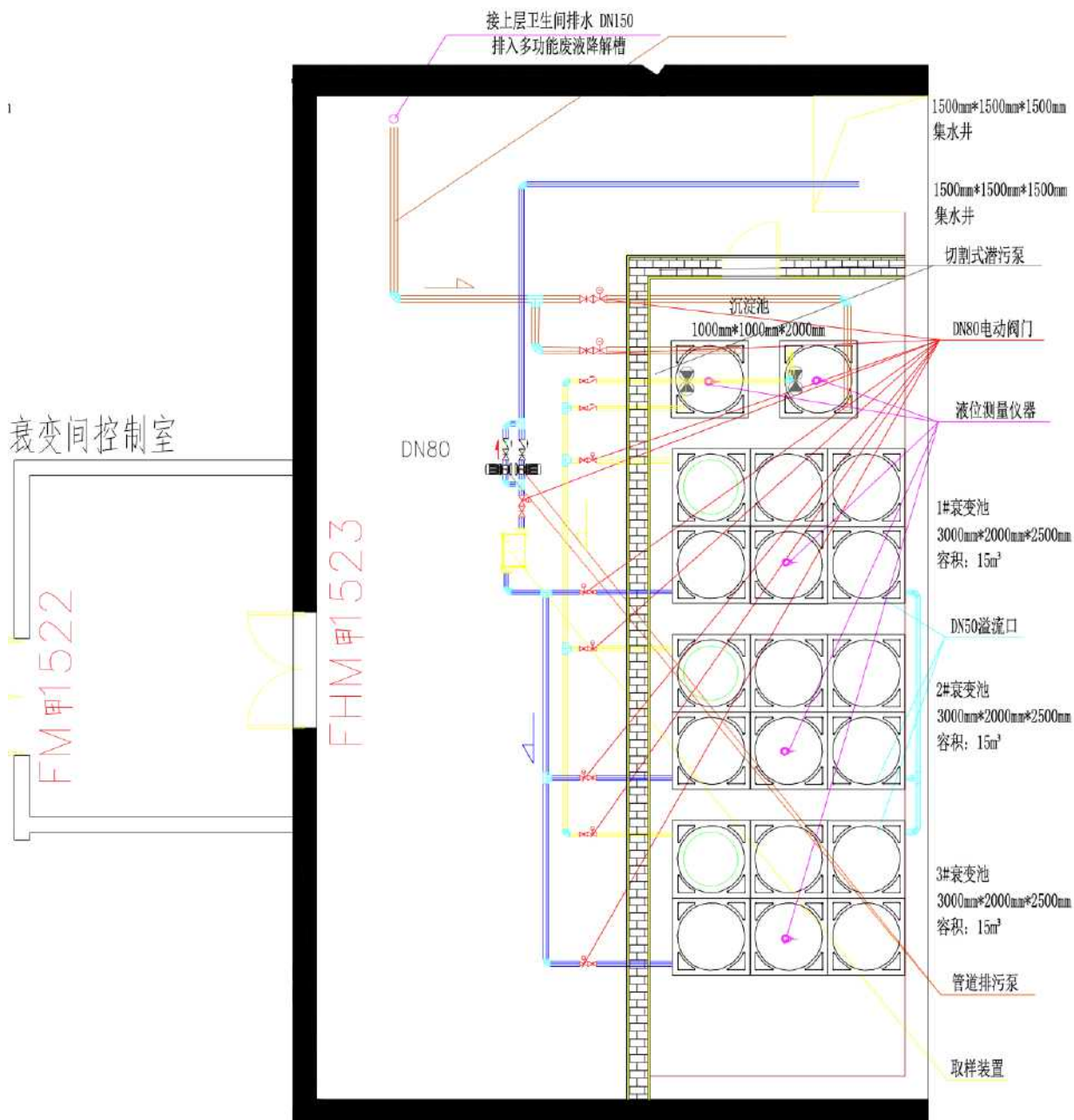


图 4-54 BNCT 衰变池布局示意图

依据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）要求，所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放。由表 3-82 可知，患者排泄物中放射性核素的半衰期均小于 24 小时，半衰期最长的为 ^{24}Na （14.959 h）。排泄物在排衰变池中泄留衰变 30 天后，可直接解控排放入示范中心污水管网。由表 3-82 可

知，排泄物废水在衰变池中静置衰变 10 天后，总 β 活度约为 0.103 Bq/L，已满足《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）规定的排放限值（总 α ：1 Bq/L、总 β ：10 Bq/L）。

本项目硼中子俘获治疗中心平均一天治疗病例为 8 人，保守按每天治疗病人数量为 10 个计，病人照射后在恢复室滞留 2 小时以上，每个病人在此期间如厕产生污水 10 L，其中排尿量 1 L，辅助冲水 9 L。每天照射后的病人产生的排泄物污水总量最多约为 100 L，即 0.1 m³。每个衰变箱容量为 15m³，存满需要 150 天。若按照排泄物暂存衰变 30 天后排放，当前衰变池容量可以满足硼中子俘获治疗使用需求。

4.2.7.3 放射性固体废物

（1）来源

硼中子俘获治疗系统的放射性固体废物主要为靶站更换下来的废靶，靶站一年更换一次，每年产生 2 个废靶。由表 3-75 可知，靶站连续照射一段时间后涉及的放射性核素大多为短半衰期核素，核素半衰期一般不超过 60 天，因此通过一定时间的存放，这些含有放射性核素的固废即可衰变达到较低的水平。准备更换的靶站在结束照射后需要冷却 7 天，此时半衰期短或产生量小的核素基本衰变完全。

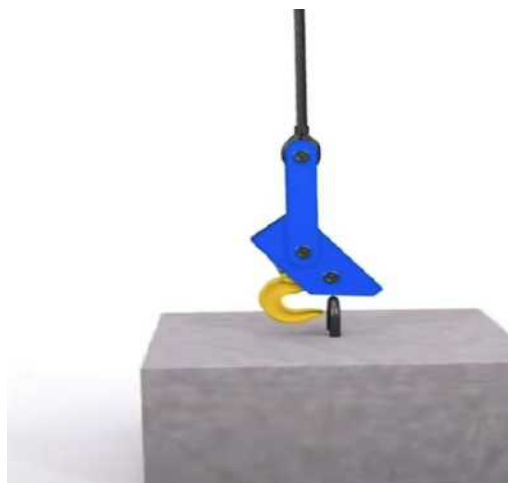
（2）处理措施

1) 废靶

更换靶站时，人员远程控制废靶暂存间内单轨吊，用定制专用吊具将上下三层盖板打开，再将废靶吊出，放置于轨道下方的无轨电动平车后，移到指定区域暂存。单靶贮存衰变时间为 3 年，3 年后沿图 4-55 黑色箭头路线经吊装口吊出，定期请有资质单位检测，当单个靶站的放射性核素活度低于清洁解控水平后，可申请作为普通固废处置。



单轨吊



混凝土块专用吊具



无轨电动平车

图 4-56 废靶转移工具示例照片

2) 其它放射性固废

硼中子俘获治疗系统的其它放射性固废主要来自于加速器运行、维修过程中产生的口罩、手套、抹布等易耗品和活化的废零件，上述废物沿图 4-57、图 4-58 深蓝色箭头路线转运至地下二层衰变间中暂存。经监测废物活度低于清洁解控水平并经审管部门确认或批准后，可作为非放射性固废处置。固废转移应尽量选择人流较少时段进行。

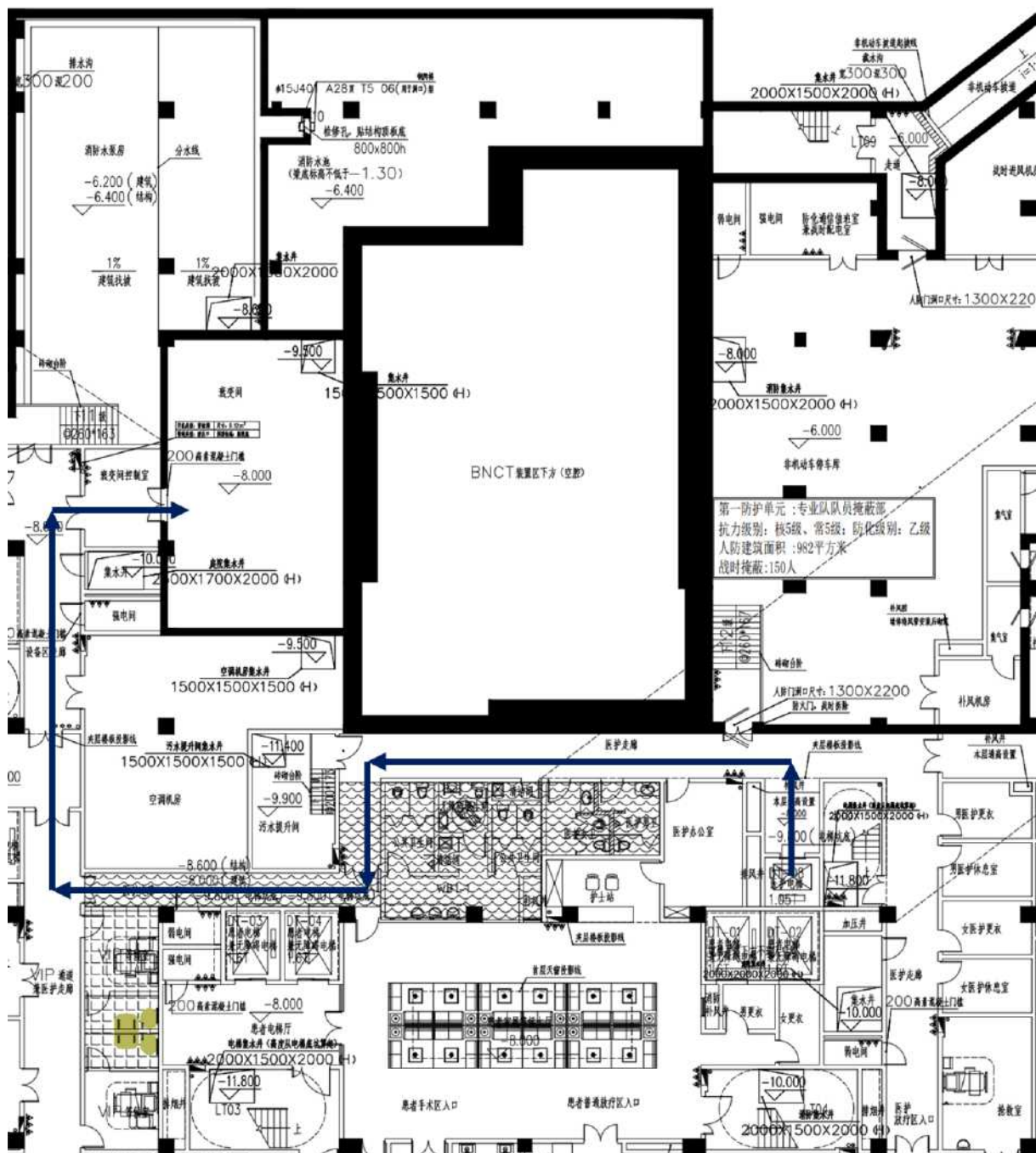


图 4-58 BNCT 其它放射性固废流线示意图 2

4.3 直线加速器、后装治疗机

由于本项目直线加速器与后装治疗机均位于地下一层放疗科，工作场所相邻，因此本章节一并描述。

4.3.1 场所布局与分区

直线加速器、后装治疗机辐射工作场所分区情况见表 4-11 和图 4-59。

表 4-11 直线加速器、后装治疗机辐射工作场所分区表

区域	场所名称
控制区	直线加速器机房 1、直线加速器机房 2、直线加速器机房 3、后装治疗机
监督区	各机房控制室、手术区 UPS 电源间、手术室、强电间、治疗区走廊、辅助机房、水冷机房、后装机等候区、排烟机房等

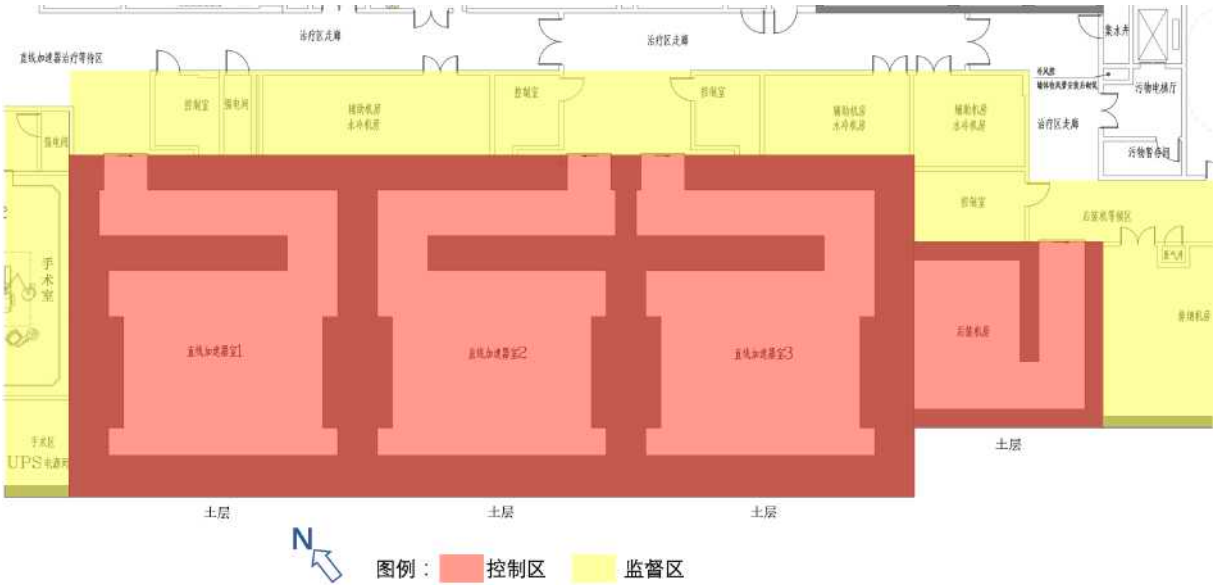


图 4-59 直线加速器、后装治疗机辐射工作场所分区图

4.3.2 辐射屏蔽

表 4-12 直线加速器机房屏蔽参数表

房间	屏蔽体	规格	区域
直线加速器室 1	主屏蔽区	2350mm/3000mm 混凝土（宽 4800m）	地下一层放疗科
	次屏蔽区	1700mm 混凝土	
	侧墙	1800mm 混凝土	
	迷道内墙	1500mm 混凝土	
	迷道外墙	1500mm 混凝土	
	顶板	主屏蔽区 3000mm 混凝土（宽 4800m） 次屏蔽区 1700mm 混凝土	
	地板	2000mm 混凝土	
	防护门	15mmPb	
直线加速器室 2	主屏蔽区	3000mm 混凝土（宽 4800m）	地下一层放疗科
	次屏蔽区	1700mm 混凝土	

房间	屏蔽体	规格	区域
	侧墙	1800mm 混凝土	
	迷道内墙	1500mm 混凝土	
	迷道外墙	1500mm 混凝土	
	顶板	主屏蔽区 3000mm 混凝土（宽 4800m） 次屏蔽区 1700mm 混凝土	
	地板	2000mm 混凝土	
	防护门	15mmPb	
直线加速器室 3	主屏蔽区	2350mm/3000mm 混凝土（宽 4800m）	
	次屏蔽区	1700mm 混凝土	
	侧墙	1800mm 混凝土	
	迷道内墙	1500mm 混凝土	
	迷道外墙	1500mm 混凝土	
	顶板	主屏蔽区 3000mm 混凝土（宽 4800m） 次屏蔽区 1700mm 混凝土	
	地板	2000mm 混凝土	
	防护门	15mmPb	

表 4-13 后装治疗机房屏蔽尺寸参数表

房间	屏蔽体	材质及厚度	区域
后装治疗 机房	西侧与直加机房共用墙体	2350mm/1700mm 混凝土	地下一层放 疗科
	东、南、北侧墙体	800mm 混凝土	
	迷道内墙	800mm 混凝土	
	迷道外墙	800mm 混凝土	
	顶板	800mm 混凝土	
	地板	800mm 混凝土	
	防护门	10mmPb	

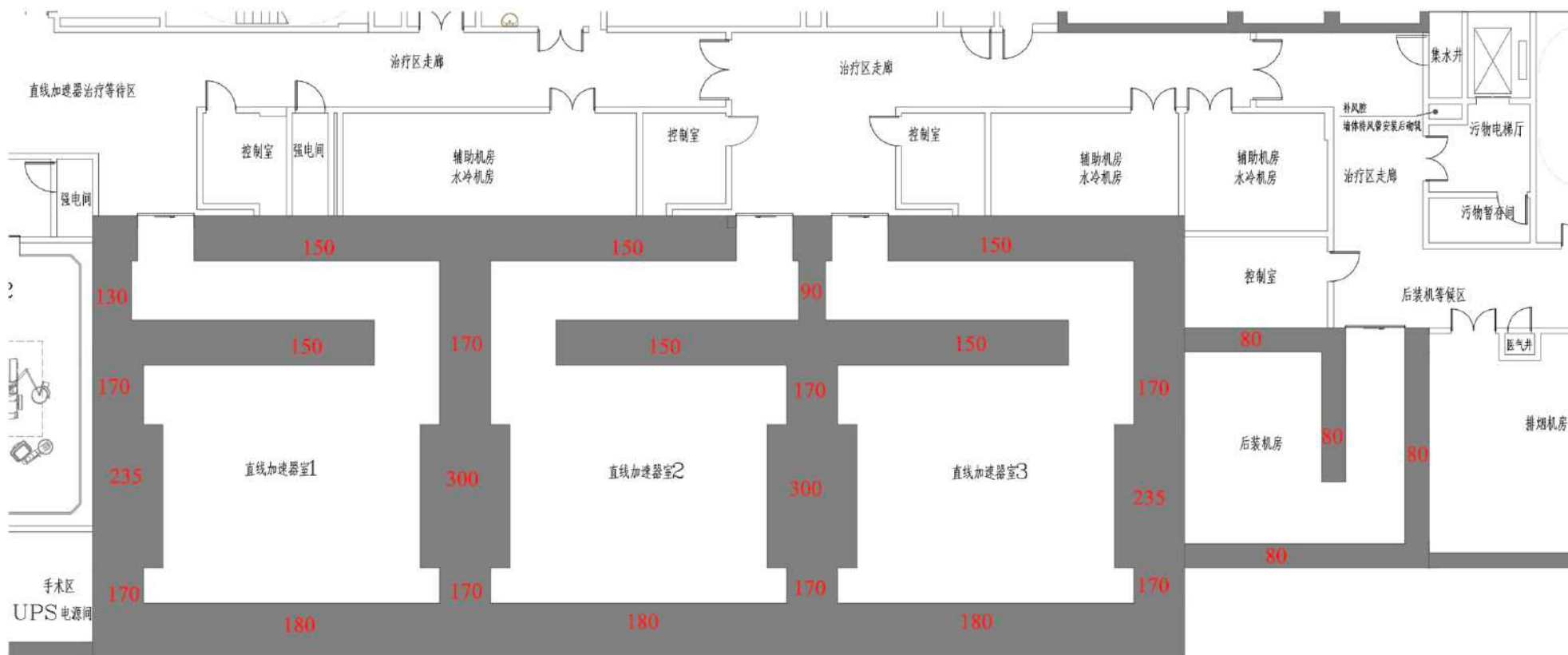


图 4-60 直线加速器、后装治疗机屏蔽尺寸平面图（剖面以直加 3 号机房为例）

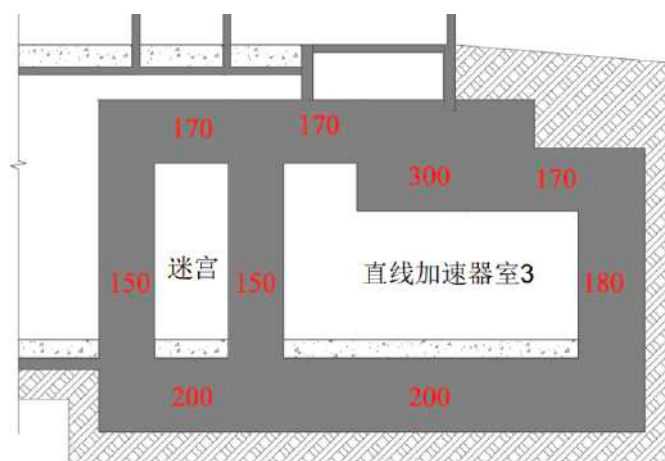


图 4-61 直线加速器屏蔽尺寸剖面图（三间直加机房一致，以直加 3 号机房为例）

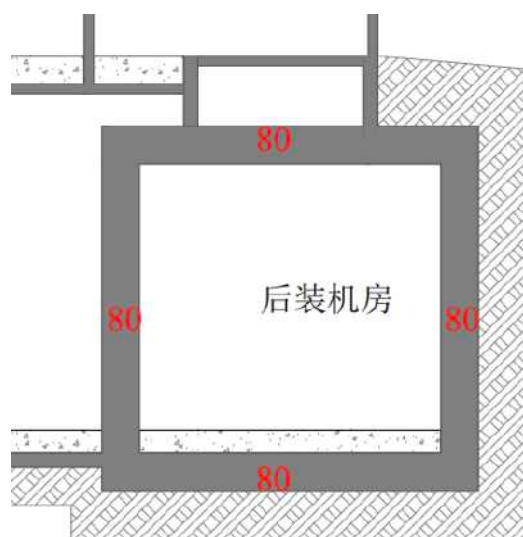


图 4-62 后装治疗机屏蔽尺寸剖面图

4.3.3 安全联锁及辐射监测系统

4.3.3.1 直线加速器

直线加速器的安全与防护设施功能描述如下：

（1）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。

（2）联锁系统

机房设置多重联锁装置，以保证人员和设备安全，防止意外事故。

1) 门机联锁

采用电动推拉防护门，与设备启动电路实行门机联锁方式，即防护门未关闭前，加速器无法启动。

2) 系统联锁

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

（3）手动开门装置

在防护门外侧墙上安装 1 个紧急开门按钮，防护门内侧墙上安装 1 个手动开门装置，均带有明显标志。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）急停按钮

每间加速器机房的控制室内桌面联锁控制盒上自带急停按钮（1 个）、机房四周墙壁上设置急停按钮（4 个，含 2 个预留）、迷道内设置急停按钮（1 个），并有明显标志。（以上不包括设备机身或治疗床自带的急停按钮数量），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。

（5）视频监控对讲系统

治疗机房内和迷道均安装视频监控，安装点位确保能看到整个治疗机房和迷道的全景，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有对讲设备，便于工作人员与患者之间进行交流。

（6）电离辐射警告标志和工作状态指示灯

机房防护门外设置电离辐射警告标志和中文警示说明，安装工作状态指示灯（三色灯），不同颜色显示和加速器运行状态关联。

（7）清场按钮

机房内墙面设置清场按钮 1 个，摆位完成后，确认机房内除患者外无其他人员逗留，按下清场按钮后离开治疗机房。

表 4-14 直线加速器辐射安全及联锁设备数量

序号	名称	数量，每个直加机房	总计
1	门头 LED 警示屏	1 个	3 个
2	电移门限位开关	1 组	3 组
3	门口警示灯	1 个	3 个
4	进门/出门管理器	1 个	3 个
5	紧急开门按钮	1 个	3 个
6	门内开门按钮	1 个	3 个
7	声光报警装置	2 个	6 个
8	急停按钮	6 个（桌面联锁控制盒上自带一个急停）	18 个
9	语音对讲装置	1 个	3 个
10	清场按钮	1 个	3 个
11	摄像头	4 个	12 个

表 4-15 直线加速器安全与防护设施情况表

序号	项目	内容	备注
1	控制台及安全联锁	防止非工作人员误操作的锁定开关	控制台钥匙控制
2		控制台有紧急停机按钮	控制台桌面联锁控制盒上 1 个
3		监控和对讲系统	监控：迷道 2 个、治疗室内 2 个 对讲系统：控制室和治疗室 1 套
4		治疗室门与束流联锁	门机联锁
5		治疗室内准备出束声音提示	声光报警装置：迷道 1 个、治疗室 1 个
6	警告标志	入口电离辐射警告标志	设置在防护门外
7		入口有加速器工作状态指示灯	三色灯 1 个，设置在防护门外
8		门头 LED 警示屏	设置在外防护门外，门上方
9	治疗室紧急设施	门内开门按钮	设置在防护门内侧墙壁上 1 个
10		治疗室内有紧急停机按钮	墙壁 4 个（已有 2 个、预留 2 个） 迷道 1 个
11		治疗床有紧急停机按钮	至少 1 个
12	监测设备	治疗室内有固定式剂量率仪	1 台固定式 γ 剂量率仪
13		便携式辐射监测仪器仪表	1 号、2 号共用 1 台便携式 γ 剂量率仪；3 号和后装机共用 1 台便携式 γ 剂量率仪

序号	项目	内容	备注
14	其他	个人剂量报警仪	2 台/间
15		个人剂量计	1 个/人
16		治疗室门防夹人装置	具有防夹功能
17		治疗室门紧急开门按钮	紧急情况下从门外开门，设置在防护门外墙壁上 1 个
18		通风系统	设有通风系统，换气次数为 10 次/h

4.3.3.2 后装治疗机

（1）联锁系统

机房设置多重联锁装置，以保证人员和设备安全，防止意外事故。

1) 门机联锁

采用电动推拉防护门，与设备启动电路实行门机联锁方式，即防护门未关闭前，无法导出放射源进行治疗。治疗过程中意外开门时，系统将自动回收放射源至贮源器，终止治疗。

2) 施源器与源联锁

固定在患者身体的施源器与治疗源运动实行联锁，如果发生放射源导出故障（如施源管道堵塞）等情况时，设备会自动回源。

3) 安装发生停电或意外中断时自动和手动回源装置，当后装源无法自动返回贮源位置，采用手动回源方案。

（2）手动开门装置

在防护门外侧墙上安装 1 个紧急开门按钮，防护门内侧墙上安装 1 个手动开门装置，均带有明显标志。当遇到意外情况，可随时按动紧急开门按钮，打开防护门。

（3）急停按钮

分别在机房内墙面设置（4 个，含 2 个预留）、迷路内墙面设置（1 个）、控制室内桌面联锁控制盒自带（1 个）急停按钮，后装机设备上自带急停按钮（1 个），并带有醒目标识及文字显示，在紧急情况下，按下任一急停按钮均能够使放射源迅速返回贮源器，紧急情况处理完毕后，须复位后，后装机才能重新启动。

（4）电离辐射警告标志和工作状态指示灯

机房防护门外和贮源器表面设置电离辐射警告标志和中文警示说明。

机房防护门外安装工作状态指示灯（三色灯），不同颜色显示和后装机运行状态关联。

（5）视频监控对讲系统

治疗机房内和迷道均安装视频监控，安装点位确保能看到整个治疗机房和迷道的全景，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滞留。治疗室与控制室之间设有对讲设备，便于工作人员与患者之间进行交流。

（6）清场按钮

机房内墙面设置清场按钮 1 个，摆位完成后，确认机房内除患者外无其他人员逗留，按下清场按钮后离开治疗机房。

表 4-16 后装治疗机辐射安全及联锁设备数量

序号	名称	数量
1	门头 LED 警示屏	1 个
2	电移门限位开关	1 组
3	门口警示灯	1 个
4	进门/出门管理器	1 个
5	紧急开门按钮	1 个
6	门内开门按钮	1 个
7	声光报警装置	2 个
8	急停按钮	6 个（桌面联锁控制盒上自带一个急停）
9	语音对讲装置	1 个
10	清场按钮	1 个
11	摄像头	3 个

表 4-17 后装治疗机安全联锁设施情况表

序号	项目	内容	备注
1	控制台及安全联锁	防止非工作人员误操作的锁定开关	控制台钥匙控制
2		控制台有紧急停机按钮	控制台桌面联锁控制盒上 1 个
3		监控和对讲系统	监控：迷道 2 个、治疗室内 2 个 对讲系统：控制室和治疗室 1 套
4		治疗室门与束流联锁	门机联锁
5		治疗室内准备出束声音提示	声光报警装置：迷道 1 个、治疗室 1 个
6	警告标志	入口电离辐射警告标志	设置在防护门外
7		入口有加速器工作状态指示灯	三色灯 1 个，设置在防护门外
8		门头 LED 警示屏	设置在外防护门外，门上
9	治疗室	门内开门按钮	设置在防护门内侧墙壁上 1 个
10	紧急设施	治疗室内有紧急停机按钮	墙壁 4 个（已有 2 个、预留 2 个） 迷道 1 个

序号	项目	内容	备注
11	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
12		便携式辐射监测仪器仪表	与邻近的 3 号直加机房共用 1 台便携式 γ 剂量率仪
13		个人剂量报警仪	2 台
14		个人剂量计	1 个/人
15	其他	治疗室门防夹人装置	具有防夹功能
16		治疗室门紧急开门按钮	紧急情况下从门外开门，设置在防护门外墙壁上 1 个
17		通风系统	设有通风系统，换气次数为 10 次/h

备注：其他防护用品包括应急储源器 1 个、长柄镊子 1 个。

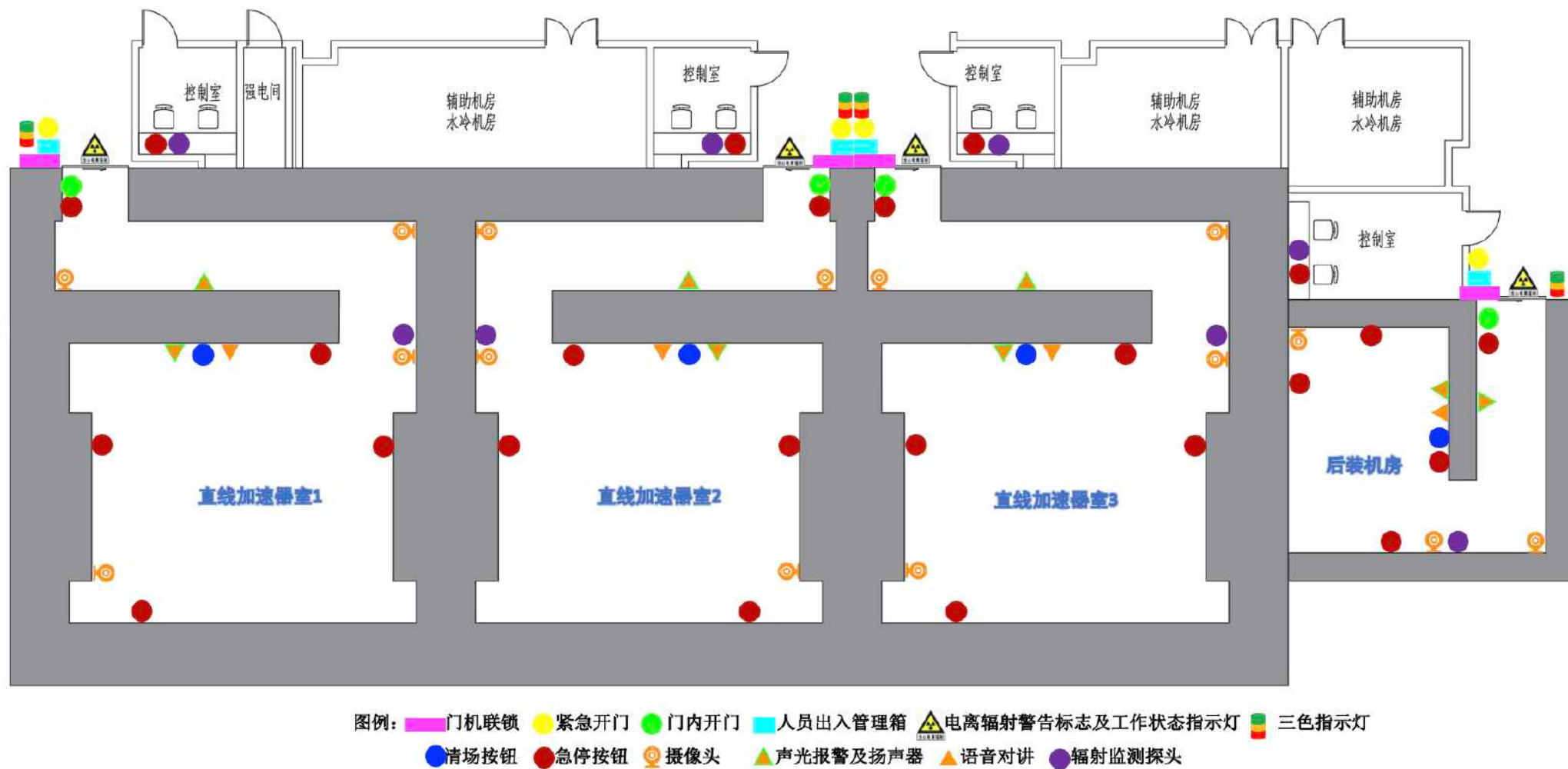


图 4-63 直线加速器、后装治疗机安全联锁设施点位图

4.3.4 后装机贮源器、卡源处理措施

贮源器是贮存后装治疗用放射源的容器，一般由外而内分别为不锈钢外壳、铅屏蔽层和钨合金屏蔽层（如图 4-64 所示），保证贮源器没有伽马射线泄漏的直接路径。贮源器包括供运输（或暂存）放射治疗源用的运输贮源器和供后装机配套用的工作贮源器，工作贮源器位于后装机机体中央。运输（或紧急/维修）贮源器用于放射源的运输、在放射源不能进入后装机的贮源器，或在维修后装机驱动机械部分时，临时存放放射源，运输贮源器由设备供货厂家提供并同放射源一起更换。

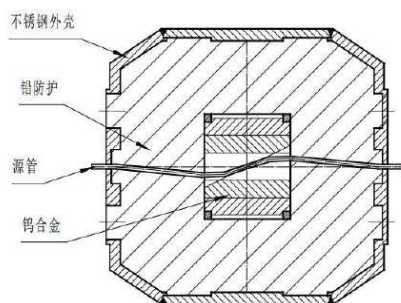


图 4-64 ^{192}Ir 放射源贮源器结构示意图

如遇卡源事故/事件，处理措施如下：

①后装机本身设计具有应急自动返回工作贮源器的功能。从而保证在实施治疗期间，当发生停电、卡源或意外中断照射时，放射源能自动返回工作贮源器。

②当自动回源装置功能失效时，辐射工作人员将第一时间通过手动回源措施进行应急处理，从而减少患者的误照射。

③在处理卡源的过程中，工作人员需携带个人剂量报警仪，需穿戴辐射防护用品。卡源事故处理期间，安全系统同时显示和记录已照射的时间和剂量，直到下一次照射开始，同时应发出声光报警信号。辐射工作人员进入机房内操作手动回源措施进行应急处理时，必须通过监测设施记录当时的辐射剂量率水平，记录处理时间和受照累积剂量。事故处理后及时总结并记录，包括事故发生的时间和地点、对任何可能受到照射的人员所做的辐射剂量估算结果、采取的纠正措施、事故的可能原因、为防止类似事件再次发生所采取的措施。

④及时向生态环境主管部门、卫生部门报告。

⑤必要时，迅速请求设备供应方技术支持，快速处理。

4.3.5 通风系统

每间直线加速器机房、后装机房的送排风均采用“上进下出、对角布置”的方式：送风口设置在机房顶部，排风口设置在机房底部，底部距离机房地面高度 30cm。机房进风口、排风口位置及管道走向见图 4-65、图 4-66。进风管道与排风管道穿墙方式均采用“L”型弯折，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、后装机房通风管道穿墙方式见图 4-67。直线加速器机房地沟穿墙方式见图 4-68。排风管道汇总到的排风井后引至示范中心大楼屋顶排放。通风换气次数大于等于 4 次/h。直加、后装机房通风设计参数见下表。

表 4-18 直加、后装机房通风设计参数

区域名称	送、排风方式 (空调、排风机)	区域体 积, m ³	新风量, m ³ /h	排风量, m ³ /h	换气次数, 次/h
直线加速器 1	机械送风, 机械排风	392	3600	4000	10
直线加速器 2	机械送风, 机械排风	392	3600	4000	10
直线加速器 2	机械送风, 机械排风	392	3600	4000	10
后装治疗机房	机械送风, 机械排风	176	1650	1800	10

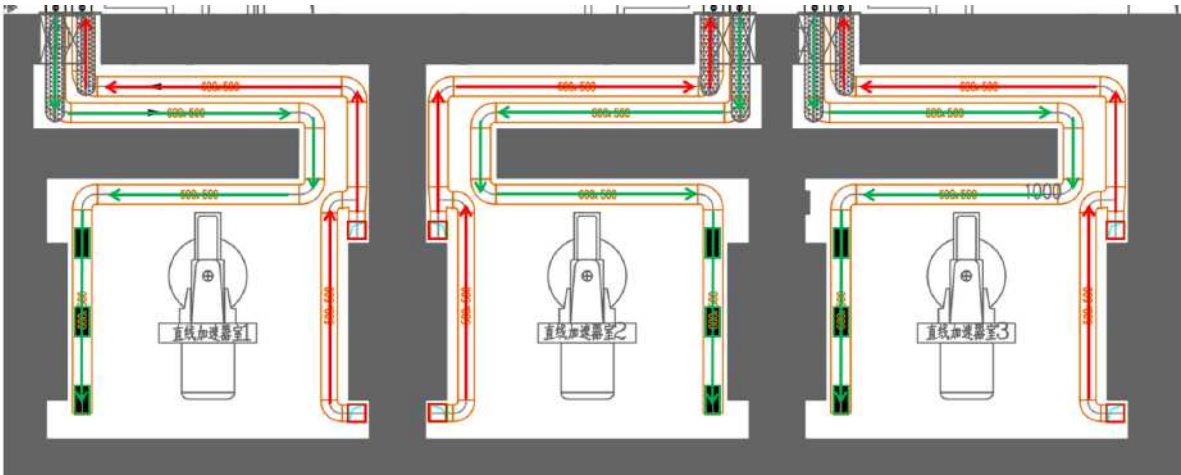


图 4-65 直加机房进风、排风位置及管道走向示意图

4.3.6 放射性三废

本项目电子直线加速器 X 射线最高能量为 6MV，不需要考虑感生放射性。

本项目后装治疗机使用 Ir-192 放射源，不产生放射性废气、放射性废水，可能产生废放射源，由厂家负责回收，医院不贮存。

4.4 大孔径 CT

4.4.1 场所布局与分区

大孔径 CT 辐射工作场所分区情况如下。

表 4-19 大孔径 CT 辐射工作场所分区表

区域	场所名称
控制区	大孔径 CT 机房 1、大孔径 CT 机房 2
监督区	操作间、储藏室、CT 设备间、治疗走廊、MR 机房、MR 设备间等

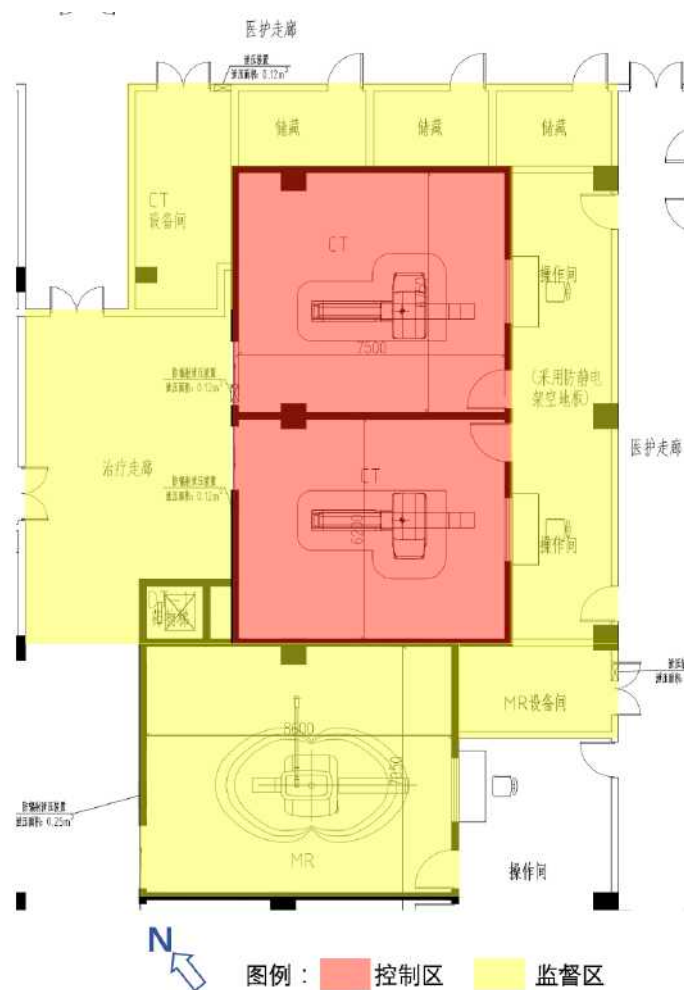


图 4-69 大孔径 CT 辐射工作场所分区图

4.4.2 辐射屏蔽

表 4-20 大孔径 CT 屏蔽尺寸参数表

房间	屏蔽体	规格	区域
大孔径 CT 机房 1、2	墙体	200mm 混凝土+2mmPb 硫酸钡水泥	地上二层 影像科
	顶板	200mm 混凝土+2mmPb 硫酸钡水泥	
	地板	200mm 混凝土+2mmPb 硫酸钡水泥	
	防护门 1	4mmPb	
	防护门 2	4mmPb	
	观察窗	4mmPb 铅玻璃 含防护窗框	

4.4.3 安全联锁及防护措施

常见大孔径 CT 的机房内机身上的操作面板以及控制室内描控制盒上自带急停按钮。

其他安全设施：显示“射线有害灯亮勿入”的工作状态指示灯、电离辐射警告标志、候诊区设置放射防护注意事项告知、防护平开门安装自动闭门装置、工作状态指示灯与机房门有效联动。

表 4-21 CT 防护用品清单

序号	防护用品名称	铅当量	数量	使用对象	使用场所
1	铅围裙	0.5mmPb	2	受检者	CT 机房 1、2
2	铅围脖	0.5mmPb	2	受检者	
3	铅帽	0.5mmPb	2	受检者	
4	铅衣	0.5mmPb	2	陪检者	

4.4.4 通风系统

正常或事故工况下均不产生放射性废气，空气中主要存在的危害因素为空气吸收 X 射线能量并通过电离作用产生的臭氧和氮氧化物。机房内设置动力排风装置保持良好通风。排风量为 803m³/h，每小时换气次数为 5 次。

4.5 放药制备及动物实验

4.5.1 场所布局与分区

放药制备及动物实验辐射工作场所主要包含回旋加速器机房及非密封放射性物质工作场所，辐射工作场所分区情况如下表所示，分区布局见图 4-70。

表 4-22 放药制备及动物实验辐射工作场所分区表

区域	场所名称
控制区	回旋加速器机房、热室房间、热室缓冲间、洁具间、消毒间、准备间、热室区废物间、洗衣整衣间、质控室、传递缓冲间、分装间、解剖室、测量室、动物实验室、放化实验室、清洗间、动物暂存间、小动物 PET-SPECT-CT 机房、小动物 PET-MR 机房、动物实验区废物间、衰变池等

监督区	回旋控制室、回旋前室、电气设备间、水冷设备间、一更、二更、检测间、淋浴间、风淋缓冲间、拆包间、扫描机房控制室、动物暂存间、医护走廊、消防兼安防控制室等
-----	---

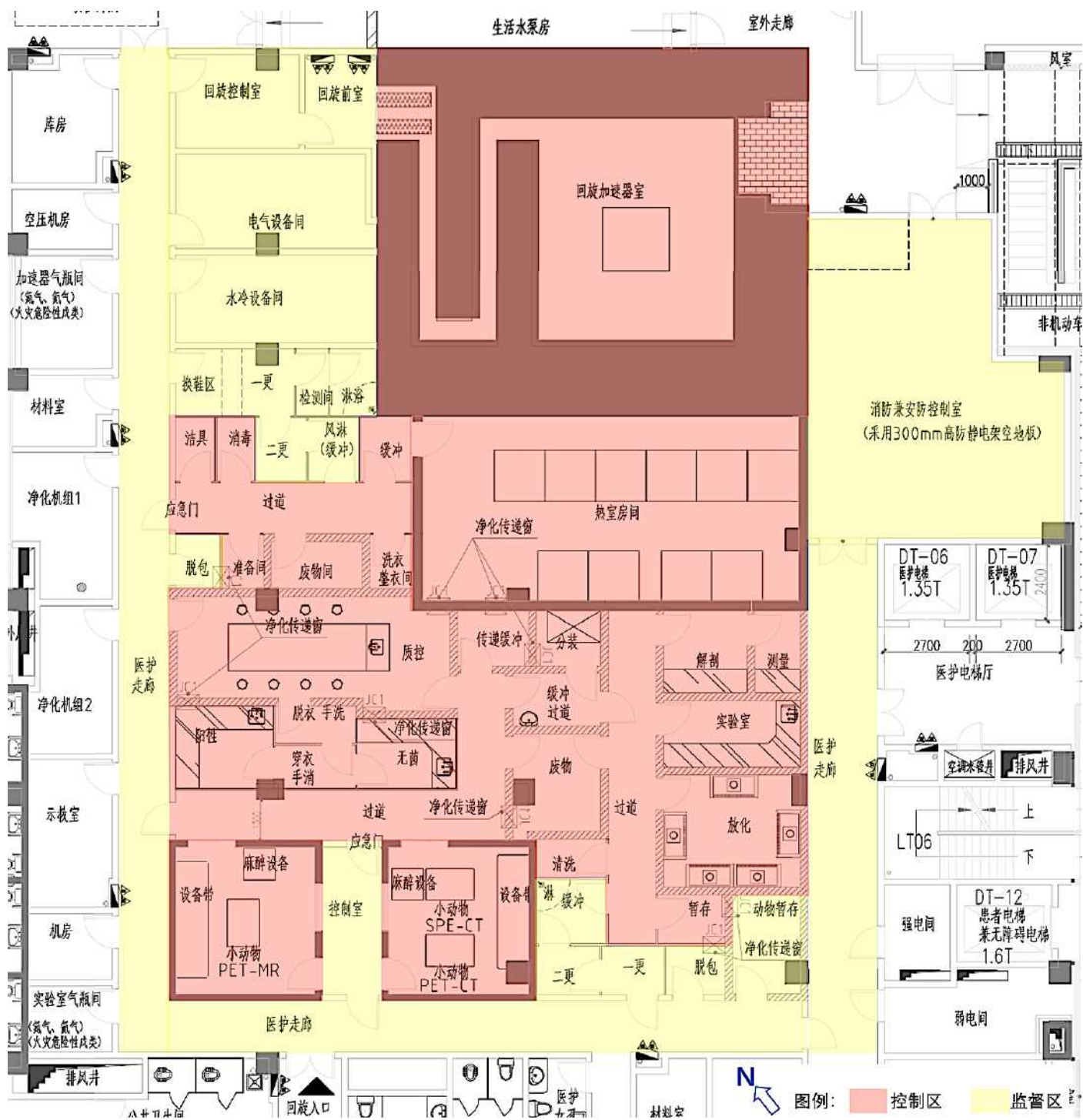


图 4-70 放药制备与动物实验辐射工作场所分区图

4.5.2 人流物流

放药制备及动物实验区的人流物流路线见图 4-71。图中，蓝色路线表示辐射工作人员，洋红色路线表示放射性药物，绿色路线表示动物，红色路线表示放射性固废废物。

(1) 辐射工作人员流线

1) 回旋控制室、扫描机房控制室人员路线：由回旋区入口刷门禁进入→经医护走廊进入相应的机房控制室进行操作→工作结束后原路退出。

2) 放药合成人员路线：由回旋区入口刷门禁进入→经医护走廊从西北侧的一更、二更经风淋缓冲进入控制区→在热室房间开展药物合成相关工作→完成工作后原路返回→在检测间进行表污监测→确认未经污染后，经一更原路退出场所，如发生污染，应立即在淋浴间针对沾污位置进行去污，直至达标，最后经一更原路退出场所。

