

核技术利用建设项目
西华大学宜宾校区光核反应研究中心
项目环境影响报告表
(公示本)

宜宾市科教产业投资集团有限公司

二〇二二年五月

生态环境部监制

核技术利用建设项目
西华大学宜宾校区光核反应研究中心
项目环境影响报告表

建设单位：宜宾市科教产业投资集团有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）：***

通讯地址：四川省宜宾市临港经开区临港经济技术开发区国兴大道·沙坪路7号

邮政编码：***

联系人：***

电子邮件：***

联系电话：***

目 录

表 1	项目概况	1
表 2	放射源	13
表 3	非密封放射性物质	14
表 4	射线装置	15
表 5	废弃物（重点是放射性废弃物）	16
表 6	评价依据	17
表 7	保护目标与评价标准	19
表 8	环境质量和辐射现状	22
表 9	项目工程分析与源项	25
表 10	辐射安全与防护	36
表 11	环境影响分析	47
表 12	辐射安全管理	105
表 13	结论与建议	117

表 1 项目概况

建设项目名称		西华大学宜宾校区光核反应研究中心项目				
建设单位		宜宾市科教产业投资集团有限公司				
法人代表		***	联系人	***	联系电话	***
注册地址		四川省宜宾市临港经开区临港经济技术开发区国兴大道·沙坪路 7 号				
项目建设地点		宜宾市临港经济技术开发区西华大学西南角				
立项审批部门		宜宾三江新区发展和政策研究局		批准文号	宜三江发改发[2022]1 号	
建设项目总投资（万元）		***	项目保护投资（万元）	***	投资比例（环保投资/总投资）	***
项目性质		☒ 新建 ☐ 改建 ☐ 扩建 ☐ 其它			占地面积（m ² ）	3396
应用类型	放射源	☐ 销售	☐ I类 ☐ II类 ☐ III类 ☐ IV类 ☐ V类			
		☐ 使用	☐ I类（医疗使用） ☐ II类 ☐ III类 ☐ IV类 ☐ V类			
	非密封放射性物质	☐ 生产	☐ 制备 PET 用放射性药物			
		☐ 销售	/			
		☐ 使用	☐ 乙 ☐ 丙			
	射线装置	☐ 生产	☐ II类 ☐ III类			
		☐ 销售	☐ II类 ☐ III类			
		☒ 使用	☒ II类 ☐ III类			
	其它	/				
	项目概述 一、建设单位简介及项目由来 宜宾市科教产业投资集团有限公司（后简称“科教集团”，统一社会信用代码 915111500MA67D7W404）是在宜宾市推进“产业发展双轮驱动”战略、加快打造“科教强市”、奋力把宜宾大学城和科技创新城建成长江国际科教创新城的大背景下，由市委市政府批准同意，于 2017 年 8 月组建成立的市属国有企业，注册资本金 30 亿元。集团公司按照“政府搭台、企业主体、市场运作、封闭运行、自求平衡”原则，发展定位为宜宾科教产业创新发展平台和宜宾“双城”开发建设运营平台，着力为宜宾打造一座辐射川滇黔渝的高教引领、科技创新、人才集聚、产城融合的长江国际					

科教城，把“双城”建设成为宜宾的地标、川南示范和西部名片的战略目标。

西华大学（统一社会信用代码 12510000450717578Y）宜宾校区位于宜宾市临港经济开发区大学城路三段 1 号，占地 450 亩，建筑面积 14.5 万 m²，包含了教学楼、实验楼、研发中心、实习实训厂房、学生宿舍、食堂等。

为了加快高校技术转移及科技成果转化，形成产学研紧密结合的技术创新体系的需要，院校自身由科技成果向现实生产力转化，更好地推动宜宾经济社会发展的需要，实现西华大学与各高校在核技术应用上的产业化合作，推动核技术应用实践在宜宾当地发展的需要，宜宾市科教产业投资集团有限公司拟在西华大学宜宾校区西南角空地建设光核反应研究中心项目。项目总用地面积约 5 亩，总建筑面积约 3396m²。建设内容包括 40MeV 电子直线加速器实验室、10MeV 电子束辐照实验室、9MeV CT 实验室及其配套房间，在三间实验室内各使用 1 台电子直线加速器，均属于Ⅱ类射线装置。本项目由宜宾市科教产业投资集团有限公司负责投资、建设，建设完成后交由西华大学管理运营，由西华大学负责办理辐射安全许可证。目前项目未开工建设。

按照《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国环境影响评价法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素和射线装置安全和防护条例》（国务院令第 449 号）和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（国家环保部令第 18 号）的规定和要求，本项目需进行环境影响评价。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（生态环境部 部令第 16 号）的相关规定，本项目属于“第五十五项—172 条核技术利用建设项目—使用Ⅱ类射线装置”，本项目应编制环境影响报告表，报四川省生态环境厅审查批准。因此，宜宾市科教产业投资集团有限公司委托四川省中栎环保科技有限公司编制该项目的环境影响报告表（委托书见附件 1）。

四川省中栎环保科技有限公司接受本项目环境报告表编制工作的委托后，在进行现场踏勘、实地调查了解项目所在地环境条件和充分研读相关法律法规、规章制度、技术资料后，在项目区域环境质量现状评价的基础上，对项目的环境影响进行了预测，并按相应标准进行评价。同时，对项目环境可能造成的影响、项目单位从事相应辐射活动的的能力、拟采取的辐射安全和防护措施及相关管理制度等进行了评价分析，在此基础上提出合理可行的对策和建议，编制完成本报告表。

本报告编制完成后，本项目在西华大学官网及科教集团官网上进行了公示，公示网址分别为 <http://tech.xhu.edu.cn/ac/e0/c265a175328/page.htm> 及 <http://www.ybkjtt.com/news/459.html>，公示网站截图如下：



公示后，未收到单位和个人有关项目情况的反馈意见。

二、产业政策符合性

本项目属电子加速器辐照应用项目，根据中华人民共和国国家发展和改革委员会制定的《产业结构调整指导目录（2019 年本）》（中华人民共和国国家发展和改革委员会第 29 号令，2020 年 1 月 1 日起施行）、《国家发展改革委关于修改<产业结构调整指导目录（2019 年本）>的决定》（中华人民共和国国家发展和改革委员会第 49 号，2021 年 12 月 30 日实施），电子加速器辐照应用属于鼓励类“六、核能”中第 6 条“同位素、加速器及辐照应用技术开发”项目，是国家鼓励发展的新技术应用项目。

本项目电子直线加速器产生的电离辐射经屏蔽体防护及距离衰减后，其所致的周围职业人员和公众的年剂量符合本次评价所确定的剂量约束值要求。且本项目属于国家鼓励发展的新技术应用项目，符合国家有关法律法规和当前产业政策。

三、实践正当性分析

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于辐射防护“实践的正当性”要求，对于一项实践，只有在考虑了社会经济和其他有关因素之后，其对受照个人或社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时，该实践才是正当的。

40MeV 电子直线加速器实验室的建设，主要用于对加速器产生高能 X 射线的相关研究，该项目基于射频直线加速器的医用放射性同位素转化及应用。**本项目 40MeV 直线加速器实验室仅设计到出束打靶产生 X 射线**，主要考虑 X 射线、中子及感生放射性的防护设计。

9MeV CT 实验室主要基于加速器产生 X 射线并用于射线成像检测相关研究，电子加速器用于射线成像检测主要有以下优点：成像直观、影像可以长期保存，探伤灵敏度很高，对体积状缺陷敏感，缺陷影像的平面分布真实、尺寸测量准确。对被测物的表面光洁度没有严格要求。材料晶粒度对检测结果影响不大，可以适用于各种材料内部缺陷检测。

10MeV 电子束辐照实验室主要用于辐照灭菌等相关研究，电子加速器消毒灭菌技术主要由以下优点：①相较钴源辐照，电子加速器辐照具有辐照束流集中定向、辐照效率高，不产生放射性废物等特点。②电子加速器辐照加工用时短，加工速度快，无任何毒性和残留，不添加任何化学试剂，不影响辐照品原有成分和品质；在辐照时不拆包装箱，能快速、安全通过，无二次污染，更环保。

本项目拟建电子加速器机房设计的混凝土墙体和屏蔽门的防护厚度充分考虑了辐射效应，能够有效降低电离辐射对工作人员和周边公众的辐射影响，经屏蔽后对工作人员和公众的照射剂量满足相关标准限值要求。该项目实施后对周围环境的影响满足国家相关标准限值要求，为学校、社会带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害，有利于发展社会经济，符合辐射防护“实践的正当性”原则。因此，本环评认为该项目的实施是正当可行的。

四、项目概况

（一）项目名称、性质、地点

项目名称：西华大学宜宾校区光核反应研究中心项目

建设性质：新建

建设地点：宜宾市临港经济技术开发区西华大学西南角

（二）建设内容与规模

本次评价内容及规模为：科教集团拟在西华大学宜宾校区西南角建设光核反应研究中心项目，建设内容包括 40MeV 电子直线加速器实验室、10MeV 电子束辐照实验室、9MeV 工业 CT 实验室及其配套用房，并在 3 间实验室内各安装使用 1 台电子加速器，均属于 II 类射线装置。40MeV 电子直线加速器产生的 X 射线主射方向朝向西南部墙体，X 射线能量为 40MeV，额定束流 2mA，年出束时间约 1000h，主要用于对加速器产生高能 X 射线的相关研究；9MeV 工业 CT 实验室加速器产生的 X 射线主射方向朝向西南部墙体，X 射线能量为 9MeV，额定束流 150 μ A，年出束时间约 1000h，主要基于加速器产生 X 射线并用于射线成像检测相关研究；10MeV 电子束辐照实验室加速器产生的电子束出束方向竖直向下，能量 10MeV，额定束流 2mA，年出束时间约 2000h，主要基于 10MeV 电子直线加速器产生高能电子束用于辐照灭菌等相关研究。

40MeV 电子直线加速器实验室与 9MeV 工业 CT 实验室相邻建设，加速器均安装在机房中部，共占地 660m²，均为单层钢筋混凝土结构建筑，高约 8.4m。40MeV 电子直线加速器实验室为下沉实验室，下沉深度为 2.0m，面积（含迷道）约 216m²，实验室尺寸为长 27.0m $\times$ 宽 8.0m $\times$ 高 8.4m，其东南侧有速调管室（148.5m²）及控制室（59.4m²）。实验室四面墙体、迷道顶部、底部均是密度为 2.35g/cm³ 的钢筋混凝土，主射方向朝向西南部墙体。实验室西南部（主射方向）、东南部墙体厚度均

为 3000mm，西北部（与 9MeV 工业 CT 实验室共用）墙体厚度为 2500mm，东北部“Z”型迷道内墙厚度为 2000mm，长 5000mm，迷道外墙厚度为 2000mm，长 5000mm，迷道宽度为 4000mm，顶部墙体厚度为 2000mm，底部混凝土厚度为 1000mm；迷道门为 400mm 钢+300mm 聚乙烯，迷道门外为走廊。

9MeV 工业 CT 实验室净空尺寸为长 27.0m×宽 8.0m×高 6.4m，其东南侧有控制室（20.2m²）。实验室四面墙体、迷道顶部、底部均是密度为 2.35g/cm³ 的钢筋混凝土，主射方向朝向西部墙体。实验室西南部（主射方向）墙体厚度为 3000mm、东南部（与 40MeV 电子直线加速器实验室共用）墙体厚度为 2500mm、西北部墙体厚度为 2000mm，东北部“Z”型迷道内墙厚度为 1800mm，长 6000mm，迷道外墙厚度为 2000mm，长 6000mm，迷道宽度为 4000mm，顶部墙体厚度为 2000mm，底部混凝土厚度为 1000mm；迷道门为 280mm 钢门，迷道门外为走廊。

10MeV 电子束辐照实验室于 9MeV 工业 CT 实验室北侧建设，为 2 层钢筋混凝土结构建筑，高约 10.5m，由门厅将 10MeV 电子束辐照实验室与 9MeV 工业 CT 实验室隔开。1 层为电子束辐照室、变配电室、冷却循环水水泵间、去离子水制备间、设备用房、控制室、会议室及辅助办公室等，2 层为加速器主机室、暖通设备用房和电井等配套设施区域，2 层屋顶无人员活动。

1 层为电子束辐照实验室占地面积为 594m²（长 30.0m、宽 19.4m、高 2.4m）；四面墙体、迷道、顶部和底部均为钢筋混凝土结构（2.35g/cm³）。辐照实验室属于 2 层结构，其中辐照室位于 1 层，主机位于 2 层主机室内。电子加速器辐照室面积为 334.6m²，东南侧墙体为 2800mm 厚混凝土；西南、东北侧墙体均为 2600mm 厚混凝土（辐照区）、1600mm 厚混凝土（内迷道区）、300mm（外迷道区）；西北侧“T”型墙体为 500mm 厚混凝土；内侧“H”型迷道：“—”为 2100mm 厚混凝土，两侧“|”为 1000mm 厚混凝土；室顶为 1000mm 厚混凝土。2 层直线加速器机房面积为 108.5m²，东南侧、东北侧墙体均为 2200mm 厚混凝土；西北侧墙体为墙体为 2900mm 厚混凝土，西南侧迷道内墙为 1700mm 厚混凝土，长 5000mm，迷道外墙为 1400mm 厚混凝土，防护门为 180mm 钢。

项目组成及主要环境问题见表 1-1。

表 1-1 建设项目组成及主要的环境问题表

名称	建设内容及规模	可能产生的环境问题
----	---------	-----------

				施工期	营运期
主体工程	40MeV 电子直线加速器实验室	40MeV 电子直线加速器实验室为下沉实验室，下沉深度为 2.0m，面积(含迷道)约 216m ² ，实验室尺寸为长 27.0m×宽 8.0m×高 8.4m，其东南侧有速调管室（148.5m ² ）及控制室（59.4m ² ）。实验室四面墙体、迷道顶部、底部均是密度为 2.35g/cm ³ 的钢筋混凝土，主射方向朝向西南部墙体。实验室西南部（主射方向）、东南部墙体厚度均为 3000mm，西北部（与 9MeV 工业 CT 实验室共用）墙体厚度为 2500mm，东北部“Z”型迷道内墙厚度为 2000mm，长 5000mm，迷道外墙厚度为 2000mm，长 5000mm，迷道宽度为 4000mm，顶部墙体厚度为 2000mm，底部混凝土厚度为 1000mm；迷道门为 400mm 钢+300mm 聚乙烯。		施工废水 扬尘 施工机械 噪声 建筑垃圾 等	X 射线 感生放射性 中子 臭氧 氮氧化物
	辅助房间	控制室、速调管室、暖通设备用房（与 9MeV 工业 CT 实验室共用）			
	9MeV 工业 CT 实验室	9MeV 工业 CT 实验室净空尺寸为长 27.0m×宽 8.0m×高 6.4m，其东南侧有控制室（20.2m ² ）。实验室四面墙体、迷道顶部、底部均是密度为 2.35g/cm ³ 的钢筋混凝土，主射方向朝向西部墙体。实验室西南部（主射方向）墙体厚度为 3000mm、东南部（与 40MeV 电子直线加速器实验室共用）墙体厚度为 2500mm、西北部墙体厚度为 2000mm，东北部“Z”型迷道内墙厚度为 1800mm，长 6000mm，迷道外墙厚度为 2000mm，长 6000mm，迷道宽度为 4000mm，顶部墙体厚度为 2000mm，底部混凝土厚度为 1000mm；迷道门为 280mm 钢门。		施工废水 扬尘 施工机械 噪声 建筑垃圾 等	X 射线 臭氧 氮氧化物
	辅助房间	控制室、速调管室、暖通设备用房（与 40MeV 电子直线加速器实验室共用）			
	10MeV 电子束辐照实验室	1F	辐照室	施工废水 扬尘 施工机械 噪声 建筑垃圾 等	电子线 X 射线 臭氧 氮氧化物
			辅助房间		
		2F	主机室		
			电子加速器辐照室面积为 334.6m ² ，东南侧墙体为 2800mm 厚混凝土；西南、东北侧墙体均为 2600mm 厚混凝土（辐照区）、1600mm 厚混凝土（内迷道区）、300mm（外迷道区）；西北侧“T”型墙体为 500mm 厚混凝土；内侧“H”型迷道：“—”为 2100mm 厚混凝土，两侧“ ”为 1000mm 厚混凝土；室顶为 1000mm 厚混凝土。		
			辐照室西南侧由北向南依次为控制室、设备用房、去离子水制备间；辐照室东南侧为冷却循环水水泵间、变配电室；辐照室西北侧为物流运输区域，采用全自动电子传输带。		
			2 层直线加速器机房面积为 108.5m ² ，东南侧、东北侧墙体均为 2200mm 厚混凝土；西北侧墙体为墙体为 2900mm 厚混凝土，西南侧迷道内墙为 1700mm 厚混凝土，长 5000mm，迷道外墙为 1400mm 厚混凝土，防护门为 180mm 钢。		

		辅助区域	直线加速器机房四周设有多间设备用房。		
	使用设备及出束时间	使用 1 台电子直线加速器，额定电子线能量为 10MeV，额定电子束流为 2mA，属于 II 类射线装置，年出束时间约 2000h。			
辅助工程	排风系统	专用排风系统排至楼顶后排放 每台加速器配备1套排风系统		施工废水 扬尘	生活垃圾、生活污水
	水冷却系统	3 间实验室各采用一台风冷冷水机组（集成了水箱及冷冻泵，放置于屋面上）进行冷却，冷却循环水泵分两组，每组一用一备，均设置于循环水泵房内，冷却水循环使用，不外排。		施工机械 噪声 建筑垃圾等	
公用工程	供电	拟设一个 10/0.4kV 变电所为本项目提供低压电源		/	/
	供水	依托西华大学供水基础设施直接引入		/	/
环保工程	废水	工作人员办公和日常生活污水就近排入校区已建生活污水管网。检修放出的冷却循环水废水采用容器暂存，监测达标后排放。		/	生活垃圾、生活污水、放射性固体废物、冷却循环水废水等
	固体废物	依托校区建设的垃圾收集设施收集，统一交由学校环卫部门处理，不合格的辐照品根据物品的种类不同，按要求进行处理。维修维护环节产生的放射性废物暂存于放射性废物暂存间。			
	废气	项目加速器运行产生的 O ₃ 、NO _x 等废气经机房排风系统引至屋顶排放。		/	/

（三）本项目主要原辅材料及能耗情况

本项目主要原辅材料及能耗情况见表 1-2。

表 1-2 主要原辅材料及能耗情况表

	名称	名称	年耗量（单位）	来源	主要化学成分
能源	煤（T）	——	——	——	——
	电（kW）	——	3×10 ⁶ kW·h/a	市政电网	——
	气（nm ³ ）	——	——	——	——
水量	地表水	——	——	——	——
	地下水	——	——	——	——

（四）本项目涉及射线装置

本项目涉及射线装置相关参数见表 1-3。

表 1-3 本项目使用射线装置的相关情况

名称	型号	生产厂家	参数	射线类型	投射类型	数量	管理类别	场所	备注
40MeV 电子加速器	待定	待定	额定 X 射线能量 40MeV 额定电子束电流	X 射线	定向向实验室西南部墙体	1	II	40MeV 电子直线加速器实验室	拟购

			2mA						
9MeV 电子加速器	待定	待定	额定 X 射线能量 9MeV 额定电子束电流 150μA	X 射线	定向向实验室西南部墙体	1	II	9MeV 工业 CT 实验室	拟购
10MeV 电子加速器	待定	待定	额定电子束能量 10MeV 额定电子束电流 2mA	电子线	定向向下	1	II	10MeV 电子束辐照实验室	拟购

（五）本项目选址合理性分析

本项目选址于西华大学宜宾校区内西南角空地，用地已经取得了宜宾市国土资源局颁发的《不动产权证书》（川（2018）宜宾市不动产权第 2009767 号），用地性质为科教用地；宜宾市自然资源和规划局三江新区分局为本项目出具审查意见（宜三江资源规划函[2022]281 号），同意本项目选址及设计，见附件 4；此外，西华大学宜宾校区已就《宜宾临港开发大学城职业教育基地-西华大学宜宾研究院项目（一期）》进行了环境影响评价，取得了原宜宾临港经济技术开发区规划建设环保局的批复文件（宜临港建环发[2017]147 号）（附件 6）。

本项目用地均在西华大学宜宾校区建设红线范围内，不新增用地，且选址尽可能远离了学校办公楼、宿舍楼、食堂等相对敏感的区域。在评价范围内，除本项目外，仅一栋实训厂房，人流量相对较小，拟建的辐射工作场有良好的实体屏蔽设施和防护措施，产生的辐射经屏蔽和防护后对辐射工作人员和公众的照射剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的剂量限值要求，并满足报告表确定的剂量约束值的要求。本项目地理位置图见附图 1。

因此，从辐射防护安全和环境保护角度分析，本项目选址是合理的。

（六）本项目外环境及平面布局合理性分析

本项目位于西华大学宜宾校区内西南角空地，在项目 3 个电子加速器机房周围 50m 范围内，西南侧约 10m 为空地，10-50m 为长翠路；东南侧约 25m 为空地，25-50m 为大学路；东北侧约 15m 为通道，15-50m 为学校实训厂房 B；西北侧 50m 范围内为拟建车行道及出入口。本项目规划总平面及外环境关系见附图 2。

本项目用地区域均在学校用地红线范围内，外环境相对简单，不存在明显环境制约因素。因此，本项目平面布局合理。

（七）劳动定员及工作制度

劳动定员：拟配备 20 名辐射工作人员，4 名其他人员（搬运工人），具体人员配置见表 1-4。

工作制度：40MeV 电子直线加速器实验室年工作 1000h，连续 24h 工作制，年工作约 41.67 天，拟在学校暑假期间进行实验；拟配备 12 名辐射工作人员，实行三班倒工作制，每班 8h，每班 2 人，轮班工作。

9MeV 工业 CT 实验室年工作 1000h，每天开机约 4h，年工作 250 天；拟配备 4 名辐射工作人员，实行白班单班制，每天 8h，2 人一组，轮值工作。

10MeV 电子束辐照实验室年工作 2000h，每天开机约 8h，年工作 250 天；拟配置工作人员 8 名，其中辐射工作人员 4 名，包括主控室操作组长 2 名和操作人员 2 名；搬运工人 4 名，按公众人员管理；主控室操作组长负责加速器主控室操作及主控室、设备间、辐照室四周等场所巡视工作，其余人员分为 2 组，负责加速器的相关工作；未辐照区物品搬运工人 2 人、已辐照区物品搬运工人 2 人。

表 1-4 项目劳动定员一览表

实验室	岗位名称	劳动定员	备注	
40MeV 电子直线加速器实验室	技术人员	12	2 人一组，三班倒工作制，轮班	辐射工作人员
9MeV 工业 CT 实验室	技术人员	4	2 人一组，1 组长 1 操作，白班单班制，轮值	
10MeV 电子束辐照实验室	操作人员	4	2 人一组，白班单班制，轮岗	
	未辐照区工人	2	装卸工人 2 人	非辐射工作人员
	已辐照区工人	2	装卸工人 2 人	
合计		24	/	/

环评要求：①职业人员应通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台(以下简称培训平台，网址: <http://fushe.mee.gov.cn>) 免费学习相关知识。自 2020 年1 月1 日起，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当通过生态环境部培训平台报名并参加考核；②在职业人员上岗前，学校应组织其进行岗前职业健康检查，并建立个人健康档案。

五、本项目依托公辅设施的合理性与可行性分析

根据西华大学宜宾校区平面布局规划，校区内建有综合楼、化粪池等配套工程，本次光核反应研究中心项目生产用水、用电依托校区供水、供电；实验室工作人员的生活依托校区生活设施。本项目依托的办公生活设施及环保设施具体情况如下：

项目用水、用电均由校区供水、供电系统提供，本项目拟建设一个 10/0.4kV 变电所为本项目提供低压电源。校区用水均市政供水管网，生产、生活用电均由市政

电网供给。

本项目工作人员生活污水依托校区污水处理设施处理，校区生活污水经预处理池处理后达《污水综合排放标准》(GB8978-1996)三级标准后经市政管网排入白沙城镇污水处理厂处理达标后排放。

根据西华大学宜宾校区项目建设规划，校区供水、供电系统，污水管网、污水处理设施等生活设施及环保设施已投用；因此，本项目办公生活设施及环保设施依托校区建设设施是可行的。

综上所述，本项目依托整体项目合理可行。

六、与本项目有关的原有污染情况

（一）原有项目辐射安全许可情况

（1）目前，西华大学已取得四川省生态环境厅核发的《辐射安全许可证》（川环辐证[00758]），许可的种类和范围：使用II类射线装置。发证日期：2020年06月23日，有效期至2025年06月22日。

（2）西华大学现有核技术利用项目的许可情况见表1-5。该校现有核技术利用项目环保措施和设施均运行正常。

表 1-5 西华大学已获许可使用射线装置

序号	设备名称	规格型号	类别	数量	使用场所	备注
1	450kV 小焦点射线源系统	451HP/11	II	1	西华大学先进数字辐射成像系统与器件实验室	已上证、在用

共计1台II类射线装置，与在用设备一致。

（二）是否发生过辐射安全事故

据了解，学校自取得辐射安全许可证以来，未发生过辐射安全事故，具体情况见附件11。

（三）辐射工作人员培训情况

西华大学严格按照国家相关规定执行辐射工作人员持证上岗制度。学校目前有2名辐射工作人员，均参加了辐射安全与防护培训班的学习并取得了《辐射安全培训合格证》，证书编号详见下表。

表 1-6 现有辐射工作人员的培训及证书情况

姓名	性别	培训时间	培训类别	证书编号	培训计划
----	----	------	------	------	------

周霖	男	2019 年 7 月	辐射安全与防护	CHO42024	到期复训
冯真	男	2019 年 7 月	辐射安全与防护	CHO42025	到期复训

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的相关规定，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当通过国家核技术利用辐射安全与防护学习平台（网址：<http://fushe.mee.gov.cn>）报名并参加考核。辐射安全与防护培训成绩合格单有效期为五年。

（四）辐射管理规章制度执行情况

根据相关文件的规定，结合学校实际情况，制定有相对完善的管理制度，包括《辐射工作场所安全管理要求》、《辐射工作人员岗位职责》、《辐射安全和防护设施维护维修制度》、《射线装置台账管理制度》、《辐射工作人员培训计划》、《辐射工作设备操作规程》、《辐射工作人员个人剂量管理制度》、《辐射事故应急预案》、《辐射工作场所和环境辐射水平监测方案》等。学校辐射安全管理机构健全，有领导分管，人员落实，责任明确，在落实各项辐射安全规章制度后，可满足原有射线装置防护实际需要。对学校现有场所而言，学校也已具备辐射安全管理的综合能力。学校应本次项目内容补充完善，并且应根据国家发布新的相关法规内容，结合学校实际及时对各项规章制度补充修改。

（五）小结

综上所述，西华大学不存在原有辐射环境问题。

表 2 放射源

序号	核素名称	总活度(Bq)/ 活度(Bq)×枚数	类别	活动种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/

注：放射源包括放射性中子源，对其要说明是何种核素以及产生的中子流强度（n/s）。

表 3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

注：日等效最大操作量和操作方式见《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）。

表 4 射线装置

（一）加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量 (MeV)	额定电流 (mA) / 剂量 率 (Gy/h)	用途	工作场所	备注
1	电子直线 加速器 1	II	1	待定	电子	40	X 射线额定束流 2mA	科学研究	40MeV 电子直线加 速器实验室	拟购
2	电子直线 加速器 2	II	1	待定	电子	9	X 射线额定束流 150μA	探伤成像	9MeV 工业 CT 实验 室	拟购
3	电子直线 加速器 3	II	1	待定	电子	10	电子线额定电流 2mA	杀 菌 消 毒	10MeV 电子束辐照 实验室	拟购

（二）X 射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途	工作场所	备注
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

（三）中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大靶电流 (mA)	中子强度 (n/s)	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度 (Bq)	贮存方式	数量	
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
臭氧	气态	O ₃	/	少量	少量	少量	不暂存	环境大气
感生放射性废气（本项目感生放射性废气中的主要核素为 ¹¹ C、 ¹³ N、 ¹⁵ O 和 ⁴¹ Ar）	气态	¹¹ C、 ¹³ N、 ¹⁵ O 和 ⁴¹ Ar	/	少量	少量	少量	不暂存	环境大气
放射性废水（检修时排放的冷却水）	液态	³ H、 ⁷ Be、 ¹¹ C、 ¹³ N、 ¹⁵ O	/	少量	少量	少量	采用容器暂存	监测达标并经生态环境主管部门同意后方可排入市政管网
放射性固体废物	固态	/	/	少量	少量	少量	暂存于放射性废物暂存间	交由有资质的单位处理
—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/L，固体为 mg/kg，气态为 mg/m³，年排放总量为 kg。

2. 含有放射性的废物要注明其排放浓度、年排放总量分别用比活度（Bq/L 或 Bq/kg 或 Bq/m³）和活度（Bq）

表 6 评价依据

法 规 文 件	(1) 《中华人民共和国环境保护法》，主席令[2014]第九号（2014 年 4 月 24 日修订，2015 年 1 月 1 日起实施）； (2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，主席令[2016]第四十八号（2016 年 7 月 2 日修订，2018 年 12 月 29 日修正）； (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，主席令[2003]第六号（2003 年 6 月 28 日通过，2003 年 10 月 1 日起实施）； (4) 《建设项目环境保护管理条例》，国务院 682 号令（2017 年 7 月 16 日修订，2017 年 10 月 1 日实施）； (5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院第 449 号令（根据 2019 年 3 月 2 日《国务院关于修改部分行政法规的决定》第二次修订）； (6) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（生态环境部 部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日起施行）； (7) 《关于发布<射线装置分类>的公告》（原环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日起实施）； (8) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（原国家环境保护总局第 31 号令，2021 年 1 月 4 日修订）； (9) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（原环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起实施）； (10) 《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》（环发[2006]145 号，原国家环境保护总局、公安部、卫生部文件，2006 年 9 月 26 日）； (11) 《关于进一步加强环境影响评价管理防范环境风险的通知》（环发[2012]77 号，原环境保护部文件，2012 年 7 月 3 日）； (12) 《四川省辐射污染防治条例》（四川省十二届人大常委会第二十四次会议第二次全体会议审议通过，2016 年 6 月 1 日实施）； (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，自 2019 年 11 月 1 日施行）；
------------------	--

	(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 公告 2019 年第 57 号)。
技术标准	(1)《辐射环境保护管理导则·核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016)； (2)《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)； (3)《环境γ辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)； (4)《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)； (5)《电子辐射工程技术规范》(GB50752-2012)； (6)《粒子加速器工程设施辐射防护设计规范》(EJ346-1988)； (7)《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》(HJ 979- 2018)； (8)《无损检测用电子直线加速器》(GB/T20129-2015)； (9)《电子直线加速器工业 CT 辐射安全技术规范》(HJ785-2016)； (10)《粒子加速器辐射防护规定标准》(GB5172-1985)； (11)《γ射线和电子束辐照装置防护检测规范》(GBZ141-2002)； (12)《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2019)。
其他	(1)环评委托书； (2)《辐射防护手册》(第一分册 辐射源与屏蔽，原子能出版社，1987)； (3)《环境保护部辐射安全与防护监督检查技术程序》； (4)原四川省环境保护厅关于印发《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲(2016)的通知》(川环函〔2016〕1400 号)。

