

编号：HA·HP·2026·03

核技术利用建设项目
伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置
环境影响报告书
（报批前公示稿）

中山大学·深圳

2026年3月

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置

建设地点：广东省深圳市光明区公常路 66 号中山大学深圳校区 24 栋理工科组团与 25 栋理工科组团连接处直线加速器区

建设性质：新建

建设单位：中山大学·深圳

建设内容及规模：对中山大学深圳校区 24 栋理工科组团与 25 栋理工科组团连接处停车库进行改造，作为理学院直线加速器设备建设用地，总改造面积约 951.03 平方米。拟使用一套最高能量 200MeV 的电子直线加速器（I 类射线装置），用于科学研究。

项目投资：总投资约为 ■■■ 万元，其中环保投资约 ■■■ 万元，占总投资的 ■■■ %。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

本项目建设单位为中山大学·深圳（法人证书见附件 1），项目前期工作具体由中山大学理学院主导承担。

中山大学（Sun Yat-sen University），简称“中大”，由中华人民共和国教育部直属，是教育部、国家国防科技工业局和广东省共建的综合性全国重点大学，位列首批国家“双一流”A 类、“985 工程”、“211 工程”，入选国家“珠峰计划”、“111 计划”、“2011 计划”、卓越法律人才教育培养计划、卓越医生教育培养计划、国家大学生创新性实验计划、国家级大学生创新创业训练计划、国家建设高水平大学公派研究生项目、新工科研究与实践项目、全国深化创新创业教育改革示范高校、国家大学生文化素质教育基地、国家创新人才培养示范基地、国家国际科技合作基地、首批高等学校科技成果转化和技术转移

基地、学位授权自主审核单位等，是中国高校行星科学联盟、中国人工智能教育联席会、中国自由贸易试验区研究院联盟、大学通识教育联盟、粤港澳高校联盟、粤港澳大湾区物流与供应链创新联盟成员。1924年，孙中山先生亲手将广州地区多所高校整合创立国立广东大学。学校于1926年定名为国立中山大学。今日的中山大学，由1952年院系调整后分设的中山大学和中山医科大学于2001年10月合并而成。截至2025年9月30日，中山大学由广州校区、珠海校区、深圳校区三个校区、五个校园及十家附属医院组成；开设129个本科专业；有博士后科研流动站47个，一级学科博士点63个，一级学科硕士点69个，专业学位类别58种。

中山大学深圳校区位于深圳市光明区公常路66号，是2015年11月3日由深圳市人民政府与中山大学签署共建世界一流大学战略合作协议的重要成果，2015年12月由教育部批准建设，是中山大学三校区五校园的主体校园之一，定位目标建设成为支撑引领深圳经济社会发展，辐射粤港澳大湾区及亚太地区的高层次创新人才重要培养基地。2018年6月12日，中山大学深圳校区校园基础建设全面启动，2023年底一期校园全部交付使用。中山大学深圳校区现设有17个学院，具体包括：医学院、公共卫生学院（深圳）、药学院（深圳）、材料学院、生物医学工程学院、电子与通信工程学院、智能工程学院、航空航天学院、农业与生物技术学院、生态学院、集成电路学院、先进制造学院、先进能源学院、网络空间安全学院、管理学院（创业学院）、理学院、柔性电子学院以及中山大学附属第七医院、第八医院、人文社科研究院、深圳经济研究院。深圳校区占地面积3.143平方公里，一期用地面积1.448平方公里（2172亩），建筑面积129万平方米。校区规划可容纳20000名在校生。截至2025年9月，在校生总数15923人，其中本科生10017人，硕士研究生3838人，博士研究生2068人。

中山大学理学院位于中山大学深圳校区，成立于2021年2月。根据中山大学建设世界一流大学的战略目标，理学院秉承“德才双修、顶天立地，知行合一、勇立潮头”的学院文化，开展“数学”和“物理学”两个一级学科建设，为深圳校区学科布局和发展提供支持，支撑伽马光子对撞机及综合粒子设施等大科学装置建设，为国家重大战略需求和粤港澳大湾区建设服务。中山大学物理学科始建于1924年创校之初，在教育部第四轮学科评估中物理学科评级为A-并列全国第7位。理学院物理学学科人才培养涵盖理论物理、粒子物理与原子核物理、原子与分子物理、等离子体物理、凝聚态物理、

声学、光学、无线电物理、物理与交叉学科（医学物理、统计物理、核科学）等学科方向，其中重点开展粒子物理与原子核物理、理论物理、等离子体物理和光学四个学科方向建设。现有教职工 57 人，其中顾问教授 1 人（中国科学院院士）、教授 9 人（包括 1 位教育部新世纪优秀人才、2 位广东省重大人才工程）、特聘教授 2 人、正高级工程师 1 人，副教授 18 人，助理教授 7 人，专职科研人员（含博士后）7 人，专业技术人员 6 人，党政管理人员 7 人。理学院现已获批广东省教育厅 2024 年度广东省普通高校重点科研平台，联合东莞散列中子源获批广东省重点实验室，累计立项的国家、省市等各类科研项目约 40 项，其中教育部重大项目 1 项，面上项目 13 项，青年项目 15 项，横向项目 10 项等；国家级人才项目 1 项、省级重大人才项目 2 项；发表高水平论文 50 余篇；申请国家（含国际）发明专利 13 余项，获批专利 4 项。

1.2.2 项目背景、意义

中山大学建设的伽玛光子对撞机（Gamma collider based on electron interacting with laser，简称 Genie，或奇霓）将是世界上第一台伽玛光子对撞机。这是一种新型的高能物理实验装置，具有独特的物理目标和重要科学意义，从低能（1MeV）到高能（125 GeV 到几个 TeV），在各个能区都有丰富的物理，与其他已有类型的对撞机如强子对撞机、正负电子对撞机、电子强子对撞机等互为补充，具有不可替代的作用。Genie 项目将建成两条高亮度的伽玛光束线，为高端制造工艺中主流的钛合金、高温合金器件性能反馈体系提供高品质的射线线站；同时将建成的两个高品质电子束打靶实验室也为电子束辐照材料、电子照相、核物理等提供绝佳的实验站；装置将搭载 200TW 的超强激光系统，可以开展强激光等离子体领域的研究，包括激光驱动产生脉冲中子源、高功率 THz 波等提供新型交叉研究实验平台。

2023 年 8 月 2 日，项目获得《教育部关于中山大学伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置项目可行性研究报告的批复》（见附件 2）。

1.2.3 建设规模及周期

本项目主要建设内容为一套伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置，主要技术参数见表 1-1。

表 1-1 伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置主要技术参数

序号	射线装置类型	装置参数	数量/台	类别	使用场所
1	电子直线加速器	加速粒子：电子 最高能量：200MeV 平均每秒电子数：3.13E+11 e/s	1	I	24 栋理工科组团与 25 栋理工科组团连接处直线加速器区

根据《射线装置分类》的规定：“粒子能量大于等于 100 兆电子伏的非医用加速器”属 I 类射线装置。本项目装置属 I 类射线装置。根据《深圳市生态环境局关于印发<深圳市建设项目环境影响评价分类管理名录（2026 年版）>的通知》（深环规〔2026〕1 号，2026 年 2 月 25 日）的规定，本项目使用 I 类射线装置，环境影响评价文件类别确定为环境影响报告书。因此，中国原子能科学研究院受建设单位的委托（环评委托书见附件 3），负责本项目的辐射环评工作。

1.2.4 产业政策和规划符合性

1.2.4.1 产业政策符合性

本项目属于《产业结构调整指导目录》（2024 年本）中“鼓励类”中第六项第 4 条“核能——核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”，以及第三十一项第 10 条“科技服务业——国家级工程（技术）研究中心、国家产业创新中心、国家农业高新技术产业示范区、国家农业科技园区、国家认定的企业技术中心、国家实验室、全国重点实验室、国家重大科技基础设施、科技企业孵化器、众创空间、绿色技术创新基地平台、新产品开发设计中心、科教基础设施、产业集群综合公共服务平台、中试基地、实验基地、国家技术创新中心建设”的范畴。因此，该项目建设符合国家相关产业政策。

1.2.4.2 规划符合性

项目建设用地位于中山大学深圳校区内部，用地性质为教育设施用地，建设用地规划许可证号为深规土许 GM-2018-0005 号，见附件 4。因此，本项目建设符合土地利用规划相关要求。

1.2.5 周围环境概况

本项目选址于广东省深圳市光明区公常路 66 号中山大学深圳校区 24 栋理工科组团与 25 栋理工科组团连接处直线加速器区，现状为正在使用的地下停车库。项目地理位置见图 1-1，周边环境见图 1-2，项目在中山大学深圳校区的位置见图 1-3、图 1-4，项目现状平面布局见图 1-5，项目改造后平面、剖面布局见图 1-6 至图 1-8，项目现状照片见图 1-9。

由图 1-2 可知，项目东侧、西侧及北侧均为中山大学深圳校区内部，南侧为公常路，路对面为圳美同富裕工业区、深圳市平进股份有限公司，项目周围 200 米范围内无幼儿园、中小学，符合《广东省未成年人保护条例》第三十二条“学校周围直线延伸二百米范围内禁止设立易燃易爆、剧毒、放射性、腐蚀性等危险物品的生产、经营、储存、使用场所或者设施”的相关规定。

深圳市地图

分区设色有邻区基本表版



图 1-1 项目地理位置图



图 1-2 项目周边环境图



图 1-3 项目在中山大学深圳校区的位置图

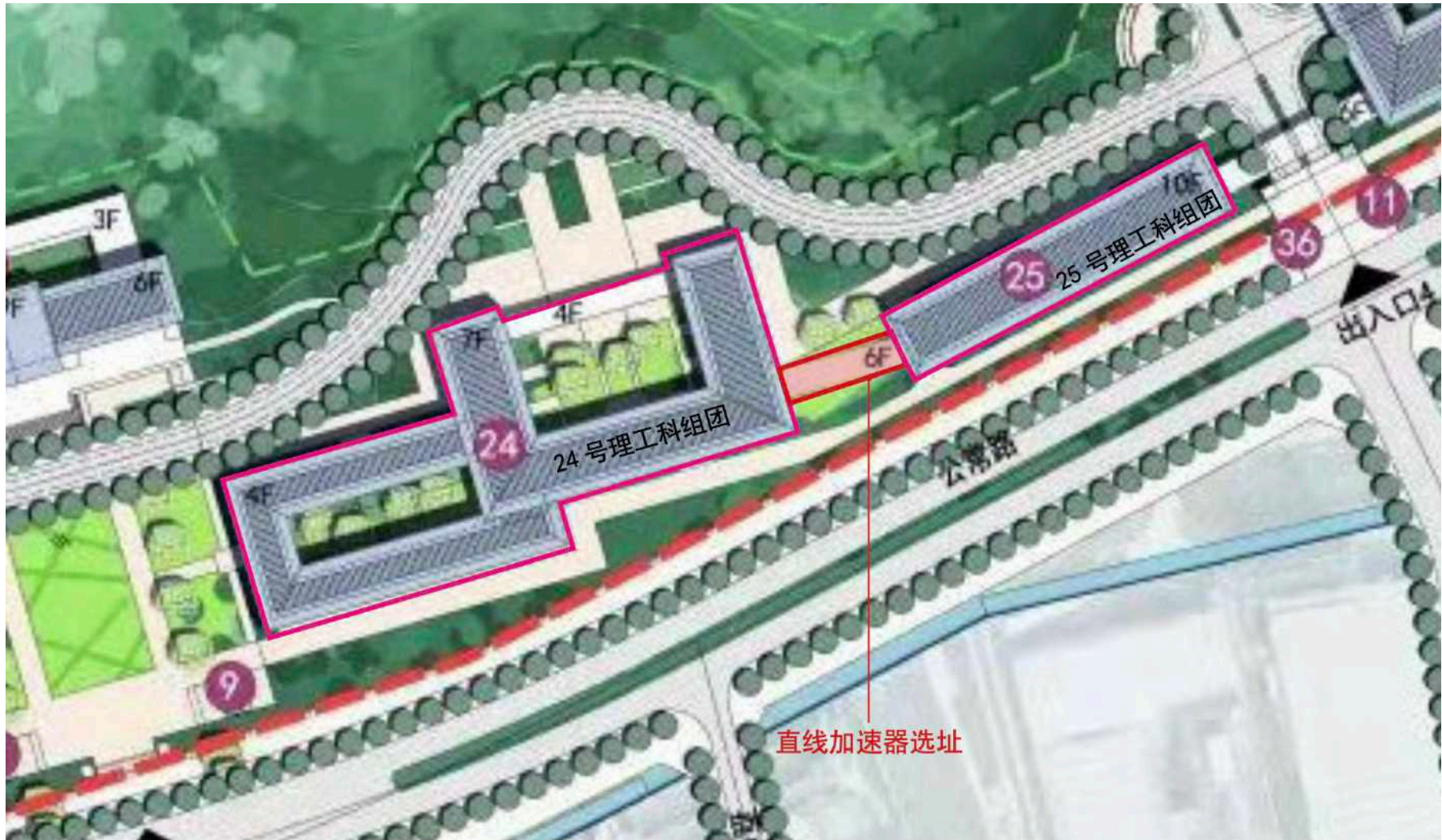


图 1-4 项目具体位置示意图

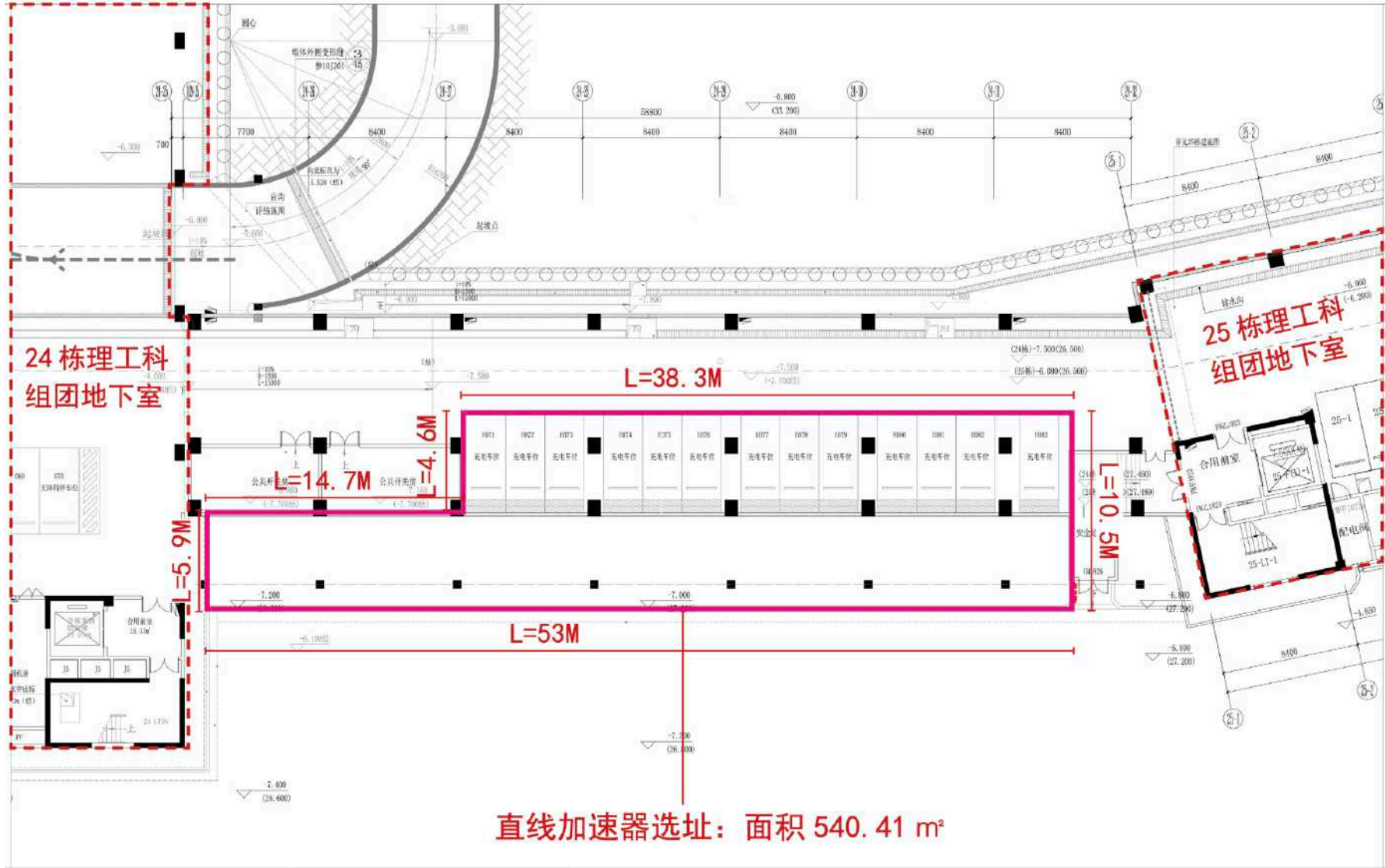


图 1-5 项目改造前的现状平面图

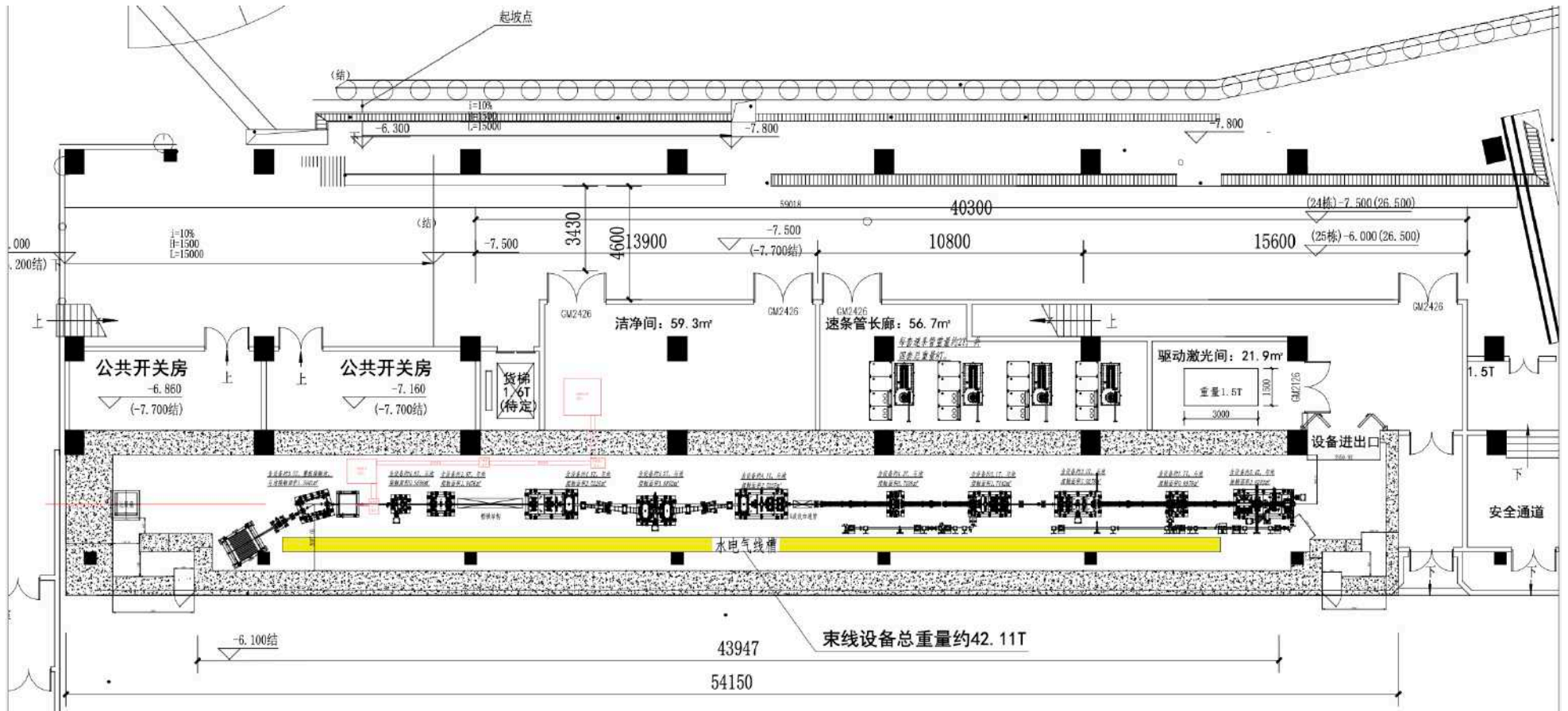


图 1-6 项目改造后的平面图（半地下一层）

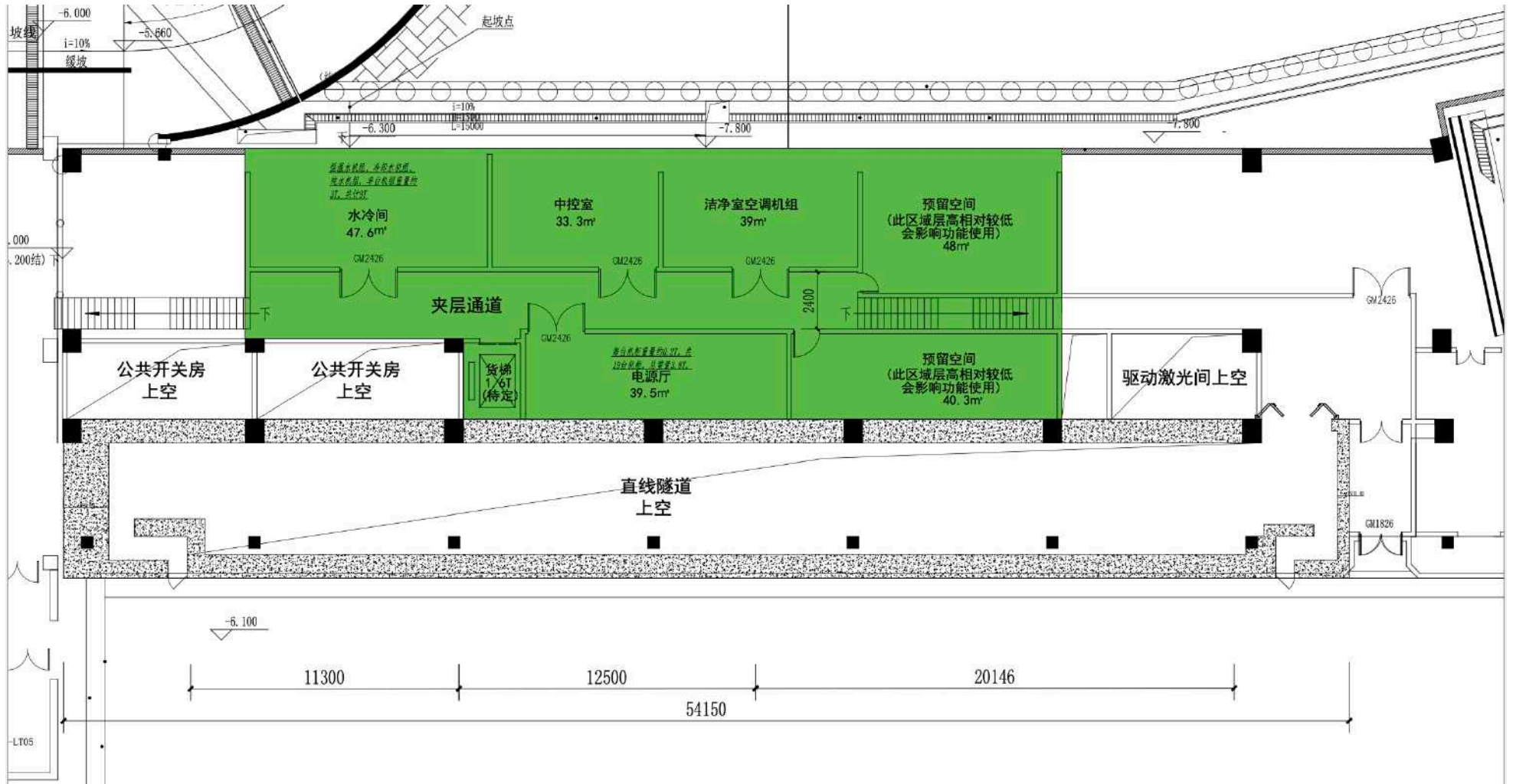
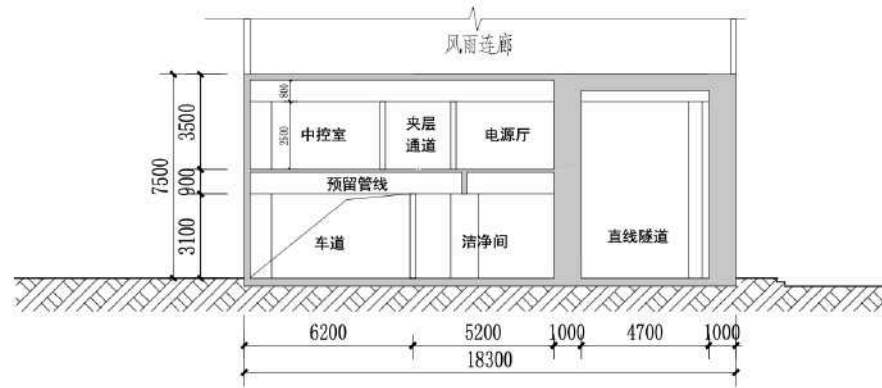