3) 放药质检、分装人员路线：由回旋区入口刷门禁进入→经医护走廊从东南侧的一更、二更经缓冲间进入控制区→在质控室、分装间等区域开展相应工作→完成工作后原路返回→在缓冲间进行表污监测→确认未经污染后，经一更原路退出场所，如发生污染，应立即在淋浴间针对沾污位置进行去污，直至达标，最后经一更原路退出场所。

4) 动物实验人员路线：由回旋区入口刷门禁进入→经医护走廊从东南侧的一更、二更经过缓冲间进入控制区→在放化实验室、动物实验实等区域开展相应工作→完成工作后原路返回→在缓冲间进行表污监测→确认未经污染后，经一更原路退出场所，如发生污染，应立即在淋浴间针对沾污位置进行去污，直至达标，最后经一更原路退出场所。

(2) 药物路线

本项目拟制备 8 种放射性核素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 进行显像诊断，前 7 种核素由回旋加速器生产， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 计划由 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器淋洗自制或外购，均按照使用量进行定量制备。

1) 制备：回旋加速器打靶制备的放射性核素通过预装在靶线地沟内的专用管道系统，利用高压在氦气的推动下自动传输到热室的药物合成柜内。计划在热室某一手套箱内淋洗 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。

2) 质检：每批次药物均取一定量的样品，从热室传递窗转移至质控室进行质检。

3) 分装：质检合格后，剩余药物依次通过热室传递窗、传递缓冲传递窗进入分装室。

4) 送药：分装完毕后，用于动物实验的放射性药物经缓冲过道转移至动物实验室、放化实验室使用；用于核素诊断的放射性药物经缓冲过道、医护走廊，送入核素诊断区的储源室，以供 PET-CT、SPECT-CT 诊断使用。

(3) 实验动物路线

小动物外购暂养于动物暂存室。开展动物实验时，小动物由动物暂存室经传递窗送至动物实验室进行麻醉以及药物注射，之后送至小动物 PET-SPECT-CT 机房、小动物 PET-MR 机房、解剖室、测量室等处开展相应实验。需观察肿瘤抑制情况和生物反应情况的小动物暂养在控制区内的动物暂存间。

(4) 放射性固体废物路线

1) 热室房间放药合成产生的固废，经缓冲间移出，暂存于热室区废物间。

2) 放药质检、分装以及动物实验产生的固废，暂存于动物实验区废物间。

3) 动物实验完成后，将小动物尸体及组织作为放射性固废，按要求收集后暂存于动物实验区废物间的冰柜内。

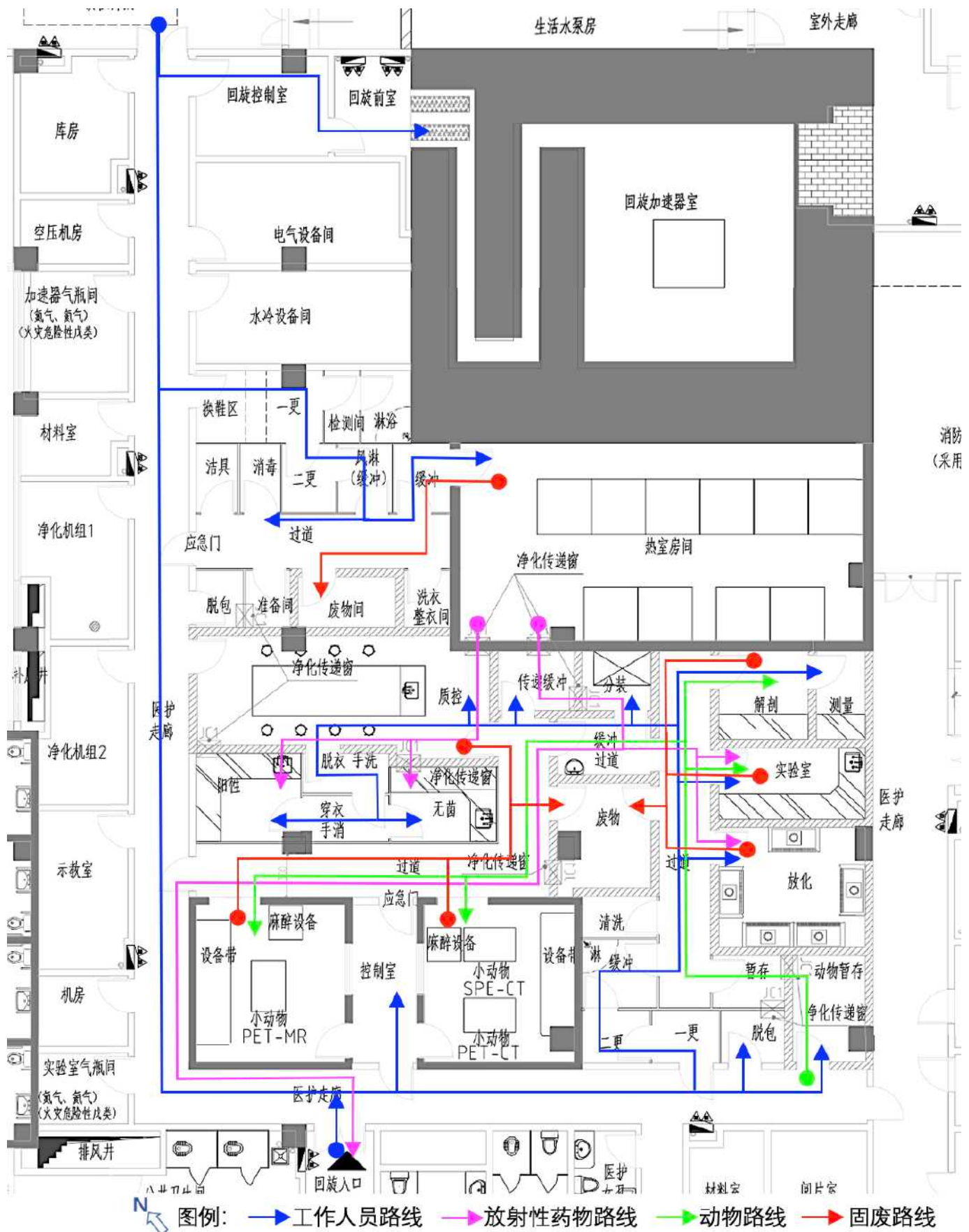


图 4-71 放药制备及动物实验人流物流路径示意图

4.5.3 辐射屏蔽及防护用品

放药制备及动物实验区辐射屏蔽尺寸见表 4-23，防护用品见表 4-24。

表 4-23 放药制备及动物实验区辐射屏蔽尺寸

房间	屏蔽体	规格
回旋加速器机房	南、北墙	2200mm 混凝土
	东墙	2300mm 混凝土
	西侧迷道内墙	1100mm+1100mm 混凝土
	西侧迷道外墙	1100mm 混凝土
	迷道长	迷路 1：7.2m；迷路 2：8.2m
	迷道宽	0.8m
	顶棚	2200mm 混凝土
	地板	2200mm 混凝土
	机房门	50mm 聚乙烯+5mm 铅
热室房间	东、西、南三面墙体	300mm 混凝土
	北侧与回旋机房共用墙	2200mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	10mmPb
	传递窗（2 个）	8mmPb 当量铅玻璃
西侧脱包间	传递窗	4mmPb 当量铅玻璃
热室区废物间	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	4mmPb
传递缓冲、分装间、缓冲过道	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门（4 个）	6mmPb
	传递窗	8mmPb 当量铅玻璃
质控室	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门（2 个）	6mmPb
	传递窗（2 个）	8mmPb 铅玻璃
动物实验区废物间	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门（2 个）	4mmPb
	传递窗	4mmPb 当量铅玻璃

房间	屏蔽体	规格
解剖测量室	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	4mmPb
动物实验室	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	4mmPb
放化实验室	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	4mmPb
小动物 PET-SPECT-CT 机房	墙体	200mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护电动门	4mmPb
	防护门	4mmPb
	观察窗	4mmPb
小动物 PET-MR 机房	墙体	200mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护电动门	4mmPb
	防护门	4mmPb
	观察窗	4mmPb
动物暂存间	墙体	240mm 实心砖墙
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	4mmPb
	传递窗	4mmPb 当量铅玻璃
东南侧脱包间	传递窗	4mmPb 当量铅玻璃

表 4-24 一层放药制备及动物实验防护用品配备清单

场所	防护措施和用品名称	数量	铅当量
热室	合成热室	9	80mmPb
	分装热室	1	80mmPb
	脚踏式废物衰变桶	1	10mmPb
	铅罐	若干	40mmPb
	防护推车	1	/
分装室	分装柜	1	40mmPb
质控室	通风柜（手套箱式）	1	20mmPb
	注射器防护套	若干	5mmPb
	脚踏式废物衰变桶	1 个	10mmPb

场所	防护措施和用品名称	数量	铅当量
实验室	通风柜（手套箱式）	1	20mmPb
	脚踏式废物衰变桶	1 个	10mmPb
放化实验室	通风柜（手套箱式）	1	20mmPb
	脚踏式废物衰变桶	1 个	10mmPb
解剖室	通风柜（手套箱式）	1	20mmPb
	脚踏式废物衰变桶	1 个	10mmPb
固废间	废物衰变桶	6 个	10mmPb
	固体衰变箱	2	10mmPb
小动物 PET-SPECT-CT 机房	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	各 1 件	0.5mmPb
	脚踏式废物衰变桶	1 个	10mmPb
PET-MR	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	各 1 件	0.5mmPb
	脚踏式废物衰变桶	1 个	10mmPb
动物暂存	饲养铅盒	若干	5mmPb
	铅冰箱	1	10mmPb
更衣室	一次性防水手套、安全眼镜、防水工作服、胶鞋等	若干	/
缓冲间	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、去污剂和/或喷雾（至少为加入清洗洗涤剂 and 硫代硫酸钠的水）；小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔（水溶性油墨）、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签	若干	/
淋浴间	去污工具组	1 套	/

4.5.4 人身安全联锁系统

4.5.4.1 系统组成

安全联锁系统是加速器运行的安全防护的核心，旨在保护工作人员免受辐射伤害。其控制系统确保加速器运行时，任何可能引发事故的行为都会触发联锁信号。系统由 PLC 安全联锁控制箱、桌面联锁控制盒、视频监控、安全联锁部件以及网络通信模块组成，形成自动化监测与控制的集散系统。系统结构示意图见下图。

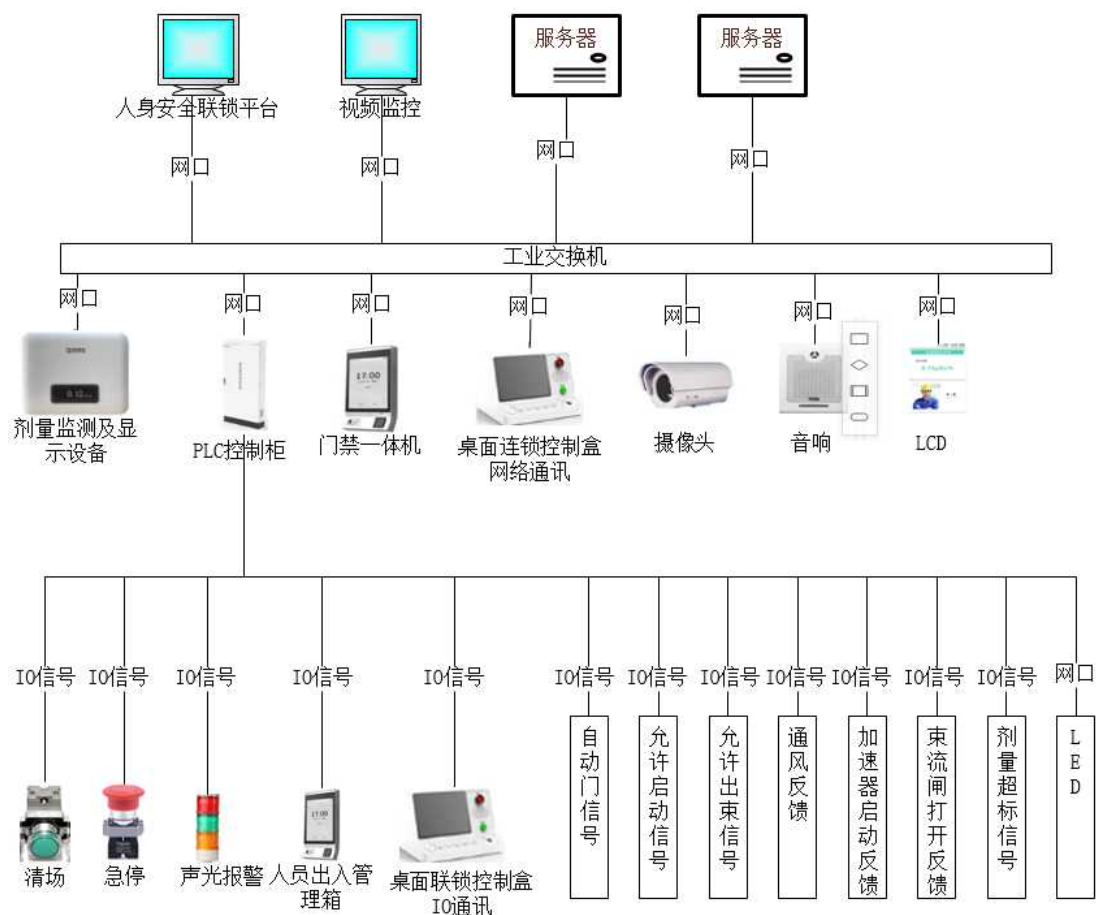


图 4-72 医用回旋加速器系统框架图

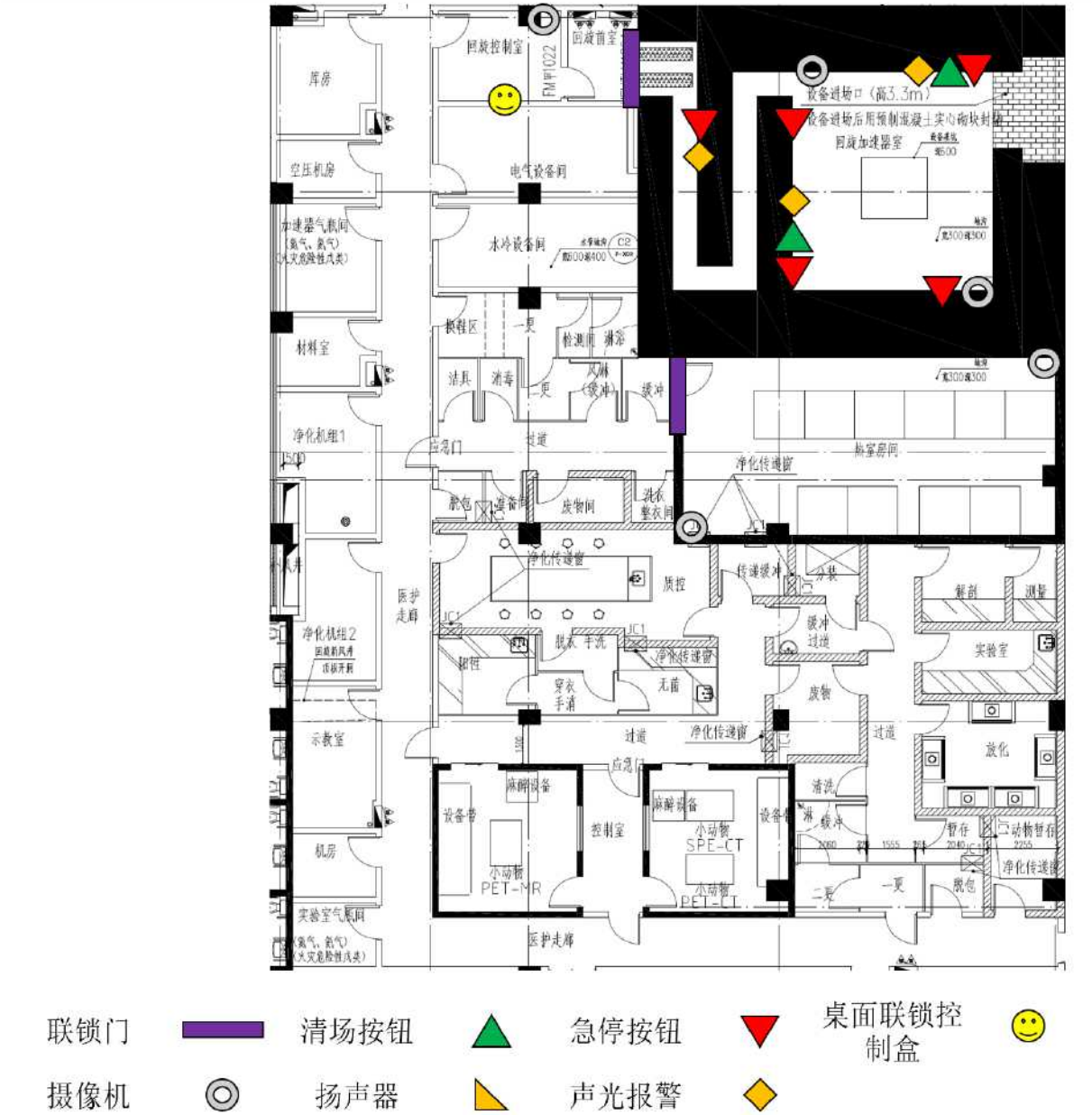
4.5.4.2 安全联锁系统设备点位

医用回旋加速器涉及的设备清单以及安装位置如下表所示。

表 4-25 医用回旋加速器人身和设备安全联锁系统设备清单

序号	系统名称	子系统名称	数量	单位	使用位置
1	回旋加速器安全联锁	安全联锁控制箱	1	套	控制室
2		加速器桌面安全联锁控制盒	1	套	控制室
3		急停按钮	2	套	回旋加速器室内
4		清场按钮	5	套	回旋加速器室内
5		报警灯	2	套	回旋加速器室内
6		语音提示器	1	套	回旋加速器室内
7		人员出入管理箱	1	个	回旋加速器室
8		人脸识别终端	1	套	回旋加速器室和热室各一个
9		门内开门按钮	1	个	回旋加速器室内
10		电移门限位开关	1	个	回旋加速器室内

序号	系统名称	子系统名称	数量	单位	使用位置
11		摄像机	6	个	回旋加速器室内 3 个，控制室 1 个，热室 2 个
12		门头 LED 警示屏	1	个	屏蔽门上方
13		工作站电脑	3	套	回旋加速器控制室



*联锁门均配有：门口警示灯、LCD 信息显示屏、门头 LED 警示屏、人员出入管理设备、紧急开门按钮、门内开门按钮

图 4-73 医用回旋加速器安全联锁设备点位图

4.5.4.3 安全联锁设备原理及功能

本项目回旋加速器系统辐射安全联锁系统包含的主要联锁设备有联锁门（门机联锁）、声光报警装置、状态指示灯、LCD 信息展示屏、清场搜索（巡检）按钮、急停按钮、剂量联锁、桌面联锁控制盒、人员出入管理箱、紧急开门开关和智能化系统，各功能如下：

a) 安全联锁控制箱

安全联锁控制箱由 PLC 及相关电气元件组成，是安全联锁的核心，采集现场端所有安全联锁信号，并进行数据处理，控制门的开关并输出联锁信号给加速器。从而保证工作人员的人身安全。

加速器机房防护门与加速器联锁，当防护门未关闭到位时，加速器无法开启高压出束；当加速器工作过程中误操作打开防护门时，加速器立即停止出束。

b) 桌面安全联锁控制盒

桌面安全联锁控制盒，集成急停按钮、钥匙开关、急停按钮。

桌面联锁控制盒集成钥匙开关，同加速器进行联锁。只有将钥匙开关拨至闭合位置后，加速器才能出束；钥匙开关不在闭合位置，加速器不能出束。加速器开机前，启动通风。满足通风时间后运行人员利用供束钥匙关闭供束开关，在厅内剂量安全情况下，打开防护门，进行厅内巡检、之后关门。供束钥匙回到控制台，打开供束开关。在所有急停按钮未被按下情况下，方可进行开机。

桌面安全联锁控制盒设有急停按钮，当遇到紧急情况下，按下急停按钮。加速器停止供束。

桌面安全联锁控制盒配有人脸识别系统，需要授权才可以操作，防止非工作人员误操作。

c) 门头 LED 警示屏和警示标识

加速器机房防护门上方部署门头 LED 警示屏，显示“正在出束”、“停止供束”等，用于提示加速器机房的运行状态。防护门外醒目位置设置电离辐射警告标志和中文警示说明。

d) 紧急开门装置

加速器机房内外各设置 1 个紧急开门装置，紧急开门装置直接与防护门联锁，用于紧急情况下打开防护门。当防护门打开时，同时加速器停止出束。

e) 清场、急停按钮、报警灯

加速器机房四面墙体设有清场、急停按钮。在加速器计划供束时，报警灯闪烁，工作人员进入加速器机房执行清场工作，避免加速器启动束流时有人员滞留。从最里面一个清场按钮开始，执行完所有清场工作，确认无人后关闭防护门，在控制室桌面联锁控制盒找开钥匙开关，具备出束状态。所有清场工作需要在指定时间内完成，超过设定时间需要重新清场。

急停按钮用于紧急情况下停止加速器供束，加速器出束前需要保证所有急停按钮复位。在清场完成或是加速器出束过程中有急停操作，加速器停止供束，需要人工现场复位急停按钮。如果需要再供束，需重新执行清场工作。

f) 语音提示器

加速器大厅配有语音提示器，当执行清场操作时，进行语音播报，提醒人员及时离开。

g) 伽马中子剂量监测

加速器控制室和机房防护门内配置固定式伽马和中子剂量监测探测器，显示主机部署在控制室。显示主机具有显示和声光报警功能，当剂量率超过设置值时，进行声光提醒，同时主机输出联锁信号给安全联锁系统。当剂量高于设定阈值时，屏蔽门禁止打开，只有当剂量率降低到设置的值后，方可打开屏蔽门进入机房。

本项目回旋加速器剂量监测设施点位布置见下图。

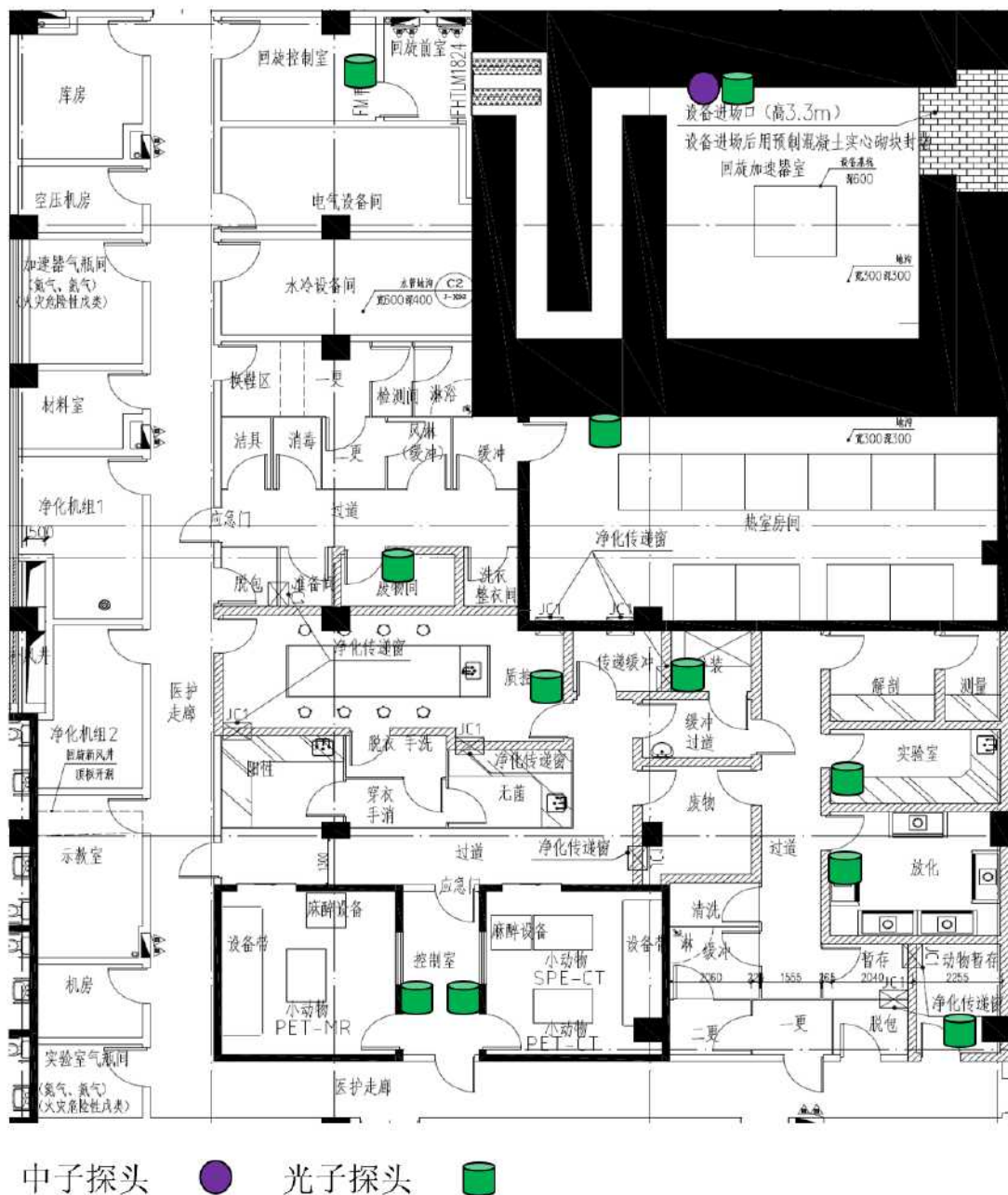


图 4-74 回旋加速器剂量监测设施位置示意图

- h) 视频监控：控制室、机房内以及热室房间安装视频监控系统，监控大屏位于控制室，便于工作人员观察加速器大厅的实时情况。
- i) 热室房间设置门禁系统，具有权限人员才可进入。

4.5.4.4 安全联锁逻辑

工作人员进出控制区域都需要申请分配相应的权限，得到授权后，工作人员在流程操作正常的情况下方可进入工作场所，超出授权期后将无法进入工作场所。

系统在正常工作前必须经过复位和自检两个过程。复位是初始化系统各个设备的工作状态，使其进入初始状态；自检是对各个设备的工作性能进行检查，确保系统的正常运行。

在复位和自检工作完成后，工作人员在符合人员进入的前提进入回旋加速器室，在回旋加速器室按下最里侧的清场按钮，声光报警灯发出声光信号，喇叭发出清场提示表示系统即将进入清场状态，提醒所有工作人员撤离该区域，工作人员确保无关人员停留后依次按下区域内其余所有清场按钮，完成回旋加速器室的清场后，离开回旋加速器室，并确保屏蔽门已关闭。然后回到控制室的桌面联锁控制盒上进行人脸识别，并按下启动按钮，则准许回旋加速器启动、离子源启动、束流闸打开。

a) 回旋加速器室控制逻辑

回旋加速器室的加速器、离子源束流闸只有在清场生效、系统无急停、通道门全部处于关闭状态时，桌面联锁控制盒人脸识别正确，桌面联锁控制盒按下才准回旋加速器室内的加速器启动和离子源及束流闸开启。在回旋加速器运行过程中，任意 1 路出现断路，加速器运行立即停止同时离子源及束流闸关闭。其控制逻辑与清场示意图如图下所示：

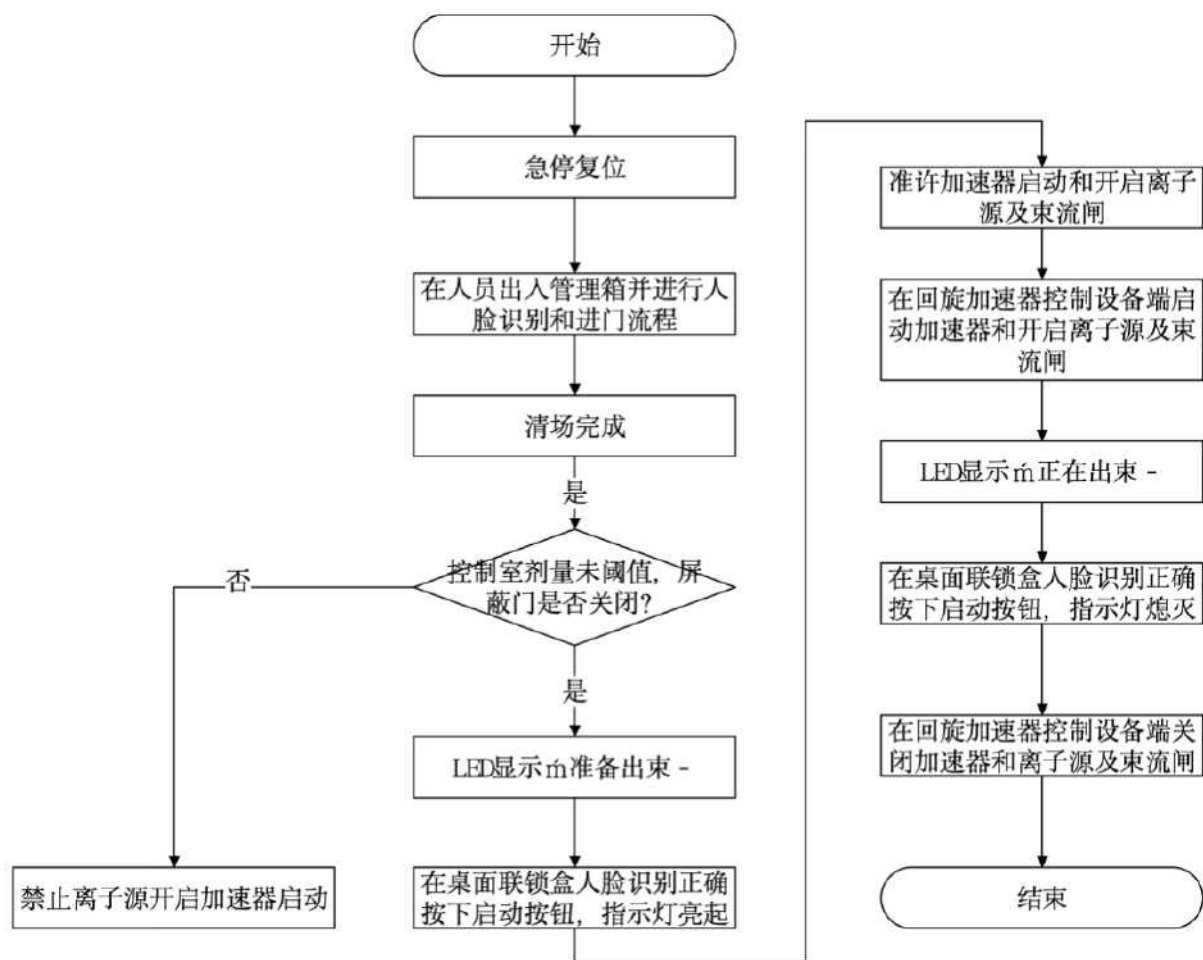
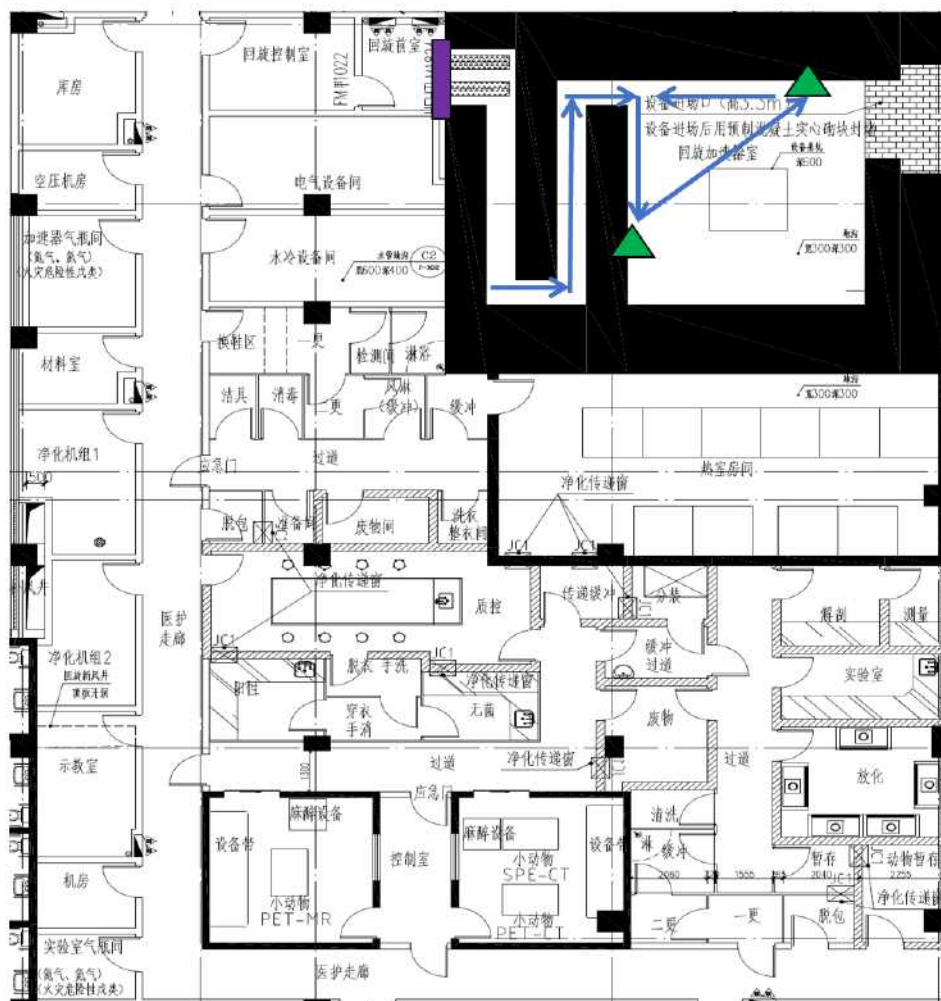


图 4-75 回旋加速器启动逻辑



联锁门 清场按钮 ▲

图 4-76 回旋加速器清场搜索巡检路线示意图

b) 回旋加速器室人员进入控制逻辑

回旋加速器室准许人员进入的条件：加速器停机、离子源关闭、束流切断设备关闭、清洁通风完成、人员授权验证通过、剂量率低于阈值、桌面联锁控制盒钥匙按钮指示灯熄灭、人员出入管理箱操作正常或者紧急开门按钮按下。具体逻辑如下图所示。

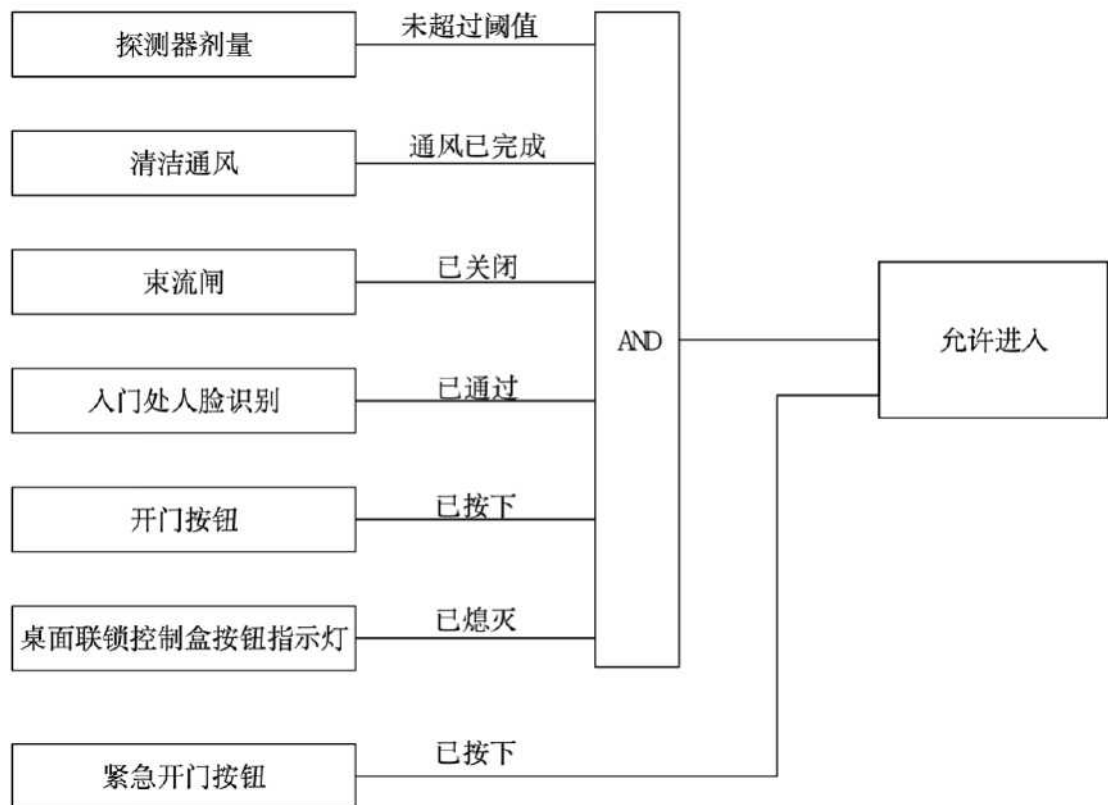


图 4-77 回旋加速器室人员进入逻辑

c) 热室人员进入控制逻辑

在热室屏蔽门处进行人脸识别正确，且剂量未超阈值人员或者紧急开门按钮按下。具体逻辑如下图所示。



图 4-78 热室人员进入逻辑

4.5.4.5 其它辐射安全与防护措施

(1) 热室门禁：用于判断人员是否有权限进入热室，只有具有权限的人员才可进入。

(2) 小动物的 PET-MR、PET-SPECT-CT 的屏蔽门处有对应的指示灯，当启动 PET-MR、PET-SPECT-CT 的时候会在对应的屏蔽门处进行指示。

(3) PET-SPECT-CT 机房屏蔽门处有对应的指示灯，当启动 PET-SPECT-CT 的时候会在对应的屏蔽门处进行指示。

4.5.5 场所辐射监测系统

本项目回旋加速器辐射工作场所监测设置情况如下。

a) 因为回旋加速器运行过程中会产生伽马射线和中子，所以加速器控制室、加速器大厅内需配备高灵敏伽马探测器和中子探测器。控制室内安装于靠近加速器侧，加速器大厅安装于迷道口。监测主机安装于控制室操作台旁边，便于工作人员查看。辐射监测设备与安全联锁系统联动，保障人员安全。

b) 热室房间、固废间、放化实验室等高活房间安装固定式辐射报警设备，用于场所剂量监测。

c) 操作非密封源场所需配备表面污染监测设备，用于操作台、地面、个人防护用品等表面污染监测。

d) 加速器控制室、热室房间需配备便携式剂量率仪，用于加速器机房以及热室等高放射性场所漏射线检测以及防护检测。

e) 放射性药物制备退更室需配备手脚表面污染监测设备，用于医护人员制药退更时手部、脚部以及全身污染监测，手脚表面污染监测仪能够有效地检测和记录医护人员在制药和退更过程中手部和脚部是否受到放射性污染。

f) 职业人员需佩戴个人剂量仪报警仪，用于个人剂量累积监测，实时剂量报警。

g) 核医学科需配备一定数量的应急监测设备和防护设备，用于特殊应急情况下使用。

h) 辐射安全管理部门需配备便携式剂量率仪、便携中子以及表面污染监测设备，用于安全管理监测。

1) 设备清单如下。

表 4-26 放药制备及动物实验监测设备清单

序号	产品名称	数量	单位	使用场所及位置
回旋加速器区域				
1	电离室 γ 剂量监测仪	1	台	加速器大厅
2	区域中子剂量监测仪	1	台	加速器大厅
3	区域辐射监测仪（主机）	1	台	加速器控制室
4	闪烁体 γ 剂量监测仪	6	台	加速器控制室、放化实验室、合成热室、固废间、质控室、分装室
5	手脚表面污染监测仪	2	台	卫生通过间一更位置
6	表面污染监测仪	2	台	放化实验室、合成热室
7	便携式 X/ γ 剂量率仪	3	台	回旋加速器室、放化实验室、合成热室、区域巡检
8	便携式中子剂量率仪	1	台	回旋加速器控制室，用于区域巡检
9	个人剂量报警仪	若干	台	职业人员防护
小动物实验区				
10	闪烁体 γ 剂量监测仪	4	台	PET-SPECT-CT 机房、PET-MR 机房、实验室、动物暂存间
11	表面污染监测仪	2	台	PET-SPECT-CT 机房、PET-MR 机房、实验室、区域巡检
12	便携式 X/ γ 剂量率仪	2	台	PET-SPECT-CT 机房、PET-MR 机房、实验室、场所巡检
13	个人剂量报警仪	若干	台	职业人员防护

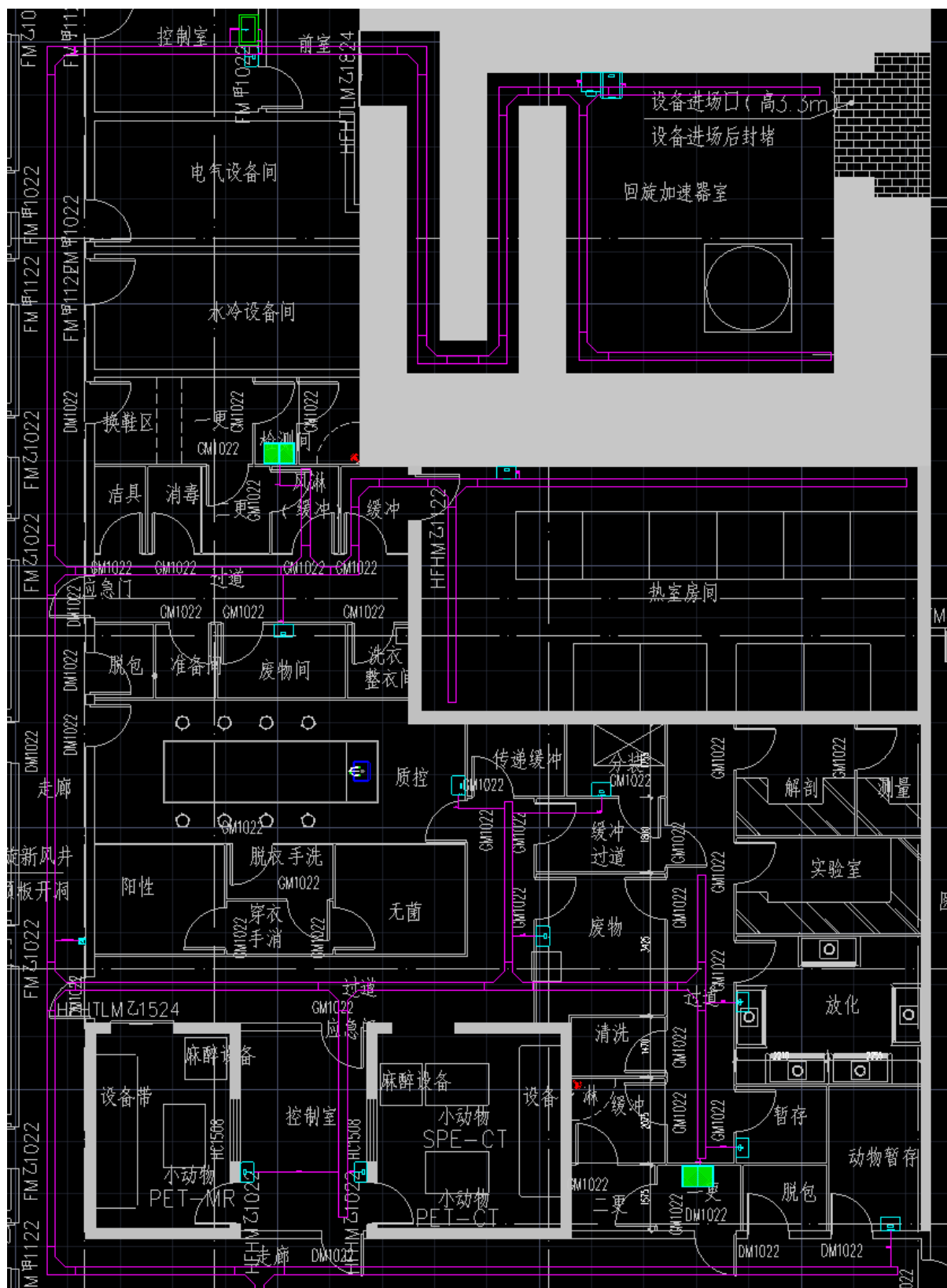


图 4-79 放药制备及动物实验辐射监测点位图

4.5.6 放射性三废

4.5.6.1 放射性废气

4.5.6.1.1 放射性废气来源

放药制备及动物实验区的放射性废气主要包括回旋加速器机房可能产生的活化空气，以及操作非密封放射性物质可能产生的放射性废气。

4.5.6.1.2 通风系统处理措施

本项目放药制备及动物实验辐射工作场所设置有独立的通风系统，各排风管道负责区域见表 4-27。

回旋加速器机房送、排风口上进下出、对角设置，管路走向见图 4-80，换气次数 10 次/小时，符合《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）的相关要求。