表 7 保护目标与评价标准

评价范围 本项目涉及工业电子加速器，按照《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）要求中“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物边界外 50m 的范围”的要求，并结合本项目实际，确定项目辐射评价范围：电子加速器机房实体建筑边界外 50m 的范围（如附图 2 所示）。							
保护目标 本项目评价范围内的主要环境保护目标有：辐射工作人员及辐射工作场所 50m 以内的公众。由于电离辐射水平随着距离的增加而衰减，因此选取离辐射工作场所较近、有代表性的环境保护目标进行分析。根据总平面布置情况及项目周围外环境关系，依次确定本项目涉及的环境保护目标具体见表 7-1。							
表 7-1 本项目环境保护目标							
序号	位置	保护目标	相对辐射源方位	距辐射源最近距离(m)	人流量(人次/天)	照射类型	年剂量约束值(mSv)
1	40MeV 电子加速器实验室	40MeV 电子加速器控制室内工作人员	东侧	17	2	职业照射	5.0
2		速调管室内的工作人员	东南侧	8	2		
3		9MeV 工业 CT 实验室内的工作人员	西北侧	7	2	公众照射	0.1
4		9MeV 工业 CT 控制室内的工作人员	北侧	15.5	2		
5		走廊的工作人员	西北侧	17	10		
6		门厅的其他人员	西北侧	26	流动		
7		暖通设备用房的其他人员	西北侧	35	3		
8		其离子水制备间、冷却循环水泵间、变配电室的其他人员	北侧	35	3		
9		实训厂房 B 内的人员	东北侧	32	流动		
10		主射束墙外的其他人员	西南侧	7	流动		
1	9MeV 工业	9MeV 工业 CT 控制室内的工作人员	东北侧	14	2	职业照射	5.0
2	CT 实验室	40MeV 电子加速器实验室内工作人员	东南侧	8	2	公众照射	0.1

3		40MeV 电子加速器控制室内工作人员	东侧	24	2	公众照射	0.1			
4		速调管室内的工作人员	东南侧	19	4					
5		走廊的工作人员	东北侧	19	10					
6		门厅的其他人员	西北侧	18	流动					
7		暖通设备用房的其他人员	西北侧	23	3					
8		去离子水制备间、冷却循环水泵间、变配电室的其他人员	北侧	29	3					
9		实训厂房 B 内的人员	东北侧	34	流动					
10		10MeV 电子束辐照实验室的工作人员	北侧	42	7					
11		10MeV 电子束辐照实验室一层设备用房、控制室的工作人员	北侧	34	2					
12		主射束墙外的其他人员	西南侧	5	流动					
1		10MeV 电子束辐照实验室	10MeV 电子束辐照实验室的工作人员	西北侧	16			7	职业照射	5.0
2			10MeV 电子束辐照实验室一层设备用房、控制室的工作人员	西南侧	10			2		
3	去离子水制备间、冷却循环水泵间、变配电室的其他人员		东南侧	5	3	公众照射	0.1			
4	门厅流动人员		南侧	23	流动					
5	10MeV 电子束辐照实验室室外流动人员		西北侧	26	流动					
6	实训厂房 B 内的人员		东北侧	26	流动					
7	10MeV 电子束辐照实验室设备间、暖通用房（速调管室专用）		西南侧	20	2					
8	9MeV 工业 CT 实验室、控制室内的工作人员		南侧	37	2					
9	走廊的工作人员		南侧	35	流动					
10	40MeV 电子加速器实验室、控制室内的工作人员		南侧	48	2					
11	10MeV 电子束辐照实验室二层暖通用房、设备用房等工作人员		正上方	3	2					
12	10MeV 电子束辐照实验室二层会议室、设备间、辅助办公室		西南侧	19	流动					

评价标准

一、环境质量标准

(1) 大气：《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准。

(2) 地表水：《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III 类标准。

(3) 声环境：《声环境质量标准》（GB3096-2008）1 类标准。

二、污染物排放标准

(1) 废气：《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）二级标准。

(2) 生活污水：污水执行《污水综合排放标准》（GB8978-1996）三级标准。

(3) 噪声：施工期执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）中相关标准；运营期执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）1 类标准。

(4) 固体废物：《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》（GB 18599-2020）。

(5) 电离辐射

①职业照射：根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 4.3.3.1 条的规定，对任何工作人员，由来自各项获准实践的综合照射所致的个人总有效剂量不超过由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量限值（但不可作任何追溯平均）20mSv/a；根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）4.2.1 中规定辐射工作人员个人年有效剂量约束值为 5mSv/a。

②公众照射：第 B1.2.1 条的规定，实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过年有效剂量 1mSv/a；根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）4.2.1 中规定公众成员个人年有效剂量约束值为 0.1mSv/a。

③辐射工作场所边界周围剂量率控制水平：根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）中规定“电子加速器辐照装置外人员可达区域屏蔽体外表面 30cm 处及以外区域周围剂量当量率不能超过 2.5μSv/h”。

(6) 工作场所臭氧的控制水平

根据《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-85）附录要求：E.2.1 加速器设施内应有良好的通风，以保证臭氧的浓度低于 0.3mg/m³，以及《室内空气质量标准》（GB/T18883-2002）表 1 中臭氧小时平均标准值浓度符合 0.16mg/m³ 的要求。根据《环境空气质量标准》（GB3095-2012），室外臭氧小时平均浓度符合二级标准（0.20mg/m³）的要求。

表 8 环境质量和辐射现状

环境质量和辐射现状

一、项目地理和场所位置

本项目位于西华大学宜宾校区内西南角空地，在项目 3 个电子加速器机房周围 50m 范围内，西南侧约 10m 为空地，10-50m 为长翠路；东南侧约 25m 为空地，25-50m 为大学路；东北侧约 15m 为通道，15-50m 为学校实训厂房 B；西北侧 50m 范围内为拟建新开车行道及出入口。

本项目现场图见图 8-1。



拟建空地处



实训厂房B

图8-1 项目拟建区域现状图

二、辐射环境现状监测及评价

本项目为使用电子加速器项目，主要的污染因子为电离辐射，对环境空气、地表水及地下水影响较小，因此本次评价没有对区域环境空气质量、地表水和地下水环境质量进行监测评价，重点对评价区域开展了辐射环境现状监测评价。为掌握项目所在地的辐射环境现状，2021 年 12 月 16 日四川省永坤环境监测有限公司、2022 年 2 月 10 日四川致胜创科环境监测有限公司对项目拟建场所进行了

现场监测，监测报告见附件 9、10。

表 8-1 监测项目、方法及方法来源

项目	监测方法	仪器使用	仪器参数
X-γ辐射剂量率	《环境γ辐射剂量率测定规范》 HJ 1157-2021	AT1123 型 X-γ剂量率仪	检定/校准有效期： 2021.03.22~2022.03.21
	《辐射环境监测技术规范》 HJ 61-2021	编号：YKJC/YQ-36 校准因子：0.99	
中子剂量当量率	《辐射防护仪器中子周围剂量当量（率）仪》 GB/T14318-2019	中子周围剂量当量（率）仪 型号：XH-3028 编号：H05 校准因子：0.95	①检定/校准有效期： 2022.12.30 ②检定证书编号：检字第 [2021]-N1578

辐射监测仪器已经由计量部门年检，且在有效期内，测量方法按国家相关标准实施，可以作为电离辐射环境现状的科学依据。

三、质量保证

公司均通过了计量认证，具备完整、有效的质量控制体系。本次监测所用的仪器性能参数均符合国家标准方法的要求，均有有效的国家计量部门的检定合格证书，并有良好的日常质量控制程序。监测人员均经具有相应资质的单位培训，考核合格持证上岗。数据分析及处理采用国家标准中相关的数据处理方法，按国家标准和监测技术规范有关要求进行处理和填报，并按有关规定和要求进行三级审核。

质量管理体系：

（一）计量认证

从事监测的单位，四川省永坤环境监测有限公司于 2018 年 1 月通过了原四川省质量技术监督局的计量认证，证书编号为：182312050067，有效期至 2024 年 1 月 28 日。四川致胜创科环境监测有限公司于 2021 年 2 月通过了四川省市场监督管理局的计量认证，证书编号为：212312050163，有效期至 2027 年 8 月 15 日。

（二）仪器设备管理

①管理与标准化；②计量器具的标准化；③计量器具、仪器设备的检定。

（三）记录与报告

①数据记录制度；②报告质量控制。监测人员均经具有相应资质的部门培训，

考核合格持证上岗。

四、监测结果

表 8-2 拟建辐射工作场所环境 γ 辐射剂量率监测结果 单位: nSv/h

点位	监 测 位 置	平均值	标准差	备注
1	项目拟位置北侧道路	93	1.6	室外
2	项目拟建位置	107	1.6	
3	项目拟建位置南侧实训厂房 B	116	1.6	
4	项目拟建位置门卫室	120	1.6	

由监测报告得知,项目所在区域的环境 γ 辐射剂量率为 93~120nSv/h。根据《环境 γ 辐射剂量率测定规范》(HJ 1157-2021),校准参考辐射源的空气比释动能与周围剂量当量的转换系数,在 ^{137}Cs γ 参考辐射场中,其取值为 1.20。因此本项目 γ 辐射空气吸收剂量率背景值为 77.5~100nGy/h,与中华人民共和国生态环境部《2020 年全国辐射环境质量报告》(2021 年 6 月)中四川省自动站空气吸收剂量率监测结果(67.5~121.3nGy/h)基本一致,属于当地正常天然本底辐射水平。

表 8-3 拟建辐射工作场所中子剂量当量率监测结果 单位: $\mu\text{Sv/h}$

点位	监 测 位 置	监测结果	标准差	备注
1	项目拟位置北侧道路	$\leq\text{LLD}$	/	/
2	项目拟建位置	$\leq\text{LLD}$	/	
3	项目拟建位置南侧实训厂房 B	$\leq\text{LLD}$	/	
4	项目拟建位置门卫室	$\leq\text{LLD}$	/	

注: 1、以上数据均未扣除环境背景值; 2、LLD=0.01 $\mu\text{Sv/h}$;

从上表可知,拟建加速器机房处及周围各监测点中子剂量当量率均低于仪器检出限(<0.01 $\mu\text{Sv/h}$)。

表 9 项目工程分析与源项

工程设备和工艺分析

一、施工期

(一) 土建施工期

本项目为新建电子加速器项目，需新建电子加速器机房及配套用房。在项目施工期过程中，对环境影响的主要因素为施工噪声、固体废物、废水及扬尘。项目施工工艺流程及产污环节见图 9-1。

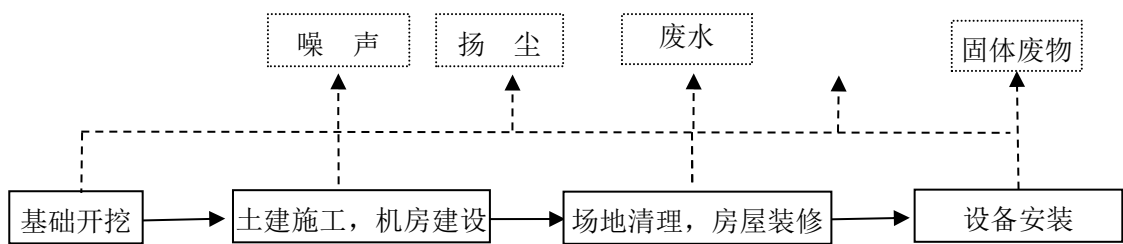


图 9-1 施工期工艺流程及污染物产生环节图

在机房装修时，应注意施工方式，并保证各屏蔽体有效衔接，防护门与墙的重叠宽度至少为空隙的 10 倍，避免各屏蔽体之间有漏缝产生。

1、扬尘

由于本项目为地面开挖，墙体为混凝土浇灌，会产生一定的扬尘。

2、噪声

施工期噪声包括各类机械、运输车辆的噪声以及土建施工产生的噪声，由于施工范围较小，施工噪声对周围环境的影响较小。

3、废水

施工期产生的废水主要包括施工废水和施工人员的生活污水，施工废水循环使用，生活污水产量较小。

4、固体废物

施工期固体废物主要为多余土方、施工垃圾、建筑垃圾、安装固废和生活垃圾。

(二) 设备安装调试期

在安装电子加速器设备时，会有少量的废包装材料产生，在调试阶段会产生X射线、电子束、中子、感生放射性和少量臭氧等。

项目产生的包装废物可回收部分回收利用，不能回收部分作为建筑垃圾进行处理。电子加速器的运输、安装和调试均由设备厂家安排的专业人员进行，在设备调试期间，建设单位和学校应配合设备厂家专业人员加强安装调试现场的辐射安全管理，保证在此期间内放射工作场所设置的各类辐射安全防护措施正常运行。设备安装好后，应先启动安全联锁装置，并经确认系统正常后才可启动射线装置。在射线装置进行调试期间，应关闭机房防护门，在门外设置醒目的电离辐射警告标志，禁止无关人员靠近；加速器开关钥匙应安排专人看管；安装人员离开机房期间，机房必须关闭上锁，钥匙交由专人看管或安排专人看守。

二、运营期

（一）工作原理及设备组成

电子直线加速器设备组成：一般由加速管、微波系统、调制器、束流传输系统、真空系统、恒温水冷却系统、电源及控制系统、束流应用系统等组成。

电子直线加速器工作原理：电子直线加速器是采用微波电场将电子加速到高能装置。脉冲变压器产生的脉冲频率，传入电子枪，电子枪发射脉冲频率一致的脉冲电子。加速管流经速调管产生的微波功率在腔体内形成行波场，当脉冲电子进入加速管后，通过行波场进行加速使其成为高能电子束。

电子加速器工作原理流程见下图 9-2。

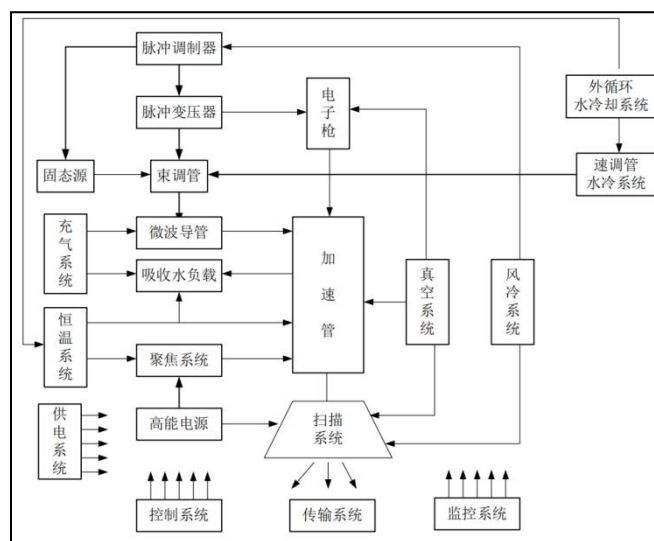


图 9-2 电子加速器工作原理图

1、40MeV 电子直线加速器工作原理

本项目 40MeV 直线加速器利用加速管产生的高能电子束进行束流打靶，高速电子与靶物质发生轫致辐射，产生低于入射电子能量的特征 X 射线，其发射率随靶材料的原子序数和电子束能量的增加而增加，其中随电子能量的增加而增加得更为急剧，必须用足够厚的屏蔽材料才能将其减弱到较低的水平，它们是加速器防护的主要对象，当电子束能量高于 10MeV 时，需考虑中子的产生和防护。

根据设计单位提供的资料，本项目 40MeV 直线加速器设置自屏蔽体，自屏蔽体厚度满足泄漏率达到 1/10000 水平。

40MeV 加速器靶材料为金属钨，厚度为 1cm。钨靶后为二氧化钼片，二氧化钼片数量为 10 个，每个钼片厚度为 1mm，初始粒子为电子，最高能量为 40MeV，电子束流按 2mA 考虑，占空比 1%，年工作时间为 2000h。钨靶及钼片具体布置情况见下图。

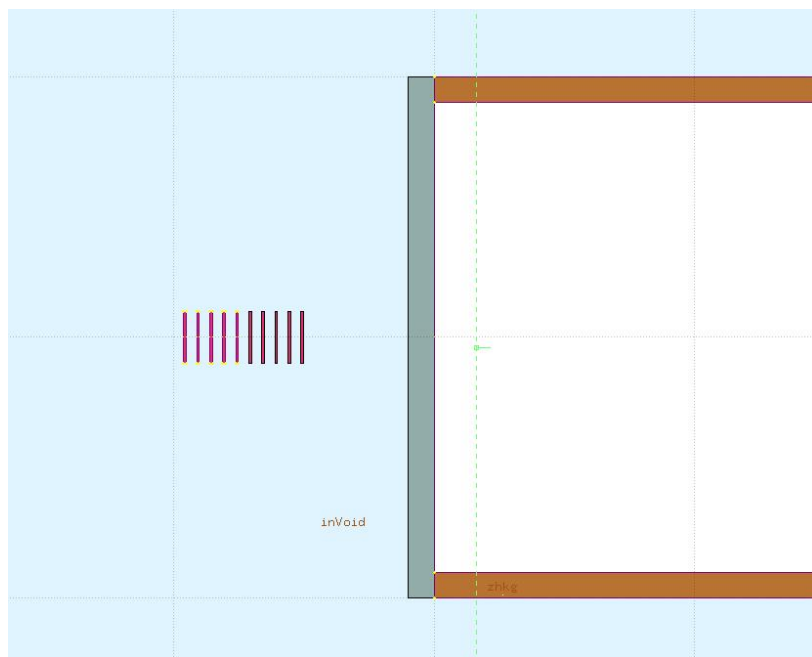


图 9-3 靶片及钼片示意图

屏蔽措施由靶点移动屏蔽体与实验室墙体（含顶板）组成。其中，靶点移动屏蔽体由铅材料及聚乙烯材料构成。移动屏蔽体构成示意图见图 2。



图 9-4 移动屏蔽体示意图

其中，正对束流方向铅板厚度为 15cm，聚乙烯板厚度为 5cm；靶片上方铅板厚度为 10cm，聚乙烯板厚度为 5cm。远离靶点方向的铅板厚度为 3cm，聚乙烯板厚度为 2cm。以上屏蔽厚度为初步设计，施工图阶段可能会根据实际情况进行调整。

2、9MeV 工业 CT 实验室电子直线加速器工作原理

脉冲电子经行波场加速成为高能电子束，若高速电子与靶物质发生碰撞，就会发生轫致辐射，产生低于入射电子能量的特征 X 射线。该 X 射线可用于工业无损探伤。X 射线沿着多个视角方向穿过被检测物的特定区域后，由辐射探测器记录射线透射率的变化，再通过特定算法重建出该区域物理特征分布图像，可用于评定材料或制品的质量，从而防止由于材料或制品内部缺陷引起的事故。

3、10MeV 电子束辐照实验室直线加速器工作原理

高能电子束可直接经过扫描系统变成电子束带，当辐照产品经由传输系统传送到扫描窗下，高能电子将穿透产品杀灭货物所携带的细菌，达到灭菌的目的。聚焦系统提供适当强度的磁场约束电子防止电子散射；恒温系统是保持整个系统在其工作在适宜的温度中；真空系统保证电子枪、加速管、扫描系统为真空状态。

（二）工艺流程及产污环节

（1）40MeV 电子直线加速器工艺流程及产污

加速器运行产生的辐射，可分为瞬时辐射和剩余辐射两类。

瞬时辐射包括初级辐射（指被加速的带电粒子，本项目为电子）和及其与靶

材料或加速器结构材料等相互作用产生的 X 射线和中子等次级辐射。瞬时辐射在加速器运行时产生，关机后立即消失，其特点是能量高、辐射强，是辐射屏蔽设计的主要考虑因素。

剩余辐射是加速器的初级粒子和次级辐射（主要是中子）在加速器结构材料和环境介质（屏蔽物、空气、设备冷却水等）中诱发生成的感生放射性，它们在加速器停止运行后继续存在。对加速器的屏蔽设计来说，剩余辐射不是考虑的重点对象，但对加速器停机之后的检修维修、调试、换靶等工作来说却是防护的重点。

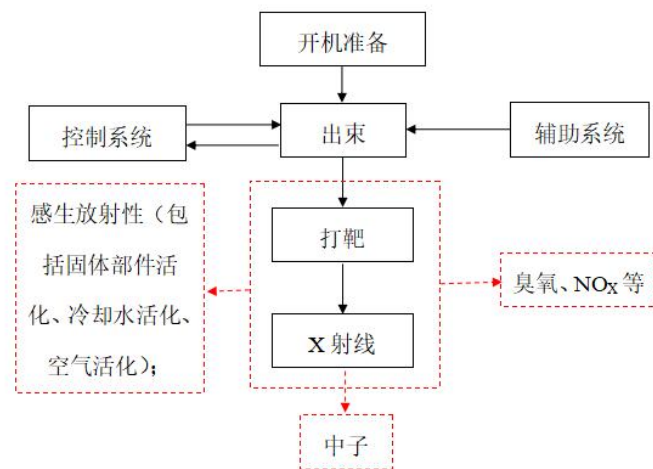


图 9-5 本项目 40MeV 电子直线加速器工艺流程及产污位置图

(2) 9MeV 工业 CT 加速器工艺流程及产污

本项目 9MeV 工业 CT 加速器非工作状态时不产生 X 射线，进行探伤工作时接通设备高压，电子束在设备中加速至高能，经加速器机头靶材料后，发射 X 射线，经设备准直器出束。加速器开展 X 射线探伤时，X 射线电离空气产生少量臭氧和氮氧化物，每次设备开机前，打开实验室内机械通风装置，探伤完毕通风机运行至少 6 分钟，保证室内充分通风换气，减少臭氧等废气累积。工作流程和产污环节如下图所示：

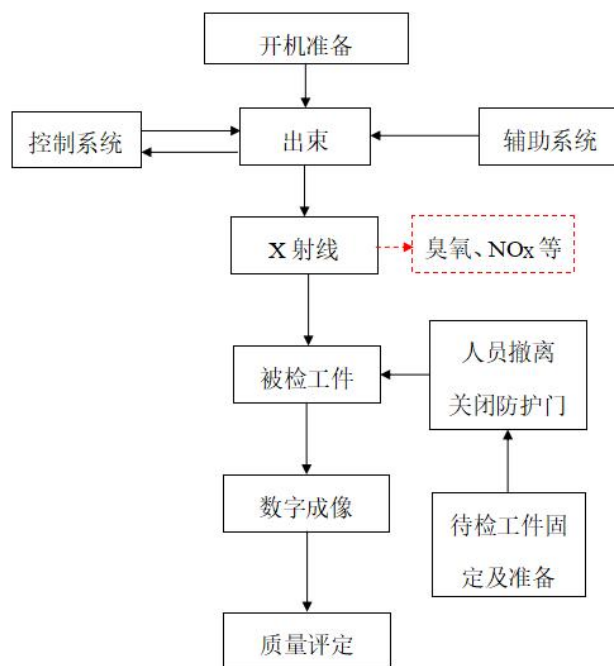


图 9-6 本项目 9MeV 工业 CT 加速器工艺流程及产污位置图

(3) 10MeV 电子束辐照加速器操作流程

- ①对待辐照品进行直观评价，入库；
- ②确定产品密度范围，编排辐照计划；
- ③将待辐照品放置于辊道输送系统上，固定位置；

④开机前，操作人员巡检辐照室，确定照射室内无人，确定所有安全联锁装置、臭氧排风系统、加速器冷却系统和照射室内照明、监视器工作正常；并打开声光警示。

⑤核算好辐照所需的剂量后，将所有安全装置复位后，启动加速器电源，调节到所需时间后，开启输送系统运行区开关，调节运行速度至工艺要求的速度，匀速前进进行辐照；

⑥照射完毕后的辐照品在加速器控制室外辊道传输系统卸货处取下，然后装上新的需照射的物品。

电子加速器开机辐照过程会产生 X 射线、非放射性废气（O₃、NO_x），大于 10MeV 直线加速器还需考中子及感生放射性；项目运营期间，将产生员工生活污水、生活垃圾及设备运行噪声的污染因素。

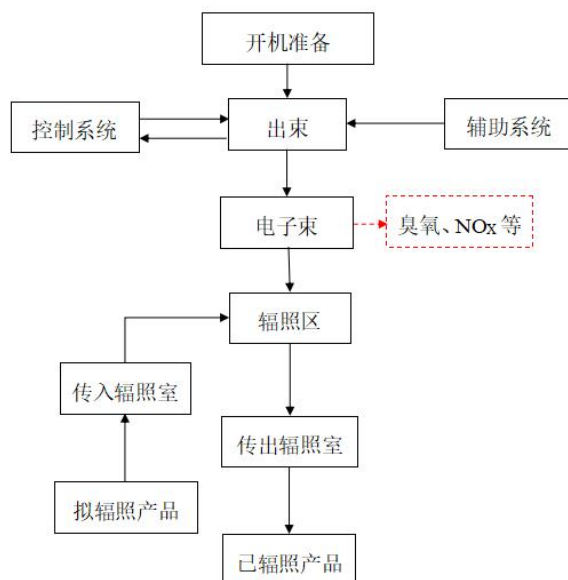


图9-7 本项目10MeV电子束辐照加速器工艺流程及产污位置图

污染源描述

（一）施工期污染源项

1、施工噪声

施工期噪声主要来自开挖地基、混凝土浇筑、设备安装等几个阶段，施工期噪声源主要为混凝土罐车、载重车、混凝土输送泵、振捣机、电焊机、电锯、空压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，另外还有设备安装过程产生的一些突发性、冲击性、不连续性的敲打撞击噪声。项目施工期噪声源强见下表。

表 9-2 施工期噪声源强一览表

施工阶段	噪声源强	声源强度（dB（A））
加速器机房浇筑阶段	混凝土罐车、载重车	80~85
	混凝土输送泵	90~100
	振捣机	100~105
	电焊机	100~105
	电锯	90~95
	空压机	80~85
设备安装、调试阶段	电钻	100~105
	电锤	100~105
	轻型载重机	75~80
	角磨机	100~105

2、施工废气

施工期需进行的挖掘地基、打桩、混凝土浇筑等作业，各种施工将产生地面

扬尘，另外施工机械和运输车辆作业时排放燃油废气；为确保浇筑连续性，施工期间拟采用商品混凝土，不在现场进行混凝土搅拌作业。因此，本项目施工期废气主要是施工扬尘和燃油废气，排放量较小，且影响局限在施工现场附近区域。

3、施工废水

施工期废水主要来自两个方面：一是施工废水，二是施工人员的生活废水。

施工废水主要来自混凝土养护、砌砖保湿。本项目 3 座加速器实验室建筑总面积约为 3396m²，采用商品砼进行浇筑；施工废水经隔油、沉淀后回用，不外排。

本项目施工期预计施工人员为 15 人，工期约 6 个月；施工人员生活用水按 100L/人·d 计，则用水量为 1.5m³/d，污水排水量按用水量的 0.8 计，则污水产生量为 1.2m³/d，施工期施工人员污水产生量为 216m³。

4、固体废物

项目施工期固体废物主要为加速器机房浇筑中产生的混凝土废渣等建筑垃圾，以及施工人员生活垃圾。

（1）生活垃圾

项目施工期预计施工人员为 15 人，工期约 6 个月；施工人员生活垃圾产生量为 7.5kg/d，则施工期生活垃圾产生量为 1.35t。

（2）建筑垃圾

根据项目设计方案，本项目建筑总面积约为 3396m²，混凝土废渣等建筑垃圾产生量按 0.03t/m² 进行估算；则项目施工期共产生建筑垃圾约 104.7t。

（二）运营期污染源项

本项目电子加速器 X 射线辐射最大标称能量（40MeV），加速器开机照射时，将产生 X 射线、高能电子束、中子、感生放射性以及非放射性有害气体（臭氧、氮氧化物等），此外项目运行期将产生生活污水、生活垃圾及设备运行噪声。

1、X 射线

电子加速器在进行辐照时电子枪发射电子，经加速管加速，在横向扫描磁场的作用下，扫描扩展，成为均匀扫描宽度的电子束，利用电子束对产品进行辐照。电子加速过程中，部分电子会丢失，打在加速管壁上，可产生 X 射线。此外，电子束打到高原子序数物质时也会产生高能 X 射线。X 射线的贯穿能力极强，可对周围环境辐射造成辐射污染，但关机后 X 射线影响即消失。此外，在加速器

运行过程中，除了由电子束在靶上产生的韧致辐射外，还可能由于其他原因产生某些次级辐射如泄漏辐射、散射、反流电子引起的韧致辐射等。由于电子束轰击靶、各结构材料和辐照产品都会产生韧致辐射（X 射线），X 射线是电子加速器装置辐射防护设计中的主要辐射源；此外，由于 40MeV 加速器实验室会产生中子、感生放射性，因此在辐射防护中需要设计对中子的防护。

2、电子束

电子加速器在运行时可产生高能电子束，因其贯穿能力远弱于 X 射线，在 X 射线得到充分屏蔽的条件下，电子束亦能得到足够的屏蔽。

3、放射性废气

本项目 40MeV 电子直线加速器在运行过程中将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为 ^{13}N （半衰期为 9.965min）、 ^{15}O （半衰期为 2.037min）、 ^{11}C （半衰期为 20.39min）和 ^{41}Ar （半衰期为 1.8h）。

4、放射性废液

本项目产生的放射性废液主要是活化的冷却水。40MeV 电子直线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 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O ，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。

5、放射性固体废物

本项目产生的放射性固体废物主要为 40MeV 电子直线加速器维修维护环节产生的含放射性的固体废物。

另两间实验室加速器电子束能量 $\leq 10\text{MeV}$ ，可不考虑感生放射性的影响。

6、非放射性污染因素分析

（1）非放射性废气

电子加速器开机运行时，产生的 X 射线与空气可通过电离作用产生臭氧（ O_3 ）和氮氧化物（ NO_x ），在 NO_x 中以 NO_2 为主；它们是具有刺激性作用的非放射性有害气体。本项目加速器机房均设有专门的通风系统。

其中，臭氧的危害大，产额高，而氮氧化物的产率仅为臭氧产率的十分之一，且国家对空气中臭氧浓度的标准严于氮氧化物，因此，本次评价主要考虑臭氧的影响。

加速器机房在良好通风条件下，臭氧很快弥散在大气环境中，臭氧半衰期约 22~25 分钟，常温下可自行分解为氧气。本次环评主要考虑辐照室内产生的臭氧对停机后进入人员的影响，需保证其有害气体职业接触限值满足《室内空气质量标准》（GB/T18883-2002）的要求。

（2）非放射性废水

项目运营期废水为生活污水。本项目拟配备工作人员 24 名，生活污水产生量约为 0.04t /d/人，因此生活污水年产生量为 240t/a。

（3）非放射性固体废弃物

本项目运营期产生的固体废弃物主要是工作人员产生的生活垃圾及少量不合格的辐照品。

本项目拟配备工作人员 24 名，生活垃圾产生量约为 0.5kg /d/人，因此生活垃圾年产生量为 3t。生活垃圾依托校区生活垃圾统一处理。

本项目辐照工作为全自动机械化操作，项目辐照消毒灭菌生产由操作人员设定好所需剂量后就可全自动批量辐照，故辐照过程中超剂量或少剂量照射出现的几率极小，根据同类型项目，辐照不合格造成物品废弃几率远低于万分之一。

