

核技术利用建设项目
使用 II 类射线装置项目
环境影响报告表

中国科学院国家空间科学中心

2021 年 6 月

环境保护部监制

核技术利用建设项目
使用 II 类射线装置项目
环境影响报告表

建设单位名称：中国科学院国家空间科学中心

建设单位法人代表（签名或签章）：王赤

通讯地址：北京市海淀区中关村南二条 1 号

邮政编码：100190

联系人：刘春生

电子邮箱：lcs7073@163.com

联系电话：13381128414

目 录

表 1 项目基本情况	1
表 2 放射源	8
表 3 非密封放射性物质	8
表 4 射线装置	9
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）	10
表 6 评价依据	11
表 7 保护目标与评价标准	11
表 8 环境质量和辐射现状	17
表 9 项目工程分析与源项	23
表 10 辐射安全与防护	29
表 11 环境影响分析	45
表 12 辐射安全管理	45
表 13 结论与建议	67
表 14 审批	69

表 1 项目基本情况

建设项目名称	使用 II 类射线装置项目				
建设单位	中国科学院国家空间科学中心				
法人代表	王赤	联系人	刘春生	联系电话	13381128414
注册地址	北京市海淀区中关村南二条 1 号				
项目建设地点	北京怀柔新城 11 街区 (HR00_0011_6006 地块) 怀柔科学城核心区 6 号楼				
立项审批部门	北京市发改委		批准文号	京发改(审)【2018】444 号	
建设项目总投资(万元)	5293.7 (不含房屋建设费用)	项目环保投资(万元)	150	投资比例(环保投资/总投资)	2.8%
项目性质	<input checked="" type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它			占地面积(m ²)	4169
应用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I 类 <input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类 <input type="checkbox"/> IV 类 <input type="checkbox"/> V 类		
		<input type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I 类(医疗使用) <input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类 <input type="checkbox"/> IV 类 <input type="checkbox"/> V 类		
	非密封放射性物质	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物		
		<input type="checkbox"/> 销售	/		
		<input type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> 乙 <input type="checkbox"/> 丙		
	射线装置	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类		
		<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类		
其他					
<p>1 项目概况</p> <p>1.1 建设单位概况</p> <p>中国科学院国家空间科学中心(以下简称“空间中心”)是我国空间科学及其卫星项目和中国科学院月球与深空探测任务的总体性研究机构,我国空间科学领域的研究中心和创新高地,负责组织开展国家空间科学发展战略规划研究,具体负责中国科学院空间科学先导专项的组织与实施,开展空间科学及相关应用领域的创新性科学研究和技术发展和试验工作。</p> <p>作为我国第一颗人造卫星的摇篮,在六十多年的发展历程中,空间中心始终面向世界科技前沿,面向国家重大需求,面向国民经济主战场,牵头组织和承担了一大批重大</p>					

科技项目，取得了一大批引领性原创成果，突破了一大批关键核心技术，在我国航天事业发展中发挥了骨干引领与示范带动作用，举起了我国空间科学大旗，作出了不可替代的重要贡献。

空间中心承担的重大任务主要包括：中国科学院空间科学先导专项，载人航天工程、月球与深空探测工程、高分、北斗导航等国家科技重大专项，风云、海洋系列应用卫星的有效载荷和相关支持系统的任务，牵头空间科学战略规划研究，牵头建设国家重大科技基础设施——子午工程，承担国家自然科学基金、空间环境保障和空间天气建模 973 项目、国家 863 计划重大课题等。

空间中心是我国月球与深空探测任务的主要发起者和重要参研单位之一。自 2004 年至今，全程参与探月工程一、二、三期以及我国首次自主火星探测任务的方案论证，并承担了卫星（探测器）有效载荷总体、载荷集成管理控制系统、有效载荷地面综合测试系统、空间环境探测载荷、国际合作载荷、空间天气保障等一系列重要任务。成功研制 26 台（套）空间设备，为嫦娥一、二、三、四号任务的圆满成功作出重大贡献。先后获得“绕月探测工程突出贡献单位”“嫦娥二号任务突出贡献单位”“全国五一劳动奖状”“工人先锋号”等荣誉称号；2 次荣获国务院颁发的“国家科学技术进步特等奖”，3 次荣获工业和信息化部颁发的“国防科学技术进步奖特等奖”，并将在嫦娥五号、“天问一号”以及月球与深空探测后续任务等国家重大项目中继续发挥重要作用。

2008 年至 2012 年，空间中心牵头建设了我国在空间天气和空间环境领域第一个国家重大科技基础设施——东半球空间环境地基综合监测子午链（子午工程），为我国建设独立自主的空间环境监测和保障体系奠定了地基监测基础，大大提高了我国在日地关系这一重大基础科学领域的创新能力。2019 年 7 月，空间中心牵头承担的“十三五”国家重大科技基础设施——空间环境地基综合监测网项目（子午工程二期）开工建设，建成后有望大幅提高我国对空间环境的认知能力、自主创新能力和保障服务能力。

空间中心现有在职职工 747 名，其中中国科学院院士 2 人，中国工程院院士 1 人，研究员 43 人，副研究员及高级工程师 150 人，中级科技人员 168 人。

空间中心具有空间物理专业博士、硕士学位授予权，计算机应用专业的博士、硕士学位授予权，空间飞行器设计、电磁场及微波技术专业的硕士学位授予权，并设有空间物理专业博士后流动站。现有在站博士后 9 人，在学研究生 450 人，其中博士生 213 人，硕士生 237 人，客座专家 8 人。

1.2 核技术利用及辐射安全管理现状

空间中心现有辐射安全许可证颁发日期是 2020 年 5 月 29 日，许可证编号京环辐证【F0026】，有效期至 2022 年 5 月 23 日，其种类和范围为：使用 IV 类、V 类放射源，使用 II 类、III 类射线装置。

1.2.1 核技术利用现状情况

空间中心涉源部门如下：

- (1) 西昌卫星发射基地（不储存）；
- (2) 效应室（源库）；
- (3) 探测室（源库）；
- (4) 上海卫星工程研究所（不储存）；
- (5) 质保中心；
- (6) 探测室-怀柔园区。

空间中心已许可射线装置使用情况见表 1-1，已许可使用的放射源情况见表 1-2。

表 1-1 空间中心已许可的射线装置情况（共 5 台）

序号	装置名称	类别	数量
1	电子束源 30KeV	III	1
2	离子束源 30KeV	III	1
3	YTX3000 型自动 X 光检查系统	III	1
4	电子加速器（200KeV）	II	1
5	电子加速器（2MeV）	II	1

表 1-2 空间中心已许可使用密封源（共 30 枚）

序号	源名称	类别	活度×枚数
1	Am-241	V	3.7E+4Bq×1
2	Am-241	IV	7.4E+8Bq×1
3	Cs-137	V	2.59E+6Bq×1
4	Sr-90	V	3.7E+6Bq×1
5	Fe-55	V	3.7E+8Bq×1
6	Pu-238	V	3.7E+8Bq×1
7	Sr-90	V	3.7E+5Bq×1

8	Sr-90	V	3.33E+9Bq×1
9	Cf-252	V	2.0E+5Bq×1
10	Sr-90	V	1.85E+9Bq×10
11	Ba-133	V	3.7E+8Bq×1
12	Cd-109	V	3.7E+9Bq×1
13	Tl-204	V	3.7E+7Bq×2
14	Sr-90	V	3.7E+8Bq×2
15	Am-241	V	3.7E+5Bq×2
16	Co-60	V	3.7E+7Bq×1
17	Fe-55	V	3.7E+10Bq×1
18	Cs-137	V	3.7E+7Bq×1

1.2.2 近几年履行环保审批情况

空间中心近几年取得环评批复和竣工验收情况见表 1-3。

表 1-3 空间中心近几年履行环保审批情况

序号	项目名称	环评批复文号	验收文号
1	使用电子加速器项目	京环审【2010】515 号	京环验【2015】213 号

1.2.3 辐射安全管理情况

(1) 辐射安全管理机构

空间中心设有辐射安全与防护管理小组，组长由中心党委书记承担，成员主要由各室主任或副主任、业务主管组成，并设有 1 名专人负责。

(2) 现有辐射安全管理制度

空间中心设有《中国科学院国家空间科学中心辐射安全与防护管理制度》，该制度包含的内容有辐射安全管理体系和岗位职责，辐射安全操作规程，辐射防护及安保措施，设备检修维护制度，人员培训制度，台账管理制度，监测方案，辐射应急预案。

(3) 辐射工作人员考核

空间中心现有辐射工作人员 37 人，现有辐射工作人员培训证书有效期至 2021 年 3 月，建设单位目前正在陆续组织辐射工作人员参加生态环境部门组织的辐射安全与防护考核，截至 4 月底，已有 23 名辐射工作人员通过了考核。现有辐射工作人员均通过了职业健康体检，本项目涉及辐射工作人员共 12 人均通过了生态环境部门组织的考核。

(4) 个人剂量监测

空间中心现从事辐射工作的所有人员均佩戴了个人剂量计，并委托有资质的单位对辐射工作人员进行个人剂量监测，每季度一次，个人剂量档案齐全。

根据空间中心提供的 2020 年度辐射工作人员的个人剂量监测报告可知，2020 年度的个人剂量最大值为 0.168mSv，满足规定的职业照射年剂量约束值要求。

(5) 工作场所及辐射环境监测

空间中心定期对辐射工作场所进行场所监测，并委托有资质的第三方机构（具有 CMA 或 CNAS 证书）每年进行一次工作场所和环境监测，监测数据记录存档。

根据空间中心提供该单位辐射工作场所的 2020 年工作场所监测报告可知，各监测点空气中 γ 剂量率符合相关标准要求。

(6) 辐射事故应急管理制度

空间中心制定了辐射应急预案，预案中明确了应急指挥机构的职责、人员组成及分工、应急行动及终止程序、应急保障等，在有条件的情况下开展应急演练。

(7) 辐射监测仪器

空间中心现有监测仪器情况见表 1-4，监测仪器定期送有资质的机构进行检定。

表 1-4 现有监测仪器

序号	仪器名称	型号	仪器状态	数量
1	个人剂量报警仪	PM1610	在用	4
2	多功能辐射监测仪	Model:900+	在用	3
3	个人剂量报警仪	REN200	在用	1
4	高灵敏环境 γ 探测器	EGM-5	在用	1
5	高气压电离室场所 γ 监测仪	AGM-6	在用	4