图 1-7 项目改造后的平面图（二层）

1-1剖面图



2-2剖面图

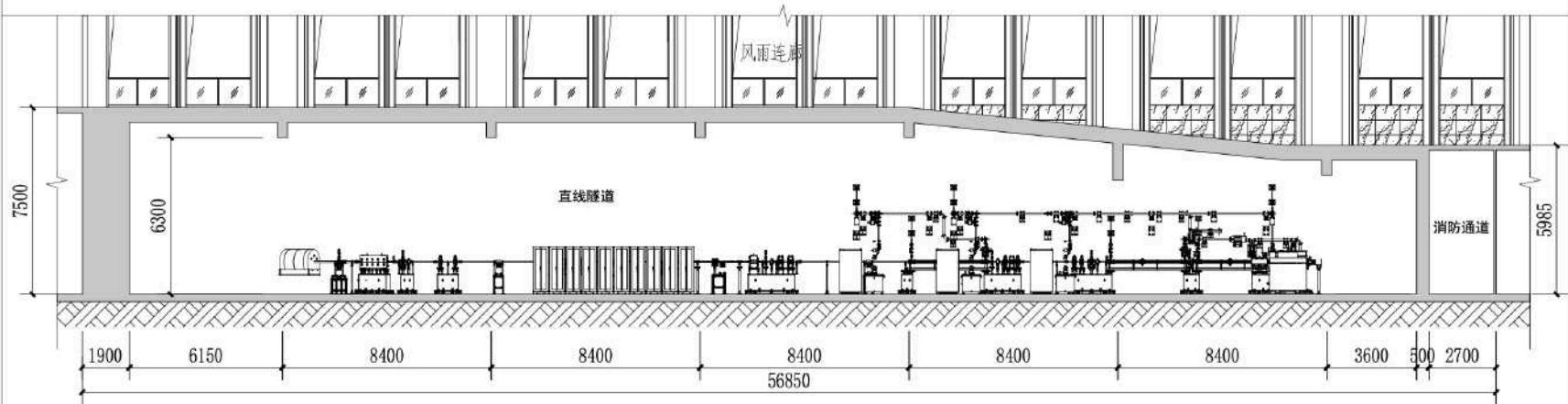


图 1-8 项目改造后的剖面图

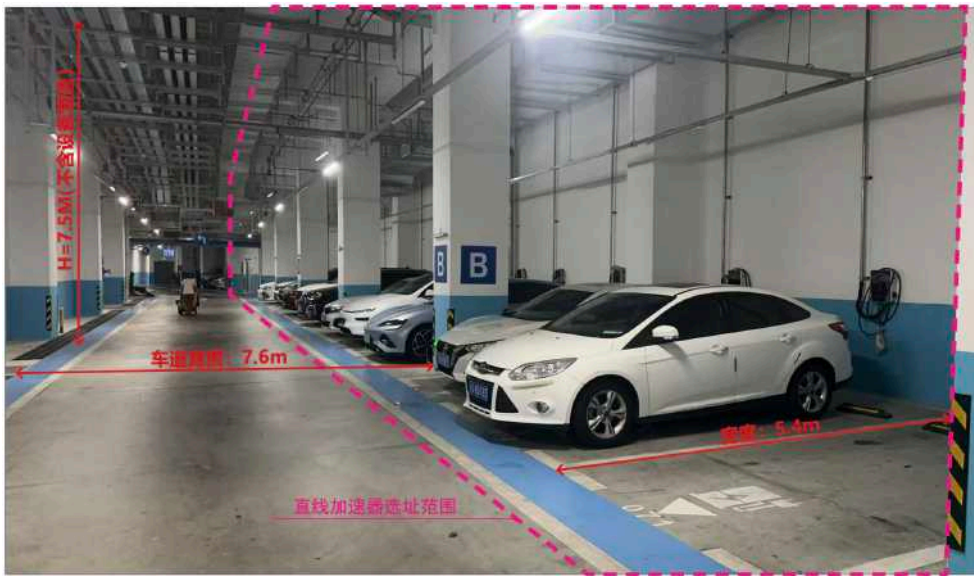


图 1-9 项目现状照片

1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状

1.2.6.1 核技术利用现状

中山大学·深圳现持有广东省生态环境厅核发的辐射安全许可证（证书编号：粤环辐证[B9325]，见附件5），有效期至2028年7月18日，其种类和范围为：使用Ⅱ类、Ⅲ类射线装置，已许可使用的射线装置明细见表1-2。

表 1-2 中山大学·深圳已许可使用的射线装置明细

序号	装置名称	规格型号	类别	数量/台	活动种类	场所名称
1	冷场发射透射电镜系统	JEM-F200	Ⅲ类	1	使用	中山大学深圳校区东教学楼三栋 105A
2	120kV 透射电镜	JEM-1400Flash	Ⅲ类	1	使用	中山大学深圳校区东教学楼三栋 105B
3	聚焦离子束双束电子显微镜	FEI Helios 5CX	Ⅲ类	1	使用	中山大学深圳校区东教学楼三栋 114C
4	3D-X 射线显微镜	Xradia 515 Versa	Ⅱ类	1	使用	中山大学深圳校区东教学楼三栋一层 107
5	X 射线单晶衍射仪	XtaLAB Synergy Custom	Ⅲ类	1	使用	中山大学深圳校区东教学楼三栋 203B
6	XR 4.0 expert unit X 射线成像设备	XR 4.0 expert unit	Ⅲ类	1	使用	中山大学深圳校区东区 3 号楼物理实验室 II
7	Horizon-Wi 型双能 X 射线骨密度仪	Horizon-Wi	Ⅲ类	1	使用	中山大学深圳校区医学园半地下一层
8	L11831 型微焦点 X 射线源	L11831 型	Ⅲ类	1	使用	中山大学深圳校区医学园二栋 B103 室

1.2.6.2 环评审批和环保验收情况

中山大学·深圳根据《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的规定，严格落实环评审批、辐射安全许可办理及竣工环保验收手续，在许可的种类和范围内从事射线装置的使用工作，严格执行辐射安全管理的各项规章制度，于每年1月31日前向生态环境主管部门提交上一年度评估报告，到目前无辐射安全事故发生。2025年的年度评估报告已按要求提交，见附件6。

1.2.6.3 辐射安全管理现状

1.2.6.3.1 辐射安全管理机构

建设单位已成立辐射安全与环境保护管理机构，并安排专人专职负责辐射安全与防护管理工作。中山大学·深圳辐射安全与环境保护管理机构的成员详见下表。

表 1-3 中山大学·深圳辐射安全与环境保护管理机构

机构名称		辐射安全与环境保护管理机构			
联系人		姓名	董煜	电话	020-84110847
		Email	dongy77@mail.sysu.edu.cn		
序号	管理人员	姓名	职务或职称	工作部门	专/兼职
1	组长	陈骞	主管	设备与实验室管理处	专职
2	副组长	董煜	科员	设备与实验室管理处	专职
3	成员	胡国庆	处长	设备与实验室管理处	专职
4	成员	郑仕勇	副处长	设备与实验室管理处	专职
5	成员	吴昱彤	安全员	分析测试中心	兼职
6	成员	毕远杰	正高级工程师	理学院	兼职
7	成员	全昌云	安全员	生物医学工程学院	兼职
8	成员	李怡淳	安全员	公共卫生学院（深圳）	兼职
9	成员	刘文辉	安全员	设备与实验室管理处	专职

1.2.6.3.2 辐射安全管理规章制度

中山大学·深圳已制定较为完善的辐射安全管理制度，并严格按照规章制度执行，包括《辐射安全管理岗位职责》《辐射设备检修维护制度》《辐射防护和安全保卫制度》《放射性同位素使用登记制度》《辐射工作人员培训要求及计划》《辐射工作人员及场所监测方案》《辐射安全与防护状况年度评估制度》《射线装置台账管理及使用登记制度》，具体见附件 7。

1.2.6.3.3 辐射工作人员培训

中山大学·深圳制定了辐射工作人员培训计划，目前辐射工作人员已全部完成生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，且获得合格证书。新上岗辐射工作人员和现持有辐射安全培训合格证书到期的人员，必须通过生态环境部认可的辐射安全与防护考核且考核合格后，方可从事辐射工作。

1.2.6.3.4 个人剂量监测

中山大学·深圳目前已委托广东省职业病防治院承担辐射工作人员的个人剂量监测工作，监测频度为每3个月检测一次。在岗的辐射工作人员均已按照规范佩戴了个人剂量计，在个人剂量计佩戴时间每次届满一个监测周期时，由专人负责收集剂量计送检更换，并将每季度的个人剂量检测结果和每年度的个人剂量检测报告存档备案。最近一年辐射工作人员的年度个人剂量检测结果均不超过职业人员剂量约束值，见附件8，说明建设单位采取的辐射防护和安全管理措施是可行的。

1.2.6.3.5 工作场所及环境监测

建设单位定期对现有辐射工作场所进行辐射水平监测。同时，每年委托有资质单位进行一次辐射工作场所和周边环境监测，监测数据记录存档。2025年度辐射工作场所监测委托广东核协检测服务有限公司（CMA：202019115369）开展，监测报告见附件9。由报告可以看出，建设单位辐射工作场所及周围环境辐射水平满足相关标准要求。

1.2.6.3.6 监测仪器和防护用品

建设单位的辐射工作人员都配有个人剂量计。建设单位配置的辐射监测仪器清单见表1-10。防护用品配备了铅衣、铅帽、铅手套、铅眼镜和铅围脖各2套。辐射监测仪器和防护用品能够满足现在工作的需要。

表 1-10 现有辐射监测仪器和防护用品

序号	仪器名称	型号	购置日期	仪器状态	数量
1	环境级便携式 X/γ 剂量测量仪	FH 40 G NBR	2023.6	正常	1
2	便携式表面沾污仪	COMO170	2023.6	正常	2
3	中子剂量仪	LB1230N	2023.6	正常	1
4	手提式氦气连续监测仪	RAD7	2023.6	正常	1
5	宽量程辐射剂量测量仪	AT1123	2023.6	正常	1
6	便携式 γ 个人剂量报警仪	RadEye PRD	2023.6	正常	5
7	大范围电离室	FHT 191	2023.6	正常	1
8	电离室巡检仪	Fluke451P	2023.6	正常	1
9	便携式 X、γ 剂量率仪	RT2210	2025.5	正常	1
10	核辐射检测仪	GC-01	2023.9	正常	1
11	核辐射检测仪	GC-01	2024.9	正常	1

1.2.6.3.7 辐射事故应急管理情况

建设单位制定了《中山大学辐射安全事故应急预案》，见附件 7，预案中明确了应急指挥机构、人员组成及分工、应急部门及人员职责、应急器材，发生辐射事故时的报告、通讯联络方式、应急处置方式等。

发生辐射事故时，应立即启动本单位的辐射事故应急预案，采取必要的防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向深圳市生态环境主管部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向深圳市卫生行政部门报告。同时，需进行工作人员的意外事故剂量监测和工作场所及周围环境的应急监测，并做好详细的监测记录。

1.3 编制依据

1.3.1 法律、法规和规章

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》（中华人民共和国主席令第 9 号，2015 年 1 月 1 日施行）；
- (2) 《中华人民共和国环境影响评价法》（全国人民代表大会常务委员会，2018 年 12 月 29 日施行）；
- (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（中华人民共和国主席令第 6 号，2003 年 10 月 1 日）；
- (4) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日修正版）；
- (5) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日修订版）；
- (6) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令 第 18 号，2011 年 5 月 1 日施行）；
- (7) 《关于发布<射线装置分类>的公告》（环境保护部 国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日）；

- (8) 《建设项目环境保护管理条例》（国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日起施行）；
- (9) 《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）；
- (10) 《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）；
- (11) 《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）；
- (12) 《关于印发<核技术利用建设项目重大变动清单（试行）>的通知》（环办辐射函[2025]313 号）；
- (13) 《广东省未成年人保护条例》（2009 年 1 月 1 日施行）；
- (14) 《深圳市生态环境局关于印发<深圳市建设项目环境影响报告书（表）编制监督检查办法>的通知》（深环规〔2022〕3 号，2022 年 6 月 13 日）；
- (15) 《深圳市生态环境局关于印发<深圳市建设项目环境影响评价分类管理名录（2026 年版）>的通知》（深环规〔2026〕1 号，2026 年 2 月 25 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 5172-2025，2026 年 5 月 1 日实施）；
- (3) 《放射性废物管理规定》（GB 14500-2002）；
- (4) 《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）；
- (5) 《环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）；
- (6) 《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

- (7) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；
- (8) 《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）；
- (9) 《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ 979-2018）；
- (10) 《电子直线加速器工业 CT 辐射安全技术规范》（HJ 785-2016）；
- (11) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）；
- (12) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.5-2015）；
- (13) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；
- (14) 《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）；
- (15) 《大气污染物排放限值》（DB 4427-2001）；
- (16) 《水污染物排放限值》（DB 4426-2001）。

1.3.3 其它文件、资料

- (1) NCRP. Report NO.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP,2005;
- (2) IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001;
- (3) 周启甫,戈立新主编. 兆伏级 X、 γ 射线放疗设施屏蔽设计和评价[M]. 北京: 中国原子能出版社. 2013;
- (4) (美) 帕特森 (H.W.Patterson), (美) 托马斯 (R.H.Thomas) 著; 刁会昌等译. 加速器保健物理[M].北京, 原子能出版社.1983;
- (5) 建设单位提供的相关资料。

1.4 评价标准

1.4.1 剂量限值和剂量约束值

1.4.1.1 剂量限值

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）规定，工作人员的
职业照射和公众照射的剂量限值如下：

（1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

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

（2）公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

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

1.4.1.2 剂量约束值

根据《粒子加速器辐射安全与防护规定》（GB 5172-2025），本次评价以 5mSv/a 作
为本项目职业人员的年剂量约束值，以 0.1mSv/a 作为本项目公众人员的年剂量约束值。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

结合本项目特点并参考同类型项目，本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平
按照表 1-4 执行。

表 1-4 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

射线装置	辐射工作场所位置	剂量率控制水平
伽玛光子对撞机及综合束流设施 (一期) 验证装置	四周屏蔽墙、防护门、 机房顶外 30cm 处	2.5 μ Sv/h

1.4.3 放射性废物控制标准

1.4.3.1 放射性废液

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中相关规定,满足下列条件的低放废液方可直接排入流量大于 10 倍排放量的普通下水道:

(1) 每月排放的总活度不超过 $10ALI_{min}$;

(2) 每次排放的活度不超过 $1ALI_{min}$, 并且每次排放后不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

根据 GB18871-2002 中的方法, 计算了冷却水中 3H 和 7Be 的单次排放限值 $1ALI_{min}$ 和单月排放限值 $10ALI_{min}$, 列于表 1-5。

表 1-5 冷却水感生放射性核素排放限值

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

注: 放射性核素排放限值 (ALI) 按工作人员连续 5 年的年平均有效剂量限值 20mSv 除以食入或吸入内照射剂量转换因子计算; 食入、吸入内照射剂量转换因子取 GB18871 表 B3 中的保守值。

同时执行广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB 4426-2001)中总 α 、总 β 的最高允许排放浓度标准要求, 具体列于表 1-6。

表 1-6 广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB 4426-2001) 排放标准要求

污染物	最高允许排放浓度, Bq/L
总 α	1.0
总 β	10

1.4.3.2 放射性固体废物

本项目运行期间可能产生的放射性固体废物主要为废靶、废离子树脂及废活性炭。

本项目运行期间产生的放射性固体废物的清洁解控参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 A 中 A2.1 的规定“任何时间段内在进行实践的场所存在的给定核素的总活度或在实践中使用的给定核素的活度浓度不超过表 A-1 所给出的或审管部门所规定的豁免水平”。

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 A 表 A-1 中给出的可能与本项目相关的放射性核素的豁免活度浓度和活度列于表 1-7。对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比的和小于 1 时，方可给予豁免。

表 1-7 放射性固体废物中的核素的豁免活度浓度与豁免活度

核素	半衰期	衰变常数, s ⁻¹	豁免活度浓度, Bq/g	豁免活度, Bq
⁷ Be	53.29 d	1.5054E-07	1E+03	1E+07
²² Na	2.6018y	8.4478E-09	1E+01	1E+06
²⁴ Na	14.959h	1.2871E-05	1E+01	1E+05
³³ P	25.4d	3.1585E-07	1E+05	1E+08
⁴⁵ Ca	162.61d	4.9336E-08	1E+04	1E+07
⁴⁶ Sc	83.79(4) d	9.5746E-08	1E+01	1E+06
⁴⁷ Sc	3.3492(6) d	2.3954E-06	1E+02	1E+06
⁴⁸ Sc	43.67(9) h	4.4090E-06	1E+01	1E+05
⁴⁸ V	15.976d	5.0216E-07	1E+01	1E+05
⁵¹ Cr	27.701d	2.8961E-07	1E+03	1E+07
⁵¹ Mn	46.2min	2.5005E-04	1E+01	1E+05
⁵² Mn	5.591d	1.4349E-06	1E+01	1E+05
⁵³ Mn	3700000a	5.9404E-15	1E+04	1E+09
⁵⁴ Mn	312.2d	2.5697E-08	1E+01	1E+06
⁵⁶ Mn	2.5789h	7.4660E-05	1E+01	1E+05
⁵² Fe	8.275h	2.3268E-05	1E+01	1E+06
⁵⁵ Fe	2.7y	8.1406E-09	1E+04	1E+06
⁵⁹ Fe	44.63d	1.7976E-07	1E+01	1E+06
⁵⁵ Co	17.53h	1.0984E-05	1E+01	1E+06
⁵⁶ Co	77.233d	1.0387E-07	1E+01	1E+05
⁵⁷ Co	271.74d	2.9523E-08	1E+02	1E+06
⁵⁸ Co	70.86d	1.1322E-07	1E+01	1E+06
⁶⁰ Co	5.271y	4.1699E-09	1E+01	1E+05

核素	半衰期	衰变常数, s ⁻¹	豁免活度浓度, Bq/g	豁免活度, Bq
⁶¹ Co	1.649h	1.1676E-04	1E+02	1E+06
⁶³ Ni	100.1y	2.1958E-10	1E+05	1E+08
⁶⁴ Cu	12.701h	1.5160E-05	1E+02	1E+06
⁹⁵ Nb	34.991d	2.2927E-07	1E+01	1E+06
⁹⁷ Nb	72.1min	1.6023E-04	1E+01	1E+06
⁹⁹ Mo	65.976h	2.9183E-06	1E+02	1E+06

1.4.4 其他标准

1.4.4.1.1 NO_x 和 O₃ 控制标准

本项目产生的非放射性有害气体主要为臭氧和氮氧化物，排放方式为通过排风系统外排至环境空气中。本项目工作场所的 NO_x 和 O₃ 浓度限值执行《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素》（GBZ2.1-2019）表1中规定的臭氧最高容许浓度 0.3mg/m³、氮氧化物浓度限值 5mg/m³。

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

本项目装置的最大能量为 200MeV，属I类射线装置。本项目主要的辐射环境影响途径为瞬发辐射外照射以及运行期间排入环境感生放射性气体对人员造成的照射。

《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）“1.5 节评价范围和保护目标”中规定“放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围），对于I类放射源或I类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”。根据 HJ10.1-2016 的要求，本项目电离辐射环境影响评价范围取装置四周实体屏蔽墙向外 100m 的范围。

1.5.2 环境保护目标

本项目电离辐射评价范围内的保护目标以本项目相关的辐射工作人员、场所周围活

动的其他非辐射工作人员以及公众为主，详见图 1-10 及表 1-8。由图 1-2 可知，项目周边二百米范围内无学校，符合《广东省未成年人保护条例》第三十二条“学校周围直线延伸二百米范围内禁止设立易燃易爆、剧毒、放射性、腐蚀性等危险物品的生产、经营、储存、使用场所或者设施”的相关规定。

表 1-8 本项目辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

方位		距离, m	周围环境	保护目标	人数, 人
直 加 隧 道	北	0~10	一层：公共开关房、货梯、洁净间、速调管长廊、驱动激光间、通道等；二层：货梯、电源厅、通道、水冷间、中控室、洁净室空调机组、预留空间等。	职业	6
		10~100	室外通道等	公众	流动人员
	东	0~3	走道	公众	流动人员
		3~100	工学园二栋	公众	300
	南	0~100	室外通道、公常路等	公众	流动人员
	西	0~100	工学园 1 号楼	公众	200
	上方	/	连廊	公众	流动人员
	下方	/	土层	/	/

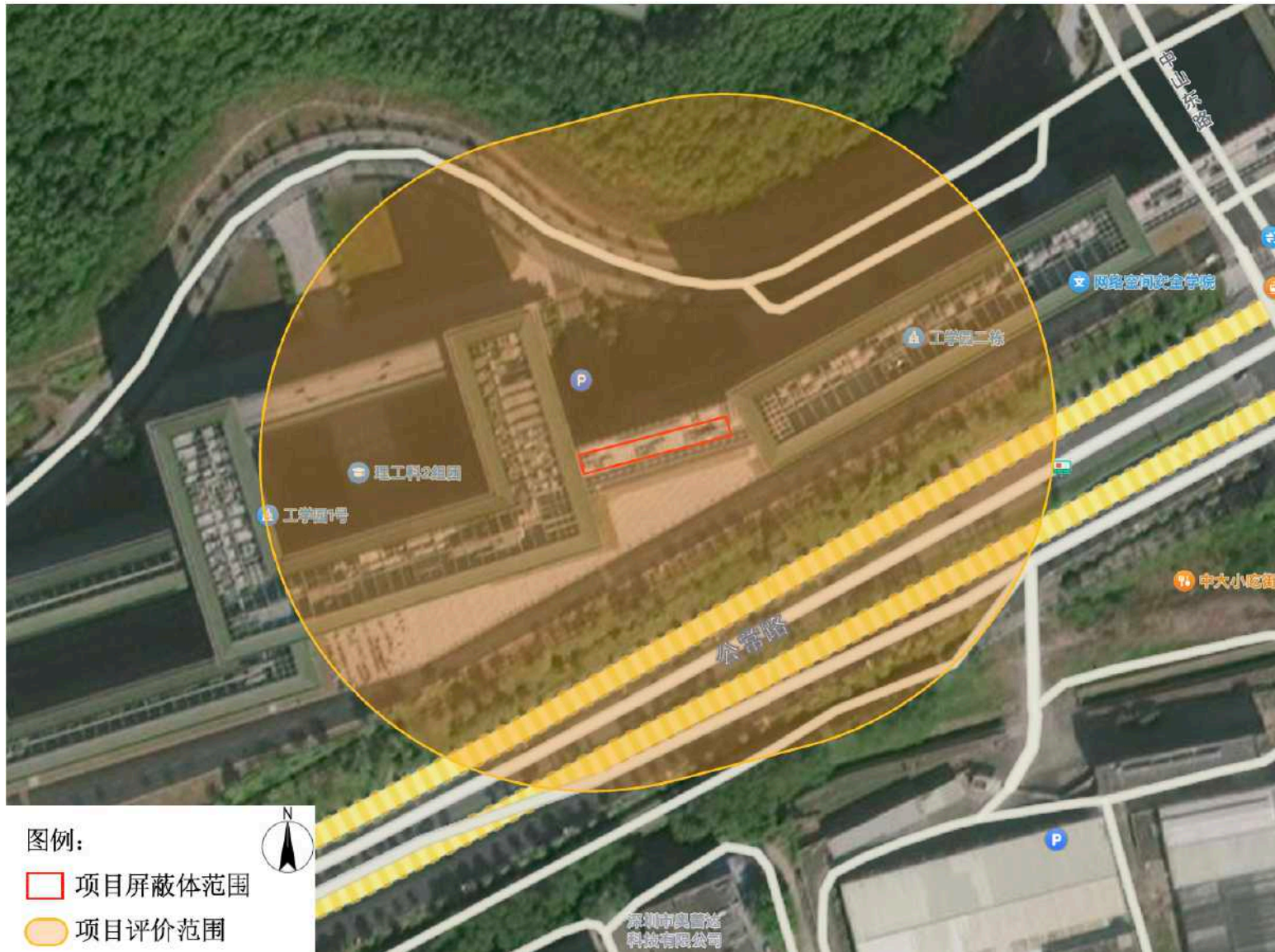


图 1-10 本项目电离辐射评价范围及保护目标示意图（楼外）

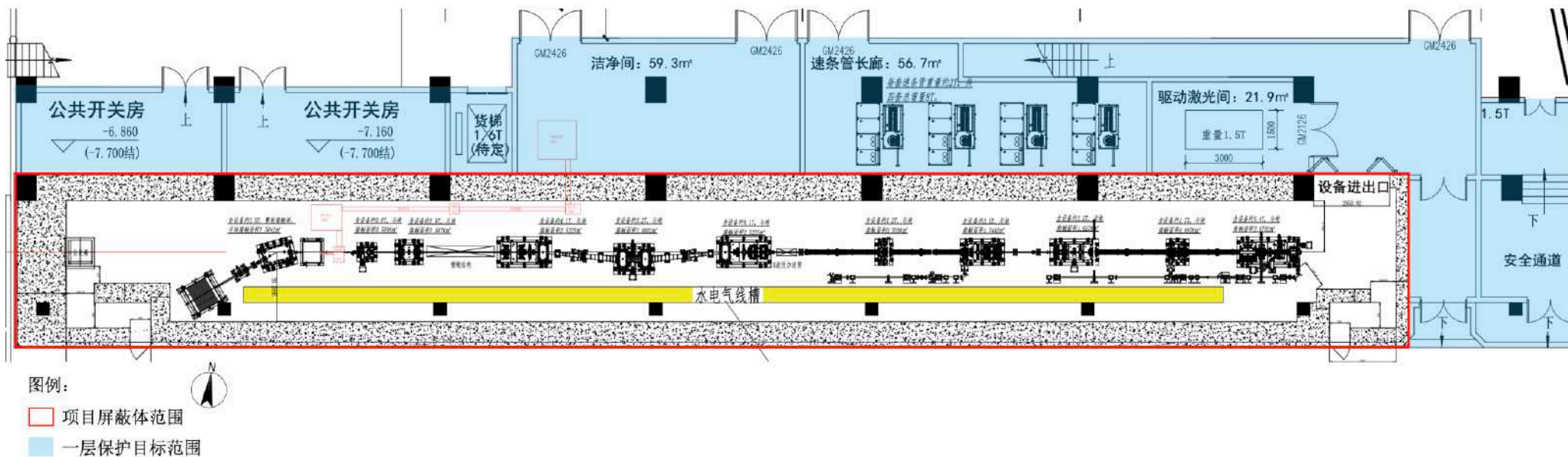


图 1-11 本项目电离辐射保护目标示意图（楼内一层）

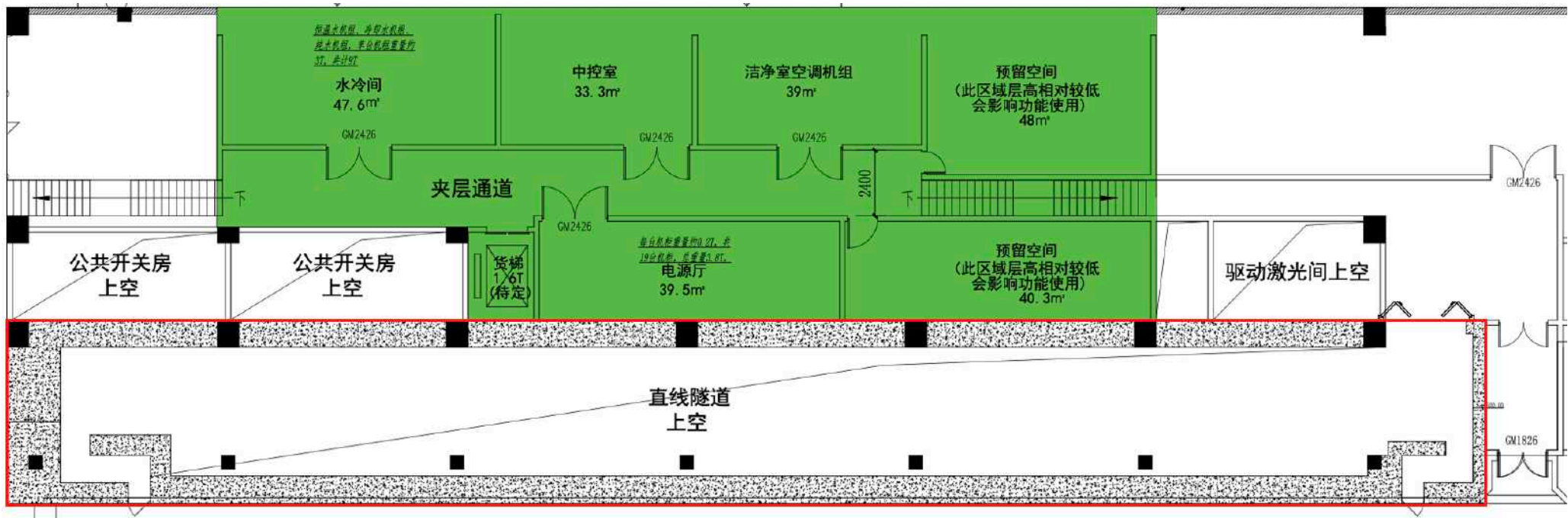


图 1-12 本项目电离辐射保护目标示意图（楼内二层）

2 自然环境与社会环境状况

2.1 自然环境状况

2.1.1 地理位置及地形地貌

光明区位于广东省深圳市西北部，东至观澜街道、西接松岗街道、南抵石岩街道、北与东莞市接壤，中心位置位于北纬 22°46'34"，东经 113°54'44"，总面积 156.1 平方千米。