（4）设备噪声

本项目建成投运后噪声源主要为风机、水冷设备等各类设备运行噪声及货物搬运噪声，噪声源强一般在 60~90dB（A）之间，项目主要产噪设备安装位置、数量及源强等见表 9-3。

表9-3 项目噪声产生情况

机房	噪声源	数量	源强（dB（A））	安装位置
40MeV 电子直线 加速器实验室	风机	1	90	楼顶
	水冷设备	1	85	水冷机房
9MeV 工业 CT 实 验室	风机	1	90	楼顶
	水冷设备	1	85	水冷机房
10MeV 电子束辐 照实验室	风机	1	90	楼顶
	水冷设备	1	85	水冷机房

表 10 辐射安全与防护

一、平布置及两区划分

1、平面布局

本项目位于西华大学宜宾校区内西南角空地，在项目 3 个电子加速器机房周围 50m 范围内，西南侧约 10m 为空地，10-50m 为长翠路；东南侧约 25m 为空地，25-50m 为大学路；东北侧约 15m 为通道，15-50m 为学校实训厂房 B；西北侧 50m 范围内为拟建新开车行道及出入口。本项目规划总平面及外环境关系见附图 2。

2、辐射工作场所两区划分

为了便于加强管理，切实做好辐射安全防范工作，按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求在辐射工作场所内划出控制区和监督区。

控制区：在正常工作情况下控制正常照射或防止污染扩散以及在一定程度上预防或限制潜在照射，要求或可能要求专门防护手段和安全措施的限定区域。在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志并给出相应的辐射水平和污染水平的指示。运用行政管理程序如进入控制区的工作许可和实体屏蔽（包括门锁和连锁装置）限制进出控制区，辐射工作场所应与非辐射工作场所隔开。

监督区：未被确定为控制区，正常情况下不需要采取专门防护手段或安全措施，但要不断检查其职业照射状况的制定区域。在监督区入口处的合适位置张贴电离辐射警示标记；并定期检查工作状况，确认是否需要防护措施和安全条件，或是否需要更改监督区的边界。

本次环评根据国际放射防护委员会对控制区和监督区的定义，结合各项目辐射防护和环境情况特点，将 40MeV 电子直线加速器实验室（含迷道）、9MeV 工业 CT 实验室（含迷道）、辐照室一层（含迷道），二层主机室划为控制区，曝光过程中严禁任何人员进入；划定控制室及控制室外走廊、速调管室、一层控制室、设备应付、去离子水制备间、冷却水循环间、变配电室、二层设备用房为监督区，禁止非辐射工作人员进入。本项目两区划分情况见表 10-1，两区划分见图 10-1。

表 10-1 本项目辐射工作场所两区划分情况

项目	控制区	监督区
西华大学宜宾校区光核反应研究中心项目	40MeV 电子直线加速器实验室（含迷道）	控制室及控制室外走廊、速调管室、
	9MeV 工业 CT 实验室（含迷道）	控制室及控制室外走廊
	一层：辐照室（含迷道） 二层：主机室	一层：控制室、设备用房、去离子水制备间、冷却水循环间、变配电室 二层：设备用房

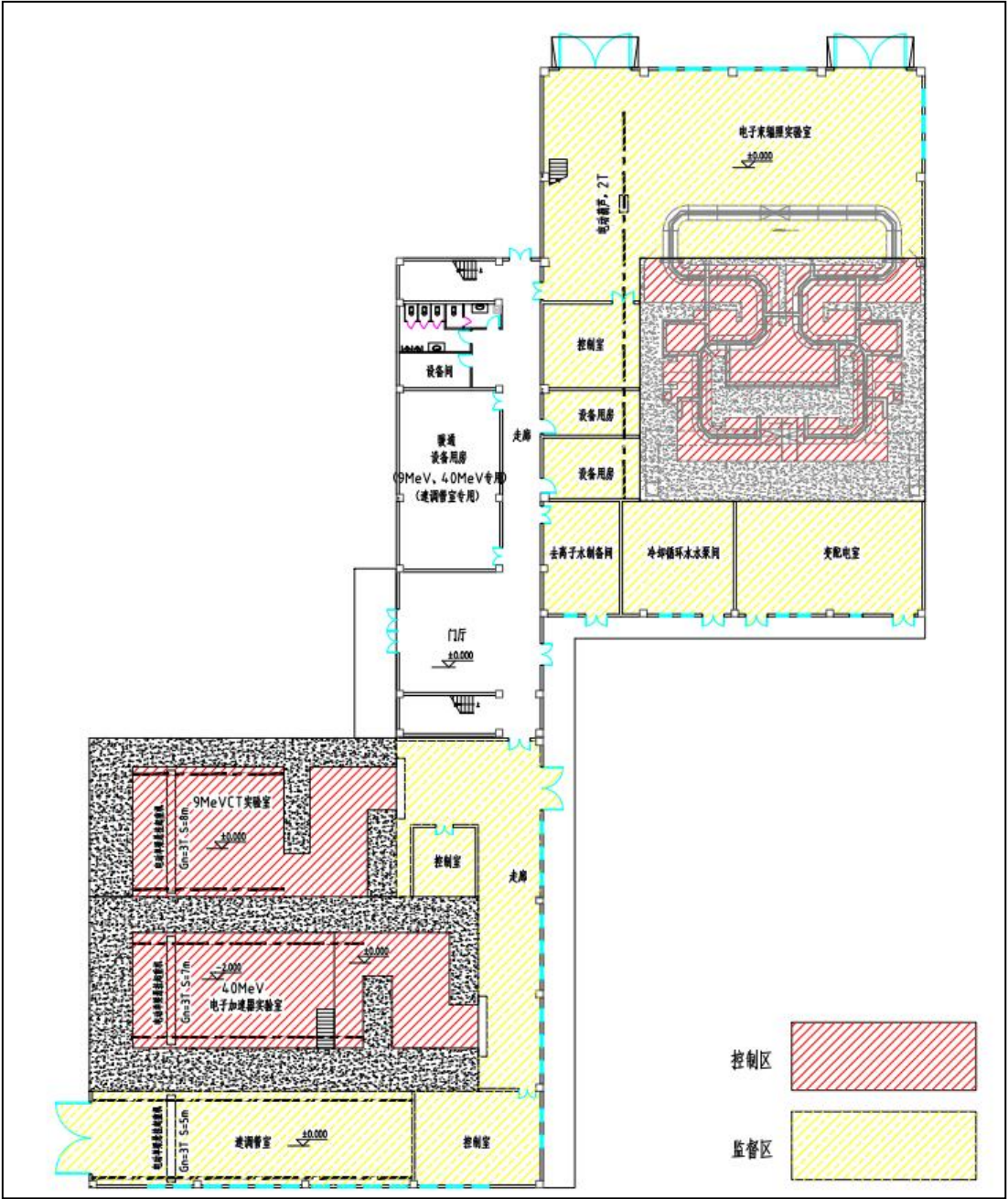


图 10-1 本项目一层两区划分示意图

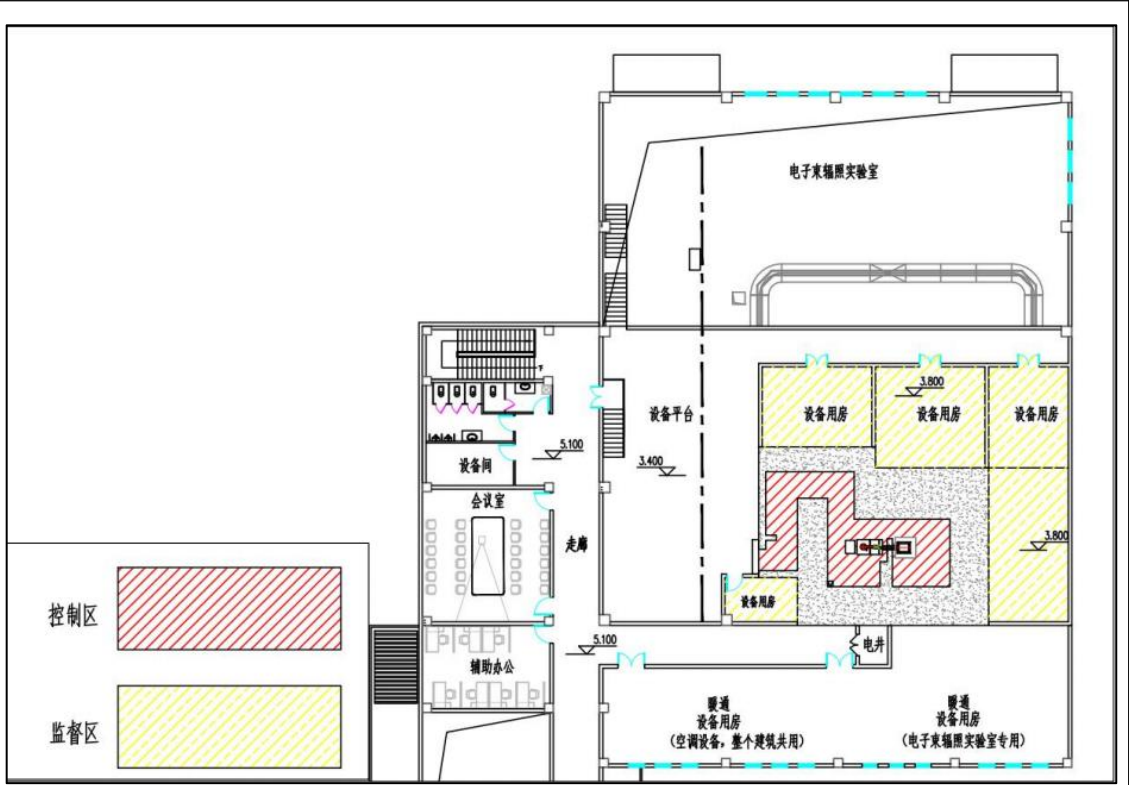


图 10-2 本项目二层两区划分示意图

二、辐射安全及防护措施

1、加速器机房的实体防护

电子加速器机房主要采用现浇混凝土（密度为 2.35g/cm³）结构，位于地面一层，本项目电子加速器机房具体屏蔽设计见表 10-2，平面及剖面布局见附图 6。

表 10-2 本项目 3 间实验室工程屏蔽防护措施一览表

实验室	工程屏蔽防护
40MeV 电子直线加速器实验室	40MeV 电子直线加速器实验室为下沉实验室，下沉深度为 2.0m，面积（含迷道）约 216m ² ，实验室尺寸为长 27.0m×宽 8.0m×高 8.4m，其东南侧有速调管室（148.5m ² ）及控制室（59.4m ² ）。实验室四面墙体、迷道顶部、底部均是密度为 2.35g/cm ³ 的钢筋混凝土，主射方向朝向西南部墙体。实验室西南部（主射方向）、东南部墙体厚度均为 3000mm，西北部（与 9MeV 工业 CT 实验室共用）墙体厚度为 2500mm，东北部“Z”型迷道内墙厚度为 2000mm，长 5000mm，迷道外墙厚度为 2000mm，长 5000mm，迷道宽度为 4000mm，顶部墙体厚度为 2000mm，底部混凝土厚度为 1000mm；迷道门为 400mm 钢+300mm 聚乙烯。
9MeV 工业 CT 实验室	9MeV 工业 CT 实验室净空尺寸为长 27.0m×宽 8.0m×高 6.4m，其东南侧有控制室（20.2m ² ）。实验室四面墙体、迷道顶部、底部均是密度为 2.35g/cm ³ 的钢筋混凝土，主射方向朝向西部墙体。实验室西南部（主射方向）墙体厚度为 3000mm、东南部（与 40MeV 电子直线加速器实验室共用）墙体厚度为 2500mm、西北部墙体厚度为 2000mm，东北部“Z”型迷道内墙厚度为 1800mm，长 6000mm，迷道外墙厚度为 2000mm，长 6000mm，迷道宽度为 4000mm，顶部

墙体厚度为 2000mm，底部混凝土厚度为 1000mm；迷道门为 280mm 钢门。		
10MeV 电子束辐照实验室	1F	辐照室 电子加速器辐照室面积为 334.6m ² ，东南侧墙体为 2800mm 厚混凝土；西南、东北侧墙体均为 2600mm 厚混凝土（辐照区）、1600mm 厚混凝土（内迷道区）、300mm（外迷道区）；西北侧“T”型墙体为 500mm 厚混凝土；内侧“H”型迷道：“—”为 2100mm 厚混凝土，两侧“ ”为 1000mm 厚混凝土；室顶为 1000mm 厚混凝土。
	2F	直线加速器主机机房 2 层直线加速器机房面积为 108.5m ² ，东南侧、东北侧墙体均为 2200mm 厚混凝土；西北侧墙体为 2900mm 厚混凝土，西南侧迷道内墙为 1700mm 厚混凝土，长 5000mm，迷道外墙为 1400mm 厚混凝土，防护门为 180mm 钢。

建设单位在电子加速器机房主体施工建设时，需连续浇筑，采取有效措施避免产生孔洞气泡，确保施工质量，达到预期的屏蔽效果。

2、设备的固有安全性

本项目加速器从正规厂家购买。加速器本身设有多重安全保护措施：钥匙控制、急停装置、调制器联锁、水系统联锁等。本项目加速器的固有安全性良好。产生的辐射主要都是采用混凝土墙体屏蔽。

（1）紧急停机按钮：在控制台设有紧急停机按钮。一旦遇到紧急情况，按下紧急停机按钮，切断加速器供电。

（2）调制器联锁：只有在电子枪灯丝、磁控管灯丝预热完毕，且没有故障出现时（灯终和准加灯亮），调制器才允许加高压，加速器才可以出束。一旦出现充电过流、反峰过荷、无触发、柜门打开的故障，均切断高压，加速器不出束。相应的故障灯亮。

（3）水系统联锁：一旦水冷系统的水温、水位、水压等出现故障时，均切断高压，同时水系统停止工作，加速器不出束，故障灯亮。

（4）真空联锁：若加速器内真空度低于设定值，则加速器停机，故障灯亮。

（5）操作人员钥匙联锁：控制室操作人员离开操作台时，取下钥匙，加速器无法开机，避免误照射发生。

（6）控制台复位确认按钮：巡检结束后，操作人员在控制台进行光电感应系统、巡检系统、急停系统等安全装置的复位操作，加速器才能开机运行。

3、安全装置

为了保证加速器正常运行，避免人员误入加速器实验室、主机厅和辐照室时发生误照事故，本项目加速器安全装置具有多重性、冗余性和独立性。重要的联

锁采用两种独立的方法进行，增加系统的可靠性。为了可靠，保护功能全部由硬件实现。当加速器处于“准备”或“运行”状态时，打开通道门或有紧急停机信号时，联锁系统有最高优先级，迅速切断加速器束流、高频系统的功率输出等，确保加速器不产生动态辐射，下面分别介绍本项目实验室的安全装置情况。

(1) 40、9MeV直线加速器实验室

①门-机联锁：加速器实验室防护门要与出束联锁，屏蔽门未关好，加速器不能出束；加速器工作期间屏蔽门不能打开。

②门-灯联锁：加速器实验室防护门与工作状态显示联锁，加速器实验室防护门外顶部拟设置工作状态指示灯。加速器处于出束状态时，指示灯为红色，以警示人员注意安全；当加速器处于非出束状态，指示灯为绿色。

③紧急止动装置和紧急开门按钮：除了加速器主机上以及控制台上自带的紧急止动按钮外，实验室内墙非主射线位置上、迷路门出口处均设置有中文标识的紧急停机开关，误入人员按动紧急停机开关就能使加速器停机；迷路出口处设置中文标识的紧急开门按钮。

④工作状态显示及警示标识：加速器实验室防护门上设置明显的电离辐射警告标志，出入口应有工作状态显示、声音、光电等警示措施。

⑤在加速器实验室墙上安装固定式剂量报警装置（带剂量显示功能），探头安装在实验室迷路内墙上（靠近防护门），只要迷路内的剂量超过预设的剂量阈值，就会报警。

(7) 时间防护：通过制定最优化的治疗、诊断方案尽量减少射线装置的照射时间。尽量减少人员与治疗室的近距离接触时间。

(8) 个人防护：加速器实验室的辐射工作人员每人佩戴个人剂量计和预定剂量率阈值的自动报警仪。

(9) 加速器将由生产厂家进行质保维修，学校操作和管理人员仅对加速器进行日常维护（如电路、开关、机电等维护）。

安全装置的布置见附图 8。

(2) 10MeV电子加速器辐照实验室

为了保证加速器正常运行，避免人员误入加速器主机厅和辐照室时发生误照事故，本项目加速器安全装置具有多重性、冗余性和独立性。重要的联锁采用两

种独立的方法进行，增加系统的可靠性。为了可靠，保护功能全部由硬件实现。

①门机联锁：辐照室的栅栏门和二楼主机厅的混凝土门与束流控制和加速器高压联锁，安装在距地面 1.9m 处，在辐照室门或主机室门打开时，加速器不能开机；在加速器运行中门被打开，加速器迅速自动停止出束。

②钥匙联锁：加速器的主控室开机钥匙和主机室门和辐照室门联锁，且为同一把钥匙。人员要进入机房或辐照通道时，必须从加速器控制台上取出开机钥匙，才能开门进入机房或辐照室，此时加速器无法启动，以确保进入人员的安全。该钥匙必须与一台有效的便携式辐射监测报警仪相连。在运行中该钥匙是唯一的且只能由运行值班长使用。

③防人误入装置：辐照室迷道出入口、加速器主机厅迷道入口距地面 1.2m 处均设置有三道红外光电联锁，每道光电联锁在同一垂直面上都有上中下三道光束。当人或者动物经过红外开关处，会触碰到红外线，则加速器停机。

④急停装置：辐照室迷道出入口和加速器控制台上均设有急停按钮，并有指示标识；沿辐照室和主机厅内墙上、迷道内墙上等所有墙面距地面 1.4m 处布设拉线开关（为不锈钢制，不易生锈）实现对辐照室和主机厅人员可达位置的全覆盖，以致发生因为疏忽大意而导致辐照室或主机厅内有人员滞留时，滞留人员能够随处拉动拉线，加速器的高压立即切断，同时在控制台上报警灯亮，这时加速器不能启动工作，操作人员将急停开关复位后加速器才能再次启动。

⑤巡检按钮（清场巡更系统）：主机室和辐照室内距地面 1.4m 处设置了“巡检按钮”，巡检按钮处设置明显的标识并进行编号，且与控制台联锁。在加速器准备出束时，巡检人员进入辐照室和主机厅内巡视，按序按动“巡检按钮”，确认有无人员逗留后，加速器才能出束。

⑥信号警示装置：在控制区出入口处及内部距地 2.5m 处设置灯光和音响警示信号，加速器出束前将响警铃 30 秒对人员进行提示尽快撤离，万一有人停留在机房内，此时可按室内墙上或控制台上的急停按钮，切断加速器供电。加速器出束时警灯闪亮，警示任何人员不得进入防护厅。主机室和辐照室出入口设置工作状态指示灯（红黄绿三色指示灯），并与电子加速器辐照装置联锁，出束时绿灯灭、红灯闪烁；停止出束时红灯灭、绿灯亮；黄灯亮时加速器处于准备工作状态，不得开门进入通道。

⑦剂量联锁：辐照室和主机室安装固定式剂量报警仪，迷道进出口内侧设置有剂量监测探头，与辐照室和主机室的出入口门等联锁。当辐照室和主机厅内的辐射水平超过了仪器预定值时，主机厅和辐照室的门无法打开。

⑧监控系统：在辐照室、主机厅以及迷道内距地面 2m 安装监控系统，以便检查这些区域内的生产进展情况，并使用反射镜保护监控摄像机。辐照室监控全覆盖，不留死角，在主控室可以清楚看到辐照区及机房全景，确认没有人员，才可开机。

⑨通风联锁：主机室、辐照室排风系统和控制系统联锁，加速器停机后，只有达到预先设定的 8min 时间才能开门，以保证室内臭氧等有害气体的浓度低于允许值。

⑩束下装置联锁：电子加速器辐照装置的控制与束下装置的控制必须建立可靠的接口和协议文件。束下装置因故障偏离正常运行状态或停止运行时，加速器自动停机。

⑪烟雾报警：辐照室顶部设置烟雾报警装置，遇有火险时，加速器应立即停机并停止通风。

⑫主机厅门内距地面 1.4m 处安装了紧急开门按钮，如有人员不慎滞留在主机厅内，可通过紧急开门按钮打开防护门逃生。

安全装置的布置见附图 8。

3、其他防护措施

除工作场所屏蔽设计的安全防范措施外，学校还将配备完备的防护器材。

本项目拟配备 20 名辐射工作人员，拟配备个人剂量计 20 套（每名辐射工作人员 1 套）。辐射工作人员防护主要考虑个人剂量检测及体检；工作时佩带个人剂量计，每季度检测一次；如遇特殊辐照，应马上送检。测量结果长期保存；同时，辐射工作人员从事项目辐射工作前进行健康体检，此后每年应进行一次体检，体检结果长期保存。

《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条第五款的要求：配备便携式 X-γ 剂量监测仪 1 台，用于工作场所剂量监测；每间实验室配备便携式辐射剂量监测报警仪；此外，40MeV 电子直线加速器实验室还应配备中子周围剂量当量（率）仪。

综上所述，在上述所有措施落实后，本项目配备的相关辐射防护措施符合标准的要求，配备的联锁装置可有效的保护操作人员和公众，减少因人为误入造成辐射安全事故。

4、排风系统

本项目3间电子加速器机房设计有专门的通风排风系统。

其中40MeV电子直线加速器实验室送风管道为 $\phi 800\text{mm}$ 的不锈钢材质，从迷道门上方，沿迷道路径送风至实验室内；排风管道为 $\phi 630\text{mm}$ 的不锈钢材质，将实验室内的气体沿迷道外墙经迷道口抽至实验室顶部排放。

9MeV工业CT实验室送风管道为 $\phi 500\text{mm}$ 的不锈钢材质，从迷道门上方，沿迷道路径送风至实验室内；排风管道为 $\phi 630\text{mm}$ 的不锈钢材质，将实验室内的气体沿迷道外墙经迷道口抽至实验室顶部排放。

10MeV电子束辐照实验室送风管道为 $\phi 160\text{mm}$ 的不锈钢材质，从进货口门上方，沿迷道路径送风至辐照室内；排风管道为 $\phi 320\text{mm}$ 的不锈钢材质，排风口（2个）分别设置于出束口两侧，将辐照室内的气体抽至二层，与二层直线加速器主机房内的排风管道一起抽至屋顶排放。排风管道走向见附图7。

本项目不在主屏蔽墙处设穿墙管线，不影响墙体屏蔽效果，电缆沟及送排风管线均以多次弯折形式穿出机房，出束期间X射线经管道多重折射、吸收和削减后辐射能量急剧下降，射线通过管道外漏的影响可忽略不计。

3间加速器实验室的机械通排风的房间的换气次数、风机台数和排风方式如下表所示：

表10-3 3间实验室通排风情况

序号	房间名称	换气次数(h^{-1})/风量(m^3/h)	风机台数	排风方式
1	40MeV 电子直线加速器实验室	6/7950	1	工作时产生的废气采用专用排风系统进行排风
2	9MeVCT 实验室	6/4260	1	
3	10MeV 辐照灭菌实验室	6/5160	1	

三、环保投资

为了保证本项目工作安全持续开展，根据《环保部辐射安全与防护监督检查技术程序》和《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）》的相关要求，需要投入一定的资金来建设必要的环保设施，配备相应的监测仪器和防护用

品，本项目环保投资估算见表 10-5。

表 10-5 环保设施及投资一览表

序号	项目	应具备条件	数量	投资（万元）
40MeV 电子直线加速器实验室				
1	实体防护设施	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	1 套	***
2		防护门	1 扇	***
3		通风系统	1 套	***
4	控制台及安全联锁	防止非工作人员操作的钥匙控制系统	1 套	设备自带
5		控制信号联锁	1 套	设备自带
6		冷却系统联锁	1 套	设备自带
7		通风系统联锁	1 套	***
8		烟雾报警系统联锁	1 套	***
9		防护门剂量联锁	1 套	***
10		防人误入装置联锁	1 套	***
11		信号警示装置	1 套	***
12		束下装置联锁	1 套	***
13		门机联锁	1 套	***
14	警示装置	入口电离辐射警示标志	1 套	***
15		入口加速器工作状态显示	1 套	***
16		机房内准备出束音响提示	1 套	***
17		控制台上蜂鸣器	设备自带	/
18	紧急设施	机房内设计有中文标识的紧急停机、巡检按钮	7 个	***
19		电视监控对讲装置	1 套	***
20		有中文标识的紧急开门按钮	1 个	***
21		拉线开关	2 个	***
22	监测设备	加速器机房内固定式剂量报警仪	1 套	***
23		中子周围剂量当量（率）仪	1 台	***
24		便携式 X-γ辐射监测仪（3 间实验室共用）	1 台	***
25		个人剂量报警仪	2 个	***
26		个人剂量计	12 套	***
27	其他	冷却水暂存容器	1 个	***
28		放射性废物暂存间	1 间	***
小计				***
9MeV 工业 CT 实验室				
1	实体防护设施	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	1 套	***
2		防护门	1 扇	***
3		通风系统	1 套	***
4	控制台及安全联锁	钥匙控制	1 套	***
5		门机联锁	1 套	***
6		门灯联锁	1 套	***

7	警示装置	入口处机器工作状态指示灯(LED 报警屏)	1 套	***
8		入口处电离辐射警示标志	1 套	***
9	紧急设施	室内有中文标识的紧急停止按钮	3 个	***
10		逃逸开关	1 套	***
11		摄像监控系统	1 套	***
12	监测设备	加速器机房内固定式剂量报警仪	1 套	***
13		便携式 X 射线辐射剂量仪 1 台(3 间实验室共用)	1 台	计入 40MeV 实验室投资
14		个人剂量报警仪	2 个	***
15		个人剂量计	4 套	***
小计				***
10MeV 电子束辐照实验室				
1	实体防护设施	由上下两层构成, 建筑全部采用混凝土防护设计、迷道	1 座	***
2		二层主机室进出口设置防护门。	1 道	***
3	控制台及安全联锁	主控钥匙开关必须和主机室门和辐照室门联锁。	1 套	***
4		门机联锁: 一层辐照室出入口和二层主机室防护门配置门机联锁装置 1 套。	3 套	***
5		防人误入装置: 在主机室和辐照室的人员出入口通道内设置防人误入的安全联锁装置。	3 道	***
6		剂量联锁: 在辐照室、主机室的出入口设置剂量监测探头, 并与固定式辐射剂量监测仪绑定, 与辐照室和主机室的出入口门等进行联锁。	1 套	***
7		通风联锁: 辐照室通风系统与控制系统联锁。	1 套	***
8		束下装置联锁: 辐照室建立 1 套束下装置联锁。	1 套	***
9		巡检按钮: 加速器机房设有 12 个巡检开关及 2 个巡检复位箱。其中辐照室设巡检开关 8 个, 巡检复位箱 1 个, 主机室设置巡检开关 4 个, 巡检复位箱 1 个。	12 个	***
10	警示装置	声光报警装置: 辐照室出入口及内部、主机室出入口设置声光报警装置, 辐照室 3 个, 主机室 1 个。	4 个	***
11		LED 危险警示装置: 主机室和辐照室出入口设置工作状态指示装置。	3 个	***
12		烟雾报警: 在辐照室内设置烟雾报警装置 1 套。	1 套	***

13		辐照室迷道出入口外、加速器主机室防护门外和辐照室进出口设置电离辐射警告标志。	1 套	***
14	紧急设施	在主控台上和主机室、辐照室内各设置有中文标识的急停按钮 1 个。	4 个	***
15		加速器安装 1 套监控装置，辐照室和主机室内各区域均安装监控探头（一层辐照室安装 10 处，二层主机室安装 2 处）。	1 套	***
16	监测设备	便携式 X- γ 剂量监测仪 1 台（3 间实验室共用）	1 台	计入 40MeV 实验室投资
17		便携式辐射剂量监测报警仪 4 台	4 台	***
18		每个辐射工作人员配备个人剂量计 1 个，拟配置 4 套	4 套	***
小计				***
合计				***

本项目总投资***万元，环保投资***万元，占总投资的***。今后在实践中，学校应根据辐射防护和管理要求，结合自身实际情况对环保设施做相应补充完善，使之更能满足实际和相关管理要求。同时，学校应定期对环保设施、监测仪器等进行检查、维护。

三废的治理

1、废气

（1）放射性废气

该项目放射性废气主要来源于加速器机房的感生放射性废气。本项目感生放射性废气中的主要核素为 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar ，半衰期均较短。

整个实验室通过空气调节系统保持房间负压，避免活化空气沿缝隙泄漏到工作场所对工作人员造成辐射。排放的感生放射性废气经各排风管道收集后，从实验室屋顶的排气筒进行集中排放。排气筒于屋顶（12.2m）排放，排入环境后很快衰变消失，满足国家相关标准的要求，项目拟采取的放射性废气处理措施是合理可行的。

（2）非放射性废气

本项目营运期产生的非放废气主要为 O_3 和 NO_2 。

对于 40MeV 和 9MeV 实验室，其 O_3 和 NO_2 产生量极少，经过排风系统排出后，其影响很小可以忽略；10MeV 电子束辐照室，使用电子束进行辐照，臭

氧产额较高，本项目辐照室内设置了通排风管道。本项目产生的臭氧拟通过排风管道引出高于二层设备间屋顶（8.4m）排放，臭氧排入环境大气后，经自然分解和稀释，不会对环境空气造成明显影响。

本项目 10MeV 电子加速器长期辐照后，学校应对电子束辐照实验室连续通风 6 分钟后，人员才能进入加速器机房内。

2、固废

（1）放射性固废

本项目产生的放射性固废为低放射性固废。本项目产生的放射性固体废物进行分类收集和包装，暂存于放射性废物暂存间，最终交由有资质的单位处理。

（2）非放射性固废

本项目在设备运行期间，主要固体废物为生活垃圾，生活垃圾依托既有的生活垃圾处理设施处理；运营过程中不合格的辐照品根据物品的种类不同，按要求进行处理。

3、废水

（1）放射性废水

项目正常运行过程中冷却水循环使用，不外排。本项目放射性废水主要为事故排水或检修排水，排放循环冷却水时需监测一次总 α 和总 β ，检测达标并经生态环境主管部门同意后排入市政污水管网。

（2）非放射性废水

在设备运行期间，主要固体废物为生活污水，生活污水依托既有的生活污水处理系统处理。

表 11 环境影响分析

建设阶段对环境的影响

一、施工期的环境影响分析

本项目在西华大学宜宾校区内西南角空地内建设，西华大学宜宾校区已就《宜宾临港开发大学城职业教育基地-西华大学宜宾研究院项目（一期）》进行了环境影响评价，取得了原宜宾临港经济技术开发区规划建设环保局的批复文件（宜临港建环发[2017]147 号）（附件 6）。本项目需新建加速器机房、对机房进行装修和设备安装等工序的施工。故施工期将会产生一定扬尘、噪声、固体废物、装修中产生的废气以及施工人员的生活垃圾和生活污水，在施工期应重点做好以下工作：

- 扬尘的防治措施：项目通过施工现场封闭施工和采取洒水等措施进行控制；
- 废水防治措施：施工废水经沉淀后循环使用；生活废水依托项目原有设施进行处理；
- 废气防治措施：项目施工现场封闭施工，及时清理，通风换气等措施；
- 噪声防治措施：选用低噪声设备，合理安排施工时间；
- 固废防治措施：基础工程挖土方与回填土方在就地平衡，弃土运至指定填埋场处置；生活垃圾收集后委托环卫部门统一清理。