1.3 项目情况

1.3.1 建设目的

本项目以“十三五”国家科技创新规划为指导，以北京市建设全国科技创新中心为契机，以“十三五”空间科学先导专项、载人航天、深空探测、探月工程等重大国家任务为依托，在怀柔科学城建设国内领先、国际先进的空间科学卫星有效载荷集成与测试、定标试验、空间辐射效应分析试验、可靠性及环境试验、大数据应用承载、空间环境研究预报等多学科交叉的空间科学卫星系列及有效载荷研制测试保障平台，为实现高精度、高指向度和高稳定性的科学探测奠定基础，支撑空间科学任务从孵育、前期准

备、技术攻关到工程研制、成果产出完整链条发展，吸引和造就一批以首席科学家、工程两总为代表的空间科学领军人物，在空间科学前沿领域取得重大发现和突破，为保障国家安全、服务经济社会作出重大贡献。

1.3.2 项目背景

随着我国社会和经济的快速发展，空间科学已经成为当前我国亟需加强的战略性创新领域，开展空间科学研究是国家安全、经济和社会发展的保障，而空间科学卫星系列及有效载荷研制测试保障平台建设是将我国建设成为空间科学强国的必然要求。

科学卫星有效载荷是开展空间科学研究的核心手段之一。我国“十三五”及未来一段时间空间科学任务对卫星有效载荷集成测试保障能力提出了迫切需求，建设空间科学卫星系列及有效载荷研制保障平台是我国空间科学探测的重要保障。

空间科学任务概念孵育到最终成果产出的完整链条中，需要强有力的技术保障平台，确保每个环节顺利实施。建设空间科学卫星系列及有效载荷研制测试保障平台，是我国引领世界空间科学发展的基本条件。

中国科学院国家空间科学中心是空间科学规划的牵头单位，在卫星系列及有效载荷研制测试方面优势明显。建设空间科学卫星系列及有效载荷研制保障测试平台，将有效提升我国空间科学卫星及有效载荷的研制研究水平，是未来空间科学发展的必要支撑。

1.3.3 项目建设规模

本项目建设地点为怀柔科学城核心区先进光源技术研发与测试平台园区6号楼，该楼建筑面积4169平方米，占地面积2994平方米，用地性质为科研用地。本项目的建设内容为：

(1) 拟建空间环境探测有效载荷定标平台，使用低能离子辐射模拟装置，涉及使用串列加速器1台，其质子能量 $\leq 12\text{MeV}$ ，重离子总能量 $\leq 30\text{MeV}$ 。

(2) 拟建空间辐射效应分析试验平台，使用50MeV中能质子辐照装置，涉及使用质子回旋加速器1台。

本项目拟使用加速器具体情况见表1-5。

表 1-5 本项目拟使用加速器情况

序号	设备名称	型号	主要参数	使用场所	用途
1	质子回旋加速器	——	最大能量 50MeV、最大流强 10 μ A	怀柔科学城核心区 6 号楼 50MeV 质子回旋加速器机房	空间辐射模拟实验与测试，器件、材料、生物样品等辐照效应测试与研究。
2	串列加速器	Coaxial-Medium-Current Tandetron	质子最高能量：12MeV，重离子总能量：30MeV*；最大流强：0.1mA	怀柔科学城核心区 6 号楼串列加速器辐射屏蔽实验室机房	进行空间中低能离子辐射环境模拟，对空间辐射探测载荷进行测试与定标。

根据《射线装置分类》（2017 年），本项目拟使用的串列加速器和质子回旋加速器属于 II 类射线装置，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021）》（生态环境部令 16 号，2021 年 1 月 1 日），本项目需编制环境影响评价报告表。

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》(GB 18871-2002)。

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	质子回旋加速器	II	1台	—	质子	50MeV	10 μ A	空间辐射模拟实验与测试, 器件、材料、生物样品等辐照效应测试与研究。	怀柔科学城核心区6号楼50MeV质子回旋加速器机房	
2	串列加速器	II	1台	Coaxial-Medium-Current Tandetron	质子、重离子	质子最高能量: 12MeV, 重离子最高总能量: 30MeV	0.1mA	进行空间中低能离子辐射环境模拟, 对空间辐射探测载荷进行测试与定标。	怀柔科学城核心区6号楼串列加速器辐射屏蔽实验室机房	

(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 (μ A)	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	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
活化气体	气态	⁴¹ Ar	2.27E+11Bq		2.27E+11Bq		不暂存	经排风系统排入外环境
辐照的靶件	固态						暂存在加速器机房的放射性废物坑中	自行衰变至一段时间后申请清洁解控，不满足解控要求送北京市城市废物库

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；年排放总量用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	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》，2015 年 1 月 1 日起施行；</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，2018 年 12 月 29 日修订并施行；</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月 1 日施行；</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》，2017 年 10 月 1 日起施行；</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，2005 年 9 月 14 日，国务院令 第 449 号，2019 年 3 月 2 日第二次修正版；</p> <p>(6) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021）》，生态环境部令 16 号，2021 年 1 月 1 日起实施；</p> <p>(7) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，2006 年 1 月 18 日，国家环境保护总局令 第 31 号，2019 年 8 月 22 日第三次修正版；</p> <p>(8) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环境保护部第 18 号令，2011 年 5 月 1 日；</p> <p>(9) 关于发布《射线装置分类》的公告，国家环境保护部 国家卫生和计划生育委员会 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 06 日；</p> <p>(10) 《关于发布〈建设项目竣工环境保护验收暂行办法〉的公告》，国环规环评[2017]4 号，2017 年 11 月 20 日；</p> <p>(12) 《北京市环保局办公室关于做好辐射类建设项目竣工环境保护验收工作的通知》，京环办[2018]24 号，2018 年 1 月 25 日；</p> <p>(13) 《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部令 第 9 号，2019 年 11 月 1 日；</p> <p>(14) 《生态环境部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》，生态环境部办公厅，2019 年 12 月 24 日印发，2020 年 1 月 1 日 1 日起实施；</p> <p>(15) 关于发布《放射性废物分类》的公告，环境保护部 工业和信息化部 国家国防科技工业局 2017 年第 65 号，2017 年 11 月 30 日。</p>
技术	<p>(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；</p>

标准	<p>(2) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；</p> <p>(3) 《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；</p> <p>(4) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）；</p> <p>(5)《核技术利用放射性废物、废放射源收贮准则》(DB11/639-2009)；</p> <p>(6) 《辐射环境保护管理导则-核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）；</p> <p>(7) 《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-85）；</p> <p>(8) 《大气污染物综合排放标准》（DB11/501-2017）；</p> <p>(9) 《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ2.1-2019）。</p>
其他	<p>(1) 建设单位提供的相关技术资料；</p> <p>(2) 委托书。</p>

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

7.1.1 评价内容

本项目主要就射线装置使用过程中对周围环境及工作人员、公众等产生的影响进行分析。

7.1.2 评价因子

本项目评价因子为射线装置使用过程中产生的 γ 射线、中子、感生放射性、臭氧、氮氧化物及氟化物。

7.1.3 评价范围

为确保辐射场所周围区域内活动的公众和工作人员所受到的辐射剂量低于相应的剂量约束值，根据《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）中的规定，“应用放射源和射线装置项目按装置实体边界外 50m 的范围（I 类射线装置一般应不小于 500m）”。本次评价范围以 II 类射线装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围区域，其评价范围图见图 7-1。



图 7-1 II 类射线装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围示意图

7.2 保护目标

本项目建设地址位于怀柔科学城内 6 号楼。本项目所在建筑部分为一层、部分为二层和三层，其中 II 类射线装置所在场所为一层建筑，办公区域为二层、三层建筑。本项目环境保护目标主要为工作场所职业工作人员以及周边建筑的公众。评价范围内保护目标及人口分布见表 7-1。

表 7-1 评价范围内保护目标及人口分布情况

序号	方位	敏感目标名称	最近距离	人数	保护对象
该建筑内敏感点	东侧	内循环水泵房、高频机房、电源机房	1.5m	偶有工作人员	本项目辐射工作人员
	东侧	走廊	0m	10 人	
	东南侧	回旋加速器控制机房	2m	10 人	
	南侧	大厅、物理测量厅、协同效应实验大厅、走廊、厕所	0m	10 人	
	南侧	低能离子模拟辐照装置中央控制室	0m	2 人	
	南侧	低能离子模拟辐照装置备品备件间、厕所	0m	2 人	
	南侧	低能离子模拟辐照装置实验准备间、大厅	5.6m	2 人	
外部敏感点	北侧	2c 号楼	10m	约 20 人	该建筑内办公人员
	北侧偏西	4 号楼	12m	约 20 人	该建筑内办公人员
	西侧	马路	45m	临时公众	从马路经过的行人
	南侧	马路	16m	临时公众	从马路经过的行人

7.3 评价标准

7.3.1 剂量限值及剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) B1 的规定，工作人员的**职业照射**和**公众照射**的剂量限值见下表。

表 7-2 工作人员职业照射和公众照射剂量限值

工作人员职业照射年有效剂量	公众照射
≤20mSv	≤1mSv

7.3.1.1 剂量限值

(1) 工作人员的剂量

应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

- (a) 由审管部门决定的连续 5 年的平均有效剂量，20mSv；
- (b) 任何一年中的有效剂量，50mSv。

(2) 公众照射

实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

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

7.3.1.2 年剂量约束值

根据辐射防护最优化原则，考虑到单位实际情况并为其它辐射设施和实践活动留有余地，本次评价对该单位职业照射和公众照射的年受照剂量约束值分别进行了如下设定：

(1) 取职业照射年有效剂量限值的 1/4，作为本项目辐射工作人员的年受照剂量约束值，即 5mSv/a；

(2) 取公众年有效剂量限值的 1/10 作为周围公众的年受照剂量约束值，即 0.1 mSv/a。

7.3.2 剂量率控制水平

根据相关法律标准，结合本项目特点，本项目 II 类射线装置机房四周屏蔽体外、防护门外及屋顶剂量率控制水平为 2.5 μ Sv/h。

7.4 非放射性控制值

本项目臭氧、NO_x、氟化物及 SO₂ 排放限值参照执行《大气污染物综合排放标准》（DB11/501-2017）表 3，室内 O₃、NO_x、HF、氟化物及 SO₂ 浓度限值参照执行《工作场所所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ2.1-2019）中工作场所空气中化学物质容许浓度限值，具体标准值见表 7-3。