光明区地形地貌属于低山丘陵滨海区，背山面海、岗峦起伏，区内水域广阔，青山环绕。地势东北高西南低，地形较为复杂，主要地貌为低山、丘陵、台地和平原，东北部主要为低山，中部及北部主要为丘陵台地，西部主要是冲积平原，并残存一些低丘，而西南海岸多为泥岸，滩涂资源丰富。

2.1.2 水文

茅洲河穿流过光明区，将辖区一分为二。除了茅洲河干流，光明区辖区范围内还有水系丰富的支流。

光明区有包括鹅颈水库、莲塘水库、桂坑水库、铁坑水库、大鹵水库、红坳水库、尖岗坑水库、横坑水库、后底坑水库、阿婆髻水库、石狗公水库、白鸽陂水库、禾槎涧水库、畔坑水库、望天湖水库、罗仔坑水库、水车头水库、碧眼水库等在内的 18 座水库。截至 2009 年，光明区有总库容达 2075 万立方米。

2.1.3 地下水

项目所在区域地下水赋存于土层孔隙和基岩裂隙中，其主要为潜水类型，主要赋存于第四系砾砂层中，水量受季节影响，雨季中水量较大。其下为基岩裂隙水，主要赋存于基岩的强、中、微风化岩中，由于本场地节理、裂隙发育，地下水渗透性较好，略具承压性，水量较大。

2.1.4 地震

所在区域地处东南沿海地震带的中部，该区地震活动呈现明显的周期性，即低潮期和高潮期交替出现。自 1400 年以来存在两个地震活动周期，即 1400 年~1700 年为第一活动期，1701 年至今为第二个活动期，其时间尺度约 300 年。东南沿海地区的地震活动大体上从沿海一带起向内陆有逐渐减弱的趋势，大于 7 级地震均发生在外海，内陆的地震一般小于 7 级。破坏性地震多分布在北西向断裂与北东向断裂、东西向断裂的交汇部位。

2.1.5 气候特征

项目场地位于深圳市光明区，属亚热带季风气候，气候温和，日照充足，雨量充沛，但季节分配不均、干湿季节明显。夏长而不酷热，冬暖而时有阵寒；春秋是季风转换季节，夏秋季有台风。

气温：年平均气温 22.3℃；1 月最冷，月平均最低气温为 14.1℃；7 月最热，月平均最高气温为 28.2℃。最高气温大于 30℃ 的天数为 132 天；无霜期为 355 天。极端最高气温 38.7℃，极端最低气温 0.2℃。

风速：年平均风速 2.6m/s；极端最大风速 40m/s（为南或南南东向台风）。常年盛行南东风（频率 17%），北东风（频率 14%），其次为东风（频率 13%）和东北风（频率 11%），随季节和地形等不同，风向频率也不同。

降雨量：多年平均降雨量为 1966.3mm。每年 4~9 月为雨季，且多为台风型暴雨，全年 86% 的雨量出现在雨季。最大年降水量为 2747mm，最小年降水量为 912.5mm。多年最大一次连续降雨量 459.3mm，全区日平均最大暴雨量 282mm，最大小时雨量 114.8mm/h。年降雨日数 144.7 天，连续最长降雨日数 20 天。

2.2 社会环境状况

光明区位于深圳西北部，历经农场、新区、行政区三个发展阶段。1958 年，广东省决定设立光明国营农场。2007 年，正式设立光明新区。2018 年 2 月，国务院批复成立

深圳市光明区，9月19日揭牌成立。光明区是深圳最年轻的行政区，下辖光明、公明、新湖、凤凰、玉塘、马田6个街道，共37个社区。辖区总面积155.38平方公里，常住人口117.41万人，其中常住户籍人口27.05万人。

2.3 环境质量和辐射现状

2.3.1 环境天然放射性水平

根据《广东省辐射环境质量监测季报（2025年第2季度）》（https://gdee.gd.gov.cn/hjjce/fshjzl/content/post_4755694.html），深圳市2025年第2季度环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果列于表2-1。

表 2-1 深圳市 2025 年第 2 季度环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果（nGy/h）

自动站站名	4月	5月	6月	历史范围值
深圳分部站	112.3	112.3	111.0	94.9-215.2
备注：环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果未扣除宇宙射线响应值。				

对本项目拟建场址及周围环境辐射环境质量现状的调查结果表明，拟建场址及周围环境的辐射环境现状水平未见异常。

2.3.2 辐射环境质量现状调查与评价

为充分了解本项目辐射工作场所及周围环境的辐射环境现状，建设单位委托广东核协检测服务有限公司（CMA：202019115369）于2026年1月21日对项目拟建场址及周围环境的 γ 辐射剂量率和中子辐射剂量率进行了检测，检测报告见附件10。

2.3.2.1 辐射剂量率

2.3.2.1.1 检测项目、方法与仪器

辐射工作场所及环境辐射剂量率检测项目及方法见表2-2。检测仪器见表2-3，均在检定有效期内。

表 2-2 检测项目与方法

序号	检测项目	检测方法
1	X、 γ 辐射剂量率	《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）
2	中子辐射剂量率	《辐射防护仪器中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T 14318-2019）

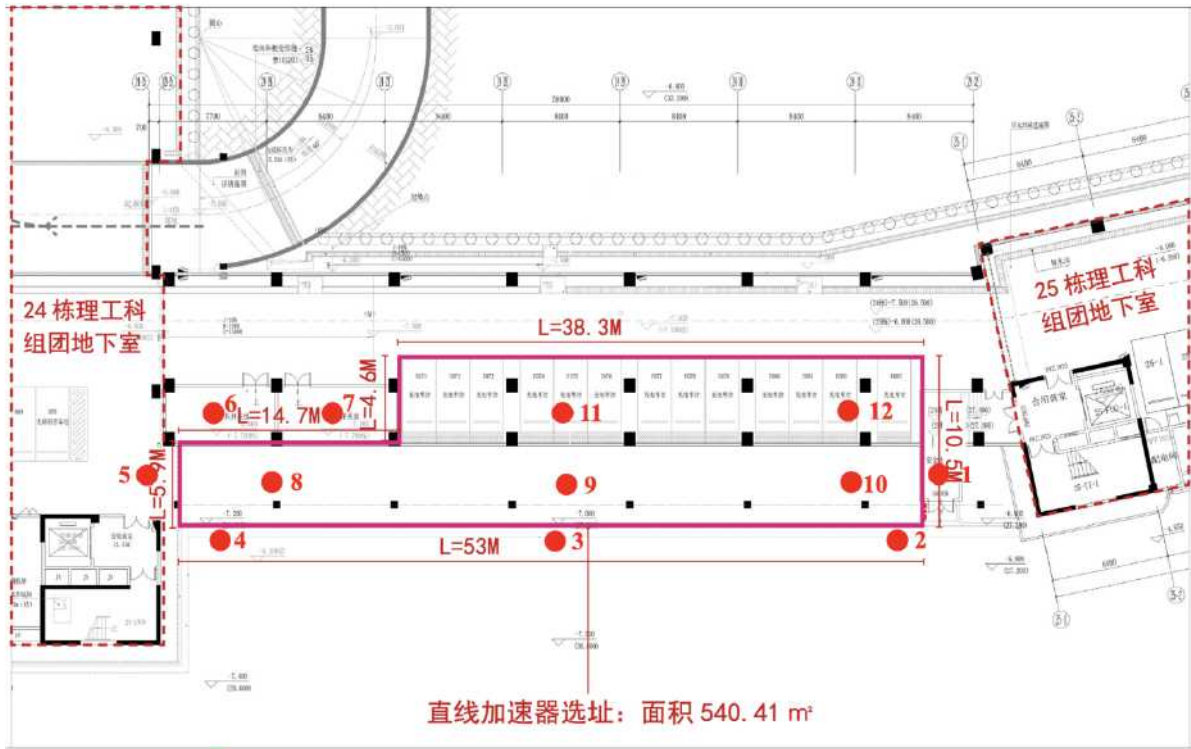
表 2-3 检测仪器参数及检定情况表

仪器名称	环境 X- γ 剂量率仪	仪器型号	主机 6150AD6/H+探头 6150AD-b/H
生产厂商	Automess	仪器编号	主机 170826+探头 172132
测量范围	5nSv/h~99.9 μ Sv/h	能量响应	38keV~7MeV, -17%~+17%（相对 ^{137}Cs 参考 γ 辐射源）
时间响应	$\geq 8\text{s}$	仪器来源	<input checked="" type="checkbox"/> 自有 <input type="checkbox"/> 租用 <input type="checkbox"/> 借用
检定单位	广东省辐射剂量计量检定站	证书编号	GRD(1)20250163
检定有效期	2025 年 6 月 10 日~2026 年 6 月 9 日		
仪器名称	中子仪	仪器型号	ATKNG（AT1117M+BDKN01）
生产厂商	白俄罗斯 ATOMTEX	仪器编号	19098
测量范围	0.1 μ Sv/h~10mSv/h	能量响应	0.025eV~14MeV
时间响应	$\leq 2\text{s}$ （精准误差 $\leq 10\%$ ）	仪器来源	<input checked="" type="checkbox"/> 自有 <input type="checkbox"/> 租用 <input type="checkbox"/> 借用
检定单位	中国计量科学研究院	证书编号	DLjs2025-01362
检定有效期	2025 年 5 月 16 日~2026 年 5 月 15 日		

2.3.2.1.2 检测点位及结果

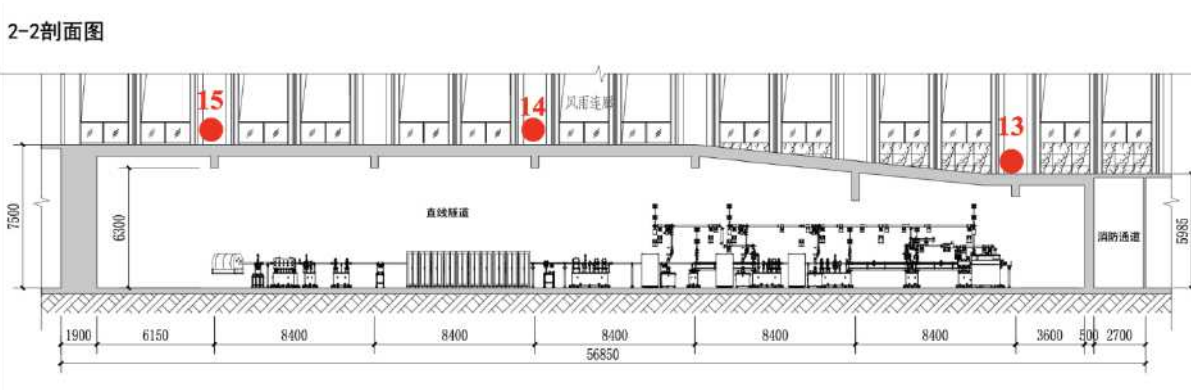
本项目拟建场址及周边环境关注点环境 γ 辐射剂量率和中子辐射剂量率现状检测布点示意图见图 2-1~图 2-3，检测结果见表 2-4~。

检测结果显示：项目拟建场址环境 γ 辐射剂量率为：101nGy/h~158nGy/h；拟建场址周边环境关注点环境 γ 辐射剂量率为：82nGy/h~143nGy/h（以上数据均已扣除宇宙射线的贡献）；拟建场址及周边环境关注点中子辐射剂量率均低于仪器探测下限（0.1 μ Sv/h）。由结果可知，项目工作场所及周围环境辐射剂量率未见异常。



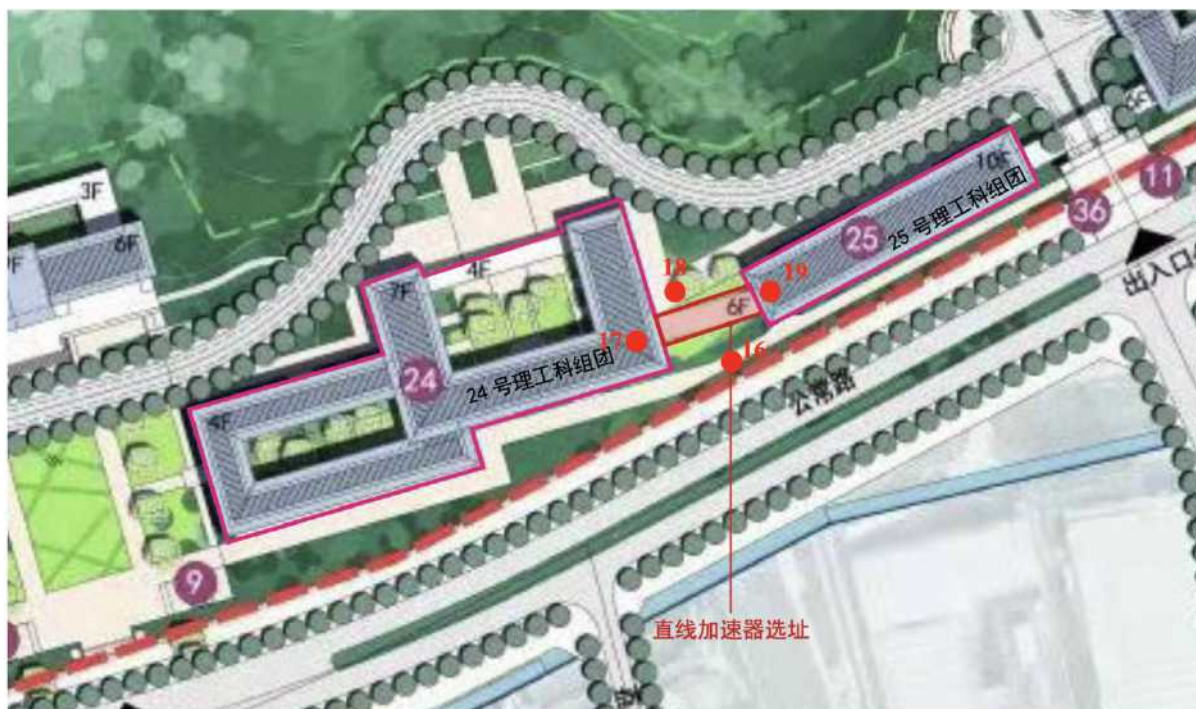
图例: ● γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率监测点位

图 2-1 拟建场址检测布点平面示意图



图例: ● γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率监测点位

图 2-2 拟建场址检测布点剖面示意图



图例：● γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率监测点位

图 2-3 拟建场址周边环境检测布点示意图

表 2-4 环境 γ 辐射剂量率检测结果

编号	测量位置	地面介质	环境 γ 辐射剂量率 (nGy/h)
			均值 \pm 标准差
1#	直线加速器选址东侧 (楼梯间)	瓷砖	124 \pm 3
2#	直线加速器选址南墙外东侧 (室外空地)	土壤	101 \pm 1
3#	直线加速器选址南墙外中间 (室外空地)	土壤	106 \pm 1
4#	直线加速器选址南墙外西侧 (室外空地)	土壤	119 \pm 1
5#	直线加速器选址西侧 (车库通道)	水泥	135 \pm 1
6#	直线加速器选址北墙外 1 (公共开关房)	水泥	118 \pm 1
7#	直线加速器选址北墙外 2 (公共开关房)	水泥	137 \pm 2
8#	直线加速器选址内部西侧 (车库通道)	土壤	158 \pm 1
9#	直线加速器选址内部中间 (车库通道)	土壤	138 \pm 1
10#	直线加速器选址内部东侧 (车库通道)	土壤	129 \pm 1
11#	直线加速器选址北侧 1 (车位)	水泥	113 \pm 1
12#	直线加速器选址北侧 2 (车位)	水泥	109 \pm 1
13#	直线加速器选址上方东侧 (风雨连廊)	大理石	130 \pm 2
14#	直线加速器选址上方中间 (风雨连廊)	大理石	133 \pm 3
15#	直线加速器选址上方西侧 (风雨连廊)	大理石	143 \pm 2
16#	直线加速器选址南侧 (室外通道)	沥青	82 \pm 1
17#	直线加速器选址西侧 (24 号理工科组团)	瓷砖	141 \pm 2
18#	直线加速器选址北侧 (室外通道)	瓷砖	123 \pm 1
19#	直线加速器选址东侧 (25 号理工科组团)	瓷砖	136 \pm 1

注：1.以上数据均已扣除宇宙射线的贡献，环境 γ 辐射剂量率依据 HJ 61-2021 中公式（9）进行宇宙射线响应的扣除：

$$\dot{D} = C_f(E_f\dot{X} - \mu_c\dot{X}_c')$$

式中：

\dot{D} —环境 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果；

C_f —仪器量程检定/校准因子，由法定计量部门检定或校准时给出；

E_f —仪器检验源效率因子。如仪器无检验源，则该值取 1；

\dot{X} —现场检测时仪器 n 次读数的平均值， $n \geq 10$ ；

μ_c —建筑物对宇宙射线带电粒子和光子的屏蔽因子，楼房取值为 0.8，平房取值为 0.9，原野、道路取值为 1；

\dot{X}_c' —测点处仪器对宇宙射线的响应值。宇宙射线测量地为东经 114.56659°，北纬 23.78538°，海拔 100m，本项目所在地为东经 113.953314°，北纬 22.801955°，海拔 36.7m，依据 HJ 61-2021 中第 8.6.1 节“海拔高度差别 $\leq 200m$ ，经度差别 $\leq 5^\circ$ ，纬度 $\leq 2^\circ$ ，可以不进行 \dot{X}_c' 修正”，取 37nSv/h；

2.现场检测时仪器探头均垂直于地面向下，离地高度 1m，每个点位读取 10 个数据。

表 2-5 中子辐射剂量率检测结果

编号	测量位置	中子辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	备注
1#	直线加速器选址东侧（楼梯间）	<LLD _n	瓷砖
2#	直线加速器选址南墙外东侧（室外空地）	<LLD _n	土壤
3#	直线加速器选址南墙外中间（室外空地）	<LLD _n	土壤
4#	直线加速器选址南墙外西侧（室外空地）	<LLD _n	土壤
5#	直线加速器选址西侧（车库通道）	<LLD _n	水泥
6#	直线加速器选址北墙外 1（公共开关房）	<LLD _n	水泥
7#	直线加速器选址北墙外 2（公共开关房）	<LLD _n	水泥
8#	直线加速器选址内部西侧（车库通道）	<LLD _n	土壤
9#	直线加速器选址内部中间（车库通道）	<LLD _n	土壤
10#	直线加速器选址内部东侧（车库通道）	<LLD _n	土壤
11#	直线加速器选址北侧 1（车位）	<LLD _n	水泥
12#	直线加速器选址北侧 2（车位）	<LLD _n	水泥
13#	直线加速器选址上方东侧（风雨连廊）	<LLD _n	大理石
14#	直线加速器选址上方中间（风雨连廊）	<LLD _n	大理石
15#	直线加速器选址上方西侧（风雨连廊）	<LLD _n	大理石
16#	直线加速器选址南侧（室外通道）	<LLD _n	沥青
17#	直线加速器选址西侧（24 号理工科组团）	<LLD _n	瓷砖
18#	直线加速器选址北侧（室外通道）	<LLD _n	瓷砖
19#	直线加速器选址东侧（25 号理工科组团）	<LLD _n	瓷砖

注：1.现场检测时仪器探头均垂直于地面向下，离地高度 1m，每个点位读取 5 个数据；

2.中子周围剂量当量仪探测下限（LLD_n）为 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 。

2.4 场址适宜性评价

本项目所在区域地质条件良好，没有影响射线装置安全稳定运行的颠覆性因素。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，条件较好。项目地点周边 200m 范围内无中小学，符合《广东省未成年人保护条例》（2009 年 1 月 1 日实施）中的要求。环境质量和辐射现状调查结果表明，项目区域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，本项目选址对所申请的核技术利用活动具有环境符合性。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

本项目伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置主要技术参数见下表。

表 3-1 伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置主要技术参数

序号	射线装置类型	装置参数	数量/台	类别	使用场所
1	电子直线加速器	加速粒子：电子 最高能量：200MeV 平均每秒电子数：3.13E+11e/s	1	I	24 栋理工科组团与 25 栋理工科组团连接处直线加速器区

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 装置原理及主要参数

本项目拟建的伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置主体为一台电子直线加速器，主要损失参数列于表 3-2。

表 3-2 伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置各区域主要束损参数

序号	辐射源项	粒子类型	最高能量	损失流强	打靶材料
1	直线隧道	电子	200MeV	1%均匀损失， 3.13E+09 e/s	不锈钢
2	废束流桶 200MeV	电子	200MeV	全束流 3.13E+11e/s	石墨心+铁+聚乙烯

3.2.2 装置组成

3.2.2.1 直线加速器

本项目伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置布局示意图见图 3-1。

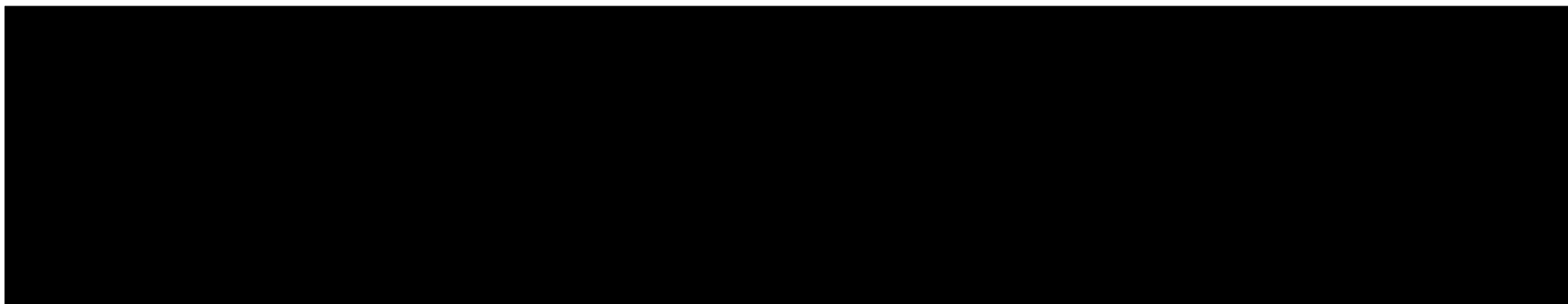


图 3-1 本项目直线加速器布局示意图

3.2.2.1.1 光阴极电子枪

光阴极电子枪是电子束流的源头，也是电子直线加速器起始点。直线加速器系统采用光阴极微波电子枪作为电子源，通过控制驱动激光的参数对电子束电荷量、初始束团长度以及发射时间进行控制，实现高品质电子束的产生、初成形和预加速。光阴极电子枪采用两节加速管，为 SLAC 型 3 米行波加速管。电子枪出口电子最高能量为 5MeV，单束团电荷量 1nC，重复频率 50Hz。与常规光阴极电子枪不同，本项目光阴极电子枪需要通过驱动激光系统，在一个宏脉冲中产生两个时间间隔 46.218ns 且性能参数相近的微束团。

3.2.2.1.2 加速管

光阴极电子枪产生的束流，经过电子枪后的螺线管和加速管上的螺线管磁铁实现对束流发射度的控制，经过加速管 L1、L2、L3 加速后，电子束能量达到约 120MeV，实现束流发射度的冻结。加速管 L2 和 L3 采用偏离最大加速相位加速，使束团获得一个与纵向时间线性相关的能量调制，经过磁压缩器实现对束团长度的压缩，获得系统所需长度的束流。加速管 L4 将电子束能量加速到对撞所需的能量 200MeV。单只加速管长度约 3 米，外形如图 3-2 所示。