机房施工质量的要求：（1）在建设过程中严格按照施工规范进行施工，在电子加速器机房屏蔽体施工过程中，应连续整体浇筑，采取有效措施避免产生孔洞气泡，防止射线泄露；防护门与墙体重叠部分不小于缝隙宽度的 10 倍；（2）穿过机房墙体的各种管道、电缆不得影响屏蔽墙体的屏蔽防护效果，不得正对工作人员经常停留的地点。

二、设备安装调试期间的环境影响分析

本项目电子直线加速器的安装和调试均由供货方专业人员完成，在设备安装和调试时机房的防护措施已建设完成，产生的辐射经过墙体的屏蔽和距离衰减后对环境的影响是可接受的。设备安装完成后，建设单位需及时回收包装材料及其它固体废物，作为一般固体废物进行处置，不随意丢弃；设备调试时，加速器产生的X射线、电子线会使空气发生电离，产生臭氧和氮氧化物，而氮氧化物的产

率仅为臭氧产率的十分之一；臭氧和氮氧化物经实验室及辐照室设置的排风系统排放；且臭氧在常温下可分解为氧气，对环境的影响很小。

运行阶段对环境的影响

科教集团拟在西华大学宜宾校区西南角建设光核反应研究中心项目，建设内容包括 40MeV 电子直线加速器实验室、10MeV 电子束辐照实验室、9MeV 工业 CT 实验室及其配套用房，并在 3 间实验室内各安装使用 1 台电子加速器，均属于 II 类射线装置。

辐射环境影响分析

一、40MeV 电子直线加速器实验室

（一）40MeV 电子直线加速器实验室 X 射线环境影响分析

以下就 40MeV 直线加速器运营中产生的 X 射线、中子、感生放射性、臭氧的影响进行预测评价。

1、40MeV 电子直线加速器实验室关注点设立及剂量率参考水平

关注点示意图见下图：



图 11.1-1 40MeV 电子直线加速器实验室关注点示意图

各侧墙体外关注点导出控制剂量按下式进行计算：

$$\dot{H} = \dot{H}_c / (t \cdot U \cdot T) \dots\dots\dots(\text{式 } 11.1-1)$$

式中： $\dot{H}$ —— 导出剂量率参考控制水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

$\dot{H}_c$ —— 年剂量参考控制水平，职业人员取 $5000\mu\text{Sv/年}$ ，公众取 $100\mu\text{Sv/年}$ ；

U —— 射线装置向关注点照射的使用因子，此处取 1；

T —— 人员在相应关注点驻留的居留因子；

t —— 射线装置年工作时间，1000h。

各墙面及屋顶参数选取及计算结果见表 11.1-1。

表 11.1-1 40MeV 电子直线加速器实验室关注点控制剂量水平参数选取及计算结果表

关注点		受照类型	使用因子	$\dot{H}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	关注点的最高剂量率参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
A	40MeV实验室西北面墙外30cm处	公众	1	0.1	2.5	0.1
B	40MeV实验室西南面墙外30cm处(主射方向)	职业	1	5	2.5	2.5
C	40MeV实验室东南面墙外30cm处(40MeV电子加速器实验室)	公众	1	0.1	2.5	0.1
D	40MeV实验室东北面墙外30cm处	公众	1	0.1	2.5	0.1
E	迷道门	职业	1	2.50	2.5	2.50
F	40MeV实验室屋顶上方	公众	1	10	/	10

由于屋顶人员不可到达，故剂量率参考控制水平保守取 $10\mu\text{Sv/h}$ 。

2、40MeV 电子直线加速器实验室墙体厚度核算

(1) 主射方向（西南侧墙体）屏蔽厚度核算

西南侧墙体为主射墙体，焦斑聚西南侧墙体距离为7m，该墙体所需屏蔽投射因子可由式11.1-2计算、所需屏蔽体厚度由式11.1-3计算。

$$B = \frac{\dot{H} * R^2}{I * H_0} \dots\dots\dots(\text{式 } 11.1-2)$$

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式 } 11.1-3)$$

式中：

$\dot{H}$ ——剂量率参考控制水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

R —— 辐射源至关注点的距离，取 7m；

I —— 最大管电流，取 2mA；

H_0 —— 距辐射源点（靶点）1m 处输出量，根据《辐射防护手册》（第一分册）图 3.2，入射电子能量为 40MeV 时，X 射线发射率主要有前向和侧向，其中距靶 1m 处每 mA 束流产生的前向 X 射线发射率为 $1 \times 10^6 \text{rad} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ，旁侧 X 射线发射率为 $3 \times 10^3 \text{rad} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ；经换算为前向 X 射线发射率为 $6 \times 10^{11} \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，旁侧 X 射线发射率为 $1.8 \times 10^9 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ；

加速器设置自屏蔽体，自屏蔽体厚度满足泄漏率达到 1/10000 水平；因此前向 X 射线发射率为 $6 \times 10^7 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，旁侧 X 射线发射率为 $1.8 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$

TVL——什值层厚度，根据《辐射防护手册》（第一分册）图 10.7，入射电子能量为 40MeV 所产生的 X 射线在普通混凝土中的半值层约为 140mm；在钢中的半值层保守取为 35mm；在铅中的半值层保守取 13mm；换算为什值层分别为 464.8mm、116.2mm、43.2mm；

B ——屏蔽透射因子公式见（式 11.1-2）；

40MeV 电子直线加速器实验室四周墙面屏蔽参数选取及计算结果见表 11.1-2。

表 11.1-2 40MeV 电子直线加速器实验室主射方向屏蔽体理论厚度计算表

墙体	剂量参考 控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	关注点至 辐射源的 距离(m)	透射 因子	理论计算 屏蔽厚度 (mm)	实际设 计厚度 (mm)	是否满 足屏蔽 要求
40MeV 电子直线 加速器实验室西 南面墙外 30cm 处（主射方向）	2.5	7.3	1.11E-06	2768	3000	满足

注：混凝土密度为 2.35 g/m³。

3、非主射方向屏蔽厚度核算：

非主射辐射屏蔽因子根据公式11.1-1、11.1-4计算：

$$\dot{H}_{\text{漏}} = \frac{\dot{H}_L \cdot B_2}{R^2} \dots\dots\dots(\text{式 } 11.1-4)$$

B_2 —非主射屏蔽透射因子；

$\dot{H}_{\text{漏}}$ —预测点剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）；

$\dot{H}_L$ —距靶点 1m 处 X 射线管组装体的泄漏辐射剂量率，单位为微希伏每小时（ $\mu\text{Sv/h}$ ），旁侧 X 射线发射率为 $1.8 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ；

R —参考点离靶点的距离，m

对于估算出的屏蔽投射因子 B^2 ，所需的屏蔽体厚度 X 按下式计算：

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式 } 11.1-5)$$

式中：TVL——什值层厚度，根据《辐射防护手册》（第一分册）图10.7，入射电子能量为40MeV所产生的X射线在普通混凝土中的半值层约为140mm；在钢中的半值层保守取为35mm；在铅中的半值层保守取13mm；换算为什值层分别为464.8mm、116.2mm、43.2mm；

表 11.1-3 40MeV 电子直线加速器实验室非主射方向屏蔽体理论厚度计算表

墙体	剂量参考 控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	关注点至 辐射源的 距离(m)	透射 因子	理论计算 屏蔽厚度 (mm)	实际设 计厚度 (mm)	是否 满足 屏蔽 要求
40MeV 实验室西北 面墙外 30cm 处	0.1	6.8	2.57E-05	2134	2500	满足
40MeV 实验室东南 面墙外 30cm 处（速 调管室）	0.1	7.3	2.96E-05	2105	3000	满足
40MeV 实验室东北 面墙外 30cm 处	0.1	17.3	1.66E-04	1757	2000	满足
40MeV 实验室屋顶 上方	10	8.43	3.95E-03	1117	2000	满足

4、散射辐射影响

散射辐射由（式11.1-1）和（式11.1-6）计算散射辐射影响。

$$B = \frac{\dot{H}_c \cdot R_s^2 \cdot R_0^2}{I \cdot H_0 \cdot F \cdot \alpha} \dots\dots\dots(\text{式11.1-6})$$

式中：

B—散射屏蔽透射因子；

Hc—预测点剂量率（μSv/h）；

R_s—散射体至关注点的距离，m；

R₀—靶点至探伤工件的距离，均取0.5m；

I—额定管电流，2mA；

H₀—距辐射源点（靶点）1m处输出量，根据《辐射防护手册》（第一分册）图3.2，入射电子能量为40MeV时，X射线发射率主要有前向和侧向，其中距靶1m处每mA束流产生的前向X射线发射率为1×10⁶rad·m²·mA⁻¹·min⁻¹，旁侧X射线发射率为3×10³rad·m²·mA⁻¹·min⁻¹；

F—R₀处的辐射野面积；

α—散射因子，可保守取值为α_w·10000/400，α_w保守取1.9×10⁻³；

对于估算出的屏蔽投射因子B，所需的屏蔽体厚度X按下式计算：

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式11.1-7})$$

式中：TVL——什值层厚度，根据《辐射防护手册》（第一分册）图10.7，4入射电子能量为40MeV所产生的X射线在普通混凝土中的半值层约为140mm；在钢中的半值层保守取为35mm；在铅中的半值层保守取13mm；换算为什值层分别为464.8mm、116.2mm、43.2mm；

表 11.1-4 40MeV 电子直线加速器实验室散射方向屏蔽体理论厚度计算表

墙体	剂量参考 控制水平 (μSv/h)	关注点至 辐射源的 距离(m)	透射 因子	理论计算 屏蔽厚度 (mm)	实际设 计厚度 (mm)	是否 满足 屏蔽 要求
40MeV 实验室西北 面墙外 30cm 处	0.1	6.8	3.38E-04	1613	2500	满足
40MeV 实验室东南 面墙外 30cm 处（速 调管室）	0.1	7.3	3.90E-04	1585	3000	满足
40MeV 实验室东北 面墙外 30cm 处	0.1	17.3	2.19E-03	1236	2000	满足

40MeV 实验室屋顶上方	10	8.43	5.19E-02	597	2000	满足
---------------	----	------	----------	-----	------	----

5、复合分析

漏射辐射的屏蔽厚度与散射辐射的屏蔽厚度相差一个什值层（TVL）厚度或更大时，采用其中较厚的屏蔽；相差不足一个什值层（TVL）厚度时，在较厚的屏蔽上增加一个半值层（HVL）厚度。由表11.1-5可知，本项目散射辐射的屏蔽厚度与漏射辐射的屏蔽厚度相差大于一个什值层（TVL）厚度，因此本项目屏蔽体在考虑散射辐射及漏射辐射屏蔽厚度计算时采用其中较厚的屏蔽。

表11.1-5 40MeV电子直线加速器实验室屏蔽厚度计算与实际设计厚度汇总表

关注点	有用线束需屏蔽厚度（mm）	非主射辐射需屏蔽厚度（mm）	散射辐射需屏蔽厚度（mm）	理论计算屏蔽厚度（mmPb）	设计厚度（mmPb）	备注
40MeV实验室西南面墙外30cm处（主射方向）	2768	/	/	2768	3000	满足
40MeV 实验室西北面墙外30cm 处	/	2134	1613	2134	2500	满足
40MeV 实验室东南面墙外30cm 处（速调管室）	/	2105	1585	2105	3000	满足
40MeV 实验室东北面墙外30cm 处	/	1757	1236	1757	2000	满足
40MeV 实验室屋顶上方	/	1117	597	1117	2000	满足

根据上表，本项目40MeV电子直线加速器实验室设计屏蔽厚度均能满足屏蔽要求。

6、40MeV 电子直线加速器实验室迷道入口人员通道门屏蔽厚度核算

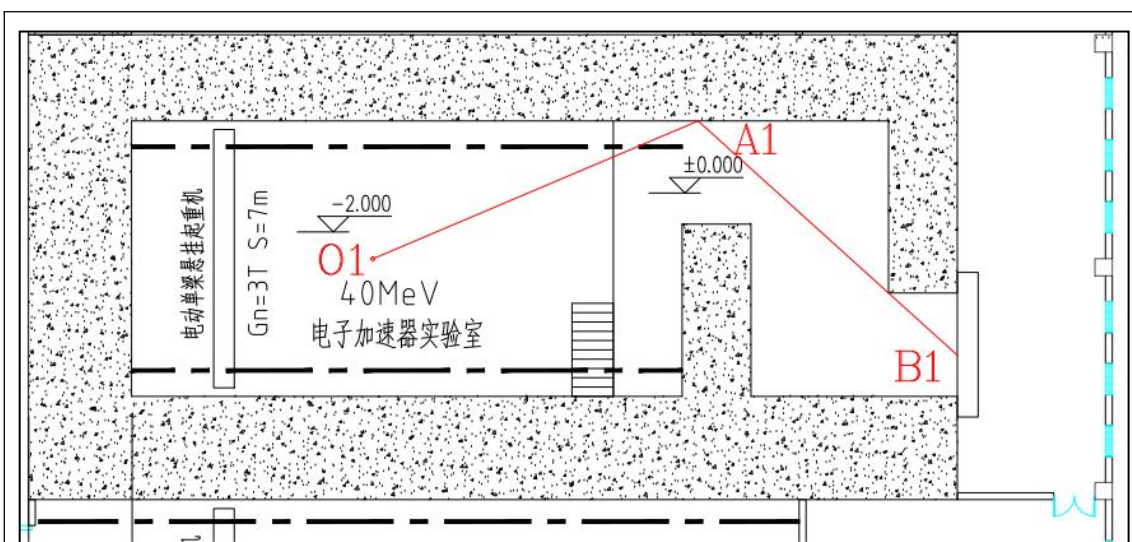


图 11.1-1 40MeV 电子直线加速器实验室迷宫散射路径示意图

迷宫内O1、A1、B1点的辐射剂量率主要考虑散射辐射的影响，由式11.1-8核算。屏蔽物质厚度X计算公式由式11.1-9、式11.1-10、式11.1-11计算。

$$\dot{H} = \frac{I \cdot H_0 \cdot B}{R_s^2} \cdot \frac{F \cdot a}{R_0^2} \dots\dots\dots(\text{式11.1-8})$$

$$B = 10^{-X/TVL} \dots\dots\dots(\text{式11.1-9})$$

$$B = \frac{\dot{H}_c \cdot R_s^2}{I \cdot H_0} \cdot \frac{R_0^2}{F \cdot a} \dots\dots\dots(\text{式11.1-10})$$

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式11.1-11})$$

式中：

$\dot{H}_c$ —表11-1中确定的剂量率参考水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

$\dot{H}$ —关注点散射辐射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

R_s — 散射体至关注点的距离，m；

R_0 —靶点至探伤工件的距离，取 0.5m；

I —最大电流，取 2mA；

X —屏蔽体厚度，mm；

B —屏蔽透射因子。

TVL—什值层厚度，根据《辐射防护手册》（第一分册）图10.7，4入射电

子能量为40MeV所产生的X射线在普通混凝土中的半值层约为140mm；在钢中的半值层保守取为35mm；在铅中的半值层保守取13mm；换算为什值层分别为464.8mm、116.2mm、43.2mm；

H_0 —距辐射源点（靶点）1m 处输出量，根据《辐射防护手册》（第一分册）图 3.2，入射电子能量为 40MeV 时，X 射线发射率主要有前向和侧向，根据前文，前向 X 射线发射率为 $6 \times 10^7 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，旁侧 X 射线发射率为 $1.8 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ；

F— R_0 处的辐射野面积；

α —散射因子，可保守取值为 $\alpha_w \cdot 10000/400$ ， α_w 保守取 1.9×10^{-3} 。

本项目 40MeV 实验室迷道主要是受散射线影响，实验室迷道散射路径为 $O1 \rightarrow A1 \rightarrow B1$ ， $O1A1$ 路径长度为 10.27m， $A1B1$ 路径长度为 10.16m；根据式 11.1-8、式 11.1-9 和式 11.1-10 计算出 40MeV 电子直线加速器实验室迷道入口防护铅门所需厚度见下表：

表11.1-6 40MeV电子直线加速器实验室迷道入口防护铅门厚度校核

场所	Hc-关注点散射 辐射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	H_0 -距辐射源点 (靶点) 1m 处输 出量 $\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$	R_s -散射体 至关注点 的距离 (m)	B-屏蔽透 射因子	X-屏蔽体厚 度 (mm)
40MeV 电子直线 加速器实 验室	2.5	6.00E+07	20.43	2.29E-04	157

计算得出人员通道门满足 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 所需的厚度最大为 157mm，迷道入口防护钢门设计屏蔽厚度为 400mm，满足 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 防护要求。

已知屏蔽体厚度，根据式 11.1-1~式 11.1-7 可求得关注点剂量率，进而球的关注点年有效剂量，见下表：

表11.1-7 本项目40MeV电子加速器实验室外关注点处X射线年照射剂量计算结果表

关注点	年受有用线束 照射剂量 (mSv/a)	年受漏射照 射剂量 (mSv/a)	年受散射照 射剂量 (mSv/a)	年受照射 剂量 (mSv/a)	受照 者类 型
40MeV 实验室西南面 墙外 30cm 处（主射方 向）	1.98E-01	/	/	1.98E-01	职业 照射
40MeV 实验室西北面 墙外 30cm 处	/	5.38E-03	1.71E+00	1.72E+00	公众 照射

40MeV 实验室东南面 墙外 30cm 处（速调管 室）	/	3.30E-05	1.25E-01	1.25E-01	公众 照射
40MeV 实验室东北面 墙外 30cm 处	/	8.32E-04	1.14E-03	1.97E-03	公众 照射

7、本项目X射线所致年剂量估算

表11.1-8 本项目40MeV电子加速器实验室外保护目标处X射线年照射剂量计算结果表

关注点	靶点至预测点的距离 (m)	年受照射剂 量 (mSv/a)	受照者类 型
40MeV 电子加速器控制室内工作人员	17	1.97E-03	职业照射
速调管室内的工作人员	8	1.95E-03	职业照射
9MeV 工业 CT 实验室内的的工作人员	7	3.51E-02	公众照射
9MeV 工业 CT 控制室内的工作人员	15.5	1.97E-03	公众照射
走廊的工作人员	17	1.97E-03	公众照射
门厅的其他人员	26	2.54E-03	公众照射
暖通设备用房的其他人员	35	1.40E-03	公众照射
其离子水制备间、冷却循环水泵间、 变配电室的其他人员	35	1.40E-03	公众照射
实训厂房 B 内的人员	32	1.68E-03	公众照射
主射束墙外的其他人员	7	4.04E-03	公众照射

(二) 40MeV 电子直线加速器实验室中子环境影响分析

1、实验室四周墙体核算

本项目入射电子束能量为40MeV,其光核反应产生的总的中子产额,根据《辐射剂量与防护》P143图5.5可得总的中子产额为 $y_0=1.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$,经其自屏蔽体吸收后的中子产额为 $y=1.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$

根据表5.3,其中90°方向上的中子产额 $y_{90^\circ}=2y_0$, $y_{90^\circ}=0.5y$,

由此可得 $y_{90^\circ}=0.5y=7.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$

$y_0=0.5y_{90^\circ}=0.25y=3.75 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$

根据式5.1,当加速器束流为I(μA)时,距靶r米处的中子注量率为:

$$\varphi(0^\circ \text{或} 90^\circ) = Iy(0^\circ \text{或} 90^\circ) \times 10^{-4}/r^2$$

$$\varphi(0^\circ) = Iy(0^\circ) \times 10^{-4}/r^2 = 2 \times 10^3 \times 3.75 \times 10^5 \times 10^{-4}/1^2 = 7.5 \times 10^4$$

$$\varphi(90^\circ) = Iy(90^\circ) \times 10^{-4}/r^2 = 2 \times 10^3 \times 7.5 \times 10^5 \times 10^{-4}/1^2 = 1.5 \times 10^5$$

当初级中子束是决定屏蔽层厚度的主要因素时,厚度d的屏蔽层后,中子的剂量当量指数率应满足以下不等式:

$$H_1(d) \leq \varphi_0 \zeta_n q / (2.8 \times 10^{-4} r^2) \leq H_L \dots\dots\dots(\text{式11.1-12})$$

所以相应的中子透射系数为：

$$\zeta_n \leq 2.8 \times 10^{-4} r^2 H_L / (\phi_0 q) \dots\dots\dots (式11.1-13)$$

H_L 是剂量当量率控制水平，单位是Sv/h，本项目取 2.5×10^{-6} Sv/h

ϕ_0 是距离靶1m处的中子注量率，单位是 $m^2 \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$

r 是源到参考点之间的距离，单位是m

q 是区域的居留因子，无量纲

ζ_n 是透射系数，单位是 $Sv \cdot cm^{-2}$

$2.8 \times 10^{-4} h \cdot s^{-1}$ ，是单位转换系数。

根据上式算出透射系数 ζ_n 后，根据相关资料查找所需的屏蔽厚度；由于这个厚度是用理论计算方法得到的，这些计算大致带有2倍的计算误差，所以为了安全起见，在应用上述方法算得所需的屏蔽厚度之后，还应添加一个半值层厚度。

对于A点： $\zeta_n \leq 2.8 \times 10^{-4} r^2 H_L / \phi_0 q = 2.8 \times 10^{-4} \times 2.5 \times 10^{-6} \times 10^2 / (7.5 \times 10^4) \times 1$
 $= 9.3 \times 10^{-13}$

据资料可得混凝土的质量厚度为 $370 g \cdot cm^{-2}$ ，即 $d = 370 / 2.3 = 161 cm$ 。另外添加一个半值层厚度，查阅图5.14，得半值层为18cm，这样确定A墙混凝土厚度为179cm。

对于B、C点： $\zeta_n \leq 2.8 \times 10^{-4} r^2 H_L / \phi_0 q = 2.8 \times 10^{-4} \times 2.5 \times 10^{-6} \times 6.5^2 / (1.5 \times 10^5) \times 1$
 $= 1.97 \times 10^{-13}$

据资料可得混凝土的质量厚度为 $450 g \cdot cm^{-2}$ ，即 $d = 440 / 2.3 = 191 cm$ 。另外添加一个半值层厚度，查阅图5.14，得半值层为18cm，这样确定A墙混凝土厚度为209cm。

对于C点： $\zeta_n \leq 2.8 \times 10^{-4} r^2 H_L / \phi_0 q = 2.8 \times 10^{-4} \times 2.5 \times 10^{-6} \times 7^2 / (1.5 \times 10^5) \times 1$
 $= 2.29 \times 10^{-13}$

据资料可得混凝土的质量厚度为 $435 g \cdot cm^{-2}$ ，即 $d = 435 / 2.3 = 189 cm$ 。另外添加一个半值层厚度，查阅图5.14，得半值层为18cm，这样确定A墙混凝土厚度为207cm。

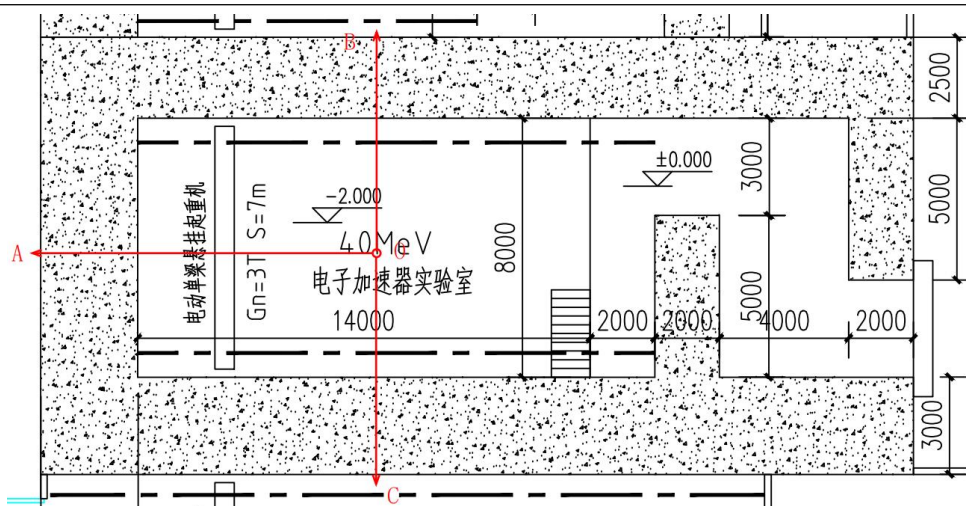


图11.1-2 40MeV电子直线加速器实验室关注点选取

2、实验室顶部墙体核算：

如图所示，根据中子源到参考点P的距离，屋顶屏蔽材料对中子的透射系数

$$\zeta_{nr} \leq 3.3 \times 10^{-5} r^2 H_L / \varphi_0 / \Omega \dots \dots \dots (\text{式11.1-14})$$

$$\Omega = 4 \text{tg}^{-1} (ab/cd) \dots \dots \dots (\text{式11.1-15})$$

Ω 是源对屋顶所长的立体角，单位sr，其于符号意义及单位同前

40MeV实验室屋顶屏蔽为2000mm混凝土，本项目电子最高能量为40MeV，靶材为钨，经自屏蔽体吸收后中子源强为 $1.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$ 。按级联中子为总中子数5%考虑（2000mm混凝土对蒸发中子的屏蔽能力很强，可不考虑蒸发中子逸出屋顶），则级联中子源强为 $7.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$

计算可得：

$$\begin{aligned} \zeta_{nr} &\leq 3.3 \times 10^{-5} r^2 H_L / \varphi_0 / \Omega \\ &= 3.3 \times 10^{-5} \times 2.5 \times 10^{-6} \times 10^2 / (7.5 \times 10^3) / [4 \times \text{tg}^{-1} (7 \times 4 / 7 / 10)] \\ &= 1.17 \times 10^{-13} \end{aligned}$$

查附图33得混凝土的质量厚度为 $450 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，即 $d = 450 / 2.3 = 196 \text{ cm}$ 。这样确定屋顶混凝土厚度为196cm。

3、实验室迷道防护门核算：

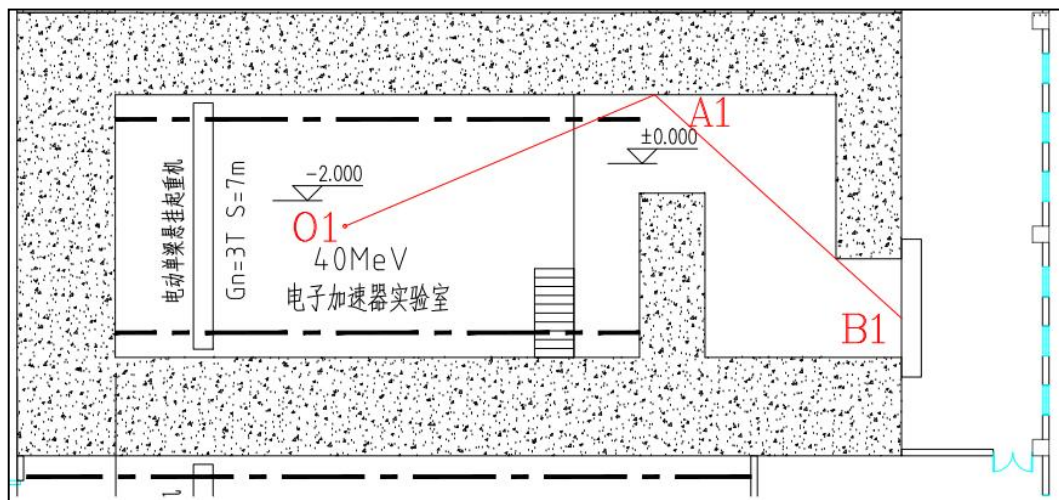


图 11.1-3 40MeV 电子直线加速器实验室迷宫散射路径示意图

本项目40MeV实验室迷宫主要是受散射线影响，实验室迷宫散射路径为O1→A1→B1，O1A1路径长度为10.27m，A1B1路径长度为10.16m；

对于反射中子的屏蔽计算，在考察反射中子那一点上的屏蔽层厚度，可由下式算得屏蔽材料对反射中子的透射系数来确定，即：

$$\zeta_{n, rR} \leq 2.77 \cdot r_1^2 H_L \cdot r_R^2 / (Y \cdot a_n \cdot a \cdot q) \dots \dots \dots (\text{式11.1-16})$$

$\zeta_{n, rR}$ 是透射系数，单位是 $Sv \cdot cm^2$

Y是单位时间内沿准直方向的单位立体角内发射的中子数，单位是 $sr^{-1} s^{-1}$

a_n 是中子在 θ_R 方向上的反射系数，查图6.5得 6×10^{-2}

a是反射物上的投照面积，约 $16.8m^2$

r_1 是源到反射点的距离

r_R 是反射点到参考点的距离

经计算， $\zeta_{n, rR} = 2.77 \times 2.5 \times 10^{-6} \times 10.27^2 \times 10.16^2 / (1.5 \times 10^6 \times 2 \times 10^3 \times 6 \times 10^{-2} \times 16.8 / 4\pi) = 3.13 \times 10^{-10}$

查附图33得混凝土的质量厚度为 $120g \cdot cm^{-2}$ ，即 $d = 120 / 2.3 = 52cm$ 。这样确定反射点混凝土厚度为52cm，由于中子经反射点后剂量率大大降低，因此屏蔽门可采用与反射点屏蔽墙厚度相同的屏蔽，以满足要求。即防护门可采用52cm的混凝土防护中子。

根据NCRP144号报告图4.11可知，中子平均能量与不同屏蔽材料的什值层的关系，理论外推后可得，当中子能量为40MeV时，混凝土的什值层为264cm，聚乙烯的什值层为138.5cm，因此52cm的混凝土折合成聚乙烯约29.3cm，设计厚度

为30cm，满足要求。

4、关注点剂量估算：

根据设计厚度，据资料可得屏蔽体质量厚度，根据质量厚度查找对应的透射系数 ζ_n ，再通过 $H(d) = \varphi_0 \zeta_n q / (2.8 \times 10^{-4} r^2)$ 计算得到关注点的剂量率，进而得到关注点年剂量。

对于A点，当设计厚度为300cm时，所受中子所致年剂量为1.34E-04mSv/a；

对于B点，当设计厚度为250cm时，所受中子所致年剂量为6.34E-02mSv/a；

对于C点，当设计厚度为300cm时，所受中子所致年剂量2.54E-03mSv/a；

对于迷道门，所受中子所致年剂量为7.98E-04mSv/a。

各保护目标的年有效剂量可根据关注点处的剂量进行计算得到，详见下表：

表11.1-9 本项目40MeV电子加速器实验室外保护目标处中子年照射剂量计算结果表

关注点	靶点至预测点的距离 (m)	年受照射剂量 (mSv/a)	受照者类型
40MeV 电子加速器控制室内工作人员	17	7.98E-04	职业照射
速调管室内的工作人员	8	3.97E-05	职业照射
9MeV 工业 CT 实验室内的工作人员	7	1.29E-03	公众照射
9MeV 工业 CT 控制室内的工作人员	15.5	7.98E-04	公众照射
走廊的工作人员	17	7.98E-04	公众照射
门厅的其他人员	26	9.38E-05	公众照射
暖通设备用房的其他人员	35	5.18E-05	公众照射
其离子水制备间、冷却循环水水泵间、 变配电室的其他人员	35	5.18E-05	公众照射
实训厂房 B 内的人员	32	6.19E-05	公众照射
主射束墙外的其他人员	7	2.73E-06	公众照射