表 7-3 非放射性废物排放及室内浓度标准

污染物	排放标准		室内浓度限值	
	最高允许排放浓度, mg/m ³	最高允许排放速率, kg/h	最高容许浓度, mg/m ³	时间加权平均容许浓度, mg/m ³
O ₃	——	——	0.3	——
NO _x *	0.6	0.05	——	5
氟化氢	——	——	2	
氟化物	3	0.35*	——	2 (不含氟化氢)
SO ₂	100	7.04*	——	5

注：*NO_x 最高允许排放浓度取无组织排放监控点浓度的 5 倍；最高运行排放速率采用外推法计算得出；

*氟化物、SO₂ 排放口高度高于周围 200m 范围最高建筑 5m, 周围最高建筑为 22.8m, 则排放口高度为 28m, 排放速率内插法计算得到。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理位置

本项目位于怀柔科学城核心区 6 号楼，其东侧为绿地，南侧为马路，西侧为绿地，北侧为核心区 2C 楼和 4 号楼。

8.2 场所位置图

拟建的 2 台 II 类射线装置位于 6 号楼建筑内的北部，其中中能质子辐照装置位于东侧，低能离子辐照装置位于西侧，2 台加速器机房所在位置其顶部无建筑，无地下一层。中能质子辐照装置东墙外为走廊，南墙外为走廊、物理测量厅及协同效应实验大厅，西墙外为低能离子辐照装置机房，北墙外为道路；低能离子辐照装置东墙外为中能质子辐照装置机房和协同效应实验大厅，南墙外局部为道路，局部为控制室，西墙外为道路，北墙外为道路。

8.3 辐射本底监测

2021 年 1 月 12 日中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室对空间中心使用 II 类射线装置项目拟建场址及周边环境进行了辐射现状监测。

8.3.1 监测项目

本项目监测项目包括：（1） γ 辐射剂量率；（2）中子周围剂量当量率；（3）土壤中 ^3H 、 ^7Be 、 ^{22}Na 、 ^{54}Mn 活度浓度和总 α 总 β 分析；（4）地下水中 ^3H 、 ^7Be 活度浓度和总 α 总 β 分析。

8.3.2 监测仪器

本次监测采用的监测设备及主要技术性能指标见表 8-1。

表 8-1 监测设备及主要技术性能指标

仪器名称	型号	出厂编号	主要技术性能指标	检定有效日期
辐射测量仪	FH40G+ FHZ672 E-10	024979 +0810	测量范围：10nGy/h~100 μ Gy/h； 能量范围：48keV~6MeV； 相对响应之差：<±15%。 校准因子 1.14	2021 年 10 月 26 日
中子周围剂量当量率仪	LB123+ LB6411	178982-4092 +1501	能量范围：热中子~20MeV； 测量范围：50nSv/h~100mSv/h。 校准因子 1.0	2022 年 1 月 17 日

低本底 α 、 β 测量 仪	LB-4	038	本底计数率： $\alpha \leq 0.0040 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^2$ ； $\beta \leq 0.16 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^2$ 。 效率： $\alpha \geq 67.7\%$ ； $\beta \geq 56.8\%$ 。 重复性： $\alpha \leq 2.1\%$ ； $\beta \leq 1.9\%$ 。 串道比： $\alpha \leq 2.0\%$ ； $\beta \leq 0.03\%$ 。	2021 年 5 月 29 日
高纯锗 γ 谱仪	72299-750	012816	分辨力 1.69keV 短期稳定性 0.03% 活度 0.45%	2022 年 12 月 14 日
液闪谱仪	Quantulus 1220	2200266	相对误差 $\leq 4.0\%$ 短期稳定性 0.1% 重复性 0.4%	2022 年 11 月 5 日

8.3.3 监测方法

(1) γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率

采用便携式监测仪表，以定点的测量方式进行。监测时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 4 次，每次间隔 5 秒钟，取平均值。

(2) 周边环境样品放射性分析

土样放射性分析，在取样点位采集土壤表层样品，使用土壤采集器，在 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 范围内，采用梅花五点法采集，条件不具备时用蛇型布样采集，每点采 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 的表层土样（1~5cm），在现场充分混合，去除石头、草根等杂物后取 3kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。土样送实验室开展放射性分析。

水样放射性分析，样品容器选用聚乙烯塑料桶（取 3H 样时应采用硬质玻璃容器）。采集工具先用洗涤剂除去油污、用自来水冲洗干净，再用 10%硝酸或者盐酸洗刷，用自来水冲洗干净后使用。往盛水容器中按 10mL 酸/L 水样加入浓 HNO_3 使水样 pH 为 1.5 左右，避免器壁对放射性的吸附。（监测 ^3H 的水样品不能加酸）。样品送实验室开展放射性分析。

8.3.4 监测结果

γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果见表 8-2~表 8-5，样品测量结果见表 8-6。

表 8-2 6 号楼一层 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

监测点位	点位描述	γ^* nGy/h	n nSv/h
1	门厅中间	109.8 \pm 5.0	<LLDn
2	实验室 3 南墙外 30cm 西	96.1 \pm 5.1	<LLDn

3	实验室 2 南墙外 30cm 东	83.5±0.4	<LLDn
4	实验室 3 南墙外 30cm 中	95.9±0.8	<LLDn
5	实验室 3 迷宫中间	86.5±0.6	<LLDn
6	实验室 3 东南	56.6±0.2	<LLDn
7	实验室 3 东北	76.0±0.7	<LLDn
8	实验室 3 西北	76.6±0.4	<LLDn
9	实验室 3 西南	70.9±1.7	<LLDn
10	实验室 2 东南	86.4±0.7	<LLDn
11	实验室 2 中间	87.3±1.0	<LLDn
12	实验室 2 西南	93.4±3.4	<LLDn
13	实验室 2 西北	85.4±0.7	<LLDn
14	实验室 2 东北	84.7±0.5	<LLDn
15	实验室 4 中间	83.8±0.4	<LLDn
16	实验室 3 东墙外 30cm 南	99.2±0.4	<LLDn
17	实验室 3 东墙外 30cm 中	103.6±0.7	<LLDn
18	实验室 3 东墙外 30cm 北	99.8±2.4	<LLDn
19	控制机房中间	102.4±0.4	<LLDn
41	中央控制室操作位	103.4±2.2	<LLDn
42	实验室 1 南部西墙外 30cm 北	111.0±1.0	<LLDn
43	实验室 1 南部西墙外 30cm 中	114.9±1.1	<LLDn
44	实验室 1 南部西墙外 30cm 南	118.0±1.5	<LLDn
45	实验室 1 门外	88.8±1.0	<LLDn
46	实验室 1 内东部西南	94.1±0.7	<LLDn
47	实验室 1 内东部东南	94.5±1.8	<LLDn
48	实验室 1 内东部中间	95.8±2.3	<LLDn
49	实验室 1 内东部东北	93.1±1.3	<LLDn
50	实验室 1 内西部东	93.8±3.7	<LLDn
51	实验室 1 内西部西南	97.2±1.1	<LLDn
52	实验室 1 内西部西北	89.4±0.7	<LLDn

注：*监测结果含宇宙射线响应值；

LLDn=0.05μSv/h

表 8-3 6 号楼二层 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ* nGy/h	n nSv/h
20	实验室 3 南墙外 30cm 中	98.0±0.7	<LLDn
21	实验室 3 南墙外 30cm 西	99.6±1.6	<LLDn
22	实验室 2 南墙外 30cm 东	95.3±1.3	<LLDn
23	实验室 3 东墙外 30cm 南	104.1±0.6	<LLDn
24	实验室 3 东墙外 30cm 中	95.7±1.7	<LLDn
25	实验室 3 东墙外 30cm 北	92.0±0.2	<LLDn
53	物理测量区西北	105.6±1.1	<LLDn

54	物理测量区东北	118.6±3.4	<LLDn
55	物理测量区东	113.2±0.9	<LLDn
56	载荷测试区东	105.5±2.1	<LLDn

注：*监测结果含宇宙射线响应值。

LLDn=0.05μSv/h

表 8-4 6 号楼三层 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ* nGy/h	n nSv/h
26	实验室 3 东墙外 30cm 北	56.8±0.5	<LLDn
27	实验室 3 东墙外 30cm 中	62.7±0.3	<LLDn
28	实验室 3 东墙外 30cm 南	59.2±0.4	<LLDn
29	实验室 3 南墙外 30cm 东	63.7±1.1	<LLDn
30	实验室 3 南墙外 30cm 中	73.8±0.9	<LLDn
31	实验室 3 南墙外 30cm 西	76.5±0.4	<LLDn
32	实验室 3 西墙外 30cm 南	74.5±0.4	<LLDn
33	实验室 1 西墙外 30cm 中	74.0±0.4	<LLDn
34	实验室 2 屋顶中间	57.1±1.8	<LLDn
35	实验室 3 西墙外 30cm 北	77.2±0.7	<LLDn
36	实验室 4 屋顶中间	59.3±1.2	<LLDn
37	实验室 1 屋顶东南	60.5±1.0	<LLDn
38	实验室 1 屋顶东北	57.3±0.8	<LLDn
39	实验室 1 屋顶西北	54.8±1.1	<LLDn
40	西南角屋顶	58.0±0.3	<LLDn