非密封放射性物质工作场所排风管道走向根据不同场所活性进行设计，布局见图 4-81，排风管道走向满足自低浓度到高浓度流向要求，通风系统设计风量保证各功能房间为负压状态，并在各功能房间设置止回阀防止放射性气体回流交叉污染，放药制备区热室内的合成分装柜、动物实验区通风橱、分装室分装柜分别设置单独的排风管道，且通风速度不小于 0.5m/s，在热室内的合成分装柜、分装注射室的分装柜顶部安装活性炭过滤装置，放射性废气均经过活性炭处理后高于建筑屋顶排放，符合《核医学辐射防护与安全要求》（H1188-2021）、《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）的相关要求。

表 4-27 本项目一层放药制备及动物实验区辐射工作场所排风管路及负责区域设计

序号	排风管路名称	负责排风区域
1	加速器室排风	回旋加速器室（换气次数 10 次/小时）
2	热室排风	热室房间、热室合成分装柜
3	洁净区排风	测量室、解剖室、实验室、放化实验室、暂存间、清洗室、分装室、质控室、固废间、脱包间、准备间、废物间、洗衣整衣间、缓冲间、洁具间、消毒间、过道等

序号	排风管路名称	负责排风区域
4	非洁净排风	一更、二更、淋浴间、检测间、传递缓冲间、缓冲过道、缓冲间、脱包间等
5	动物暂存排风	动物暂存间
6	扫描机房排风	小动物 PET-SPECT-CT 机房、小动物 PET-MR 机房、控制室

表 4-28 放药制备及动物实验区过滤器组合效率情况表

区域	系统类型	过滤器组合	总过滤效率	主要过滤目标	核心颗粒物穿透率
动物实验室	送风	G4+F8+H11	≥99.925%	≥0.5μm 颗粒（花粉、细菌）	5×10 ⁻⁵ (0.005%)
	排风	F5	50%	≥1μm 颗粒（灰尘、纤维）	50%
热室	新风	G4+F8+H12	≥99.9925%	≥0.5μm 颗粒（超细粉尘、气溶胶）	1×10 ⁻⁵ (0.001%)
	排风	G4+H12+活性炭	≥99.991%	≥0.5μm 颗粒+气态污染物	1×10 ⁻⁴ (0.01%)
回旋加速器	新风	G4+F8+H12	≥99.9925%	≥0.5μm 颗粒（超细粉尘、气溶胶）	1×10 ⁻⁵ (0.001%)
	排风	G4+H12+活性炭	≥99.991%	≥0.5μm 颗粒+气态污染物	1×10 ⁻⁴ (0.01%)

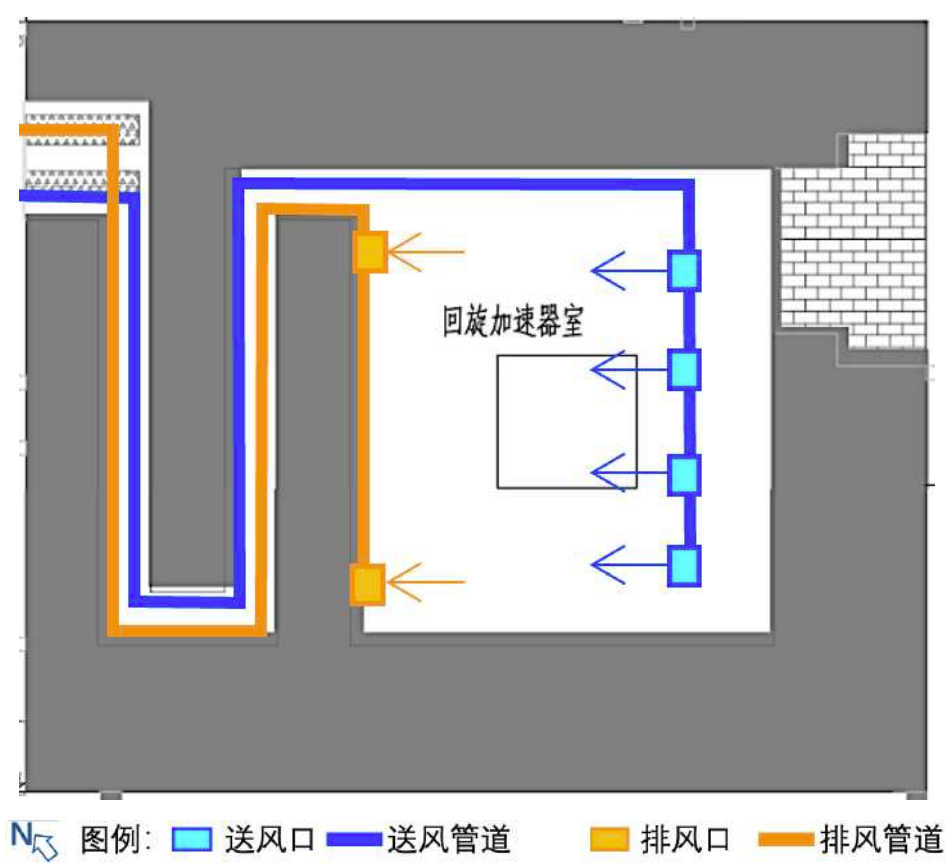


图 4-80 放药制备回旋加速器机房通风管道走向示意图

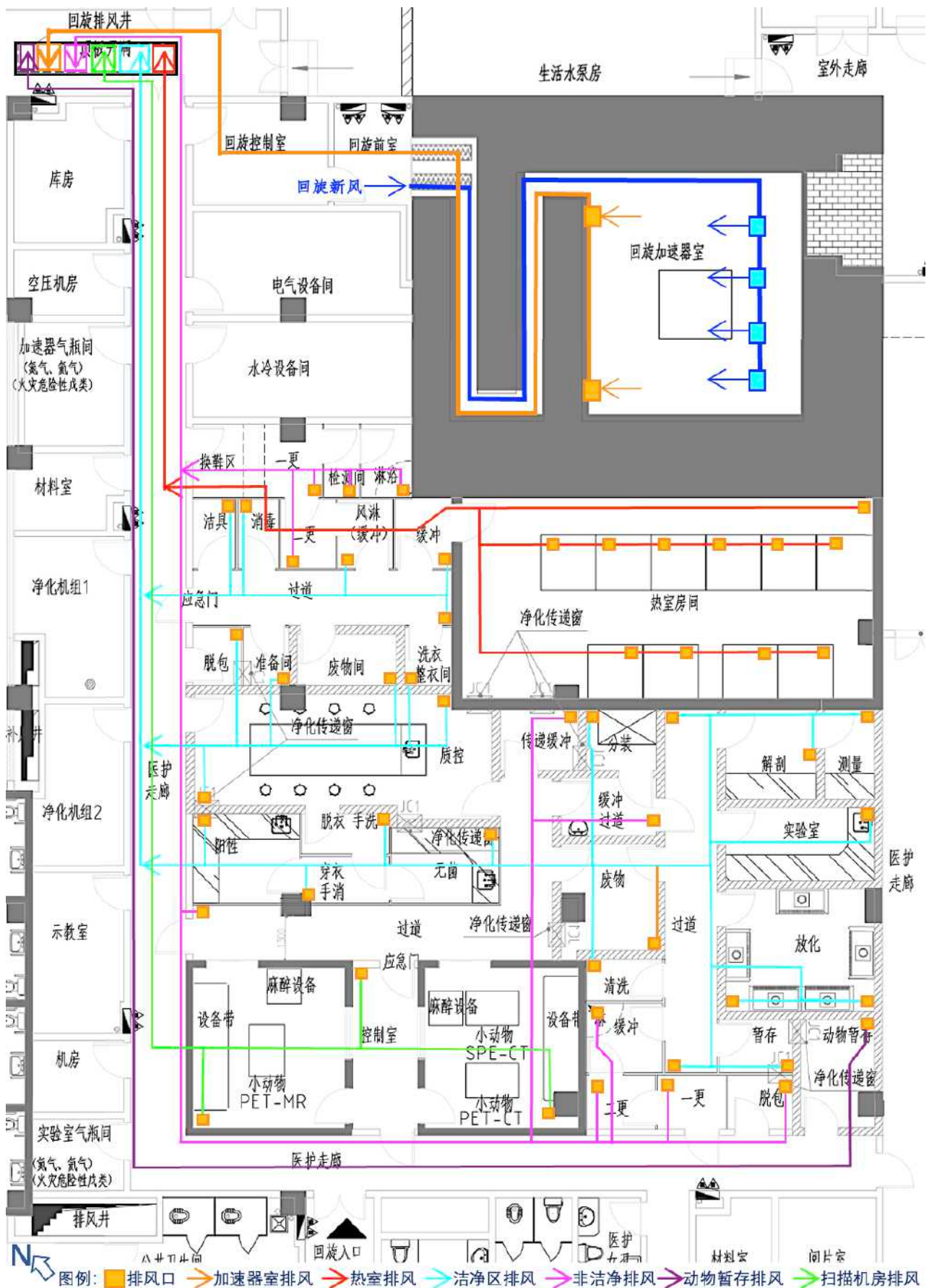


图 4-81 放药制备及动物实验区排风管道走向示意图

4.5.6.2 放射性废液

本项目放药制备及动物实验区与核素诊断区共用一套衰变池，该衰变池位于地下一层，放射性废液处理措施可行性分析如下。

4.5.6.2.1 放射性废液来源

1) 放药制备放射性废液产生量

放药制备场所产生废液量为制备药物产生微量废水、核素管道清洗废水、工作人员清洗淋浴废水以及应急洗消废水，平均每天产生的废水量约 100L/d。

2) 动物实验放射性废液产生量

动物实验动物产生的尿液一般被垫料吸附，作为固体废物处置。注射药物后的动物尿液等排泄物较少，主要为辐射工作人员清洗去污和工作场所清洗去污的放射性废水，放射性废水日产生量约 150L/d。

3) 核素诊断区放射性废液产生量

- a. 诊断患者产生的废水量：每天诊断患者 30 名，诊断患者用水定额取 5L/人，每次患者用水两次，诊断患者用水量： $30 \times 5 \times 2 = 300\text{L}$ ，诊断患者每天共产生废水量 300L；
- b. 辐射工作人员清洗去污：每天清洗废水量辐射工作人员清洗去污按 50L/d；
- c. 工作场所清洗去污废水量：工作场所清洗去污按 $0.1\text{L}(\text{m}^2 \cdot \text{次})$ 计算，诊断区面积约为 60m^2 ，每天清洗一次，每天废水产生量为：60L；
- d. 应急洗消废水量：按平均每天产生 20L 废水考虑。

则核素诊断区日产生废水量为： $300\text{L} + 50\text{L} + 60\text{L} + 20\text{L} = 430\text{L}$ 。

综上，放药制备及动物实验区与核素诊断区每天共产生废水量为 0.68m^3 。

4.5.6.2.2 放射性废液处理措施

1) 衰变池容积及运行模式

衰变池前端设置沉淀池，衰变池由三个相对独立的衰变池水箱并联组成，分别为 1 #、2 #和 3 #，衰变池为不锈钢材质，耐酸耐腐蚀、无渗透性且内部光滑，每个衰变池

水箱有效容积为 30.625 m^3 ($3.5\text{m}\times 3.5\text{m}\times 2.5\text{m}$)，总有效容量为 91.875m^3 。每个衰变池设置检修口。正常工作时，废液先排进 1#衰变池，当 1#衰变池液面达到设定液位时，关闭该池进水阀，开启 2#衰变池的进水阀，废液进入 2#衰变池，当 2#衰变池液面达到设定液位时，关闭该池进水阀，开启 3#衰变池的进水阀，废液进入 3#衰变池，当 3#衰变池续满废液前，对 1#衰变池的放射性废液进行监测，达到排放标准后排出。以此类推，3 个衰变池循环注水，在一个池子注满封闭开始，直到这个池排空，共经历注满另外 2 个衰变池水箱的时间，从而确保了放射性废液能在衰变池中充分的停留衰变。

2) 废液处理可行性分析

每个衰变池水箱的有效容积为 30.625 m^3 ，则注满单个衰变池水箱的时间为 $30.625/0.68\approx 45$ 天，注满两个衰变池水箱的时间约为 90 天。放药制备及动物实验区与核素诊断区使用的核素中，半衰期最长的为 Lu-177，约 6.73 天，存满 10 个半衰期需要约 68 天（小于注满两个衰变池水箱所需的时间 90 天）。由上述计算结果可知，衰变池容积满足废液暂存需求。

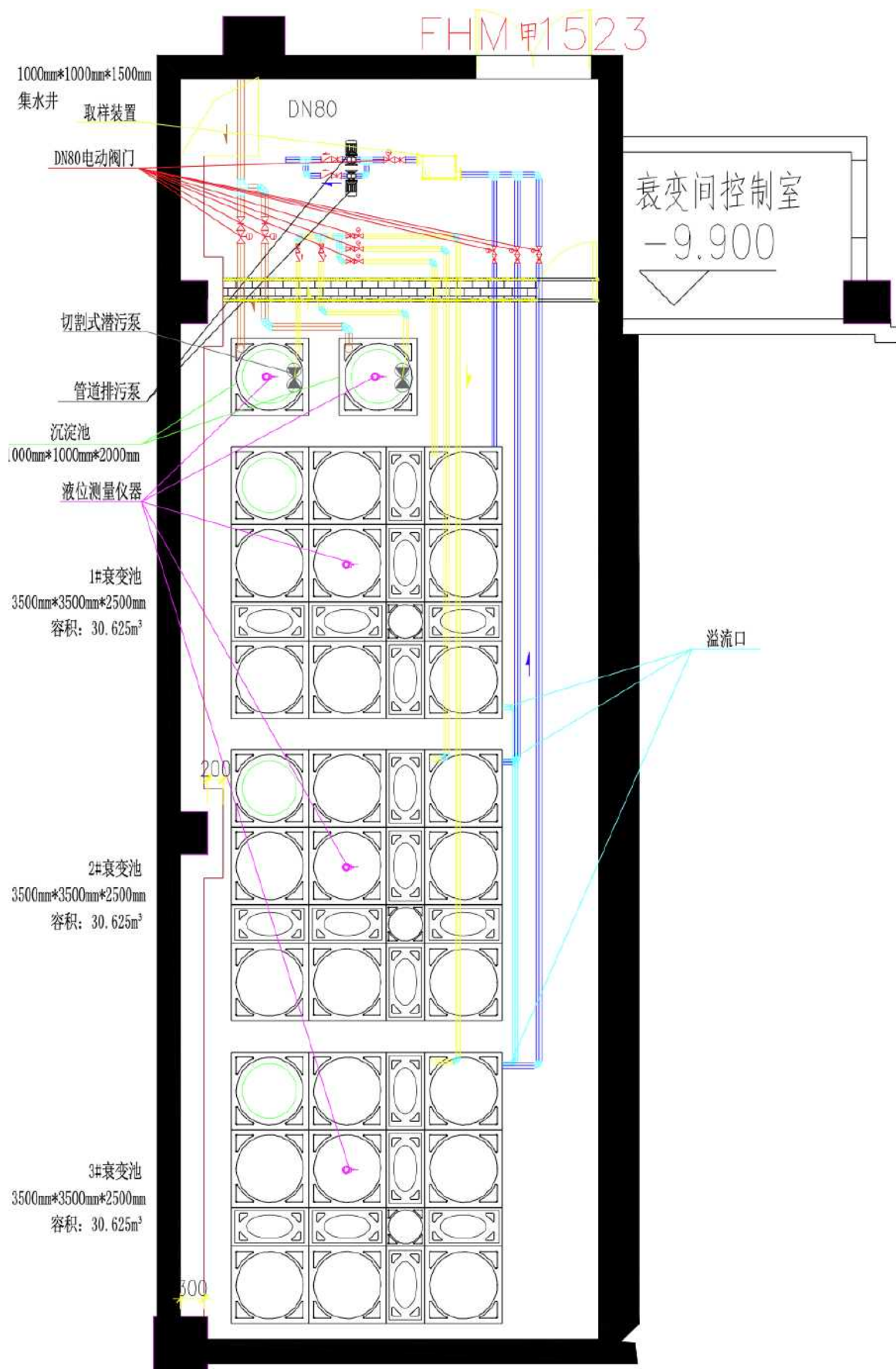


图 4-82 放药制备及动物实验区与核素诊断区共用的衰变池设计方案

4.5.6.3 放射性固废

4.5.6.3.1 放射性固废来源

放药制备及动物实验区辐射工作场所运行过程中产生的放射性固体废物主要包括：

- a) 回旋加速器维修置换的废靶膜、各区域排风系统更换的废旧活性炭：回旋加速器用质子轰击靶膜等物体时，会产生感生放射性，废靶膜产生量为 7 个/a。
- b) 放射性药物合成、分装、质检过程中产生的生产耗材：合成、分装、质检过程中产生的生产耗材，产生量为 10kg/a。
- c) 废旧的发生器和药物淋洗、分装、质检过程中产生的耗材：沾有放射性药物的吸水纸和酒精棉球、工作人员操作时佩戴的一次性手套以及质控过程产生少量沾污放射性核素的滤膜、废试纸、针筒、针头、试管、手套等，产生量为 10kg/a；淋洗后衰变到无使用价值的发生器（50 个/a）。
- d) 动物实验过程中产生的实验耗材及动物尸体、组织和样品切片：小动物实验过程中产生的废注射器（30kg/a）、废垫料（110kg/a）、一次性实验耗材（包括手套、口罩、吸水纸等，60kg/a）及动物尸体、组织和样品切片（300kg/a），装入铅废物桶，送固废间暂存，总产生量为 500kg/a。
- e) 通风系统过滤装置更换产生的废旧活性炭，装入铅废物桶，送放射性废物间暂存；产生量为 200kg/a。

4.5.6.3.2 放射性固废处置方案

放药制备及动物实验区辐射工作场所运行过程中产生的放射性固体废物处置方案如下：

- a) 回旋加速器维修置换的废靶膜、各区域排风系统更换的废旧活性炭：对于回旋加速器维修更换下来的废靶膜和各区域通风系统过滤装置更换产生的废旧活性炭，分类收集后贮存于放射性废物间内专设的铅废物桶中自然衰变，最终送有资质单位处置。

- b) 放射性药物合成、分装和药物淋洗、分装及各核素质检过程中产生的耗材：全部作为放射性固体废物装入铅废物桶，送放射性废物间暂存，暂存时间满足要求，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 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对废物清洁解控，均当做非放射性废物委托有资质单位进行处理。对于废发生器，暂存于放射性固废间内，定期由生产厂家统一回收。
- c) 小动物实验过程中产生的固体废物：小动物实验过程中产生的实验耗材分类收集装入铅废物桶中，动物尸体、组织和样品切片分类收集转移至固废间内的冰箱中，铅冰箱外围 10mm 铅当量；一次性注射器、西林瓶、一次性手套等分类收集装入铅废物桶中。送固废间暂存的固体废物中，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，所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 10 倍最长半衰期，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 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对废物清洁解控，送有资质单位处理。

表 4-29 放药制备及动物实验区辐射工作场所放射性固废产生及处理方式

固废来源/名称	产生量	暂存或处理方式
回旋加速器更换的废靶膜	7 个/a	先将放射性固体废物收集到专用铅桶内，定期将铅桶中的放射性废物转移至放射性废物间内储存衰变。待其衰变达到相应核素的清洁解控水平后作为普通医疗废物处理。
合成、分装损坏的设备或部件	10kg/a	
淋洗、质控时沾有放射性药物的吸水纸和酒精棉球、工作人员操作时佩戴的一次性手套等	10kg/a	
废发生器	50 个/a	暂存在放射性废物间，由生产厂家回收处理。
小动物实验过程中产生的废注射器、废垫料、一次性实验耗材及动物尸体、组织和样品切片	500kg/a	先将放射性固体废物收集到专用铅桶内，定期将铅桶中的放射性废物转移至放射性废物间内储存衰变。待其衰变达到相应核素的清洁解控水平后作为普通医疗废物处理。
通风系统过滤装置更换产生的废旧活性炭	200kg/a	先将放射性固体废物收集到专用铅桶内，定期将铅桶中的放射性废物转移至放射性废物间内储存衰变。待其衰变达到清洁解控水平后作为非放射性固废处理。

4.6 核素诊断

4.6.1 场所布局与分区

核素诊断区辐射工作场所分区具体如下表所示，分区布局见图 4-83。

表 4-30 核素诊断区辐射工作场所分区表

区域	场所名称
控制区	治疗走廊、分装注射室、储源间、PET 固废间、抢救室、运动负荷室、等候室、PET-CT 机房、SPECT 机房等
监督区	PET-CT 机房控制室、SPECT 机房控制室、设备间、缓冲走廊、卫生通过间、医护走廊、护士站等

4.6.2 人流物流

（1）辐射工作人员路线

护士从医护走廊经卫生通过间进入分装注射室进行药物分装和注射，工作完成后经卫生通过间原路退出；技师从医护走廊进入 PET/CT 控制室、SPECT/CT 控制室进行设备操作。

（2）患者路线

患者经西侧门厅的患者入口（单向门）进入缓冲走廊、患者走廊，经地面导识线来到注射窗处接受显像放射性药物注射，随后进入等候室候诊，根据语音提示进入相应的 PET/CT 机房或 SPECT/CT 机房进行检查，需留观则回到原等候室，留观结束后通过患者走廊东北侧的患者出口（单向门）离开。

（3）放射性药物路线

用于核素诊断的放射性药物在一层的放药制备及动物实验区制备完成后，依次经回旋出入口、医护走廊、卫生通过间送入储源间。 ^{18}F 每日上午、下午各送药一次，其余核素均为上午送药一次。运送药物时间要求避开接诊时间，尽量减少所运送药物对人员和环境的影响（列入核医学管理制度中）。

（4）放射性固体废物路线

暂存在固废间的放射性固体废物，暂存满 30 天后，经固废间→分装注射室→抢救室→患者走廊→患者出口→污物电梯，送至医院医疗废物暂存库统一处理。

放射性固体废物运输采取时间管理的方式，避免人员的交叉，即每天接诊结束，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（列入核医学管理制度中）。

该诊断区域内功能用房设置齐全。工作场所设置了医护走廊、患者走廊，人员动线简单；放射性药物与固体废物的运输采取了时间管理方式，避免了与人员交叉，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该区，可保证工作人员和公众免受不必要的照射。

综合考虑，核素诊断区辐射工作场所布局合理。



图 4-83 核素诊断区辐射工作场所分区图

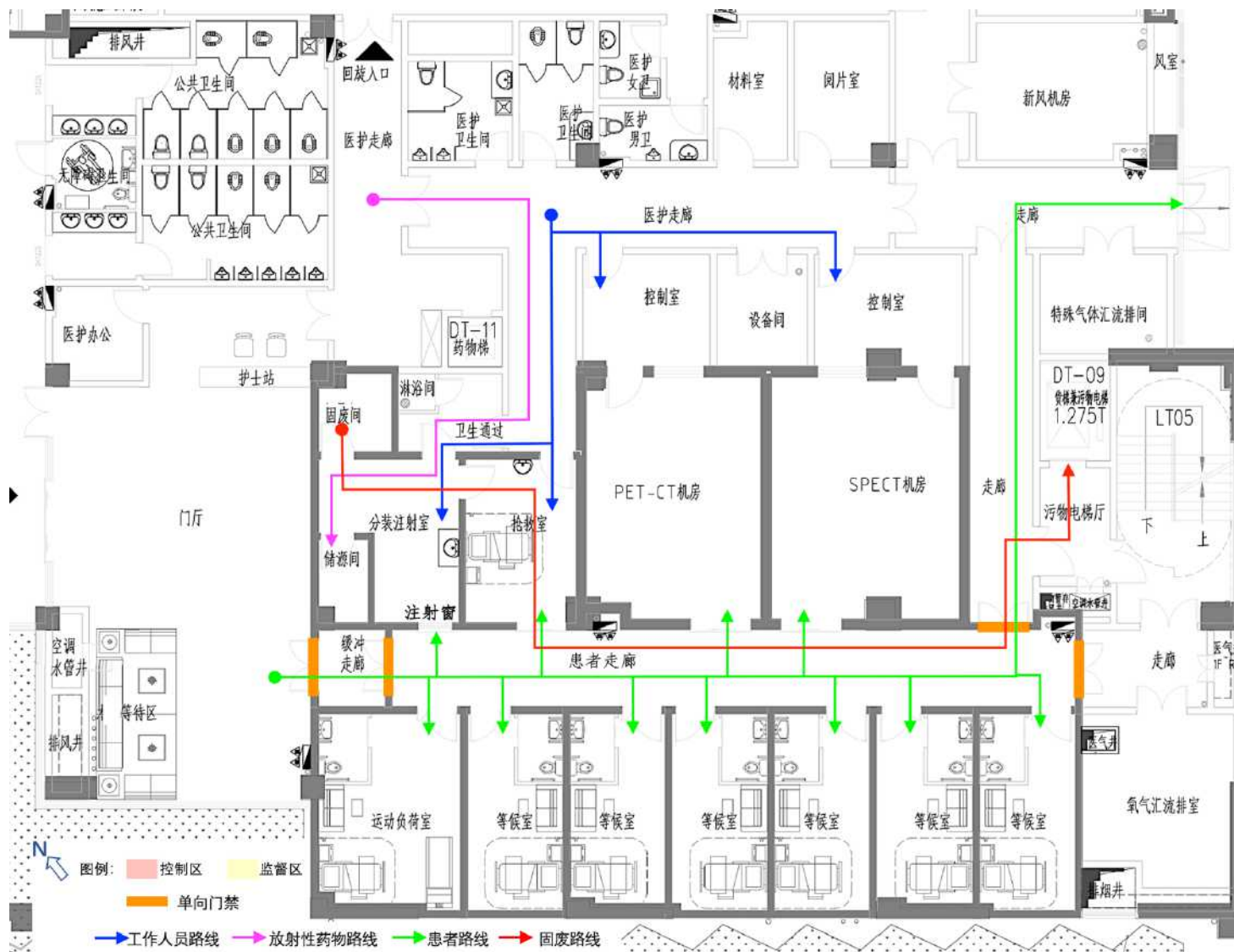


图 4-84 核素诊断区人流物流路径示意图

4.6.3 辐射屏蔽及防护用品

核素诊断区辐射屏蔽设计方案见表 4-31，防护用品配备清单见表 4-32。

表 4-31 核素诊断区辐射屏蔽设计方案

房间	屏蔽体	规格
PET-CT 机房	四周墙体	300mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土+8mmPb 防护涂层
	地板	200mm 混凝土+8mmPb 防护涂层
	防护电动门（患者走廊）	8mmpb
	防护平开门（控制室）	10mmpb
	观察窗	10mmpb
SPECT 机房	四周墙体	300mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护电动门（患者走廊）	4mmpb
	防护平开门（控制室）	6mmpb
	观察窗	6mmpb
分装注射室、储源间、固废间	四周墙体	200mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	8mmpb
抢救室、运动负荷室、等候室	墙体	200mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	地板	200mm 混凝土
	防护门	6mmpb
缓冲走廊、患者走廊	防护门（4 个）	8mmpb

表 4-32 核素诊断区防护用品配备清单

房间	防护用品名称	数量	铅当量
分装注射室	注射窗	1 个	40mmPb
	注射器防护套	若干	10mmPb
	脚踏式废物衰变桶	2 个	10mmPb
储源间	储源保险柜	2 个	30mmPb
固废间	废物衰变桶	3 个	10mmPb
等候室 （6 间）	废物衰变桶	6 个	10mmPb
	铅屏风	6 个	3mmPb
PET-CT 机房	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	各 1 件	0.5mmPb
SPECT 机房	铅防护衣、铅橡胶颈套、铅橡胶帽子、铅防护眼镜	各 1 件	0.5mmPb
卫生通过间	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、去污剂和/或喷雾（至少为加入清洗洗涤剂 and 硫	若干	/

房间	防护用品名称	数量	铅当量
	代硫酸钠的水)；小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔（水溶性油墨）、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签		
淋浴间	去污工具组	1 套	/

4.6.4 辐射安全措施

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，设置门灯连锁；机房电动推拉门设置防夹装置，平开机房门设有自动闭门装置。

②PET/CT 机房、SPECT/CT 机房与控制室之间设置铅玻璃观察窗及视频监控对讲系统，控制室和等候室之间设置视频监控对讲系统，患者通道、等候室等处设置视频监控系统，以便工作人员能观察受检者并与受检者进行沟通，核对受检者的信息，正确指导受检者就诊，保持核医学工作场所良好的就诊秩序。

③PET/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。

④医护人员出入口均设置门禁，禁止无关人员入内；缓冲走廊、患者走廊出入口均设置门禁和单向门，防止无关人员随意进入，且患者经出口离开后不能返回控制区。

⑤放射性表面污染控制措施：分装注射室、储源间、固废间、扫描机房、等候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。分装注射室和注射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。工作台面选用表面光洁、耐腐蚀、防渗漏、易去污的材料。

⑥卫生通过间设置表污检测、洗消用具、洁净衣物存放区、污染衣物存放区。

⑦储源间安装防盗门、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，严防放射性药物或校准用放射源丢失。

⑧患者入口周围设置放射防护注意事项告知栏，在受检者路径上明显位置张贴通俗易懂的患者就诊流程，受检者用药前有工作人员提前告知用药受检者用药后注意事项（如不在场所内吸烟，尽量避免受检者之间的交叉影响，用药后不宜乘坐公共交通，不在人群集中的区域长时间停留等，减少受检者对周围公众成员的影响）。

4.6.5 辐射监测

核素诊断区辐射监测方案如下，设备清单见表 4-33。

- 1) 核医学高活放射性房间如分装注射室、储源间、固废间，以及 PET/CT 控制室和 SPECT/CT 控制室安装固定式 γ 辐射剂量率监测仪，用于场所剂量监测。
- 2) 操作非密封源场所配备便携式表面污染监测设备，用于操作台、地面、个人防护用品等表面污染监测。
- 3) 配备便携式 X/ γ 剂量率仪，用于 PET/CT 机房、SPECT/CT 机房等辐射工作场所漏射线检测以及防护检测。
- 4) 卫生通过间配备手脚表面污染监测设备，用于医护人员离开工作场所时手部、脚部以及全身污染监测，手脚表面污染监测仪能够有效地检测和记录医护人员在工作过程中手部和脚部是否受到放射性污染。
- 5) 职业人员需佩戴个人剂量仪报警仪，用于个人剂量累积监测，实时剂量报警。
- 6) 分装注射室需配备活度计，用于注射放射性药物活度测量。

表 4-33 核素诊断区监测设备清单

序号	产品名称	数量/台	用途
1	固定式 γ 辐射剂量率监测仪	5	PET/CT 控制室、SPECT/CT 控制室、分装注射室、储源间、固废间，见图 4-85
2	便携式表面污染监测仪	2	卫生通过间、固废间等工作场所的场所巡检
3	便携式 X/ γ 剂量率仪	3	PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、场所巡检等
4	手脚表面污染监测仪	1	卫生通过间
5	个人剂量报警仪	若干	核医学科职业人员防护
6	活度计	1	分装注射室

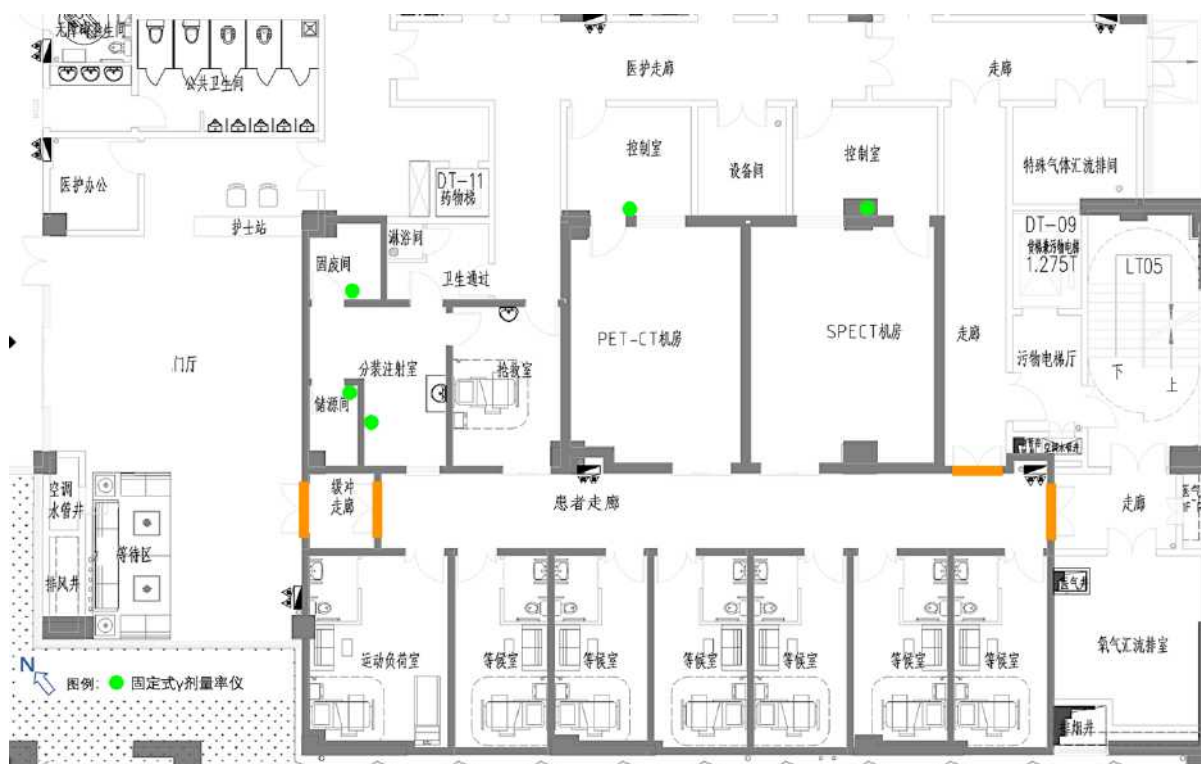


图 4-85 核素诊断区固定式 γ 辐射剂量率监测点位图

4.6.6 放射性三废

4.6.6.1 放射性废气

4.6.6.1.1 放射性废气来源

核素诊断区的放射性废气主要为操作非密封放射性物质可能产生的放射性废气。

4.6.6.1.2 通风系统处理措施

本项目核素诊断区通风系统满足自低浓度到高浓度流向设计，通风系统设计风量保证各功能房间为负压状态，并在各功能房间设置止回阀防止放射性气体回流交叉污染，药物分装柜设置单独的排风管道，且通风速度不小于 0.5m/s，分装柜顶部安装活性炭过滤装置，放射性废气均经过活性炭过滤后在高于建筑屋顶排放。符合《核医学辐射防护与安全要求》（H1188-2021）、《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）的相关要求。本项目一层核素诊断区辐射工作场所排风设计见下表。

表 4-34 本项目一层核素诊断区辐射工作场所排风设计

场所名称	进风量, m ³ /h	出风量, m ³ /h	通风房间
核素诊断区	3000	10000	PET-CT 机房、SPECT-CT 机房等
	4000		分装注射室、固废间、淋浴间、抢救室、运动负荷室、等候室等

4.6.6.2 放射性废液

本项目核素诊断区与放药制备及动物实验区共用一套衰变池，该衰变池位于地下一层，放射性废液处理措施可行性分析如下。

4.6.6.2.1 放射性废液来源

1) 核素诊断区放射性废液产生量

- e. 诊断患者产生的废水量：每天诊断患者 30 名，诊断患者用水定额取 5L/人，每次患者用水两次，诊断患者用水量：30*5*2=300L，诊断患者每天共产生废水量 300L；
- f. 辐射工作人员清洗去污：每天清洗废水量辐射工作人员清洗去污按 50L/d；
- g. 工作场所清洗去污废水量：工作场所清洗去污按 0.1L(m²•次) 计算，诊断区面积约为 60m²，每天清洗一次，每天废水产生量为：60L；
- h. 应急洗消废水量：按平均每天产生 20L 废水考虑。

则核素诊断区日产生废水量为：300L+50L+60L+20L=430L。

2) 放药制备放射性废液产生量

放药制备场所产生废液量为制备药物产生微量废水、核素管道清洗废水、工作人员清洗淋浴废水以及应急洗消废水，平均每天产生的废水量约 100L/d。

3) 动物实验放射性废液产生量

动物实验动物产生的尿液一般被垫料吸附，作为固体废物处置。注射药物后的动物尿液等排泄物较少，主要为辐射工作人员清洗去污和工作场所清洗去污的放射性废水，放射性废水日产生量约 150L/d。

综上，核素诊断区与放药制备及动物实验区每天共产生废水量为 0.68m³。

4.6.6.2.2 放射性废液处理措施

1) 衰变池容积及运行模式

衰变池前端设置沉淀池，衰变池由三个相对独立的衰变池水箱并联组成，分别为 1 #、2 #和 3 #，衰变池为不锈钢材质，耐酸耐腐蚀、无渗透性且内部光滑，每个衰变池水箱有效容积为 30.625 m^3 ($3.5\text{m} \times 3.5\text{m} \times 2.5\text{m}$)，总有效容量为 91.875m^3 。每个衰变池设置检修口。正常工作时，废液先排进 1#衰变池，当 1 #衰变池液面达到设定液位时，关闭该池进水阀，开启 2 #衰变池的进水阀，废液进入 2 #衰变池，当 2 #衰变池液面达到设定液位时，关闭该池进水阀，开启 3 #衰变池的进水阀，废液进入 3 #衰变池，当 3 #衰变池续满废液前，对 1 #衰变池的放射性废液进行监测，达到排放标准后排出。以此类推，3 个衰变池循环注水，在一个池子注满封闭开始，直到这个池排空，共经历注满另外 2 个衰变池水箱的时间，从而确保了放射性废液能在衰变池中充分的停留衰变。

2) 废液处理可行性分析

每个衰变池水箱的有效容积为 30.625 m^3 ，则注满单个衰变池水箱的时间为 $30.625/0.68 \approx 45$ 天，注满两个衰变池水箱的时间约为 90 天。放药制备及动物实验区与核素诊断区使用的核素中，半衰期最长的为 Lu-177，约 6.73 天，存满 10 个半衰期需要约 68 天（小于注满两个衰变池水箱所需的时间 90 天）。由上述计算结果可知，衰变池容积满足废液暂存需求。

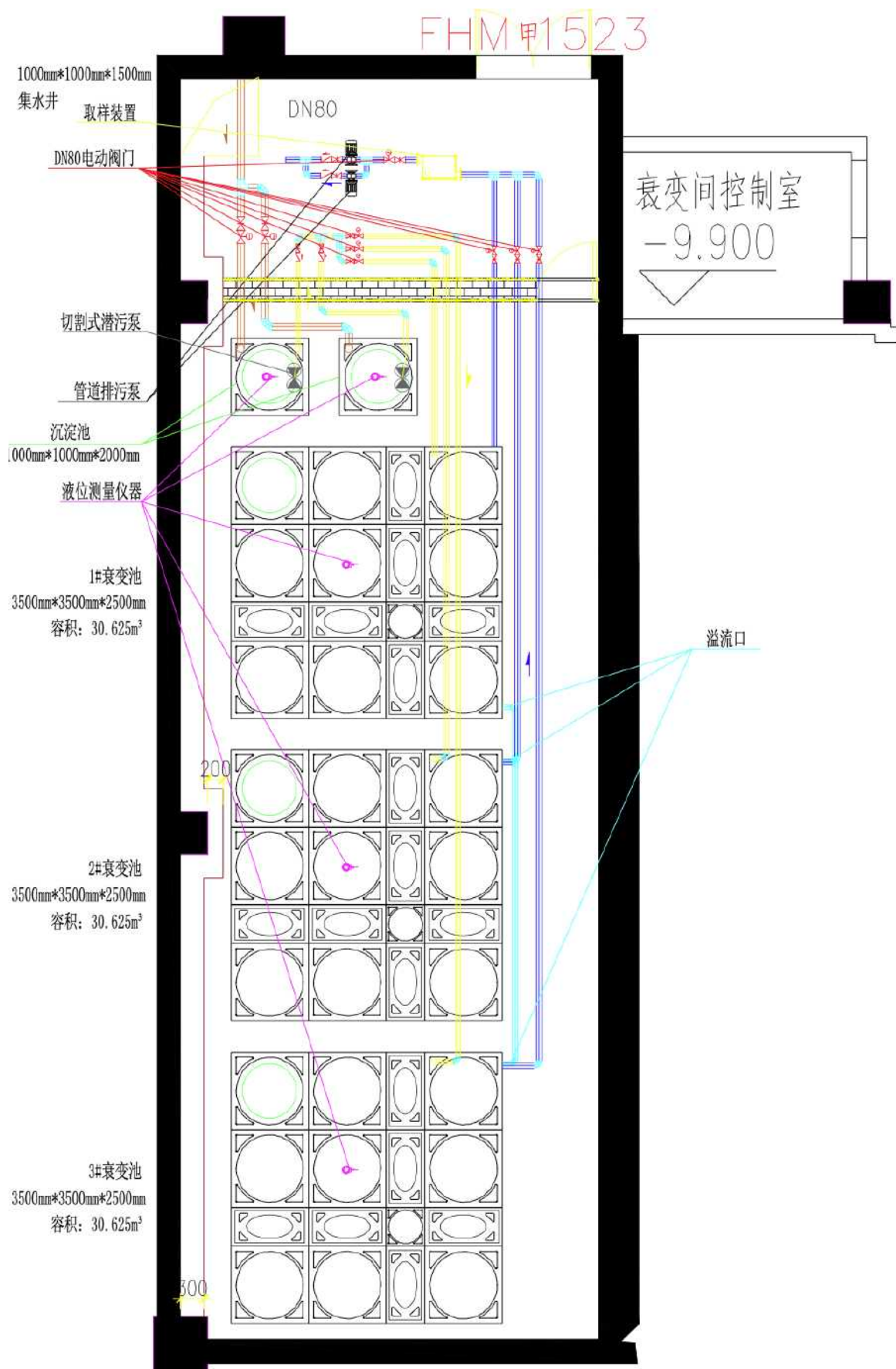


图 4-86 核素诊断区与放药制备及动物实验区共用的衰变池设计方案

4.6.6.3 放射性固废

4.6.6.3.1 放射性固废来源

核素诊断区辐射工作场所运行过程中产生的放射性固体废物主要包括患者诊断过程中医护人员为患者注射药物时产生的少量沾污放射性核素的一次性注射器、西林瓶、手套、口罩、消毒棉棒、纱布，以及通风系统废活性炭滤芯等。患者诊断固体废物单人次产生量最多为 0.02kg，每日诊断的患者约为 30 人，每天产生 0.6kg，则年产生量约为 219kg/a。通风系统废活性炭滤芯每年产生量约 2kg。

4.6.6.3.2 放射性固废处置方案

表 4-35 核素诊断放射性固体废物产生量及处理方式

来源	废物类型	年产污量	处理方式
核素诊断区	一次性注射器、西林瓶、手套、口罩、消毒棉棒、纱布等	219kg	按核素种类、收储日期分类暂存在放射性废物间，满足解控水平经解控后按医疗废物处理
通风系统	废活性炭滤芯	2 kg	暂存在放射性废物间，满足解控水平后按非放废物处理。

4.7 核素治疗

4.7.1 场所布局与分区

表 4-36 核素治疗区辐射工作场所分区表

区域	场所名称
控制区	治疗走廊、储源室、预留储藏间、分装注射室、服药室、高活性放射性实验室、污物暂存间、核素病房 1~16、抢救室、放射性废物暂存间、放射性被服暂存库等
监督区	卫生通过间、缓冲走廊、医护走廊、医护办公室、医护值班室、敷贴室、甲功室、备餐室、UPS 电源间、污物电梯厅等