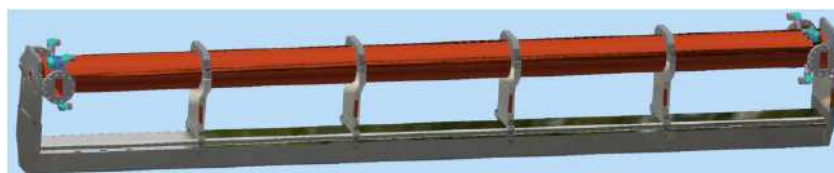


图 3-2 单只加速管机械设计外形图

加速管的微波系统工作频率 2.856 GHz，脉冲重复频率 50Hz。主要包括微波源与放大器、微波传输系统、微波低电平、加速结构等。微波源及放大器（SSA）为速调管提供微波激励。参考线主要为低电平系统提供统一的相位参考信号。微波传输系统的功能是将速调管输出的微波能量按照系统的需求传输至 光阴极微波电子枪和加速结构中，以便在腔中建立起加速场。低电平系统通过控制输入微波信号来维持速调管恒定幅度和相位的微波输出，同时对微波系统的运行状态进行监测和诊断。加速结构指 4 根 3 米长加速管，输入微波功率后，将从电子枪出来的束流能量提升到 200MeV。

3.2.2.1.3 束流垃圾桶

装置有两个束流垃圾桶，垃圾桶 1 用于调试束流，垃圾桶 2 用于预防通往垃圾桶 1 的偏转磁体失效，起到保护收集的作用，位置见图 3-3。

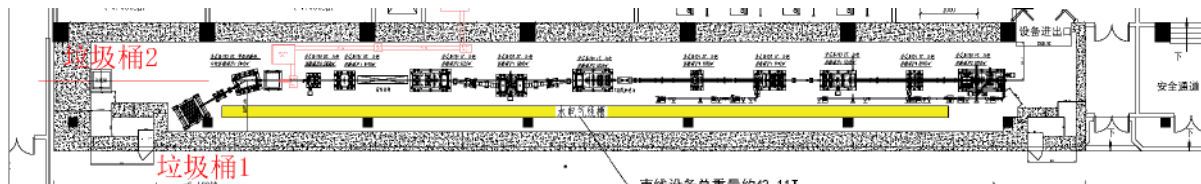


图 3-3 束流垃圾桶位置示意图

3.2.3 装置运行计划及工作流程

3.2.3.1 运行计划

依据实际需求及科研情况，预估装置运行计划如下表所示。

表 3-3 运行计划

阶段	时间周期/频次	年出束时长, h
正常运行	全年运行 36 周, 252 天	1000

3.2.3.2 工作流程

(1) 开机流程

- a) 清场检查：由专人按预定顺序全面检查控制区，操作清场装置确认人员已全部撤离。
- b) 连锁条件：清场完成是人身安全连锁系统允许开机的必要条件。
- c) 声光警示：清场及开机前，控制区通过声光报警提醒人员离开。
- d) 准备出束：安全连锁就绪后，打开安全连锁的出束控制开关，开启水机组，预热调制器，预备加高压出束

(2) 实验、测试流程

● 直线隧道：

- a)将测量靶片放置在加速器束流线的测试位置上；
- b)加速器出束使加速中的电子束流与靶片进行散射；
- c)利用测试装置测量束流的能量、流强、能散度和发射度等参数。

(3) 关机流程

- a) 停止出束：关闭束流，终止粒子加速过程。
- b) 检查加速器各系统（如电源、磁铁、真空、冷却等）是否正常降载或关闭。
- c) 安全联锁系统继续就位，由辐射防护人员确认活化水平后，方可进入场所内进行维修、换样品。

(4) 维护维修流程（需明确控制区准入条件、高活区维修条件）。

- 装置停机后，活化区需开启快速通风，加速排出活化气体（如 O-15、N-13、C-11 等短寿命核素）。
- 停机 1 小时后，距设备表面 30cm 处剂量率 $<100 \mu\text{Sv/h}$ 的不受限制手工维修条件，方可允许人员进入隧道、靶站等控制区进行维护。

3.2.4 工作负荷及人员配置

装置的工作人员配备计划如下表所示。

表 3-4 工作人员配备计划

序号	岗位名称	工作内容	工作地点	人数
1	辐射安全	设施的辐射安全管理	整个装置	1
2	加速器运行及调试	加速器运行及调试	直线隧道	3
3	激光系统运行维护	激光系统运行维护	激光间	2
总计				6

3.3 污染源项

本项目装置电子最大能量 200MeV，为高能电子加速器，其辐射源项包括瞬发辐射和感生放射性两大部分。

瞬发辐射场特点是能量高、辐射强，但会随着装置的停机而完全消失。同时，装置结构部件、设备冷却水、屏蔽体内空气等被电子或次级粒子轰击产生的活化产物，会产生感生放射性，感生放射性在加速器停机后依然存在。

瞬发辐射中子和 γ 皆具有很强的穿透能力，穿过屏蔽层的中子和 γ 将对人引起直接的辐射剂量，以及穿过屋顶进入天空的中子由于散射（称为天空反散射）而对周围地面上的人引起辐射剂量，以上是本项目装置运行时需考虑的环境影响问题。

瞬发辐射会引起加速器部件的活化，特别是束流损失较大处的部件，从而使检修人员受到辐射照射和产生一定量的活化固体废物，还会引起屏蔽体内空气的活化（主要活化产物是 Ar-41、C-11、N-13、O-15、Be-7、H-3 等），以及设备冷却水的活化（主要活化产物是 O-15、C-11、Be-7 和 H-3 等），这些气态和液态放射性物质的排放会对环境造成一定的影响。此外穿过设备底层屏蔽而进入土壤的中子还会引起土壤和地下水的活化，也有可能对环境造成影响。不过对于本项目电子直线加速器来说这些影响都很小，详见其后章节的分析。

γ 射线会引起屏蔽体内空气中分子原子的电离产生自由基，自由基的结合会产生有害物质（主要是 O₃、NO_x 和 HNO₃），这些物质的排放也会对环境带来一定的影响。

根据本项目装置运行时对环境的影响特征，对以上各种污染源项的定量分析将在以下各节中分别论述。

本次评价利用 FLUKA 程序对瞬发辐射及感生放射性进行建模计算。

FLUKA 程序是 20 世纪 60 年代由欧洲核子研究中心（CERN）主导开发的，是用于计算粒子输运和与物质相互作用的通用工具。主要应用于质子和电子加速器及靶站的设计、辐射活化、辐射剂量学、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理、高能物理模拟、放射治疗等领域。可模拟包括中子、电子、质子在内的 60 余种不同的粒子及重离子，其中子能量范围从 10⁻⁵eV 到 20TeV，光子能量范围从 100eV 到 10000TeV，

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

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

3.3.1 瞬发辐射场

本项目装置中的电子在加速和运输的过程中，与周围介质发生相互作用，其部分或全部能量转化成各种形式的辐射，如韧致辐射、中子等。

当电子能量较低时，通过电离损失将能量传递给靶原子使其电离或激发；当电子能量大于介质的临界能量时，主要通过韧致辐射损失能量。韧致辐射与靶原子作用主要产生高能正负电子对，从而发生电磁级联效应。常用的屏蔽材料如铁、铝、铜、铅、混凝土的临界能量在几 MeV~几十 MeV 的范围，且原子序数大的材料临界能低（如铅的临界能不到 10MeV），原子序数小的材料临界能高（如铝和混凝土的临界能约 50 MeV），即高能电子在高原子序数材料中有更深的电磁级联簇射深度。

当韧致辐射光子能量较高，达到或超过了光核反应的阈能，还会发生一定概率的光核反应产生中子，不同能量的光子发生的光核反应不一样、产生的中子能量也不一样。当光子能量低于 30 MeV 时，光致蜕变在“巨共振”区域内占主导地位，中子的产生主要来源于“巨光核共振”过程，巨共振中子的能量大约为几个 MeV。当光子能量高于 30 MeV，超过巨共振区域时，发生伪氘核反应，产生伪氘核中子。对于较薄的屏蔽体，韧致辐射光子和巨共振中子在对屏蔽体外的剂量率贡献中占主导作用；对于较厚的屏蔽体，巨共振中子在对屏蔽体外的剂量率贡献中占主导作用。

3.3.2 感生放射性

本项目射线装置运行时束流损失在部件、真空管壁、靶等部位，产生瞬发辐射过程中，初始和次级粒子与周围设备、屏蔽体和空气、水等材料发生的核反应，会使材料内稳定的核素转变成具有放射性的核素，使其产生感生放射性，即发生材料活化。在装置停机后，由束流损失产生的瞬发辐射立即消失，但感生放射性依然存在，产生的放射性核素会按照衰变规律，放出 γ 、 β 等射线。本项目射线装置产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响对象是对停机后，需要进入控制区内的辐射工作人员。

主要活化产物包括：

屏蔽间内的空气活化： ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar ；

冷却水活化： ^3H 、 ^7Be ；

装置结构部件活化： ^{48}V 、 ^{52}Mn 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{57}Ni 。

感生放射性采用蒙特卡罗程序 FLUKA 精确计算，结合活化公式估算和验证。

3.3.2.1 空气的感生放射性

加速器运行期间产生的次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、高能中子散裂反应和 (γ, n) 反应等产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》(H.W.帕特森, R.H.托马斯) P296, 对于长半衰期核素 ^3H 和 ^7Be , 其产生率较低, 可不必考虑。本次评价主要考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素, 具体见表 3-5。

表 3-5 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 , mb
^{11}C	20.5min	C	1.2×10^{-4}	(γ, n) 反应	10
		N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.7
^{13}N	9.96min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		N	7.55×10^{-1}	(γ, n) 反应	9
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	9
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.8
^{15}O	2.04min	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	(γ, n) 反应	10
^{41}Ar	1.83h	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	660

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

3.3.2.1.1 空气感生放射性饱和活度浓度

(一) 计算方法

保守考虑，本次评价计算不考虑通风情况下运行期间机房内的空气感生放射性静态饱和活度浓度以及考虑通风情况下运行期间机房内的动态饱和活度浓度。

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)，在不考虑通风的情况下，装置连续运行一段时间后，停机时刻机房内空气感生放射性静态饱和活度浓度可由公式(3-1)、(3-2)计算得到；在考虑通风的情况下，机房内空气感生放射性动态饱和活度浓度可由公式(3-3)计算得到，具体如下：

$$C_{sat} = N\sigma\phi \quad (3-1)$$

$$N = \frac{\rho}{M} \times f \times N_A \quad (3-2)$$

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

式中，

C_{sat} 为不考虑通风的情况下，停机时刻机房内空气感生放射性核素的静态饱和活度浓度， Bq/cm^3 ；

C_t 为考虑通风的情况下，停机时刻机房内空气感生放射性核素的动态饱和活度浓度， Bq/cm^3 ；

N 为单位体积空气中靶核的数目， $个/cm^3$ ；

σ 为靶核的活化反应截面， cm^2 ；

ϕ 为中子注量率和光子注量率， $n/cm^2 \cdot s$ 或 $p/cm^2 \cdot s$ ；

ρ 为空气的密度， g/cm^3 ；

M 为靶核的原子质量, g;

f 为母核在空气中的质量份额;

N_A 为阿伏伽德罗常数, $6.023E+23$;

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

r_l 为正常运行时机房内的换气次数, s^{-1} 。

(二) 各参数的取值

(1) λ

衰变常数 λ 的计算结果如表 3-6 所示。

表 3-6 放射性核素衰变常数计算结果

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

(2) r_l

根据建设单位提供的资料, 具体通风系统设计情况见“4.2.2 通风系统”的描述。

(3) N

单位体积空气中靶核的数目 N 的计算结果如表 3-7 所示。

表 3-7 单位体积空气中靶核的数目计算结果

母核	M , g	f^*	ρ , g/cm^3	N_A	N , 个/ cm^3
C	12	7.55×10^{-4}	1.21E-03	6.023E+23	7.29E+15
N	14	7.55×10^{-1}	1.21E-03	6.023E+23	3.93E+19
O	16	2.3×10^{-1}	1.21E-03	6.023E+23	1.05E+19
Ar	40	1.3×10^{-2}	1.21E-03	6.023E+23	2.37E+17

注: * f 取值来自 NCRP NO.144 报告 P344 Table 6.5。

(4) ϕ

本次评价计算了各区域的平均中子注量率和光子注量率, 计算结果列于表 3-8 和表

3-9 所示。

表 3-8 平均光子注量率计算结果

区域名称	辐射源项	束损, e/s	光子产额, p/e	光子发射率, p/s	光子注量率, p/cm ² ·s
直线隧道	束流管线损	3.13E+09	13.85	8.66E+10	1.25E+06
	200MeV 废束桶点损	3.13E+11	9.36E-3	5.85E+09	4.66E+04

表 3-9 平均中子注量率计算结果

区域名称	辐射源项	束损, e/s	中子产额, n/e	中子发射率, n/s	中子注量率, n/cm ² ·s
直线隧道	束流管线损	3.13E+09	1.35E-2	8.44E+07	1.88E+03
	200MeV 废束桶点损	3.13E+11	4.0E-5	2.50E+07	1.99E+02

(5) σ

靶核的活化反应截面 σ 的取值见表 3-5。

3.3.2.2 冷却水的感生放射性

正常运行工况下, 加速器隧道内设备冷却水闭路循环不排放, 冷却水的总体积约 0.5 立方米。束流管道为外径 38、内径 35mm 的 316L 不锈钢管, 计算时保守假设加速器运行的束流损失区域全部为磁铁, 冷却水层厚 1cm, 距离束流管道 1cm。计算条件考虑加速器连续运行 30 年, 一次活化冷却水不外排。停机后, 冷却水活度浓度见表 3-10。

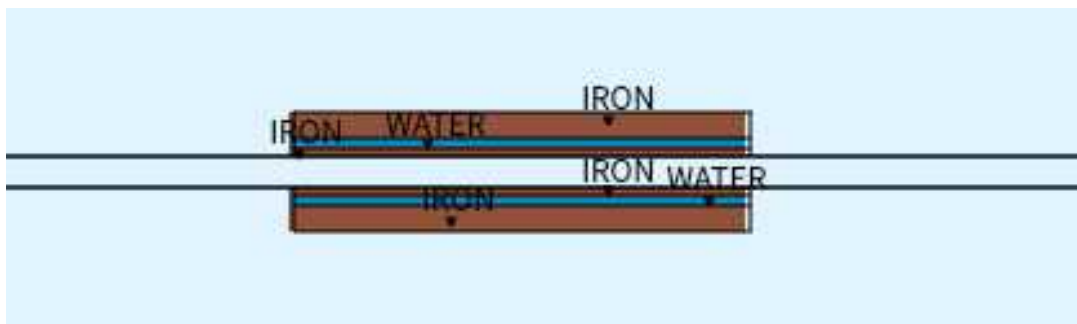


图 3-4 冷却水计算模型图

表 3-10 冷却水活化水平模拟结果

核素	半衰期	活度浓度 (Bq/mL)	总活度 (Bq)	单次排放限值 1ALI _{min} (Bq)
H-3	2.6h	7.21E-03	3.61E+03	4.76E+08
Be-7	312.7d	9.75E-04	4.88E+02	3.85E+08

3.3.2.3 结构部件的感生放射性

结构部件的感生放射性主要是粒子直接与装置结构材料相互作用产生，主要考虑加速器束流管、偏转磁铁和废束桶。根据主要的束流损失点位分布，采用蒙卡模拟方法，直接计算各部件的感生核素活度和感生放射性剂量率分布。

加速器束流管道的材质为 316L 不锈钢，模拟的连续运行时间为 30 年，停机 1 小时、4 小时后，机房内剩余剂量率分布见图 3-5~图 3-8，距离束线 30cm 的剂量率均不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ ，垃圾桶周围剂量水平最高在 $10\mu\text{Sv/h}$ 左右，位于束流入口处。

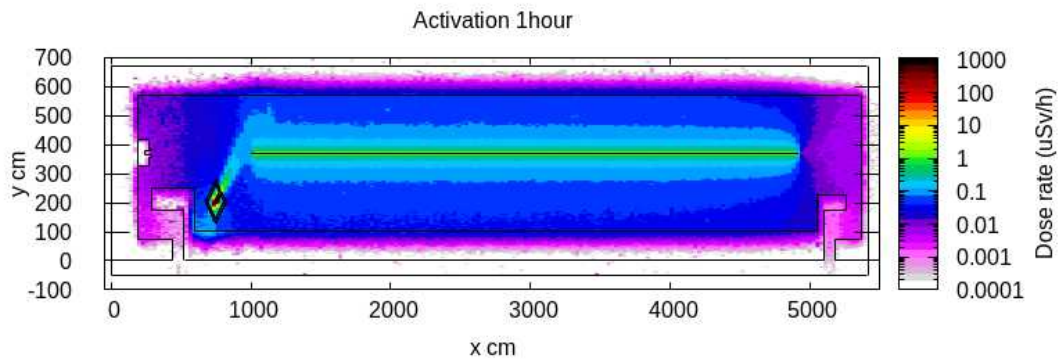


图 3-5 停机 1 小时后剂量率分布（束流进入垃圾桶 1）

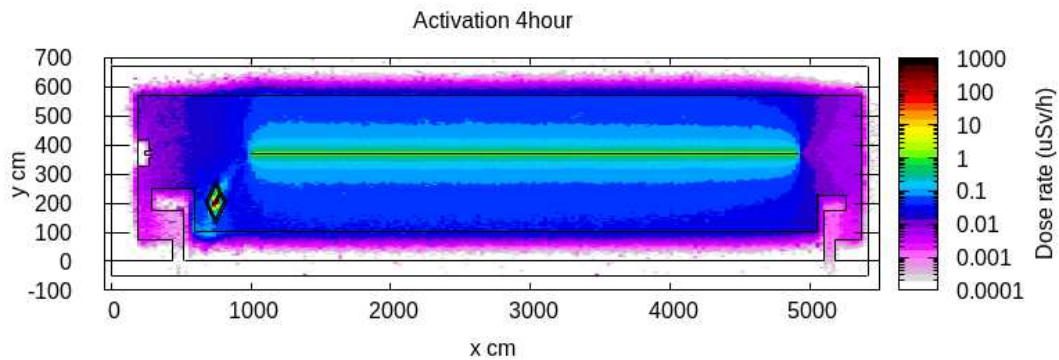


图 3-6 停机 4 小时后剂量率分布（束流进入垃圾桶 1）

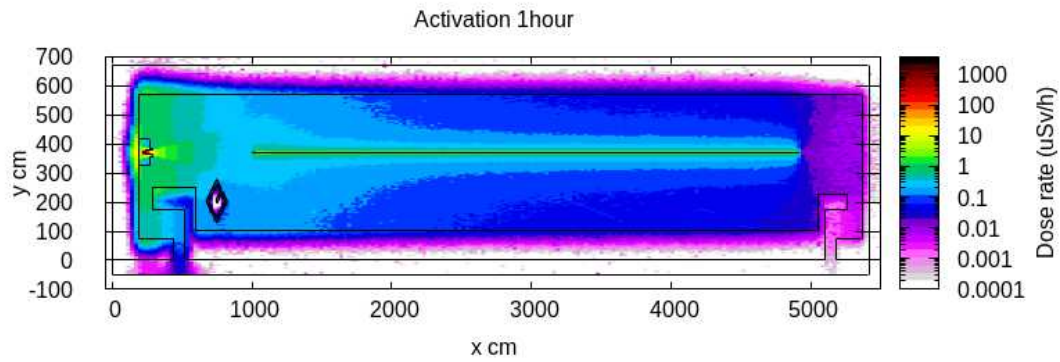


图 3-7 停机 1 小时后剂量率分布（束流进入垃圾桶 2）

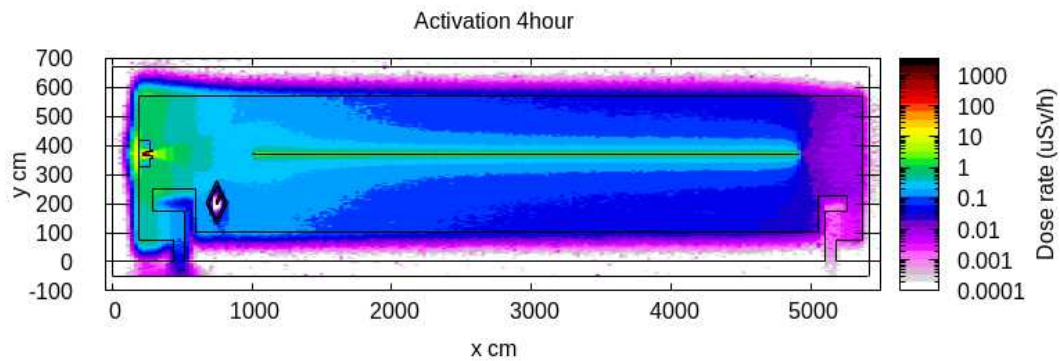


图 3-8 停机 4 小时后剂量率分布（束流进入垃圾桶 2）

停机时刻加速器束流管感生放射性核素饱和活度浓度计算结果如表 3-11 所示。束流管的材质为 316L 不锈钢，束流管壁产生的主要放射性核素有 V-48、Mn-52、Mn-54、Co-56、Co-57、Co-58 和 Ni-57 等。

表 3-11 加速器束流管感生核素及其饱和活度浓度

核素	比活度 (Bq/g)	半衰期	Γ (mSv/h)/MBq
Nb-96	0.145	23.3h	4.11E-04
Nb-95	0.226	35.1d	1.30E-04
Mo-91	0.276	15.5m	1.87E-04
Nb-90	1.121	14.6h	6.51E-04
Zr-89	0.476	3.3d	2.66E-04
Y-88	0.214	106.6d	4.79E-04
Zr-88	0.261	83.4d	1.71E-04
Y-87	0.203	3.3d	1.86E-04
Y-86	0.114	14.7h	6.26E-04
Co-61	0.160	1.6h	2.29E-05
Co-58	6.698	70.8d	1.65E-04
Co-57	85.027	270.9d	4.09E-05
Ni-57	17.444	1.5d	2.89E-04

Mn-56	0.924	2.6h	2.48E-04
Co-56	13.009	78.8d	5.15E-04
Ni-56	0.309	6.1d	2.94E-04
Mn-54	48.379	312.7d	1.38E-04
Mn-52	7.102	5.6d	5.41E-04
Fe-52	0.238	8.3h	1.40E-04
Cr-49	3.386	42.1m	2.00E-04
Sc-48	0.108	1.8d	5.11E-04
V-48	8.619	16.0d	4.58E-04
Sc-47	0.578	3.4d	2.17E-05
Sc-46	1.155	83.8d	3.15E-04
Ti-45	0.808	3.1h	1.63E-04
Sc-44	1.102	3.9h	3.57E-04
K-42	0.107	12.4h	3.85E-05
Mn-52m	0.906	21.4m	3.87E-04
Nb-91m	3.334	61.0d	7.16E-05
Nb-92m	0.170	10.1d	2.41E-04
Nb-95m	0.114	3.6d	6.39E-05
Tc-99m	4.089	6.0h	3.32E-05

停机时刻垃圾桶 1、垃圾桶 2 的感生放射性核素比活度计算结果见表 3-12、表 3-13。

表 3-12 垃圾桶 1 中的放射性核素的比活度

核素	比活度 (Bq/g)	半衰期	Γ (mSv/h)/MBq
H-3	1.48E-01	12.32h	β^-
Be-7	2.03E-01	53.4d	9.292E-06
C-11	2.91E-01	20.5m	1.908E-04
Mn-56	9.46E-03	2.6h	2.48E-04
Mn-54	4.55E-01	312.7d	1.38E-04
Mn-52	3.33E-02	5.6d	5.41E-04
Mn-52m	4.33E-03	21.4m	3.87E-04
Cr-51	7.34E-02	27.7d	6.32E-06
V-48	8.46E-03	16.0d	4.58E-04

表 3-13 垃圾桶 2 中的放射性核素的比活度

核素	比活度 (Bq/g)	半衰期	Γ (mSv/h)/MBq
Mn-56	1.26E+01	2.6h	2.48E-04
Mn-54	7.15E+02	312.7d	1.38E-04
Mn-52	5.56E+01	5.6d	5.41E-04
Mn-52m	7.18E+00	21.4m	3.87E-04
Cr-51	1.22E+01	27.7d	6.32E-06

Cr-49	3.24E+00	42.1m	2.00E-04
V-48	1.66E+01	16.0d	4.58E-04
Sc-46	2.23E+00	83.8d	3.15E-04
Sc-44	1.83E+00	3.9h	3.57E-04

3.3.2.4 土壤和地下水的感生放射性

参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5.5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。根据第五章瞬发辐射的计算结果及剂量率分布图可以看出，混凝土屏蔽体与土壤交界处的剂量率都低于 5.5mSv/h，因此，本节不再对其感生放射性核素进行分析。

3.4 废弃物

3.4.1.1 放射性废气

本项目装置运行期间产生的感生放射性气体来源于电子束流损失产生的初级和次级粒子引起的空气活化，其主要放射性核素为 ^{11}C ($T_{1/2}[^{11}\text{C}]=20.39\text{min}$)、 ^{13}N ($T_{1/2}[^{13}\text{N}]=9.965\text{min}$)、 ^{15}O ($T_{1/2}[^{15}\text{O}]=2.037\text{min}$) 和 ^{41}Ar ($T_{1/2}[^{41}\text{Ar}]=1.8\text{h}$)。

3.4.1.2 放射性废液

本项目装置运行期间产生的放射性废液主要是活化的设备冷却水。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，经过一段时间就基本可以衰变到可以忽略的水平，主要活化产物为 ^7Be 、 ^3H 。

3.4.1.3 放射性固体废物

本项目装置运行期间产生的放射性固体废物主要为废靶、废离子树脂及废活性炭。在装置运行期间，预计每年放射性固体废物产生量小于 1m^3 。

3.4.1.4 臭氧等有害气体

O₃、NO₂等有害气体来源于电子束流损失产生的次级 γ 射线引起空气中氧的分解生成自由基，再经过化学反应而形成。本项目电子束流强较低，臭氧等有害气体的产生量很低。

4 辐射安全与防护

4.1 场所布局与屏蔽

4.1.1 辐射工作场所分区

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）的规定，应将辐射工作场所分为控制区和监督区。控制区是指需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域；监督区是指通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。