注：*监测结果含宇宙射线响应值。

LLDn=0.05μSv/h

表 8-5 6 号楼周边 γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

监测 点位	点位描述	地貌	γ* nGy/h	n nSv/h
57	实验室 1 东部南墙外 30cm 西	草地	74.8±3.2	<LLDn
58	实验室 1 东部南墙外 30cm 东	草地	83.9±1.7	<LLDn
59	实验室 4 南墙外 30cm 中	草地	79.1±1.7	<LLDn
60	拟建场址东边界外	土路	80.6±3.0	<LLDn
61	拟建场址南边界外	柏油路	65.4±0.4	<LLDn
62	拟建场址西边界外	草地	75.8±0.3	<LLDn
63	拟建场址北边界外西（4 号楼南）	水泥路	72.1±0.3	<LLDn
64	拟建场址北边界外东（2 号楼南）	水泥路	69.1±1.1	<LLDn
65	拟建场址北边界外中	水泥路	66.8±0.2	<LLDn
66	实验室 3 北墙外 30cm 东	草地	83.2±2.2	<LLDn
67	实验室 3 北墙外 30cm 西	草地	85.4±2.1	<LLDn
68	实验室 2 北墙外 30cm 东	草地	79.1±2.2	<LLDn

69	实验室 2 北墙外 30cm 西	草地	84.7±0.6	<LLDn
70	实验室 1 北墙外 30cm 东	草地	83.2±0.4	<LLDn
71	实验室 1 北墙外 30cm 中	草地	81.0±0.8	<LLDn
72	实验室 1 北墙外 30cm 西	草地	85.1±0.4	<LLDn

注：*监测结果含宇宙射线响应值；

LLDn=0.05μSv/h。

表 8-6 拟建场址土壤样品放射性分析结果

样品编号	取样点	检测项目	分析结果
1	拟建场址东草地	总 α	(2.84±0.27) E+02 Bq/kg
		总 β	(7.67±0.16) E+02 Bq/kg
		³ H	(1.99±0.12) Bq/kg
		⁷ Be	≤LD=4.6 Bq/kg
		⁵⁴ Mn	≤LD=2.5E-01 Bq/kg
		²² Na	≤LD=2.7E-01 Bq/kg
2	拟建场址南绿地	总 α	(2.45±0.35) E+02 Bq/kg
		总 β	(8.17±0.19) E+02 Bq/kg
		³ H	(2.63±0.15) Bq/kg
		⁷ Be	≤LD=6.6 Bq/kg
		⁵⁴ Mn	≤LD=3.6E-01 Bq/kg
		²² Na	≤LD=3.9E-01 Bq/kg
3	拟建场址西草地	总 α	(2.07±0.26) E+02 Bq/kg
		总 β	(7.70±0.15) E+02 Bq/kg
		³ H	(6.52±0.25) Bq/kg
		⁷ Be	≤LD=4.6 Bq/kg
		⁵⁴ Mn	≤LD=2.4E-01 Bq/kg
		²² Na	≤LD=2.6E-01 Bq/kg
4	拟建场址北草地 (4 号楼南)	总 α	≤LD=1.0E+02 Bq/kg
		总 β	(7.87±0.21) E+02 Bq/kg
		³ H	(1.97±0.13) Bq/kg

		⁷ Be	≤LD=9.9 Bq/kg
		⁵⁴ Mn	≤LD=3.6E-01 Bq/kg
		²² Na	≤LD=3.6E-01 Bq/kg

表 8-7 拟建场址地下水放射性分析结果

样品编号	取样点	检测项目	测量结果
1	地下水* (卫生间自来水)	总 α	≤LD=2.1E-02 Bq/L
		总 β	(7.55±0.50) E-02 Bq/L
		³ H	≤LD=2.5 Bq/L
		⁷ Be	≤LD=2.0E-01 Bq/L

注：本项目卫生间自来水为市政供水，其水源来自附近的地下水

由表 8-2~8-4 可知：本项目拟建场所 6 号楼内测点的 γ 辐射剂量率监测结果在 (54.8~118.6) nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均为小于仪表探测限。

由表 8-5 可知：本项目拟建场所 6 号楼周边测点的 γ 辐射剂量率监测结果在 (65.4~85.4) nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均为小于仪表探测限。

由表 8-6 可知：本项目拟建场址周围土壤样品中 ²²Na、⁷Be、⁵⁴Mn 活度浓度的分析结果均小于等于探测限，总 α 分析结果在小于仪表探测限~284Bq/kg 范围内，总 β 分析结果在 767~817 Bq/kg 范围内，³H 分析结果在 1.97~6.52 Bq/kg 范围内。

由表 8-7 可知：本项目拟建场所周围地下水 ³H、⁷Be 活度浓度的分析结果均小于等于探测限，总 α 分析结果小于仪表探测限，总 β 分析结果为 0.0755Bq/L。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 设备组成及工作方式

本项目建设地点位于怀柔科学城核心区 6 号楼，该项目建设阶段的环境影响评价报告书已获得北京市环境保护局的批复（京环审【2017】90 号，本项目拟配备的设备为中能质子辐照装置和低能离子辐射模拟装置。

9.1.1 中能质子辐照装置

(1) 设备组成

空间中心中能质子辐照装置的实验设备主要包含一台 50MeV 质子回旋加速器、一条束流输运线与实验终端。其中能质子辐照装置的主要技术指标见表 9-1。

表 9-1 中能质子辐照装置的主要技术指标

项目	指标参数或内容	备注
加速粒子种类	负氢离子	
引出束流粒子种类	质子	
加速器引出束流最高能量	50MeV	
加速器引出束流最低能量	30MeV	
束流引出方式	剥离引出	
实验靶站接收的束流能量范围	30MeV—50MeV	3
加速器引出束流最大流强	10 μ A	平均流强
加速器引出束流最小流强	10nA	平均流强
实验终端靶上束流密度	5 \times 10 ⁵ 至 5 \times 10 ⁹ p/cm ² •s	
靶站束流扫描面积	20cm \times 20cm	照射野
照射野束流不均匀度	小于 10%	
靶站束流能散	小于 2%	通过 ESS 段优化
束流流强稳定度	小于 10%/10 小时	

50MeV 质子回旋加速器是一台紧凑型回旋加速器，设计引出质子束流能量 30MeV~50MeV，引出束流流强 10nA~10 μ A。回旋加速器直径约 4 米，高度 2.5 米，总重量约 100 吨。回旋加速器采用一台外部多峰场负氢离子源产生负氢离子束，通过注入束流线注入束流。加速器的高频系统为一台 100KW 高频发射机驱动一对高频腔体，四次谐波加速，高频加速电压为 50KV—90KV。束流引出方式为剥离引出，引出效率高于 99%。能够最高引出能量为 50MeV，最低引出能量为 30MeV。

质子束流进入加速器大厅后通过 2 台偏转磁铁、聚焦磁铁、束流诊断装置、扩束器、限束器等元件后进入到实验靶站。在实验靶站质子束流经过准直器等元件后打到实验样品台架上样品中。

(a) 回旋加速器

加速器主要由负氢离子源、注入束流传输线、螺旋静电偏转板与中心区、高频腔与频率调谐装置、高频功率源、主磁铁与励磁线圈、真空室、真空泵系统、剥离引出系统、引出开关磁铁、束流诊断装置、液压举升装置、控制系统、水冷系统、气动系统、电源系统、电气系统等系统装置组成。其加速器示意图见 9-1。

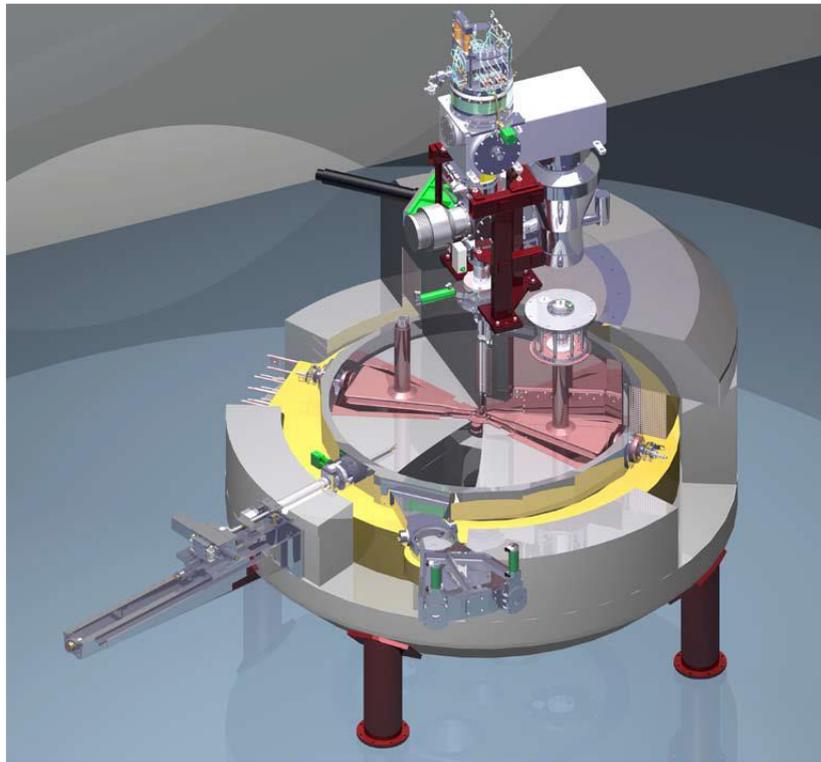


图 9-1 回旋加速器示意图

50MeV 回旋加速器为采用外部离子源注入的紧凑型直边扇回旋加速器，加速负氢离子，采用剥离引出方式引出质子束流。加速器采用 2 个高频谐振腔体结构，使得负氢离子束每圈获得 4 次加速，加速电压为 50kV-90kV，高频机功率为 100kW，采用数字化高频闭环控制系统。回旋加速器主磁铁提供粒子回旋加速的调变磁场，平均场强为 1.0T-1.6T，磁铁直径约 4 米，总重量约 100 吨，磁铁材料为含碳量低于 0.025%的电工纯铁。主真空系统采用 2 台 GM 冷泵

+2 台分子泵+1 台干泵的组合式真空获取装置，真空度要求好于 1×10^{-7} mBarr。离子源采用多峰场负氢离子源，能够注入 35keV 的负氢离子束；静电偏转板与中心区能够把离子源输出的束流偏转至束流加速轨道。剥离引出装置是用碳膜将负氢离子的电子剥离，穿过碳膜的质子束流在磁场作用下偏转出磁铁。加速器技术指标见表 9-2。