4.7.2 人流物流

核素治疗区的人员流动路径、放射性药物运输路线、放射性固废路径如下：

- 1) 辐射工作人员路径：由医护电梯到达三楼，经卫生通过间进入储源室取药、进入分装注射室进行药物分装、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) 甲癌患者路径规划：乘患者电梯到达三楼→由核素病房入口进入→护士站登记→由单向入口进入核素治疗工作场所→沿治疗走廊进入服药室→在服药室服药→进入 ^{131}I 病房住院→出院时从专用单向出口离开核素治疗工作场所→乘患者电梯到达一楼后离开。
- 3) 甲亢患者路径规划：乘患者电梯到达三楼→由核素病房入口进入→护士站登记→由单向入口进入核素治疗工作场所→沿治疗走廊进入服药室→在服药室服药→甲亢留观病房留观→无碍后从专用单向出口离开核素治疗工作场所→乘患者电梯到达一楼后离开。
- 4) ^{177}Lu 治疗患者路径规划：乘患者电梯到达三楼→由核素病房入口进入→护士站登记→由单向入口进入核素治疗工作场所→沿治疗走廊来到注射窗→注射后进入 ^{177}Lu 病房住院→出院时从专用单向出口离开核素治疗工作场所→乘患者电梯到达一楼后离开。
- 5) 甲功测定患者路径规划：乘患者电梯到达三楼→由核素病房入口进入→护士站登记→沿核素病房门厅走廊来到甲功测定室（门诊）→服药后离开。
- 6) 药物路径：外购放射性药物由药物供应商工作人员经一楼核医学科医护走廊到达药物梯，乘药物梯到三楼储源室。（考虑到放射性药物路线与医护人员有部分交叉，计划采取时间管控的方式，运送药物时间避开医护人员工作时间，尽量减少因运送药物对医护人员造成的影响）
- 7) 放射性固废路线：暂存在核素治疗区内污物暂存间、放射性废物暂存间的放射性固体废物，满足解控要求后，转运进污物电梯，由一层与负一层之间的污物电梯出口运出示范中心大楼，与其他核医学科解控的放射性固废统一处理。

- 8) 放射性废液：各核素病房及分装注射室等核素治疗区的放射性废液分别汇集到沿治疗走廊布置的下水主管道，下排至负一层核素病房专用衰变池组。

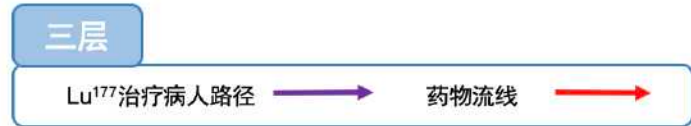
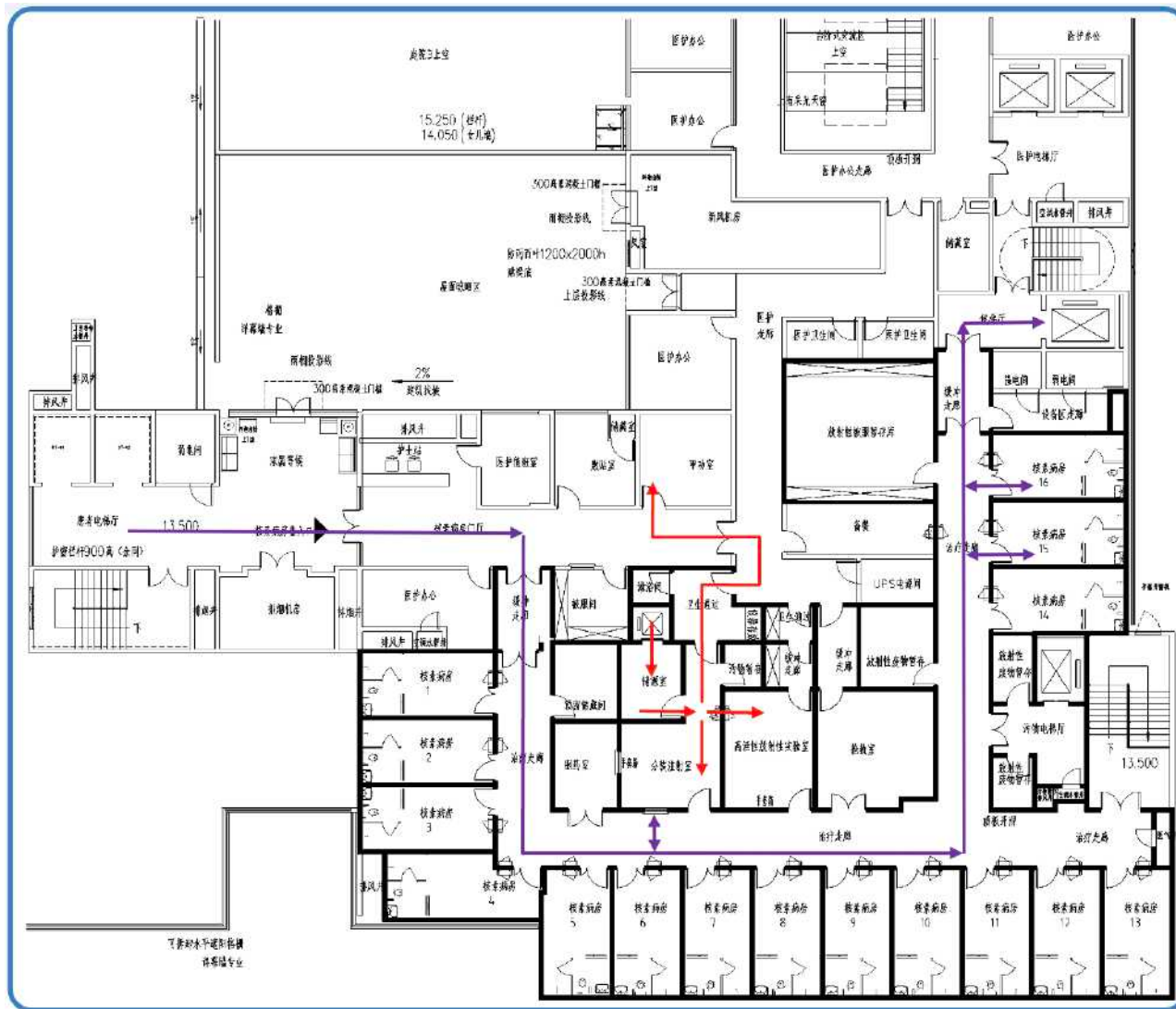
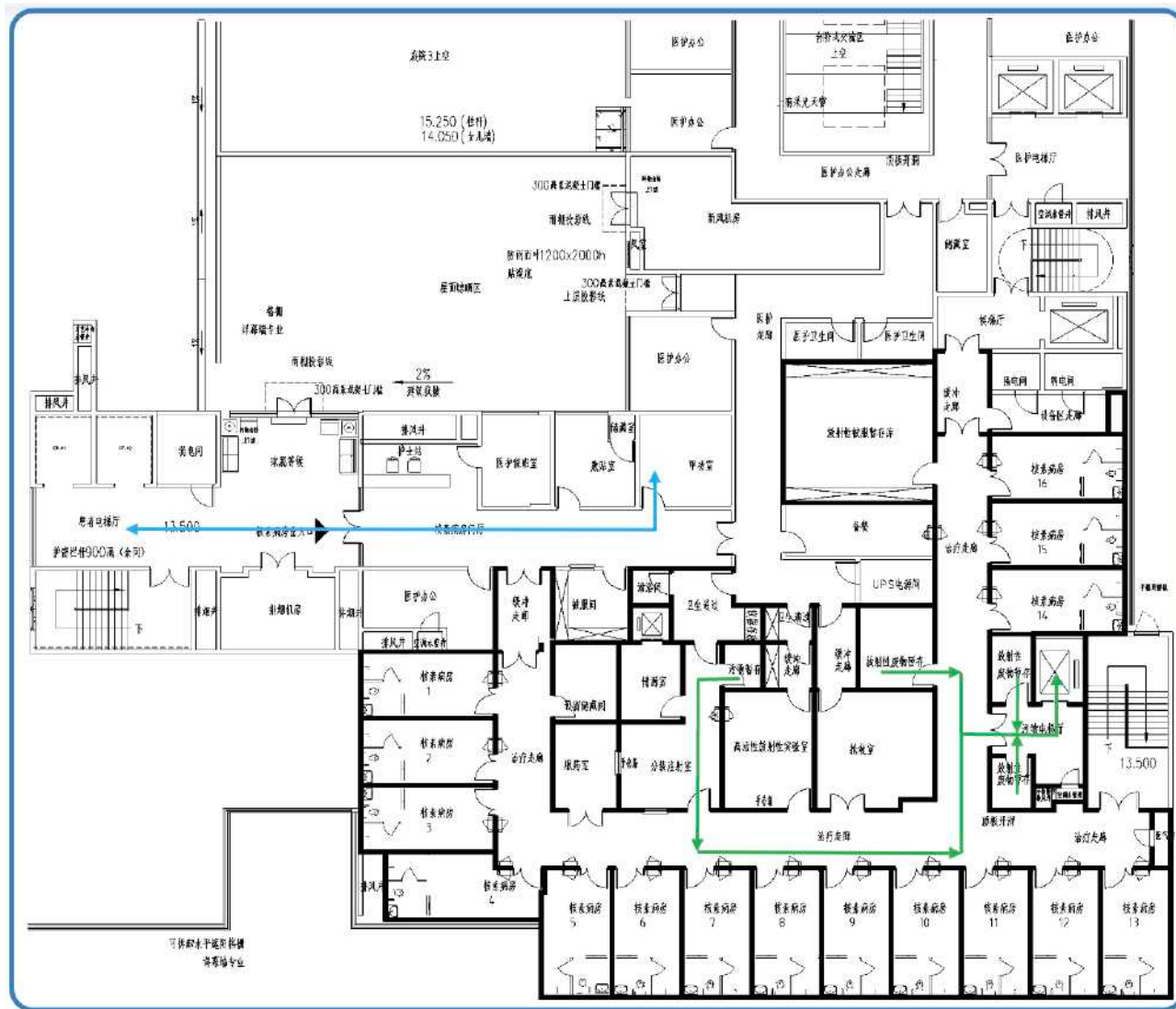


图 4-91 核素治疗人流物流路径图（三层）



三层

甲功测定病人路径

固废路线

图 4-92 核素治疗人流物流路径图（三层）

4.7.3 辐射屏蔽及防护用品

表 4-37 核素治疗区辐射屏蔽方案

房间	屏蔽体	规格
高活区-整个核素治疗控制区	地板	200mm 混凝土+12mmPb 防护涂料
核素治疗病房 1~16	四周墙体	200mm 混凝土+12mmPb 防护涂料 1 号病房与医护办公共用的墙体：400mm 混凝土+10mmPb 防护涂料，与排风井共用的墙体：400mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土+12mmPb 防护涂料
	门	12mmPb
	传递窗	15mmPb
服药室	墙体	200mm 混凝土+12mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+12mmPb 防护涂料
	门	15mmPb
分装注射室	墙体	200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料 与服药室共用的墙体：200mm 混凝土+12mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
	门	12mmPb
	服药窗	40mmPb
	注射窗	40mmPb
高活实验室	墙体	200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
	门	12mmPb
	传递窗	15mmPb
抢救室	墙体	200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
	门	13mmPb
治疗走廊	顶板	200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
备餐	墙体	窗侧墙面：200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料 与被服间共用墙体：200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	窗	15mmPb
储源室	墙体	200mm 混凝土+8mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+8mmPb 防护涂料
	门	16mmPb
污物暂存	墙体	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料 和高活实验室共用墙体：200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	门	8mmPb
	墙体	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料

房间	屏蔽体	规格
放射性废物暂存 1~3		和抢救室共用墙体：200mm 混凝土+10mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	门	8mmPb
放射性被服暂存	墙体	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	门	8mmPb
预留储藏间	墙体	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料 和服药室共用墙体：200mm 混凝土+12mmPb 防护涂料 和储源室共用墙体：200mm 混凝土+8mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	门	8mmPb
药物梯	墙体	200mm 混凝土
淋浴间	墙体	200mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	门	普通门
入口缓冲走廊	墙体	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料 与医护办公共用的墙体：350mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	外门	8mmPb
	内门	15mmPb
抢救室入口处缓 冲走廊	墙体	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	外门	8mmPb
	内门	12mmPb
出口缓冲走廊	墙体	200mm 混凝土 和被服间共用墙体：200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土
	外门	8mmPb
	内门	15mmPb
分装注射室入口 处卫生通过	墙体	200mm 混凝土
	顶板	200mm 混凝土
	外门	8mmPb
	内门	10mmPb
高活实验室入口 处卫生通过+缓冲 走廊	墙体	卫生：200mm 混凝土 缓冲：200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	顶板	200mm 混凝土+6mmPb 防护涂料
	外门	8mmPb
	内门	10mmPb
	卫生通过门	8mmPb

表 4-38 核素治疗防护用品及应急去污用品配置情况

序号	防护用品名称	使用场所	数量	铅当量
1	储源箱	储源室	1	10 mmPb
2	转运铅盒	药物转运途中	1	10 mmPb
3	注射器铅防护套	分装注射室	2	5 mmPb
4	手套箱	分装注射室、放射性高活实验室	2	40 mmPb
5	注射窗	分装注射室	1	40 mmPb
6	服药窗	分装注射室	1	40 mmPb
7	铅衣、铅围脖	分装注射室、放射性高活实验室	2 套	0.5 mmPb
8	活度计	分装注射室、放射性高活实验室	2	手套箱自带
9	铅废物桶	服药室、分装注射室、高活实验室	20 L/ 3 个	20 mmPb
10	铅废物箱	放射性废物暂存间	120 L/ 3 个	20 mmPb
11	铅废物桶	污物暂存间、放射性废物暂存间	60 L/ 3 个	20 mmPb
12	铅废物桶	核素病房	10 L/ 16 个	10 mmPb
13	口罩、手套、帽子、吸水滤纸、纱布等一次性用品	分装注射室	若干	/
14	应急及去污用品（一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼睛、防水工作服、胶鞋、去污剂、小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔（水溶性油墨）、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签、不透水的塑料布、一次性镊子等其他工具）	卫生通过间	1 套	/

4.7.4 辐射安全措施

- a) 划定控制区监督区，控制区采用红色警示线划分，控制区防护门外等醒目位置粘贴电离辐射警告标志等提示。
- b) 核素治疗区病人出入口处均设有电子门禁，限制人员的进出和给药后患者的随意活动，无关人员不得进入控制区，给药后患者不得随意流动，避免不需要的照射。
- c) 控制区出入口设置了缓冲区，工作人员通过的缓冲区提供必要的更衣设施、个人防护用品及表面污染监测设备。
- d) 控制区入口、出口处安装固定式辐射检测仪，禁止将被污染的物品带出，确保安全。
- e) 设置抢救室，配备急救设施，用于突发情况等患者的抢救。
- f) 用水量控制的措施：病房内用水充值卡刷卡取水，定量供应。
- g) 接受 ^{131}I 治疗的患者，其体内的放射性活度降低至 400 MBq 或经监测距其体表 1 m 处的周围剂量当量率不大于 25 $\mu\text{Sv/h}$ ，方可出院。

4.7.5 辐射监测系统

表 4-39 核素治疗区辐射工作场所监测计划表

场所	监测项目	监测类别	监测方式	监测频率	监测点位
核素治疗区	X- γ 辐射剂量率监测	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放有放射性物质的设备、装置表面
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	
	β 表面放射性污染	自行监测	便携式仪表监测	每次工作结束（药物洒落时及时监测）	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者病房，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。
		委托监测	便携式仪表监测	1 次/年	

表 4-40 核素治疗区拟配备的辐射监测设备清单

序号	设备名称	数量	总计
1	固定式 X- γ 探测器	护士站：1 台 控制区入口、出口缓冲区：共 2 台 病房：1 台/间，共 16 台 储源室：1 台 分装注射室：1 台 高活性放射性实验室：1 台 污物暂存间：1 台 放射性废物暂存：1 台/间，共 3 台	26 台
2	便携式 X- γ 辐射巡测仪	1 台	1 台
3	便携式表面污染检测仪	1 台	1 台
4	直读式个人剂量报警仪	4 台	4 台
5	个人剂量计	1 个/人	11 个

4.7.1 放射性三废

4.7.1.1 放射性废气

4.7.1.1.1 放射性废气来源

核素治疗区的放射性废气主要包含 I-131 核素。

4.7.1.1.2 通风系统处理措施

第一套排风：污物暂存间、放射性被服暂存间、放射性废物暂存间，排风量约 2000 m³/h；上述房间放射性气体汇集后经放射性废物暂存间东侧排风井，升至示范中心大楼屋顶排气口，经活性炭滤过后排放。

第二套排风：服药室、分装注射室、病房、高活实验室、抢救室等，排风量约 4000 m³/h，风速不低于 0.5 m/s。述房间放射性气体汇集后经核素病房 4 西侧排风井升至示范中心大楼屋顶排气口，经活性炭滤过后排放。

各手套箱支管均安装止回阀，各区域排风支管在接入主管前安装止回阀。

核素病房排风管道经大楼排风井通往楼顶，排风管出口离屋顶地面不小于 3 m，屋顶排风管道末端配置高效活性炭过滤装置（过滤效率为 90%）。

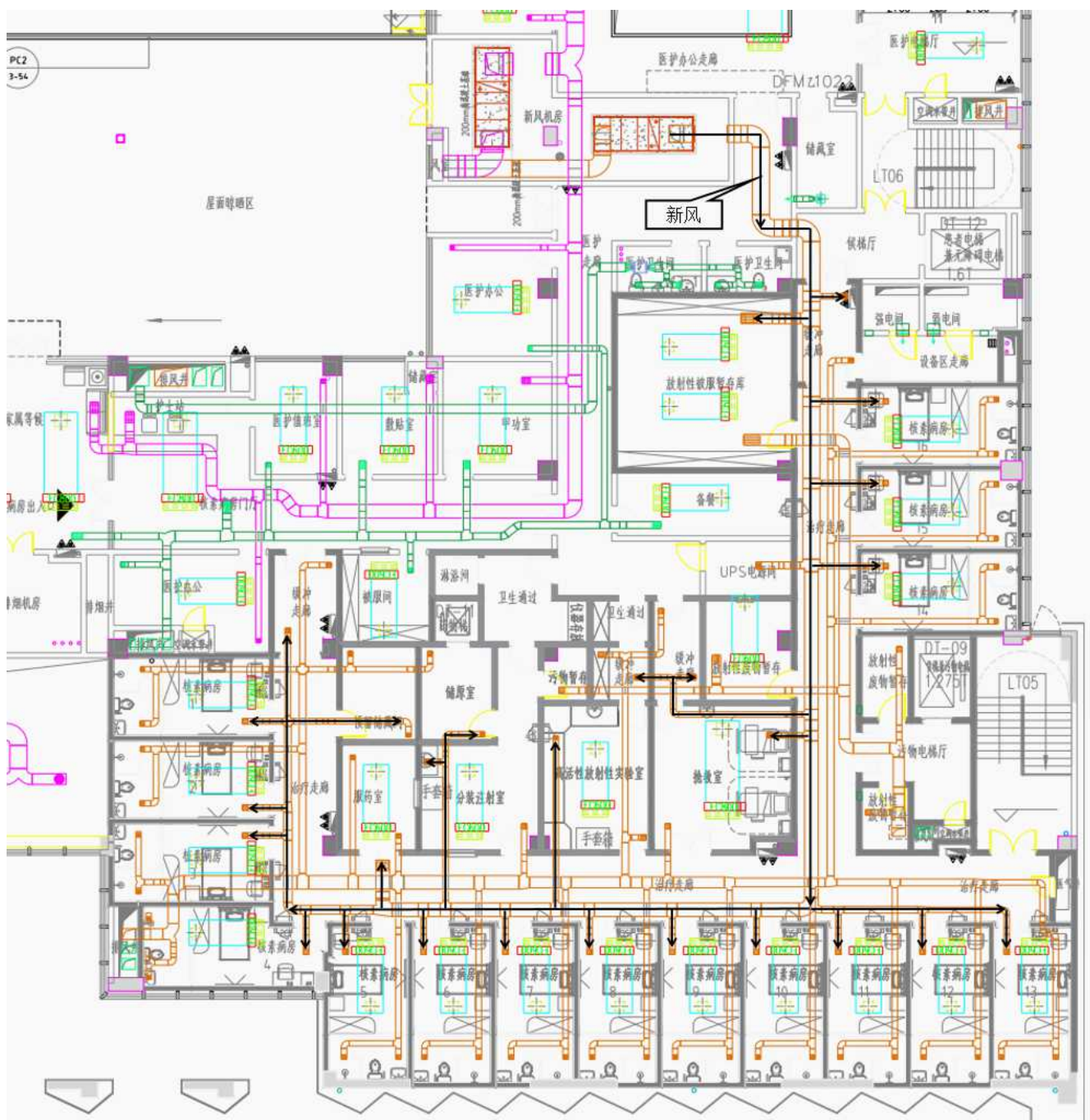


图 4-95 核素病房新风管道走向图

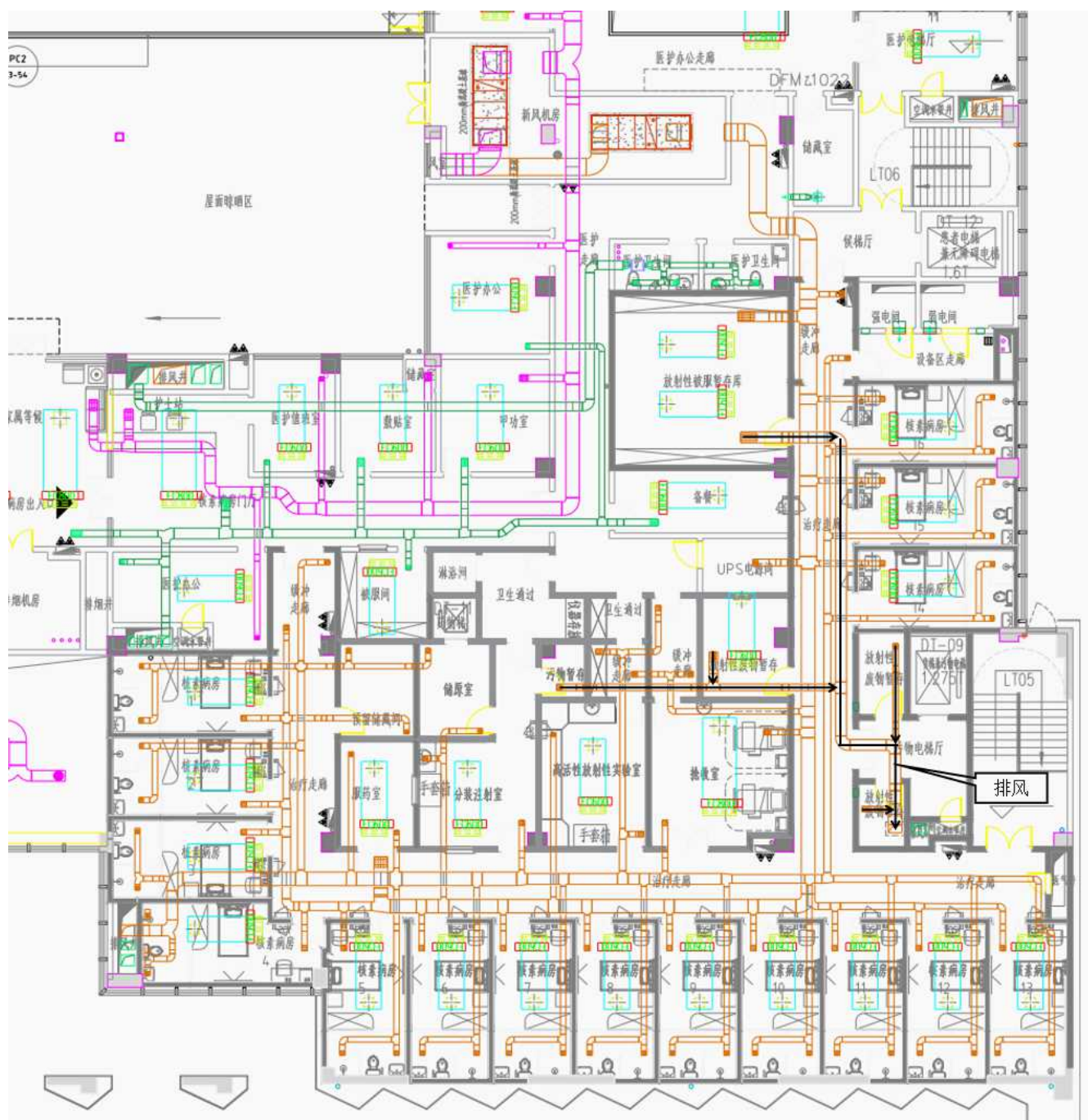


图 4-96 核素病房排风管道走向图 1

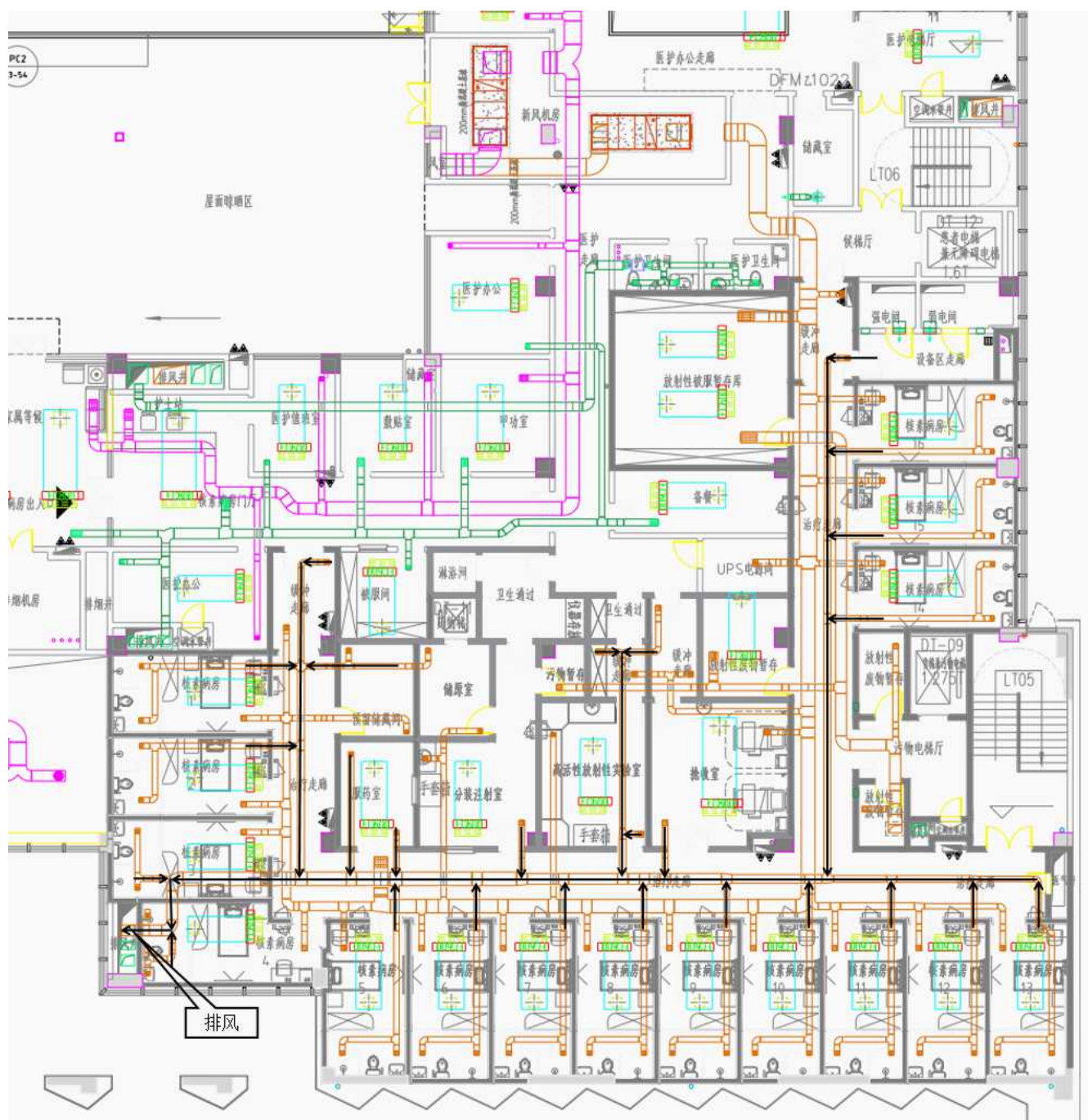


图 4-97 核素病房排风管道走向图 2

4.7.1.2 放射性废液

4.7.1.2.1 放射性废液来源

核素治疗区废液产生量估算：

假设甲癌治疗病房周一到周日每天住满 5 个病人，每个病人每天产生废水 120 L；甲亢留观病房一周接待 50 个病人，每个病人留观期间产生放射性废液 6 L； ^{177}Lu 治疗一周收治 1 个病人，住院 1 天，一个病人一天 120 L；人员去污、场所清洁（考虑应急裕量）用水平均每天共 100 L；则核素治疗区每周产生废液总量为：

$$5 \times 120 \times 7 + 50 \times 6 + 120 + 100 \times 7 = 5320 \text{ L} = 5.32 \text{ m}^3$$

平均每天产生放射性废液总量为 $5.32 \div 7 = 0.76 \text{ m}^3$ ，暂存 180 天产生的放射性废液总量为 $0.76 \times 180 = 136.8 \text{ m}^3$ ，每年总排量约 $5.32 \times 50 = 266 \text{ m}^3$ 。

4.7.1.2.2 放射性废液处理措施

核素治疗区产生放射性废液主要含 ^{131}I 、 ^{177}Lu 。这两种核素共用 1 套衰变池，位于地下一层，衰变池前端设置沉淀池，衰变池由三个相对独立的衰变池水箱并联组成，分别为 1 #、2 #和 3 #，衰变池为不锈钢材质，耐酸耐腐蚀、无渗透性且内部光滑，1 #、2 #衰变池容积有效容积为 72 m^3 （ $9 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ）、3 #衰变池容积有效容积为 96 m^3 （ $8 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ），总有效容量为 240 m^3 。每个衰变池设置检修口。衰变池南侧东侧整体采用混凝土浇筑，人员可达处墙体为 500 mm 混凝土；北侧与设备区的隔墙为 240 mm 实心砖+600 mm 硫酸钡涂料；顶部为 150 mm 混凝土。正常工作时，废液先排进 1 #衰变池，当 1 #衰变池液面达到设定液位时，关闭该池进水阀，开启 2 #衰变池的进水阀，废液进入 2 #衰变池，当 2 #衰变池液面达到设定液位时，关闭该池进水阀，开启 3 #衰变池的进水阀，废液进入 3 #衰变池，当 3 #衰变池续满废液前，对 1 #衰变池的放射性废液进行监测（此时 1 #衰变池的放射性废液储存时间应满 180 天），达到排放标准后排出。以此类推，3 个衰变池循环注水，在一个池子注满封闭开始，直到这个池排空，共经历注满另外 2 个衰变池的时间，从而确保了放射性废液能在衰变池中充分的停留衰变。

衰变池并联设置 3 个池，分为 1 #衰变池、2 #衰变池和 3 #衰变池。1 #、2 #衰变池有效容积为 72 m³，3 #衰变池有效容积为 96 m³，废液储满 1 #、2 #和 3 #衰变池分别需历时 94 天、94 天和 126 天。

3 个衰变池循环注水，在一个池子注满封闭开始，直到这个池排空，共经历注满另外 2 个衰变池的时间。则注满容积最小的两个衰变池所需的时间为 188 天，大于含 I-131 废水应暂存的 180 天。

综上，核素治疗区衰变池容量满足要求。

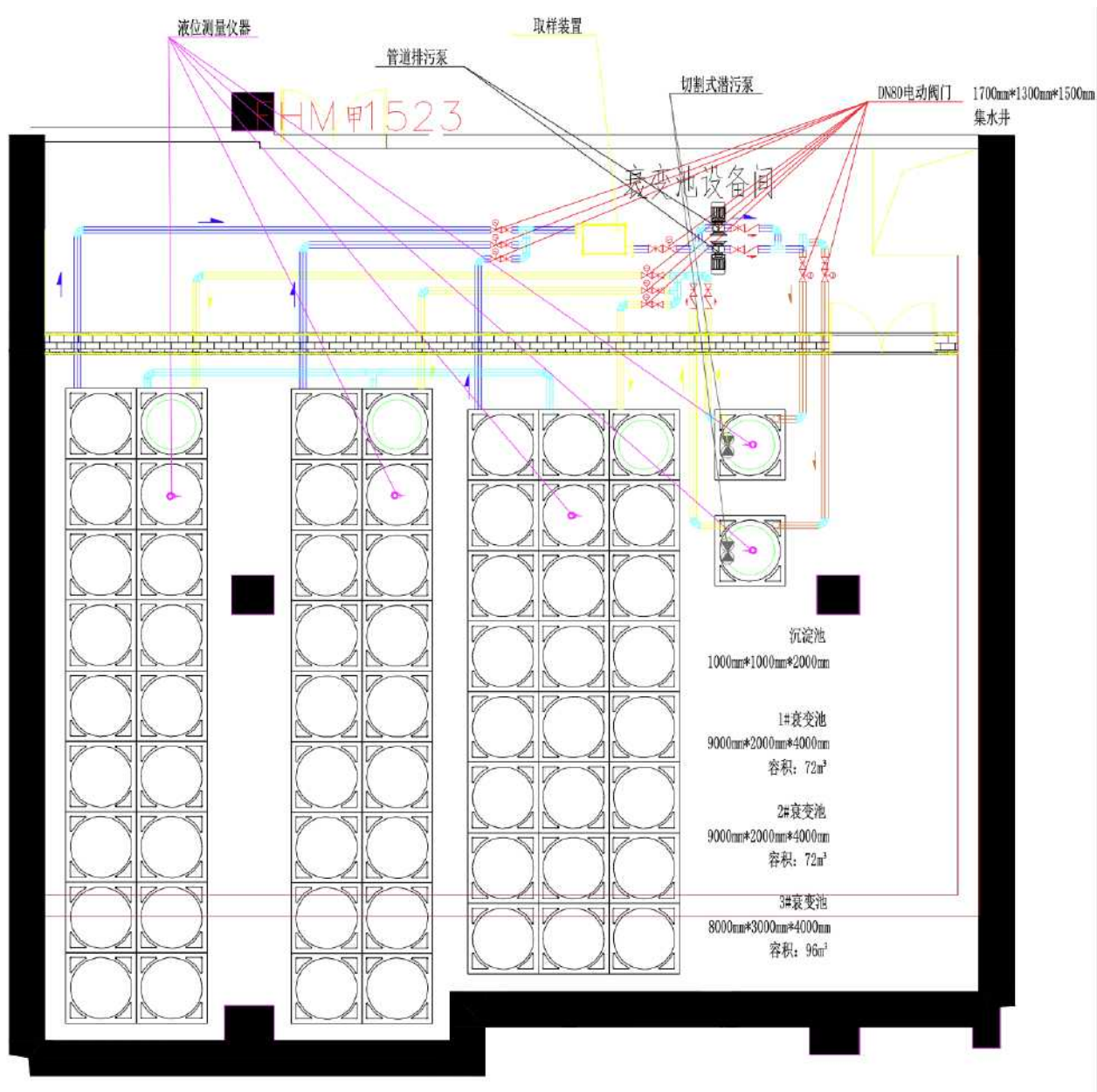


图 4-98 核素治疗衰变池设计方案

4.7.1.3 放射性固废

4.7.1.3.1 放射性固废来源

核素治疗区辐射工作场所运行过程中产生的放射性固体废物主要包括患者接受治疗过程中产生的剩余药物包装、一次性物品、服药口杯、注射器、棉签、操作手套、口罩等，以及通风系统废活性炭滤芯等。

假设患者每人每天产生的放射性固废量为 0.02kg。甲癌治疗病房周一到周日每天住满 5 个病人，每天共产生 0.1kg；甲亢留观病房每天接待 10 个病人，每天共产生 0.2kg；则历经 180 天产生含 I-131 固废约 54kg，每年产生量约 110kg。¹⁷⁷Lu 治疗一周收治 1 个病人，住院 1 天，一周产生 0.02kg，历经 10 个半衰期 68 天产生含 ¹⁷⁷Lu 固废约 0.2kg，每年产生量约 1kg。通风系统废活性炭滤芯每年产生量约 2kg。

4.7.1.3.2 放射性固废处置方案

表 4-41 核素治疗放射性固体废物产生量及处理方式

来源	废物类型	年产污量	处理方式
核素治疗区	剩余药物包装、一次性物品、服药口杯、注射器、棉签、操作手套、口罩等	111kg	按核素、收储日期分类暂存在放射性废物间，满足解控水平经解控后按医疗废物处理
通风系统	废活性炭滤芯	2 kg	暂存在放射性废物间，满足解控水平后按普通废物处理。

4.8 服务期满后的环境保护措施

质子治疗系统这类可能产生放射性污染的射线装置因搬迁等原因不再使用时，建设单位应编制相应的退役方案、制定退役目标，确保放射性废物得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

5 环境影响分析

5.1 建设阶段环境影响分析

本项目建设阶段需要进行辐射防护工程建设、内部装修及设备安装等。

(1) 声环境影响分析

本项目施工期较短且施工过程主要在院区。施工期拟采取以下噪声防治措施：

①合理安排施工时间，中午及夜间停止施工，尽可能避免大量高噪声设备同时施工。

②合理布局施工现场，避免在同一地点安排大量高噪声设备，以避免局部声级过高。

③降低设备声级，选用低噪声设备和工艺，可从根本上降低源强，同时要加强检查、维护和保养机械设备，保持润滑，紧固各部件，减少运行震动噪声。整体设备应安放稳固，并与地面保持良好接触，有条件的应使用减振机座，降低噪声。

④减少施工交通噪声，施工期间运输车辆应尽量减少夜间运输量，限制大型载重车的车速。

通过采取以上措施，对周边环境影响较小。

(2) 水环境影响分析

施工期废水主要为施工废水和施工人员的生活污水。施工废水上清水重复利用，淤泥集中堆放后期用作回填土，施工人员生活污水主要为洗涤废水和粪便污水，本项目施工期生活污水排入示范中心污水处理系统，经污水管道排入市政污水管网。不直接外排环境。

(3) 固体废物

本项目施工期固体废物主要为施工期间人员日常生活产生的生活垃圾和施工垃圾，生活垃圾统一放至示范中心生活垃圾存放点，由环卫部门定期清运。施工垃圾对弃渣处置必须坚持“先挡后弃”。其次将建筑垃圾分类，尽量回收其中尚可利用的部分建筑材料，对没有利用价值的废弃物运交由环卫部门清运。

(4) 大气环境影响分析

本项目在建设施工期各种施工将产生地面扬尘，另外机械和运输车辆作业时排放废气和扬尘，但这些方面的影响仅局限在施工场地内，且产生量小，对周边大气环境影响较小。

经采取以上措施，施工期对周围环境影响较小。

5.2 正常运行的环境影响分析

5.2.1 质子治疗系统

5.2.1.1 质子治疗系统屏蔽体外剂量率计算

5.2.1.1.1 计算方法

本次评价采用目前国内外通用的 FLUKA 程序计算质子治疗系统屏蔽体外剂量率水平。屏蔽计算依据的束流损失参数见表 3-40，屏蔽体材质及厚度见表 4-3，建立的计算模型见图 5-1 和图 5-2。

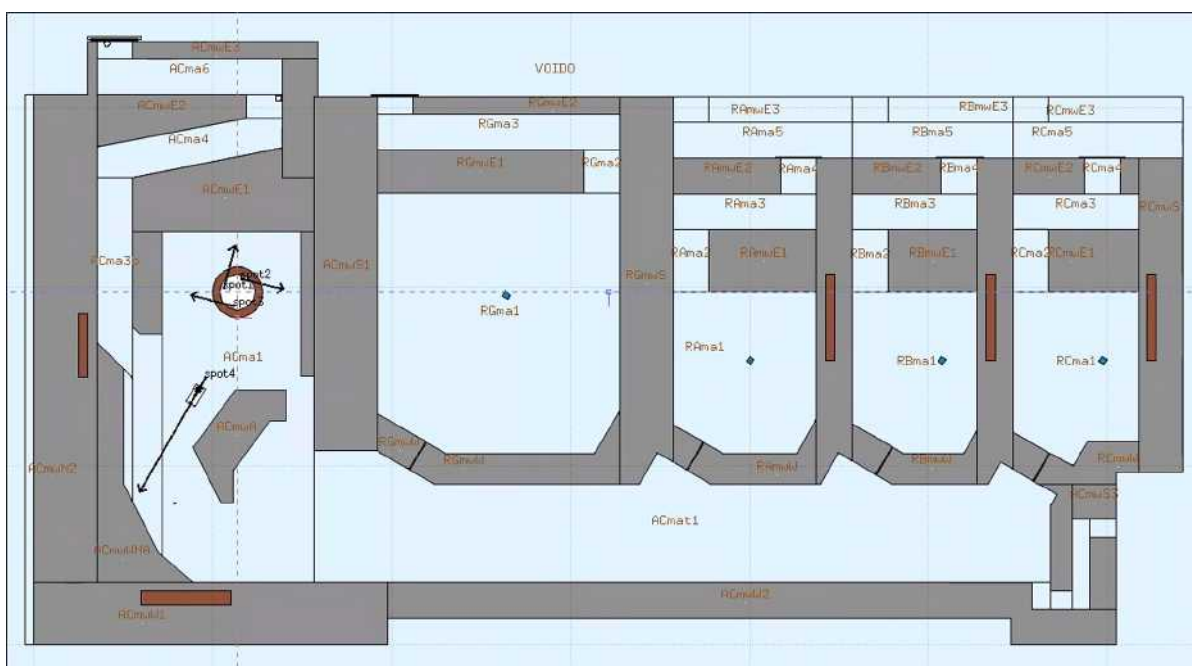


图 5-1 质子治疗系统屏蔽模拟计算模型图（束线高度（1.25 m）处平面图）

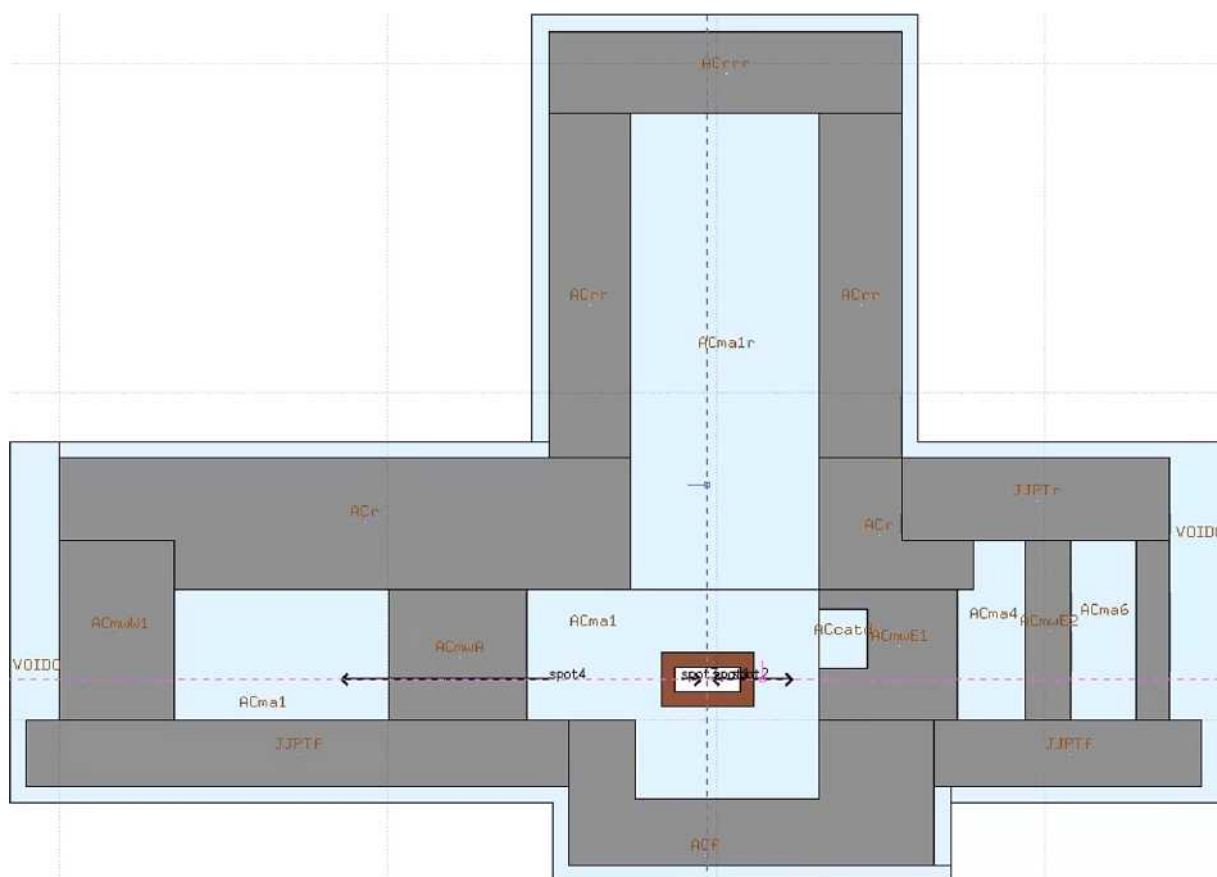


图 5-2 质子治疗系统屏蔽模拟计算模型东西向剖面图



图 5-3 质子治疗系统屏蔽模拟计算模型南北向剖面图

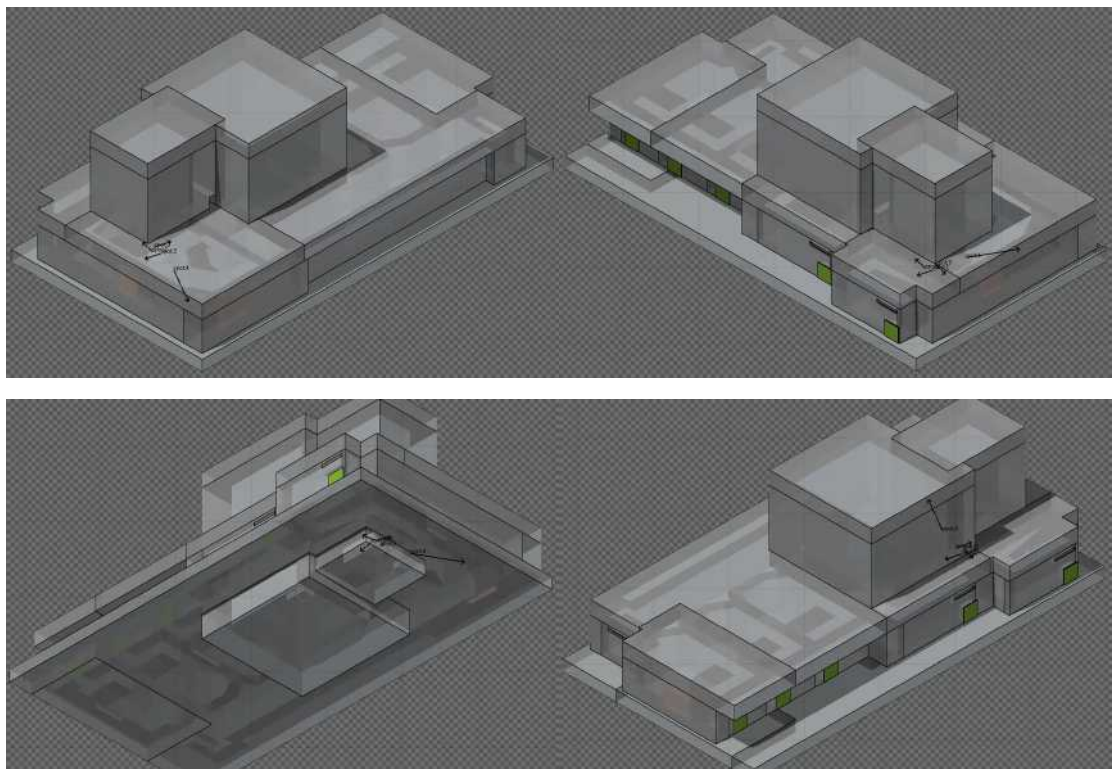


图 5-4 质子治疗系统屏蔽体立体效果示意图

5.2.1.1.2 计算结果

根据质子加速器运行工况下加速器束流损失参数，计算了质子治疗系统周围辐射剂量率分布情况及各关注点剂量率计算结果，具体如下。关注点位置见图 5-5~图 5-9。质子治疗系统不同工况下的剂量率分布图见图 5-10~图 5-21。