本项目辐射工作场所分区图如图 4-1 所示，具体见表 4-1。

表 4-1 辐射工作场所分区表

区域	具体情况	
控制区	直线加速器隧道	
监督区	一层	公共开关房、货梯、洁净间、速调管长廊、驱动激光间、通道等
	二层	货梯、电源厅、水冷间、中控室、洁净室空调机组、通道、预留空间等

控制区管理要求：控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标志，机房门列入安全连锁系统，装置运行期间禁止进入，仅经授权并解除连锁后才能进入控制区内，进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，并设置门禁，需经授权方可进入，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

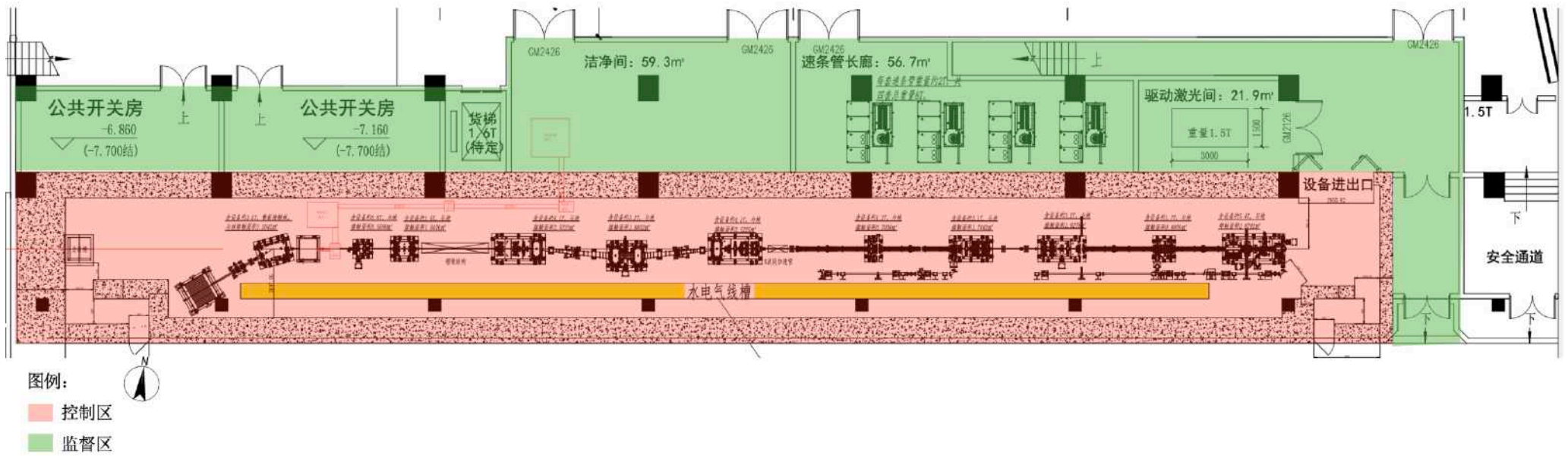


图 4-1 辐射工作场所分区图（一层）

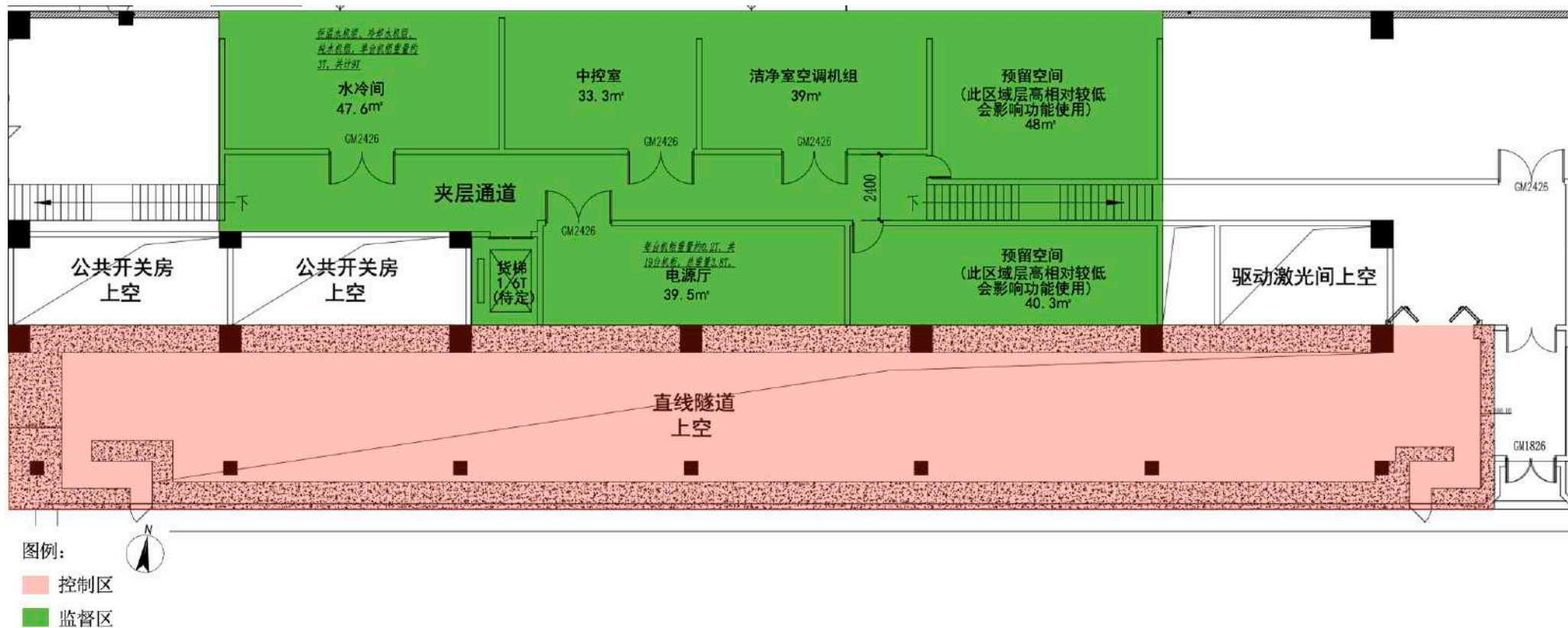


图 4-2 辐射工作场所分区图（二层）

4.1.2 辐射屏蔽

4.1.2.1 主屏蔽体

本项目辐射屏蔽设计方案如表 4-2 和图 4-6、图 4-7 所示。

表 4-2 辐射屏蔽设计及周围环境分布情况

区域	位置	混凝土厚度, cm	屏蔽体外环境
直线隧道 长: 51.7m 宽: 4.7m 高: 4.8~6.3m	南墙	100	室外区域
	北墙	100	公共开关房、货梯、洁净间、 速调管长廊、驱动激光间等
	东墙	50	通道
	西墙	190	通道
	顶部	60	连廊
	底板	30	土层
	西侧人员门	1cm 铅屏蔽门	通道
	东侧人员门	普通门	通道
	东侧设备门	等效 1 米厚混凝土屏蔽门	通道

备注: 表中混凝土为普通混凝土, 密度不小于 2.35g/cm³; 铅密度不小于 11.3g/cm³。

4.1.2.2 束流垃圾桶

直线加速器末端有两个束流垃圾桶, 其中:

(1) 束流垃圾桶 1 用于调试束流, 屏蔽设计方案见图 4-3, 具体如下:

- 1) 打靶区域为 30cm 石墨, 用于减少韧致辐射的产生;
- 2) 接下来包裹铁层, 用于屏蔽韧致辐射;
- 3) 最外层为聚乙烯/石蜡, 用于屏蔽中子。

(2) 束流垃圾桶 2 为保护垃圾桶, 如果磁铁失效导致束流未能正常进入垃圾桶 1, 则会进入垃圾桶 2, 保障束流不会直接轰击墙体, 屏蔽设计方案见图 4-4, 具体如下:

- 1) 靶为材料铁;
- 2) 主体: 90cm×90cm×90cm 立方体, 正面有半径 15cm、高 20cm 的圆柱, 从圆柱表面向内有一半半径 7.5cm, 长 49.5cm 圆柱形空洞。

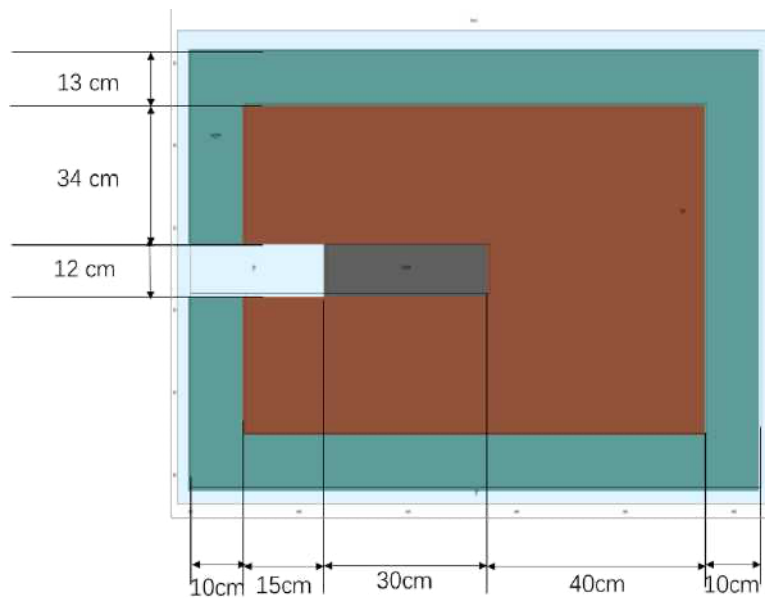


图 4-3 束流垃圾桶 1 屏蔽设计方案剖面示意图

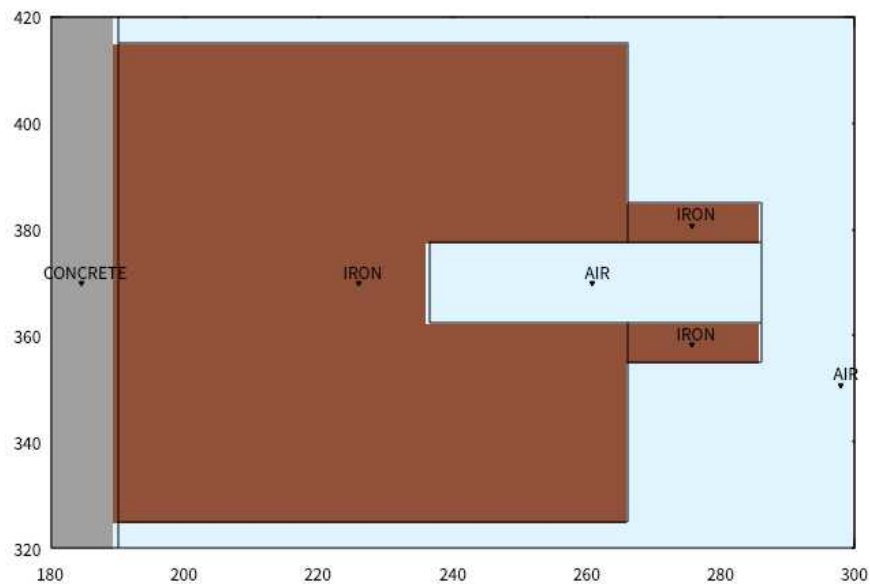


图 4-4 束流垃圾桶 2 屏蔽设计方案剖面示意图

4.1.2.3 穿墙孔洞

加速器机房穿墙孔洞的屏蔽设计方案如下。

表 4-3 加速器机房穿墙孔情况

序号	作用	尺寸	距地高度	屏蔽补偿措施	外环境
1	激光孔	φ170mm	1.3m	屏蔽材料封堵	驱动激光间
2	波导孔	200mm×200mm	3.2m	屏蔽材料封堵、迷宫	速调管长廊
3	波导孔	200mm×200mm	3.2m	屏蔽材料封堵、迷宫	速调管长廊

4	波导孔	200mm×200mm	2.2m	屏蔽材料封堵、迷宫	速调管长廊
5	波导孔	200mm×200mm	2.2m	屏蔽材料封堵、迷宫	速调管长廊
6	激光孔	φ170mm	1.0m	屏蔽材料封堵	洁净间
7	电缆孔	450mm×300mm	6.5m	后砌混凝土防护墙	户外区域围栏
8	电缆孔	500mm×200mm	6.5m	后砌混凝土防护墙	户外区域围栏
9	水管孔	450mm×300mm	6.5m	后砌混凝土防护墙	户外区域围栏

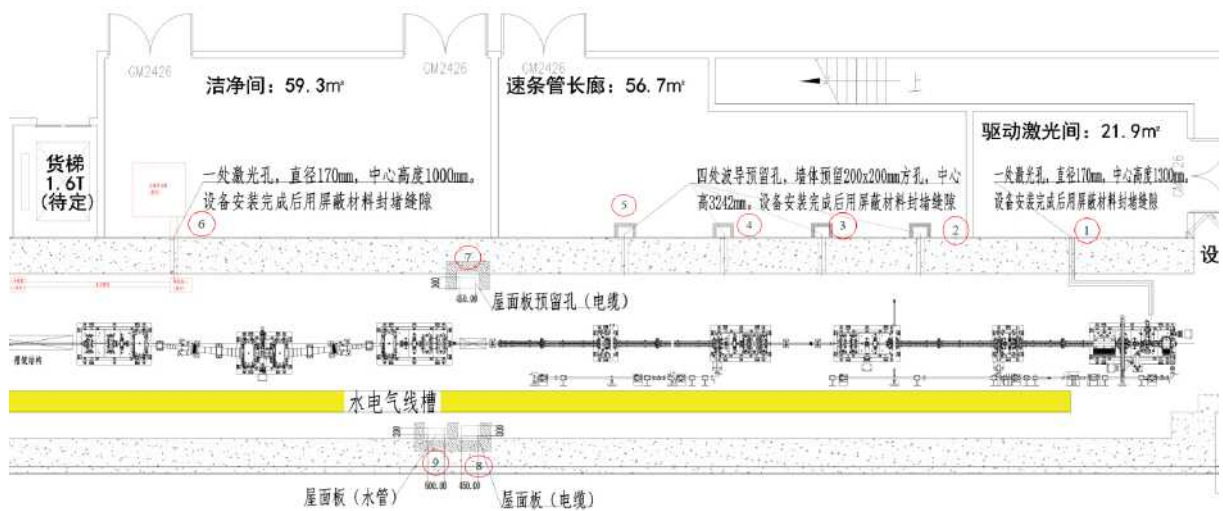


图 4-5 穿墙孔洞位置示意图

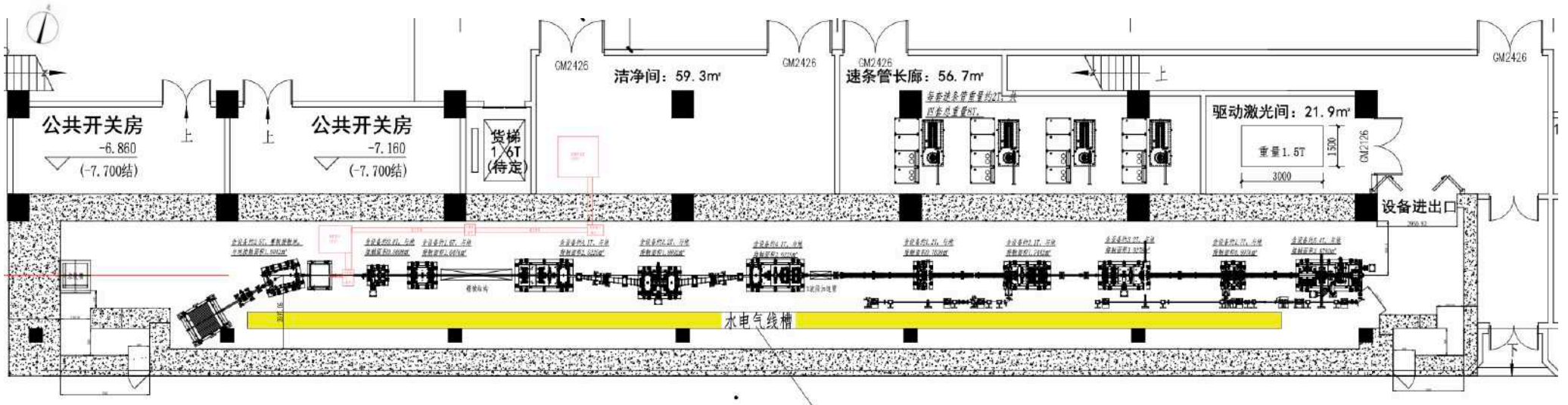


图 4-6 平面布局示意图

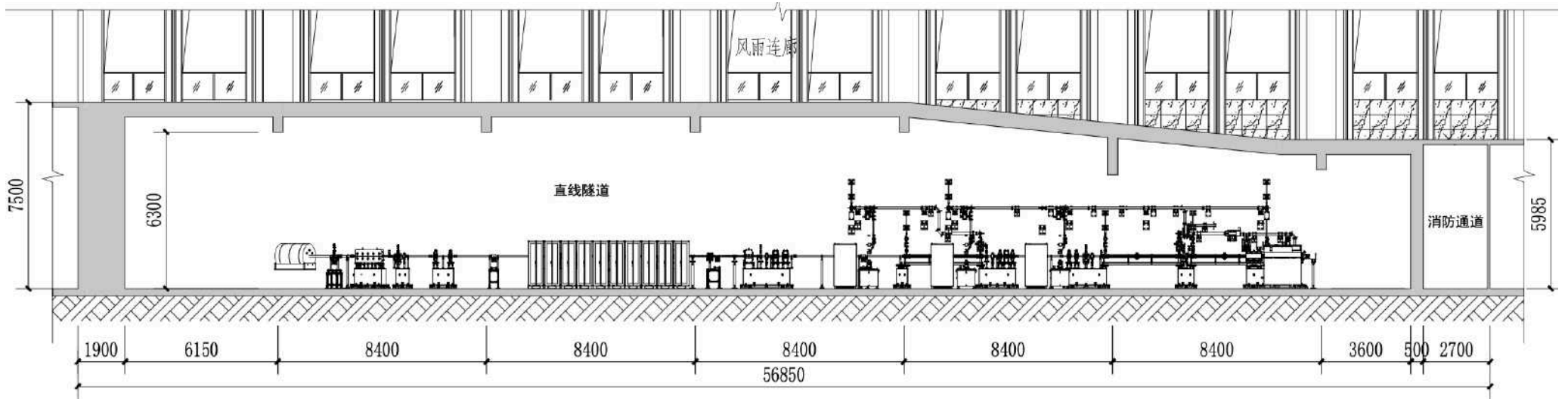
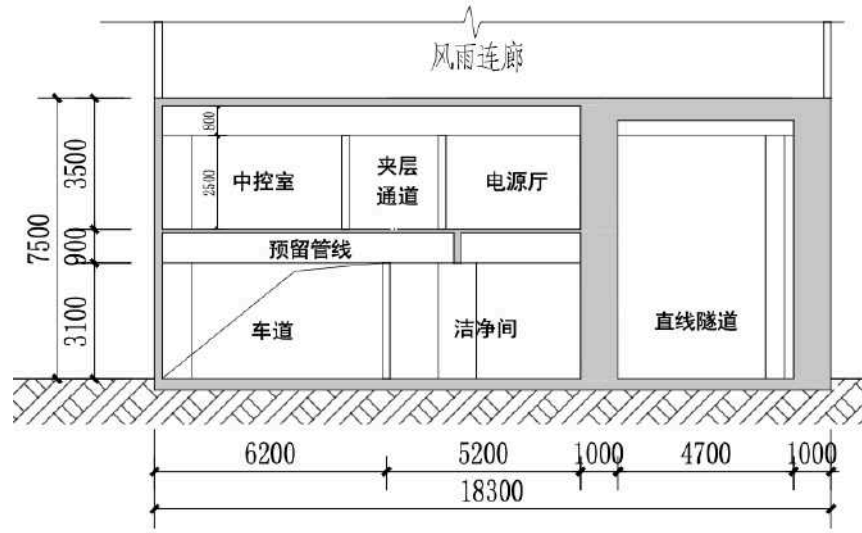


图 4-7 剖面布局示意图

4.2 辐射安全与防护措施

4.2.1 安全联锁系统

4.2.1.1 设计原则

安全联锁系统由于其独特的应用场合，除了要遵循弱电控制系统的设计规范外，还要符合辐射防护相关规定和标准。在借鉴国内外同类项目安全联锁系统设计和运行经验的基础上，本项目安全联锁系统主要设计原则如下：

- (1) 简单可靠：系统设计要力求在简洁的基础上，保证运行可靠性及稳定性。
- (2) 最优切断：安全联锁系统在加速器控制系统中应具有最优先的权力切断束流。
- (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使系统回到安全状态，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和监测，如发现设备工作异常则根据安全等级生成相应级别的报警事件。
- (7) 以人为本：安全联锁系统在保障工作人员人身安全的基础上，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。

4.2.1.2 运行模式

加速器工作模式如下：

表 4-4 加速器工作模式

状态编号	加速器状态	安全联锁	说明
------	-------	------	----

1	允许进入	未就绪	正常维修
2	允许进入	就绪	准备开机，限制进入
3	不许进入	就绪	加速器供束
4	不许进入	未就绪	异常，紧急切断加速器

4.2.1.3 总体方案

安全联锁系统架构如图 4-8 所示。系统划分为联锁控制系统、联锁门禁监控系统、联锁钥匙系统和监控平台。

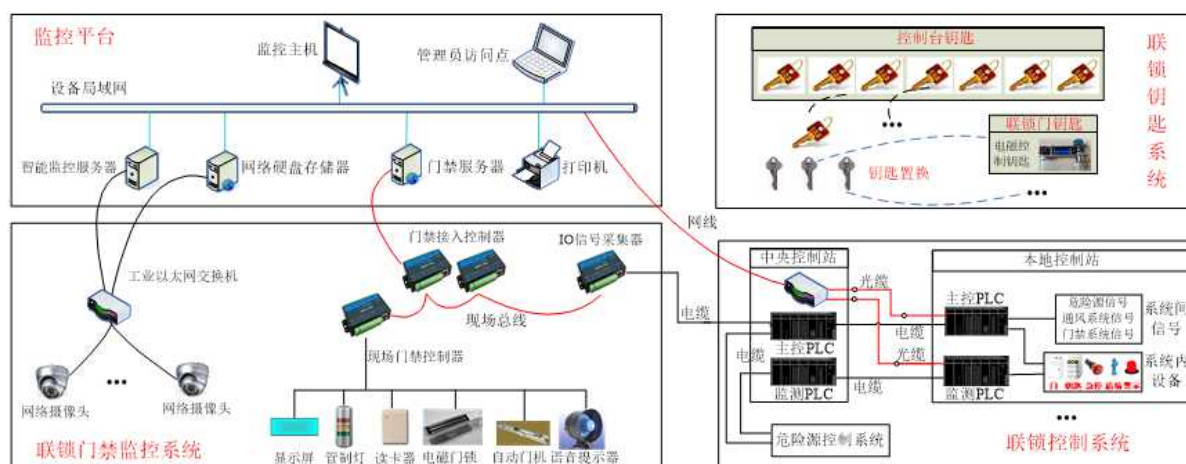


图 4-8 安全联锁系统架构示意图

安全联锁系统根据控制区的联锁门钥匙信号、门磁开关信号、紧急停机按钮信号和搜索清场信号判断控制区是否就绪，控制区就绪逻辑如图 4-9 所示。

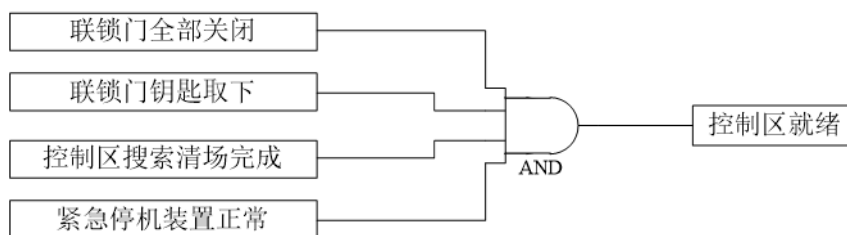


图 4-9 控制区就绪逻辑

系统根据加速器运行状态判断进入控制区是否安全，为实现不同加速器模式下各控制区的管制，每个控制区都设有控制进入、限制进入和禁止进入 3 种人员进入管制状态，如图 4-10 示：控制进入发生在加速器停止运行并且控制区经过通风，已经可以保障进入人员的安全后，此时工作人员凭授权的门禁卡可进出相关区域；限制进入是一种中间

待命状态，发生在控制区搜索清场时、搜索清场完成后或控制区涉及的加速器准备开机时，在限制进入模式时只有使用巡更卡（高权限卡）才可进入；禁止进入状态发生在加速器开机运行时或剂量衰减时，此时门禁刷卡无效，不允许任何人员进入控制区。另外，为保证人员安全，在任何运行模式下人员均可刷卡或通过紧急开门按钮打开联锁门离开控制区。