(三) 40MeV 电子直线加速器实验室剩余辐射（感生放射性）环境影响分析

1、感生放射性的产生

加速器运行时在部件、靶等部位，在产生瞬发辐射的过程中，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，会使里面原来稳定的核素转变成带有各种放射性的核素，使其产生感生放射性，发生活化。在加速器停机后，瞬发辐射立即消失，但感生放射性依然存在，产生的放射性核素依然会按照各自的衰变规律，发出 γ 、 β 等射线。感生放射性强度取决于加速粒子的能量、种类、流强、加速器运行时间、被照材料性质等因素。

2、感生放射性的影响

加速器产生的感生放射性对周围环境的辐射影响较小，主要的影响对象是加速器停机后，需要进入加速器实验室进行检查、维护维修操作的工作人员。由于加速器设置有自屏蔽体，检查人员所受的感生放射性的照射较小；感生放射性是加速器设备维修维护人员的主要辐射来源。

因此，本次评价主要考虑加速器结构部件、空气、冷却水等部位的感生放射性。加速器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。加速器产生感生放射性的主要部位是靶周围的部件等，其主要材料为铁、不锈钢、铜、铝和铝合金以及各种烃类。相关实验研究表明，加速器关机后所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，更换、退役产生的放射性废物交由有资质的单位回收处理。对环境产生的影响较小。实验室空气的感生放射性，由于实验室设置了专门的通排风系统，产生的放射性气体经排风管道收集后，经屋顶排入空气中，因此可忽略不计，本项目主要考虑冷却水的感生放射性。

加速器系统中，用于加速器加速管等的冷却水，在中子辐射场的照射下会被活化。高能中子与冷却水中的氢和氧发生活化反应，产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 等放射性核素。其中， ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 的半衰期很短，加速器停机后，这些核素将迅速衰变，浓度也会很快降低。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 。

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环使用，不外排。只有在相关部位检修时，才需要将设备内可能残留有少量冷却水进行排放。本项目拟为 40MeV 实验室设置 1 个冷却水暂存容器，用于暂存检修时排放的冷却水。经过一定时间暂存，短半衰期核素 ^{15}O 、 ^{13}N 和 ^{11}C 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 。对容器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市政管网。

（四）40MeV 电子直线加速器实验室保护目标分析

本项目 40MeV 电子加速器实验室保护目标同时受到 X 射线、中子的影响，因此需综合考虑对他们的影响。

表11.1-10 本项目40MeV电子加速器实验室外关注点处年照射剂量计算结果表

关注点	年受X射线照射剂量 (mSv/a)	年受中子照射剂量 (mSv/a)	合计	受照者类型
40MeV 电子加速器控制室	1.97E-03	7.98E-04	2.77E-03	职业照射

内工作人员				
速调管室内的工作人员	1.95E-03	3.97E-05	1.99E-03	公众照射
9MeV 工业 CT 实验室内的 工作人员	3.51E-02	1.29E-03	3.64E-02	公众照射
9MeV 工业 CT 控制室内的 工作人员	1.97E-03	7.98E-04	2.77E-03	公众照射
走廊的工作人员	1.97E-03	7.98E-04	2.77E-03	公众照射
门厅的其他人员	2.54E-03	9.38E-05	2.64E-03	公众照射
暖通设备用房的其他人员	1.40E-03	5.18E-05	1.45E-03	公众照射
其离子水制备间、冷却循 环水水泵间、变配电室的 其他人员	1.40E-03	5.18E-05	1.45E-03	公众照射
实训厂房 B 内的人员	1.68E-03	6.19E-05	1.74E-03	公众照射
主射束墙外的其他人员	4.04E-03	2.73E-06	4.04E-03	公众照射

从上表可以看出，40MeV 实验室建成后，所致关注点职业人员受年附加有效剂量最大为 2.77E-03mSv/a，低于职业照射剂量约束值 5.0mSv/a；所致公众受年附加有效剂量最大为 3.64E-02mSv/a，低于公众照射剂量约束值 0.1mSv/a。

二、9MeV 工业 CT 实验室

（一）关注点剂量选取

以下就 9MeV 直线加速器运营中产生的 X 射线、臭氧和噪声的影响进行预测评价，选择各侧墙体外 30cm 处为关注点，关注点示意图见下图。

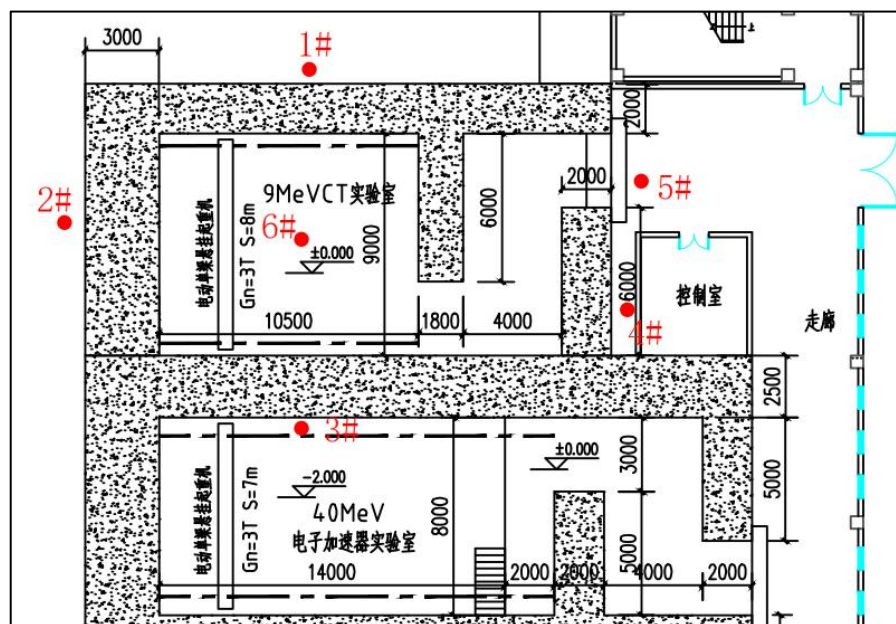


图 11.2-1 9MeV 工业 CT 实验室关注点示意图

各侧墙体外关注点导出控制剂量按下式进行计算：

$$\dot{H} = \dot{H}_c / (t \cdot U \cdot T) \dots\dots\dots(\text{式 } 11.2-1)$$

式中： $\dot{H}$ —— 导出剂量率参考控制水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

$\dot{H}_c$ —— 年剂量参考控制水平，职业人员取 $5000\mu\text{Sv/年}$ ，公众取 $100\mu\text{Sv/年}$ ；

U —— 探伤装置向关注点照射的使用因子，此处取 1；

T —— 人员在相应关注点驻留的居留因子；

t —— 探伤装置年工作时间，1000h。

各墙面及屋顶参数选取及计算结果见表 11.2-1。

表11.2-1 关注点控制剂量水平参数选取及计算结果表

关注点		受照类型	使用因子	$\dot{H}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	关注点的最高剂量率参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
1#	9MeV实验室西北面墙外30cm处	公众	1	0.1	2.5	0.1
2#	9MeV实验室西南面墙外30cm处 (主射方向)	职业	1	5.0	2.5	2.50
3#	9MeV实验室东南面墙外30cm处 (40MeV电子加速器实验室)	公众	1	0.1	2.5	0.1
4#	9MeV实验室东北面墙外30cm处	公众	1	0.1	2.5	0.1
5#	迷道门	职业	1	2.50	2.5	2.50
6#	9MeV 实验室屋顶上方	公众	1	10	/	10

注：①关注点的最高剂量率参考控制水平($H_{e,max}$)为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，本次评价参考 $\dot{H}$ 和 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 中较小水平进行评价。②本项目实验室上方屋顶不可到达，故剂量率参考控制水平保守取 $10\mu\text{Sv/h}$ 。

(二) 9MeV 工业 CT 实验室墙体厚度核算

1、主射方向屏蔽厚度核算：

有用线束屏蔽因子由式 11.2-2、11.2-3 计算。

$$B = \frac{\dot{H} * R^2}{I * H_0} \dots\dots\dots(\text{式 } 11.2-2)$$

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式 } 11.2-3)$$

式中：

$\dot{H}$ —— 剂量率参考控制水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

R —— 辐射源至关注点的距离，取 m；

I —— 最大管电流，取 5mA；

H_0 —— 距辐射源点（靶点）1m 处输出量，根据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表 1，X 射线束能量为 9MeV 时，最大 X 射线空气比释动能率为 30Gy/min，当 X 射线束能量 $\leq$ 9MeV 时，焦点尺寸 $\leq$ 2.0mm，本项目 9MeV 电子直线加速器额定束流强度为 150 μA ，经计算， H_0 取值为 0.63mGy·m²/(mA·min)，即 3.78 $\times$ 10⁴ $\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$ ；

H_L ——距靶点 1m 处 X 射线管组装体的泄漏辐射剂量率，单位为微希伏每小时（ $\mu\text{Sv/h}$ ），据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）5.3.7，X 射线泄漏量取 0.1%；

TVL——什值层厚度，根据《辐射防护手册》（第三分册）图 4.8，9MeV 能量的 X 射线入射到普通混凝土（密度为 2.35g/cm³）中的什值层约为 420mm；

B ——屏蔽透射因子公式见（式 11.2-2）；

9MeV 工业 CT 实验室四周墙面屏蔽参数选取及计算结果见表 11.2-2。

表 11.2-2 9MeV 工业 CT 实验室主射方向屏蔽体理论厚度计算表

墙体	剂量参考 控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	关注点至 辐射源的 距离(m)	透射 因子	理论计算 屏蔽厚度 (mm)	实际设 计厚度 (mm)	是否满 足屏蔽 要求
9MeV 实验室西 南面墙外 30cm 处（主射方向）	2.5	8.55	3.22E-02	627	3000	满足

注：混凝土密度为 2.35 g/m³。

2、非主射方向屏蔽厚度核算：

非主射辐射屏蔽因子由式11.2-1、11.2-4计算：

$$\dot{H}_{\text{漏}} = \frac{\dot{H}_L \cdot B_2}{R^2} \dots\dots\dots(\text{式 11.2-4})$$

B₂—非主射屏蔽透射因子；

$\dot{H}_{\text{漏}}$ —预测点剂量率（μSv/h）；

H_L —距靶点 1m 处 X 射线管组装体的泄漏辐射剂量率，单位为微希伏每小时（μSv/h），根据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表 1，X 射线束能量为 9MeV 时，最大 X 射线空气比释动能率为 30Gy/min，据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）5.3.7，X 射线泄漏量取 0.1%，X 射线的辐射权重因子取 1，因此取值为 1800Sv/h；

R—参考点离靶点的距离，m

对于估算出的屏蔽透射因子B₂，所需的屏蔽体厚度X按下式计算：

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式11.2-5})$$

式中：TVL——什值层厚度，根据《辐射防护手册》（第三分册）图4.8，9MeV能量的X射线入射到普通混凝土（密度为2.35g/cm³）中的什值层约为420mm；

表 11.2-3 9MeV 工业 CT 实验室非主射方向屏蔽体理论厚度计算表

墙体	剂量参考 控制水平 (μSv/h)	关注点至 辐射源的 距离(m)	透射 因子	理论计算 屏蔽厚度 (mm)	实际设 计厚度 (mm)	是否 满足 屏蔽 要求
9MeV 实验室西北 面墙外 30cm 处	0.1	6.80	2.57E-03	1088	2000	满足
9MeV 实验室东南 面墙外 30cm 处 (40MeV 电子加速 器实验室)	0.1	7.30	2.96E-03	1062	2500	满足
9MeV 实验室东北 面墙外 30cm 处	0.1	13.35	9.90E-03	842	2000	满足
9MeV 实验室屋顶 上方	100	6.55	2.38E-01	262	2000	满足

3、散射辐射影响

由（式11.2-1）和（式11.6-7）计算散射辐射影响。

$$B = \frac{\dot{H}_c \cdot R_s^2 \cdot R_0^2}{I \cdot H_0 \cdot F \cdot a} \dots\dots\dots(\text{式11.2-6})$$

式中：

B—散射屏蔽透射因子；

Hc—预测点剂量率（μSv/h）；

R_s—散射体至关注点的距离，m；

R₀—靶点至探伤工件的距离，均取0.5m；

I—额定管电流，150μA；

H₀—距辐射源点（靶点）1m 处输出量，根据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表 1，X 射线束能量为 9MeV 时，最大 X 射线空气比释动能为 30Gy/min，当 X 射线束能量≤9MeV 时，焦点尺寸≤2.0mm，本项目 9MeV 电子直线加速器额定束流强度为 150μA，经计算，H₀取值为 0.63mGy·m²/(mA·min)，即 3.78×10⁴μGy·m²/(mA·h)；

F—R₀处的辐射野面积；

α—散射因子，可保守取值为α_w·10000/400，α_w保守取1.9×10⁻³；

对于估算出的屏蔽投射因子B，所需的屏蔽体厚度X按下式计算：

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式11.2-7})$$

式中：TVL——什值层厚度，根据《辐射防护手册》（第三分册）图4.8，9MeV能量的X射线入射到普通混凝土（密度为2.35g/cm³）中的什值层约为420mm；

表 11.2-4 9MeV 工业 CT 实验室散射方向屏蔽体理论厚度计算表

墙体	剂量参考 控制水平 (μSv/h)	关注点至 辐射源的 距离(m)	透射 因子	理论计算 屏蔽厚度 (mm)	实际设 计厚度 (mm)	是否 满足 屏蔽 要求
9MeV 实验室西北 面墙外 30cm 处	0.1	6.80	2.15E-02	701	2000	满足
9MeV 实验室东南 面墙外 30cm 处 (40MeV 电子加速 器实验室)	0.1	7.30	2.47E-02	675	2500	满足
9MeV 实验室东北 面墙外 30cm 处	0.1	13.35	8.27E-02	455	2000	满足

9MeV 实验室屋顶上方	100	6.55	4.98E-01	127	2000	满足
--------------	-----	------	----------	-----	------	----

4、复合分析

非主射辐射的屏蔽厚度与散射辐射的屏蔽厚度相差一个什值层（TVL）厚度或更大时，采用其中较厚的屏蔽；相差不足一个什值层（TVL）厚度时，在较厚的屏蔽上增加一个半值层（HVL）厚度。由表11-4可知，本项目散射辐射的屏蔽厚度与非主射辐射的屏蔽厚度相差大于一个什值层（TVL）厚度，因此本项目屏蔽体在考虑散射辐射及非主射辐射屏蔽厚度计算时采用其中较厚的屏蔽。

表11.2-5 本项目9MeV工业CT实验室屏蔽厚度计算与实际设计厚度汇总表

关注点	有用线束需屏蔽厚度（mm）	非主射辐射需屏蔽厚度（mm）	散射辐射需屏蔽厚度（mm）	理论计算屏蔽厚度（mmPb）	设计厚度（mmPb）	备注
9MeV实验室西南面墙外30cm处（主射方向）	627	/	/	627	3000	满足要求
9MeV 实验室西北面墙外30cm 处	/	1088	701	1088	2000	满足要求
9MeV 实验室东南面墙外30cm 处（40MeV 电子加速器实验室）	/	1062	675	1062	2500	满足要求
9MeV 实验室东北面墙外30cm 处	/	842	455	842	2000	满足要求
9MeV 实验室屋顶上方	/	262	127	262	2000	满足要求

根据上表，本项目9MeV工业CT实验室设计屏蔽厚度均能满足屏蔽要求。

5、9MeV 工业 CT 实验室迷道入口人员通道门屏蔽厚度核算

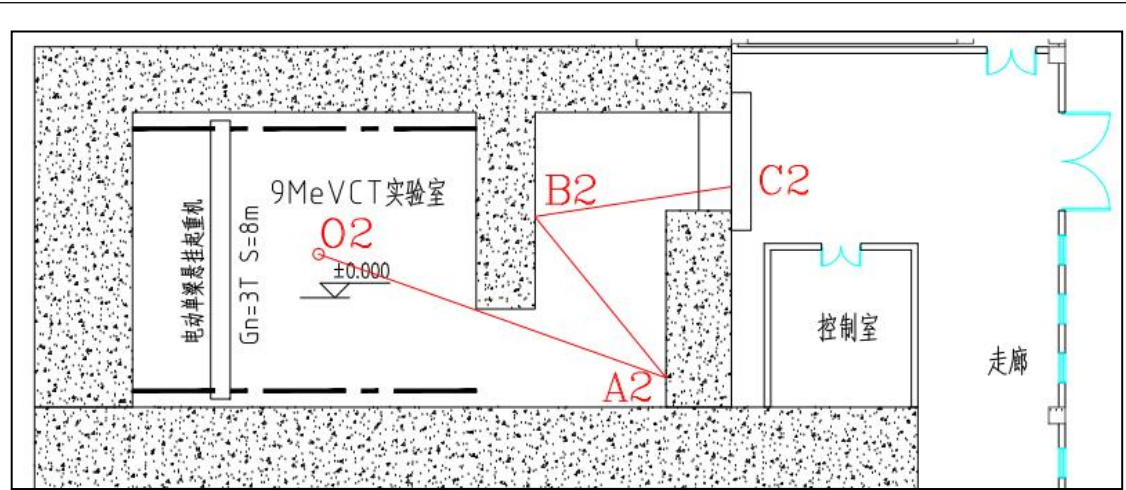


图 11.2-1 9MeV 工业 CT 实验室迷宫散射路径示意图

迷宫内O2、A2、B2点的辐射剂量率主要考虑散射辐射的影响，由式11.2-8核算。屏蔽物质厚度X计算公式由式11.2-9、式11.2-10、式11.2-11计算。

$$\dot{H} = \frac{I \cdot H_0 \cdot B}{R_s^2} \cdot \frac{F \cdot a}{R_0^2} \dots\dots\dots(\text{式11.2-8})$$

$$B = 10^{-X/TVL} \dots\dots\dots(\text{式11.2-9})$$

$$B = \frac{\dot{H}_c \cdot R_s^2}{I \cdot H_0} \cdot \frac{R_0^2}{F \cdot a} \dots\dots\dots(\text{式11.2-10})$$

$$X = -TVL \cdot \lg B \dots\dots\dots(\text{式11.2-11})$$

式中：

$\dot{H}_c$ —表11-1中确定的剂量率参考水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

$\dot{H}$ —关注点散射辐射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

R_s —散射体至关注点的距离，m；

R_0 —靶点至探伤工件的距离，取 0.5m；

I —最大电流，取 0.15mA；

X —屏蔽体厚度，mm；

B —屏蔽透射因子。

TVL—什值层厚度，据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表2，X射线能量束为9MeV时，对应的密度为 $7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 的钢的半值层为

30mm，经计算，什值层厚度为9.03mm；

H_0 —距辐射源点（靶点）1m 处输出量，根据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表 1，X 射线束能量为 9MeV 时，最大 X 射线空气比释动能为 30Gy/min，当 X 射线束能量 $\leq$ 9MeV 时，焦点尺寸 $\leq$ 2.0mm，本项目 9MeV 电子直线加速器额定束流强度为 150 μ A，经计算， H_0 取值为 0.63mGy $\cdot$ m²/(mA $\cdot$ min)，即 3.78 $\times$ 10⁴ μ Gy $\cdot$ m²/(mA $\cdot$ h)；

F— R_0 处的辐射野面积；

α —散射因子，可保守取值为 $\alpha_w \cdot 10000/400$ ， α_w 保守取 1.9×10^{-3} 。

本项目 9MeV 实验室迷道主要是受散射线影响，实验室迷道散射路径为 O2 $\rightarrow$ A2 $\rightarrow$ B2 $\rightarrow$ C2，O2A2 路径长度为 11.27m，A2B2 路径长度为 6.35m，B2C2 路径长度为 6.08m；根据式 11.2-8、式 11.2-9 和式 11.2-10 计算出 9MeV 实验室迷道入口防护铅门所需厚度见下表：

表11.2-6 9MeV工业CT实验室迷道入口防护铅门厚度校核

场所	Hc-关注点散射 辐射剂量率 (μ Sv/h)	H_0 -距辐射源点 (靶点) 1m 处输出 量 μ Gy $\cdot$ m ² /(mA $\cdot$ h)	R_s -散射体 至关注点 的距离 (m)	B-屏蔽透 射因子	X-屏蔽体厚 度 (mm)
9MeV 实 验室	2.5	3.78 $\times$ 10 ⁴	23.7	2.48 $\times$ 10 ⁻¹	5.47

计算得出人员通道门满足 2.5 μ Sv/h 所需的厚度最大为 5.47mm，迷道入口防护钢门设计屏蔽厚度为 18mm，入口处满足 2.5 μ Sv/h 防护要求。

（三）运行阶段对环境的影响

本项目 9MeV 电子直线加速器，主射方向定向投向西南侧墙体，实验室无地下楼层和地下室、屋顶亦为人员不可到达处，主射线束不会对其造成影响，因此地面及屋顶不单独进行核算；9MeV 工业 CT 实验室西南侧考虑有用线束，其余方位考虑漏射和散射辐射。

1、预测点选取

选取 9MeV 实验室四周及迷道门，共 12 个预测点位。

2、预测模式

（1）有用线束（主射）辐射影响

由式 11.2-12 $\sim$ 11.2-14 计算有用线束辐射影响。

$$\dot{H}_{有} = \frac{I \cdot H_0 \cdot B_1}{R^2} \dots\dots\dots(\text{式 11.2-12})$$

$$B_1 = 10^{-X/TVL} \dots\dots\dots(\text{式 11.2-13})$$

$$H = \dot{H}_{有} \cdot t \cdot T \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots(\text{式 11.2-14})$$

式中：H —— 参考点的附加有限剂量，mSv/a；

$\dot{H}$ —— 关注点的剂量率，μSv/h；

R —— 参考点离靶的距离，m；

H₀ —— 距辐射源点（靶点）1m处输出量，根据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表1，X射线束能量为9MeV时，最大X射线空气比释动能率为30Gy/min，当X射线束能量≤9MeV时，焦点尺寸≤2.0mm，本项目9MeV电子直线加速器额定束流强度为150μA，经计算，H₀取值为0.63mGy·m²/(mA·min)，即3.78×10⁴μGy·m²/(mA·h)；

I —— 管电流，150μA；

t —— 年工作时间，1000 h；

T —— 人员在相应关注点驻留的居留因子；

B₁ —— 屏蔽材料对初级 X 射线束的屏蔽透射因子；

关注点有用线束辐射年照射剂量率计算结果见表11.2-7。

表11.2-7 有用线束照射剂量计算参数及结果表

关注点	靶点至预测点的距离（m）	透射因子	预测点剂量（μSv/h）	居留因子	年受照射剂量（mSv/a）	受照者类型
9MeV实验室西南面墙外30cm处（主射方向）	8.55	7.20E-08	3.72E-04	1	3.72E-04	公众

（2）漏射辐射影响

已知屏蔽体厚度，漏射屏蔽透射因子可根据（式11.2-13）进行计算，由（式11.2-15）和（式11.2-14）计算漏射辐射对周围环境的影响。

$$\dot{H}_{漏} = \frac{\dot{H}_L \cdot B_2}{R^2} \dots\dots\dots(\text{式11.2-15})$$

式中：

B₂—漏射屏蔽透射因子；

$\dot{H}_{漏}$ —预测点剂量率（μSv/h）；

H_L—距靶点 1m 处 X 射线管组装体的泄漏辐射剂量率，单位为微希伏每小时（μSv/h），根据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表 1，X 射线束能量为 9MeV 时，最大 X 射线空气比释动能率为 30Gy/min，据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）5.3.7，X 射线泄漏量取 0.1%，X 射线的辐射权重因子取 1，因此取值为 1800Sv/h；

R—参考点离靶点的距离，m。

各参数取值及各个关注点漏射辐射年照射剂量率计算结果见表11.2-8。

表11.2-8 漏射照射剂量计算参数及预测结果表

关注点	靶点至预测点的距离（m）	屏蔽透射因子B ₂	预测点剂量率（μSv/h）	居留因子	年受照射剂量（mSv/a）	受照者类型
9MeV 实验室西北面墙外 30cm 处	6.8	1.73E-05	6.74E-04	1	6.75E-04	公众照射
9MeV 实验室东南面墙外 30cm 处（40MeV 电子加速器实验室）	7.3	1.12E-06	3.77E-05	1	3.77E-05	公众照射
9MeV 实验室东北面墙外 30cm 处	13.35	1.73E-05	1.75E-04	1	1.75E-04	公众照射
9MeV 实验室屋顶上方	6.55	1.73E-05	7.26E-04	1/16	4.54E-05	公众照射

（3）散射辐射影响

由（式11.2-16）和（式11.2-14）计算散射辐射影响。

$$\dot{H}_{散} = \frac{I \cdot H_0 \cdot B_3}{R_s^2} \cdot \frac{F \cdot \alpha}{R_0^2} \dots\dots\dots (式11.2-16)$$

式中：

B₃—散射屏蔽透射因子；

$\dot{H}_{散}$ —预测点剂量率（μSv/h）；

R_s—散射体至关注点的距离，m；

R₀—靶点至探伤工件的距离，均取0.5m；

I—额定管电流，150μA；

H_0 —距辐射源点（靶点）1m 处输出量，根据《无损检测用电子直线加速器》（GB/T20129-2015）表 1，X 射线束能量为 9MeV 时，最大 X 射线空气比释动能为 30Gy/min，当 X 射线束能量 $\leq$ 9MeV 时，焦点尺寸 $\leq$ 2.0mm，本项目 9MeV 电子直线加速器额定束流强度为 150 μ A，经计算， H_0 取值为 0.63mGy $\cdot$ m²/(mA $\cdot$ min)，即 3.78 $\times$ 10⁴ μ Gy $\cdot$ m²/(mA $\cdot$ h)；

F— R_0 处的辐射野面积；

α —散射因子，可保守取值为 $\alpha_w \cdot 10000/400$ ， α_w 保守取 1.9×10^{-3} ；

本项目探伤机辐射剂量率计算参数和预测结果见表 11-9。

表11.2-9 散射照射剂量计算参数及预测结果表

关注点	靶点至预测点的距离（m）	屏蔽透射因子 B_2	预测点剂量率（ μ Sv/h）	居留因子	年受照射剂量（mSv/a）	受照者类型
9MeV 实验室西北面墙外 30cm 处	6.8	1.73E-05	5.58E-02	1	2.79E-02	公众照射
9MeV 实验室东南面墙外 30cm 处（40MeV 电子加速器实验室）	7.3	1.12E-06	3.12E-03	1	1.56E-03	公众照射
9MeV 实验室东北面墙外 30cm 处	13.35	1.73E-05	1.45E-02	1	7.25E-03	公众照射

（4）对关注点及保护目标的综合分析

①本项目对处于有用线束照射、漏射照射及散射照射范围内关注点年照射剂量考虑此三种照射剂量的叠加值。

表11.2-10 本项目9MeV实验室外关注点处年照射剂量计算结果表

关注点	年受有用线束照射剂量（mSv/a）	年受漏射照射剂量（mSv/a）	年受散射照射剂量（mSv/a）	年受照射剂量（mSv/a）	受照者类型
9MeV 实验室西南面墙外 30cm 处（主射方向）	3.72E-04	/	/	3.72E-04	职业照射
9MeV 实验室西北面墙外 30cm 处	/	6.75E-04	2.79E-02	2.86E-02	公众照射
9MeV 实验室东南面墙外 30cm 处（40MeV 电子加速器实验室）	/	3.77E-05	1.56E-03	1.60E-03	公众照射
9MeV 实验室东北面墙外 30cm 处	/	1.75E-04	7.25E-03	7.43E-03	公众照射

表11.2-11 本项目9MeV实验室外关注点处年照射剂量计算结果表

关注点	靶点至预测点的距离 (m)	年受照射剂量 (mSv/a)	受照者类型
9MeV 工业 CT 控制室内的工作人员	14	5.92E-03	职业照射
40MeV 电子加速器实验室内工作人员	8	1.17E-03	公众照射
40MeV 电子加速器控制室内工作人员	24	2.02E-03	公众照射
速调管室内的工作人员	19	2.06E-04	公众照射
走廊的工作人员	19	3.20E-03	公众照射
门厅的其他人员	18	3.60E-03	公众照射
暖通设备用房的其他人员	23	2.20E-03	公众照射
去离子水制备间、冷却循环水水泵间、 变配电室的其他人员	29	1.39E-03	公众照射
实训厂房 B 内的人员	34	1.00E-03	公众照射
10MeV 电子束辐照实验室的工作人员	42	6.60E-04	公众照射
10MeV 电子束辐照实验室一层设备用房、 控制室的工作人员	34	1.01E-03	公众照射
主射束墙外的其他人员	5	3.72E-04	公众照射

从上表可以看出，9MeV 实验室建成后，所致关注点职业人员受年附加有效剂量最大为 5.92E-03mSv/a，低于职业照射剂量约束值 5.0mSv/a；所致公众受年附加有效剂量最大为 3.60E-03mSv/a，低于公众照射剂量约束值 0.1mSv/a。

三、10MeV 电子束辐照实验室

本项目拟在辐照实验室内使用一台电子加速器，属于 II 类射线装置，额定电子束能量为 10MeV，额定电子束流为 2mA，年出束时间约 2000h，主射方向定向向下。加速器在运行过程中，主要环境影响为电子线、X 射线、臭氧。

（一）10MeV 电子束辐照实验室屏蔽体设计方案

10MeV 电子束辐照实验室于二者北侧建设，为 2 层钢筋混凝土结构建筑。1 层为电子束辐照室、变配电室、冷却循环水水泵间、去离子水之备件、设备用房、控制室、会议室及辅助办公室等，2 层为加速器主机室、暖通设备用房和电井等配套设施区域，2 层屋顶无人员活动；

（二）剂量率参考点选取

为预测加速器辐照室设计方案的屏蔽效果，拟在辐照室外选取有代表性的关注点进行预测。根据本项目工程特征及辐照室周围环境状况，选择剂量率参考点为辐照室和主机室四周屏蔽墙外 0.3m 处及迷道口处。剂量关注点情况列于表 11.3-1，关注点的分布见图 11.3-1（a）和图 11.3-1（b）。