表 5-1 各工况下 FLUKA 程序源项输入参数

工况	编号	源项位置	质子能量/MeV	损失流强/nA	靶材	尺寸	束流损失方向
调试工况 1/ 调试工况 2 (法拉第筒位置不同)	1	静电偏转板	245	180	Ti	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	东偏南
	2	磁通道 1	245	90	Fe	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	南偏西
	3	补偿磁通道 1	245	90	Fe	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	北偏东
	4	法拉第筒	245	540	Cu	$\Phi 7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$	西偏北
治疗工况 220	1	静电偏转板	240	15.15	Ti	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	东偏南
	2	磁通道 1	240	7.58	Fe	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	南偏西
	3	补偿磁通道 1	240	7.58	Fe	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	北偏东
	4	降能、准直	240	45.45	C / Cu	/	西偏北
	5.220	动量分散控制狭缝	220	9.42	W	$\Phi 6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$	西偏南
治疗工况 150/70	1	静电偏转板	240	500/3	Ti	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	东偏南
	2	磁通道 1	240	500/6	Fe	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	南偏西
	3	补偿磁通道 1	240	500/6	Fe	$\Phi 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	北偏东
	4	降能、准直	240	500	C / Cu	/	西偏北
	5.150	动量分散控制狭缝	150	9.95	W	$\Phi 6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$	西偏南
	5.70		70	2.46			
各治疗室	1	等中心点	220	3	H ₂ O	$\Phi 30\text{ cm} \times 35\text{ cm}$	/

表 5-2 调试/治疗工况下加速器大厅各关注点辐射剂量率计算结果

关注点编号	关注点位置	周围环境	剂量率最大计算结果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
1	北侧墙外	绿化带	2.40	10
2	西侧墙外	绿化带	1.34	10
3	南侧墙外	旋转束治疗室	3.09	10
4	东侧墙外	走廊	1.74	10
5	防护门外	走廊	1.72	10
6	东侧墙 V 型穿墙管出口	走廊	1.37	10
7	能选区顶板	质子功率源间	5.67	10
8	能选区底板	土层	4266.89	5000
9	加速器大厅上空北侧墙外	走廊	9.61	10
10	加速器大厅上空西侧墙外	质子功率源间	7.03	10
11	加速器大厅上空东侧墙外	空调机房	2.44	10
12	加速器大厅上空顶板	屋面	4.91	10
13	加速器大厅基坑北侧墙外	土层	602.56	5000
14	加速器大厅基坑西侧墙外	土层	4266.89	5000
15	加速器大厅基坑东侧墙外	消防水池	7.27	10
16	加速器大厅基坑底板	土层	3427.36	5000

关注点 编号	关注点位置	周围环境	剂量率最大计算结果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
17	束线传输区西侧墙外	绿化带	0.01	10
18	束线传输区东侧墙外	旋转束治疗室	0.18	10
19	束线传输区东侧墙外	固定束治疗室	0.01	10
20	束线传输区南侧墙外	吊装大厅	0.02	10
21	防护门外	吊装大厅	0.33	10
22	南侧墙 V 型穿墙管出口	吊装大厅	1.62	10
23	束线传输区顶板	能选电源室	0.03	10
24	束线传输区底板	土层	0.03	5000

表 5-3 旋转束治疗室不同方向出束时各关注点辐射剂量率计算结果

关注点 编号	关注点位置	周围环境	剂量率最大计算结果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
RG1	西南向出束-南侧墙外	固定束治疗室 a	4.78	10
RG2	东北向出束-东侧墙外	走廊	0.23	10
RG3	东北向出束-防护门外	走廊	1.64	10
RG4	东北向出束-东侧墙 V 型穿墙管出口	走廊	0.72	10
RG5	垂直向上出束-顶板	屋面	8.25	10
RG6	垂直向下出束-底板	土层	4587.29	5000
RG7	东北向斜上出束-二层东侧墙外	走廊	1.26	10
RG8	西南向斜上出束-二层西侧墙外	走廊	3.70	10
RG9	西南向斜上出束-二层南侧墙外	质子备件库	1.49	10
RG10	东北向斜下出束-负一层东侧墙外	水冷泵房集水井	2.82	10

表 5-4 固定束治疗室各关注点辐射剂量率计算结果

关注点 编号	关注点位置	周围环境	剂量率最大计算结果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
Ra1	固定束治疗室 a 北侧墙外	旋转束治疗室	0.20	10
Ra2	固定束治疗室 a 南侧墙外	固定束治疗室 b	4.08	10
Ra3	固定束治疗室 a 东侧墙外	模具间	0.07	10
Ra4	固定束治疗室 a 防护门外	走廊	0.88	10
Ra5	固定束治疗室 a 东侧墙 V 型穿墙管出口	走廊	0.61	10
Rb1	固定束治疗室 b 北侧墙外	固定束治疗室 a	0.17	10
Rb2	固定束治疗室 b 南侧墙外	固定束治疗室 c	5.08	10
Rb3	固定束治疗室 b 东侧墙外	模具间	0.09	10

关注点 编号	关注点位置	周围环境	剂量率最大计算结 果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
Rb4	固定束治疗室 b 防护门外	走廊	0.75	10
Rb5	固定束治疗室 b 东侧墙 V 型穿墙管出口	走廊	1.07	10
Rc1	固定束治疗室 c 北侧墙外	固定束治疗室 b	0.20	10
Rc2	固定束治疗室 c 西侧墙外	电梯间	0.40	10
Rc3	固定束治疗室 c 南侧墙外	污物走廊	1.41	10
Rc4	固定束治疗室 c 东侧墙外	走廊	0.10	10
Rc5	固定束治疗室 c 防护门外	走廊	0.99	10
Rc6	固定束治疗室 c 东侧墙 V 型穿墙管出口	走廊	2.27	10
R7	顶板	门诊医师诊室、 办公室等	0.58	2.5
R8	底板	土层	8.01	5000

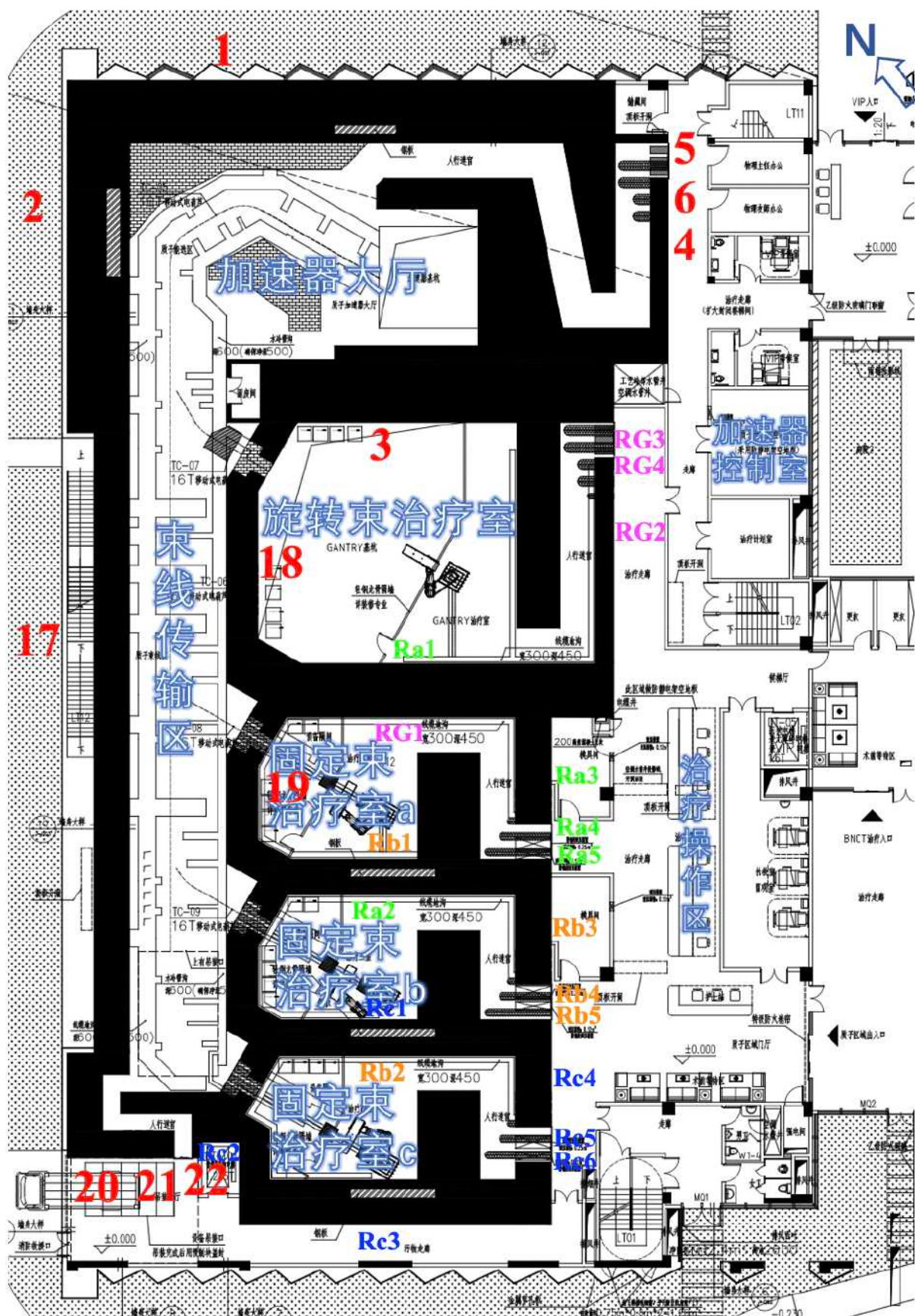


图 5-5 一层关注点位置示意图

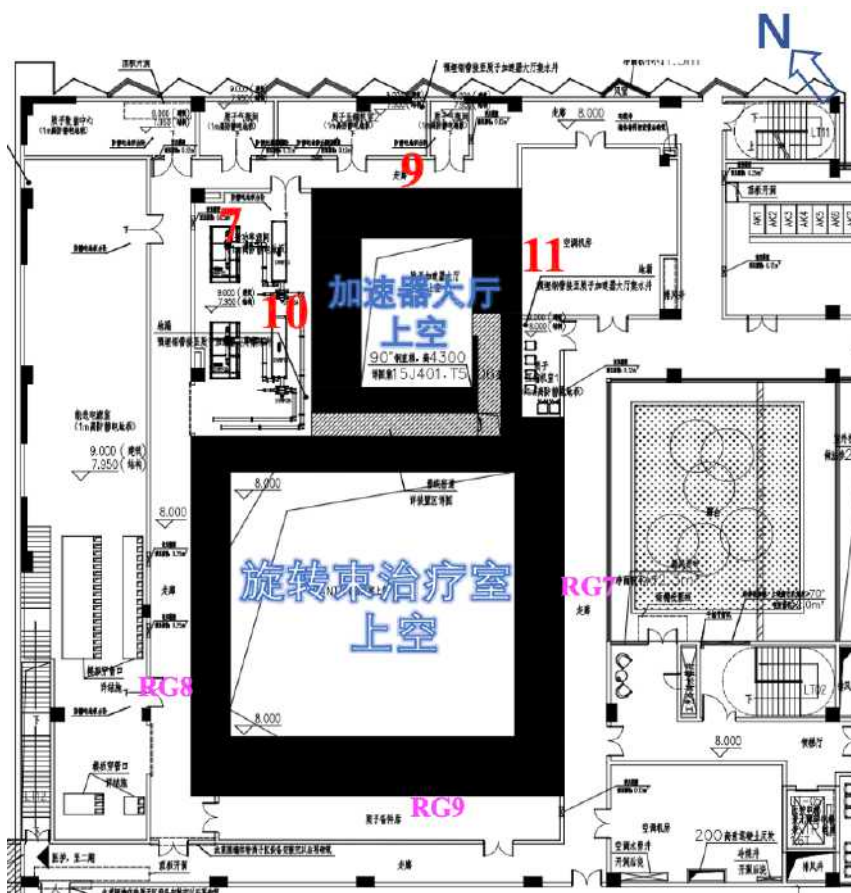


图 5-6 二层关注点位置示意图

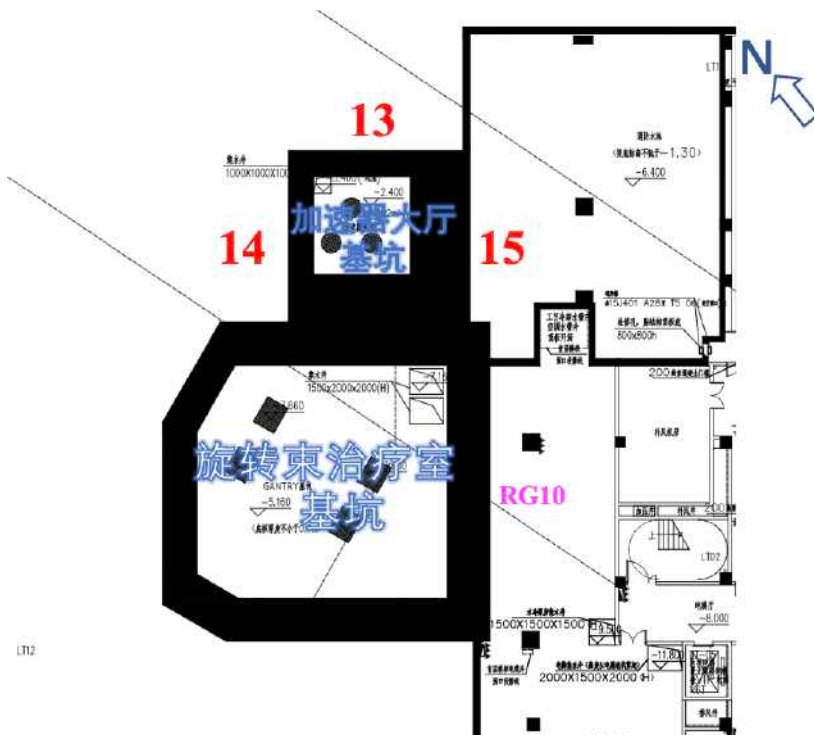


图 5-7 负一层关注点位置示意图

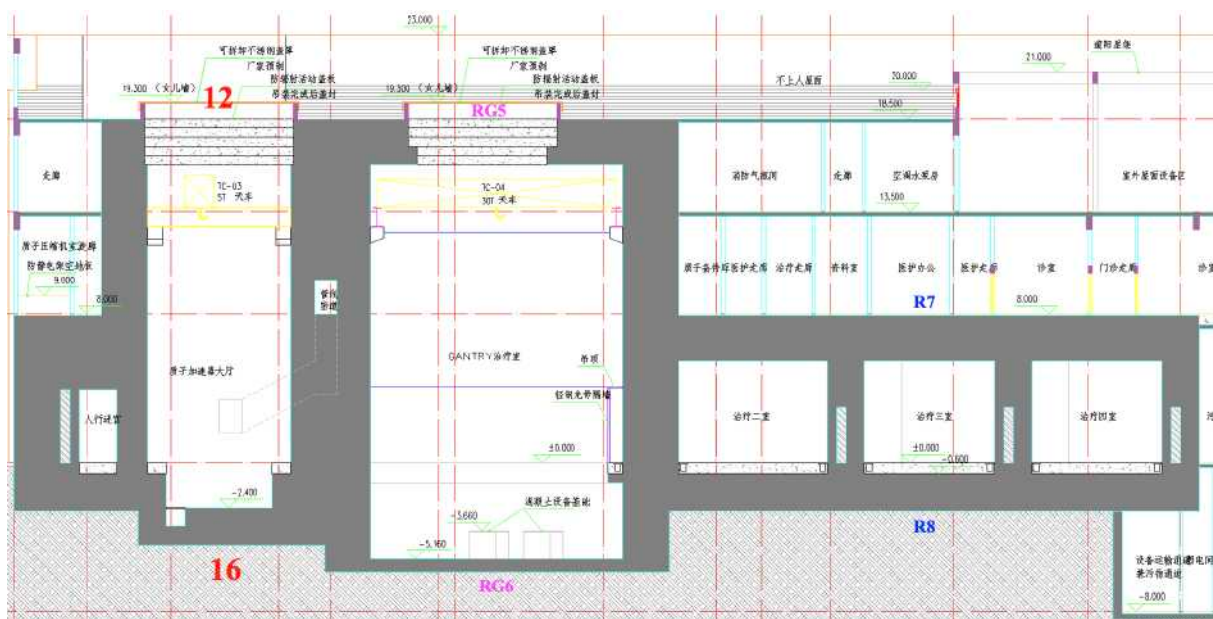


图 5-8 加速器大厅和治疗室顶层、底板关注点位置示意图

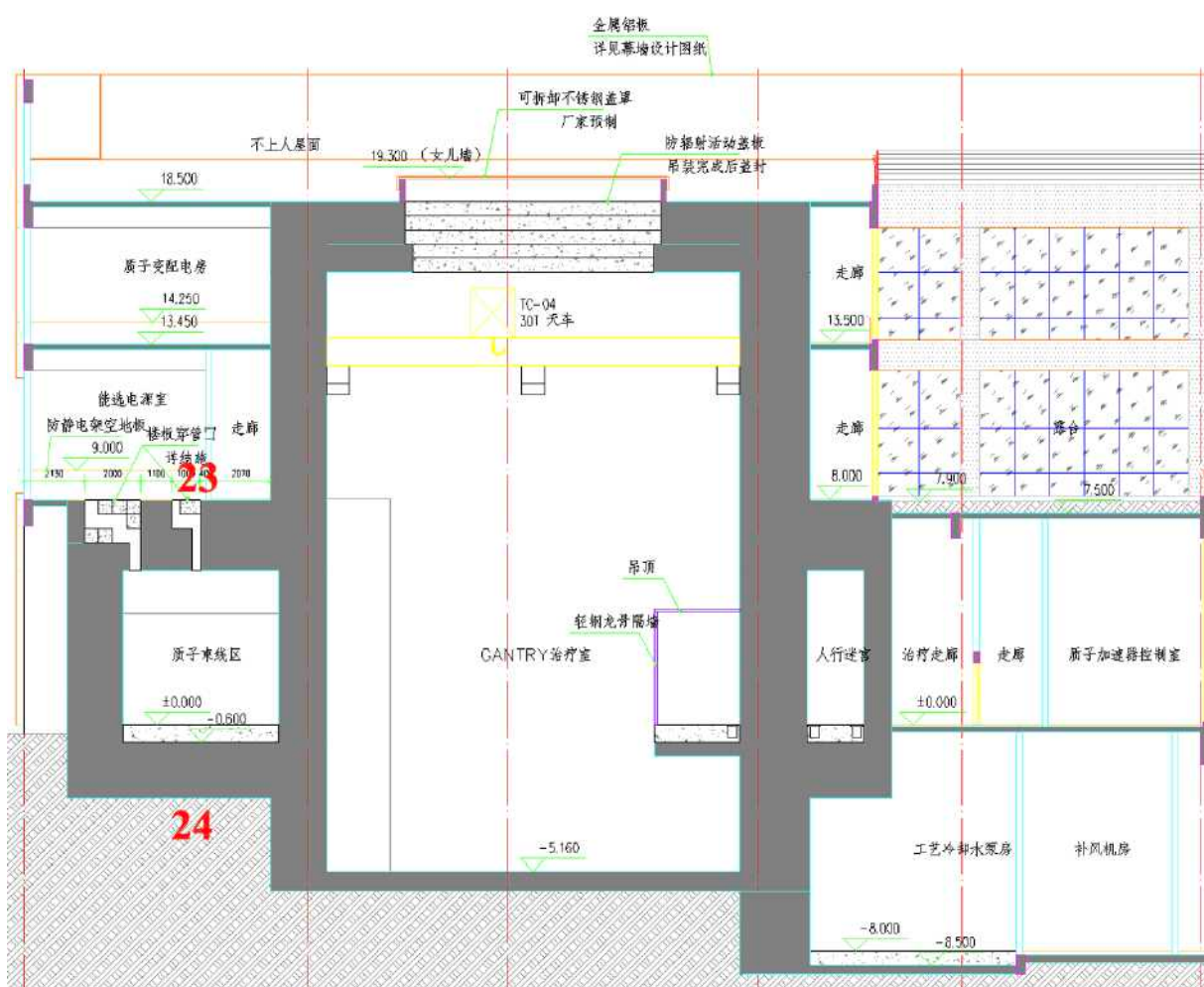


图 5-9 束线区顶层、底板关注点位置示意图

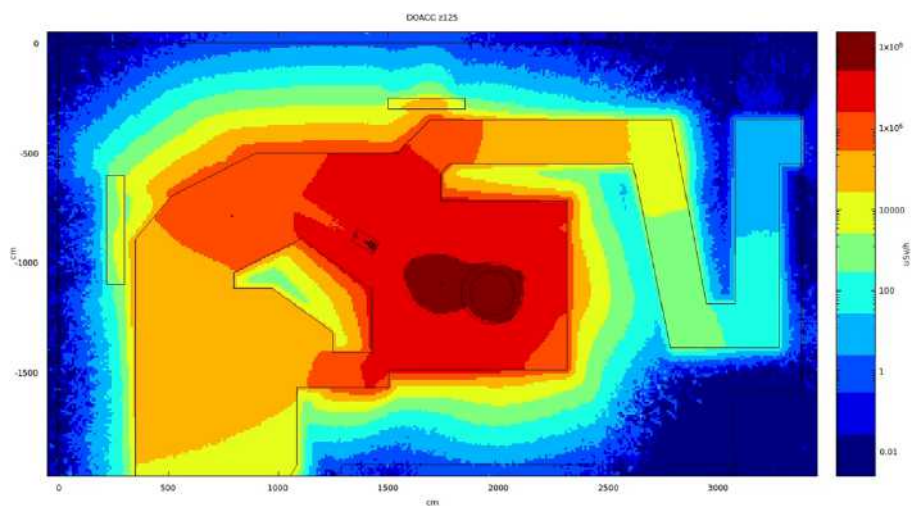


图 5-10 加速器大厅调试 1 工况束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

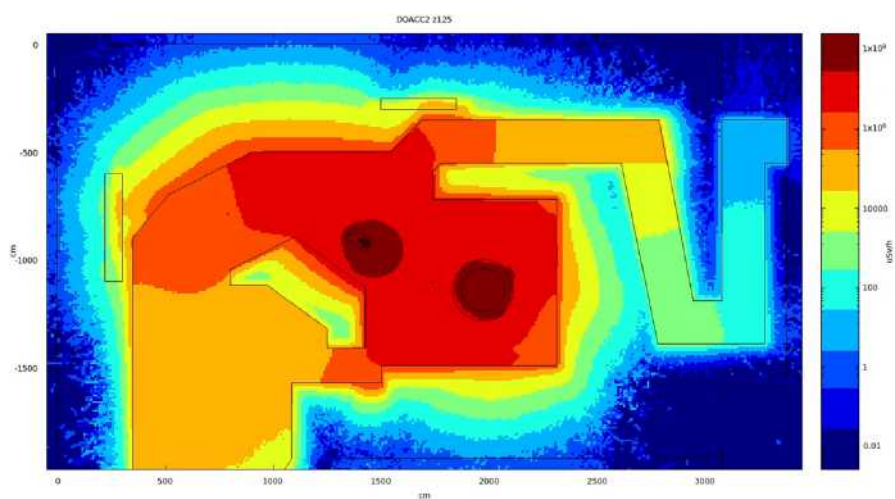


图 5-11 加速器大厅调试 2 工况束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

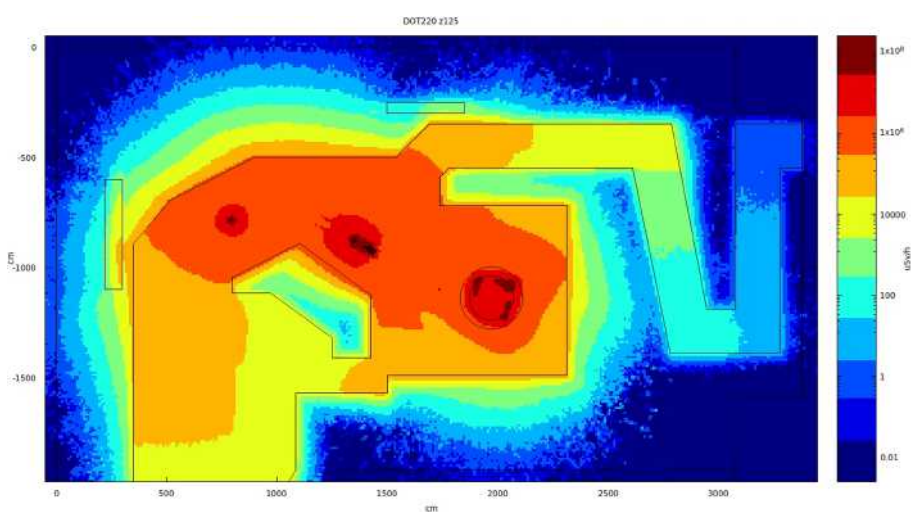


图 5-12 加速器大厅 220 MeV 治疗工况束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

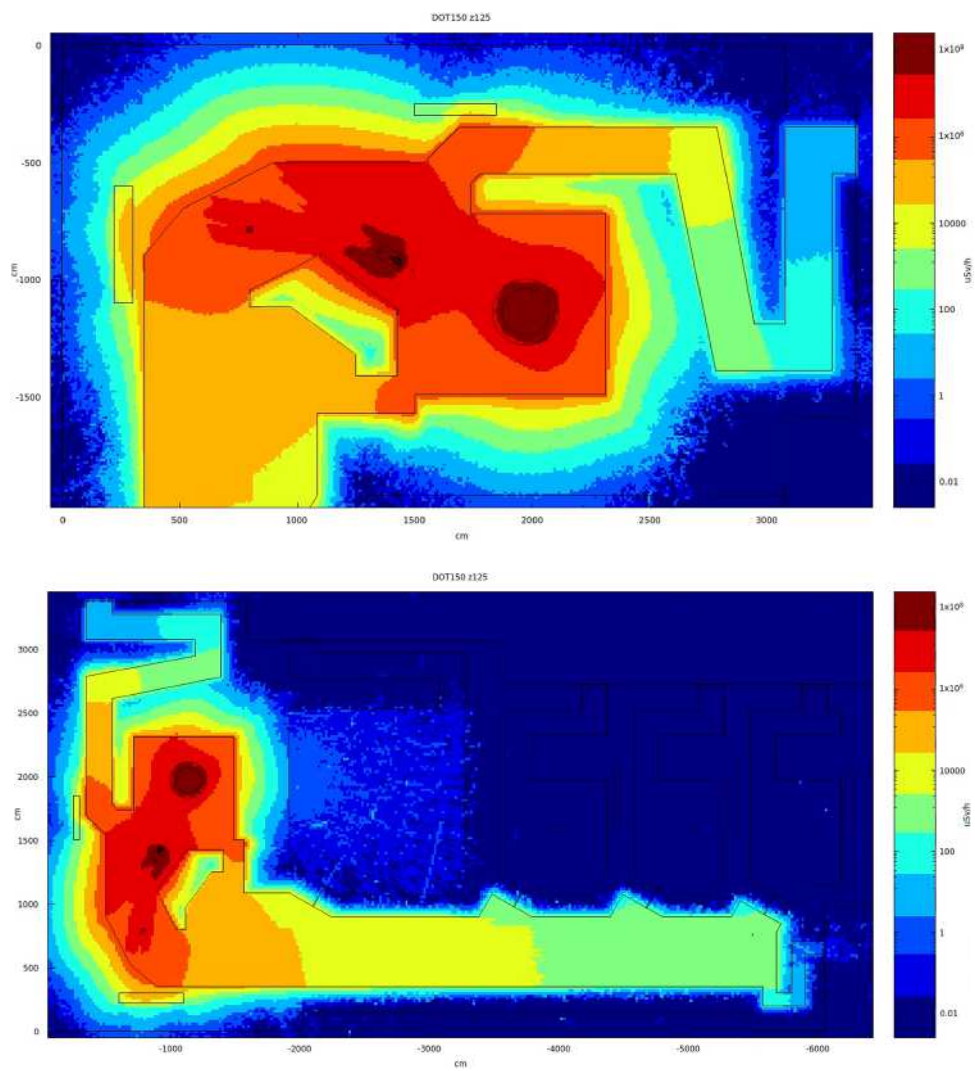


图 5-13 加速器大厅 150 MeV 治疗工况束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

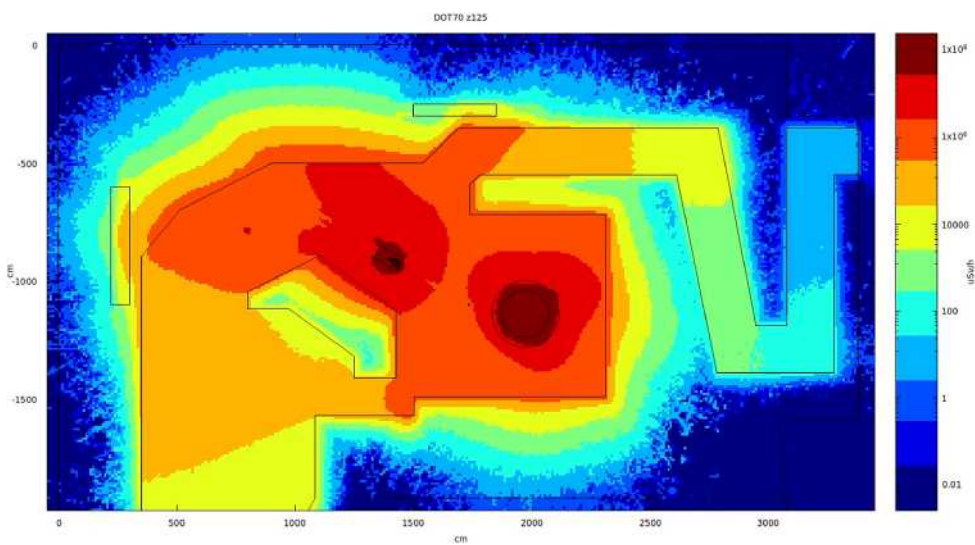


图 5-14 加速器大厅 70 MeV 治疗工况束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

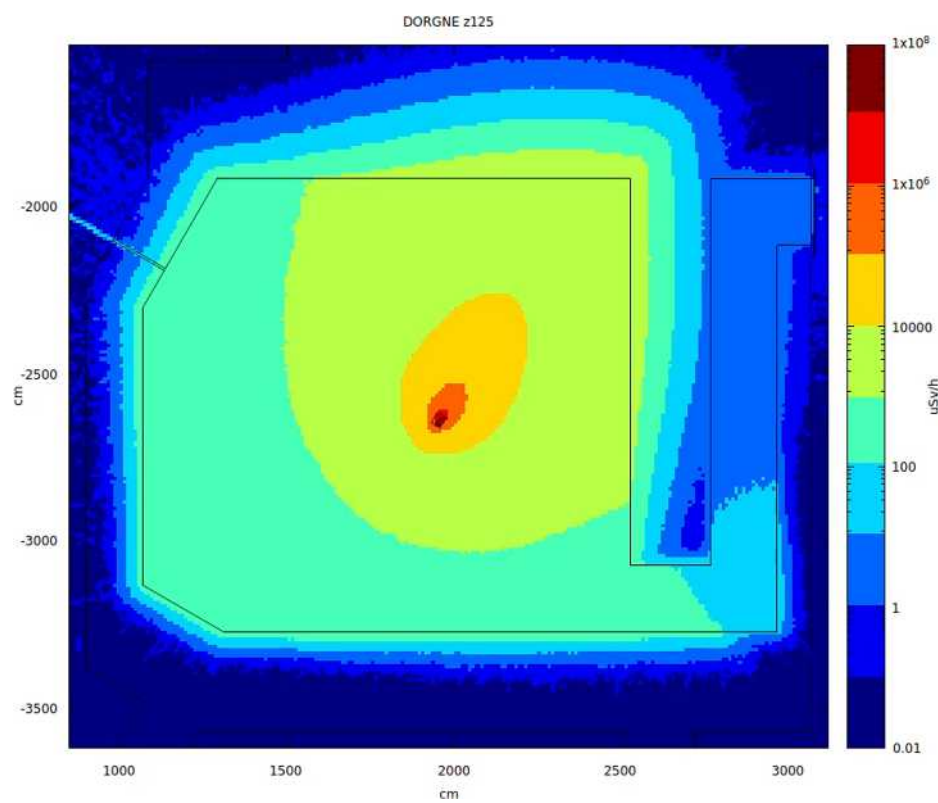


图 5-15 旋转束治疗室东北向出束束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

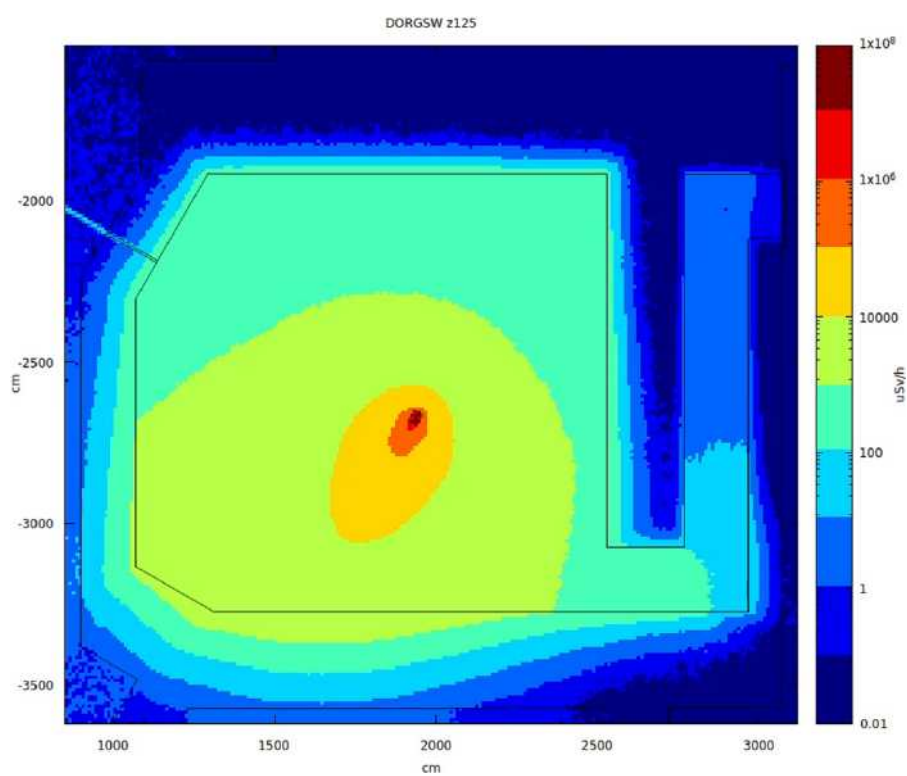


图 5-16 旋转束治疗室西南向出束束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

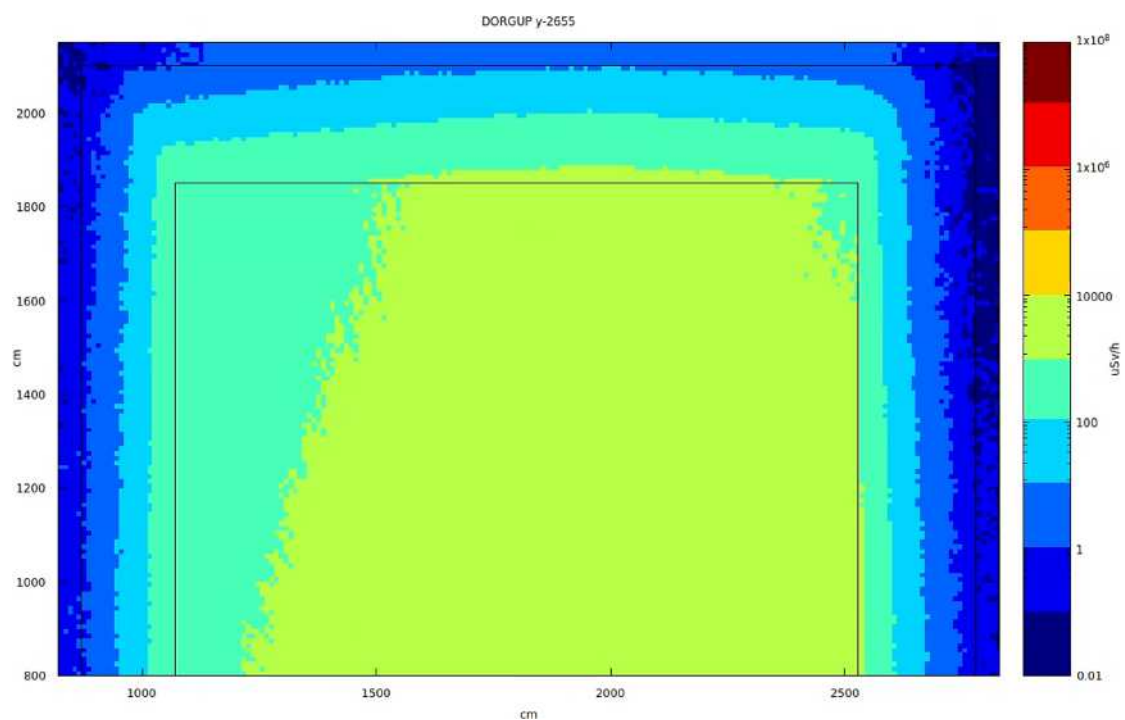


图 5-17 旋转束治疗室垂直向上出束束线所在平面处剂量率分布图

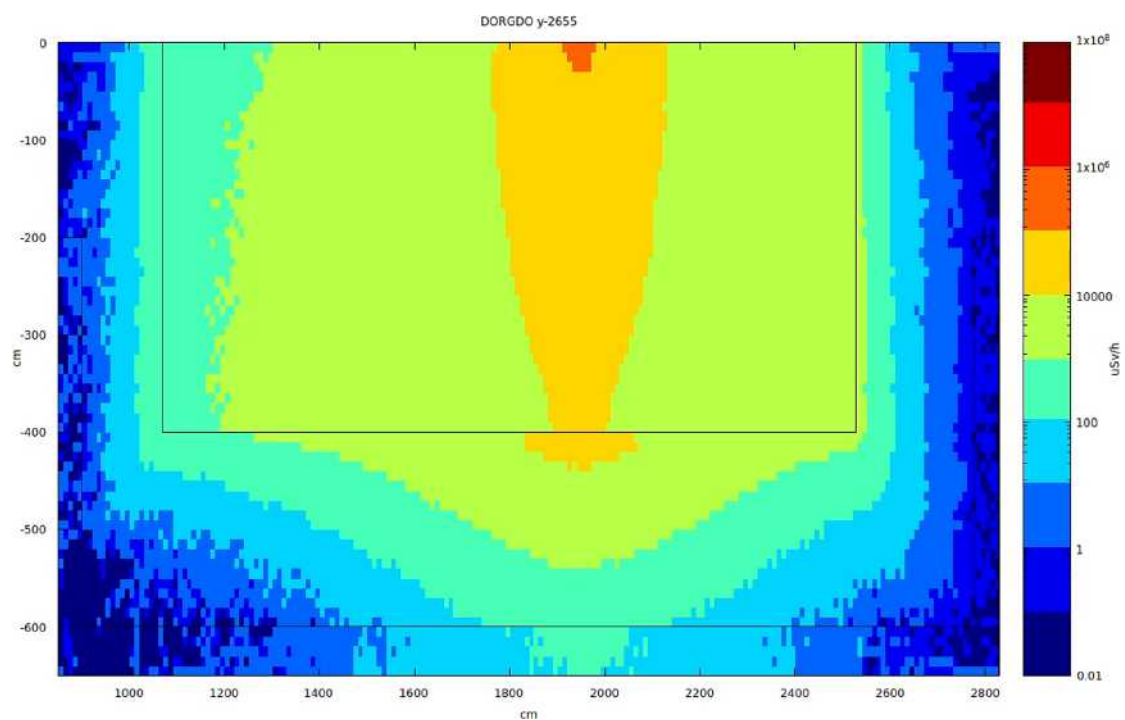


图 5-18 旋转束治疗室垂直向下出束束线所在平面处剂量率分布图

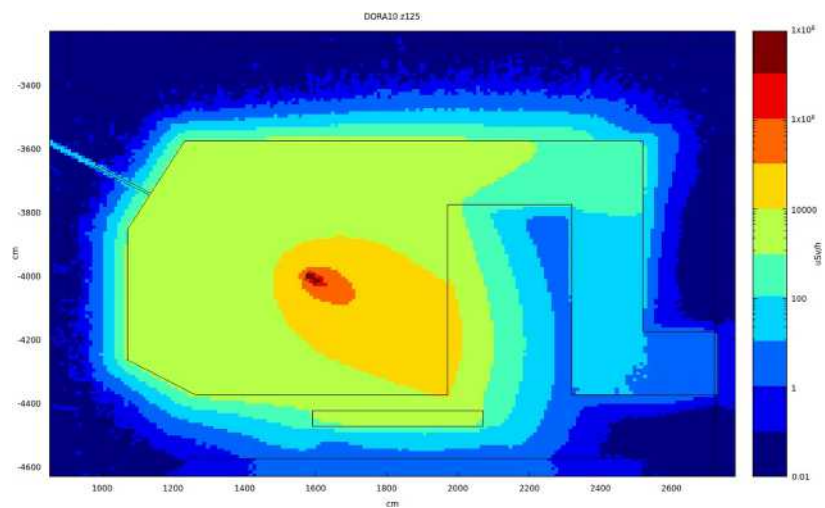


图 5-19 固定束治疗室 a 束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

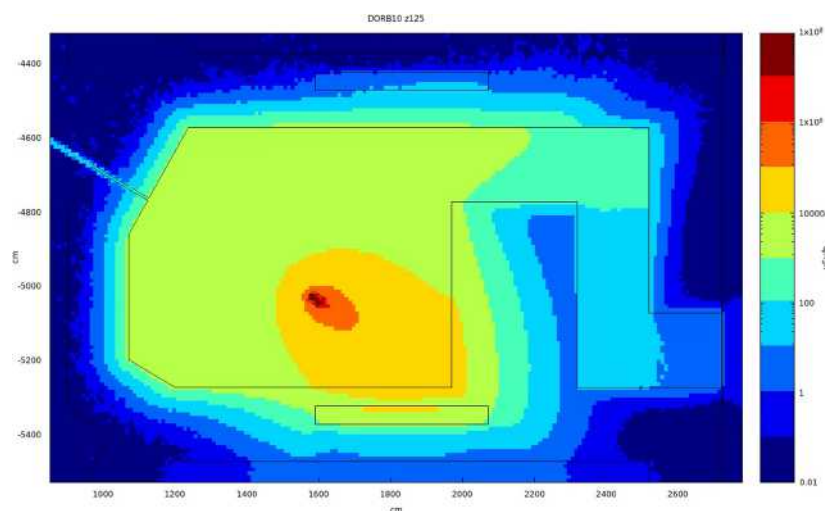


图 5-20 固定束治疗室 b 束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

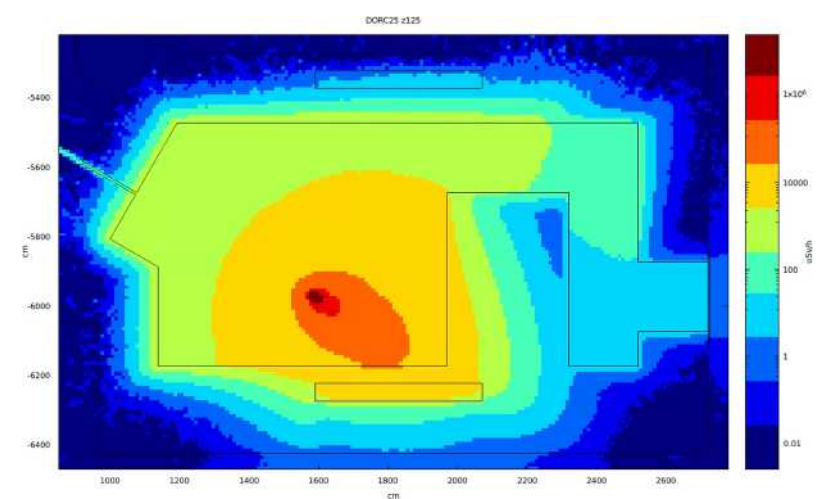


图 5-21 固定束治疗室 c 束线高度（1.25 m）处剂量率分布图

5.2.1.1.3 小结

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

5.2.1.2 质子治疗系统辐射工作人员年受照剂量估算

质子治疗系统辐射工作人员配备情况见表 3-7。

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质子治疗系统开机出束时产生的瞬发辐射照射，照射剂量可由下式进行计算：

$$H=D \times T \times t \quad (\text{公式 5.2.1.2-1})$$

式中，

H 为工作人员年受照剂量，mSv/a；

D 为工作人员所在区域剂量率，mSv/h；

T 为工作人员的居留因子；

t 为工作人员年受照时间，h/a。

5.2.1.2.1 技师

本项目配备技师 10 人，分两班，工作内容主要包括患者治疗前的模拟定位、在控制台处操作设备、在治疗室内部给患者摆位和操作 X 射线定位系统等工作。

5.2.1.2.1.1 模拟定位

在每名患者首次治疗前，技师需要在二层影像科的 CT 操作间内操作 CT 模拟定位机，对患者进行治疗前的模拟定位。每次模拟定位期间，CT 机出束时间约为 1min。此过程中主要受到相邻 CT 机房出束瞬发辐射的影响。本项目每年模拟定位人数约 1500 人。本项目技师分两班，保守考虑平均每名技师每年参与模拟定位的次数约为 750 次。由此可计算得出每位技师从事模拟定位期间的受照剂量，列于下表。