表 9-2 回旋加速器主要技术指标

项目	指标参数	备注
加速器引出质子束流能量范围	30MeV-50MeV	可调
加速器引出束流流强范围	10nA-10 μ A	可调
加速粒子种类	负氢离子	
离子源类型	外部，多峰场负氢离子源	
加速器磁场强度	1T-1.6T	
加速器尺寸	Φ 4m \times 2.5m	
加速器总重量	约 100 吨	
粒子加速模式	4 次谐波加速	
高频发射机功率	100KW	
高频加速电压	50kV-90kV	
引出束流流强稳定度	小于 10%/10 小时	
加速器总功率	约 260KW	

(b) 束流输运线与实验终端

质子束流输运系统的作用是将回旋加速器产生的质子束流传输至实验终端，并在束流传输过程中，调整质子束流的能量、能散、发射度等参数，使得最终传输至实验终端的束流满足物理实验的要求。

空间辐射效应实验需要的质子束流强度跨度大，质子束流密度 $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^9$ p/cm²·s，扫描面积 20cm \times 20cm，换算到束流强度最大为 2.4 μ A，最小只有 0.24nA，且能量范围宽，从回旋加速器引出的质子束流最小为 10nA 左右，能量为 30MeV-50MeV。

束流传输线主要由引出开关磁铁、束流诊断装置（荧光靶、法拉第筒）、导向磁铁、四极透镜、偏转磁铁、真空管道、真空泵组、扩束器、准直器以及配套的支架等设备组成。

束流通过传输线后传送至实验靶站。

(2) 工作原理

回旋加速器的工作原理如图 9-2 所示。在回旋加速器中心部位的离子源经高压电弧放电而使气体电离发射出粒子束流，该粒子束流在称为 Dee 的半圆形电极盒（简称 D 型盒）中运动。D 型盒与高频振荡电源相联为加速粒子提供交变的电场。在磁场和电场的作用下被加速的粒子在近似于螺旋的轨道中运动飞行。设粒子的质量为 m ，所带电荷为 q ，所具有的运动速度为 v ，运动方向垂直于磁场强度为 B 的磁力线，粒子受到垂直于 v 和 B 的 Lorentz 力 F_L 的作用，该力为：

$$F_L = vBq$$

粒子轨道的曲率半径 r 由离心力和 F_L 之间的平衡状态来确定：

$$mv^2/r = vBq$$

由上式可得粒子的速度 v ：

$$v = qBr / m$$

则粒子产生的动能为：

$$E = mv^2/2 = B^2q^2r^2 / 2$$

在回旋加速器中心区域，粒子被拉出后经电场的加速而获得较低的初速度 v_1 ，同时，磁场也对这些粒子产生作用，两种场作用的结果是粒子在 Dee 间隙（gap）内按螺旋轨道飞行。经过非常短的时间后，粒子经 gap 进入另一个 Dee 电极盒，此后，粒子在该 Dee 电极盒一边飞行到等电势的另一边。每越过一个 gap 后，其轨道半径将比前一次的轨道半径大。粒子运动的瞬时轨道半径将随时间 t 的增加而增大，粒子运动速度的平方与粒子旋转的圈数成比例。被加速粒子运动的螺旋轨道半径 r 与运行时间 t 的平方根成正比。带电粒子经多次加速后，圆周轨道半径达到最大并获得最大的能量，在该点处粒子将被束流提取装置提取引出进入靶室。

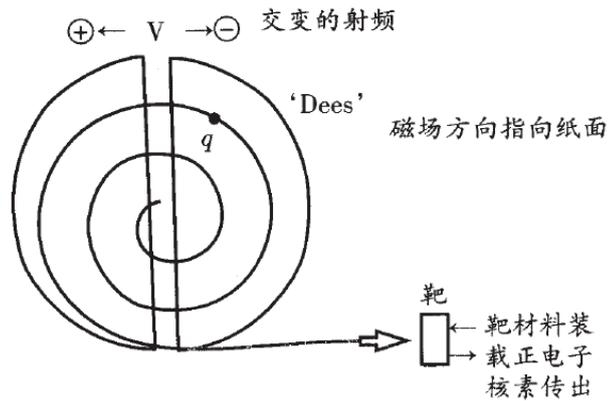


图 9-2 回旋加速器的工作原理简图

(3) 操作流程

将预处理、预测试的样品（电子器件）安装于靶台，用质子束辐照样品至一定注量，之后停止辐照，取下样品，测试其电参数的退化情况。测试通常在本实验室完成，个别情况可能将样品送至其他实验室测试。一个样品通常需要辐照多次，以得出其在不同质子注量下的响应曲线。其操作流程图见图 9-3。

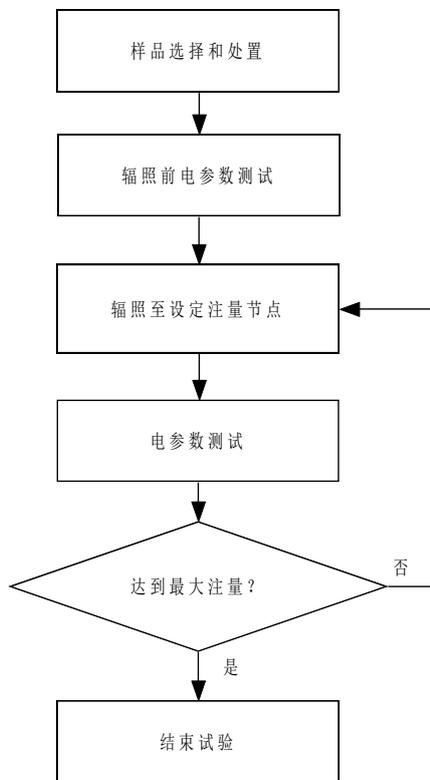


图 9-3 操作流程图

被辐照的样品主要是电子器件(CCD、CMOS、LD等)及安装器件的PCB板,材料主要为:硅、铜、铝、环氧树脂、陶瓷、玻璃等,数量约200个/年。

(4) 人员配备情况

本项目中能质子辐照装置配有10名辐射工作人员,每种样品平均照射时间约为0.5h,加速器年出束时间为1000h。

9.1.2 低能离子辐射模拟装置

(1) 设备组成

本项目低能离子辐射模拟装置

主要由轻离子源和重离子源,高压发生器,加速管,高压电极内部设备,磁分析器,真空管道,真空系统,实验真空罐,束流监测系统,SF₆高压绝缘气体处理及存储装置,辐射监测及安全联锁系统,视频监控系统,声光报警系统,中控系统,冷却水循环系统,稳压供电系统等组成。该设备质子能量最大为12MeV,其他重离子粒子总能量不超过30MeV,设备参数如下:

- 束流种类: ¹H, ⁴He, ⁷Li, ¹²C, ¹⁴N, ¹⁶O, ¹⁹F, ²⁶Al, ²⁷Al, ³⁶Cl, ⁵⁶Fe;
- 加速高压范围: 30kV~6MV;
- 束流能量精度: >99.0%;
- 束流通量范围: 10³~10¹⁰cm⁻²s⁻¹连续可调;
- 束斑直径: Ø50mm;
- 束斑内束流不均匀度: ≤10%;
- 束流稳定度: ≤5%/30min;

(2) 原理

1931年美国的范德格拉夫(R. J. Van de Graaff)发明了静电加速器,质子能量达到1.5MeV。串列加速器就是在静电加速器基础上发展起来的、由两段(甚至三段)静电加速器组成的加速器。串列加速器两端为地电位,电动机带动的输电链将正电荷输送到高压电极。离子源产生的负离子在加速管中加速,到达高压端电荷交换室被剥离电荷变成正离子,然后可以在另一加速管继续加速。总的等效加速电压比普通的静电加速器提高了一倍。可用来加速从质子直到原子序数为92的铀离子,用于核物理实验、加速器质谱分析、同位素制备等。

(3) 操作流程

加速器首先由离子源提供低能负离子束流，通过引出电场把束流引入加速管进行一次加速，然后通过剥离膜把核外电子剥离掉进行二次加速，然后经过束流输运线输运到 90° 分析磁铁进行能量和电荷态的精确选取后再经过输运线输运到开关磁铁进行小角度偏转进入不同的试验终端进行束流试验。

(4) 人员配备情况

低能离子辐照模拟装置配有 2 名辐射工作人员，实验过程中，每个靶件会进行多次辐照，每次平均辐照时间约 5min 左右，加速器年出束时间为 1000 小时。

污染源项

9.2 污染源分析

9.2.1 正常工况下污染源分析

(1) 中能质子加速器和低能离子辐射装置会产生中子，伴生 γ 射线产生，对周围公众和工作人员造成外照射；

(2) 加速器运行过程中主束或次级中子与靶、加速器部件、设备冷却水及隧道内的空气相互作用发生活化，产生感生放射性；

(3) 穿过屏蔽墙顶射向天空的各种辐射，由于空气的散射作用，将部分又回到地面，即加速器运行过程中会产生天空反散射；

(4) 加速器运行时会产生少量的臭氧及氮氧化物

(5) 低能离子模拟辐照装置会泄露少量的高压绝缘气体 SF_6 ，高压绝缘气体 SF_6 被加速器离子束流电离产生少量的 SO_2 和 HF ，由于 SO_2 和 HF 产量很少，可忽略不计。

9.2.2 事故情况下污染源分析

本项目可能发生的事故为 1) 工作人员误留或误入到正处于开机出束状态的加速器机房中；2) 由于冷却水管道破裂，导致活化的冷却水泄露。这些事故工况下，停留人员主要受到中子、 γ 射线的外照射。

其它电源故障、触电、着火等事故，不会对环境造成辐射污染。

表 10 辐射安全与防护

10.1 场所布局及屏蔽设计

10.1.1 场所布局

本项目拟使用的 2 台 II 类射线装置位于怀柔科学城核心区 6 号楼一层。2 台装置周围情况见表 10-1。

表 10-1 辐射工作场所周围情况

设备	东侧	南侧	西侧	北侧	楼上
中能质子辐照装置	走廊	门厅、走廊及协同效应实验大厅	低能离子辐射模拟装置机房	室外绿地	屋顶
低能离子辐射模拟装置	中能质子辐照装置机房	中央控制室及室外道路	室外绿地和道路	室外道路	屋顶