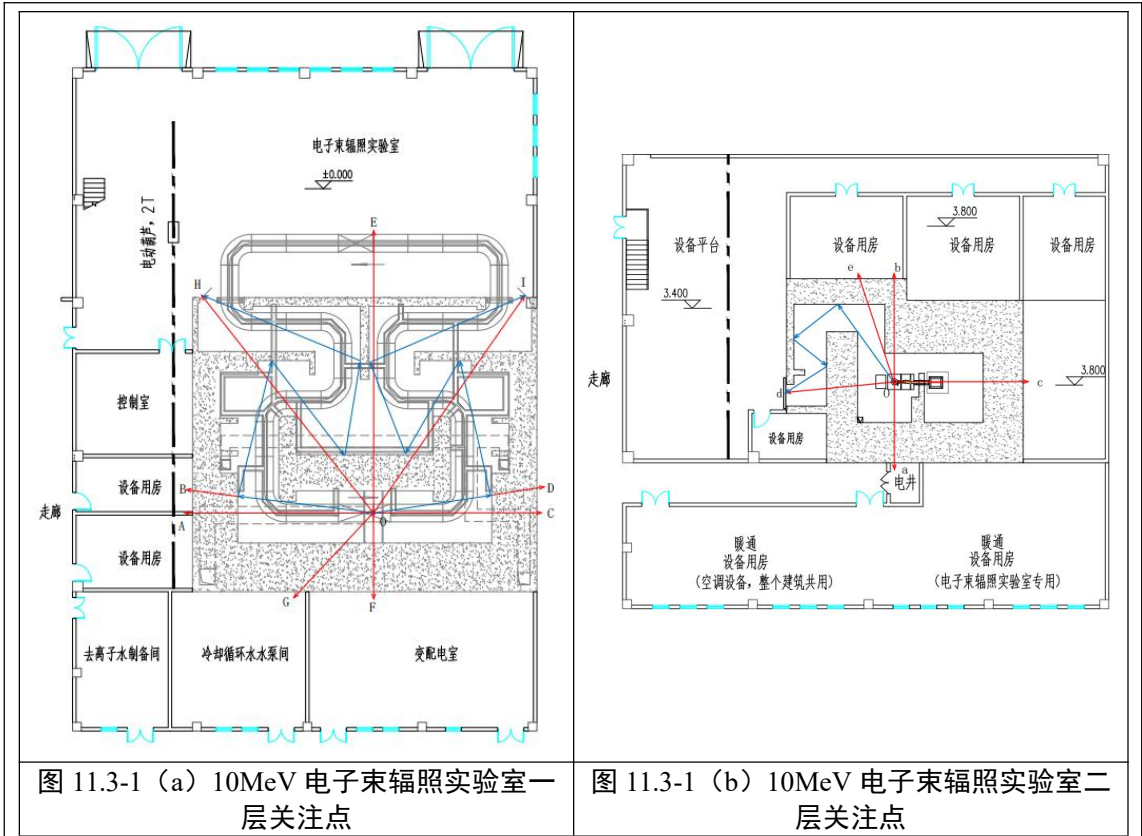


图 11.3-1 (a) 10MeV 电子束辐照实验室一层关注点

图 11.3-1 (b) 10MeV 电子束辐照实验室二层关注点

表 11.3-1 本项目屏蔽体外各参考点距源点距离一览表

楼层	参考点 编号	剂量率参考点位置			距源点（散射点） 距离（m）	性质
一 层 辐 照 室	A	设备用房	加速器西南墙外 30cm 处		10.85	职业
	B	设备用房	加速器西南墙外 30cm 处		11.05	职业
	C	辐照室外东北 侧道路	加速器东北墙外 30cm 处		9.55	职业
	D	辐照室外东北 侧道路	加速器东北墙外 30cm 处		9.85	公众
	E	物流传输作业 区	加速器西北墙外 30cm 处		15.5	公众
	F	变配电室	加速器东南墙外 30cm 处		4.8	公众
	G	冷却循环水水 泵间	加速器东南墙外 30cm 处		6.5	公众
	H	进货口	加速器西北墙左迷 道口	直射	15.7	公众
				散射	7.84, 7.87, 6.48, 5.76, 9.83	
	I	出货口	加速器西北墙右迷 道口	直射	15	公众
散射				6.89, 7.78, 6.45, 5.76, 9.70		
二	a	电井	加速器东南墙		4.7	职业

层 加 速 器 室	b	设备用房	加速器西北墙		6.0	职业
	c	设备用房	加速器东北墙		7.4	职业
	e	厂区道路上空	加速器屋顶		6.77	/
	d	防护门口	加速器西南墙迷道口	直射	6.1	职业
				散射	5.2, 6.2, 0.4	

(三) X 射线辐射影响分析

本次加速器机房辐照室和主机室的屏蔽计算采用《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》(HJ979-2018) 附录 A 中的相关计算公式进行墙体屏蔽厚度核算和计算各关注点处的辐射剂量率。

1、辐射影响预测公式

(1) X 射线发射率

本项目加速器运行时束流方向定向朝下，因此 X 射线 0°方向是地面（地下为土层），不需要防护。因此辐照室四周墙壁的厚度取决于 90°方向 X 射线，主机室四周的墙壁厚度也取决于漏束 90°方向 X 射线。

①辐照室 X 射线发射率

根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》(HJ979-2018) 附录 A 表 A.1, 10MeV 入射电子在距靶 1m 处侧向 90°的 X 射线发射率常数为 $13.5\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{mA}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ，靶材料为不锈钢，保守计算考虑修正因子取 1。

辐照室距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率 $D_{10}(90^\circ) = 60 \times 13.5 \times 2 \times 1 \text{ Gy/h} = 1.62 \times 10^3 \text{ Gy/h}$ 。

根据附录 A 表 A.4，10MeV 电子在侧向屏蔽能量取相应等效能量为 6MeV。

②主机室加速器束流损失所致的 X 射线发射率

根据厂家提供资料，本项目拟购加速器束流损失为 2%（即主机室漏束的等效能量为 3MeV、电子束流强度为 $4 \times 10^{-2} \text{ mA}$ ）。根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》(HJ979-2018) 附录 A 表 A.1，3MeV 入射电子在距靶 1m 处侧向 90°的 X 射线发射率常数为 $3.2\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{mA}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ，靶材料为不锈钢，保守计算考虑修正因子取 1。

主机室距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点吸收剂量率 $D_{10}(90^\circ) = 60 \times 3.2 \times 4 \times 10^{-2} \times 1 \text{ Gy/h} = 7.68 \text{ Gy/h}$ 。

根据附录 A 表 A.4，3MeV 电子在侧向屏蔽能量取相应等效能量为 1.9MeV。

(2) 透射比 B_x 的计算

根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》(HJ979-2018) 附录 A 中透射比 B_x 的计算公式如下:

$$B_x = (1 \times 10^{-6}) \left[\frac{H_M d^2}{D_{10}} \right] \dots\dots\dots \text{(公式 11.3-1)}$$

式中:

B_x ——X 射线的屏蔽透射比, 指在屏蔽体入射面的吸收剂量率, 经屏蔽厚度按该透射比减弱, 使屏蔽体的出射面剂量率达到所要求的水平;

H_M ——参考点最大允许周围剂量当量率($\mu\text{Sv/h}$);

d ——X 射线源与参考点之间的距离(m);

T ——居留因子。当参考点位置为人员全居留时取值 1, 部分居留时可取 1/4, 偶然居留时可取 1/16;

常数(1×10^{-6})为单位转换系数;

D_{10} ——距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率(Gy/h)。

$$D_{10} = 60 \cdot Q \cdot I \cdot f_e \dots\dots\dots \text{(公式 11.3-2)}$$

式中:

Q ——X 射线发射率($\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}$);

I ——电子束流强度(mA);

f_e ——X 射线发射率修正系数。

X 射线发射率数据是电子束打高 Z 靶的数据, 被辐照靶材料为“铁、铜”时, 0° 方向的修正系数 f_e 为 0.7, 90° 方向的修正系数 f_e 为 0.5; 被辐照靶材料为“铝、混凝土”时, 0° 方向的修正系数 f_e 为 0.5, 90° 方向的修正系数 f_e 为 0.3; 本项目为保守计算, X 射线发射率修正系数 f_e 取 1。

(3) 屏蔽墙体厚度的计算

本次评价屏蔽墙体厚度采用屏蔽材料的十分之一值层法。

$$B_x = 10^{-n} \quad \text{或} \quad n = \log_{10}(1/B_x) \dots\dots\dots \text{(公式 11.3-3)}$$

计算屏蔽体厚度, 可以保守的估算为:

$$S = T_l + (n-1)T_e \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11.3-4)}$$

式中:

S ——屏蔽体厚度 (cm);

T_l ——在屏蔽厚度中, 朝向辐射源的第一个十分之一值层 (cm);

T_e ——平衡十分之一值层, 该值近似于常数 (cm);

n ——为十分之一值层个数。

其中: T_l 和 T_e 值见《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》(HJ979-2018) 附录 A 中表 A.2, 即辐照室等效能量 6MeV, $T_l=35.5\text{cm}$, $T_e=35.5\text{cm}$; 主机室等效能量 1.9MeV, $T_l=22.1\text{cm}$, $T_e=20.1\text{cm}$, 散射 X 射线能量 0.5MeV, $T_l=15.2\text{cm}$, $T_e=11.9\text{cm}$ 。

(4) 迷道散射剂量率计算公式

$$H_{l,rj} = \frac{D_{10}\alpha_1 A_1 (\alpha_2 A_2)^{j-1}}{(d_1 \cdot d_{r1} \cdot d_{r2} \dots d_{rj})^2} \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11.3-5)}$$

式中:

$H_{l,rj}$ ——迷道外人口 (防护门) 散射剂量率, Sv/h;

α_1 ——入射到第一个散射体的 X 射线的散射系数;

α_2 ——从第一个散射体以后的物质散射出来的 X 射线的散射系数 (假设对以后所有散射过程是相同的);

A_1 ——X 射线入射到第一散射物质的散射面积 (m^2); (辐照室迷道散射面积 A_1 为第一次散射宽度与高度的乘积, 之后的散射面积均为迷道宽度与高度的乘积)。见示意图 11.3-1 (a), 图 11.3-1 (b)。

A_2 ——迷道的截面积 (m^2);

d_l ——X 射线源与第一散射物质的距离 (m);

$d_{r1}, d_{r2} \dots d_{rj}$ ——沿着迷道长轴的中心线距离 (m);

j ——指第 j 个散射过程。

(5) 天空反散射的计算

$$H = \frac{2.5 \times 10^{-2} (B_{XS} D_{10} \Omega^{1.3})}{(d_i d_s)^2} \quad \dots\dots\dots \text{(公式 11.3-6)}$$

式中：

H ——在距离 X 射线辐射源 d_s 处地面，天空反散射的 X 射线周围剂量当量率（Sv/h）；

B_{XS} ——X 射线屋顶的屏蔽透射比；

Ω ——由 X 射线源与屏蔽墙对应的立体角（Sr）；

d_i ——在屋顶上方 2m 处离靶的垂直距离（m）；

d_s ——X 射线源至 P 点的距离（m）。

（6）屋顶厚度计算

屋顶的屏蔽透射比 B_{XS} 为：

$$B_{XS} = 4 \times 10^{-5} \left[\frac{H_M d_i^2 d_s^2}{D_{10} \Omega^{1.3}} \right] \dots\dots\dots \text{（公式 11.3-7）}$$

式中： B_{XS} ——屋顶屏蔽体对 X 射线的屏蔽透射比；

H_M ——P 点所在位置的最大允许周围剂量当量率，Sv/h；

d_i ——从靶到屋顶以上两米的垂直距离，m；

d_s ——射线装置与计算点之间的距离，m；

Ω ——射线装置与屋顶之间包含的立体角，Sr；顶角为 2θ 的圆锥的立体角为一个单位球的球冠。 $\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta)$ 。

计算出屋顶屏蔽透射比 B_{XS} 后，按上述十分之一值层求解法计算出屋顶的屏蔽厚度。计算天空反散射参考点 P 为屏蔽墙外 20m-250m 范围内，因此 d_s 取最小值 20m（数据来源辐射防护手册（第一分册）辐射源与屏蔽：第 416 页第 8.3.1）。

（7）X 射线通过屋顶的侧向散射

通过混凝土屋顶 X 射线的侧向散射可用以下经验公式计算：

$$H = \frac{D_{10} F f(\theta)}{d_R^2 10^{1 + \left[\frac{(t-T_1)}{T_e} \right]}} \dots\dots\dots \text{（公式 11.3-8）}$$

式中：

H ——X 射线侧向散射周围剂量当量率(Sv/h)

D_{10} ——靶上方 1 米处 X 射线的吸收剂量率(Gy/h)；

F ——靶上方 1 米处照射野的面积(m²)；

$f(\theta)$ ——由表 A.5 中给出的 X 射线的角度分布函数；

d_R ——从屋顶上方束流中心到关注点的距离(m)；

t ——屋顶的厚度(m)；

T_1 、 T_e 分别为屋顶屏蔽材料的第一个和平衡十分之一值层(m)。

(8) 关注点透射剂量率计算公式

根据混凝土墙设计厚度，利用 $S = T_1 + (n-1)T_e$ ，求出 n 值。根据公式 $B_x = 10^{-n}$ 求出屏蔽墙透射比 B_x ，利用公式 11.3-9 反推计算出设计屏蔽墙体外 30cm 处剂量当量率，其计算公式如下：

$$H_M = (1 \times 10^6) \frac{D_{10}}{d^2} 10^{-n} \dots\dots\dots \text{(公式 11.3-9)}$$

3.2 屏蔽墙厚度计算

(1) 屏蔽墙厚度的计算

首先根据公式 11.3-1 计算出透射比 B_x ，代入公式 11.3-3，计算出 n 值，然后根据公式 11.3-4 计算出对应的混凝土厚度；其中参考点（距离屏蔽体外侧 0.3m 处）最大允许周围剂量当量率 H_M 取 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，居留因子保守取 1。项目辐照机房直射辐射屏蔽墙厚度计算结果见表 11.3-2；

表 11.3-2 直射辐射屏蔽墙厚度计算结果

楼层	参考点	墙体外环境	d (m)	$D_{10}(\text{Gy/h})$	B_x	n	所需混凝土厚度 S(cm)	设计厚度(cm)	是否满足
一层	西南墙外 30cm 处	A 设备用房	10.85	1.62E+03	1.82E-07	6.74	239.30	260	满足
		B 设备用房	11.05	1.62E+03	1.88E-07	6.72	238.73	264	满足
	东北墙外 30cm 处	C 辐照室外东北侧道路	9.55	1.62E+03	1.41E-07	6.85	243.23	260	满足
		D 辐照室外东北侧道路	9.85	1.62E+03	1.50E-07	6.82	242.28	264	满足
	西北墙外 30cm 处	E 物流传输作业区	15.5	1.62E+03	3.71E-07	6.43	228.30	260	满足
	东南墙外 30cm 处	F 变配电室	4.8	1.62E+03	3.56E-08	7.45	264.44	280	满足
		G 冷却循环水泵间	6.5	1.62E+03	6.52E-08	7.19	255.09	280	满足
	防护门外	H 进货口	15.7	1.62E+03	3.80E-07	6.42	227.90	320	满足
	防护门	I 出货口	15	1.62E+03	3.47E-07	6.46	229.31	320	满足

	外									
二层	东南墙 外 30cm 处	a	电井	4.7	7.68	7.19E-06	5.14	105.38	220	满足
	西北墙 外 30cm 处	b	设备用房	6	7.68	1.17E-05	4.93	101.12	140	满足
	东北墙 外 30cm 处	c	设备用房	7.4	7.68	1.78E-05	4.75	97.45	220	满足
	北墙外 30cm 处	e	厂区道路上空	6.77	7.68	1.49E-05	4.83	99.01	180	满足
	防护门 外	d	防护门口	6.1	7.68	1.21E-05	4.92	100.83	170	满足

从表 11.3-2 可知,项目辐照机房一层辐照室和二层主机室直射辐射屏蔽墙的设计厚度均大于计算所需屏蔽墙的厚度,因此,屏蔽墙设计满足防护要求。

(2) 防护门的屏蔽计算

①迷道散射计算

对于能量大于 3 MeV 的 X 射线,认为其散射一次后的能量均为 0.5MeV;对于初级 X 射线,散射系数 α_1 取值 5×10^{-3} ,对于一次散射后的 X 射线散射系数 α_1 (假设一次散射后的反射过程一样, $E=0.5\text{MeV}$)取值为 2×10^{-2} 。

辐照室迷道散射计算的 D_{10} 取值为: $D_{10}(90) = 1.62 \times 10^3 \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。辐照室迷道散射面积的确定: A_1 为第一次散射宽度与高度的乘积,之后的散射面积均为迷道宽度与高度的乘积,根据图 11.3-1 (a),对于 H 点: $A_1 = (3.68 + 3.5) \times 1.5 = 10.8 \text{m}^2$, $A_2 = 2.0 \times 1.85 = 3.7 \text{m}^2$ 。

主机室迷道散射计算的 D_{10} 取值为: $D_{10}(90) = 7.68 \text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。根据图 11.3-1 (b),对于 d 点: $A_1 = 2.23 \times 5.0 = 11.2 \text{m}^2$, $A_2 = 1.2 \times 5.0 = 6.0 \text{m}^2$

代入公式 11.3-5 计算,可得本项目迷道出入口的散射剂量率;计算结果见下表

表 11.3-3 项目迷道出入口的散射剂量率计算结果

楼层	参考点	散射 次数	A_1 (m^2)	A_2 (m^2)	d_1 (m)	dr_1 (m)	dr_2 (m)	dr_3 (m)	dr_4 (m)	$H_{1,rj}$ ($\mu\text{Sv/h}$)
一层	进货口	H	4	10.8	7.84	7.87	6.48	5.76	9.83	6.92E-05
	出货口	I	4	10.8	6.89	7.78	6.45	5.76	9.70	9.50E-05
二层	防护门 口	d	3	11.2	5.2	6.2	0.4	/	/	3.10E+02

从表 11.3-3 可知，项目一层辐照室迷道口处散射剂量率为 $9.50 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ ，远小于最大允许周围剂量率 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ，所以辐照室迷道的设计是合理的；二层主机室迷道口处散射剂量率为 $3.10 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$ ，远大于最大允许周围剂量率 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ，所以主机室迷道口必须增设防护门。

②防护门的屏蔽计算

首先计算透射比 $B_x = H_M / H_0$ ，其中 H_M 为屏蔽门外侧最大允许周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)，取 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ； H_0 为屏蔽门内侧吸收剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)。

$B_x = 2.5 / (3.10 \times 10^2) = 8.06 \times 10^{-3}$ ， $n = \log_{10} (1 / (8.06 \times 10^{-3})) = 2.09$ ；为留出保守裕度， n 值取 3。

再由附录 A 表 A.2 和表 A.3 查出铁的 T_I 和 T_e 值；对于主机室当入射电子能量为 1.9MeV 时散射一次后 X 射线的能量为 0.5MeV ，铁的 T_I 和 T_e 值分别为 $T_I = 3.8 \text{cm}$ ， $T_e = 3.3 \text{cm}$ 。最后根据公式 11.3-4 计算出对应防护门的厚度见表 11.3-4。

表 11.3-4 防护门的屏蔽厚度计算结果

楼层	参考点		H _M (μSv/h)	H ₀ (μSv/h)	B _x	n	所需防护门 厚度 S (cm)	设计厚 度 (cm)	是否 满足
二 层	防护 门口	d	2.5	3.10E+02	8.06E-03	3	17	18	满足

因此，当二层主机室不锈钢防护门的厚度为 18cm 时，屏蔽门外的剂量率为 $1.54 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ ，满足小于最大允许周围剂量率 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 的防护要求。

综上，根据计算核算，项目一层辐照室迷道设计合理，二层主机室防护门屏蔽厚度设计满足防护要求。

(3) 厂房屋顶厚度计算

屋顶厚度首先考虑直射的防护，当加速器开机时主机室内及主机室屋顶无人员能到达，对屋顶直射的防护主要考虑从一层辐照室 X 射线直射到二层主机室周围辅助房间的剂量。

首先根据公式 11.3-1 计算出透射比 B_x ，代入公式 11.3-3，计算出 n 值，然后根据公式 11.3-4 计算出对应的混凝土厚度；其中参考点（距离屏蔽体外侧 0.3m 处）最大允许周围剂量当量率 H_M 取 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ，居留因子保守取 1。项目一层辐照室 X 射线直射到二层主机室周围辅助房间直射辐射屏蔽墙厚度计算结果见表 11.3-5：

表 11.3-5 直射辐射屏蔽墙厚度计算结果表

楼层	参考点		墙体外环境	d (m)	D ₁₀ (Gy/h)	Bx	n	混凝土厚度 S (cm)	所需楼板厚度 (cm)	楼板设计厚度 (cm)	是否满足
二层主机室周围	东南墙	a	电井	4.7	1.62E+03	3.41E-08	7.47	265.09	152	155	满足
	西北墙	b	设备用房	6.0	1.62E+03	5.56E-08	7.26	257.56	148	155	满足
	东北墙	c	设备用房	7.4	1.62E+03	8.45E-08	7.07	251.10	144	155	满足
	加速器屋顶	e	厂区道路上空	6.77	1.62E+03	7.07E-08	7.15	253.84	146	155	满足

对于天空反散射,这里要综合考虑辐照室和主机室辐射对参照点 P 的剂量贡献,根据公式 11.3-6 屋顶天空反散射计算结果见表 11.3-6。假设 P 点位于公众所能达区域,区域居留因子取 1,项目年出束时间为 2000h;因此 P 点所在位置的最大允许周围剂量当量率:

$$H_M=0.1\text{mSv}/(2000\text{h}\times 1)=8.0\times 10^{-4}\mu\text{Sv/h}$$

屋顶天空反散射计算结果见表 11.3-6, P 点计算示意图见图 11.3-2;

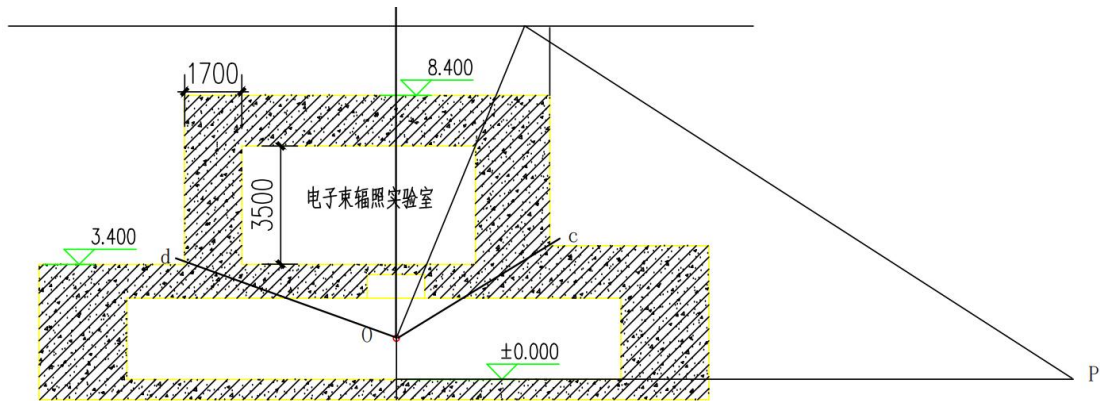


图 11.3-2 P 点计算示意图

式中 Ω 的计算公式和示意如下:

$$\Omega = \arctan \frac{ab}{cd} \dots\dots\dots (\text{公式 } 11.3-10)$$

$$\Omega = \Omega_E + \Omega_F + \Omega_G + \Omega_H \dots\dots\dots (\text{公式 } 11.3-11)$$

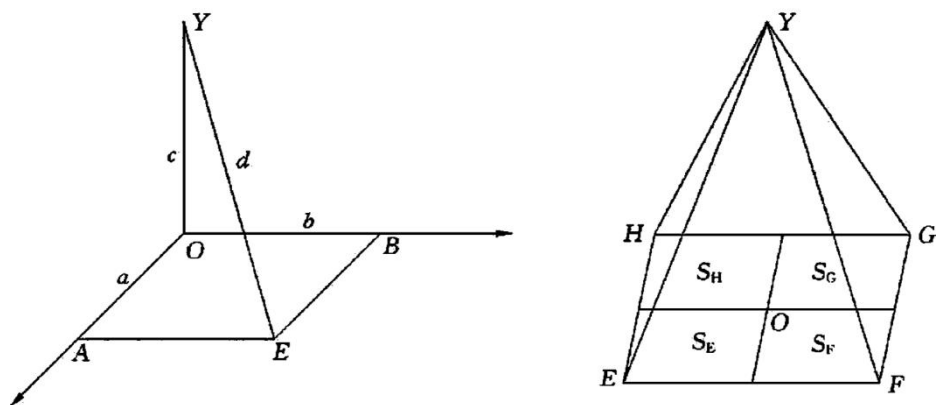


图 11.3-3 立体角计算示意图

表 11.3-6 屋顶天空反散射计算结果

楼层	H_M	D_{10}	d_i	d_s	Ω	B_{xs}	所需 楼板 (cm)	楼板 设计 (cm)	是否 满足
一层辐 照室	2.0E-0 2	1.62E +03	9.04	20	0.42	4.99E- 05	89	155	满足
二层主 机室	2.0E-0 2	7.68	7	20	0.71	3.19E- 03	52	150	满足

根据表 11.3-5 和表 11.3-6 的计算结果，只要辐照室的室顶厚度大于 0.89m，二楼主机室周围辅助房间的剂量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；同时主机室室顶厚度大于 0.52m，则 P 点的剂量率远小于 $2.0\times 10^{-2}\mu\text{Sv/h}$ ；满足对应区域年剂量率要求。对照项目设计方案，一层辐照室室顶厚度为 1.55m，二层主机室室顶厚度为 1.5m；因此，项目屋顶厚度设计满足防护要求。

(4) X 射线通过屋顶的侧向散射计算

本项目加速器机房建成后高为 8.4m，北侧 15m 为实训厂房 B，为 2 层厂房，总高 14.8m，二层工作人员位置高度约 7m。实训厂房 $B\theta=85^\circ$ ， $f(\theta)$ 取 85° 的值；计算结果见表 11.3-7；

表 11.3-7 X 射线通过屋顶的侧向散射计算结果（实训厂房 B）

楼层	$D_{10}(\text{Gy/h})$	$F(\text{m}^2)$	$f(\theta)$	$d_R(\text{m})$	$T(\text{cm})$	$T_1(\text{cm})$	$T_e(\text{cm})$	$H(\mu\text{Sv/h})$
一层辐照室	1.62E+03	0.16	0.005	36	155	35.5	35.5	4.30E-02
二层主机室	7.68	24	0.005	36	150	22.1	20.1	3.08E-05

上表计算结果可见，X 射线通过屋顶的侧向散射对实训厂房 B 贡献剂量率为 $4.30\times 10^{-2}\mu\text{Sv/h}$ 。

(5) 通风口、管线口外的辐射水平

本项目通风口位于受照区域侧面“H”型迷道墙和受照区正下方，两个排风口在地下相连通，排风管道位于辐照室地坪下，通过地埋式排风管道于地下引出至辐照室屏蔽墙外排气筒（不穿越屏蔽墙），向空中排放，排风管道没有直接穿越屏蔽墙体；因此漏射线到达通风口外经屏蔽墙体屏蔽，散射线经地下管道到达排气筒外口处则需经过多次散射，剂量率将大大降低。因此，通风口外的辐射水平可满足标准要求。

项目电缆穿越主机室屏蔽墙体的穿线管均按斜 45° 角度穿墙设计。电缆进出口采用铅皮 5mm 铅皮包裹，由于电缆穿线管很细，仅容电缆穿过，空腔很小，因此，散射线很小，主要考虑漏射线影响。因此，电缆穿墙出屏蔽体外剂量率满足 2.5 μ Sv/h 防护要求。

项目线缆管道布置详见图 11.3-2（a）~11.3-2（b）。

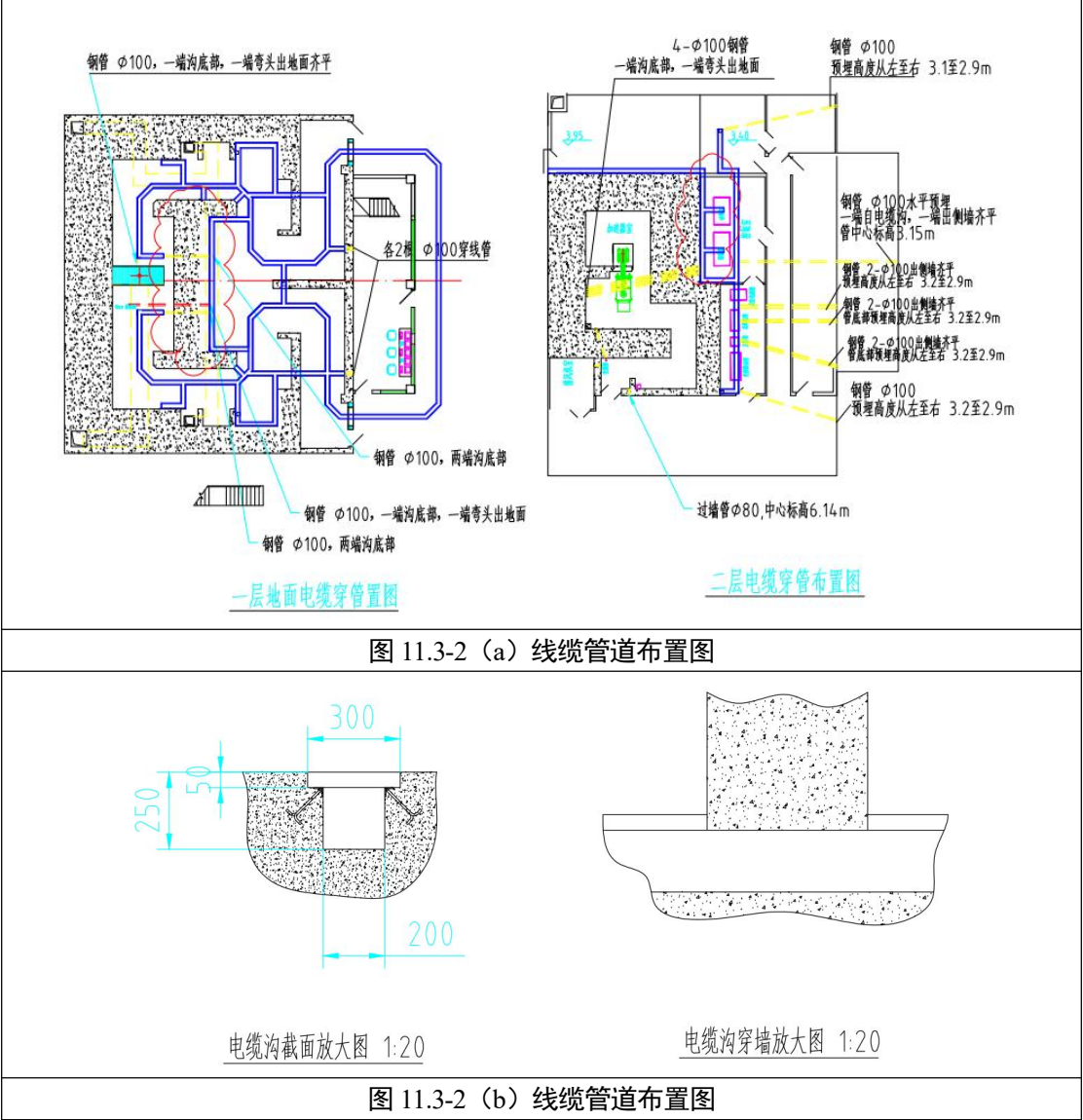


图 11.3-2（a）线缆管道布置图

图 11.3-2（b）线缆管道布置图

(6) 项目屏蔽体设计合理性分析

本次环评分别对3间加速器实验室按照各实验室加速器设备最大能量和最大束流强度进行预测分析,根据上述加速器机房屏蔽体计算可知,项目方案设计的屏蔽体防护厚度满足 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 防护要求,设计屏蔽体防护厚度大于理论计算结果,因此,本项目设计屏蔽体防护设计满足要求。