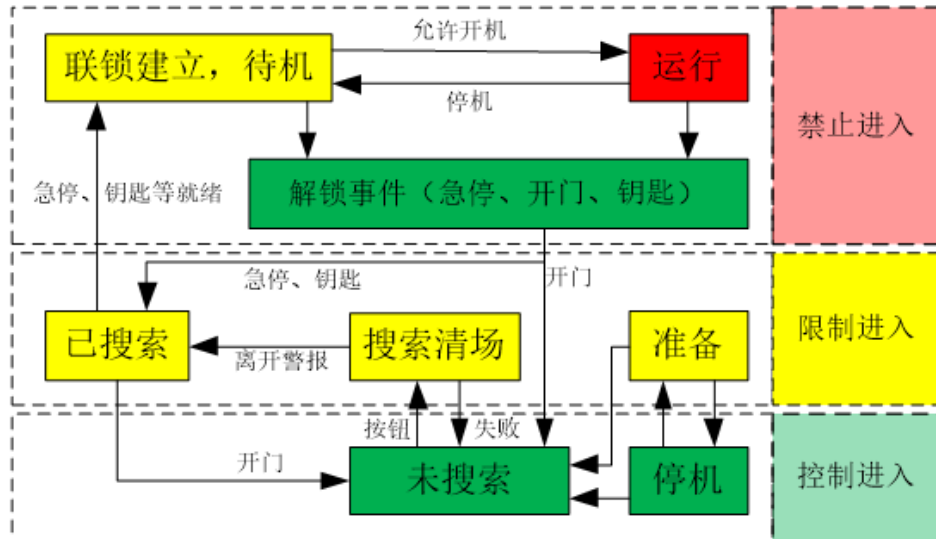


图 4-10 控制区管制模式状态转移图

安全联锁系统的工作流程如图 4-11 所示，具体如下：

- ①值班人员进入控制区启动清场，广播通知检修人员离开控制区；同时，按照设定的路线进行巡更清场，清空滞留人员；
- ②巡更清场结束后，关闭联锁门，取下联锁门钥匙并置换控制区钥匙后在控制台钥匙就位；
- ③加速器准备，控制区内进行 1 分钟的声光报警，提醒误留控制区人员操作紧急停机设备阻止加速器开机；
- ④“准备”过程结束后，安全联锁系统允许加速器启动；
- ⑤加速器“运行”后，安全联锁系统建立切束联锁，同时，“禁止进入”状态启动；
- ⑥正常停机后，等待通风换气，然后“禁止进入”联锁状态自动解除；
- ⑦值班员将联锁门钥匙插入门口的钥匙盒，其它人员才可刷卡进入控制区。

⑧工作结束后，离开联锁控制区时必须刷卡，以消除控制区滞留记录，发出“零计数”信号。

需要紧急开门时，击碎玻璃破碎按钮，打开联锁门进入或退出控制区。需要紧急停机时，按压紧急停机按钮触发紧急停机动作。

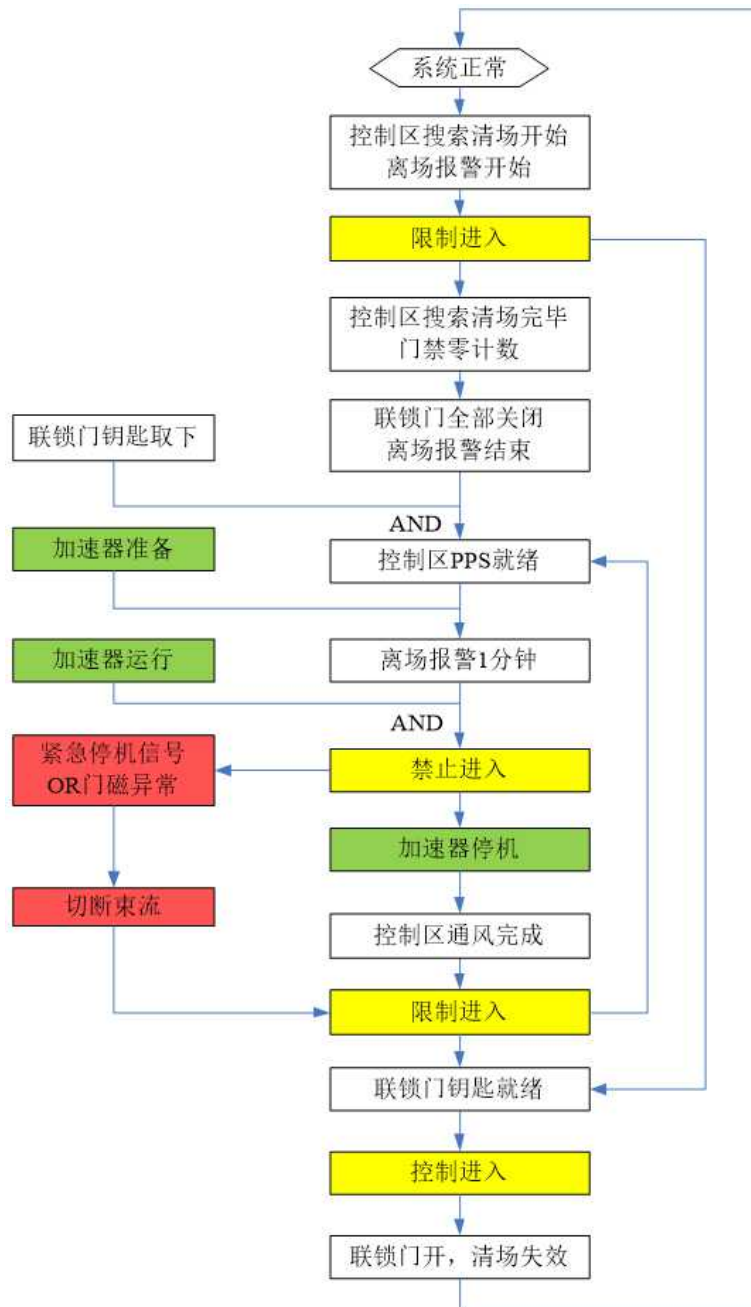


图 4-11 安全联锁系统工作流程图

4.2.1.4 软硬件组成

4.2.1.4.1 主要设备配置

安全联锁系统主要现场设备有：联锁门禁组件、联锁钥匙、紧急停机装置、搜索清场装置、联锁剂量监测器、警示装置和控制机柜等，设备数量统计如表 4-5 所示，主要设备分布如图 4-12 所示。

表 4-5 安全联锁系统设备数量统计表

序号	设备名称	数量
1	迷宫门	1
2	屏蔽门	1
3	设备通道门	1
4	门禁组件 (含紧急开门按钮)	3
5	联锁门钥匙	3
6	紧急停机按钮	7
7	搜索清场按钮 (配声光报警装置)	3
8	钥匙置换盒	1
9	控制台钥匙	1
10	控制机柜	1

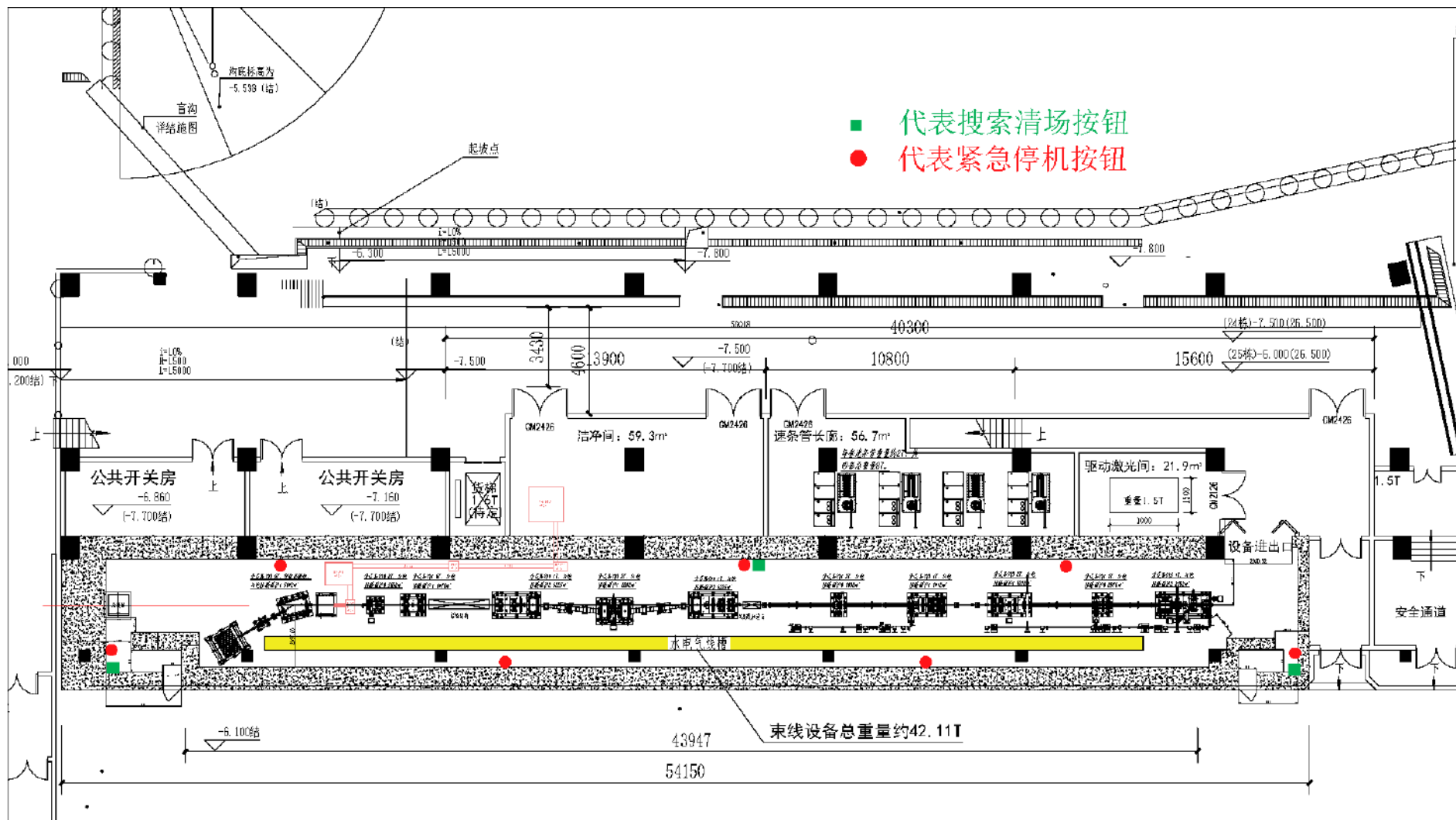


图 4-12 安全联锁设备分布示意图

(1) 联锁门禁组件：联锁门是指参与联锁的控制区通道门。联锁门禁的要求是：控制区内部存在安全威胁时联锁门无法打开；控制区联锁门被打开时加速器无法开启。

联锁门全部为单向联锁，门外配置联锁信号控制箱、门禁控制箱、LED 显示屏、管制状态指示灯、语音提示器、读卡器、玻璃破碎按钮（紧急开门按钮）、电磁控制联锁钥匙、监控摄像机；门内配置读卡器、玻璃破碎按钮。薄铅门和设备通道门根据后续需求确定是否安装自动门机。

(2) 联锁门钥匙：联锁钥匙通过将开启加速器的钥匙与控制区通道门状态联锁，实现通道门未关闭时无法启动加速器，加速器启动后人员无法进入控制区。

本项目在加速器控制台配置 7 套钥匙驱动的电气开关，该开关信号接入加速器控制系统，每套开关对应一个控制区。每个控制区有多个联锁门，在控制室配置 6 套钥匙交换盒，将控制区钥匙与联锁门钥匙互锁。每套联锁门处配置电磁控制钥匙，打开电磁锁取出钥匙的条件是：对应联锁门锁闭且清场完成。

(3) 紧急停机按钮：辐射工作场所控制区内部要设置紧急停机装置，在紧急情况下，工作人员按下紧急停机按钮可立刻切断加速器束流。紧急停机按钮安装在控制区人行道一侧的内壁上，其分布见图 4-12。

控制台设置 1 组紧急停机按钮和 1 组确认复位按钮。紧急停机按钮被按下后，必须用钥匙在按钮触发地点复位，之后在控制台进行确认复位操作。

(4) 搜索清场按钮：在加速器开机之前，未清场程控制区必须进行搜索清场。搜索清场过程中，搜索人员按照预定路线依次经过搜索点，检查清空控制区人员，操作搜索清场装置，实现搜索清场。清场按钮布置在控制区内的人员容易被遮挡的位置，其分布见图 4-12，搜索清场路线如图 4-13 所示。搜索清场按钮控制箱配置警灯、警铃或语音提示器，用于控制区搜索清场时和加速器准备开机时的声光报警。

(5) 联锁剂量监测器：屏蔽体外的部分场所剂量监测器可能接入安全联锁系统，系统要为此预留接口。接入安全联锁系统的剂量监测器需要从探测器本地扇出一路报警信号，通过硬连线方式接入联锁 PLC 系统。

(6) 控制机柜：安全联锁系统设置 1 个控制站，控制站配备 4 套联锁控制机柜和 1 套门禁监测机柜。联锁控制机柜又分为 1 套中央控制机柜和 3 套本地控制机柜。机柜内配备有冗余联锁控制器、电源、显示面板、接线面板、交换机等设备；门禁监测机柜配置有 DVR、交换机、服务器主机、显示屏、键盘鼠标等。

系统初步计划选用横河 FA-M3 系列 PLC 作为联锁控制器，将根据详细设计方案，选用不同的模块恰当的来实现其功能。

4.2.1.4.2 加速器控制系统信号接口

安全联锁系统与加速器控制系统有信号交换。

(1) 加速器状态信号：包括加速器准备、加速器停机和加速器运行，该信号由加速器控制系统发送给安全联锁系统，继电器闭合代表该状态生效。

(2) 模式允许信号：由安全联锁系统发送给加速器控制系统，继电器闭合代表安全联锁允许对应的一种加速器模式启动。

(3) 加速器模式信号：由加速器控制系统发送给安全联锁系统，继电器闭合代表一种加速器模式正在运行。

4.2.2 辐射监测系统

本项目辐射监测包括工作场所监测、环境监测和个人剂量监测。工作场所和环境监测均采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；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进行。

4.2.2.1 设计原则

粒子加速器工作场所应设置固定式区域辐射监测仪，监测仪器显示单元可设置在控制室内或出入口门附近。具体监测点位结合加速器的特点和运行需要确定，遵循的原则如下：

a) 设在加速器室和束流终端室内部的固定式区域辐射监测仪，应能真实反映上述区域

内部辐射水平随加速器运行工况的变化；

- b) 设在加速器室和束流终端室入口处的固定式区域辐射监测仪，应能真实反映上述区域内的辐射水平。
- c) 原则上应在能量高于 100MeV 的粒子加速器屏蔽体外相邻场所内人员全居留区域安装区域辐射监测系统。当监测数据超过设定阈值时，发出报警信号。
- d) 应对屏蔽体内、外的辐射场组成、大小和时间特性进行分析评估，区域辐射监测仪器的能量响应、测量范围、响应时间等指标应与辐射场的特点相匹配。

4.2.2.2 工作场所监测点位

场所辐射监测系统主要负责工作场所的监测，由固定安装探测器、数据处理单元、局域网、监控计算机、中心管理计算机与辐射防护数据库组成，如图 4-14 所示。探测器用于测量辐射水平；数据处理单元用于采集探测器的输出信号和剂量率就地显示、本地报警及通讯；内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；监控计算机用于完成监测数据的日常分析与管理；中心管理计算机用于发布剂量监测数据；辐射防护数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据，包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型（ γ /中子）。

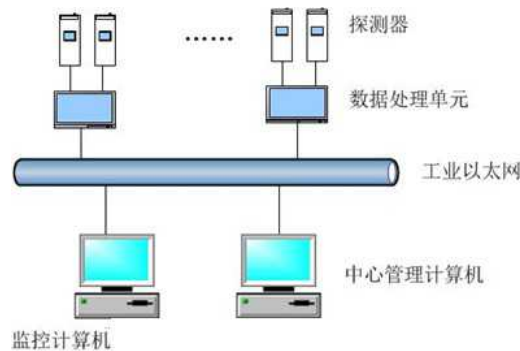
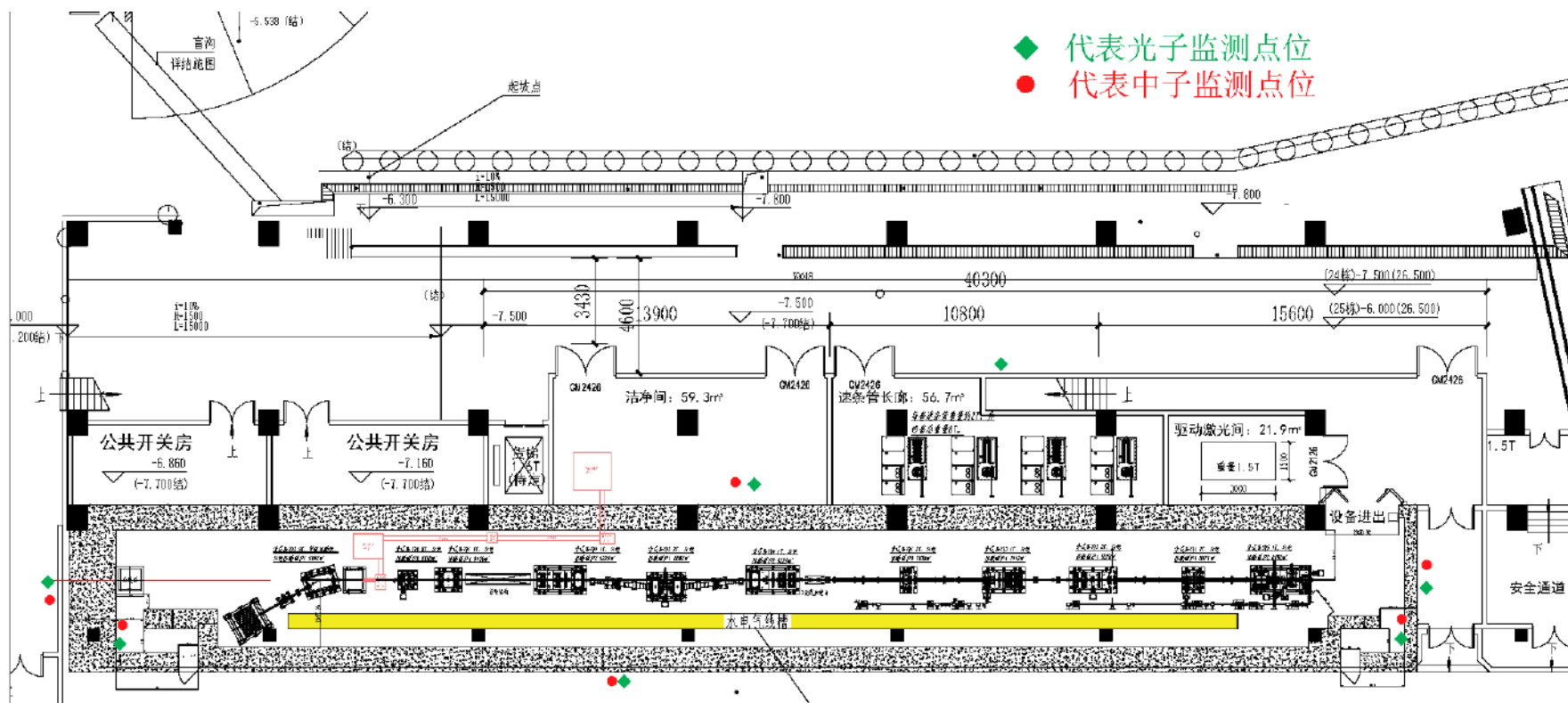


图 4-14 本项目场所辐射监测系统结构

本项目装置固定式辐射监测点位如图 4-15、图 4-16 所示。在各个控制区设置伽马剂量率监测点位，主要功能是使工作人员进入可能会存在束流的高辐射水平场所内部之前先了解场所的辐射水平，避免开机时误入造成的误照射；在人员滞留时间较长的束调管长廊设置中子和伽马剂量率监测点位，保障人员安全。



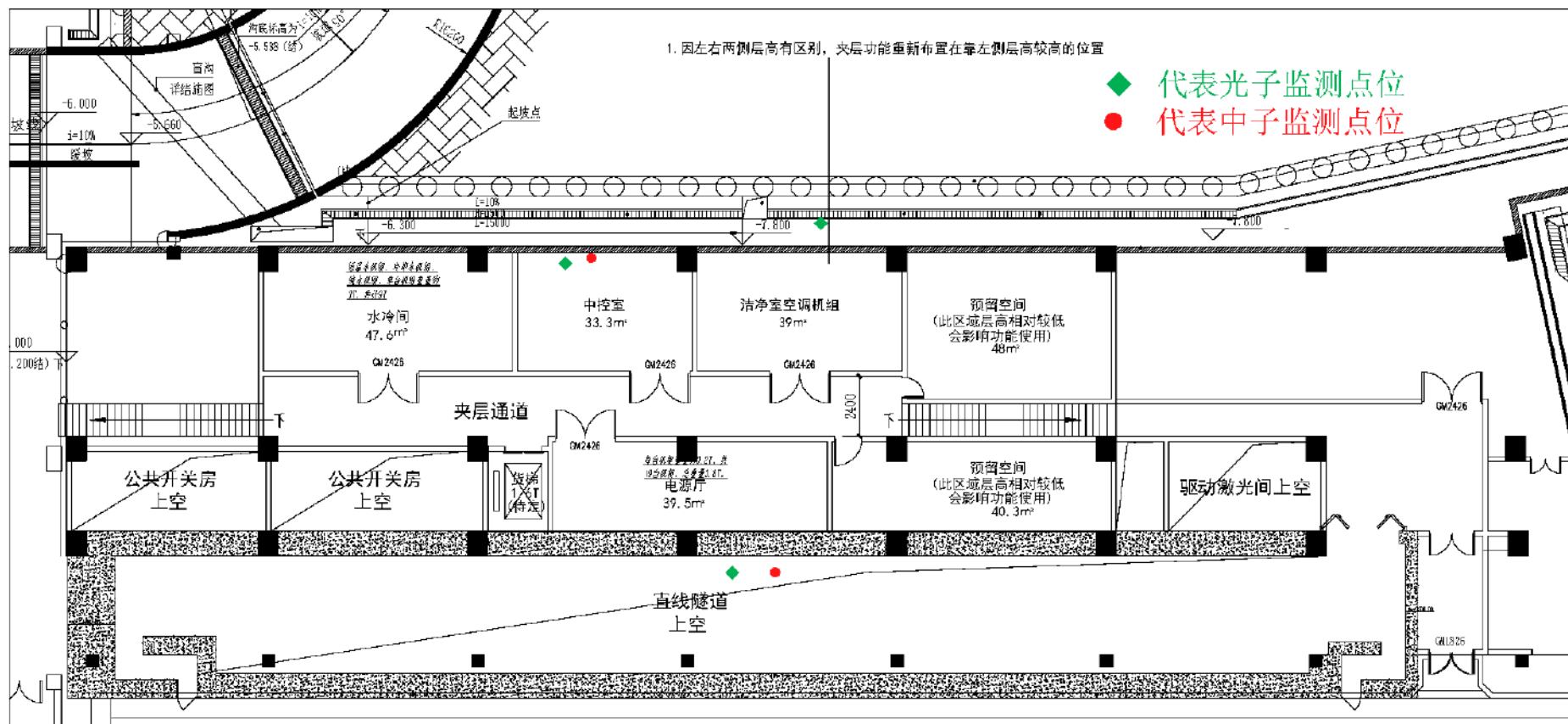


图 4-16 工作场所固定式辐射监测点位（二层）

4.2.3 其它防护措施

考虑到加速器的残余辐射水平，为了保证维修人员的安全，对于本项目设备参考的维修限值见下表。

表 4-6 直线加速器在不同的辐射水平下的维修限值

辐射水平	维修类别
<100 μ Sv/h	手工维修可不受限制。注意：但对任何工人不超过200h/yr（小于20mSv/yr）
100 μ Sv/h ~ 1 mSv/h	手工维修需要控制时间
1mSv/h ~100mSv/h	手工维修需严格管控，非常有限的维修时间
>100mSv/h	需要远程维修

注：参考 LANL: LosAlamos Neutron Science Center (LANSCE) 800 MeV 直线加速器在不同的辐射水平下的维修限值。

针对感生放射性，建设单位工作人员采取的防护措施如下：

1. 由于停机后屏蔽体内仍具有一定的感生放射性，因此须停机通风一定时间并取得控制室允许后方可进入屏蔽体。
2. 进入时必须携带个人剂量计、个人剂量报警仪和辐射剂量巡测仪。
3. 开始维护检修前，对所需检修部件及周围区域进行巡测，然后优化并确定实施方案；对高辐射区域器件的维护检修，须有辐射防护安全人员到现场监督，并根据具体情况采用必要的临时局部屏蔽措施；直接接触部件操作人员，必须配戴手套、工作服等个人防护用品。
4. 对于高残余辐射的设备应制定设备维修计划，以减少维护时间与风险。

4.2.4 通风系统

本项目控制区内均设置通风系统，采用送风机送风、排风机排风的方式，上送下排。废气经引至屋顶总排风口后排放。排风量略高于送风量，使机房内保持微负压状态。送风管道、排风管道通过低能段迷宫穿墙。排风管道最终引至楼顶总排风口排放，高度约 50 米。通风系统设计参数列于表 4-7。

机房排风管引至屋顶，经活性炭过滤器过滤后排入环境。

4.3.2 放射性废液及其处理措施

(1) 来源

本项目产生的放射性废液主要是活化的冷却水。加速器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，放置一段时间就基本可以衰变到可以忽略的水平。

(2) 处理措施

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修或发生冷却水泄漏事故时才需要排放。在隧道内设有1个集水坑，具体位置见下图。集水坑的尺寸为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.45\text{ m}$ （长 \times 宽 \times 深），容积为0.64立方米，集水坑上方有钢格栅盖板。机房设自流坡度确保泄漏的冷却水能够自流并通过地沟排入该集水坑内暂存。隧道内设备内的总水体积不超过0.5立方米，每年最多检修排放次数为1次，则年最大排放量为0.5立方米，集水坑的容积0.64立方米，能够满足活化冷却水的暂存要求。集水坑上方设有取样口，冷却水在排放前必须进行取样检测，检测结果满足放射性废液排放标准，方可排入学校污水管网，依托学校污水处理站处理。