表 5-5 每名模拟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 ¹⁾ , mSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
CT 操作间	2.5E-03	12.5	3.13E-02

注：1) 根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020），CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h，屏蔽厚度铅当量不低于 2.5mmPb。本项目二层 CT 机房四周墙体屏蔽材料为 200mm 混凝土+2mmPb 硫酸钡水泥（150kV 管电压下等效约 4mmPb），观察窗和防护门的厚度为 4mmPb，均满足 GBZ130-2020 的要求，能够确保操作间内剂量率水平低于 2.5μSv/h。因此，操作间的剂量率水平保守取 2.5μSv/h。

5.2.1.2.1.2 质子治疗

（1）控制台

操作质子治疗系统出束对患者开展照射期间、操作图像引导系统的 X 射线球管出束期间，技师均位于治疗操作区的控制台处。由于 X 射线球管出束造成的辐射影响相比于质子出束造成的辐射影响，可忽略不计，因此保守均取质子出束时控制台处的剂量率进行计算。本项目技师分两班，保守考虑每名技师承担总工作量的一半，则其操作 X 射线球管的年工作量列于表 5-6，操作质子出束时间为 1833.33h 的一半即 916.67h，则其在控制台处工作期间的受照剂量估算结果列于表 5-7。

表 5-6 每名技师操作 X 射线球管的年工作量

单次治疗期间操作 X 射线球管的工作时间, min	年治疗总次数	操作 X 射线球管的年总工作时间, h	每名技师操作 X 射线球管的年工作时间, h
1	45000	750	375

表 5-7 每位技师在控制台处工作期间的受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平, mSv/h	受照时间, h		受照剂量, mSv/a
控制台	3.3E-04	质子出束	916.67	5.50E-01
		X 射线球管出束	375	

备注：控制台处的剂量率，按照关注点 Ra4 固定束治疗室 a 防护门外（走廊）的模拟结果 0.88μSv/h 按距离平方反比推算得到，为 $0.88 \times (11^2 \div 18^2) = 0.33\mu\text{Sv/h}$ 。

（2）治疗室内

技师在治疗室内的工作分为患者治疗前摆位和治疗后解除摆位两个过程。根据质子治疗系统规划的工作量，所有技师的年总工作量计算结果列于表 5-8。10 名技师分两班，共同分担 4 间治疗室的工作量，则平均每名技师的年工作量为总工作负荷的 1/8，具体计算列于表 5-9。

表 5-8 所有技师摆位的年工作量

单次治疗前摆位所需时间, min	年进行治疗前摆位总次数	年进行治疗前摆位总时间, h	单次解除摆位所需时间, min	年总进行解除摆位工作的次数	年进行解除摆位总时间, h
6	45000	4500	1	45000	750

表 5-9 每名技师摆位的年工作量

年进行治疗前摆位时间, h	年进行解除摆位时间, h
562.5	93.8

(1) 患者治疗前摆位

患者每次治疗前, 技师在治疗室接触的是未受到照射的患者, 该过程中技师所在区域的瞬时剂量率主要来自空气的感生放射性, 计算结果列于表 5-10。

表 5-10 患者治疗前摆位期间, 技师的年受照剂量

来源	剂量率, mSv/h	受照最大年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
空气感生放射性*	2.95E-05	562.5	1.66E-02

注: *空气感生放射性所致瞬时剂量率, 根据表 3-47 中治疗室内核素动态饱和活度浓度结合剂量转换因子计算而得。

(2) 患者治疗后解除摆位

患者每次治疗结束后, 技师需要进入治疗室内, 对患者解除摆位及谈话。此时, 患者自身由于受到质子束流的照射产生的感生放射性会对技师产生一定照射。解除摆位过程中, 技师与患者被照射部位的平均距离约为 0.5m。取表 3-69 中治疗结束停机 5min 距离患者表面 50cm 处摆位区的剂量率, 可计算得出每名技师由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量, 列于表 5-11。

表 5-11 每位技师由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量

来源	剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
患者	2.42E-02	93.8	2.27E+00
空气感生放射性	2.95E-05	93.8	2.77E-03
总计			2.27E+00

5.2.1.2.1.3 小结

每位技师年总受照剂量计算结果列于表 5-12。

表 5-12 每位技师年总受照剂量

技师工作内容		年受照剂量, mSv/a
模拟定位		3.13E-02
控制台处		5.50E-01
治疗室内	患者治疗前摆位	1.66E-02
	患者治疗后解除摆位	2.27E+00
总计		2.83E+00

5.2.1.2.2 物理师

物理师工作期间的受照剂量主要来自治疗计划验证和 QA 相关工作。

5.2.1.2.2.1 治疗计划验证

根据表 3-6, 质子治疗系统每年治疗患者人数 1500 人, 每个患者需进行 1 次治疗计划验证, 则物理师每年进行治疗计划验证 1500 次。根据表 3-7, 本项目共 8 名物理师, 则平均每名物理师每年进行治疗计划验证的次数约为 188 次。每次治疗计划验证的工作流程与技师开展治疗工作的流程基本一致。则每名物理师每年进行治疗计划验证工作的年总受照剂量计算结果列于表 5-13。

表 5-13 物理师进行治疗计划验证的年总受照剂量

工作区域	工作内容	剂量率水平, mSv/h	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a	年总受照剂量, mSv/a
控制台	质子出束	3.30E-04	6.3	3.45E-05	1.14E-01
	X 射线球管出束	3.30E-04	3.1	1.72E-05	
治疗室	治疗前摆位	2.95E-05	18.8	9.26E-06	
	治疗后解除摆位	2.42E-02	3.1	1.26E-03	

5.2.1.2.2.2 QA

根据表 3-6, 质子治疗系统每年 QA 总出束时间为 333.33h。QA 期间, 物理师的工作地点包括治疗室内部和控制台。平均每名物理师每年 QA 出束期间在控制台的时间约为 42h。根据估计, QA 期间每名物理师在治疗室内部工作的时间按每年 50h 考虑。则每名物理师 QA 年受照剂量估算结果列于表 5-14。

表 5-14 物理师 QA 年受照剂量计算结果

工作地点	剂量率, mSv/h	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
------	------------	----------	--------------

治疗室内部	2.42E-02	50	1.21E+00
控制台处	3.30E-04	42	1.39E-02
总计			1.22E+00

5.2.1.2.2.3 小结

根据上述计算结果，可得出每名物理师的年总受照剂量，列于表 5-15。

表 5-15 每名物理师的年总受照剂量

治疗计划验证, mSv/a	QA, mSv/a	总受照剂量, mSv/a
1.14E-01	1.22E+00	1.34E+00

5.2.1.2.3 护士

护士主要工作地点位于护士站，护士的年受照剂量计算结果见表 5-16。

表 5-16 护士年受照剂量计算结果

工作区域	剂量率水平 ¹⁾ , mSv/h	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
护士站	3.30E-04	1833.33	6.05E-01

注：1) 护士站处的剂量率保守取治疗操作区剂量率 3.30E-04μSv/h。

5.2.1.2.4 医师

质子科室医师的工作地点主要在二层门诊区办公室、诊室。医师进入治疗室内的情形通常为在患者首次治疗期间，进入治疗室内部参与治疗前的确认等相关工作；或是当患者发生紧急情况时，可能需要进入治疗室内急救。根据估计，每名医师每年进入治疗室内部进行治疗前确认和急救的时间分别不超过 100h、20h，由此可计算得出医师的年受照剂量，见表 5-17。

表 5-17 医师年受照剂量估算结果

工作内容	剂量率水平*, mSv/h	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
门诊办公	5.8E-04	1833.33	1.06E+00
患者治疗前确认	2.95E-05	100	2.95E-03
对开展患者急救	2.42E-02	20	4.83E-01
总计	—	—	1.55E+00

*注：门诊办公处的剂量率取关注点 R7（固定束治疗室顶板上方）的计算结果，为 0.58μSv/h；患者治疗前确认时，治疗室内剂量率水平主要考虑空气感生放射性所致剂量率；对患者开展急救时，治疗室内剂量率水平保守取表 3-69 中治疗后停机 5min 距离患者表面 50cm 处摆位区的剂量率。

5.2.1.2.5 工程师

本项目配备 2 名后勤保障工程师，其主要工作内容为质子治疗系统水电网络等日常基础维护保养。根据对工作量的估计，每名后勤保障工程师每年在质子治疗室内的工作时间不超过 50h，由此可计算得出工程师的年受照剂量，列于表 5-18。

表 5-18 后勤保障工程师的年受照剂量

工作区域	剂量率水平, mSv/h	受照时间, h	受照剂量, mSv/a
质子治疗室内	2.95E-05	50	1.48E-03

5.2.1.2.6 质子治疗系统工作人员受照剂量汇总

质子治疗系统辐射工作人员受照剂量汇总如下表 5-19 所示。由计算结果可知，质子治疗系统运行期间，辐射工作人员年受照剂量最大值为 2.83mSv/a（技师），低于本项目工作人员剂量约束值 5mSv/a。

表 5-19 本项目质子治疗系统运行期间对工作人员所致年受照剂量汇总

人员类别	从事本项目工作期间的受照剂量, mSv/a
技师	2.83E+00
物理师	1.34E+00
护士	6.05E-01
医师	1.55E+00
工程师	1.48E-03

5.2.1.3 质子治疗系统公众年受照剂量估算

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外照射以及感生放射性气体的排放。

5.2.1.3.1 瞬发辐射造成的辐射剂量

瞬发辐射主要影响对象质子治疗系统辐射工作场所周围近距离范围内的公众，根据本项目质子治疗系统工作场所周围环境公众可达区的分布情况，可能受到瞬发辐射影响的公众主要为质子区域门厅等候区、示范中心北侧道路、西侧道路及南侧道路的公众（示范中心东侧道路距离质子治疗区较远，中间间隔硼中子俘获治疗区、放药制

备区等，质子治疗系统对该处的瞬发辐射影响可忽略不计）。上述公众所受瞬发辐射照射剂量可参照公式 5.2.2-1 计算。计算结果列于表 5-20。

表 5-20 质子治疗系统公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

公众所在位置	居留因子	剂量率水平，μSv/h	年受照时间，h	年受照剂量，mSv/a
质子区域门厅等候区	1/20	0.31	458.33	1.72E-02
示范中心北侧道路	1/40	1.15	1833.33	5.25E-02
示范中心北侧道路	1/40	0.47	1833.33	2.15E-02
示范中心南侧道路	1/40	0.13	458.33	1.48E-03

备注：（1）质子区域门厅等候区剂量率由关注点 Rb4 计算结果 0.75μSv/h 按距离平方反比推算得到，为 $0.75 \times (9.7^2 \div 15^2) = 0.31 \mu\text{Sv/h}$ ；
 （2）示范中心北侧道路剂量率由关注点 1 计算结果 2.40μSv/h 按距离平方反比推算得到，为 $2.40 \times (11.4^2 \div 16.5^2) = 1.15 \mu\text{Sv/h}$ ；
 （3）示范中心北侧道路剂量率由关注点 2 计算结果 1.34μSv/h 按距离平方反比推算得到，为 $1.34 \times (6.1^2 \div 10.3^2) = 0.47 \mu\text{Sv/h}$ ；
 （4）示范中心南侧道路剂量率由关注点 Rc3 计算结果 1.41μSv/h 按距离平方反比推算得到，为 $1.41 \times (3.6^2 \div 11.9^2) = 0.13 \mu\text{Sv/h}$ ；
 （5）距离由 CAD 图纸量取；
 （6）加速器大厅及束线区源项年出束时间为 1833.33h，治疗室源项年出束时间为 458.33h。

5.2.1.3.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用 IAEA NO.19 技术报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》中推荐的简单稀释模式，估算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。

表 5-21 质子治疗系统放射性排风口参数

排风高度，m	最靠近关注点的建筑物的最大截面积 A _b ，m ²	临近最高建筑物高度 H _b ，m
23	2806	101.9（晋江市医院妇幼健康服务大楼）

5.2.1.3.2.1 空气浸没外照射

由表 5-21 可知，质子治疗机房排风口高度 $H < 2.5H_b$ （临近最高建筑物高度）：

1）与排风口近距离范围内的公众， $x \leq 2.5 \sqrt{A_b}$ （ $x \leq 132\text{m}$ ）

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

$$c_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (5.2.1.3.2.1-1)$$

式中，

$C_{a,i}$ 为距离排风口 x 米处核素 i 的地面空气浓度， Bq/m^3 ；

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率， Bq/s ，见表 3-48；

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

u_a 为释放高度上年平均风速， m/s ，取值 $2m/s$ ；

K 为经验常数， m ，取值 $K=1m$ 。

2) 与排风口距离 $x > 2.5\sqrt{A_b}$ ($x > 132m$)

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

$$c_{a,i} = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \quad (5.2.1.3.2.1-2)$$

式中：

B 为在下风距离 x 处的高斯扩散因子， $1/m^2$ ；由下式 5.2.3.2.1.1-3 计算。

σ_z 为垂直扩散参数， m ，

$$B = \frac{16}{\sqrt{2\pi^3}} \frac{1}{x \sum z}, \sum z = \sigma_z^2 + A_b / \pi^{0.5}, \sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \quad (5.2.1.3.2.1-3)$$

各关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-22。

表 5-22 各关注点处地面空气浓度计算结果，单位： Bq/m^3

关注点	与排风口距离 x , m	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar
-----	------------------	----------	----------	----------	-----------

示范中心北侧道路	60	5.21E+01	7.98E+01	8.72E+01	1.66E+01
示范中心西侧道路	15	5.21E+01	7.98E+01	8.72E+01	1.66E+01
示范中心南侧道路	20	5.21E+01	7.98E+01	8.72E+01	1.66E+01
示范中心东侧道路	120	5.21E+01	7.98E+01	8.72E+01	1.66E+01

空气浸没外照射剂量可由下式 5.2.3.2.1.1-4 计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \quad (5.2.1.3.2.1-4)$$

式中：

H_A 为空气浸没照射所致年有效剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；取值 $3.15E+07s$ ；

S_f 为建筑物屏蔽因子，本次评价取 1；

G 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-23，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子。

表 5-23 剂量转换因子

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

空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-24。

表 5-24 空气浸没外照射剂量计算结果，Sv/a

关注点	与排风口距离 x, m	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	⁴¹ Ar	总计
示范中心北侧道路	60	2.01E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.31E-06
示范中心西侧道路	15	2.01E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.31E-06
示范中心南侧道路	20	2.01E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.31E-06
示范中心东侧道路	120	2.01E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.31E-06

5.2.1.3.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由式 5.2.3.2.1.2-1 计算：

$$H_{h-i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \quad (5.2.1.3.2.2-1)$$

式中：

H_{h-i} 为吸入内照射所致年有效剂量，Sv/a；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m³/h，成人：1.2m³/h；

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

吸入内照射剂量计算结果见表 5-25。

表 5-25 吸入内照射剂量计算结果，Sv/a

关注点	与排风口距离 x, m	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	⁴¹ Ar	总计
示范中心北侧道路	60	2.46E-07	/	/	/	2.46E-07
示范中心西侧道路	15	2.46E-07	/	/	/	2.46E-07
示范中心南侧道路	20	2.46E-07	/	/	/	2.46E-07
示范中心东侧道路	120	2.46E-07	/	/	/	2.46E-07

5.2.1.3.2.3 空气浸没外照射及吸入内照射合计受照剂量

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 5-26。

表 5-26 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果，Sv/a

关注点	与排风口距离 x, m	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	⁴¹ Ar	总计
示范中心北侧道路	60	2.25E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.56E-06
示范中心西侧道路	15	2.25E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.56E-06
示范中心南侧道路	20	2.25E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.56E-06
示范中心东侧道路	120	2.25E-06	3.08E-06	3.38E-06	8.50E-07	9.56E-06

5.2.1.3.3 小结

综合考虑质子治疗系统瞬发辐射、天空反散射和感生放射性气体排放的影响，公众年受照剂量汇总结果具体见表 5-27。由计算结果可知，质子治疗系统运行期间对公众所致的最大个人剂量为 8.76E-02mSv/a，低于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-27 公众受照剂量汇总，mSv/a

关注点/人群	受照途径			总计，mSv/a
	瞬发辐射， mSv/a	天空反散射， mSv/a	放射性气体， mSv/a	
质子区域门厅等候区	1.72E-02	/	/	1.72E-02
示范中心北侧道路	5.25E-02	2.55E-02	9.56E-03	8.76E-02
示范中心西侧道路	2.15E-02	2.55E-02	9.56E-03	5.66E-02
示范中心南侧道路	1.48E-03	2.55E-02	9.56E-03	3.65E-02
示范中心东侧道路	/	2.55E-02	9.56E-03	3.51E-02

5.2.2 硼中子俘获治疗装置

5.2.2.1 BNCT 屏蔽体外剂量率计算

5.2.2.1.1 计算方法

本次评价根据治疗工况下束损参数，采用 DROSG-2000 获得 2.6 MeV 质子打锂靶后不同群结构的角中子谱，并设置标准 BSA 模型，计算了硼中子俘获治疗装置屏蔽体周围辐射剂量率分布情况。因治疗室 1 与治疗室 2 的束流损失参数、布局、屏蔽方案完全一致，因此可计算其中一间治疗室出束的情况，作为两间治疗室屏蔽体外剂量率结果，本次选取位于加速器大厅南侧的治疗室 2 计算。

屏蔽计算依据的束流损失参数见表 3-10，屏蔽体材质及厚度见表 4-7。建立的计算模型见图 5-22 至图 5-27。

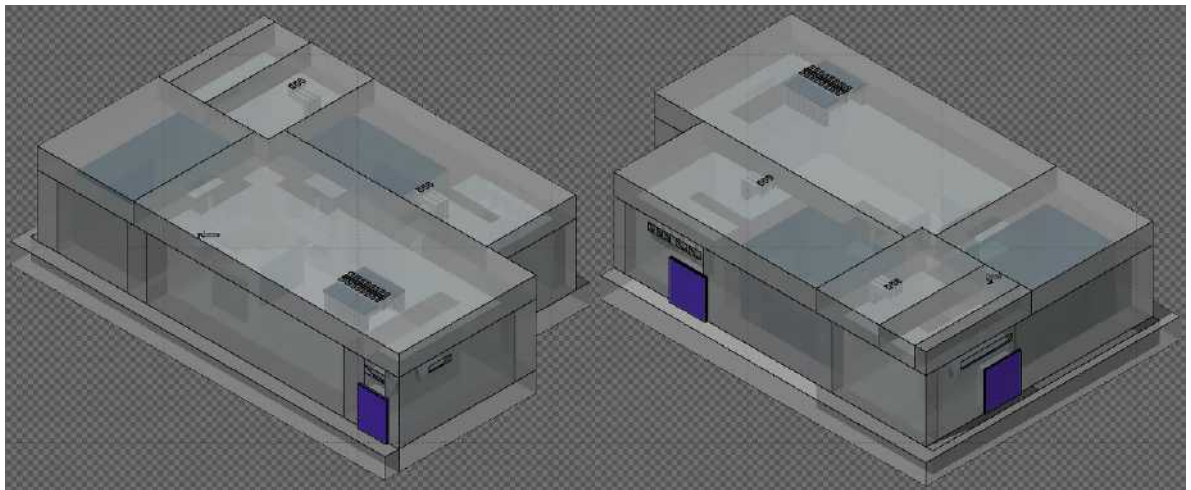


图 5-27 硼中子俘获治疗装置屏蔽体建模立体效果图

5.2.2.1.2 计算结果

硼中子俘获治疗装置各关注点剂量率计算结果见表 5-28~表 5-30。辐射剂量率分布见图 5-28~图 5-35。

表 5-28 BNCT 加速器大厅向南朝治疗室 2 打靶各关注点剂量率计算结果

关注点编号	加速器大厅周围关注点位置	屏蔽体外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
1	西墙外治疗室 1 主室	BSA 区域最大 2.00, 除 BSA 区域最大 0.90
2	西墙外吊装大厅	0.008
3	东墙外医护走廊	0.30
4	北墙外消防通道	0.68
5	东北侧防护门外	0.59
6	北墙 V 型穿墙管出口	0.75
7	防护门上方 V 型穿墙管出口	1.00
8	顶板除穿墙管区域	0.34
9	顶板穿墙管出口	4.85
10	底板下空腔	除集水井处最大 1.36, 集水井处最大 123.55

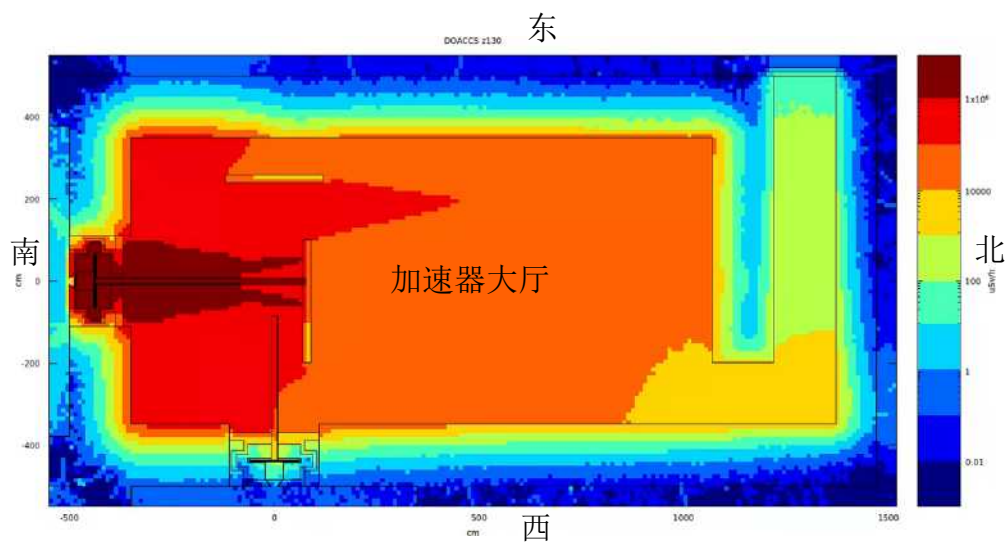


图 5-28 BNCT 加速器大厅向南朝治疗室 2 打靶束线高度平面剂量率分布图

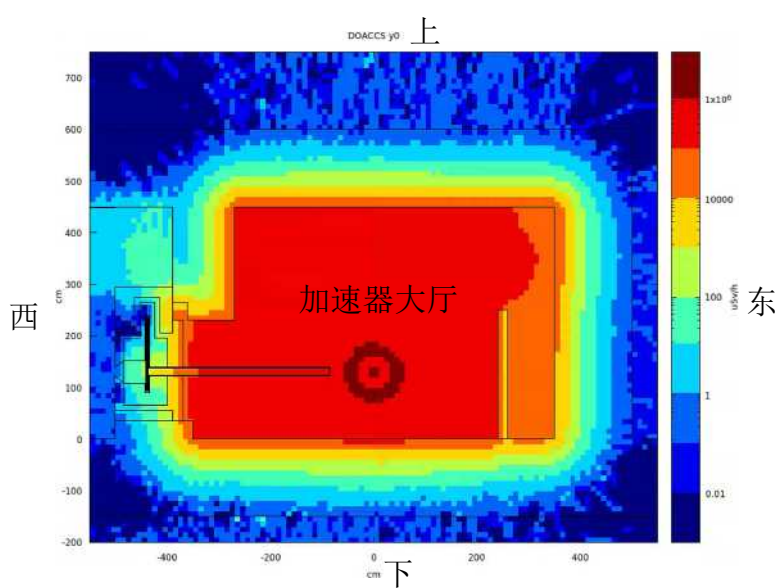


图 5-29 BNCT 加速器大厅向南朝治疗室 2 打靶东西剖面剂量率分布图

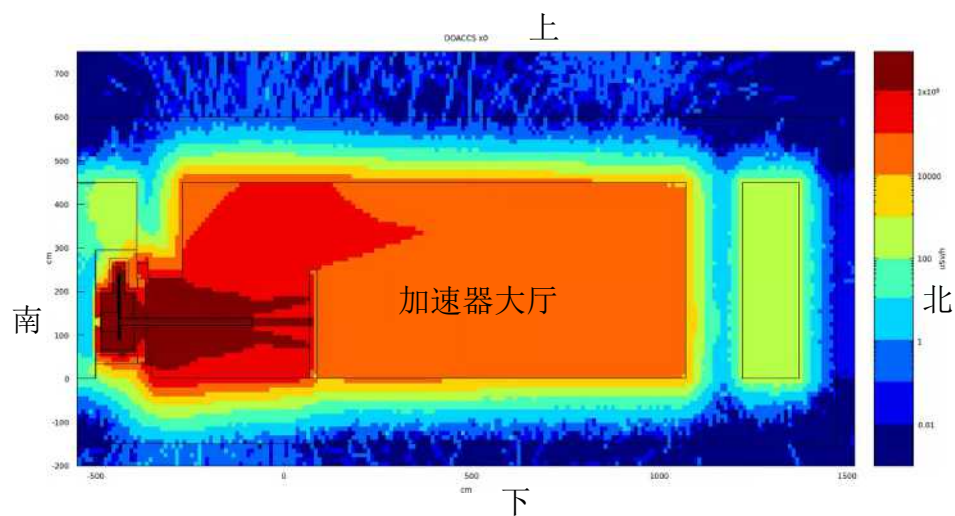


图 5-30 BNCT 加速器大厅向南朝治疗室 2 打靶南北剖面剂量率分布图

表 5-29 BNCT 加速器大厅向西朝治疗室 1 打靶各关注点剂量率计算结果

关注点编号	加速器大厅周围关注点位置	屏蔽体外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
1	南墙外治疗室 2 主室	BSA 区域最大 2.61, 除 BSA 区域最大 1.02
2	西墙外吊装大厅	0.01
3	东墙外医护走廊	0.31
4	北墙外消防通道	0.61
5	东北侧防护门外	0.85
6	北墙 V 型穿墙管出口	1.16
7	防护门上方 V 型穿墙管出口	1.58
8	顶板除穿墙管区域	0.17
9	顶板穿墙管出口	4.77
10	底板下空腔	除集水井处最大 1.21, 集水井处最大 136.08

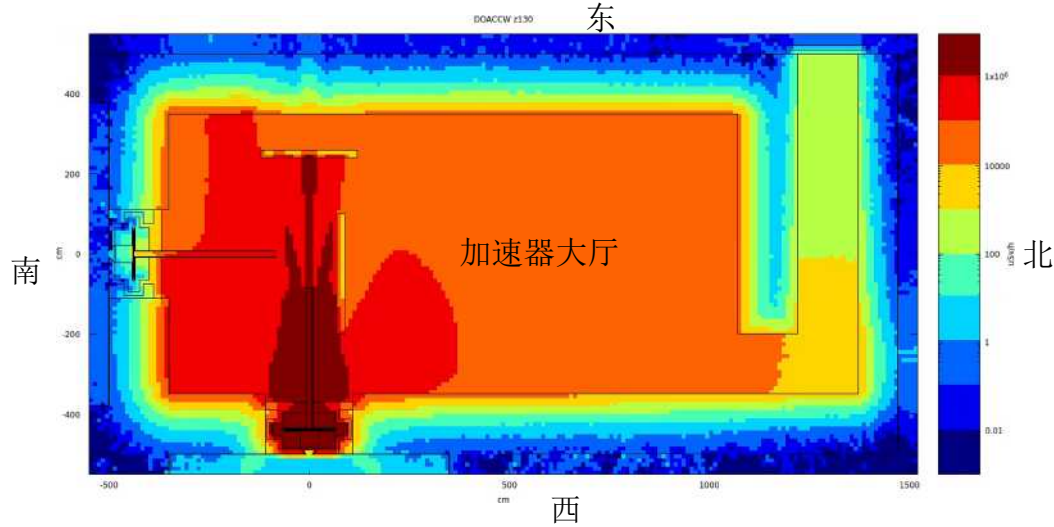


图 5-31 BNCT 加速器大厅向西朝治疗室 1 打靶束线高度平面剂量率分布图

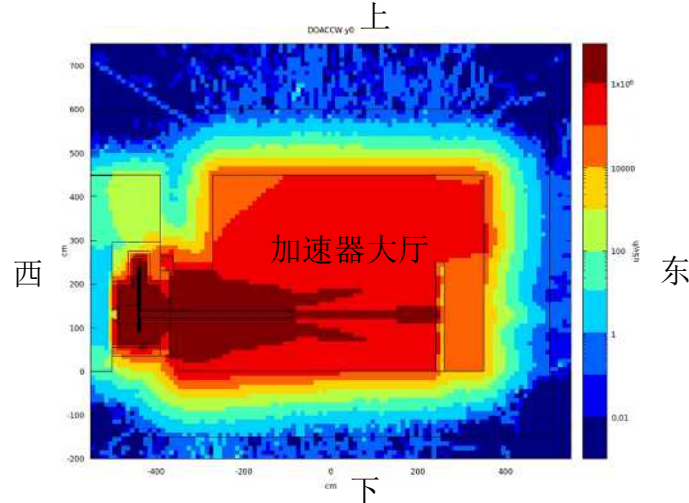


图 5-32 BNCT 加速器大厅向西朝治疗室 1 打靶东西剖面剂量率分布图

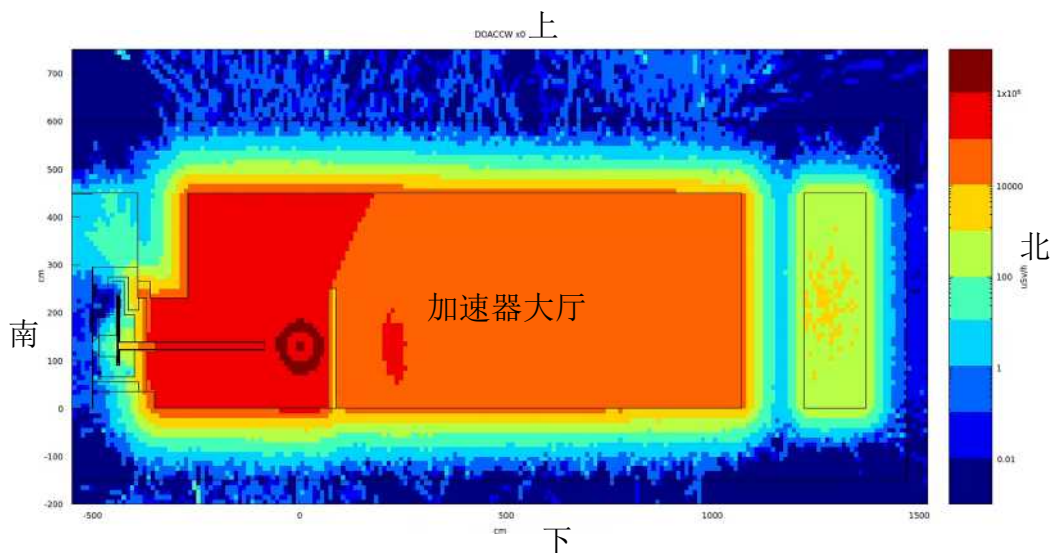


图 5-33 BNCT 加速器大厅向西朝治疗室 1 靶南北剖面剂量率分布图

表 5-30 各治疗室出束周围关注点剂量率计算结果

关注点 编号	治疗室 1 周围关注点位置	治疗室 2 周围关注点位置	剂量率, μSv/h
1	主室南墙外治疗室 2 摆位区	主室东墙外医护走廊	0.46
2	主室西墙外治疗走廊	主室南墙外治疗走廊	0.72
3	摆位区北墙外吊装大厅	摆位区西墙外治疗走廊	0.70
4	摆位区西墙外治疗走廊	摆位区南墙外治疗走廊	0.15
5	防护门外	防护门外	0.91
6	摆位区南墙 V 型穿墙管出口	摆位区西墙 V 型穿墙管出口	2.04
7	顶板除穿墙管区域	顶板除穿墙管区域	0.01
8	顶板穿墙管出口	顶板穿墙管出口	1.77
9	底板下空腔	底板下空腔	0.59

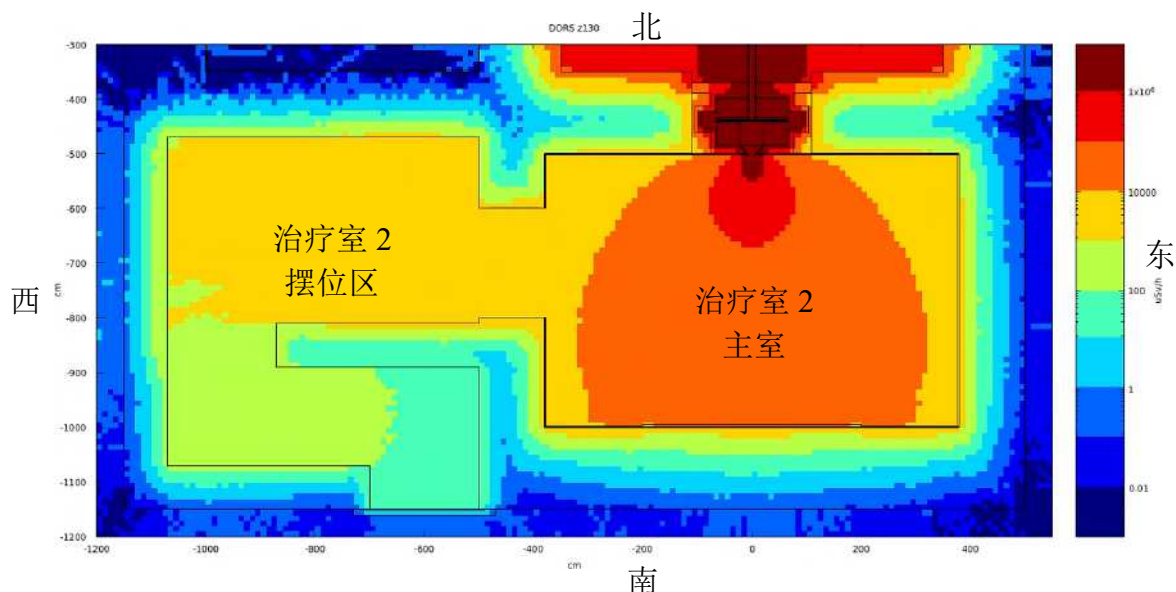


图 5-34 BNCT 治疗室 2 出束时束线高度平面剂量率分布图

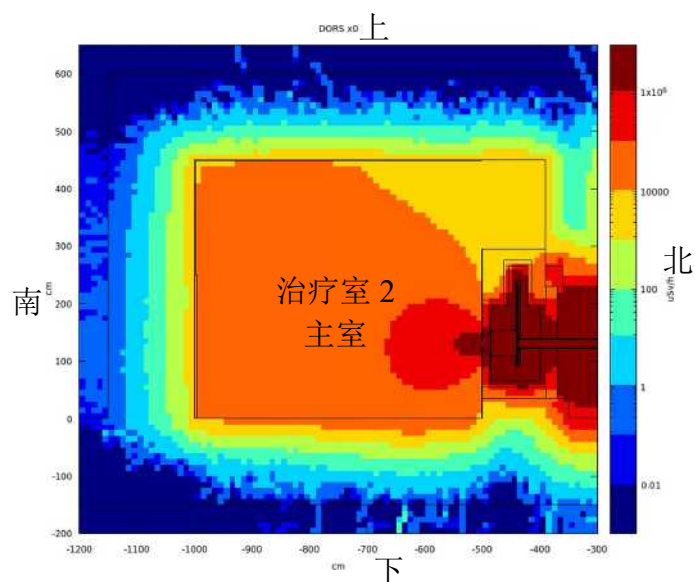


图 5-35 BNCT 治疗室 2 出束时南北剖面剂量率分布图

5.2.2.2 BNCT 辐射工作人员年受照剂量估算

本项目硼中子俘获治疗装置辐射工作人员的配备计划见表 3-12。

5.2.2.2.1 治疗技师

治疗技师的工作内容主要包括在治疗室给患者摆位/解除摆位以及在控制室内操作设备。

5.2.2.2.1.1 治疗室内摆位/解除摆位

治疗技师在治疗室内的受照剂量来自患者治疗前摆位和治疗后解除摆位两个过程。根据 BNCT 满负荷运行情况下规划的工作量，每年共治疗 2000 人次，所有治疗技师的年总工作量计算结果列于表 5-31。共 4 名治疗技师，2 人一组轮班，每名治疗技师的年工作量列于表 5-32。

表 5-31 所有 BNCT 治疗技师摆位的年工作量

单次治疗前摆位所需时间，min	年进行治疗前摆位总次数	年进行治疗前摆位总时间，h	单次解除摆位所需时间 ¹ ，min	年总进行解除摆位工作的次数	年进行解除摆位总时间，h
10	2000	333.3	2	2000	66.7

表 5-32 每名 BNCT 治疗技师摆位的年工作量

年进行治疗前摆位总时间, h	年进行解除摆位总时间, h
166.7	33.3

(1) 患者治疗前摆位

患者每次治疗前, 治疗技师在治疗室接触的是未受到照射的患者, 该过程中治疗技师所在区域的瞬时剂量率主要来自相邻治疗室出束的照射, 具体数值和计算结果列于下表。

表 5-33 BNCT 患者治疗前摆位期间, 治疗技师的年受照剂量

来源	瞬时剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/h
相邻治疗室 ¹	1.02E-03	166.7	1.70E-01

注: 1. 相邻正在执行治疗任务的治疗室所致的瞬时剂量率, 取表 5-29 中“治疗室 2 主室除 BSA 区域”处的剂量率 1.02 μ Sv/h。

(2) 患者治疗后解除摆位

患者每次治疗结束后, 治疗技师需要进入治疗室内, 对患者解除摆位。此时, 患者自身由于受到粒子束流照射产生的感生放射性会对治疗技师产生一定照射。根据第三章表 3-79 的计算结果, 停止照射 10 分钟后病人体表 0.5m 处剂量为 11 μ Sv/h。由此可计算得出每间治疗室每名治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量, 结果列于下表。

表 5-34 每位 BNCT 治疗技师由于对患者进行解除摆位所致的年受照剂量

来源	瞬时剂量率, mSv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/h
患者	1.10E-02	33.3	3.67E-01
相邻治疗室	1.02E-03	33.3	3.40E-02
总计	——	——	4.01E-01

5.2.2.2.1.2 治疗控制室内操作

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

表 5-35 BNCT 治疗技师在治疗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	受照时间 ² , h	受照剂量, mSv/h
控制室	7.20E-04	500	3.60E-01

注：1.治疗控制室内的剂量率水平保守取表 5-30 中与之距离较近的“治疗室 1 主室西墙外治疗走廊”的剂量率 $0.72\mu\text{Sv/h}$ ；

2.BNCT 每年治疗总出束时间为 1000h，治疗技师共 4 人轮班，每班 2 人，因此每人受照时间约为 500h。

5.2.2.2.1.3 小结

每位 BNCT 治疗技师年最大受照剂量计算结果列于下表。

表 5-36 每位 BNCT 治疗技师最大年总受照剂量估算结果

来源	最大年受照剂量, mSv/a
治疗前摆位	1.70E-01
治疗后解除摆位	4.01E-01
治疗控制室内操作	3.60E-01
总计	9.31E-01

5.2.2.2.2 物理师

物理师受照剂量主要来自其在治疗计划验证和 QA 工作期间：

(1) 治疗计划验证

本项目 BNCT 每年总治疗患者人数为 2000 人次。

BNCT 共配备 4 名物理师，4 人轮班，2 人一组。每名患者进行 1 次治疗计划验证，因此每年进行治疗计划验证次数为 2000 次，则每名物理师每年进行治疗计划验证次数为 1000 次。每次治疗计划验证流程与正式治疗基本一致，因此可认为物理师每次治疗计划验证的受照剂量与每次治疗期间技师的受照剂量基本一致。由表 5-36 保守推算，技师单次工作受照剂量为 $9.31\text{E-}01\text{mSv/a} \div 1000 = 9.31\text{E-}04\text{mSv/次}$ ，则每名物理师每年进行治疗计划验证期间的受照剂量计算结果列于下表。

表 5-37 BNCT 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	9.31E-04	1000	9.31E-01

(2) QA

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

表 5-38 BNCT 物理师 QA 工作期间年受照剂量算结果

工作地点	剂量率 ¹ , mSv/h	年工作时间 ² , h	年受照剂量, mSv/a
治疗室内	1.02E-03	250	2.55E-01
治疗控制室	7.20E-04	250	1.80E-01
总计	——	——	4.35E-01

注:1. 物理师在治疗室内工作时，治疗室内剂量率主要考虑相邻治疗室出束所致的瞬时剂量率，取表 5-29 中“治疗室 2 主室除 BSA 区域”处的剂量率 1.02μSv/h；治疗控制室内的剂量率水平保守取表 5-30 中与之距离较近的“治疗室 1 主室西墙外治疗走廊”的剂量率 0.72μSv/h。

2.根据工作负荷规划，每间治疗室 QA 出束时间为 250h，2 间治疗室的 QA 年总出束时间为 500h。共 4 名物理师，2 人一组，则每名物理师的年 QA 时间为 250h。

(3) 小结

根据上述计算结果，可得出物理师的年受照剂量，列于下表。

表 5-39 BNCT 物理师的年受照剂量

治疗计划验证, mSv/a	QA, mSv/a	总受照剂量, mSv/a
9.31E-01	4.35E-01	1.37E+00

5.2.2.2.3 医生

BNCT 医生的工作地点主要在医生办公室，仅在临床试验期间以及治疗室内出现突发状况时会进入治疗室内部，平均每名医生在治疗室内部的工作时间不会超过 30h/年。由于医生办公室距离治疗室较远，因此主要考虑医生在治疗室内的受照情况，则医生年受照剂量估算结果列于下表。

表 5-40 BNCT 医生年受照剂量估算结果

工作地点	辐射来源	剂量率水平, mSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
治疗室	相邻治疗室	1.02E-03	30	3.06E-02
	患者感生放射性	1.10E-02		3.30E-01
总计	——	——	——	3.61E-01

5.2.2.2.4 护士

BNCT 护士共 4 人轮班，2 人一组，负责患者引导、硼浓度测量、患者转移，工作地点主要位于注射观察室、治疗室、等候室、留观室，主要考虑其转移治疗后患者时近距离接触治疗后患者的受照情况。保守估计每名护士近距离接触每名治疗后患者的时间约 2min，每人负责 1000 名患者则年总受照时间为 h，则每名护士的最大年受照剂量计算结果列于下表。

表 5-41 护士年受照剂量估算结果

工作内容	剂量率, mSv/h	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
患者转移	1.10E-02	33.3	3.67E-01

5.2.2.2.5 BNCT 工作人员受照剂量汇总

BNCT 辐射工作人员受照剂量汇总如下表所示。由计算结果可知，本项目 BNCT 运行期间，BNCT 物理师受照剂量最大，个人年最大有效剂量为 1.37mSv/a，未超过本次评价中工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-42 BNCT 运行期间对工作人员所致年受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量, mSv/a
治疗技师	9.31E-01
物理师	1.37E+00
科室医生	3.61E-01
护士	3.67E-01

5.2.2.3 BNCT 公众年受照剂量估算

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

5.2.2.3.1 瞬发辐射照射

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

表 5-43 公众所受 BNCT 瞬发辐射外照射剂量计算结果

周围环境	剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$	居留因子	出束时间, h/a	年有效剂量, mSv
吊装大厅	0.01	1/16	1500	9.38E-04