10.1.2 辐射防护分区

本项目使用 II 类射线装置辐射工作场所采取分区管理，其中需要采取防护措施的区域为控制区，不需要采取专门的防护手段或安全措施、但需对职业照射条件进行监督评价的区域为监督区，具体分区如下：控制区：中能质子辐照装置加速器大厅、终端及低能离子辐照模拟装置机房；监督区：一层其他区域。辐射防护分区图见图 10-1。

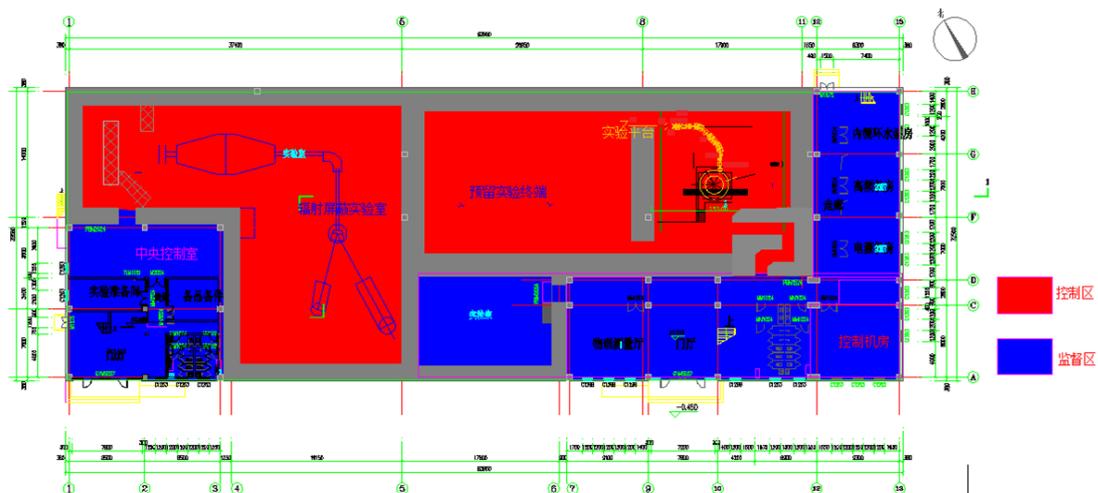


图 10-1 辐射防护分区图

10.1.3 辐射防护屏蔽设计

中能质子辐照装置的质子回旋加速器机房及实验终端机房屏蔽设计见表 10-2，低能离子辐射模拟装置所在机房屏蔽设计见表 10-3。其屏蔽设计平面及剖面图分布见图 10-2、图 10-3 和图 10-4。

表 10-2 中能质子辐照装置所在机房屏蔽设计

区域	墙体编号	屏蔽体材料	厚度, m	备注
回旋加速器室	东墙	混凝土	2.5	
	迷道内墙	混凝土	1.5	
	迷道外墙	混凝土	2.0	
	南墙	混凝土	2.5	
	西墙	混凝土	2.5	
	北墙	混凝土	2.5	
	屋顶	混凝土	2.0	
	防护门	石蜡+铅	0.33	32cm 石蜡,1cm 铅
实验终端	东墙	混凝土	2.5	
	南墙	混凝土	2.5	
	西墙	混凝土	2.5	
	北墙	混凝土	2.5	
	屋顶	混凝土	2.0	

表 10-3 低能离子辐射模拟装置所在机房屏蔽设计

区域	墙体编号	屏蔽体材料	厚度, m	备注
机房	东墙 1	混凝土	2.5	
	东墙 2	混凝土	1.8	
	南墙 1	混凝土	1.8	
	南墙 2	混凝土	1.8	
	迷道内墙	混凝土	1.5	
	迷道外墙	混凝土	1.8	
	北墙	混凝土	1.8	
	屋顶	混凝土	2.0	
	防护门	石蜡+铅	0.33	32cm 石蜡,1cm 铅

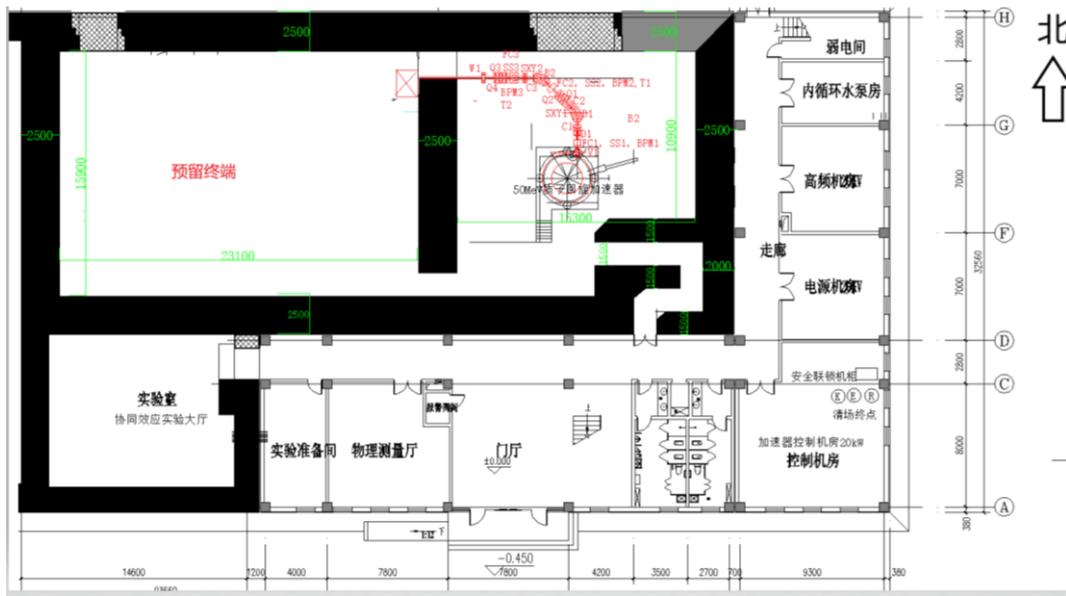


图 10-2 中能质子辐照装置屏蔽设计平面图

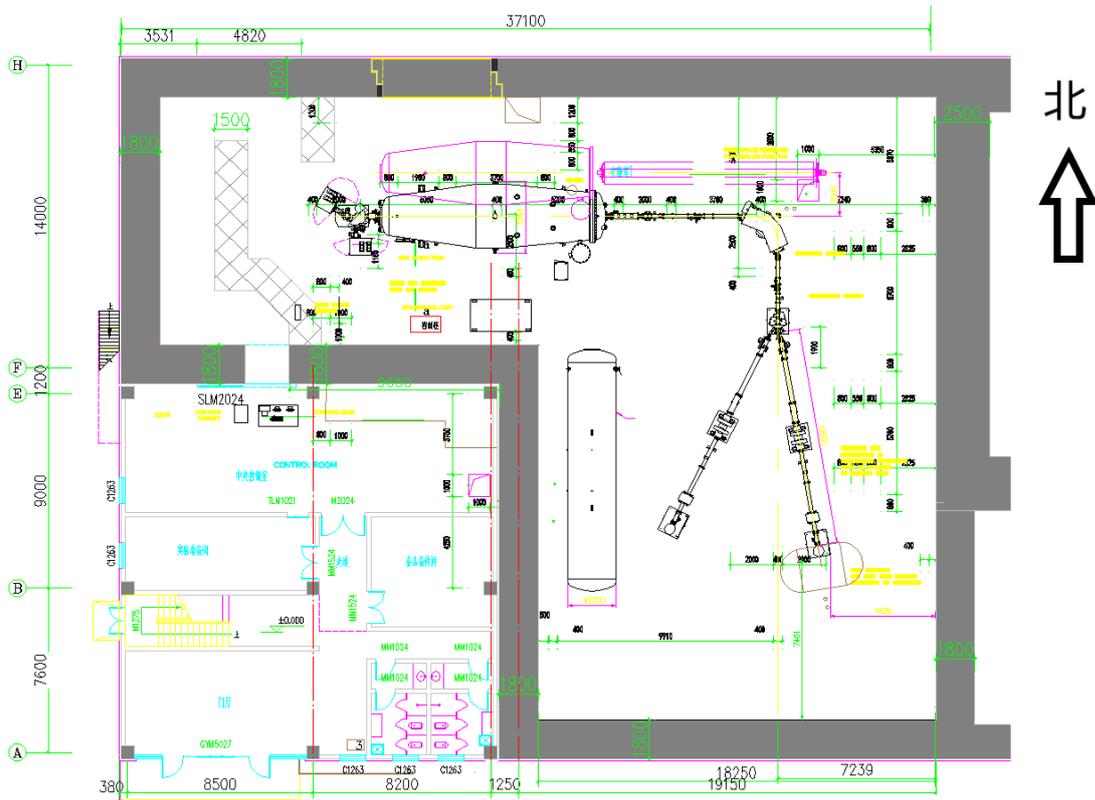


图 10-3 低能离子辐射模拟装置屏蔽设计平面图

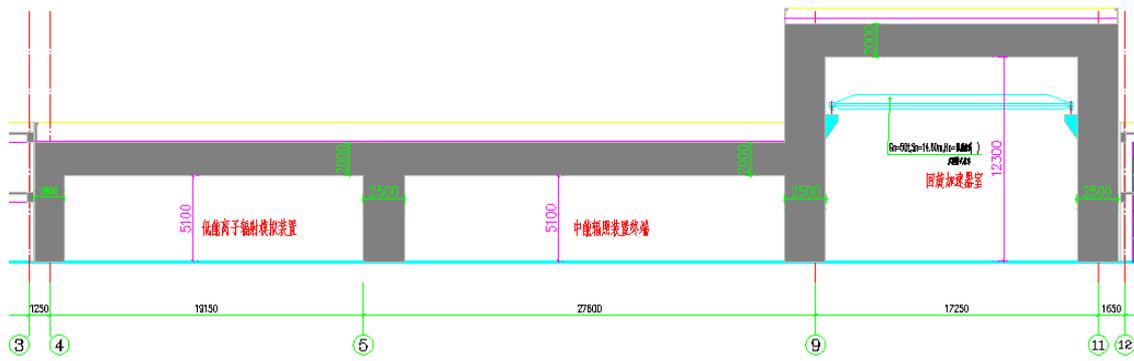


图 10-4 两台射线装置屏蔽设计剖面图

10.2 拟采取的辐射安全与防护措施

10.2.1 中能质子辐照装置

10.2.1.1 安全联锁系统

(1) 设计准则

安全联锁设计准则：

- (1) 纵深防御：充分考虑并合理设置联锁设施实现对人身辐射安全的多重冗余保护且各重保护措施之间具有相互独立性；
- (2) 硬件最可靠：重要的位置把最大的信赖寄托在“硬件”上；
- (3) 冗余设计及独立性：在同一位置、为同一目的而使用若干种联锁手段，采用冗余设计的多套联锁设施相互独立，不会因为一套系统的失效而影响到其他系统的安全性；
- (4) 最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是设备最初始的运行功能（如离子源的高压等），更好的保证区域内的辐射安全；
- (5) 失效保护设计：关键联锁部件及联锁系统失效时，相应联锁控制区域仍处于安全状态。
- (6) 自锁装置：联锁系统的主要环节急停开关在计划停机或被自救人员按下后即处于断开状态，需要人工就地进行复位后才能重新开机。