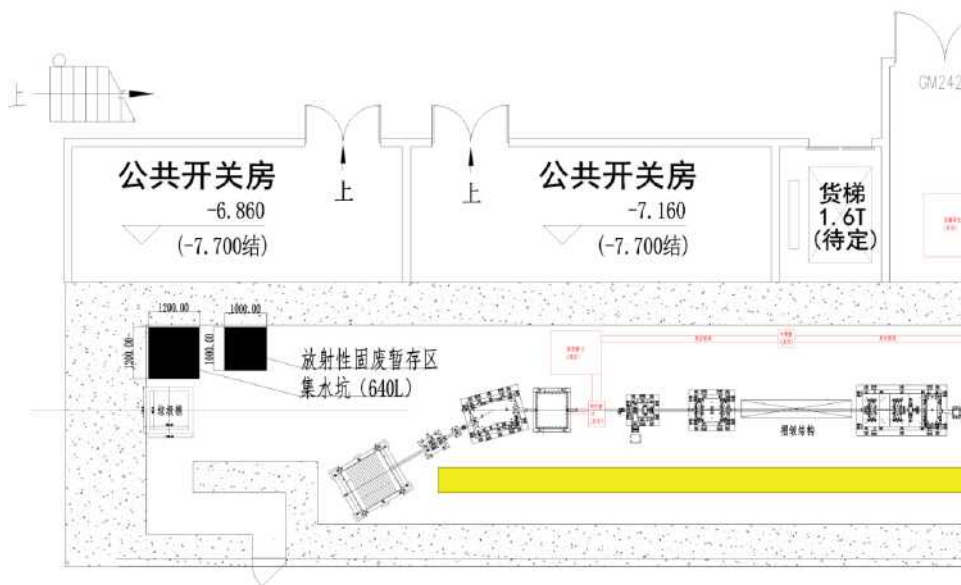


图 4-18 集水坑位置示意图

综上所述，本项目装置正常运行时不会产生放射性废液，且根据表 3-10 可知，检修或发生泄漏的情况下可能排放的冷却水活度远低于排放限值，且采取了有效的冷却水收集和暂存措施。因此，放射性废液对环境的影响很小。

4.3.3 放射性固体废物及其处理措施

(1) 来源

本项目可能产生的放射性固体废物主要为废靶、废离子树脂及废活性炭。在装置运行期间，预计每年放射性固体废物产生量小于 1m^3 。

(2) 处理措施

隧道内设置一个带锁的铁箱，用于存放本项目产生的放射性固体废物，具体位置见下图。铁箱的尺寸约为 $1\text{m}\times 1\text{m}\times 1\text{m}$ ，铁箱的厚度应确保箱体外表面 30cm 处剂量率不高于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。铁箱上贴有电离辐射警告标志和标签，标明废物名称、数量、剂量率水平和存放日期等信息。并配备专门的管理人员，负责放射性固体废物的安全管理以及铁箱钥匙的保管。

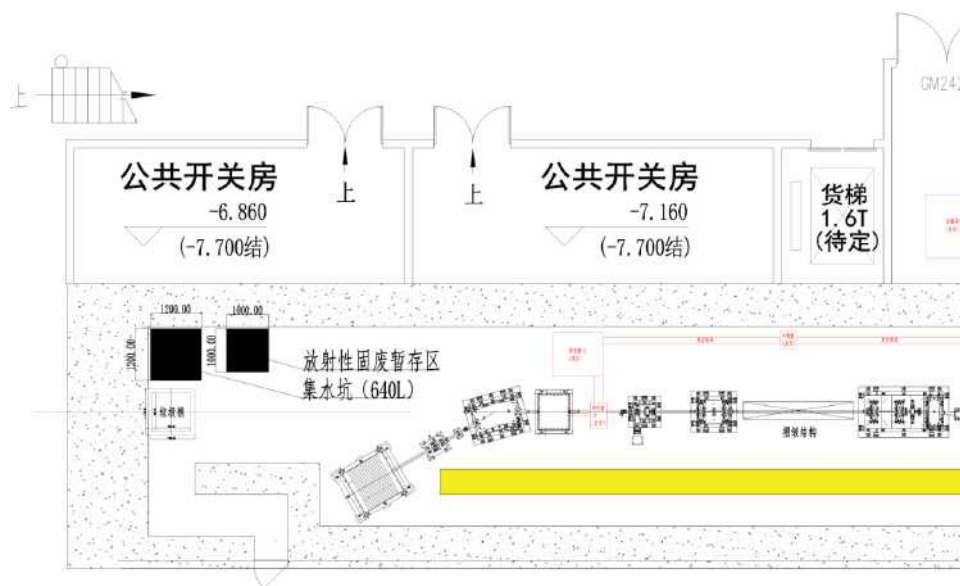


图 4-19 放射性固废暂存区位置示意图

当暂存箱内废物暂存量接近废物箱容积的 2/3 时，由建设单位委托有资质单位进行集中测量分析：

(1) 对于满足“1.4.3.2 节”所列解控标准的：

①可回收利用的部件，回收后复用。

②不能回收利用的部件，按非放射性固体废物处理。

(2) 对于不满足“1.4.3.2 节”所列解控标准的，由建设单位委托有资质单位处理。

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

4.4 服务期满后的环境保护措施

本项目射线装置终止运行后可能产生放射性污染，因搬迁等原因不再使用时，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 辐射环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

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

5.2 运行阶段对环境的影响

5.2.1 场所辐射水平

5.2.1.1 模拟计算源项及模型

本次评价采用 FLUKA 程序进行建模计算，考虑了屏蔽体结构、装置尺寸以及靶结构，采用标准硅酸盐混凝土作为防护材料，混凝土的材料组成见表 5-1。

表 5-1 混凝土材料组成

元素	含量（质量比）	元素	含量（质量比）
H	0.01	C	0.001
O	0.529107	Na	0.016
Mg	0.002	Al	0.033872
Si	0.337021	K	0.013
Ca	0.044	Fe	0.014

考虑的辐射源项见表 3-2 中的束损参数，具体为：1%束流损失， $3.13E9$ e/s，损失束流打在束流管道上。FLUKA 建模图见图 5-1。

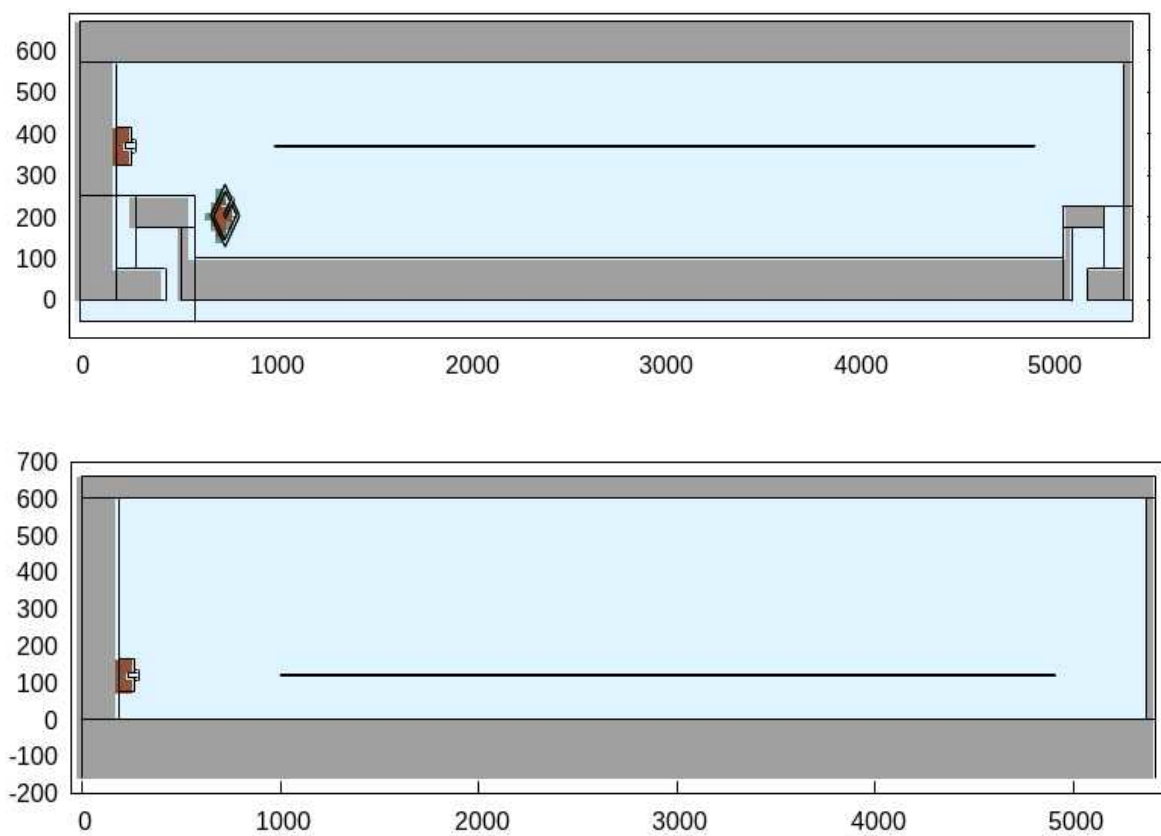


图 5-1 直线隧道 FLUKA 建模图（分别为平面、剖面）

5.2.1.2 关注点设置情况

直线加速器隧道根据周围环境分布情况设置了若干关注点，关注点位置见图 5-2。

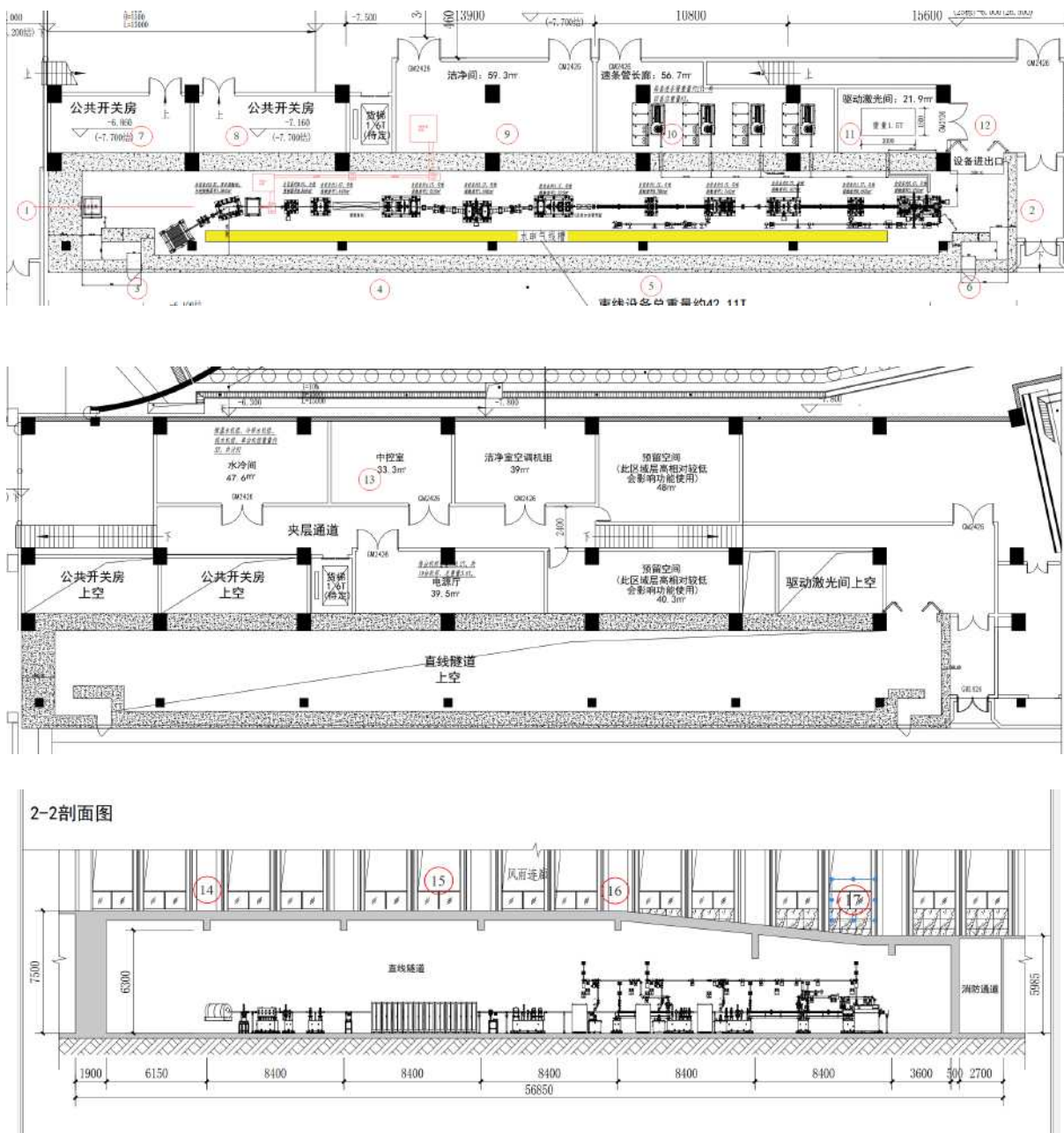


图 5-2 直线隧道屏蔽体外关注点示意图

5.2.1.3 关注点剂量率计算结果

各关注点剂量率模拟结果见表 5-2、图 5-3。从结果可以看出，直线隧道各关注点剂量率均低于其剂量率控制水平，屏蔽设计满足要求。

表 5-2 直线隧道屏蔽体外剂量率模拟结果

关注点编号	周围环境	屏蔽体外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
1	走廊	0.10	2.5

关注点编号	周围环境	屏蔽体外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	剂量率控制水平, $\mu\text{Sv/h}$
2	走廊	0.07	2.5
3	高能段迷宫口	0.15	2.5
4	户外区域	0.16	2.5
5	户外区域	0.15	2.5
6	低能段迷宫口	0.10	2.5
7	公共开关房	0.05	2.5
8	公共开关房	0.12	2.5
9	洁净间	0.21	2.5
10	速调管长廊	0.22	2.5
11	驱动激光间	0.10	2.5
12	设备门	0.06	2.5
13	控制室	0.01	2.5
14	户外区域	1.18	2.5
15	户外区域	1.22	2.5
16	户外区域	1.20	2.5
17	户外区域	0.05	2.5

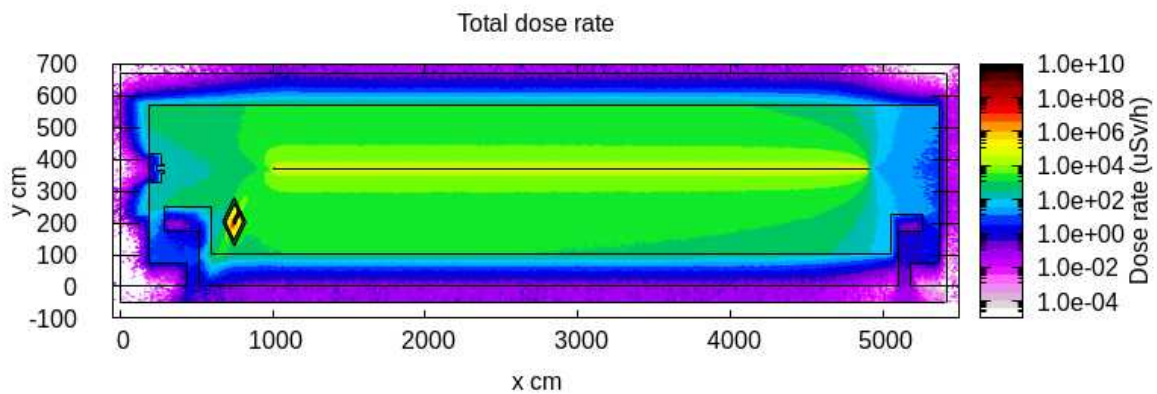


图 5-3 束流由垃圾桶 1 收集, 光子+中子剂量率平面分布图, $\mu\text{Sv/h}$

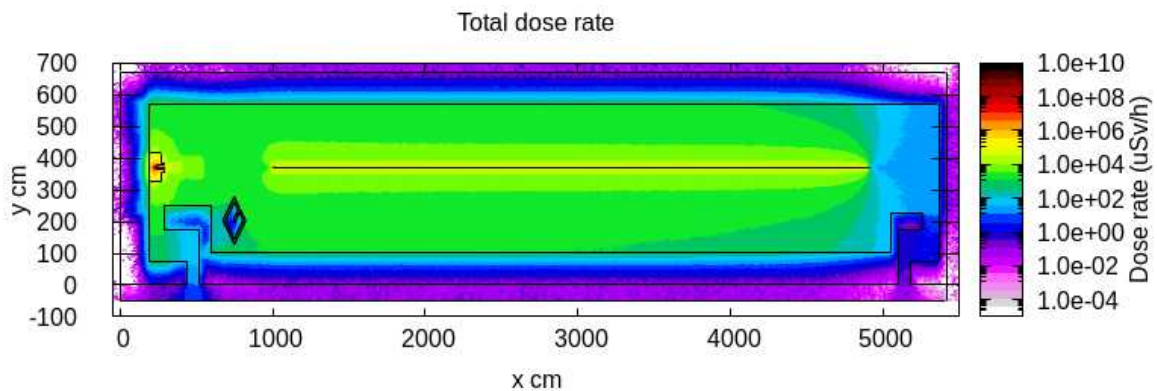


图 5-4 束流由垃圾桶 2 收集, 光子+中子剂量率平面分布图, $\mu\text{Sv/h}$

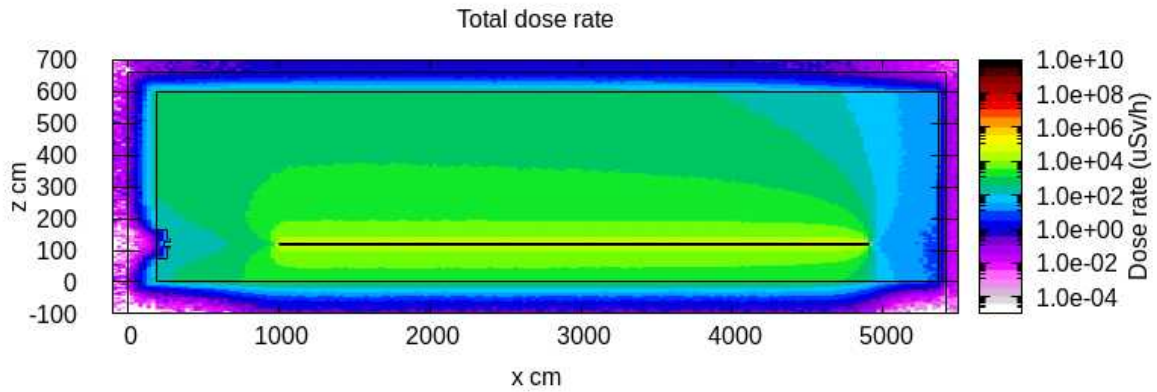


图 5-5 直线隧道光子+中子剂量率剖面分布图, $\mu\text{Sv/h}$

5.2.1.4 穿墙孔洞外剂量率计算结果

由模拟结果可知, 距离穿墙孔 30cm 处的剂量水平没有明显上升, 穿墙孔均采用相应的屏蔽补偿措施, 如表 4-3。

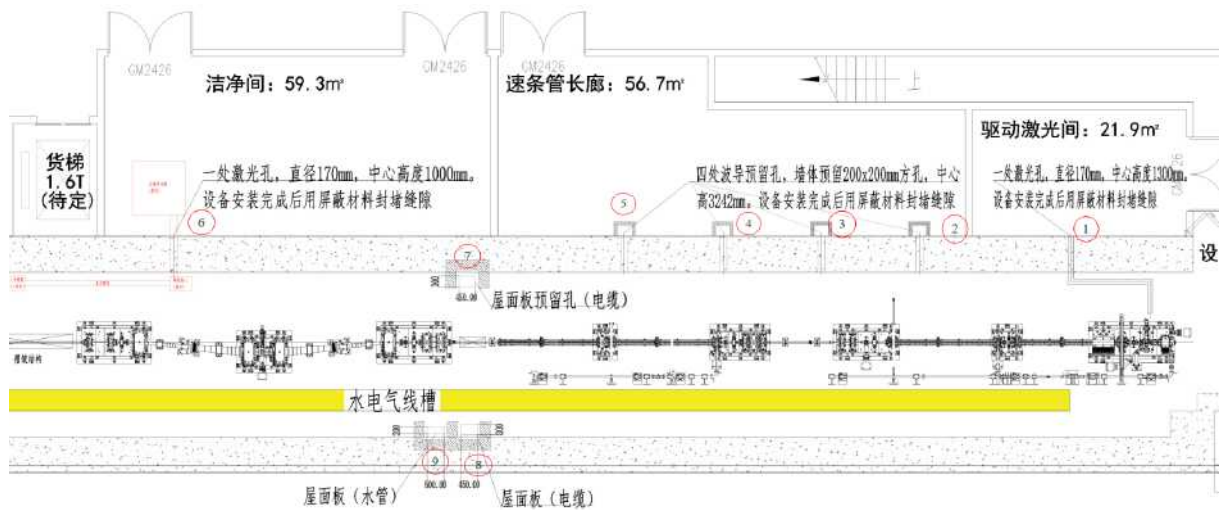


图 5-6 穿墙孔洞位置示意图

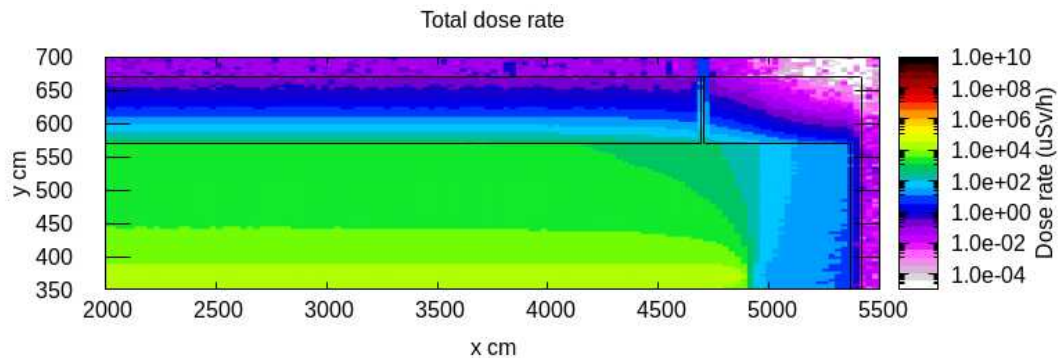


图 5-7 驱动激光孔剂量率

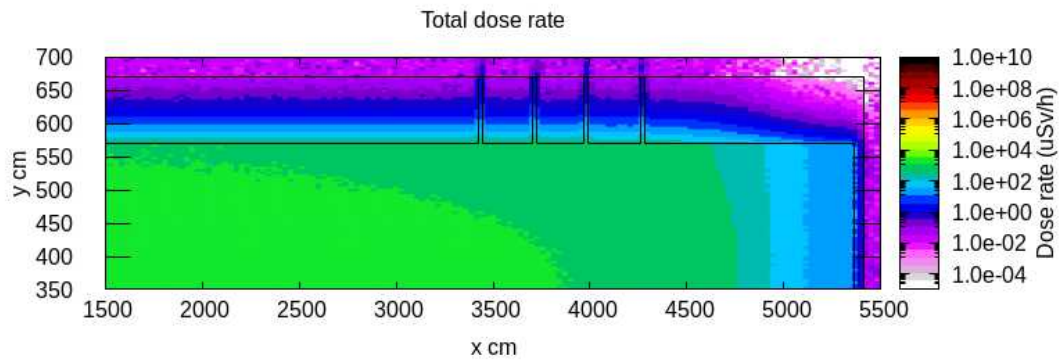


图 5-8 波导孔剂量率

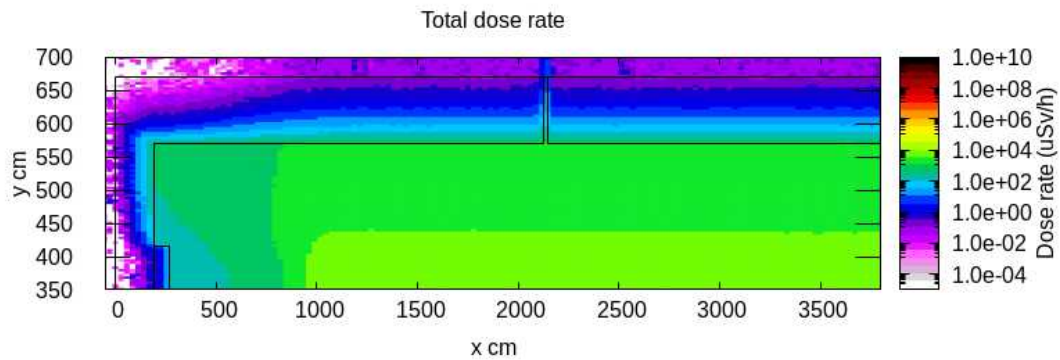


图 5-9 对撞激光孔剂量率

5.2.2 人员受照剂量

5.2.2.1 工作人员受照剂量估算

工作人员因装置运行而受到的外照射剂量可由下式 5-1 进行计算：

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

式中，

H 为工作人员年受照剂量，mSv/a；

D 为工作人员所在区域剂量率，mSv/h；

T 为工作人员的居留因子；

t 为工作人员年受照时间，h/a。

正常运行期间，负责设备运行的工作人员主要位于二层的中央控制室，仅受到加速器开机时的瞬发辐射影响。装置正常运行期间的年出束时间最多为 1000h，工作人员每年进入隧道内在束流管活化区、垃圾桶活化区周围工作的时长分别按 500h、100h 考虑，则工作人员的受照剂量计算结果见表 5-3，满足工作人员年剂量约束值要求。

表 5-3 正常运行期间工作人员受照剂量计算结果

工作人员	剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$			受照时间, h	受照剂量, mSv/a
辐射工作人员	瞬发辐射	控制室	0.01	1000	0.01
	感生放射性	束流管活化区	1	500	0.5
		垃圾桶活化区	10	100	1
	总计				1.51

5.2.2.2 公众的受照剂量估算

本项目各装置正常运行期间，瞬发辐射主要影响对象为装置周围近距离范围内的公众，其所受瞬发辐射照射剂量由下式 5-2 计算。计算结果列于表 5-4。

$$H = D \times t \times T \times 1 \quad (5-2)$$

H 为公众的年受照剂量, mSv/a;

D 为公众所在区域剂量率, mSv/h;

t 为公众年受照时间, h/a;

T 为居留因子。

表 5-4 公众关注点处所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

关注点编号	周围环境	屏蔽体外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	居留因子	年受照时间, h	年受照剂量, mSv
1	走廊	0.1	1/4	1000	2.50E-02
2	走廊	0.07	1/4	1000	1.75E-02
3	高能段迷宫口	0.15	1/4	1000	3.75E-02
4	户外区域	0.16	1/16	1000	1.00E-02
5	户外区域	0.15	1/16	1000	9.38E-03
6	低能段迷宫口	0.1	1/4	1000	2.50E-02
7	公共开关房	0.05	1/16	1000	3.13E-03
8	公共开关房	0.12	1/16	1000	7.50E-03