5.2.2.3.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

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

根据 BNCT 空气感生放射性计算结果，放射性气体对公众的照射途径主要考虑 Ar-41 的空气浸没外照射。计算时主要关注排风口近距离范围内公众的受照剂量。

表 5-44 BNCT 放射性排风口参数

排风高度/m	最靠近关注点的建筑物的最大截面积 $A_b/(\text{m}^2)$	临近最高建筑物高度 H_b/m
23	2806	101.9（晋江市医院妇幼健康服务大楼）

由表 5-44 所示，BNCT 排风口高度 $H < 2.5H_b$ （ H_b 为临近最高建筑物高度），对于近距离范围的公众，根据 IAEA NO.19 号报告，当 $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$ （ $X \leq 208\text{m}$ ）时，关注点地面空气浓度可由下式计算：

$$c_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (5.2.2.3.2-1)$$

式中：

$C_{a,i}$ 为距离排风口 x 米处核素 i 的地面空气浓度， Bq/m^3 ；

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率， Bq/s ，见表 3-73；

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 0.25；

u_a 为释放高度上年平均风速， m/s ，取值 2m/s ；

K 为经验常数， m ，取值 $K=1\text{m}$ 。

则 BNCT 排风口周围地面空气浓度计算结果列于下表。

表 5-45 各关注点处地面空气浓度计算结果，Bq/m³

关注点	⁴¹ Ar
与排风口距离 x=0~208m	2.50E-02

空气浸没外照射剂量可由下式计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \quad (5.2.2.3.2-2)$$

式中：

H_A 为空气浸没照射所致年有效剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；取值 3.15E+07s；

S_F 为建筑物屏蔽因子，本次评价取 1；

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

T 为居留因子，保守取 1。

表 5-46 剂量转换因子

核素	剂量转换因子
	空气浸没，(Sv/s)/(Bq/m ³)
⁴¹ Ar	6.50E-14

空气浸没外照射剂量计算结果见下表。

表 5-47 空气浸没外照射剂量计算结果，Sv/a

关注点	⁴¹ Ar
与排风口距离 x=0~208m	3.21E-09

5.2.2.3.3 BNCT 公众受照剂量汇总

BNCT 公众受照剂量计算结果汇总见下表。

表 5-48 BNCT 公众受照剂量汇总，mSv/a

辐射源项	年有效剂量，mSv
瞬发辐射	9.38E-04
感生放射性气体排放	3.21E-06
总计	9.41E-04

由上表可知，BNCT 正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 $9.41\text{E}-04\text{mSv/a}$ ，低于公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

5.2.3 直线加速器

5.2.3.1 直线加速器屏蔽体外剂量率计算

5.2.3.1.1 计算依据

本次评价主要采用《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）、《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）及 NCRP NO.151 号报告中推荐的计算方法，对直线加速器机房进行屏蔽核算。

本项目三间直线加速器机房均属于 L 型迷路、有用线束不向迷路照射的情形。计算时保守取直线加速器最高能量 6MV、等中心最大输出剂量率 1400cGy/min （ 840Gy/h ）的参数进行计算。

5.2.3.1.2 机房不同位置应考虑辐射束

- ①主屏蔽区：考虑有用线束的直接照射；
- ②与主屏蔽区直接相连的次屏蔽区：考虑有用线束水平照射或向顶照射时的患者散射辐射，以及加速器的泄漏辐射；
- ③侧屏蔽墙：考虑加速器的泄漏辐射；
- ④迷路外墙：考虑加速器的泄漏辐射；
- ⑤迷路入口：本项目属于加速器能量 $<10\text{MV}$ 、有用线束不向迷路内墙照射的情景，主要考虑有用线束水平照射时的患者一次散射辐射（根据 GBZ/T 201.2-2011，此项可作为迷路入口辐射剂量率的近似估计），以及穿过迷路内墙的泄漏辐射。

5.2.3.1.3 计算方法

(1) 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），主屏蔽墙半宽利用下式计算。

(1) 内凸

$$Y = (100 + a + X_2) \lg 14^\circ + 30$$

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。

(2) 外凸

$$Y = (100 + a + X_1 + X_2) \lg 14^\circ + 30$$

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。

根据图示，本项目三间直加机房水平方向的东西两侧主屏蔽墙均按内凸考虑，主屏蔽墙宽度=2× $Y_{\text{内凸}}$ ；顶屏蔽墙按一侧内凸、一侧外凸考虑，主屏蔽墙宽度= $Y_{\text{内凸}}$ + $Y_{\text{外凸}}$ 。

(2) 屏蔽透射因子

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL}$$

$$X_e = X \cdot \sec\theta$$

式中,

B 为辐射屏蔽透射因子;

X_e 为有效屏蔽厚度, cm;

X 为屏蔽物质厚度, cm;

θ 为斜射角, 即入射线与屏蔽物质平面的垂直线之间的夹角;

TVL_1 和 TVL 为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度, cm; 见表 5-49。

表 5-49 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	TVL ₁	TVL
有用线束	6MV	37	33	5.7	5.7
90°泄漏辐射	6MV	34	29	5.7	

备注: 表中数据取自 NCRP NO.151 中附录 B.2、B.7。

(3) 有用线束和泄漏辐射

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B$$

式中,

$\dot{H}$ 为屏蔽体外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

$\dot{H}_0$ 为加速器有用线束中心轴上距产生 X 射线束的靶 1m 处的常用最高剂量率, $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$;

R 为辐射源点 (靶点) 至关注点的距离, m;

f 对有用束为 1; 对泄漏辐射为泄漏辐射比率, 取 0.001。

(4) 散射辐射

$$\dot{H}_S = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^2} \cdot B$$

式中,

$\dot{H}_S$ 为散射辐射剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

α_{ph} 为患者 400cm^2 面积上的散射因子, 与入射的 X 射线能量及散射角有关;

F 为治疗装置有用束在等中心处的最大治疗野面积, 保守取最大面积 $40 \times 40\text{cm}^2$;

R_s 为患者 (位于等中心点) 至关注点的距离, m 。

(5) 迷路入口剂量率

$$\dot{H}_{sg} = \frac{\alpha_{ph} \left(\frac{F}{400} \right)}{R_1^2} \cdot \frac{\alpha_2 \cdot A}{R_2^2} \cdot \dot{H}_0$$

式中,

$\dot{H}_{sg}$ 为迷路入口的散射辐射剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

α_2 为砼墙入射的患者散射因子;

A 为散射面的面积, m^2 ;

R_1 为等中心点至散射面的距离, m ;

R_2 为散射面至迷路入口的距离, m 。

$$\dot{H}_g = \dot{H}_{sg} \cdot 10^{- (X/TVL)} + \dot{H}_{og}$$

式中,

$\dot{H}_g$ 为迷路入口总剂量率, $\mu\text{Sv/h}$;

X 为防护门铅屏蔽厚度, cm ;

TVL 为 0.5cm (铅);

$\dot{H}_{og}$ 为靶点穿过迷路内墙的泄漏辐射在迷路入口处的剂量率。

5.2.3.1.4 计算结果

三间直线加速器机房的屏蔽尺寸及结构基本一致，各关注点及照射路径见图 5-36、图 5-37；主屏蔽墙宽度核算参数及结果见表 5-50；屏蔽体外各关注点剂量率计算参数及结果见表 5-51~表 5-53；迷路入口处的剂量率计算参数及结果见表 5-54。由计算结果可知，直线加速器机房屏蔽体外剂量率均低于剂量率控制水平。

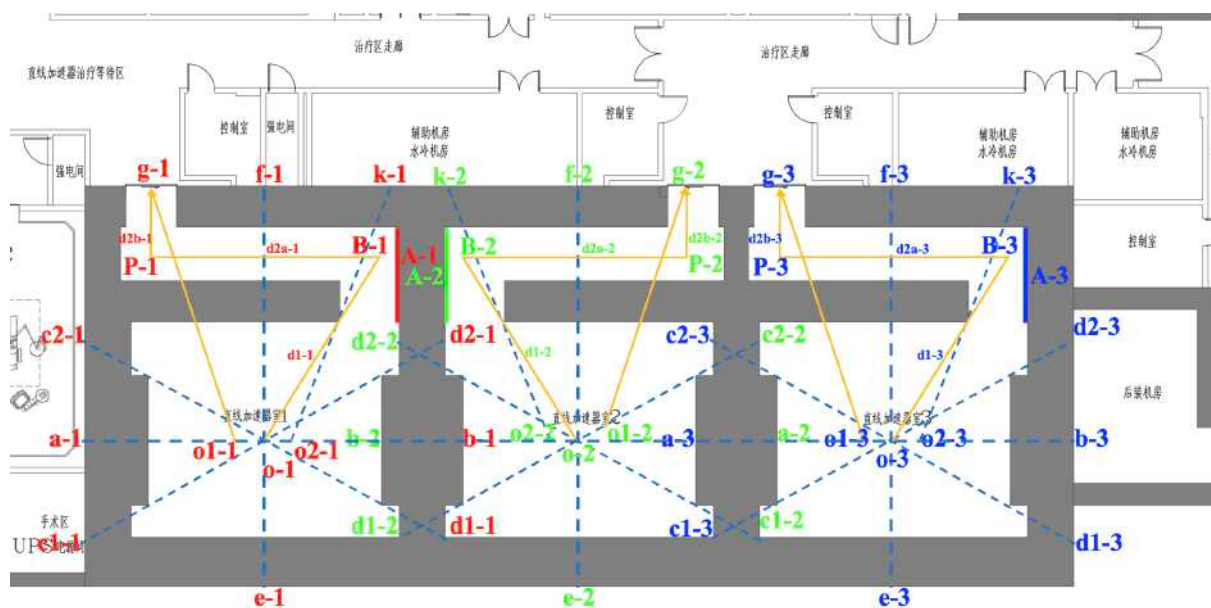


图 5-36 直线加速器机房关注点及照射路径平面示意图

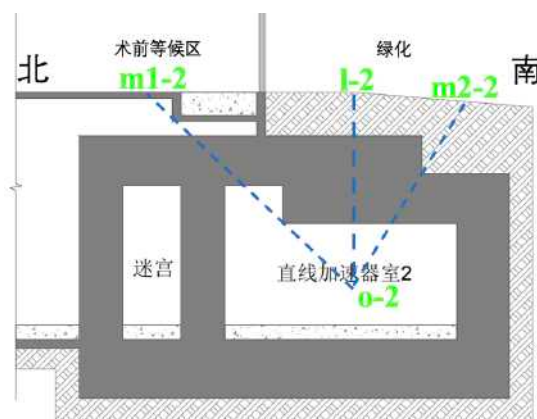


图 5-37 直线加速器机房关注点及照射路径剖面示意图（以直加机房 2 为例）

表 5-50 直加机房主屏蔽墙宽度核算结果

主屏蔽墙位置	a, cm	X ₁ , cm	X ₂ , cm	tan14°	内凸半宽, cm	外凸半宽, cm	主屏蔽宽计算结果, cm	实际宽度, cm	是否满足
直加机房 1 东西主屏蔽墙	432.5	/	65	0.2493	179	/	358	480	是
直加机房 2 东西主屏蔽墙	432.5	/	65	0.2493	179	/	358	480	是
直加机房 3 东西主屏蔽墙	432.5	/	65	0.2493	179	/	358	480	是
直加机房 1 顶部主屏蔽墙	222	170	130	0.2493	143	185	328	480	是
直加机房 2 顶部主屏蔽墙	222	170	130	0.2493	143	185	328	480	是
直加机房 3 顶部主屏蔽墙	222	170	130	0.2493	143	185	328	480	是

备注：根据图示，本项目三间直加机房水平方向的东西两侧主屏蔽墙均按内凸考虑，主屏蔽墙宽度=2×Y_{内凸}；顶屏蔽墙按一侧内凸、一侧外凸考虑，主屏蔽墙宽度=Y_{内凸}+Y_{外凸}。

表 5-51 直线加速器机房 1 关注点剂量率计算结果

关注点	周围环境	射线类型	X _e , cm	透射因子 B	H ₀ , μSv/h	R, m	H, μSv/h	合计, μSv/h
a-1	手术室	主束	235	1.00E-07	8.4E+08	7.98	1.32E+00	1.32E+00
b-1	直加 2	主束	300	1.07E-09	8.4E+08	8.63	1.21E-02	1.21E-02
l-1	车道	主束	300	1.07E-09	8.4E+08	8.02	1.40E-02	1.40E-02
c1-1、 c2-1	UPS 电源间、手术室	泄漏	195	2.81E-07	8.4E+08	7.95	3.73E-03	8.39E-03
		散射	195	3.16E-08	8.4E+08	7.95	4.66E-03	
d1-1、 d2-1	直加 2	泄漏	195	2.81E-07	8.4E+08	7.95	3.73E-03	8.39E-03
		散射	195	3.16E-08	8.4E+08	7.95	4.66E-03	
m1-1、 m2-1	家属等候区、绿化	泄漏	200	1.89E-07	8.4E+08	7.80	2.61E-03	5.71E-03
		散射	200	2.03E-08	8.4E+08	7.80	3.11E-03	
f-1	直加 1 控制室	泄漏	300	6.72E-11	8.4E+08	9.70	6.00E-07	6.00E-07
e-1	土层	泄漏	180	9.24E-07	8.4E+08	5.70	2.39E-02	2.39E-02
k-1	辅助机房、水冷机房	泄漏	162	3.86E-06	8.4E+08	10.40	3.00E-02	3.00E-02
g-1	直加 1 防护门外	泄漏	170（砼） +1.5（铅）	1.11E-06	8.4E+08	11.00	7.74E-03	7.74E-03

表 5-52 直线加速器机房 2 关注点剂量率计算结果

关注点	周围环境	射线类型	X _e , cm	透射因子 B	H ₀ , μSv/h	R, m	H, μSv/h	合计, μSv/h
a-2	直加 3	主束	300	1.07E-09	8.4E+08	8.63	1.21E-02	1.21E-02
b-2	直加 1	主束	235	1.00E-07	8.4E+08	7.98	1.32E+00	1.32E+00
l-2	绿化	主束	300	1.07E-09	8.4E+08	8.02	1.40E-02	1.40E-02
c1-2、 c2-2	直加 3	泄漏	195	2.81E-07	8.4E+08	7.95	3.73E-03	8.39E-03
		散射	195	3.16E-08	8.4E+08	7.95	4.66E-03	
d1-2、 d2-2	直加 2	泄漏	195	2.81E-07	8.4E+08	7.95	3.73E-03	8.39E-03
		散射	195	3.16E-08	8.4E+08	7.95	4.66E-03	
m1-2、 m2-2	术前等候区、绿化	泄漏	200	1.89E-07	8.4E+08	7.80	2.61E-03	5.71E-03
		散射	200	2.03E-08	8.4E+08	7.80	3.11E-03	
f-2	直加 2 控制室	泄漏	300	6.72E-11	8.4E+08	9.70	6.00E-07	6.00E-07
e-2	土层	泄漏	180	9.24E-07	8.4E+08	5.70	2.39E-02	2.39E-02
k-2	辅助机房、水冷机房	泄漏	162	3.86E-06	8.4E+08	10.40	3.00E-02	3.00E-02

g-2	直加 2 防护门外	泄漏	170 (砼) +1.5 (铅)	1.11E-06	8.4E+08	11.00	7.74E-03	7.74E-03
-----	-----------	----	---------------------	----------	---------	-------	----------	----------

表 5-53 直线加速器机房 3 关注点剂量率计算结果

关注点	周围环境	射线类型	X_e , cm	透射因子 B	H_0 , $\mu\text{Sv/h}$	R, m	H, $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$
a-3	直加 2	主束	235	1.00E-07	8.4E+08	8.63	1.13E+00	1.13E+00
b-3	后装机房	主束	300	1.07E-09	8.4E+08	7.98	1.42E-02	1.42E-02
l-3	运动负荷室	主束	300	1.07E-09	8.4E+08	8.02	1.40E-02	1.40E-02
c1-3、 c2-3	直加 2	泄漏	195	2.81E-07	8.4E+08	7.95	3.73E-03	8.39E-03
		散射	195	3.16E-08	8.4E+08	7.95	4.66E-03	
d1-3、 d2-3	后装机房、土层	泄漏	195	2.81E-07	8.4E+08	7.95	3.73E-03	8.39E-03
		散射	195	3.16E-08	8.4E+08	7.95	4.66E-03	
m1-3、 m2-3	核医学科走廊、绿化	泄漏	200	1.89E-07	8.4E+08	7.80	2.61E-03	5.71E-03
		散射	200	2.03E-08	8.4E+08	7.80	3.11E-03	
f-3	直加 3 控制室	泄漏	300	6.72E-11	8.4E+08	9.70	6.00E-07	6.00E-07
e-3	土层	泄漏	180	9.24E-07	8.4E+08	5.70	2.39E-02	2.39E-02
k-3	辅助机房、水冷机房	泄漏	162	3.86E-06	8.4E+08	10.40	3.00E-02	3.00E-02
g-3	直加 3 防护门外	泄漏	170 (砼) +1.5 (铅)	1.11E-06	8.4E+08	11.00	7.74E-03	7.74E-03

表 5-54 直线加速器机房迷路入口的散射辐射剂量率 H_{sg} 数值计算结果

参数	直线加速器 1	直线加速器 2	直线加速器 3
H_{sg} , $\mu\text{Sv/h}$	2.02E+02	2.02E+02	2.02E+02
H_0 , $\mu\text{Sv/h}$	8.40E+08	8.40E+08	8.40E+08
F, cm^2	1600	1600	1600
α_{ph}	1.39E-03	1.39E-03	1.39E-03
α_2	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02
A, m^2	16.8	16.8	16.8
R_1 , m	8.1	8.1	8.1
R_2 , m	11.4	11.4	11.4

备注：1. α_{ph} 值取自 GBZ/T 201.2-2011 附录 B 表 B.2，6MV、45° 散射角的值；

2. α_2 值取自 GBZ/T 201.2-2011 附录 B 表 B.6，入射角 45°、反射角 0°、0.5MeV 的值。

表 5-55 直线加速器机房防护门外总剂量率计算结果

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
迷道入口处的散射辐射 H_{sg} , $\mu\text{Sv/h}$	2.02E+02	2.02E+02	2.02E+02
铅防护门厚度, cm	1.5	1.5	1.5
TVL_{Pb} , cm	0.5	0.5	0.5
经防护门铅屏蔽后的 H_{sg} , $\mu\text{Sv/h}$	2.02E-01	2.02E-01	2.02E-01
迷道入口处的泄漏辐射 H_{og} , Sv/h	7.74E-03	7.74E-03	7.74E-03
防护门外散射辐射和泄漏辐射总剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	2.10E-01	2.10E-01	2.10E-01

11.1.1.2 直线加速器辐射工作人员及公众受照剂量估算

直线加速器的年使用规划列于下表。

表 5-56 三台直线加速器的年使用计划

序号	内容	单位	直加 1	直加 2	直加 3
1	每室每天常规治疗人次	人次/d/室	24	24	24
2	每人次常规治疗平均出束时间	min/人次	2	2	2
3	每室每天调强治疗人次	人次/d/室	56	56	56
4	每人次调强治疗平均出束时间	min/人次	3	3	3
5	每室每天治疗人次	人/室	80	80	80
6	每室每年治疗天数	天/a/室	250	250	250
7	每室每年治疗人次	人次/a/室	20000	20000	20000
8	每室每年 QA 出束时间	h/a/室	100	100	100
9	每室每年治疗+QA 出束时间	h/a/室	1000	1000	1000
10	年总出束时间	h/a	3000		

直线加速器、后装治疗机和大孔径 CT 均属于放疗科设备，共用一套辐射工作人员。此处先开展直线加速器对人员的剂量估算，后文将对直线加速器、后装治疗机和大孔径 CT 所致剂量进行叠加汇总。

表 5-57 直加、后装、大孔径 CT 工作人员规划

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、急救室	4 人	每天两班，8h/班
物理师	制定并验证治疗计划，定期质控等	物理师办公室、直加机房及控制室、后装机房及控制室	4 人	每天两班，8h/班
技师	CT 模拟定位、摆位、解除摆位等	CT 模拟定位机房及控制室、直加机房及控制室、后装机房及控制室、技师办公室	8 人	每天两班，8h/班
护士	治疗准备、注射、护理等	CT 模拟定位机房及控制室、注射室、护士站	4 人	每天两班，8h/班
工程师	设备日常运维	设备间、工程师办公室	2 人	每天两班，8h/班
总计			22 人	/

5.2.3.2 直线加速器辐射工作人员年受照剂量估算

5.2.3.2.1 医生

直线加速器科室医生的工作地点主要在诊室和医生办公室，仅在治疗室内患者出现突发状况时可能会进入治疗室内开展急救。由于诊室和医生办公室与机房距离较远，根据屏蔽体外剂量率计算结果，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下表。

表 5-58 直加医生年受照剂量估算结果

岗位	工作地点	剂量率 ¹ , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
医生	机房内	1.32E+00	50	6.60E-02
注：1.考虑相邻机房出束的影响。				

5.2.3.2.2 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。

5.2.3.2.2.1 在大孔径 CT 机房进行治疗前模拟定位

每名患者在首次治疗前，需要利用大孔径 CT 对其进行治疗前的模拟定位，在二层的大孔径 CT 机房 1 或大孔径 CT 机房 2 进行。本项目直加每年最多治疗人次为 60000 人次，按每名患者治疗 10 次估计，则每年技师需要治疗前模拟定位总次数为 6000 次。

每次模拟定位期间，按在大孔径 CT 机房内摆位 5min、在操作间内操作大孔径 CT 出束 1min 考虑，每次模拟定位由 2 名技师共同完成，本项目放疗科共配备 8 名技师轮班，则每名技师每年参与模拟定位的次数约为 1500 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 5-59。

表 5-59 每名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 , $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
大孔径 CT 操作间	2.5	25	6.25E-02

注：1. 根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5 μ Sv/h，则操作间的剂量率保守取 2.5 μ Sv/h。

5.2.3.2.2.2 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 60000 人次。放疗科共配备 8 名技师，则每名技师每年最多需摆位/解除摆位 7500 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 5-60。

表 5-60 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 , μ Sv/h	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a
机房内	1.32E+00	750	9.90E-01

注：1. 考虑相邻机房出束的影响。

5.2.3.2.2.3 在控制室内操作装置出束

三台直加每年治疗总出束时间为 2700h（因技师不参与 QA，故不考虑 QA 出束时间）。放疗科共配备 8 名技师，则每名技师的年受照时间为 337.5h。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 5-61。

表 5-61 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, μ Sv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
控制室	6.00E-07	337.5	2.03E-07

5.2.3.2.2.4 小结

根据上述分析，将放疗科技师年总受照剂量计算结果列于表 5-62。

表 5-62 直线加速器技师年总受照剂量

工作岗位	工作内容	年受照剂量, mSv/a
技师	在大孔径 CT 机房进行治疗前模拟定位	6.25E-02
	在机房内摆位/解除摆位	9.90E-01
	在控制室内操作装置出束	2.03E-07
	总计	1.05E+00

5.2.3.2.3 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，工作地点在直加机房及其控制室。

5.2.3.2.3.1 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 6000 次。放疗科共配备 4 名物理师，则每名物理师每年进行治疗计划验证的次数为 1500 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 5-62 技师年受照剂量 1.05mSv 除以年患者人数 6000，可推知每名物理师每次治疗计划验证的受照剂量约为 1.75×10^{-4} mSv/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 5-63。

表 5-63 物理师进行治疗计划验证期间的年受照剂量

工作内容	单次工作受照剂量, mSv/次	年工作次数	受照剂量, mSv/a
治疗计划验证	1.75×10^{-4}	1500	2.63×10^{-1}

5.2.3.2.3.2 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 250h 考虑。每台直加的 QA 年总出束时间为 100h，共 4 名物理师，则每年每名物理师在控制室内的时间为 75h。则物理师 QA 工作期间的年受照剂量估算结果列于下表。

表 5-64 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 , μ Sv/h	年工作时间, h	年受照剂量, mSv/a
直线加速器	机房内	$1.32 \times 10^{+00}$	250	3.30×10^{-1}
	控制室	6.00×10^{-07}	75	4.50×10^{-8}
	总计			3.30×10^{-1}

注：1.取值依据见上文医生、技师计算过程。

5.2.3.2.3.3 小结

根据上述计算结果，可得出放疗科物理师的年受照剂量，列于下表。

表 5-65 物理师的年受照剂量

工作岗位	工作内容	年受照剂量, mSv/a
放疗科物理师	治疗计划验证	2.63×10^{-1}
	QA	3.30×10^{-1}
	总计	5.93×10^{-1}

5.2.3.2.4 护士

根据治疗流程，护士在治疗前的大孔径 CT 定位期间，在技师操作大孔径 CT 时，根据工作需要，在操作间远程为患者注射造影剂。每年的操作总次数按大孔径 CT 定位次数的 1/10 考虑，即 600 次。注射造影剂的时间按 1min/次考虑。共 4 名护士，则每名护士的年受照剂量计算结果列于下表。

表 5-66 护士年受照剂量计算结果

工作区域	剂量率 ¹ , μSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
大孔径 CT 操作间	2.5	2.5	6.25E-03
注：1. 根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）6.3 小节的要求，CT 机房外的周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h，则操作间的剂量率保守均取 2.5μSv/h。			

5.2.3.2.5 工程师

本项目配备的放疗科工程师共 2 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 300h，由此可计算得出工程师的年受照剂量，列于下表。

表 5-67 工程师的年受照剂量

岗位	工作地点	剂量率 ¹ , μSv/h	年受照时间, h	受照剂量, mSv/a
工程师	机房内	1.32E+00	300	3.96E-01
注：1. 考虑相邻机房出束的影响。				

5.2.3.2.6 小结

本项目辐射工作人员开展直线加速器工作所致的最大年受照剂量汇总如表 5-68 所示。由结果可知，技师年受照剂量最大，为 1.05mSv，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-68 放疗科工作人员受照剂量汇总

人员类别	年受照剂量, mSv/a
医生	3.37E-02
技师	1.05E+00
物理师	5.93E-01
护士	6.25E-03

工程师	3.96E-01
-----	----------

5.2.3.3 直线加速器公众年受照剂量估算

直线加速器出束期间主要影响对象为放疗科直加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下表。由计算结果可知，放疗科直加机房正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 $1.26\text{E-}02\text{mSv/a}$ ，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

表 5-69 直线加速器公众年受照剂量计算结果

关注点	周围环境	居留因子	剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	年出束时间， h	年受照剂量， mSv
l-1	车道	1/40	$1.40\text{E-}02$	3000	$1.05\text{E-}03$
c1-1	UPS 电源间	1/16	$8.39\text{E-}03$	3000	$1.57\text{E-}03$
c2-1	手术室	1/2	$8.39\text{E-}03$	3000	$1.26\text{E-}02$
m1-1	家属等候区	1/16	$5.71\text{E-}03$	3000	$1.07\text{E-}03$
m2-1	绿化	1/40	$5.71\text{E-}03$	3000	$4.28\text{E-}04$
k-1	辅助机房、水冷机房	1/16	$3.00\text{E-}02$	3000	$5.62\text{E-}03$
g-1	直加 1 防护门外	1/8	$7.74\text{E-}03$	3000	$2.90\text{E-}03$
l-2	绿化	1/40	$1.40\text{E-}02$	3000	$1.05\text{E-}03$
m1-2	术前等候区	1/20	$5.71\text{E-}03$	3000	$8.57\text{E-}04$
m2-2	绿化	1/40	$5.71\text{E-}03$	3000	$4.28\text{E-}04$
k-2	辅助机房、水冷机房	1/16	$3.00\text{E-}02$	3000	$5.62\text{E-}03$
g-2	直加 2 防护门外	1/8	$7.74\text{E-}03$	3000	$2.90\text{E-}03$
l-3	运动负荷室	1/16	$1.40\text{E-}02$	3000	$2.63\text{E-}03$
m1-3	核医学科走廊	1/5	$5.71\text{E-}03$	3000	$3.43\text{E-}03$
m2-3	绿化	1/40	$5.71\text{E-}03$	3000	$4.28\text{E-}04$
k-3	辅助机房、水冷机房	1/16	$3.00\text{E-}02$	3000	$5.62\text{E-}03$
g-3	直加 3 防护门外	1/8	$7.74\text{E-}03$	3000	$2.90\text{E-}03$

5.2.4 后装治疗机

5.2.4.1 后装治疗机屏蔽体外剂量率计算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分： γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014），后装治疗机房应考虑治疗源 4π 发射的 γ 射线（即初级辐射）对四周墙体和室顶的直接照射及其散射辐射在机房入口处的照射。

（1）初级辐射

初级辐射所致机房屏蔽体外剂量率的计算公式如下：

$$H_{\gamma} = \frac{A \times K_{\gamma} \times B}{r^2}$$

$$B = 10^{-\frac{d}{TVL_{10}}}$$

式中， H_{γ} 为距离 γ 放射源 r 米处屏蔽体外关注点的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A 为 γ 放射源的活度， MBq ；

B 为屏蔽墙厚度对应的透射因子；

K_{γ} 为放射源的空气比释动能常数， $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}$ ；列于表 5-70。

r 为屏蔽墙外关注点至 γ 放射源点的距离， m

TVL_{10} 为屏蔽体对放射源的十分之一减弱层厚度， cm ；列于表 5-70。

d 为屏蔽体厚度， cm 。

表 5-70 γ 放射源的主要辐射特性参数

核素	半衰期	γ 射线能量均值， MeV	空气比释动能率常数 K_{γ} ， $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}$	TVL_{10} ， cm
^{192}Ir	74.0d	0.37	0.111	1.6（铅） 15.2（混凝土）

注：表中数据取自 IAEA NO.47 号报告中表 22。

保守考虑本项目后装机不是固定安装，可以在机房内活动。因此本次评价以距离治疗室内侧墙 1m 作为放射源活动范围。后装治疗机房屏蔽体外关注点设置情况见表 5-71，各关注点处的剂量率计算结果列于表 5-72。

表 5-71 后装治疗机房关注点

关注点位	点位描述	所属区域
a	北侧屏蔽墙外表面 30cm 处	控制室
b	西侧屏蔽墙外表面 30cm 处	直加机房 3
c	东侧屏蔽墙外表面 30cm 处	排烟机房
g	防护门外表面 30cm 处	后装机等候区
d	室顶上方外表面 30cm 处	一层候诊室

表 5-72 后装治疗机房屏蔽体外各关注点处剂量率计算结果

关注点	周围环境	A , MBq	d , cm	B	K_{γ} , $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}$	R , m	H_{γ} , $\mu\text{Sv/h}$
a	控制室	3.70E+05	80	5.46E-06	0.111	2.1	5.08E-02
b	直加机房 3	3.70E+05	170	6.54E-12	0.111	3	2.99E-08
c	排烟机房	3.70E+05	160	2.98E-11	0.111	4.9	5.09E-08
g	后装机等候区	3.70E+05	95	5.62E-07	0.111	3.6	1.78E-03
d	一层候诊室	3.70E+05	80	5.46E-06	0.111	7.3	4.20E-03

备注：屏蔽材料为普通混凝土（密度不低于 2.35g/cm³）。

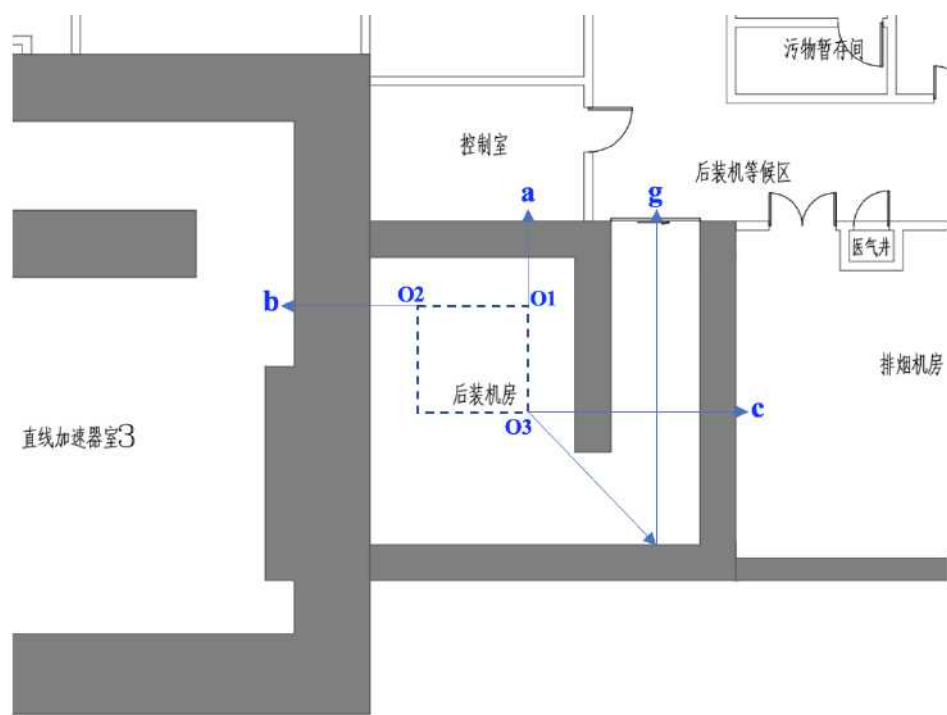


图 5-38 后装治疗机房平面关注点示意图

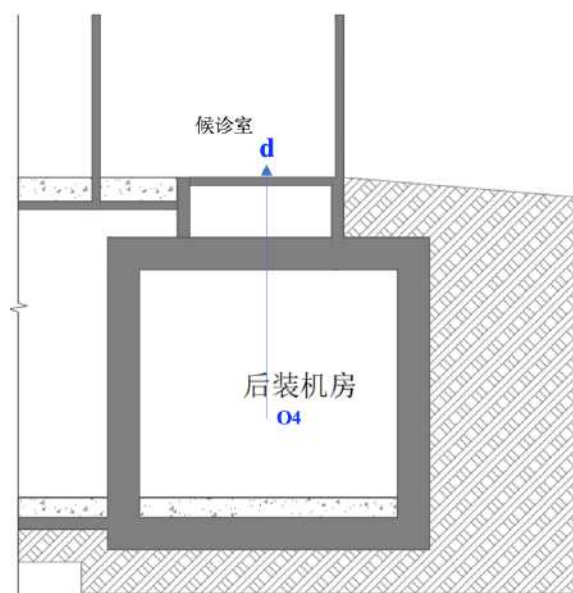


图 5-39 后装治疗机房剖面关注点示意图

(2) 迷路入口

后装治疗机房迷路入口处的散射辐射剂量采用下式计算，计算参数取值和计算结果列于表 5-73。

$$\dot{H} = \frac{A \times K_{\gamma} \times S_w \times \alpha_w}{R_1^2 \times R_2^2}$$

式中， S_w 为迷路内口墙的散射面积，其为辐射源和机房入口处共同可视见的墙区面积， m^2 ；

α_w 为散射体的散射因子；

R_1 为放射源到散射面中心点的距离， m ；

R_2 为散射面中心点至计算点的距离， m 。

表 5-73 后装治疗机房迷路入口处散射辐射剂量计算结果

关注点	A , MBq	S_w , m^2	α_w	K_{γ} , $\mu Sv \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot MBq^{-1}$	R_1 , m	R_2 , m	H , $\mu Sv/h$
g	3.70E+05	11.8	3.50E-02	0.111	4.36	7.62	15.4

注： α_w 值取自《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分： γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 2.3-2014）。保守取 0.25MeV γ 射线，入射角为 45° ，反射角为 15° 的数值，为 3.5×10^{-2} 。

关注点 g 的初级辐射和散射辐射剂量率叠加结果为 $(1.78\text{E-}03) + 15.4 \approx 15.4\mu\text{Sv/h}$ ，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分： γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 2.3-2014）， ^{192}Ir 治疗束的散射辐射能量约为 0.2MeV，其在铅中的 TVL 值为 5mm。本项目后装治疗机房防护门为 10mm 铅，屏蔽衰减因子为 0.01，经防护门屏蔽后，门外剂量率降至 $0.154\mu\text{Sv/h}$ ，低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

5.2.4.2 后装治疗机辐射工作人员年受照剂量估算

表 5-74 后装治疗机辐射工作人员受照剂量估算结果

人员类型	工作区域	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h	年受照剂量, mSv/a	总计, mSv/a
后装机技师	控制室	5.08E-02	427	2.17E-02	9.04E-02
	机房内 ¹⁾	8.24E-01	83.3	6.87E-02	
后装机物理师	控制室	5.08E-02	427	2.17E-02	2.17E-02

注：1) 工作人员进入后装机房内剂量率来源考虑相邻的 3 号直加机房的照射 ($1.42\text{E-}02\mu\text{Sv/h}$)，以及后装机贮源状态下的照射。文献《后装 γ 源近距离治疗室内辐射场剂量水平及分布》（李凤霜，张朝，李夏，马永忠，职业与健康，2018 第 34 卷，第 15 期）中，活度 6.883Ci 的 ^{192}Ir 后装机贮源状态下外表面 1m 处剂量率为 $0.56\mu\text{Sv/h}$ ，按比例推算得 10Ci 对应的外表面 1m 处剂量率为 $0.81\mu\text{Sv/h}$ 。本次评价参考该值进行估算，则后装机房内，3 号直加机房出束与后装机贮源状态叠加的剂量率为 $0.0142+0.81=8.24\text{E-}01\mu\text{Sv/h}$ 。
2) 技师摆位时间按 2min/人次计。
3) 每位后装机物理师每年在控制室内的工作时间按 50h 估计。

由计算结果可知，本项目后装治疗机辐射工作人员年受照剂量最大为技师，为 $9.04\text{E-}02\text{mSv}$ ，低于工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

5.2.4.3 后装治疗机公众年受照剂量估算

表 5-75 后装治疗机公众年受照剂量估算结果

关注点	周围环境	瞬时剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	年出束时间, h	居留因子	年剂量, mSv/a
c	排烟机房	5.09E-08	427	1/16	1.36E-09
g	后装机等候区	1.54E-01	427	1/5	3.28E-03
d	候诊室	4.20E-03	427	1/20	8.98E-05

由计算结果可知，本项目后装治疗机周围公众年受照剂量最大者为后装机等候区的公众，为 $3.28\text{E-}03\text{mSv/a}$ ，低于公众年剂量约束值 0.1mSv 。

5.2.5 放药制备及动物实验

5.2.5.1 回旋加速器屏蔽体外剂量率计算

本项目回旋加速器制备核素为 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{64}Cu 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr ，根据源项分析数据对比发现，各放药制备过程中， ^{18}F 制备时所产生的剂量率水平最高，对回旋加速器室周围辐射影响最大。结合辐射源项，保守考虑，采用 FLUKA 程序，以质子能量为 16 MeV、质子束流强度为 $60\ \mu\text{A}$ 、单靶轰击 $^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ 的体积为 3mL，对本项目回旋加速器运行过程中周围的辐射剂量率进行模拟计算，回旋加速器室建模图及周围关注点位图见图 5-40。计算所得不同打靶方向的回旋加速器室剂量率分布图见图 5-41~图 5-43；计算结果见表 5-76。

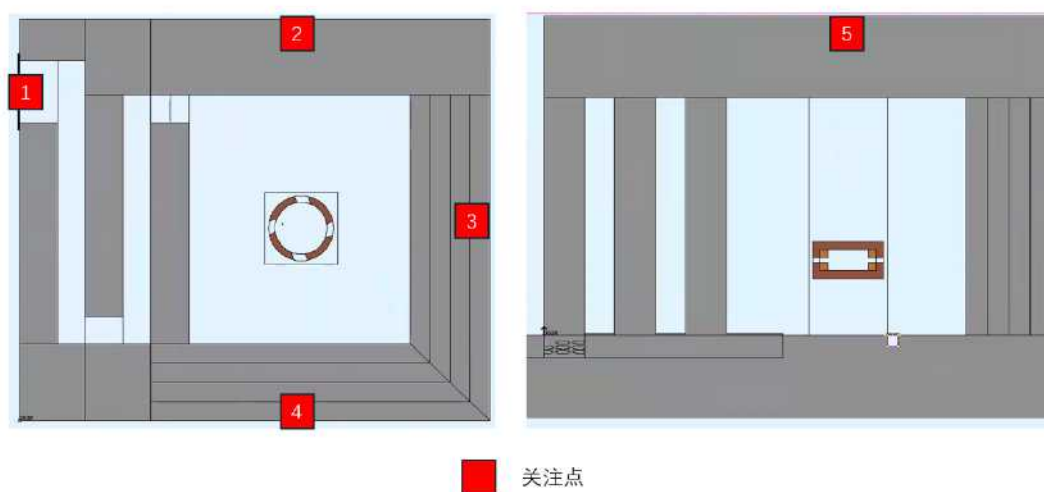


图 5-40 回旋加速器室建模图及周围关注点位图

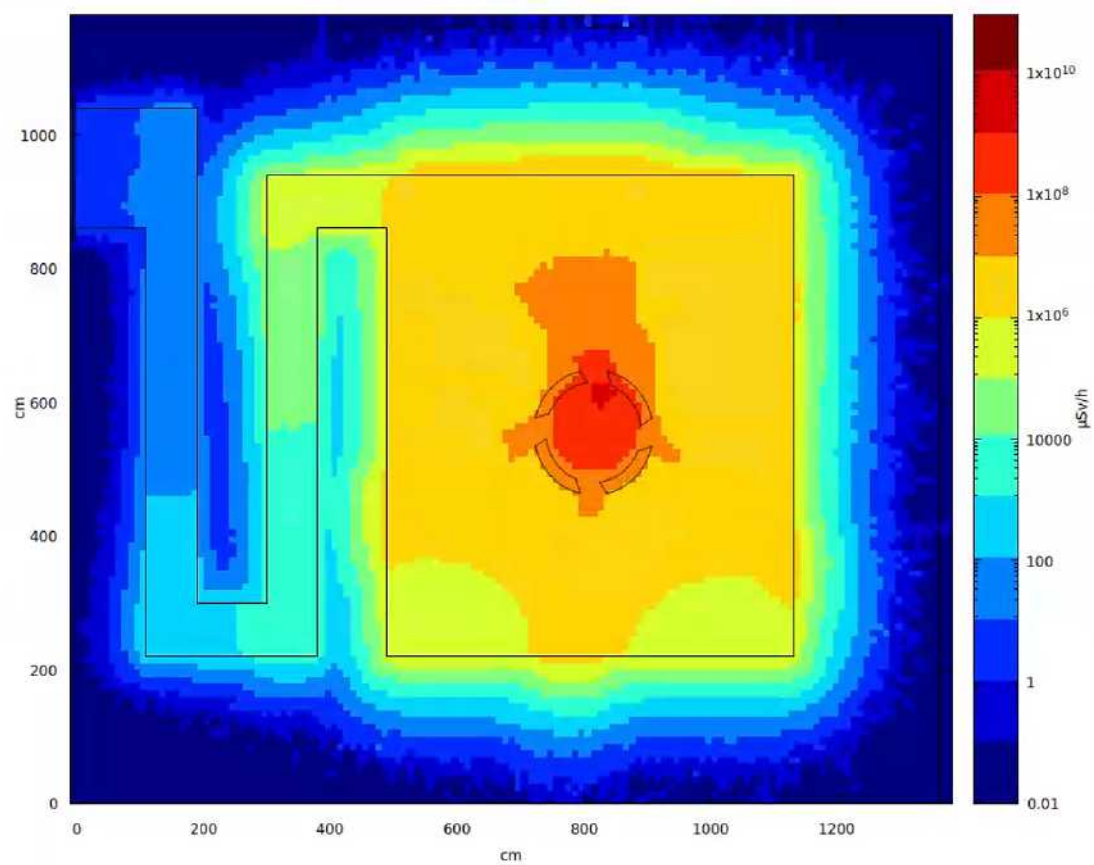


图 5-41 回旋加速器室平面剂量率分布图

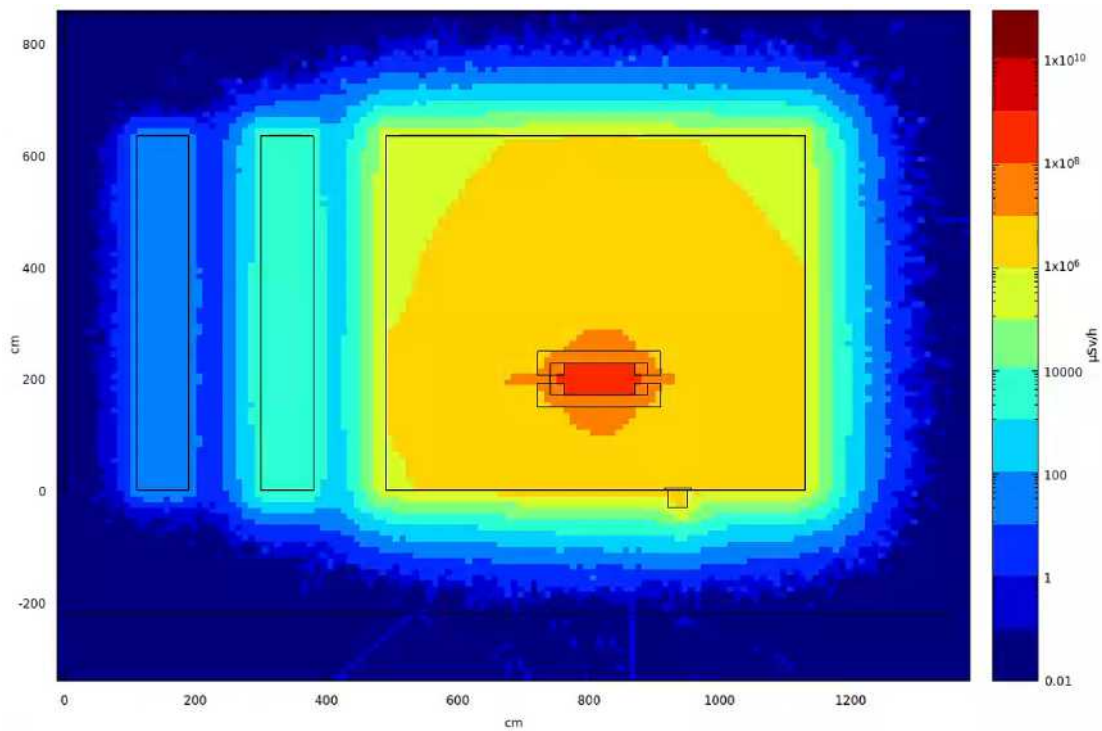


图 5-42 回旋加速器室东西向剖面剂量率分布图

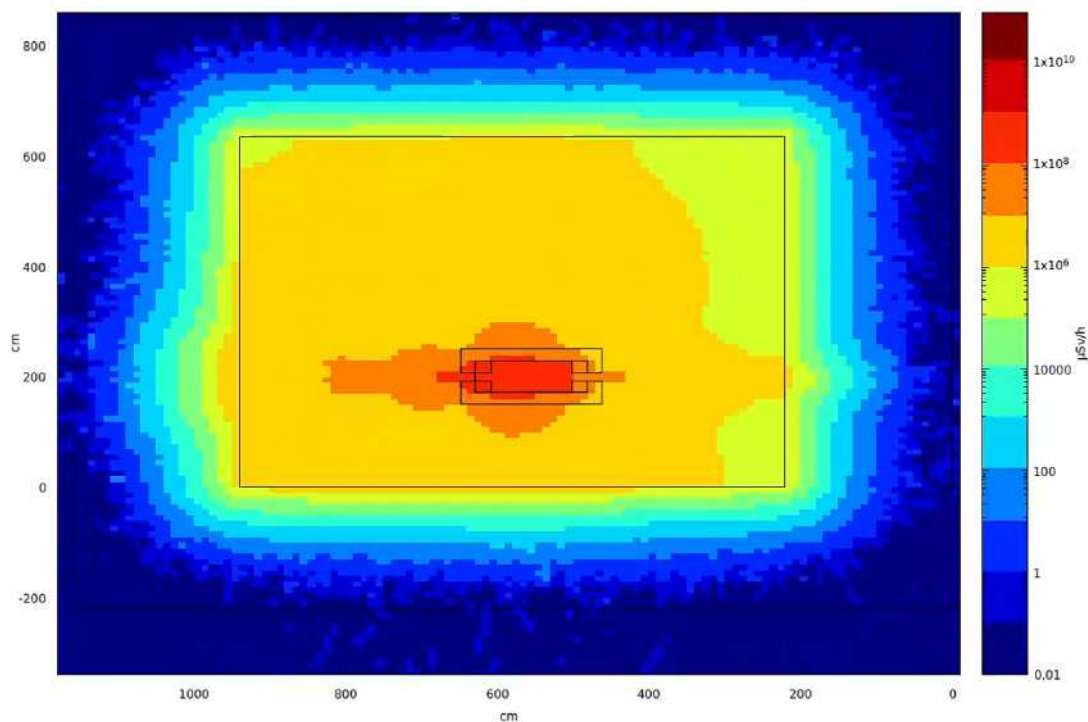


图 5-43 回旋加速器室南北向剖面剂量率分布图

表 5-76 回旋加速器室周围关注点位剂量率水平

关注点	剂量率结果, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$	是否满足要求
1 屏蔽门外 30cm	1.5	2.5	是
2 北墙外	0.8	2.5	是
3 东墙外	0.1	2.5	是
4 南墙外	0.2	2.5	是
5 顶部墙体	0.1	2.5	是