3.3 屏蔽墙辐射防护效果分析

射线种类分析

一层辐照室屏蔽墙体外辐射环境受韧致辐射初级X射线和一次散射X射线影响,由于韧致辐射初级X射线一次散射X射线能量为 0.5MeV ,因此屏蔽墙体外辐射环境主要考虑初级X射线,忽略一次散射X射线的影响。辐照室迷道口的辐射防护屏蔽评价考虑初级X射线贯穿屏蔽墙体后的透射以及经迷道多次散射后到达迷道口的散射线的叠加影响。

二层主机室室内的辐射场由三部分叠加:一层辐照室内与入射电子束成 105° 至 180° 方向的韧致辐射初级X射线,经辐照室屋顶(加速器室地板)不完全屏蔽的贯穿辐射场;一楼束辐照内的 0° 方向上产生的韧致辐射初级X射线,经地面 180° 方向散射后的次级X射线,通过辐照室屋顶上的孔洞直接照射入主机室内形成的散射辐射场;尚未加速到最高能量的电子在加速过程中束流损失而与钢桶作用产生的束流损失辐射场。由于沿与电子束入射方向成 180° 方向的次级X射线能量较低,且会受到加速器底部钢桶屏蔽,因此为简化计算,二楼主机室辐射防护屏蔽评价,仅考虑加速器室内的贯穿辐射场和束流损失辐射场。

与一层辐照室相同,二层主机室屏蔽墙体处防护评价考虑贯穿辐射场和束流损失辐射场的透射叠加影响,迷道口处防护评价考虑贯穿辐射场、束流损失辐射场的透射以及经迷道多次散射后到达迷道口的散射线。

剂量率参考点处射线种类见表11.3-8。

表 11.3-8 剂量率参考点处射线种类一览表

剂量率参考点		射线种类	射线能量
一层辐照室屏蔽墙体外	A、B、C、D、E、F、H、I	辐照室侧向 90° 韧致辐射初级X射线	6.0MeV
	J、K	辐照室侧向 90° 韧致辐射初级X射线	6.0MeV
		经迷道多次散射后到达迷道口的散射线	0.5MeV

二层主机室屏蔽墙体 外	a、b、c、d	辐照室内与入射电子束成 105°到 180°方向的韧致辐射初级 X 射线（保守按侧向 90°韧致辐射初级 X 射线计算）	6.0MeV
		主机室束流损失韧致辐射初级 X 射线	3.0MeV
	e	辐照室内与入射电子束成 105°到 180°方向的韧致辐射初级 X 射线（保守按侧向 90°韧致辐射初级 X 射线计算）	6.0MeV
		主机室束流损失韧致辐射初级 X 射线	3.0MeV
		经迷道多次散射后到达迷道口的散射线	0.5MeV

韧致辐射初级 X 射线：即与源点呈侧向 90°的直射 X 射线。

（四）参考点剂量率预测结果

根据公式 11.3-6 和公式 11.3-7 屋顶防护厚度计算出天空反散射剂量当量率；根据公式 11.3-9 屏蔽体设计防护厚度计算出经屏蔽防护后屏蔽体 0.3m 处的剂量当量率，为保守预测参点剂量率，各参考点处居留因子 T 保守取 1；加速器运行时各参考点辐射剂量率贡献值预测结果见表 11.3-9 及表 11.3-10。

表 11.3-9 参考点辐射剂量率预测结果一览表

楼层	参考点编号	剂量率参考点位置		射线来源	d (m)	D ₁₀ (Gy/h)	设计厚度 (cm)	n	剂量率贡献值 (μSv/h)
一层 辐照室	A	设备用房	加速器西南墙外 30cm 处	辐照室直射	10.85	1.62E+03	260	7.32	6.53E-01
	B	设备用房	加速器西南墙外 30cm 处	辐照室直射	11.05	1.62E+03	264	7.44	4.85E-01
	C	辐照室外东北侧道路	加速器东北墙外 30cm 处	辐照室直射	9.55	1.62E+03	260	7.32	8.42E-01
	D	辐照室外东北侧道路	加速器东北墙外 30cm 处	辐照室直射	9.85	1.62E+03	264	7.44	6.11E-01
	E	物流传输作业区	加速器西北墙外 30cm 处	辐照室直射	15.5	1.62E+03	260	7.32	3.20E-01
	F	变配电室	加速器东南墙外 30cm 处	辐照室直射	4.8	1.62E+03	280	7.89	9.11E-01
	G	冷却循环水泵间	加速器东南墙外 30cm 处	辐照室直射	6.5	1.62E+03	370	10.42	1.45E-03
	H	进口口	加速器西北墙左迷道口	辐照室直射	15.7	1.62E+03	320	9.01	6.37E-03
				辐照室迷道散射	7.84, 7.87, 6.48, 5.76, 9.83	1.62E+03	/	/	6.92E-05
	I	出口口	加速器西北墙右迷道口	辐照室直射	15	1.62E+03	320	9.01	6.97E-03
				辐照室迷道	6.89, 7.78, 6.45, 5.76, 9.70	1.62E+03	/	/	9.50E-05

二 层 加 速 器 室	a	电井	加速器东南 墙	主机室束流损失直射	4.3	7.68	220	10.85	5.92E-06
				辐照室直射	4.7	1.62E+03	320	9.01	7.10E-02
	b	设备用房	加速器西北 墙	主机室束流损失直射	5.2	7.68	220	10.85	4.05E-06
				辐照室直射	6.0	1.62E+03	290	8.17	3.05E-01
	c	设备用房	加速器东北 墙	主机室束流损失直射	6.8	7.68	180	8.86	2.32E-04
				辐照室直射	7.4	1.62E+03	260	7.32	1.40E+0
	e	厂区道路上 空	加速器屋顶	主机室束流损失直射	6.1	7.68	170	8.36	9.05E-04
				辐照室直射	6.77	1.62E+03	300	8.45	1.25E-01
	d	防护门口	加速器西北 墙迷道口	直射 主机室束流损失直射	5.3	7.68	170	8.36	1.20E-03
				辐照室直射	6.1	1.62E+03	320	9.01	4.21E-02
				散射 辐照室迷道	5.2, 6.2, 0.4	7.68	/	/	3.10E-02

表 11.3-10 10MeV 电子束辐照室保护目标人员受照剂量估算计算结果

保护目标	与加速器 机房方位	与出 束口 距离	屏蔽体外剂 量率贡献值 H_M ($\mu\text{Sv/h}$)	天空反散 射剂量率 贡献值 H_M ($\mu\text{Sv/h}$)	保护目标 处吸收剂 量率 H ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射 时间 t (h/a)	居留 因子 T	年有效剂 量 (mSv/a)
10MeV 电子束辐照实 验室的工作人员	西北侧	16	6.44E-03	/	6.44E-03	2000	1	1.29E-02
10MeV 电子束辐照实 验室一层设备用房、控 制室的工作人员	西南侧	10	6.53E-01	/	6.53E-01	2000	1	1.31E+00
去离子水制备间、冷却 循环水泵间、变配电 室的其他人员	东南侧	5	9.11E-01	/	9.11E-01	2000	1/4	4.56E-01
门厅流动人员	南侧	23	1.45E-03	/	1.45E-03	2000	1/4	7.24E-04
10MeV 电子束辐照实 验室室外流动人员	西北侧	26	3.29E-03	/	3.29E-03	2000	1/4	1.64E-03
实训厂房 B 内的人员	东北侧	26	1.53E-03	/	1.53E-03	2000	1/4	7.64E-04
10MeV 电子束辐照实 验室设备间、暖通用房 (速调管室专用)	西南侧	20	3.33E-03	/	3.33E-03	2000	1/4	1.66E-03
9MeV 工业 CT 实验室、 控制室内的工作人员	南侧	37	1.61E-06	/	1.61E-06	2000	1	3.22E-06
走廊的工作人员	南侧	35	2.32E-06	/	2.32E-06	2000	1/4	1.16E-06
40MeV 电子加速器实 验室、控制室内的工作 人员	南侧	48	9.06E-07	/	9.06E-07	2000	1	1.81E-06
10MeV 电子束辐照实	正上方	3	7.10E-02	7.57E-03	7.86E-02	2000	1/4	3.93E-02

验室二层暖通用房、设备用房等工作人员								
10MeV 电子束辐照实验室二层会议室、设备间、辅助办公室	西南侧	19	4.33E-04	7.57E-03	8.00E-03	2000	1/4	4.00E-03

从上表计算结果可知，项目加速器机房的屏蔽墙可屏蔽加速器运行时产生的大部分辐射，项目加速器机房一层辐照室屏蔽墙外表面 30cm 的辐射剂量率贡献值为 $9.06\text{E-}07\mu\text{Sv/h}\sim 9.11\text{E-}01\mu\text{Sv/h}$ ，屏蔽体外表面 30cm 处的参考点剂量率均满足《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）规定的在距屏蔽体的可达界面 30cm 由穿透辐射所产生的平均剂量率应不大于 $2.5\times 10^{-3}\text{mSv/h}$ （即 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ）的控制限值要求；由计算结果可得项目一层辐照室屏蔽墙屏蔽效果满足控制要求。二层主机室屏蔽墙外表面 30cm 处的关注点剂量率均满足《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）规定的在距屏蔽体的可达界面 30cm 由穿透辐射所产生的平均剂量率应不大于 $2.5\times 10^{-3}\text{mSv/h}$ 的控制限值要求（即 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ）；由计算结果可得项目二层主机室屏蔽墙屏蔽效果满足控制要求。

表 11.3-11 参考点辐射剂量率贡献值预测结果

参考点	楼层	设计厚度 cm	n	Bxs	D_{10} (Gy/h)	D_i m	D_s m	Ω (Sr)	天空反散射剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	P 点剂量率叠加 ($\mu\text{Sv/h}$)
P	一层室顶	155	4.51	4.30E-05	1.62E+03	11.6	20	0.42	7.57E-03	7.57E-03
	二层室顶	150	7.36	4.33E-08	7.68	8.5	20	0.71	3.95E-07	

从表 11.3-11 计算结果可知，P 点处的天空反散射辐射剂量率主要来自一层辐照室，加速器运行时，P 点处经屋顶产生的天空反散射辐射剂量率贡献值为 $7.57\times 10^{-3}\mu\text{Sv/h}$ ，满足《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）中规定的 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的控制限值要求；由计算结果可得项目屋顶屏蔽效果满足控制要求。

保护目标年剂量计算

本项目保护目标同时受3间实验室的影响，因此需考虑3间实验室对保护目标的共同影响，剂量叠加情况如下：

表 11.4-1 本项目保护目标环境影响分析

位置	保护 目标	居留 因子	项目	估算年剂量 (mSv)
40MeV 电子加速器实验室内工作人员	职业 人员	1	40MeV 直加贡献值	/
			9MeV 直加贡献值	1.17E-03
			10MeV 直加贡献值	1.81E-06
			评价值	1.17E-03
40MeV 电子加速器控制室内工作人员	职业 人员	1	40MeV 直加贡献值	2.77E-03
			9MeV 直加贡献值	2.02E-03
			10MeV 直加贡献值	1.81E-06
			评价值	4.79E-03
速调管室内的工作人员	职业 人员	1	40MeV 直加贡献值	1.99E-03
			9MeV 直加贡献值	2.06E-04
			10MeV 直加贡献值	/
			评价值	2.20E-03
9MeV 工业 CT 实验室内的工作人员	职业 人员	1	40MeV 直加贡献值	3.64E-02
			9MeV 直加贡献值	/
			10MeV 直加贡献值	3.22E-06
			评价值	3.64E-02
9MeV 工业 CT 控制室内的工作人员	职业 人员	1	40MeV 直加贡献值	2.77E-03
			9MeV 直加贡献值	5.92E-03
			10MeV 直加贡献值	3.22E-06
			评价值	8.69E-03
走廊的工作人员	公众	1/4	40MeV 直加贡献值	2.77E-03
			9MeV 直加贡献值	3.20E-03
			10MeV 直加贡献值	1.16E-06
			评价值	5.97E-03
门厅的其他人员	公众	1/4	40MeV 直加贡献值	2.64E-03
			9MeV 直加贡献值	3.60E-03
			10MeV 直加贡献值	7.24E-04
			评价值	6.96E-03
暖通设备用房的其他人员	公众	1/4	40MeV 直加贡献值	1.45E-03
			9MeV 直加贡献值	2.20E-03
			10MeV 直加贡献值	1.66E-03
			评价值	5.31E-03
其离子水制备间、冷却循环水泵间、变配电室的其他人员	职业	1/4	40MeV 直加贡献值	1.45E-03
			9MeV 直加贡献值	1.39E-03
			10MeV 直加贡献值	4.56E-01
			评价值	4.59E-01
实训厂房 B 内的人员	公众	1/4	40MeV 直加贡献值	1.74E-03
			9MeV 直加贡献值	1.00E-03
			10MeV 直加贡献值	7.64E-04

			评价值	3.50E-03
主射束（西南）墙外的其他人员	公众	1/4	40MeV 直加贡献值	4.04E-03
			9MeV 直加贡献值	3.72E-04
			10MeV 直加贡献值	/
			评价值	4.41E-03
10MeV 电子束辐照实验室的工作人员	职业人员	1	40MeV 直加贡献值	/
			9MeV 直加贡献值	6.60E-04
			10MeV 直加贡献值	1.29E-02
			评价值	1.36E-02
10MeV 电子束辐照实验室一层设备用房、控制室的工作人员	职业人员	1	40MeV 直加贡献值	/
			9MeV 直加贡献值	1.01E-03
			10MeV 直加贡献值	1.31E+00
			评价值	1.31E+00
10MeV 电子束辐照实验室室外流动人员	公众	1/4	40MeV 直加贡献值	/
			9MeV 直加贡献值	/
			10MeV 直加贡献值	1.64E-03
			评价值	1.64E-03
10MeV 电子束辐照实验室设备间、暖通用房（速调管室专用）	公众	1/4	40MeV 直加贡献值	/
			9MeV 直加贡献值	/
			10MeV 直加贡献值	1.66E-03
			评价值	1.66E-03
10MeV 电子束辐照实验室二层暖通用房、设备用房等工作人员	职业人员	1/4	40MeV 直加贡献值	/
			9MeV 直加贡献值	/
			10MeV 直加贡献值	3.93E-02
			评价值	3.93E-02
10MeV 电子束辐照实验室二层会议室、设备间、辅助办公室	公众	1	40MeV 直加贡献值	/
			9MeV 直加贡献值	/
			10MeV 直加贡献值	4.00E-03
			评价值	4.00E-03

由上表可知：本项目所致职业人员最大受照射剂量为 1.31mSv/a，公众最大受照射剂量为 6.96E-03mSv/a，均满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的职业人员 20mSv/a 和公众 1mSv/a 的剂量限值的规定。

二、臭氧的环境影响分析

1、40MeV 电子直线加速器实验室臭氧影响分析

本项目 40MeV 电子加速器在工作状态时，X 射线与实验室内空气作用产生一定量的臭氧其产率和浓度可用下面两个公式分别计算。

$$Q_0 = 6.5 \times 10^{-3} \cdot G \cdot S_0 \cdot R \cdot g \dots\dots\dots \text{式 (11.4-1)}$$

式中:

Q_0 —臭氧产率 mg/h;

G —射束在距离源点 1m 处的剂量率 Gy.m²/h, 取 360;

S_0 —射束在距离源点 1m 处的照射面积 m², 本项目取 0.16

R —射束径迹长度 m, 取 1;

g —空气每吸收 100eV 辐射能量产生 O₃ 的分子数, 本项目取 10。

经计算, 40MeV 直线加速器实验室臭氧产额为 3.74mg/h。

室内臭氧饱和浓度由下式计算:

$$C = Q_0 \cdot T_v / V \dots\dots\dots \text{式 (11.4-2)}$$

式中:

C —室内臭氧浓度, mg/m³;

Q_0 —臭氧产额 3.74mg/h;

T_v —臭气有效清除时间, h;

V —实验室空间体积, 体积为 1612.8m³;

$$T_v = \frac{t_v \cdot t_a}{t_v + t_a} \dots\dots\dots \text{式 (11.4-3)}$$

t_v —每次换气时间, 0.22h;

t_a —臭氧分解时间, 取值为 0.83h。

经计算, 40MeV 直线加速器实验室内臭氧浓度为 4.03×10^{-4} mg/m³, 低于《室内空气质量标准》(GB/T18883-2002)表 1 中臭氧小时平均标准值浓度 0.16mg/m³ 的要求。

2、9MeV 工业 CT 实验室臭氧影响分析

本项目 9MeV 电子加速器在工作状态时, X 射线与实验室内空气作用产生一定量的臭氧其产率和浓度计算方式同 40MeV 直线加速器实验室。

经计算, 9MeV 工业 CT 实验室内臭氧浓度为 7.06×10^{-4} mg/m³, 低于室内空气质量标准》(GB/T18883-2002)表 1 中臭氧小时平均标准值浓度 0.16mg/m³

的要求。

3、10MeV 电子束辐照实验室臭氧影响分析

本项目 10MeV 电子加速器在工作状态时，高能电子束与辐照室内空气作用产生一定量的臭氧和氮氧化物。电子加速器输出的直接致电离粒子束流越强，臭氧和氮氧化物的产额越高。氮氧化物的产额大约是臭氧的 1/3，且以臭氧的毒性最高，因此本节主要考虑电子加速器机房臭氧的产生和排放影响。

本项目电子加速器机房换气系统设计有一套独立的排风系统，通风量为 5160m³/h，辐照进行时，开启排风机。

①臭氧产生率

根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979- 2018）附录 B.1（公式 B-1）可得到臭氧的产生率 P：

$$P = 45dIG \dots\dots\dots \text{式 (11.4-4)}$$

式中：

P—臭氧的产生率，mg/h；

d—电子在空气中的行程（cm），应结合电子在空气中的线阻止本领 $s=2.5\text{keV/cm}$ 和辐照室尺寸选取；本项目 d 取 140cm；

I—电子束流强度，2mA；

G—空气吸收 100eV 辐射能量产生的臭氧分子数，保守值取 10。

经计算，电子加速器机房内臭氧产生率， $P=1.26\times 10^{10}\text{mg/h}$ 。

②辐照室臭氧的平衡浓度

在电子加速器正常运行期间，臭氧不断产生，考虑到室内连续通风和臭氧自身的化学分解（有效化学分解时间为 50min），电子加速器机房内臭氧平衡浓度采用《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979- 2018）附录 B.2（公式 B-2~B4）可得到。

$$Te = \frac{T_v \times T_d}{T_v + T_d} \dots\dots\dots \text{式 (11.4-5)}$$

$$C_s = \frac{PT_e}{V} \dots\dots\dots \text{式 (11.4-6)}$$

式中：

T_v —电子加速器机房换气一次所需时间，本项目排风量按照 5160m³/h 进行

计算，机房体积为 332m³，则一次换气时间为 0.064h；

T_d —臭氧的有效化学分解时间，0.83h；

V —电子加速器机房的体积，332m³；

T_e —对臭氧的有效清除时间，h；

C_s —长时间辐照时电子加速器机房室内的平衡浓度。

经计算， $T_e=6.35\times 10^{-3}h$ ， $C_s=2.41mg/m^3$ 。

因此，电子加速器辐照室内的平衡浓度超过 GBZ2.1 中规定的最高容许浓度 0.3mg/m³ 的要求。

③臭氧的排放

加速器在长期工作期间，室内臭氧浓度达到饱和平衡浓度。因此，电子加速器停止运行后，人员不能立即进入电子加速器机房内，风机必须继续运行，使室内臭氧浓度随时间急剧下降，关闭加速器后，风机需运行的持续时间根据公式 11.4-7 进行计算。

$$T = -T_e \ln \left(\frac{C_o}{C_s} \right) \dots\dots\dots \text{式 (11.4-7)}$$

式中：

C_o —GBZ2.1 规定的臭氧的最高容许浓度， $C_o=0.3mg/m^3$ ；

T —为使室内臭氧浓度低于规定的浓度所需时间，h；

经计算， $T=0.086h$ ，即电子加速器长期运行关机后，风机必须运行 6 分钟以上，人员才能进入电子加速器机房内作业。

三、噪声环境影响分析

在本项目电子加速器机房采用专用排风系统进行排风，风机的噪声为 60~90dB（A），预测模式采用《环境影响评价技术导则声环境》（HJ2.4-2009）工业噪声中室外点声源预测模式。

当声源的大小与测试距离相比小得多时，可以将此声源视为点声源，声源噪声衰减的计算公式如下：

$$L_p = L_0 - 20 \lg \frac{r}{r_0}$$

式中： L_p ——预测受声点声级增值[dB(A)]；

L_0 ——主要噪声源的室外等效源强值[dB(A)];

r ——受声点距声源的距离 (m)

表 11.4-2 噪声随距离衰减情况 单位 dB (A)

离噪声源的距 离 (m)		1	5	10	18	20	32	54	80	100	120
风机	90	90	76	70	65	64	60	55	52	50	48
水冷设备	85	85	71	65	60	59	55	50	47	45	43

由上表可知, 风机昼间噪声达标距离为32m, 夜间噪声达标距离为100m; 和
水冷设备昼间噪声达标距离为18m, 夜间噪声达标距离为54m, 因此, 本项目需
采取噪声防治措施, 以达到减小设备噪声的影响, 如采用减震、吸声棉、声屏障
等措施减小噪声的影响。

根据学校平面布局图和外环境关系图, 项目周围人员较少, 排风风机位于加
速器机房外, 采取合适的噪声防治措施后, 能够实现达标排放。

环境影响风险分析

一、环境风险评价的目的

环境风险评价的目的是分析和预测建设项目存在的潜在危害和有害因素，以及项目在建设、运营期间可能发生的事故（一般不包括自然灾害与人为破坏），引起有毒、有害（本项目为电离辐射）物质泄漏，所造成的环境影响程度和人身安全损害程度，并提出合理可行的防范、应急与减缓措施，以使项目事故发生率、损失和环境影响达到可以接受的水平。

二、风险识别

电子加速器不运行不存在辐射安全事故，也不存在影响辐射环境质量事故，电子加速器只有在开机运行状态下才会发出高能电子，韧致辐射产生 X 射线，因此，环境风险因子为 X 射线。

三、源项分析及事故等级分析

电子加速器高能电子束产生韧致辐射发出X射线，X射线电离空气产生臭氧，臭氧经通风设施换气、稀释，对大气环境基本无影响，故本项目电子加速器可能发生的风险事故中，其风险因子主要为X射线。

按照国务院 449 号令第四十条关于事故的分级原则现将项目的环境风险因子、潜在危害及可能发生的事故等级列于表 11.5-1 中。

表 11.5-1 项目的环境风险因子、潜在危害及事故等级

潜在危害	事故等级
X 射线装置失控导致人员受超年剂量限值的照射	一般辐射事故
射线装置失控导致 9 人以下（含 9 人）急性重度放射病、局部器官残疾。	较大辐射事故
射线装置失控导致 2 人以下（含 2 人）急性死亡或者 10 人以上（含 10 人）急性重度放射病、局部器官残疾。	重大辐射事故
射线装置失控导致 3 人以上（含 3 人）急性死亡。	特别重大辐射事故

四、后果计算

（一）40MeV 电子直线加速器

40MeV 电子直线加速器产生的辐射场是瞬发性的，加速器一旦停机，能造成环境影响的主要辐射源就会立即消失，不会再引起周边介质的活化。

对本项目 40MeV 电子直线加速器的操作使用进行分析，得出项目运行期间可能发生的各类辐射事故见下表，同时在下表中简要描述了事故的原因、可能导致的后果以及事故的预防减缓措施。

表 11.5-2 本项目 40MeV 电子直线加速器运行期间潜在事故（事件）一览表

事故（事件）描述	可能原因	后果	减缓措施	主要预防措施
加速器实验室误入	（1）分区管理失效； （2）安全连锁装置失效； （3）工作人员误操作	误入人员受到超过年剂量照射，导致急性放射性病或死亡发生	（1）立即停止出束； （2）启动辐射事故应急预案； （3）划出警戒线，疏散非事故处理人员； （4）进行现场辐射环境监测； （5）对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施	（1）加强分区管理核巡查力度； （2）定期对安全连锁的有效性进行检查； （3）加强工作人员的技能培训与考； （4）严格按照安全操作规程进行操作
加速器实验室通风系统故障	（1）断电； （2）风机故障； （3）人员误操作造成停机	增加工作人员和公众照射	（1）立即停止出束，对通风系统进行检查、维修； （2）检查风机、若发生故障，立即维修或更换	（1）加强检查和监测； （2）定期对风机进行检查； （3）设置备用风机和备用电源； （4）加强管理和培训
加速器冷却水泄露	（1）设备老化破损； （2）自然灾害（地震）； （3）火灾，人为破坏	造成环境污染	立即停止出束，对冷却水系统进行检查、维修	（1）加强检查和监测； （2）定期对冷却水系统进行检； （3）加强管理和培训

事故后果分析

对上表所列事故进行分析，综合考虑装置类别、事故类型、事故所致辐射影响后果等因素，安装调试期间误入 40MeV 电子直线加速器实验室为较严重事故。考虑到在运行期间，人员不会进入加速器实验室，而误入实验室的工作人员可能受到质子束流的直接照射，本次评价以“误入实验室”作为假想事故，估算事故期间人员的受照剂量。

根据前述资料，40MeV 电子直线加速器直接照射的 X 射线发射率为 $6 \times 10^7 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当人员误入治疗室，受到 X 射线直接照射，由开始受照

到采取应急措施切断电流需约 10s。由此可计算得到该过程中，误入人员的受照剂量为 3.33Gy。

由此可知，发生人员误照射事故时，考虑最不利的情况，可造成 40%的死亡率。根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中的相关规定，该类事故属于重大辐射事故。

40MeV 电子直线加速器装置设计功能齐全，具有安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，采用清场搜索、紧急停机、分区控制、警报装置等安全设备和措施，确保当设备某一区域有射线时，该区域的门无法打开，工作人员不能进入该区域。

此外，学校已在建立并逐步完善一系列辐射安全管理制度，包括《操作规程》、《人员培训计划》、《辐射防护与安全保卫制度》等，规定操作质子治疗系统的工作人员均由经过辐射防护培训和专业培训的人员担任，并严格按操作管理规程对设备进行操作运行。本项目正式运行前，编制完成《辐射事故应急预案》并严格执行，确保在发生辐射事故时，能有序、迅速地采取正确的处理措施，缓解事故后果，控制辐射事故的发展，将事故对人员、财产和环境的损失减少到最低限度。

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

（二）9MeV电子直线加速器

事故情景假设：人员误入且滞留于 9MeV 电子直线加速器实验室内，此时加速器正在出束。

后果计算：按最不利情况考虑，人员处在加速器主束方向，且无防护，剂量随时间的变化如下表所示：

表 11.5-3 事故状态下不同停留时间和距离误入人员受照剂量表

时间（min） 距离（m）	0.5	1	2
0.5	60	15	3.75
1	120	30	7.5

5	600	1.5	0.375
---	-----	-----	-------

由上表可知，误入/滞留在维修人员电子加速器机房内，可造成重大辐射事故。

（三）10MeV电子直线加速器

事故情景假设：根据本项目实际情况以及国内现有同类装置运行情况，可能发生的辐射事故如下：

（1）检修人员或工作人员人为将加速器安全装置旁路，仅切断了束流便进入辐照室，加速器在高压状态下，会产生暗电流，主要为高压电场作用下灯丝表面的电子逸出、高压发生器在锻炼高压或者束流过程中可能发生电晕放电、气体电离等也会生产各种带电粒子等，可能形成空载电流，导致人员受到照射。

（2）巡检人员忘记按下巡检开关或者紧急止动开关，还未全部撤出辐照室，操作人员启动加速器进行辐照，造成巡检人员被误照，引发辐射事故。

（3）加速器需要检修时，检修人员作业前将控制室钥匙拔下后，加速器就无法被启动，但如果忘记拔掉钥匙，而操作人员因为违反操作规程启动加速器，检修人员被误照射。

（4）有人员滞留于辐射室或者加速器大厅内，操作人员违反操作规程，未进行巡检就启动加速器，导致人员被误照射。

（5）安全联锁装置或报警系统发生故障，加速器工作时无关人员打开主机厅门并误入加速器大厅，造成人员被误照射，引发辐射事故。

事故后果分析：

事故情景(1)

根据其他辐照装置的实际检测情况，加速器在高压状态时，最低空载束流约为额定束流的二十分之一，考虑束下空气吸收剂量率为正常运行时的二十分之一，人员在束下及周围 1m 处停留 5min。根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）附录 A 表 A.1，0°方向 X 射线发射率（也为电子线发射率）为 450Gy.m².mA⁻¹.min⁻¹，束流强度为 0.1mA，根据附录 A 公式(A-2)，辐照室距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率为：

$$D_{10}(0^{\circ})=5\text{min}\times 450\text{Gy.m}^2.\text{mA}^{-1}.\text{min}^{-1}\times 0.1\text{mA}=225\text{Gy}$$

电子的辐射权重因子为 1，手部皮肤的组织权重因子为 0.01，计算出手部的

有效剂量为 2.25Sv，导致人员急性重度放射病发生率为 99%以上，为较大辐射事故。

事故情景(2)、(3)、(4)、(5)

假定在事故情况下，X射线直接照射到人员，人员受到的有效剂量与加速器产生的初级射线束造成的空气吸收剂量有关，在空气中加速器产生的初级射线束造成的空气吸收剂量可用式（11.5-1）计算：

$$D_r=D_0/r^2\cdots\cdots\cdots\text{式（11.5-1）}$$

式中：

D_r ——距离 X 射线辐射源 r m 距离处空气吸收剂量率（Gy/h）；

D_0 ——距离 X 射线辐射源 1m 距离空气吸收剂量率（Gy/h）；根据《电子加速器辐照装置辐射安全和防护》（HJ979-2018）附录 A 表 A.1，辐照室内侧向 90°方向距离 X 射线辐射源 1m 吸收剂量率为 1.62×10^3 Gy/h，主机室内侧向 90°方向距离 X 射线辐射源 1m 吸收剂量率为 7.68Gy/h。

r ——居留位置与 X 射线辐射源直线距离（m）。

人员受到的有效剂量可用式（11.5-2）进行计算：

$$E=D\cdot W_T\cdot W_R\cdots\cdots\cdots\text{式（11.5-2）}$$

式中：E—人员受到的有效剂量， Sv·min⁻¹；

W_T —组织权重因数，全身取 1；

W_R —辐射权重因数，X 射线取 1。

由于加速器只有在开机的状态下才会产生X射线，一旦发现有人员误入，只要关闭电源或误入人员启动紧急逃逸装置即可解除辐射事故，本项目在辐照室内墙上、迷道内墙上、加速器主机厅内墙上分别安装串联并有明显标识的“紧急停机按钮”开关及停机拉线开关等，因此，在正常情况下处理加速器辐射事故的时间较短，整个处理时间约 10s。

由式（11.5-1）、式（11.5-2）计算的人员可能受到的有效剂量见表 11.5-4。

表 11.5-4 事故情况下周围人员受到的剂量估算结果

10MeV 电子辐 照加速 器	与加速器靶距 离（m）	有效剂量（Sv/10s）	
		辐照室	主机室
	1.0	4.5	2.13×10^{-2}
	2.0	1.13	5.33×10^{-3}
	3.0	0.50	2.37×10^{-3}