安全联锁系统组成示意图见图 10-5。

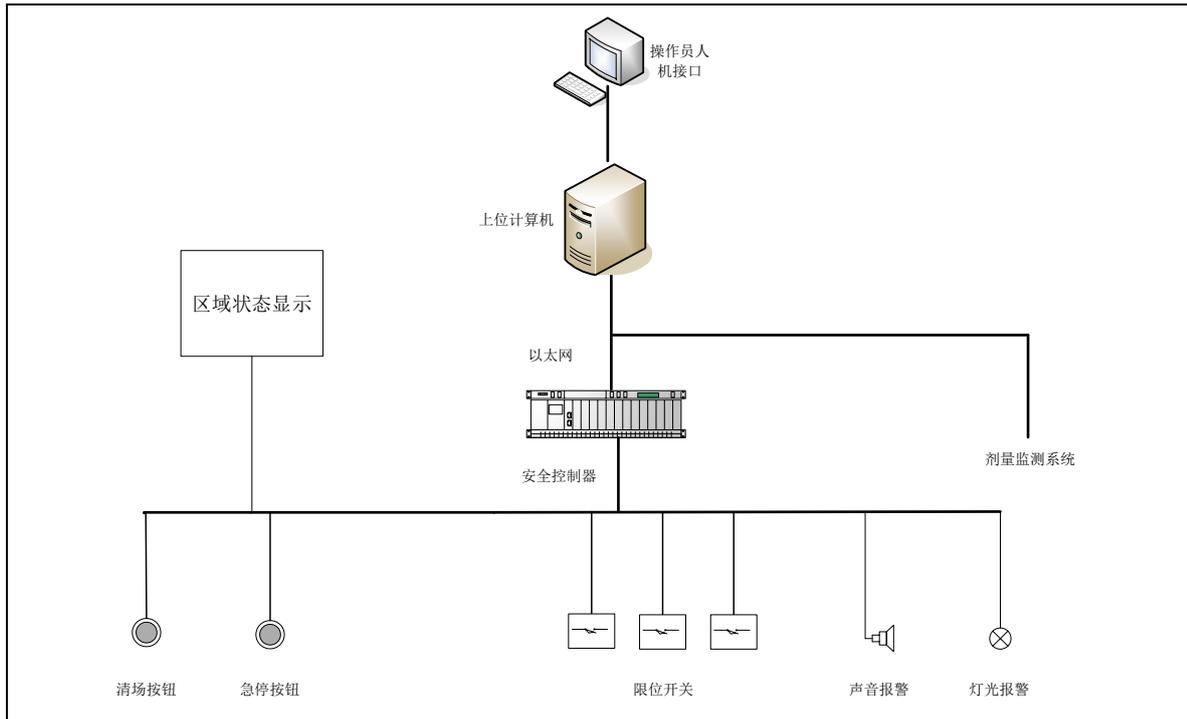


图 10-5 安全联锁系统组成示意图

(2) 系统组成

安全联锁关键设备位置图见图 10-6，主要包括以下几个部分：

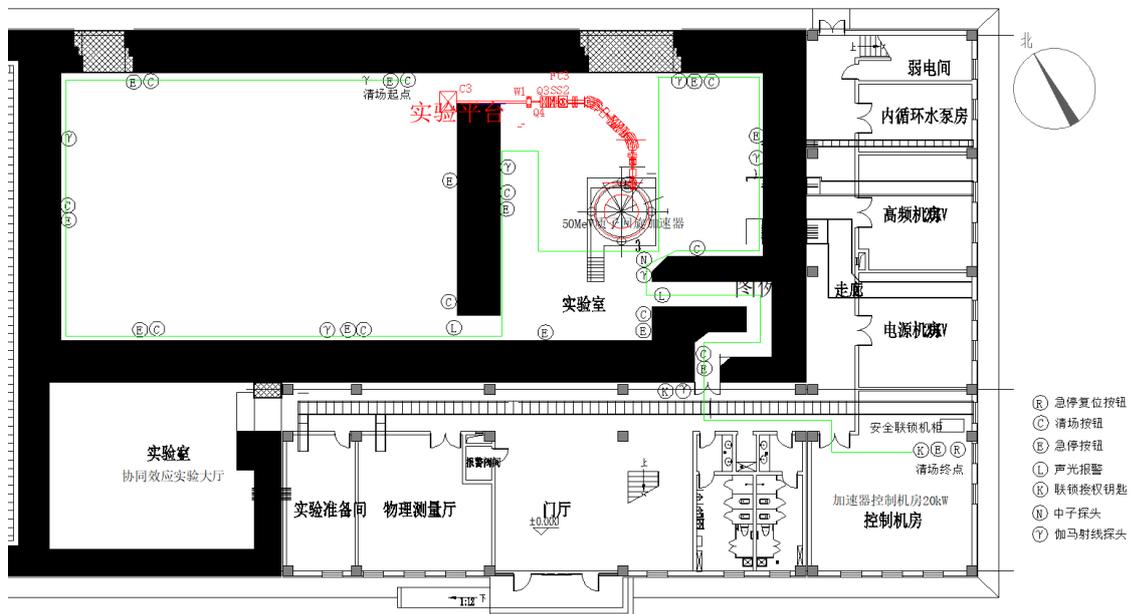


图 10-6 安全联锁关键设备位置图

①控制器（PLC）：控制器完成现场剂量信号、防护门位置信号、紧急停机按钮信号、清场按钮的回收，根据预先编程定义好安全策略执行相应的动作，可以控制关键束流加速设备，停止束流的供应。也可给主控制系统提供信息，进行控

制层的通信。

②门机联锁：回旋加速器大厅防护门和加速器联锁，防护门设有限位开关，只有当防护门关闭后加速器才能出束，门一旦打开，立即停止出束。

③声光报警：加速器出束前室内发出声光警示信号，在加速器大厅、终端、设有声光报警装置；机房防护门上方设有三色指示灯。

④急停按钮：在加速器大厅四面墙体、终端四面墙体、迷道和控制台装有醒目的急停按钮。如果有人误留，则迅速按下急停按钮，加速器立即停止供束。

⑤清场按钮：在加速器大厅、终端设有清场按钮，在开机之前必须按照路线在规定时间内完成进行清场（清场路线图见图 10-5 绿色路线），完成清场后，才能关闭防护门进行供束操作。

⑥剂量联锁：在加速器大厅、终端室内、防护门外设固定式 γ 剂量率仪，质子回旋加速器机房迷道口设有中子剂量率仪，当室内剂量率超过预设值后发出警报信号，并禁止从门外开启屏蔽门。

⑦紧急开门按钮：在加速器机房出口处内墙设有紧急开门按钮。若加速器开机出束情况下大厅内有人员停留，可通过大厅内的开门按钮开门离开，当防护门打开时安全联锁系统自动切断束流。

另外，在机房门口标有电离辐射警示标志，并有“当心电离照射”等警示语。

10.2.1.2 通风系统

回旋加速器大厅和终端设有通风换气系统，其通风管道穿墙采用 U 型穿墙。加速器大厅设有离心风机箱的 P3-1 和 P3-2~4 排风系统和 ZK-3 的空调系统；终端设有离心风机箱 P2-1 和 P2-2~3 排风系统和 ZK-2 的空调系统。其排风设计情况如下：

（1）平时无人进入时，开启排风机 P2-1、P3-1 进行排风，当负压绝对值大于 50Pa 时风机停止运行，当房间负压绝对值小于 20Pa 时开启 P2-1、P3-1 进行排风，以确保房间负压在 -20~-50 范围内，P2-1、P3-1 排风机排风量分别为 2375 m³/h 和 3480m³/h；（2）当人员进入前，开启排风机 P2-2~3、P3-2~4 进行排风，同时开启补风机 S2-1、S3-1 进行补风，当房间条件满足人员进入要求时，人员方可进行；P2-2~3 排风机的排风量分别为 16254 m³/h，P3-2~4 排风机的排风量分别为 17333 m³/h；补风机 S2-1、S3-1 补风量分别为 27513 m³/h 和 46658 m³/h；（3）当加速器

运行前开启 P2-2~3、P3-2~4 进行排风，使房间负压达到-200Pa，然后停止排风，开启空调 ZK-2、ZK-3 以保证温湿度要求；空调系统 ZK-2、ZK-3 的风量分别为 16000 m³/h；（4）当加速器运行过程中房间负压绝对值小于 150Pa 时，开启排风机 P2-1、P3-1 进行排风，当房间负压绝对值大于 200Pa 时，停止排风，以确保实验时满足温湿度要求的前提下，房间负压值-150Pa~-200Pa 范围内。