由计算结果可以看出, 当前屏蔽体设置均能满足墙外 30cm 处剂量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

5.2.5.2 非密封放射性物质工作场所屏蔽体外剂量率计算

5.2.5.2.1 β 射线的辐射影响分析

本项目动物实验使用的Ga-68、Zr-89、Lu-177等核素产生 β 射线, 考虑其韧致辐射。其中, β 射线能量最高的核素为Ga-68(1.9MeV), 能量越大射程越大, 根据《放射性同位素手册》(P230, 图 9-4, β 粒子全部吸收所需要的厚度) 查图得到Ga-68产生的 β

射线在玻璃中的最大射程不超过4mm。大部分实验操作在铅玻璃的防护下进行，玻璃厚度均已超过β射线在玻璃中的最大射程，β射线造成韧致辐射的影响相对较小。

5.2.5.2.2 γ射线的辐射影响分析

本项目拟使用核素发射的γ射线是主要的外照射辐射来源。由于放射性核素装在试剂瓶、离心管、注射器等小体积容器内，其尺寸远小于与周围关注点距离，针对核素产生的γ射线，屏蔽体外剂量率水平可采用点源公式计算：

$$\dot{H} = \frac{A}{R^2} \times \Gamma \times 0.1^{\frac{d}{TVL}}$$

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·m²/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。

表 5-77 放药制备及动物实验屏蔽体外剂量率计算结果（F-18）

区域	位置	屏蔽参数	透射因子 B	距离， m	屏蔽体外剂 量率，μSv/h
合成/分装热室	所有面	80mmPb	1.52E-05	1.00	1.05E-02
分装柜	所有面	40mmPb+40mmPb 铅罐	1.52E-05	0.80	1.63E-02
通风橱	所有面	20mmPb+40mmPb 铅罐	2.43E-04	0.50	3.12E-01
热室房间	东墙	300mm 混凝土	2.99E-07	6.53	4.85E-06
	西墙	300mm 混凝土	2.99E-07	6.53	4.85E-06
	南墙	300mm 混凝土	2.99E-07	4.48	1.03E-05
	北墙	2200mm 混凝土	4.79E-18	4.48	1.65E-16
	顶棚	200mm 混凝土	1.11E-06	8.00	1.19E-05
	防护门	10mmPb	3.79E-06	6.53	6.13E-05
放化实验室	东墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.70	3.36E-01
	西墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.70	3.36E-01
	南墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.31	4.61E-01

区域	位置	屏蔽参数	透射因子 B	距离, m	屏蔽体外剂 量率, $\mu\text{Sv/h}$
	北墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.31	4.61E-01
	顶棚	200mm 混凝土	4.56E-03	8.00	2.28E-02
	防护门	4mmPb	3.58E-02	2.70	1.58E+00
动物实验室	东墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.70	3.36E-01
	西墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.70	3.36E-01
	南墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.80	3.12E-01
	北墙	240mm 实心砖墙	7.63E-03	2.80	3.12E-01
	顶棚	200mm 混凝土	4.56E-03	8.00	2.28E-02
	防护门	4mmPb	3.58E-02	2.80	1.47E+00
小动物扫描机 房	东墙	200mm 混凝土	7.31E-02	2.70	1.06E-02
	西墙	200mm 混凝土	7.31E-02	2.70	1.06E-02
	南墙	200mm 混凝土	7.31E-02	2.31	1.45E-02
	北墙	200mm 混凝土	7.31E-02	2.31	1.45E-02
	顶棚	200mm 混凝土	7.31E-02	8.00	1.21E-03
	防护门、观察窗	4mmPb	5.74E-01	2.70	8.33E-02

5.2.5.3 放药制备及动物实验区辐射工作人员年受照剂量估算

表 5-78 放药制备及动物实验区辐射工作人员年受照剂量估算结果

岗位类别	工作地点 及内容	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	单次操作 时长, h	年操作次 数, 次	年受照时 长, h	年受照剂 量, mSv/h	年受照剂 量总计, mSv/h
扫描设备 控制	回旋控制 室	1.50E+00	0.5	800	400	6.00E-01	1.13E+00
	扫描控制 室	8.33E-02	1.6	4000	6400	5.33E-01	
动物实验 操作	通风橱前 操作	3.12E-01	2	250	500	1.56E-01	1.56E-01
药物分装	分装柜前 操作	1.63E-02	2	250	500	8.15E-03	8.15E-03

由计算结果可知, 本项目放药制备及动物实验辐射工作人员年受照剂量最大为 1.13mSv, 低于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

5.2.5.4 放药制备及动物实验区公众年受照剂量估算

本项目放药制备及动物实验辐射工作场所周围公众所受年剂量的计算结果见表 5-79。年受照剂量最大者为回旋加速器机房及热室房间东侧的消防兼安防控制室处的公众，年受照剂量为 4.00E-02mSv/a，低于公众年剂量约束值 0.1mSv。

表 5-79 医用回旋加速器机房周围公众所受年剂量的计算参数及结果

公众位置	辐射源项	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	受照时间/h	居留因子	年最大受照剂量/mSv	总计/mSv
消防兼安防控制室	回旋加速器出束	1.00E-01	400	1	4.00E-02	4.00E-02
	热室放药操作	4.85E-06	2000	1	9.70E-06	

5.2.6 核素诊断

5.2.6.1 核素诊断屏蔽体外剂量率计算

表 5-80 核素参数

序号	核素	用途	单次最大用量, MBq	周围剂量当量率常数, $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$		1 米处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	
				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	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	注射显像	925	0.0303	0.0207	28.0	19.1

备注：计算参数取自 GBZ120-2020。

表 5-81 核素的 TVL 值取值表

核素	TVL, mm	
	铅 ($11.3\text{g}/\text{cm}^3$)	混凝土 ($2.35\text{g}/\text{cm}^3$)
^{18}F	16.6	176
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	1	110

表 5-82 核素诊断场所屏蔽体外剂量率计算结果

场所	源项	方位	关注点	屏蔽材料及厚度	透射系数	距离 /m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
分装柜	^{18}F 裸源, 10 人份, 共 100mCi	各面	正面操作位	40mmPb 箱体和观察窗、转运铅盒 10mmPb 防护	9.73E-04	0.5	2.06E+00
注射窗	^{18}F 裸源, 1 人份, 10mCi, 1m 处剂量率 52.9 $\mu\text{Sv/h}$	窗外	护士操作位	40mmPb 观察窗、10mmPb 注射套防护	2.31E-04	0.50	3.05E-01
分装注射室	^{18}F 裸源, 10 人份, 共 100mCi	东墙	抢救室	200mm 混凝土	2.84E-04	2.6	2.23E-02
		西墙	门厅	200mm 混凝土	2.84E-04	2.6	2.23E-02
		南墙	患者走廊	200mm 混凝土	2.84E-04	2.95	1.73E-02
		北墙	卫生通过间	200mm 混凝土	2.84E-04	2.95	1.73E-02

场所	源项	方位	关注点	屏蔽材料及厚度	透射系数	距离/m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
		顶棚	MR 室	200mm 混凝土	2.84E-04	8	2.35E-03
		防护门	卫生通过间	8mmPb	1.28E-03	2.95	7.80E-02
等候室 1~6	^{18}F 人体源, 1 人份, 10mCi, 1m 处剂量率 34 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	相邻等候室、氧气汇流室	200mm 混凝土	7.31E-02	1.925	6.71E-01
		西墙	相邻等候室、等待区	200mm 混凝土	7.31E-02	1.925	6.71E-01
		南墙	室外区域	200mm 混凝土	7.31E-02	2.44	4.18E-01
		北墙	患者走廊	200mm 混凝土	7.31E-02	2.44	4.18E-01
		顶棚	影像科设备机房	200mm 混凝土	7.31E-02	8	3.89E-02
		防护门	患者走廊	6mmPb	4.35E-01	2.44	2.49E+00
储源室	^{18}F 裸源, 10 人份, 共 100mCi	东墙	分装注射室	200mm 混凝土	1.14E-03	1.25	3.86E-01
		西墙	门厅	200mm 混凝土	1.14E-03	1.25	3.86E-01
		南墙	缓冲走廊	200mm 混凝土	1.14E-03	1.75	1.97E-01
		北墙	分装注射室	200mm 混凝土	1.14E-03	1.75	1.97E-01
		顶棚	影像科	200mm 混凝土	1.14E-03	8	9.41E-03
		防护门	分装注射室	8mmPb	5.14E-03	1.75	8.88E-01
		防护门	分装注射室过道	16mmPb	4.33E-03	1.80	2.21E+00
抢救室	^{18}F 人体源, 1 人份, 10mCi, 1m 处剂量率 34 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	PET/CT 机房	300mm 混凝土	1.97E-02	2.2	1.39E-01
		西墙	分装注射室	200mm 混凝土	7.31E-02	2.2	5.14E-01
		南墙	患者走廊	200mm 混凝土	7.31E-02	2.95	2.86E-01
		北墙	卫生通过间	200mm 混凝土	7.31E-02	2.95	2.86E-01
		顶棚	影像科设备机房	200mm 混凝土	7.31E-02	8	3.89E-02
		防护门	医护走廊	6mmPb	4.35E-01	2.95	1.70E+00
		防护门	治疗走廊	13mmPb	6.58E-02	3.15	2.15E+00
PET/CT 机房	^{18}F 人体源, 1 人份, 10mCi, 1m 处剂量率 34 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	SPECT 机房	300mm 混凝土	1.97E-02	3.2	6.56E-02
		西墙	抢救室	300mm 混凝土	1.97E-02	3.2	6.56E-02
		南墙	患者走廊	300mm 混凝土	1.97E-02	4.225	3.77E-02
		北墙	控制室	300mm 混凝土	1.97E-02	4.225	3.77E-02
		顶棚	MR 室及操作间	200mm 混凝土 +8mmPb	2.41E-02	8	1.28E-02
		摆位处	机房内患者旁	0.5mmPb 铅衣	9.33E-01	0.5	1.27E+02
		观察窗	控制台	10mmPb	2.50E-01	4.225	4.76E-01
		防护门 (北)	控制室	10mmPb	2.50E-01	4.225	4.76E-01
		防护门 (南)	患者走廊	8mmPb 门	3.30E-01	3.2	1.10E+00
SPECT/CT 机房	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 人体源, 1 人份, 25mCi, 1m 处剂量率 19.1 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	医护走廊	300mm 混凝土	1.87E-03	3.4	3.10E-03
		西墙	PET/CT 机房	300mm 混凝土	1.87E-03	3.4	3.10E-03
		南墙	患者走廊	300mm 混凝土	1.87E-03	4.225	2.01E-03
		北墙	控制室	300mm 混凝土	1.87E-03	4.225	2.01E-03
		顶棚	影像科	200mm 混凝土	1.52E-02	8	4.55E-03
		摆位处	机房内患者旁	0.5mmPb 铅衣	3.16E-01	0.5	2.42E+01
		观察窗	控制台	6mmPb	1.00E-06	4.225	1.07E-06
		防护门 (北)	控制室	6mmPb	1.00E-06	4.225	1.07E-06
		防护门 (南)	患者走廊	4mmPb	1.00E-04	4.225	1.07E-04

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。本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 机房四周墙体、顶棚、地板、防护门和观察窗采取的辐射屏蔽措施均能满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）给出的 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》（GBZ130-2020）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满足相关标准要求。

由以上分析计算可知，核素诊断屏蔽体外周围剂量当量率均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，满足辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平的要求。

5.2.6.2 核素诊断辐射工作人员年受照剂量估算

由计算结果可知，核素诊断的工作安排可满足辐射工作人员剂量约束值 5mSv/a 的要求。

表 5-83 核素诊断工作人员受照剂量估算结果

工作人员		工作内容	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间, h/a	年有效剂量, mSv/a
给药护士		PET 药物	2.06E-01	66.7	1.37E-02
技师	PET-CT	摆位	1.27E+02	13.3	1.69E+00
		显像	4.76E-01	2000	9.53E-01
		小计			2.65E+00
	SPECT-CT	摆位	2.42E+01	8.3	2.02E-01
		显像	1.07E-06	250	2.68E-07
		小计			2.02E-01

注：（1）给药护士年受照时间：PET 给药人次按年最大工作负荷 8000 人次/a，单次给药时间 0.5min，则年给药时间约 66.7h/a；SPECT-CT 给药时操作位处剂量率很低，可忽略不计其影响。

（2）技师

①机房内摆位年受照时间：PET-CT 按年最大工作负荷 1/10 计，单次摆位时间 1min，则单台设备年受照时间约 13.3h/a；同理，单台 SPECT-CT 摆位技师年受照时间约 8.3h/a。

②显像时间：来自表 3-35。

5.2.6.3 核素诊断公众年受照剂量估算

核素诊断公众受照剂量结果如下，最大为 $3.24\text{E-}02\text{mSv}$ ，满足公众剂量约束值。

表 5-84 核素诊断公众受照剂量计算结果

位置	公众位置	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	年受照时间/h	居留因子	年受照剂量/mSv
核素诊断 周围区域	核素诊断门厅	3.86E-01	2000	1/16	4.83E-02
	MR 室及操作间	1.28E-02	2000	1/2	1.28E-02
	影像科设备机房	3.89E-02	2000	1/16	4.86E-03

5.2.7 核素治疗

5.2.7.1 核素治疗屏蔽体外剂量率计算

考虑到核素治疗主要采用的核素为 ^{131}I ，且 ^{177}Lu 的 γ 、 β 射线能量与 ^{131}I 接近，因此屏蔽计算和受照剂量计算源项相关参数按 ^{131}I 取值。由于甲癌治疗 ^{131}I 用量比甲亢治疗大，因此采用甲癌治疗核算屏蔽体外剂量率，若在甲癌治疗情况下能满足剂量率控制水平，则甲亢治疗也可满足。计算参数及结果如下，核素治疗屏蔽体外剂量率均满足剂量率控制水平。

表 5-85 核素参数

序号	核素	用途	单次最大用量, MBq	周围剂量当量率常数, $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$		1 米处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	
				裸源	人体源	裸源	人体源
1	^{131}I	甲亢治疗	555	0.0595	0.0583	33.0	32.4
2	^{131}I	甲癌治疗	5550	0.0595	0.0583	330	324
备注：计算参数取自 GBZ120-2020。							

表 5-86 核素的 TVL 值取值表

核素	TVL, mm	
	铅 ($11.3\text{g}/\text{cm}^3$)	混凝土 ($2.35\text{g}/\text{cm}^3$)
^{131}I	11	170
备注：计算参数取自 GBZ120-2020。		

表 5-87 核素治疗场所屏蔽体外剂量率计算结果（甲癌治疗）

场所	源项	方位	关注点	屏蔽材料及厚度	透射系数	距离 /m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
^{131}I 手套箱	^{131}I 裸源, 5 人份, 共 750mCi	各面	正面操作位	40mmPb 箱体和观察窗、转运铅盒 10mmPb 防护	2.85E-05	0.50	1.88E-01
^{131}I 给药窗	^{131}I 裸源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 330 $\mu\text{Sv/h}$	窗外	护士（指导患者口服药物）	40mmPb 观察窗	2.31E-04	0.50	3.05E-01
分装注射室	^{131}I 裸源, 5 人份, 共 750mCi	东墙	高活放射性实验室	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	1.90E-06	2.65	4.46E-04
		西墙	服药室	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	1.25E-06	2.65	2.93E-04
		南墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	1.90E-06	2.43	5.33E-04
		北墙	储源室	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	1.90E-06	2.43	5.33E-04
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	1.90E-06	5.00	1.25E-04
		地板	MR 室	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	1.25E-06	5.50	6.81E-05
		防护门	治疗走廊	12mmPb	1.87E-05	2.43	5.26E-03
服药间	^{131}I 裸源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 330 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	分装注射室	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.85	5.11E-01
		西墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.85	5.11E-01
		南墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	2.43	2.97E-01
		北墙	预留储藏间	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	2.43	2.97E-01

场所	源项	方位	关注点	屏蔽材料及厚度	透射系数	距离/m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.00	6.99E-02
		地板	影像科门厅	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.50	5.78E-02
		防护门	治疗走廊	15mmPb	4.33E-02	2.43	2.38E+00
储源室	^{131}I , 5 人份, 共 750mCi	东墙	控制区走廊	200mm 混凝土 +8mmPb 防护涂料	1.54E-03	1.80	7.84E-01
		西墙	预留储藏间	200mm 混凝土 +8mmPb 防护涂料	1.54E-03	1.80	7.84E-01
		南墙	分装注射室	200mm 混凝土 +8mmPb 防护涂料	1.54E-03	2.20	5.25E-01
		北墙	卫生通过间	200mm 混凝土 +8mmPb 防护涂料	1.54E-03	2.20	5.25E-01
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +8mmPb 防护涂料	1.54E-03	5.00	1.02E-01
		地板	MR 室	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	6.66E-04	5.50	3.64E-02
		防护门	分装注射室过道	16mmPb	4.33E-03	1.80	2.21E+00
抢救室	^{131}I 人体源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 324 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	8.21E-03	3.05	2.86E-01
		西墙	高活性放射性实验室	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	8.21E-03	3.05	2.86E-01
		南墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	8.21E-03	3.15	2.68E-01
		北墙	放射性废物暂存间	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	8.21E-03	3.15	2.68E-01
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	8.21E-03	5.00	1.06E-01
		地板	MR 室及操作间	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.50	5.78E-02
		防护门	治疗走廊	13mmPb	6.58E-02	3.15	2.15E+00
核素病房 1	^{131}I 人体源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 324 $\mu\text{Sv/h}$	东西墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.35	1.56E-01
		南墙	核素病房 2	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	2.03	4.26E-01
		北墙	医护办公室	400mm 混凝土 +10mmPb 防护涂料	5.47E-04	2.03	4.32E-02
		防护门外	治疗走廊	12mmPb	8.11E-02	3.35	2.34E+00
		传递窗外	治疗走廊	15mmPb	4.33E-02	3.35	1.25E+00
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.00	6.99E-02
		地板	影像科门厅	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.50	5.78E-02
核素病房 2、3	^{131}I 人体源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 324 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.35	1.56E-01
		西墙	大堂上空、室外上空	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.35	1.56E-01
		南墙	相邻病房	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.95	4.60E-01
		北墙	相邻病房	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.95	4.60E-01
		防护门	治疗走廊	12mmPb	8.11E-02	3.35	2.34E+00
		传递窗外	治疗走廊	15mmPb	4.33E-02	3.35	1.25E+00
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.00	6.99E-02
		地板	影像科等待区	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.50	5.78E-02
核素病房 4	^{131}I 人体源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 324 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	核素病房 5	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.80	1.21E-01
		西墙	室外上空	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.80	1.21E-01

场所	源项	方位	关注点	屏蔽材料及厚度	透射系数	距离/m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
		南墙	室外上空	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.95	4.60E-01
		北墙	核素病房 3	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.95	4.60E-01
		防护门	治疗走廊	12mmPb	8.11E-02	3.35	2.34E+00
		传递窗外	治疗走廊	15mmPb	4.33E-02	3.35	1.25E+00
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.00	6.99E-02
		地板	影像科等待区	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.50	5.78E-02
核素病房 5~13	^{131}I 人体源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 324 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	相邻病房	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.95	4.60E-01
		西墙	相邻病房	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.95	4.60E-01
		南墙	室外上空	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.35	1.56E-01
		北墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.35	1.56E-01
		防护门	治疗走廊	12mmPb	8.11E-02	3.35	2.34E+00
		传递窗外	治疗走廊	15mmPb	4.33E-02	3.35	1.25E+00
		顶棚	屋面	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.00	6.99E-02
		地板	影像科设备机房	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.50	5.78E-02
核素病房 14~16	^{131}I 人体源, 1 人份, 150mCi, 1m 处剂量率 324 $\mu\text{Sv/h}$	东墙	室外上空	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.35	1.56E-01
		西墙	治疗走廊	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	3.35	1.56E-01
		南墙	相邻病房、放射性废物暂存间、污物电梯等	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.93	4.72E-01
		北墙	相邻病房、设备区走廊	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	1.93	4.72E-01
		防护门	治疗走廊	12mmPb	8.11E-02	3.35	2.34E+00
		传递窗外	治疗走廊	15mmPb	4.33E-02	3.35	1.25E+00
		顶棚	空气机房、设备机房、排烟机房等	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.00	6.99E-02
		地板	影像科医护办公	200mm 混凝土 +12mmPb 防护涂料	5.40E-03	5.50	5.78E-02

5.2.7.2 核素治疗辐射工作人员年受照剂量估算

核素治疗区主要进行甲亢治疗、甲癌治疗、 ^{177}Lu 核素治疗的工作, ^{131}I 治疗给药方式为口服, ^{177}Lu 治疗给药方式为注射。保守按需要分装考虑, 实际可能采用自动分装仪或购买已分装好的成品药物, 则工作人员的受照剂量可能比计算结果更低。

表 5-88 核素治疗辐射工作人员受照剂量计算结果

岗位类别	工作地点及内容	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	单次操作时长	年操作次数, 次	年受照时长, h	年受照剂量, mSv/h	年受照剂量总计, mSv/h
------	---------	-----------------------	--------	----------	----------	--------------	----------------

医生	医护办公室办公	4.32E-02	8h	250	2000	8.63E-02	2.77E+00
	抢救室急救	3.24E+02	10min	50	8.3	2.69E+00	
技师	手套箱前操作	1.88E-01	60s	3050	50.8	9.56E-03	3.51E-02
	分装注射室指导服药	5.11E-01	60s	3000	50	2.55E-02	
护士	分装注射室指导服药	5.11E-01	60s	3000	50	2.55E-02	2.55E-02
	分装注射室注射药物	5.33E-04	60s	50	0.83	4.42E-07	
备注：全年甲癌 500 人次，甲亢 2500 人次，L-177 治疗 50 人次。							

5.2.7.3 核素治疗公众年受照剂量估算

由于甲癌患者需要住院，对辐射工作场所周围环境的照射是持续的。根据 ICRP 94 号出版物，服用放射性碘治疗后的排放情况，施予活度的大约 55%是在治疗后最初 24h 排出，22%在第 2 个 24h 排出，6%在第 3 个 24h 排出。为合理估算公众受照剂量，按每名甲癌患者住院 3 天考虑，这三天内患者体内碘与最初给药量比例的加权平均值约为 28%。则核素治疗公众受照剂量结果如下，最大为 3.24E-02mSv，满足公众剂量约束值。

表 5-89 核素治疗公众受照剂量计算结果

位置	公众位置	剂量率， μSv/h	碘代谢 比例	年受照时间 /h	居留 因子	年受照剂量/mSv
核素治疗 楼下区域	MR 室及操作间	5.78E-02	0.28	2000	1/2	1.62E-02
	影像科医护办公	5.78E-02	0.28	2000	1	3.24E-02
	影像科等待区	5.78E-02	0.28	2000	1/16	2.02E-03

5.3 事故工况的环境影响分析

5.3.1 射线装置误照射事故

5.3.1.1 事故后果分析

射线装置的核心是加速器，其辐射场是瞬发性的，装置一旦停机，对外界造成的瞬时剂量立即停止，且不会继续引起周边介质的活化。

本项目射线装置运行期间可能发生的误照射事故主要有：安全联锁系统失效、人员误入机房内部造成误照射；或工作人员在机房内部工作期间，本项目射线装置出束造成误照射。

在人员误照射事故中，加速器大厅或治疗室内部工作期间，射线装置如质子治疗系统出束造成的误照射事故所致人员受照剂量最大。

假设事故情形为：工作人员在质子治疗室内部的治疗床附近工作期间，加速器出束导致误照射，受照时间保守按单次治疗时间 2min 考虑，治疗床附近的剂量率水平由图 5-15~图 5-21 估计约为 $10^5 \mu\text{Sv/h}$ ，则可计算得到单次事故受照剂量约为 3.33mSv。

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

5.3.1.2 事故防范措施

建设单位采取拟采取以下防范措施以降低人员误入事故的发生率：

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

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

(4) 做好设备稳定性检测和状态检测，使设备始终保持在最佳状态下工作。

5.3.2 冷却水泄漏事故

5.3.2.1 事故后果分析

根据“3.3.2.3.2 节”的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，即使发生泄漏，也不会对工作人员造成辐射影响。冷却水收集至冷却水集水井暂存，有效贮存容积大于质子治疗系统内活化冷却水的体积。因此，冷却水泄漏事故也不会对环境造成污染。

5.3.2.2 事故防范措施

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

5.3.3 后装机卡源事故

①后装机本身设计具有应急自动返回工作贮源器的功能。从而保证在实施治疗期间，当发生停电、卡源或意外中断照射时，放射源能自动返回工作贮源器。

②当自动回源装置功能失效时，辐射工作人员将第一时间通过手动回源措施进行应急处理，从而减少患者的误照射。

③在处理卡源的过程中，工作人员需携带个人剂量报警仪，需穿戴辐射防护用品。卡源事故处理期间，安全系统同时显示和记录已照射的时间和剂量，直到下一次照射开始，同时应发出声光报警信号。辐射工作人员进入机房内操作手动回源措施进行应急处理时，必须通过监测设施记录当时的辐射剂量率水平，记录处理时间和受照累积剂量。事故处理后及时总结并记录，包括事故发生的时间和地点、对任何可能受到照

射的人员所做的辐射剂量估算结果、采取的纠正措施、事故的可能原因、为防止类似事件再次发生所采取的措施。

④及时向环保、卫生部门报告。

⑤必要时，迅速请求设备供应方技术支持，快速处理。

5.3.4 非密封放射性物质工作场所事故

5.3.4.1 事故后果分析

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工作人员的撒漏或核素药剂丢失

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剂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

如果对操作放射性药物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药物散落的环境中，造成环境污染和危害人体。

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诊断区，1支 370MBq 的 ^{18}F 注射液在给药过程中出现跌落，药液全部散落在注射台面，人员与污染源的距离按 1m 估算，洒落药物 1m 处剂量率为 $52.9\mu\text{Sv/h}$ ，工作人员事故处理时间按最长 30min 考虑，则事故处理人员的受照剂量为 $27\mu\text{Sv/次}$ 。

②治疗区，1位甲癌患者最大给药量 5500MBq 的 ^{131}I 药液全部洒落地面，人员与污染源的距离按 1m 估算，洒落药物 1m 处剂量率为 $330\mu\text{Sv/h}$ ，工作人员事故处理时间按最长 30min 考虑，则事故处理人员的外照射受照剂量为 $165\mu\text{Sv/次}$ 。在事故处理过程中，工作人员还可能受内照射影响，途径主要为吸入放射性气溶胶，应通过采取穿戴防护服及防护眼罩、口罩等措施，尽可能避免吸入 I-131 气溶胶。

根据以上假设条件，事故工况时，诊断区和治疗区的事故处理均不会超过辐射工作人员的年剂量限值。

5.3.4.2 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 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生态环境部门和卫生部门进行报告。

③发生放射性药物被盗或丢失，应第一时间报告向建设单位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

6.1 辐射安全与环境保护管理机构

6.1.1 机构和人员

项目建成后，建设单位将成立专门的辐射安全与环境保护管理领导小组，全面负责建设单位的辐射安全管理工作。

6.1.2 辐射工作人员管理

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40号）的规定，“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。”本项目配备1名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，同时作为辐射安全专职管理人员。

本项目辐射工作人员配备计划见表6-1。建设单位承诺新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全考核合格证书到期的人员，必须通过生态环境部有关平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

表 6-1 本项目辐射工作人员配备计划

区域	岗位类别	人数	总计
质子治疗系统	注册核安全工程师	1	35
	医师	12	
	物理师	8	
	技师	10	
	护士	2	
	工程师	2	
硼中子治疗系统	医生	4	20
	物理师	4	
	治疗技师	4	
	护士	4	
	工程师	4	

直加机房、后装机房、CT 机房	医生	4	22
	物理师	4	
	治疗技师	8	
	护士	4	
	工程师	2	
放药制备及动物实验区	扫描设备控制员	2	8
	动物实验操作员	4	
	药物分装员	2	
核素诊断	医生	2	10
	技师	4	
	护士	4	
核素治疗	医生	3	11
	技师	2	
	护士	6	
总计			106

6.2 辐射安全管理规章制度

为加强建设单位的辐射安全管理，确保工作人员和环境安全，建设单位拟制定一系列辐射安全管理制度，涵盖操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、台账管理、人员培训计划、个人剂量监测与管理、工作场所辐射监测等内容，基本能够满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法规要求。建设单位还应根据本项目建设内容和特点，在本项目建成运行前，制定和完善本项目相关操作规程、辐射防护、设备检修维护、监测方案、放射性废物处理等相关规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。

6.3 辐射监测

本项目辐射监测总体包括工作场所监测、环境监测和个人剂量监测。工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测主要以巡测的方式；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。

6.3.1 工作场所监测

本项目工作场所监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，自行监测采用安装固定式监测仪表和便携式监测仪表相结合的方式。每年至少进行一次，监测数据记录存档。具体辐射工作场所监测计划列于下表。

表 6-2 本项目辐射工作场所监测计划

辐射工作场所	监测项目	监测类别	监测方式	监测点位	监测频次
质子治疗系统、硼中子治疗系统、医用回旋加速器	X- γ 辐射剂量率、中子剂量当量率	自行监测	固定式仪表监测	机房固定式监测点位，见图 4-25、图 4-52、图 4-74	实时
			便携式仪表监测	机房四周和顶板屏蔽墙体外、防护门外、监督区边界、控制室、操作台、护士站、办公室等人员长居留场所	1 次/季度
		委托监测	便携式仪表巡测	同自行监测点位	1 次/年
直加机房 1~3、后装机房	X- γ 辐射剂量率	自行监测	固定式仪表监测	见图 4-63	实时
			便携式仪表监测	机房四周屏蔽墙外 30 cm 处、顶棚、防护门、操作位以及其他关注点处	1 次/季度
		委托监测	便携式仪表监测	同自行监测点位	1 次/年
CT 机房 1、2	X- γ 辐射剂量率	自行监测	便携式仪表监测	机房四周屏蔽墙外 30cm 处、顶棚、观察窗、防护门、控制室操作位以及其他关注点（如管线口）	1 次/季度
		委托监测	便携式仪表监测		1 次/年
放药制备区、动物实验区、核素诊断区、核素治疗区等非密封放射性物质工作场所	X- γ 辐射剂量率	自行监测	便携式仪表监测	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放有放射性物质的设备、装置表面	1 次/月
		委托监测	便携式仪表监测		1 次/年
	β 表面放射性污染	自行监测	便携式仪表监测	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者病房，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。	每次工作结束（药物洒落时及时监测）
		委托监测	便携式仪表监测		1 次/年

6.3.1 环境监测

本项目环境监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，每年至少进行一次，监测数据记录存档，具体环境监测计划列于表 6-3。

表 6-3 本项目环境监测计划

监测方式	监测对象		监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	外照射	便携式仪表巡测	γ 辐射剂量率和中子剂量率	示范中心内设置若干点位	1 次/年
			γ 辐射剂量率	放射性固体废物外表面、衰变池周围	1 次/年
		固定式仪表监测	γ 辐射剂量率和中子剂量率	示范中心内设置若干环境固定式监测点位	实时
委托监测	外照射		γ 辐射剂量率和中子剂量率	同自行监测点位和放射性固体废物外表面（只测 γ ）	1 次/年
	环境介质	加速器冷却水	H-3、Be-7、总 β	冷却水集水池	1 次/年或排放前
		射线装置固体废物外表面	感生放射性核素、 γ 能谱、	放射性固体废物	收集即送贮时
		衰变池废液	总 β	衰变池取样口	1 次/年
		核医学放射性固体废物	γ 辐射空气吸收剂量率、 β 表面放射性污染	固废暂存容器表面	1 次/年
	土壤		总 β	核医学工作场所半径 50 m 范围以内	1 次/年

6.3.2 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主、个人剂量报警仪为辅的方式进行。

个人剂量计用于对辐射工作人员的常规个人剂量监测，建设单位为每名辐射工作人员配备个人剂量计，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。

建设单位安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。个人剂量档案应终身保存。

此外，建设单位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。

6.3.3 监测设备

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

表 6-3 质子治疗系统监测设备数量表

序号	设备名称	区域	数量/台
1	固定式 γ 探测器	质子治疗系统	18
		硼中子治疗系统	9
		放药制备及动物实验区	11
		直线加速器	6
		后装治疗机	2
		核素诊断区	5
		核素治疗区	26
2	固定式中子探测器	质子治疗系统	18
		硼中子治疗系统	9

		放药制备及动物实验区	1
3	便携式中子辐射巡测仪	质子治疗系统	1
		硼中子治疗系统	1
		放药制备及动物实验区	1
4	便携式 X- γ 辐射巡测仪	质子治疗系统	1
		硼中子治疗系统	1
		放药制备及动物实验区	5
		直线加速器、后装治疗机	1
		大孔径 CT	1
		核素诊断区	3
		核素治疗区	1
5	便携式表面污染检测仪	硼中子治疗系统	1
		放药制备及动物实验区	6
		核素诊断区	3
		核素治疗区	1
6	个人剂量报警仪	质子治疗系统	1
		硼中子治疗系统	6
		放药制备及动物实验区	6
		直线加速器、后装治疗机	8
		核素诊断区	2
		核素治疗区	4
7	个人剂量计	所有辐射工作场所	1 个/人

6.4 辐射事故应急预案

建设单位根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）等的有关规定，制定《辐射事故应急预案》。

建设单位应根据本项目的建设内容和特点对现有的《辐射事故应急预案》进行补充完善，在本项目建成运行前，完善好可行、符合要求的应急预案。

6.5 申请者从事辐射工作能力评价

6.5.1 辐射安全与环境保护管理

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应当设置专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少安排 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

同时，根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40号）的规定，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。

建设单位拟成立专门的辐射安全与环境保护管理领导小组，全面负责示范中心的辐射安全管理工作。

建设单位按要求建立健全了辐射安全与环境保护管理机构，配备了相应资质的专业人员后，可满足要求。

6.5.2 辐射工作人员培训

根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），新从事放射性同位素与射线装置使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全考核合格证书到期的人员，应通过生态环境部有关平台报名并参加考核。

建设单位制定了辐射工作人员培训计划，规定新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全考核合格证书到期的人员，必须通过生态环境部有关平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

在严格落实人员培训计划后，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

6.5.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者射线装置使用场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

经预测分析评价，本项目辐射工作场所的辐射屏蔽设计均能确保屏蔽体外剂量率水平满足国家相关标准的要求。各辐射工作场所都设计了完备、冗余的安全连锁系统，通过门机连锁、清场搜索、紧急停机、紧急开门、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，并确保辐射工作场所屏蔽设施经验收合格后投入使用。在此基础上，本项目辐射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。

6.5.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目拟为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质单位监测，监测周期不超过 3 个月。建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。并配备个人剂量报警仪，用于工作人员在机房等控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目拟在相关辐射工作场所周围设固定式监测仪表，能够对工作场所的辐射水平进行实时在线监测。此外，拟配备便携式中子辐射巡测仪、便携式 X- γ 辐射巡测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

建设单位按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，能满足相关要求。

6.5.5 规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

建设单位还应根据本项目的建设内容及特点补充相应的操作规程并对相关规章制度进行更新完善。在按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

6.5.6 辐射事故应急

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

建设单位根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 22 日修正版）等的有关规定，制定《辐射事故应急预案》。

建设单位应根据本项目的建设内容和特点对现有的《辐射事故应急预案》进行补充完善，在本项目建成运行前，完善好可行、符合要求的应急预案，可满足相关要求。

6.5.7 放射性三废治理

本项目运行期间产生的放射性三废主要来自射线装置的运行以及非密封放射性物质的使用。

放射性废气主要为射线装置产生的感生放射性气体、非密封放射性物质工作场所产生的废气。各辐射工作场所内设置了独立的排风系统，放射性废气经排风管道汇至屋面排风口排入环境。

可能产生的放射性废水为射线装置的活化冷却水、非密封放射性物质工作场所产生的废水。示范中心设置了冷却水集水池、衰变池，可确保放射性废水在排放前安全暂存。暂存一定时间，排放前进行取样监测，满足解控标准后排入示范中心污水管网。

可能产生的放射性固体废物主要为射线装置运行期间产生的活化结构部件、非密封放射性物质工作场所产生的固废，暂存于放射性固废暂存区域内。暂存一段时间后，满足解控标准的，解控后按非放射性固体废物处理或由回收利用，不满足解控标准的委托有资质单位处理。

6.6 环保投资一览表

本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表见表 6-4。

表 6-4 本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资 （万元）
1	辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全防护领导小组	/
		辐射安全管理制度：制定操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案、辐射事故应急预案等；准备应急物资；制度上墙及相关宣教活动	
2	人员培训考核	组织辐射工作人员参加辐射安全与防护考核、组织内外部培训学习	10
3	监测仪器和防护用品	固定式 γ 探测器、固定式中子探测器、便携式中子巡检仪、便携式 X γ 巡检仪、便携式表面污染检测仪、个人剂量报警仪、个人剂量计等	390
		工作服、口罩、手套等个人防护用品	
4	辐射防护设施工程（建造辐射屏蔽体、安全联锁系统、辐射监测系统、通风系统、放射性三废处理设施等）		8100
	总计		8500

6.7 竣工环保验收一览表

本项目建成后，建设单位应按规定组织自主验收，编制验收监测报告书。本项目的竣工环保验收内容及要求列于表 6-5。

表 6-5 本项目竣工环保验收一览表

序号	验收内容	验收要求	
1	环保资料	本项目审批后的环境影响报告书、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。	
2	辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。	
3	人员要求	1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名； 2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
4	屏蔽体外剂量率	辐射工作场所屏蔽体外剂量率： a、居留因子 $T > 1/2$ ，剂量率水平不高于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ； b、居留因子 $T \leq 1/2$ ，剂量率水平不高于 $10\mu\text{Sv/h}$ 。	
5	辐射防护与安全措施	1.辐射工作场所分区：工作场所划分控制区、监督区。 2.人身安全联锁系统：射线装置具备安全联锁系统，由门内开门按钮、出入管理设备、紧急开门按钮、急停按钮、清场按钮、声光报警灯、视频监控和对讲装置等组成，且所有安全设备均能正常投入使用； 3.通风系统：射线装置机房上送下排，治疗室的换气次数不少于 4 次/h；非密封放射性物质工作场所设置独立通风系统，将废气统一收集，经过滤后排放。 4.场所辐射监测系统：设置场所固定式辐射监测点。	
6	放射性三废处理设施	废气	辐射工作场所设有独立的通风系统，各区域排风管最终引至屋面。
		废水	设置冷却水集水井用于暂存活化冷却水，设置衰变池用于暂存核医学废水。
		固体废物	设有固废间，用于暂存放射性固体废物。
7	辐射监测	环境监测	制定环境辐射监测计划，包括自行监测和委托监测，至少每年开展 1 次。
		个人剂量监测	每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 3 个月，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。配备一定数量的个人剂量报警仪。
		监测设备	按要求配备。

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。

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）本项目的建设是晋江市乃至福建省经济社会发展的需要，是提高现代医疗服务发展水平、不断满足多层次、多样化医疗服务需求的体现。

（2）通过本项目的建设，提高医院基础设施条件，引进先进设备、先进技术，提高患者就医条件，对满足人民群众不断增长的医疗需求和提高人民群众的身体健康水平具有重要意义。

（3）本项目的经济效益主要来自项目运行后的财政收入。收入来源主要为医疗收入、药品收入、其他收入、财政差额拨款等。财务分析计算结果表明，本项目具有较好的经济效益。

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面：本项目主要建设放射诊断治疗机房、核医学场所及其配套用房、设施等。

能源方面，项目运行期间需用水、电等能源。

（2）经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等三个方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的瞬发辐射穿过屏蔽体进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性气体进入大气环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，项目运行期间对环境的影响均低于国家标准中规定的限值。

7.3 正当性分析

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于广大人民。因此，本项目的实施是正当的。

8 公众参与

本项目根据《环境影响评价公众参与办法》的要求，在项目环境影响报告书的编制阶段，依法公开建设项目环境影响报告书的公众参与信息。公示情况详见《晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心项目环境影响报告书公众参与情况说明》。

9 结论与建议

9.1 结论

9.1.1 项目工程概况

晋江市肿瘤先进粒子治疗示范中心总占地面积 7317.32 平方米，总建筑面积 25958.27 平方米，地上三层、地下一层。核技术利用建设内容包括 1 套质子治疗系统、1 套硼中子俘获治疗装置、3 台直线加速器、1 台后装治疗机、2 台大孔径 CT、1 个用于制备 PET 放射性药物及小动物实验的乙级非密封源场所（使用 1 台回旋加速器、1 台小动物 PET/CT、1 台小动物 SPECT/CT）、1 个用于核素诊断的乙级非密封源场所（使用 1 台 PET/CT、1 台 SPECT/CT）、1 个用于核素治疗的乙级非密封源场所（16 间核素病房）。

项目运行期间的辐射污染源主要是瞬发辐射、感生放射性以及运行期间产生放射性三废。

9.1.2 实践的正当性

本项目设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响很小，满足国家相关标准要求。本项目对患者和社会所带来的利益（主要是患者的健康有利）是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术利用实施活动是正当的。

9.1.3 选址、布局合理性分析

本项目拟建于晋江市医院西北角，与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的治疗区等，并设置物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目根据功能需要布局辐射肿瘤放射诊疗场所，便于辐射工作场所的辐射防护和安全管理。从辐射防护与环境保护的角度，项目的选址可行，平面布局合理。

9.1.4 辐射安全与防护措施

（1）辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。

（2）辐射安全联锁系统：射线装置工作场所均设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括人员出入管理、门机联锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器，以及工作状态指示灯、视频监控以及电离辐射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：本项目辐射工作场所设有通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计均能满足相关标准要求，确保排入环境中的放射性废气对环境的影响能够满足相关标准要求。

（5）工作场所辐射监测系统：辐射工作场所设有固定式辐射监测仪表，对场所周围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。

9.1.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间工作人员和公众所受年最大有效剂量分别低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

9.1.6 放射性三废排放和处理

本项目运行期间，放射性三废均得到有效管控，受控排放。

9.1.7 辐射安全管理

运营单位拟成立专门的辐射安全与环境保护管理领导小组，并建立一系列辐射安全管理制度，内容涵盖人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等；制定辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在上岗前参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗；目前拟制定的辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

9.1.8 总结

综上所述，本项目在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和周围环境的辐射影响符合环境保护的要求，该项目对环境的辐射影响是可以接受的。建设单位在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，故从辐射防护和环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。

9.2 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、硼中子治疗后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。

（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。