12	设备门	0.06	1/4	1000	1.50E-02
14	户外区域	1.18	1/16	1000	7.38E-02
15	户外区域	1.22	1/16	1000	7.63E-02
16	户外区域	1.2	1/16	1000	7.50E-02
17	户外区域	0.05	1/16	1000	3.13E-03

由计算结果可看出本项目正常运行期间对公众所致的最大个人剂量为 7.63E-02mSv/a，低于公众剂量约束值 0.1mSv/a，满足相关标准要求。

5.3 事故影响分析

射线装置的辐射场是瞬发性的，装置一旦停机，能造成环境影响的辐射源立即消失，且不会再引起周边介质的活化。

装置运行期间可能发生的事故主要有：

(1) 人员误留。由于安全联锁系统失效、人员误入机房内部造成的误照射事故；或工作人员在机房内部工作期间，加速器出束造成的误照射事故。

(2) 冷却水泄漏。

此外，若在装置出束期间，项目所在地发生洪水、地震等自然灾害，装置会在工作人员操作下或触发安全联锁（如门机联锁、机房外部剂量监测联锁等）的情况下切断束流，其瞬发辐射场立即消失，不会对周围环境造成辐射影响。

5.3.1 人员误留事故

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

范：

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

(2) 开机出束前，撤离控制区时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和顺序对控制区各区域进行清场。出束期间一旦发现有人员滞留在控制区内，就近按下急停按钮。工作人员进入控制区内部工作时应随身佩戴有效的剂量报警仪，以便随时了解控制区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

冷却水管路上安装有泄漏测量传感器，一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水。根据“3.3.2.2 节”的计算结果，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员造成辐射影响。

因此，冷却水泄漏事故不会对环境造成污染。

5.3.2.2 事故防范措施

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

6 辐射安全管理

6.1 机构与人员

6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构

建设单位已成立辐射安全与环境保护管理机构，并安排专人专职负责辐射安全与防护管理工作。建设单位辐射防护领导小组详见表 6-1。

表 6-1 建设单位辐射安全与环境保护管理机构

机构名称		辐射安全与环境保护管理机构			
联系人		姓名	董煜	电话	020-84110847
		Email	dongy77@mail.sysu.edu.cn		
序号	管理人员	姓名	职务或职称	工作部门	专/兼职
1	组长	陈骞	主管	设备与实验室管理处	专职
2	副组长	董煜	科员	设备与实验室管理处	专职
3	成员	胡国庆	处长	设备与实验室管理处	专职
4	成员	郑仕勇	副处长	设备与实验室管理处	专职
5	成员	吴昱彤	安全员	分析测试中心	兼职
6	成员	毕远杰	正高级工程师	理学院	兼职
7	成员	全昌云	安全员	生物医学工程学院	兼职
8	成员	李怡淳	安全员	公共卫生学院（深圳）	兼职
9	成员	刘文辉	安全员	设备与实验室管理处	专职

6.1.2 辐射工作人员管理

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40号）的规定，“销售（含建造）、使用I类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。”本项目拟配 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。

本项目计划配备 6 名辐射工作人员，见表 6-2。

建设单位将严格按照要求，承诺今后新增辐射工作人员时，在上岗前参加生态环境

部门认可的电离辐射安全与防护考核，考核合格者方可上岗，在成绩有效期过期前再次考核，现有辐射工作人员在现有培训证书过期前参与考核，考核不合格的人员，不得从事辐射工作。

表 6-2 本项目拟配辐射工作人员情况表

序号	岗位名称	工作内容	工作地点	人数
1	辐射安全	设施的辐射安全管理	整个装置	1
2	加速器运行及调试	加速器运行及调试	直线隧道、对撞区	3
3	激光系统运行维护	激光系统运行维护	激光间、对撞区	2
总计				6

6.2 辐射安全管理规章制度

中山大学·深圳已制定较为完善的辐射安全管理制度，并严格按照规章制度执行，包括《辐射安全管理岗位职责》《辐射设备检修维护制度》《辐射防护和安全保卫制度》《放射性同位素使用登记制度》《辐射工作人员培训要求及计划》《辐射工作人员及场所监测方案》《辐射安全与防护状况年度评估制度》《射线装置台账管理及使用登记制度》，具体见附件 7。

建设单位应根据本项目建设内容和特点，在本项目建成运行前，制定或完善操作规程、设备检修维护、放射性废物处理、辐射监测、应急预案等规章制度，确保本项目运行过程中的辐射安全。

6.3 辐射事故应急

建设单位制定了《中山大学辐射安全事故应急预案》，预案中明确了应急指挥机构、人员组成及分工、应急部门及人员职责、应急器材，发生辐射事故时的报告、通讯联络方式、应急处置方式等。

发生辐射事故时，应立即启动本单位的辐射事故应急预案，采取必要的防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向深圳市生态环境主管部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向深圳市卫生行政部门报告。同时，需进行工作人员的意外事故剂量监测和工作场所及周围环境的应急监测，并做好详细的监测记录。

建设单位应结合本项目建设内容和特点，对应急预案进行补充完善。

6.4 辐射监测

本项目辐射监测总体包括个人剂量监测、工作场所监测和环境监测。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；工作场所监测和环境监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式进行。

6.4.1 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。辐射工作人员配备的个人剂量计和个人剂量报警仪均需具有监测 X- γ 和中子的功能。

个人剂量计用于辐射工作人员的常规个人剂量监测，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，监测周期不超过一个季度。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主管部门。

个人剂量报警仪用于辐射工作人员在机房内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

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。根据 GBZ128-2019，职业照射个人剂量档案终生保存。

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

保存。

6.4.2 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，监测数据记录存档。具体辐射工作场所监测计划列于表 6-3。

表 6-3 辐射工作场所监测计划表

监测类别	监测内容	监测项目	监测方式	监测点位	监测频次
自行监测	外照射	γ 辐射剂量率、中子剂量当量率	固定式仪表监测	机房内 2 处，中控室 1 处，如图 4-15、图 4-16 所示。	实时
			便携式仪表巡测	机房四周和屋顶屏蔽墙体外、防护门外人员长居留场所	1 次/季度
委托监测	外照射	γ 辐射剂量率、中子剂量当量率	便携式仪表巡测	同自行监测点位	1 次/年

6.4.3 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，监测数据记录存档，具体环境监测计划列于表 6-4。

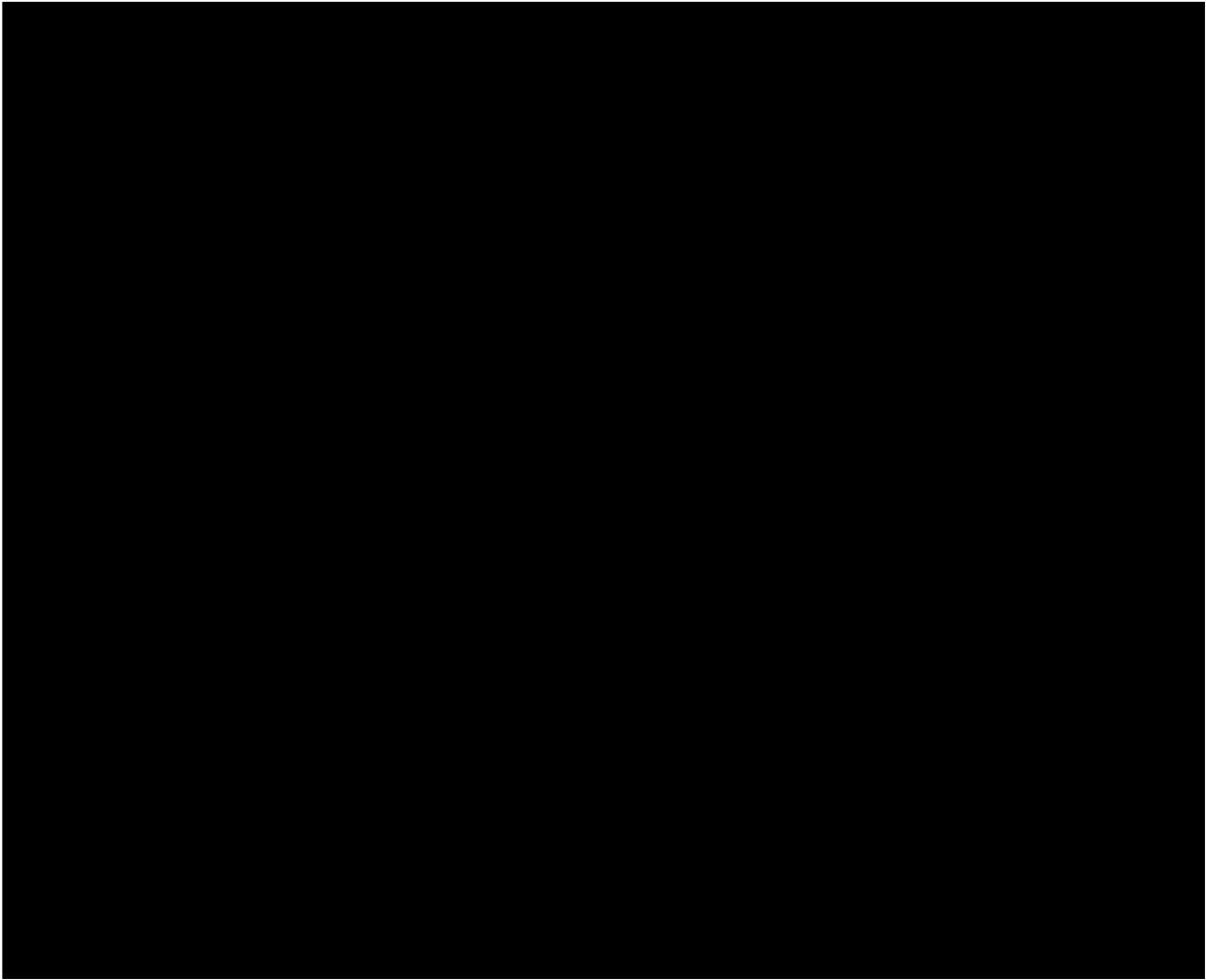
表 6-4 本项目环境监测计划

监测类别	监测内容	监测项目	监测方式	监测点位	监测频次
自行监测	外照射	γ 辐射剂量率、中子剂量当量率	固定式仪表监测	周围环境设若干个点位	实时
			便携式仪表监测	屏蔽体周围、园区内外环境敏感点处	1 次/季度
	固体废物外表面	γ 辐射剂量率	便携式仪表监测	放射性固体废物暂存处	收集及送贮时
委托监测	外照射	γ 辐射剂量率、中子剂量当量率	便携式仪表巡测	同自行监测点位	1 次/年

6.4.4 监测设备

本项目拟配备的主要监测设备包括：固定式 γ 探测器、固定式中子探测器、便携式 X/ γ 巡测仪、便携式中子巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见表 6-5。

表 6-5 本项目拟配备的辐射监测设备清单

序号	仪器名称	数量, 台	主要参数
1	区域监测电离室	3	
2	中子 He-3 探测器	8	
3	固定式辐射监测仪	5	
4	环境监测电离室	4	
5	电子个人剂量	3	

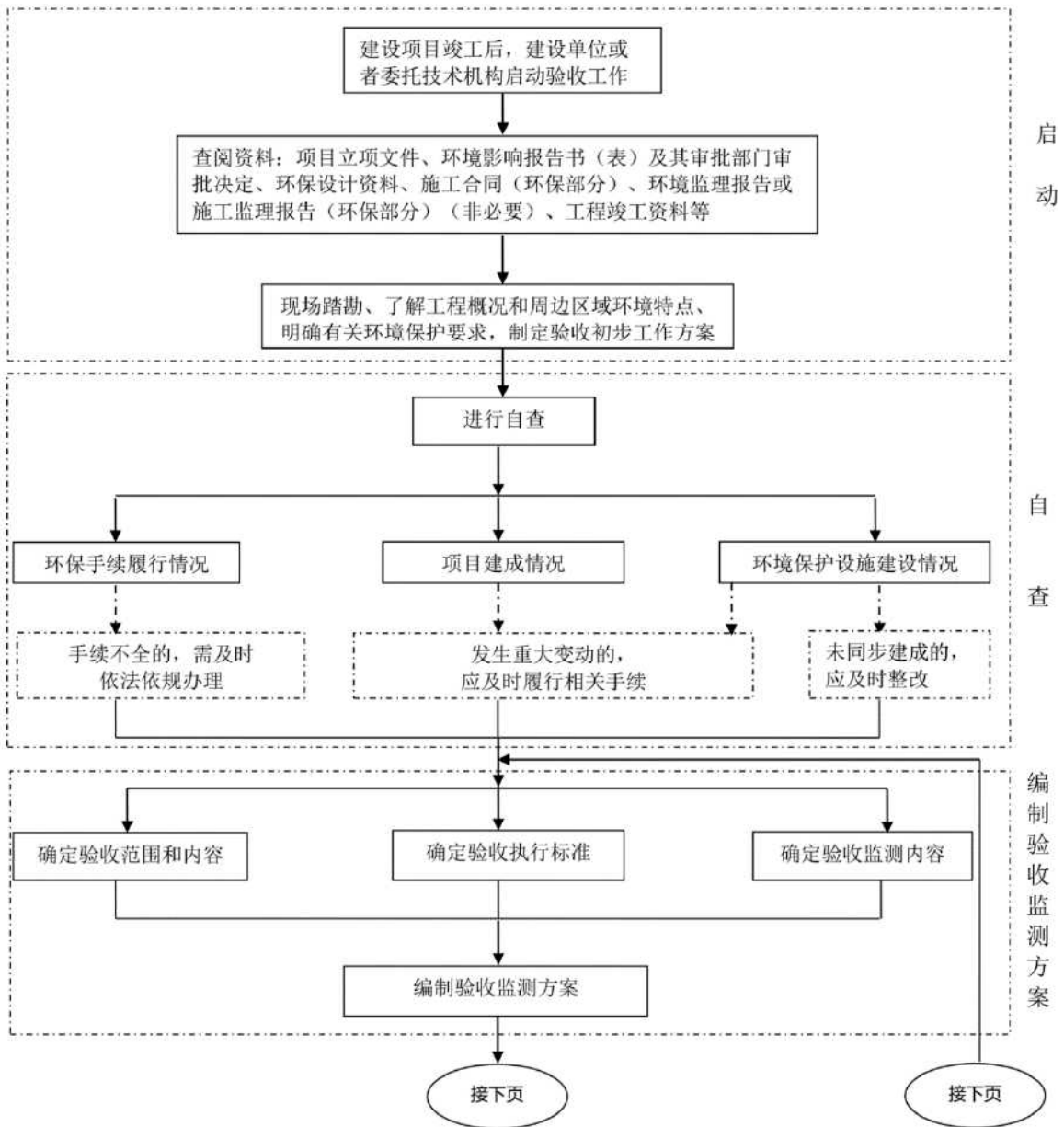
序号	仪器名称	数量, 台	主要参数
6	就地显示单元	12	[Redacted]
7	辐射监测数据管理及存储显示系统	1	
8	辐射工作人员个人剂量片	1 支/人	

6.4.5 竣工环保验收监测

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

6.4.5.1 工作流程

建设单位承诺将在项目建成后委托有资质的检测机构对机房周围环境开展竣工环保验收监测。参照《建设项目竣工环境保护验收技术指南 污染影响类》，本项目竣工环保验收监测的工作流程如图 6-1 所示。



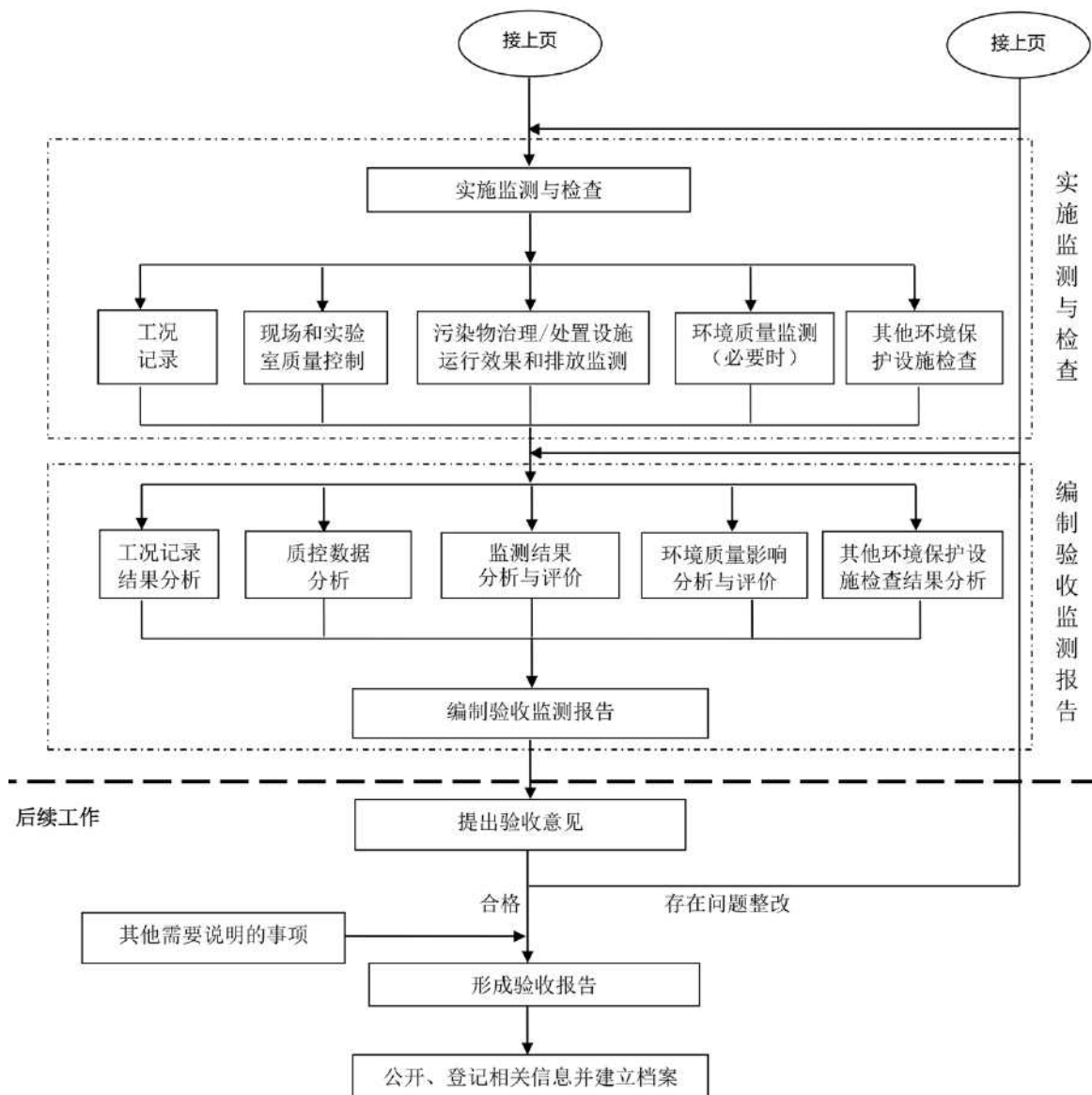


图 6-1 竣工环保验收工作流程

6.5 环保投资一览表

本项目总投资约为 ■■■ 万元，其中环保投资约 ■■■ 万元，占总投资的 ■■■ %。
拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表见表 6-6。

表 6-6 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	投资金额 (万元)

1	辐射防护设施工程	辐射屏蔽设施	[REDACTED]
		安全联锁系统	
		通风系统	
		放射性废水暂存设施	
		放射性固废暂存设施	
2	辐射监测仪器和防护用品	如：固定式区域 γ 监测仪、固定式区域中子监测仪、固定式环境 γ 监测仪、固定式环境中子监测仪、便携式X- γ 辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式表面污染仪、个人剂量计、个人剂量报警仪等监测仪器仪表	[REDACTED]
		工作服、手套等个人防护用品	
3	环境影响评价、辐射安全许可证办理、竣工环保验收手续办理	[REDACTED]	
辐射环境保护措施及环保投资合计（万元）			[REDACTED]

6.6 竣工环保验收一览表

本项目建成后，建设单位应按规定组织自主验收，编制验收监测报告。本项目的竣工环保验收内容及要求列于表 6-7。

表 6-7 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	四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶各关注点处的剂量率水平不高于环评报告书中所列剂量率控制水平。	
5	辐射防护与安全措施	1.辐射工作场所分区（控制区、监督区），并设置明显分区标识，在机房门口和机房内部设置放射性标志和中文警示说明； 2.安全连锁系统：由 PLC、出束控制开关、门连锁、急停按钮、出束指示警铃警示灯等组成，且所有安全设备均能正常投入使用； 3.通风系统：机房采用送风机送风、排风机排风的方式，换气次数达到环评文件中的要求。 4.场所辐射监测系统：设置固定式辐射监测点； 5.机房内设置视频监控系统。	
6	放射性三废处理设施	废气	加速器机房设有独立的通风系统，各区域排风管最终引至楼顶排放。
		废液	机房内设有集水坑，用于暂存装置产生的活化冷却水。
		固体废物	机房内设有固废暂存箱，用于暂存放射性固体废物，暂存箱上贴有电离辐射警告标志。配备专门的管理人员，负责放射性废物的安全管理以及暂存箱钥匙的保管。
7	辐射监测	环境监测	制定环境辐射监测计划，包括自行监测和委托监测，至少每年开展 1 次。周围设若干固定式环境监测点位。
		个人剂量监测	每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过三个月，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。并配备一定数量的个人剂量报警仪。
		监测设备	配备固定式 γ 探测器、固定式中子探测器、便携式 X/ γ 巡测仪、便携式中子巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

本项目拟建装置作为伽玛光子对撞机的验证装置。伽玛光子对撞机是一种新型的高能物理实验装置，具有独特的物理目标和重要科学意义，与其他已有类型的对撞机（如强子对撞机、正负电子对撞机、电子强子对撞机等）互为补充，具有不可替代的作用。项目遵循“六卓越一拔尖”计划 2.0 和中山大学深圳校区的学科布局，打造理工医深度融合新局面，开创理工医深度融合人才培养新范式，对粤港澳大湾区加快建设世界重要人才中心和创新高地以及先行示范区产学研一体化的意义重大。

综上所述，本项目的建设将具有良好的社会性效益和经济性效益。

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面，本项目使用射线装置开展科研工作，建设伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置。

能源方面，项目运行期间需用水、电等能源。

（2）经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等三个方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的瞬发辐射穿过屏蔽体进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性气体进入大气环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，项目运行期间对环境的影响均低于国家标准

中规定的限值。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于国家、造福于广大人民。因此，本项目的实施是利大于弊的。

7.3 正当性分析

本项目拟使用的射线装置设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽可能降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响满足国家相关标准要求。综合考虑了社会、经济和其他有关因素后，本项目对国家和社会所带来的利益大于其可能引起的辐射危害。因此，本项目核技术利用实践活动是正当的。

8 结论与建议

8.1 项目工程概况

建设单位拟对中山大学深圳校区 24 栋理工科组团与 25 栋理工科组团连接处停车库进行改造，作为理学院直线加速器设备建设用地，总改造面积约 951.03 平方米。拟使用一套最高能量 200MeV 的电子直线加速器（I 类射线装置），用于科学研究。

项目运行期间的辐射污染源主要是使用射线装置时产生的“瞬发辐射”和装置停机后依然存在的“感生放射性”，以及运行期间可能产生的放射性三废。

8.2 辐射安全与防护

8.2.1 选址、布局合理性分析

本项目拟建于广东省深圳市光明区公常路 66 号中山大学深圳校区 24 栋理工科组团与 25 栋理工科组团连接处直线加速器区，与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的实验区，并设置物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目布局考虑了实验场所功能需要，便于辐射工作场所的辐射防护和安全管理。从辐射防护与环境保护的角度，项目的选址可行，平面布局合理。

8.2.2 辐射防护

（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）辐射安全连锁系统：设计了安全、冗余的辐射安全连锁系统，包括门禁控制、门机连锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器、工作状态指示灯、视频监控以及电离辐射警告标志和中文警示说明等，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：设有独立的通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计能够确保排入环境的放射性废气对环境的影响满足相关标准的要求。

(5) 工作场所辐射监测系统：工作场所设有固定式辐射监测仪表，对场所内剂量率水平进行实时监测和显示，确保工作人员和公众的安全。

8.2.3 运行期放射性三废的治理和控制

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自装置的运行。

本项目设置了独立的排风系统，其运行期间产生的放射性气体经机房内排风管道引至楼顶排放。

本项目设有集水坑，活化冷却水经地沟排入集水坑内，确保其在得到处置前能够安全暂存。经取样监测后满足排放要求的排入建设单位污水管网。

本项目可能产生的放射性固体废物主要为废靶、废离子树脂及废活性炭，暂存于固废暂存箱内。暂存一段时间后，满足解控标准的，可回收利用的，解控后回收利用；不可回收利用的，解控后废离子树脂及废活性炭按危险废物处理，其余按一般废物处理；不满足解控标准的，委托有资质单位处理。

8.2.4 施工期污染防治措施

施工期的污染源主要有噪声、扬尘、废水和固体废物等，其中噪声和扬尘为最主要的污染物。施工期这些环境影响都是暂时性的，其对环境的影响将随施工的结束而消失。在采取一系列污染防治措施后，施工期间对环境的影响较小。

8.2.5 环境监测设施

项目周围环境设有固定式辐射监测仪表，对周围环境的辐射水平进行实时监测和显示，确保人员及环境的安全。

8.3 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、公众年最大有效剂量均低于本次评价确定的剂量约束值。

8.4 辐射安全管理

建设单位已成立了专门的辐射安全防护领导小组；已基于人员岗位职责、辐射防护、设备检修、三废管理、人员培训、辐射监测等方面内容建立了一系列的辐射安全管理制度并拟根据本项目的建设内容进行补充完善；制定了辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗；目前制定的辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

8.5 建议和承诺

综上所述，建设单位拟建设的“伽玛光子对撞机及综合束流设施（一期）验证装置”在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和环境的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。

8.5.1 建议

建议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。

8.5.2 承诺

建设单位将严格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。