	5.0	0.18	8.53×10^{-4}
	6.0	0.125	5.93×10^{-4}
	7.0	0.092	4.35×10^{-4}

由表 11.5-5 可以看出，辐照室内误入人员在距离靶 1m 处停留 10s，其所受有效剂量最高达 4.5Sv/次，远远超出标准规定的限值；根据表 11.5-1，该辐射剂量导致急性放射病的死亡率高达 90%，根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（449 号令）放射性事故分级，可能发生的辐射事故为重大辐射事故；主机室内误入人员在距离 X 射线辐射源 1m 处停留 10s，其所受有效剂量最高达 21.3mSv/次，超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的职业人员 20mSv/a 剂量限值；根据表 11-12，该辐射剂量导致急性放射病的发生率低于 1%，为一般辐射事故。

根据影响分析可知，辐照室迷道口的剂量为 $7.18 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/h}$ ，主机厅迷道口不考虑混凝土门屏蔽的剂量为 3.09mSv/h，假设人员停留 10s，所受到的剂量分别为 1.20 $\mu\text{Sv/h}$ 、0.52mSv/h，不构成辐射事故。

上述事故及其危害结果及其所引发的放射性事故等级见表 11.5-5。

表 11.5-5 项目环境风险因子、危险因素、危害结果及事故分级表

项目装置名称	环境风险因子	事故场景	危害结果	事故等级
10MeV 电子加速器	电子线	（1）检修人员或工作人员人为将加速器安全装置旁路，仅切断了束流便进入辐照室，加速器在高压状态下，会产生暗电流，主要为高压电场作用下灯丝表面的电子逸出、高压发生器在锻炼高压或者束流过程中可能发生电晕放电、气体电离等也会生产各种带电粒子等，可能形成空载电流，导致人员受到照射。	事故状态下手部的有效剂量为 2.25Sv，导致人员急性重度放射病发生率为 99%以上。	较大辐射事故
	X射线	（2）巡检人员忘记按下巡检开关或者紧急止动开关，还未全部撤出辐照室，操作人员启动加速器进行辐照，造成巡检人员被误照，引发辐射事故。	事故状态下受照射有效剂量最大为 4.5Sv，导致急性放射病的死亡率高达 90%。	重大辐射事故

	(3) 加速器需要检修时,检修人员作业前将控制室钥匙拔下后,加速器就无法被启动,但如果忘记拔掉钥匙,而操作人员因为违反操作规程启动加速器,检修人员被误照射。 (4) 有人员滞留于辐射室或者加速器大厅内,操作人员违反操作规程,未进行巡检就启动加速器,导致人员被误照射。	事故状态下受照射有效剂量最大为 4.5Sv,导致急性放射病的死亡率高达 90%。	重大辐射事故
	(5) 安全联锁装置或报警系统发生故障,加速器工作时无关人员打开主机厅防盗门并误入加速器大厅,造成人员被误照射,引发辐射事故。	事故状态下受照射有效剂量最大为 21.3mSv,导致人员受到超剂量照射。	一般辐射事故

五、事故情况下防范及应对措施

为了杜绝上述辐射事故的发生,环评要求学校严格执行以下风险预防措施:

①定期认真地对本单位射线装置的安全和防护措施、设施的安全防护效果进行检测或者检查,制定完善的辐射安全规章制度并有专人监督核实各项管理制度的执行情况,对发现的安全隐患立即进行整改,避免事故的发生;

②凡涉及对射线装置进行操作,必须有明确的操作规程,辐照作业时,至少有 2 名操作人员同时在场,操作人员严格按照操作规程进行操作,并做好个人的防护,并应将操作规程张贴在操作人员可看到的显眼位置;

③每月检查机房设置的监控系统、光电联锁系统、门机联锁装置、门灯联锁装置和其他安全联锁装置,确保一切正常并安全的情况下,射线装置才能进行照射;

④必须制定射线装置操作安全防护措施并严格执行,严格执行射线装置曝光前巡检,确保所有人员全部撤离辐照室和主机厅后才进行辐照作业,防止误操作,防止工作人员和公众受到意外辐射;

⑤每月对电子直线加速器辐照装置的安全装置进行维护、保养,对可能引起操作失灵的关键零配件定期进行更换;

⑥学校所有辐射工作人员均需参加辐射安全与防护考核,并需取得合格证

书，所有辐射工作人员均需持证上岗。

⑦维修人员进行加速器检修时，先关闭加速器电源，不得将安全联锁装置旁路，且需拔出控制台钥匙并按下巡检开关，并佩戴个人剂量报警仪。

⑧辐射防护管理人员要经常对辐照工作场所进行巡视，及时纠正不利于辐射安全防护的行为。

一旦发生误照事故，处理的步骤是：

①立即消除事故源，防止事故继续蔓延和扩大，即第一时间启动紧急开关，即第一时间停止射线装置出束。

②及时检查、估算受照人员的受照剂量，如果受照剂量较高，应及时安排受照人员就医检查。

③及时处理，出现事故后，应尽快集中人力、物力，有组织、有计划的进行处理。这样，可缩小事故影响，减少事故损失。

④事故处理后应及时收集资料、总结报告。学校对于辐射事故进行记录：包括事故发生的时间和地点，所有涉及的事故责任人和受害者名单，对所有受到照射的人员所出的辐射剂量估算结果，所有的医学检查及结果，采取的纠正措施，事故发生的原因，为防止类似事件再次发生所采取的措施。

按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，发生辐射事故时，学校应当立即启动本单位的应急方案，采取应急措施，并立即向当地生态环境主管部门和卫健主管部门报告，生态环境主管部门接到辐射事故报告后，应当立即派人赶赴现场，进行现场调查，采取有效措施，控制并消除事故影响，同时将辐射事故信息报告本级人民政府和上级人民政府生态环境主管部门。县级以上地方人民政府及其有关部门接到辐射事故报告后，应当按照事故分级报告的规定及时将辐射事故信息报告上级人民政府及其有关部门。

六、事故综合防范应对措施

学校在中管理必须认真执行安全操作规程和各项规章制度，强化安全管理，避免各辐射工作场所出现人员滞留事故发生；定期检查各辐射工作场所的门机联锁等辐射安全环保设施是否有效，同时应当加强控制区和监督区的管理，避免人员误入事故的发生。

当事故发生时应当立即启动事故应急程序，对于可能发生的各种事故，学校

方面除在硬件上配齐、完善各种防范措施外，在软件设施上也注意了建设、补充和完善，使之在安全工作中发挥约束和规范作用，其主要内容有：

- ①建立安全管理领导小组，组织管理学校的安全工作；
- ②加强人员的辐射安全与防护专业知识的学习，考试（核）合格、持证上岗；
- ③建立岗位的安全操作规程和安全规章制度，注意检查考核，认真贯彻实施；
- ④定期检查电子加速器机房的辐射屏蔽和各项辐射安全措施的性能，及有关的安全警示标志是否正常工作，避免人员误入正在工作中的电子加速器机房和可能发生的其它安全事故；

⑤制定学校事故处理预案、完善组织、落实经费、准备物资、加强演练、时刻准备应对可能发生的各种事故和突发事件。

以上各种事故的防范与对策措施，可减少或避免辐射安全事故的发生率，从而保证项目正常运营，也保障工作人员、公众的健康与安全。

表 12 辐射安全管理

辐射安全与环境保护管理

一、辐射防护安全管理领导小组

西华大学已成立了辐射安全管理领导小组（西华行字[2020]53 号）（见附件 8），根据文件可知，学校辐射安全管理领导小组组长由分管国有资产与实验室工作的校领导担任。

1、领导小组文件已包含内容：

①成员构成

组 长：分管国有资产与实验室工作的校领导

副组长：分管军民融合工作的校领导以及分管安全工作的校领导

成 员：军民融合处、党政办公室、保卫处、国有资产与实验室管理处、后勤管理处、后勤服务总公司等部门主要负责人

②领导小组职责

- 1) 贯彻执行国家有关辐射安全与环境保护方面的法律法规及相关文件要求。
- 2) 统一领导学校辐射安全与环境保护工作，组织学习传达有关会议和文件精神。
- 3) 统筹规划和研究部署学校辐射安全与环境保护工作。
- 4) 听取学校辐射安全与环境保护工作总结、汇报。
- 5) 推动学校辐射安全与环境保护工作落实。

③办公室主要职责

- 1) 在学校辐射安全与环境保护领导小组的指导下，负责放射性实验室辐射安全与环境保护管理工作。
- 2) 负责对放射性实验室的日常监督管理和安全检查。
- 3) 负责制定、修订放射性实验室防护工作管理制度并督促执行。
- 4) 协助和督促放射性实验室做好辐射污染的治理整改以及辐射污染纠纷处理工作。
- 5) 组织协调对放射性实验室放射事故的应急救援工作，负责对放射事故的调查、分析、处理统计上报工作。

④放射性实验室负责人(管理人员)主要职责

- 1) 制定、修订放射性实验室安全操作规程及相关制度。
- 2) 负责对放射性实验室的日常管理、运行、维护。
- 3) 负责对放射性实验室工作人员进行放射防护知识的培训；定期组织有关法律法规及相关要求的学习。
- 4) 负责放射性实验室的安全管理工作，制定放射防护安全技术措施方案，定期开展安全自查。

⑤办公室设置

领导小组下设办公室，挂靠军民融合处。

2、需要完善的相关内容

根据学校辐射安全管理领导小组机构文件，学校还需在以下几个方面对文件进行完善：

- ①及时调整领导小组成员名单，法人作为第一负责人；
- ②补充领导小组日常办公地点、联系人电话，增加生态环境主管部门联系电话；
- ③明确辐射工作场所安全设施的维护管理执行部门，并严格执行日常维护工作；
- ④补充发生辐射安全事故事件和和个人剂量异常事件后，积极组织开展事故原因调查，并按照程序向生态环境主管部门报告。

二、辐射工作岗位人员配置和能力要求

本项目拟配备工作人员24名，其中4名其他人员，20名辐射工作人员，均为新增辐射工作人员，今后根据学校实际情况适当增加。

(1) 学校需严格执行辐射工作人员培训制度，组织辐射工作人员及相关管理人员到生态环境部网上学习考核平台(<http://fushe.mee.gov.cn>)，参加辐射安全与防护专业知识的学习、考核，考核通过后方可上岗；

(2) 学校应为每1名辐射工作人员配备1套个人剂量计和个人剂量报警仪；

(3) 辐射工作人员应正确配戴个人剂量计，定期交由有资质的检测单位进行检测，并应为每一名辐射工作人员建立个人剂量档案，制定个人剂量管理制度。

个人剂量档案管理人员应将每季度的检测结果告知辐射工作人员，如发现结果异常，将在第一时间通知相关人员，调查原因并由当事人签字确认。

（4）辐射工作人员需熟悉专业技术，对安全防护与相关法规知识也需作相应了解，实际操作中须按操作规程行事，自觉遵守规章制度，努力做好各项安全工作。

三、电子加速器的报废

本项目电子加速器在报废前，应采取去功能化处理，确保电子加速器无法再次通电使用，并上报到生态环境主管部门办理相关手续。

辐射安全管理制度

一、档案管理分类

根据原四川省环境保护厅关于印发《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）》要求，辐射工作单位的相关资料应按照档案管理的基本规律和要求进行分类归档放置。学校辐射安全档案资料可分以下八大类：“制度文件”、“环评资料”、“许可证资料”、“射线装置台账”、“监测和检查记录”、“个人剂量档案”、“培训档案”和“辐射应急资料”。学校应当根据以上要求结合实际辐射工作开展情况对档案进行分类管理。

二、规章制度

根据学校实际情况，辐射安全管理规章制度落实情况见下表 12-1。

表 12-1 本项目辐射管理制度汇总对照分析表

序号	制度名称	备注
1	辐射安全与环境保护管理机构文件	已制定
2	辐射安全管理规定	需完善,辐射工作场所安全管理要求需悬挂于辐射工作场所墙上
3	辐射工作设备操作规程	需制定,内容挂于辐射工作场所墙上
4	辐射安全和防护设施维护维修制度	需完善,增加本项目射线装置的维护维修制度
5	辐射工作人员岗位职责	需完善,增加本项目辐射工作场所辐射工作人员岗位职责,并悬挂于辐射工作场所墙上
6	射线装置台账管理制度	需制定
7	辐射工作场所和环境辐射水平监测方案	需完善,监测方案参考本章辐射监测内容
8	监测仪表的使用与校验管理制度	需完善,增加本项目所使用仪器仪表的使用与校验管理制度

9	辐射工作人员培训制度（或培训计划）	需完善，内容应包含参加生态环境部关于辐射安全防护培训学习和考核，到期前再次考核
10	辐射工作人员个人剂量管理制度	需完善，包含“个人剂量档案终生保存”的内容
11	辐射事故应急预案	需完善，预案中“辐射事故应急响应程序”应悬挂于辐射工作场所墙上

需制定的制度包括：《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）》中规定的各种管理制度。其中《辐射监测方案》中应包含：“公司应委托有资质的单位对辐射工作场所的剂量进行监测，监测周期为1次/年”、“学校定期（监测周期为1次/月）对辐射工作场所进行监测，随时掌握辐射工作场所剂量变化情况，发现问题及时维护、整改”；《辐射工作人员培训制度》中应包含“定期参加辐射安全防护培训和考核”的内容。

需要上墙的规章制度：《辐射工作场所安全管理要求》、《辐射工作人员岗位职责》、《辐射工作设备操作规程》和《辐射事故应急响应程序》应悬挂于辐射工作场所。上墙制度的内容应体现现场操作性和实用性，字体醒目，尺寸大小应不小于400mm×600mm。

西华大学应根据规章制度内容认真组织实施，并且应根据国家发布新的相关法规内容，结合实际及时对各项规章制度补充修改，使之更能符合实际需要。

环境监测计划

环境监测是为了保证项目建成投产后，能迅速全面地反映项目运行后的污染现状和变化趋势，为环境管理，污染管理，环境保护规划提供准确、可靠的监测数据和资料。其中，辐射环境监测是辐射安全防护的一项必要措施，通过辐射剂量监测得到的数据，可以分析判断和估计电离辐射水平，防止人员受到过量的照射。根据实际情况，需建立环境监测制度，包括验收监测、工作场所监测和个人剂量监测。

1、工作场所监测

年度监测：学校需委托有资质的单位对辐射工作场所的剂量进行监测，监测周期为1次/年；年度监测报告应作为《放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告》的重要组成部分一并提交给发证机关。

自主验收监测：学校在取得《辐射安全许可证》后三个月内，应委托有资质的单位开展1次辐射工作场所验收监测，编制自主验收监测（调查）报告。

日常自我监测：定期自行开展辐射监测（也可委托有资质的单位进行监测），制定各工作场所的定期监测制度，监测数据应存档备案。

根据原环保部 18 号令和《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲(2016)》的要求，西华大学每年均委托有资质的单位对辐射工作场所进行监测并向生态环境主管部门提交了“四川省核技术利用单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告，根据西华大学《2021 年度四川省核技术利用单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告》，辐射工作场所周围的 X- γ 辐射剂量当量率为 0.14~0.17 μ Sv/h，符合《工业 X 射线探伤放射防护要求》（GBZ117-2015）和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）标准的要求。

2、个人剂量检测

学校所有辐射工作人员均佩戴了个人剂量计，每季度对个人剂量进行检测，并按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（原环境保护部令18号）要求建立个人剂量档案。学校有专人负责个人剂量检测管理工作。

西华大学委托四川瑞迪森检测技术有限公司完成个人剂量检测工作，学校辐射工作人员最近连续四个季度的个人剂量检测结果统计见表12-2。

表 12-2 辐射工作人员个人剂量统计表

序号	姓名	性别	个人剂量监测结果（mSv）					备注
			一季度	二季度	三季度	四季度	总计	
1	周霖	男	0.02	0.02	0.03	0.02	0.09	/
2	冯真	男	0.02	1.31	0.03	0.02	1.38	/

结果表明：学校按要求对辐射工作人员进行个人剂量检测，在最近连续 4 个季度的个人剂量统计表中，辐射工作人员连续 4 个季度最大个人剂量之和为 1.38mSv，其中冯真在 2021 年第二季度个人剂量检测值为 1.31mSv，超过了单季度 1.25mSv 的剂量约束值，经调查，由于冯真同志不慎将个人剂量计留置于辐射工作场所，导致该季度个人剂量检测值超标，本人并未受到超剂量照射，调查情况说明见附件 7；周霖个人剂量连续 4 个季度之和最大为 0.09mSv，不超过 5mSv 的剂量约束值。

3、监测内容和要求

(1) 监测内容：X- γ 空气吸收剂量率、中子、噪声、废水监测。

(2) 监测布点及数据管理：本项目监测布点应参考下表监测计划（表 12-3）或验收监测布点方案。监测数据应记录完善，并将数据实时汇总，建立好监测数据台账以便核查。

表 12-3 工作场所监测计划建议

设备名称	监测项目	监测周期	监测点位
电子直线加速器	X- γ 空气吸收剂量率	委托有资质的单位进行监测，频率为 1 次/年；验收监测 1 次；自行开展辐射监测	操作位、设备间、操作室、防护门、加速器机房四周等
	中子	委托有资质的单位进行监测，频率为 1 次/年；验收监测 1 次；自行开展辐射监测	40MeV 加速器实验室设备间、操作室、防护门及四周
	噪声	验收监测 1 次	排风机附近
	废水	监测达标后排放	采样检测

(3) 监测范围：控制区和监督区域及周围环境

(4) 监测质量保证

①落实监测仪表使用、校验管理制度，并利用监测单位的监测数据与学校监测仪器的监测数据进行比对，建立监测仪器比对档案；或委托有资质的单位对监测仪器进行检定/校核；

②采用国家颁布的标准方法或推荐方法，其中自我监测可参照有资质的监测机构出具的监测报告中的方法；

③完善辐射工作场所环境监测管理制度。

此外，学校需定期和不定期对辐射工作场所进行监测，随时掌握辐射工作场所剂量变化情况，发现问题及时维护、整改。做好监测数据的审核，制定相应的报送程序，监测数据及报送情况存档备查。

4、年度评估报告情况

学校应于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上年度的《放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告》，近一年（四个季度）个人剂量检测报告和辐射工作场所年度监测报告应作为《安全和防护状况年度评估报告》的重要组成部分一并提交给发证机关。学校应按照《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）》（川环函[2016]1400 号）规定的格式编写《安全和防护状况年度评估报告》。学校必须在“全国核技术利用辐射安全申报系统”(网址 <http://rr.mee.gov.cn/>)中实施申报登记。延续、变更许可证，新增或注销射线装置

以及单位信息变更、个人剂量、年度评估报告等信息均应及时在系统中申报。

学校向生态环境主管部门提交了“2021 年度四川省核技术利用单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告”，学校对 2021 年度的辐射场所的安全和防护状况以及辐射管理情况进行了说明。

辐射事故应急

一、事故应急预案

为了应对辐射事故和突发事件，学校需制订辐射事故应急预案。

学校辐射事故应急预案内容应包括：应急机构和职责分工，应急人员的培训，应急和救助的装备、资金、物资准备，辐射事故应急处理程序，辐射事故分级与应急响应措施，辐射事故调查、报告和处理程序，辐射事故的调查、预案管理。

在预案的实施中，应根据国家发布新的相关法规内容，结合学校实际及时对预案作补充修改，使之更能符合实际需要。

二、应急措施

若本项目发生了辐射事故，学校应迅速、有效的采取以下应急措施：

（1）发现误照射事故时，工作人员应立即切断电源，同时向学校主管领导和辐射安全领导小组组长报告。

（2）学校根据估算的超剂量值，尽快安排误照人员进行检查或在指定的医疗机构救治；对可能受放射损伤的人员，应立即采取暂时隔离和应急救援措施。

（3）事故发生后的 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境主管部门和公安部门报告，造成或可能造成超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康行政部门报告。

（4）最后查清事故原因，分清责任，消除事故隐患。

表 13 结论与建议

结论

一、项目概况

项目名称：西华大学宜宾校区光核反应研究中心项目

建设性质：新建

建设地点：宜宾市临港经济技术开发区西华大学西南角

建设内容：教集团拟在西华大学宜宾校区西南角建设光核反应研究中心项目，建设内容包括 40MeV 电子直线加速器实验室、10MeV 电子束辐照实验室、9MeV 工业 CT 实验室及其配套用房，并在 3 间实验室内各安装使用 1 台电子加速器，均属于 II 类射线装置。40MeV 电子直线加速器产生的 X 射线主射方向朝向西南部墙体，X 射线能量为 40MeV，额定束流 2mA，年出束时间约 1000h，主要用于对加速器产生高能 X 射线的相关研究；9MeV 工业 CT 实验室加速器产生的 X 射线主射方向朝向西南部墙体，X 射线能量为 9MeV，额定束流 150 μ A，年出束时间约 1000h，主要基于加速器产生 X 射线并用于射线成像检测相关研究；10MeV 电子束辐照实验室加速器产生的电子束出束方向竖直向下，能量 10MeV，额定束流 2mA，年出束时间约 2000h，主要基于 10MeV 电子直线加速器产生高能电子束用于辐照灭菌等相关研究。

二、本项目产业政策符合性分析

本项目属电子加速器应用项目，根据国家发展和改革委员会第 29 号令《产业结构调整指导目录（2019 年本）》，本项目属于鼓励类“六、核能”中第 6 条“同位素、加速器及辐照应用技术开发”，符合国家产业发展政策。

三、本项目选址合理性分析

本项目选址于西华大学宜宾校区内西南角空地，用地已经取得了宜宾市国土资源局颁发的《不动产权证书》（川（2018）宜宾市不动产权第 2009767 号），用地性质为科教用地。此外，西华大学宜宾校区已就《宜宾临港开发大学城职业教育基地-西华大学宜宾研究院项目（一期）》进行了环境影响评价，取得了原宜宾临港经济技术开发区规划建设环保局的批复文件（宜临港建环发[2017]147

号）（附件 6）。本项目用地均在西华大学宜宾校区建设红线范围内，不新增用地，且拟建的辐射工作场有良好的实体屏蔽设施和防护措施，产生的辐射经屏蔽和防护后对辐射工作人员和公众的照射剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的剂量限值要求并满足报告表确定的剂量约束值的要求。因此，本评价认为其选址是合理的。

四、工程所在地区环境质量现状

根据监测报告可知，本项目周围环境 γ 辐射空气吸收剂量率为 77.5~100nGy/h，中子剂量当量率均低于仪器检出限，属于当地正常天然本底辐射水平。

五、环境影响评价分析结论

施工期环境影响分析：本项目施工期产生的固废，通过集中收集，定时清运到指定地点处理后，对环境的影响较小；施工机械冲洗废水通过沉淀后循环使用，生活污水产量较小，依托现有生活污水处理设施处理；扬尘、废气通过封闭施工、湿法作业等措施有效减小扬尘、废气对环境的影响；噪声通过选用低噪声设备，规范操作，合理安排施工时间等措施后对环境的影响较小。

营运期环境影响分析：按照环评提出的要求严格落实后，本项目所致职业人员最大受照射剂量为 1.31mSv/a，公众最大受照射剂量为 6.96E-03mSv/a，均满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中规定的职业人员 20mSv/a 和公众 1mSv/a 的剂量限值的规定。

六、环保设施与保护目标

按照环评要求落实后，学校环保设施配置较全，总体效能良好，可使本次环评中确定的保护目标所受的辐射剂量保持在合理的、可达到的尽可能低的水平。

七、事故风险与防范

学校按照环评要求制订合理可行的辐射事故应急预案和安全规章制度，并认真贯彻实施，可减少和避免发生辐射事故与突发事件。

八、辐射安全管理的综合能力

学校按照环评要求落实后，对本项目电子直线加速器和场所而言，西华大学

具备辐射安全管理的综合能力。

九、项目环保可行性结论

在坚持“三同时”的原则，采取切实可行的环保措施，落实本报告表提出的各项污染防治措施的前提下，评价认为本项目在西华大学宜宾校区内西南角空地内建设，从环境保护和辐射防护角度看是可行的。

建议和承诺

一、要求

- 1、落实本报告中的各项辐射防护措施和的安全管理制度。
- 2、学校须重视控制区和监督区的管理。
- 3、按照规定组织辐射工作人员和管理人员按照生态环境部2019年第57号公告的要求，自觉参加生态环境部网上免费学习考核平台（<http://fushe.mee.gov.cn>）中辐射安全与防护专业知识的学习，考核通过后方能上岗。
- 4、定期开展场所和环境的辐射监测，据此对所用的射线装置的安全和防护状况进行年度评估，编写辐射安全和防护状况年度自查评估报告，并于每年1月31日前通过辐射安全申报系统上报至四川省生态环境厅，上报内容包括：①辐射安全和防护设施的运行与维护情况；②辐射安全和防护制度及措施的制定与落实情况；③辐射工作人员变动及接受辐射安全和防护知识教育培训情况；④场所辐射环境监测报告和个人剂量监测情况监测数据；⑤辐射事故及应急响应情况；⑥核技术利用项目新建、改建、扩建和退役情况；⑦存在的安全隐患及其整改情况；⑧其他有关法律、法规规定的落实情况。
- 5、学校必须在全国核技术利用辐射安全申报系统(网址：<http://rr.mee.gov.cn>)中实施申报登记。申领、延续、更换《辐射安全许可证》、新增或注销射线装置以及单位信息变更、个人剂量、年度评估报告等信息均应及时在系统中申报。

二、项目竣工验收检查内容

根据《建设项目环境保护管理条例》和《四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）》的相关要求，工程建设执行污染治理设施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。建设项目正式投产运行前，建设单位和学校应组织专家，组建验收组完成自主环保验收。本工程竣工环境保护验收一览表见下表13-1。

表 13-1 项目环保竣工验收检查一览表

序号	项目	应具备条件	数量
40MeV 电子直线加速器实验室			
1	实体防护设施	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	1 套
2		防护门	1 扇
3		通风系统	1 套
4	控制台及安全联锁	防止非工作人员操作的钥匙控制系统	1 套
5		控制信号联锁	1 套
6		冷却系统联锁	1 套
7		通风系统联锁	1 套
8		烟雾报警系统联锁	1 套
9		防护门剂量联锁	1 套
10		防人误入装置联锁	1 套
11		信号警示装置	1 套
12		束下装置联锁	1 套
13		门机联锁	1 套
14	警示装置	入口电离辐射警示标志	1 套
15		入口加速器工作状态显示	1 套
16		机房内准备出束音响提示	1 套
17		控制台上蜂鸣器	设备自带
18	紧急设施	机房内设计有中文标识的紧急停机、巡检按钮	7 个
19		电视监控对讲装置	1 套
20		有中文标识的紧急开门按钮	1 个
21		拉线开关	2 个
22	监测设备	加速器机房内固定式剂量报警仪	1 套
23		中子周围剂量当量（率）仪	1 台
24		便携式 X-γ辐射监测仪（3 间实验室共用）	1 台
25		个人剂量报警仪	2 个
26		个人剂量计	12 套
27	其他	冷却水暂存容器	1 个
28		放射性废物暂存间	1 间
9MeV 工业 CT 实验室			
1	实体防护设施	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	1 套
2		防护门	1 扇
3		通风系统	1 套
4	控制台及安全联锁	钥匙控制	1 套
5		门机联锁	1 套
6		门灯联锁	1 套
7	警示装置	入口处机器工作状态指示灯(LED 报警屏)	1 套
8		入口处电离辐射警示标志	1 套
9	紧急设施	室内有中文标识的紧急停止按钮	3 个
10		逃逸开关	1 套

11		摄像监控系统	1 套
12	监测设备	加速器机房内固定式剂量报警仪	1 套
13		便携式 X 射线辐射剂量仪 1 台（3 间实验室共用）	1 台
14		个人剂量报警仪	2 个
15		个人剂量计	4 套
10MeV 电子束辐照实验室			
1	实体防护设施	由上下两层构成，建筑全部采用混凝土防护设计、迷道	1 座
2		二层主机室进出口设置防护门。	1 道
3	控制台及安全联锁	主控钥匙开关必须和主机室门和辐照室门联锁。	1 套
4		门机联锁：一层辐照室出入口和二层主机室防护门配置门机联锁装置 1 套。	3 套
5		防人误入装置：在主机室和辐照室的人员出入口通道内设置防人误入的安全联锁装置。	3 道
6		剂量联锁：在辐照室、主机室的出入口设置剂量监测探头，并与固定式辐射剂量监测仪绑定，与辐照室和主机室的出入口门等进行联锁。	1 套
7		通风联锁：辐照室通风系统与控制系统联锁。	1 套
8		束下装置联锁：辐照室建立 1 套束下装置联锁。	1 套
9		巡检按钮：加速器机房设有巡检开关及巡检复位箱。其中辐照室设巡检开关 8 个，巡检复位箱 1 个，主机室设置巡检开关 4 个，巡检复位箱 1 个。	12 个
10	警示装置	声光报警装置：辐照室出入口及内部、主机室出入口设置声光报警装置，辐照室 3 个，主机室 1 个。	4 个
11		LED 危险警示装置：主机室和辐照室出入口设置工作状态指示装置。	3 个
12		烟雾报警：在辐照室内设置烟雾报警装置 1 套。	1 套
13		辐照室迷道出入口外、加速器主机室防护门外和辐照室进出口设置电离辐射警告标志。	1 套
14	紧急设施	在主控台上和主机室、辐照室内各设置有中文标识的急停按钮 1 个。	4 个
15		加速器安装 1 套监控装置，辐照室和主机室内各区域均安装监控探头（一层辐照室安装 10 处，二层主机室安装 2 处）。	1 套
16	监测设备	便携式 X-γ 剂量监测仪 1 台（3 间实验室共用）	1 台
17		便携式辐射剂量监测报警仪 4 台	4 台
18		每个辐射工作人员配备个人剂量计 1 个，拟配置 4 套	4 套

验收时依据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素和射线装置安全和防护条例》（国务院令第 449 号）、《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》、《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》等法律和标准，对照本项目环境影响报告表验收。

1、根据《建设项目环境保护管理条例》（国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日实施）文件第十七条规定：

（1）编制环境影响报告表的建设项目竣工后，建设单位应当按照国务院生态环境行政主管部门规定的标准和程序，对配套建设的环境保护设施进行验收，编制验收报告。

（2）建设单位在环境保护设施验收过程中，应当如实查验、监测、记载建设项目环境保护设施的建设和调试情况，不得弄虚作假。

（3）除按照国家规定需要保密的情形外，建设单位应当依法向社会公开验收报告。

2、根据环保部《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评〔2017〕4 号）规定：

（1）建设单位可登陆环境保护部网站查询建设项目竣工环境保护验收相关技术规范（<http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/other>）。

（2）项目竣工后，建设单位应当如实查验、监测、记载建设项目环境保护设施的建设和调试情况，编制验收监测（调查）报告。

（3）本项目配套建设的环境保护设施经验收合格后，方可投入使用，未经验收或者验收不合格的，不得投入生产或者使用。

（4）除按照国家需要保密的情形外，建设单位应当通过其网站或其他便于公众知晓的方式，向社会公开下列信息：①本项目配套建设的环境保护设施竣工后，需在 3 个月内完成项目自主验收；②对项目配套建设的环境保护设施进行调试前，公开和项目竣工时间和调试的起止日期；③验收报告编制完成后 5 个工作日内，公开验收报告，公示的期限不得少于 20 个工作日。建设单位公开上述信息的同时，应当在建设项目环境影响评价信息平台（<http://114.251.10.205/#/pub-message>）中备案，且向项目所在地生态环境主管部门报送相关信息，并接受监督检查。