排风口位于屋顶，进行屋顶排放。

10.2.2 低能离子辐射模拟装置

10.2.2.1 安全联锁

低能离子辐射模拟装置安全联锁设计准则与中能质子辐照装置基本相同，其安全联锁逻辑系统框图见图 10-7，安全联锁逻辑图见图 10-8。

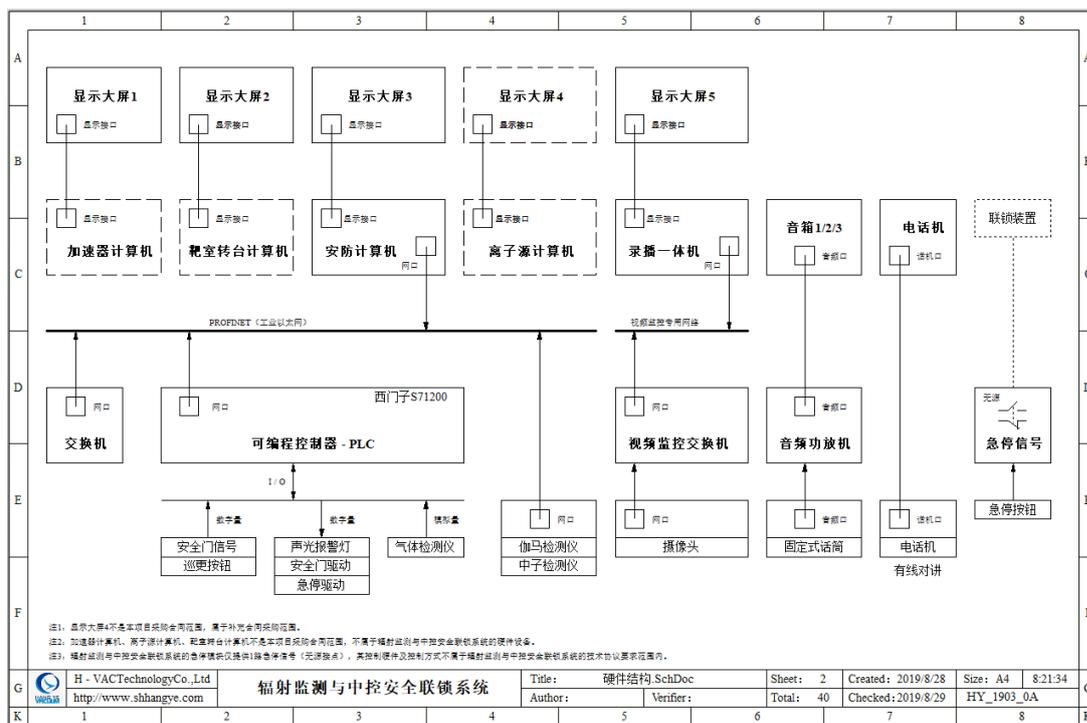


图 10-7 安全联锁系统框图

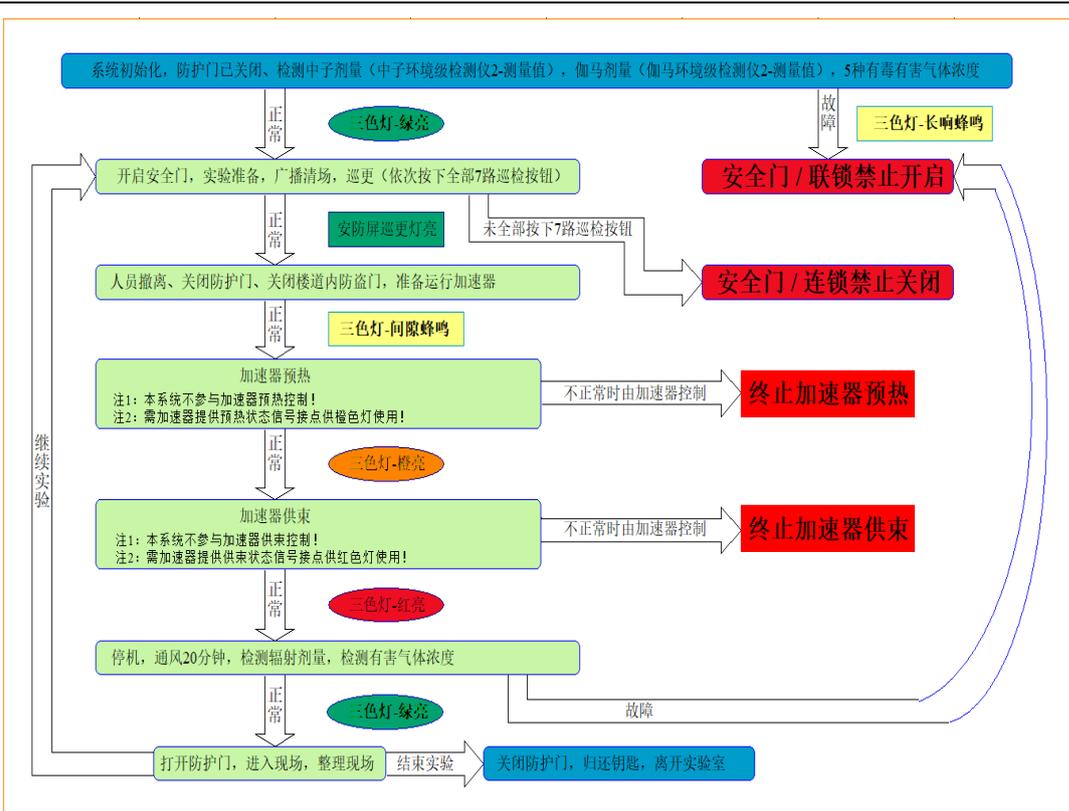


图 10-8 安全联锁逻辑图

安全联锁系统包括辐射监测、视频监控、门机联锁、辐射剂量超阈值联锁、巡更急停联锁、声光报警装置、视频监控等，关键设备位置图见图 10-9。

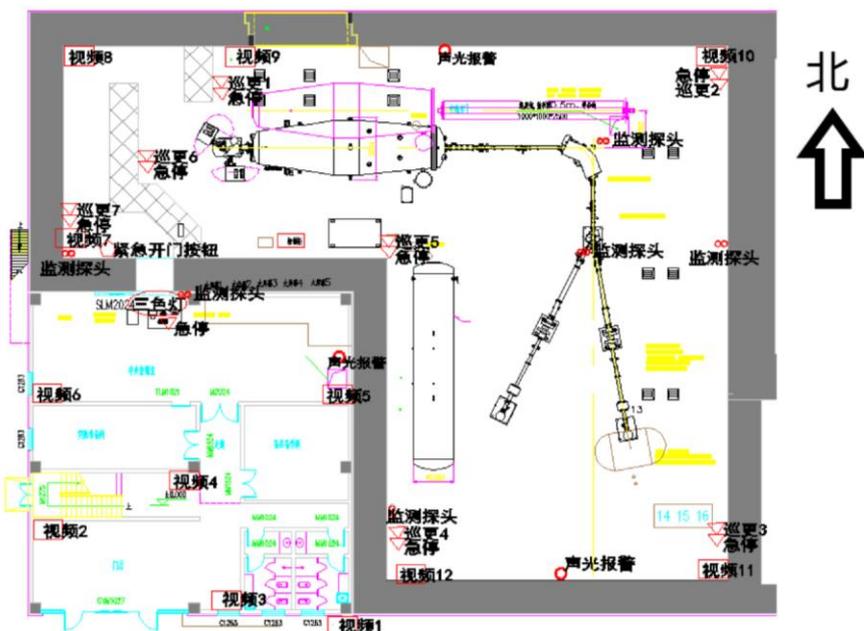


图 10-9 安全联锁关键设备位置及巡更按钮顺序图

主要组成部分如下：

①控制器（PLC）：控制器完成现场剂量信号、防护门位置信号、紧停钮信号、巡更按钮的回收，根据预先编程定义好安全策略执行相应的动作，可以控制关键束流加速设备，停止束流的供应。也可给主控制系统提供信息，进行控制层的通信。。

②门机连锁：加速器机房防护门和加速器连锁，防护门设有限位开关，只有当防护门关闭后加速器才能出束，门一旦打开，立即停止出束。

③声光报警：在加速器大厅和中央控制室设置声光报警装置，共设置 3 个声光报警装置，声光报警装置设有 3 色指示灯与蜂鸣器，橙色表示安防连锁正常、红色表示加速器预热正常、绿色表示加速器供束正常，蜂鸣表示辐射剂量与气体浓度超标；入口机房防护门上方设有三色指示灯。

④急停按钮：在加速器大厅、迷道和中央控制室装有醒目的急停按钮，共设置 8 个急停按钮，如果有人误留，则迅速按下急停按钮，加速器立即停止供束。

⑤巡更按钮：在加速器大厅四面墙体、迷道设有巡更按钮，共设置 7 个自复位式按钮，巡更按钮位置示意图图见图 10-8。在开机之前必须按照巡行路线在规定时间内完成进行巡更，完成巡更后，才能关闭防护门进行供束操作。

⑥剂量连锁：在加速器大厅、迷道、防护门外共设置 6 个 γ 和中子剂量率探头，当剂量率超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 时，禁止从门外开启防护门。若加速器开机出束情况下机房内有人员停留，可通过防护门内的开门按钮开门离开，当防护门打开时安全连锁系统自动切断束流。

⑦紧急开门按钮：在加速器机房出口处内墙设有紧急开门按钮，一旦人员误留，则迅速按下该按钮，防护门打开且加速器立即停止供束。

⑧设有五种有毒有害气体监测设备，当检测到场所内有有毒有害气体浓度高于表 7-3 中室内气体浓度限值时，禁止从门外开启防护门。

另外，在加速器大厅门口标有电离辐射警示标志，并有“当心电离照射”等警示语。

10.2.2.2 通风系统

低能离子辐射模拟装置有通风换气系统，其通风管道穿墙采用 U 型穿墙。低能离子辐照模拟装置所在机房设有离心风机箱的 P1-1 和 P1-2~5 排风系统和 ZK-1 的

空调系统。其排风设计情况如下：（1）平时无人进入时，开启排风机 P1-1 进行排风，当负压绝对值大于 50Pa 时风机停止运行，当房间负压绝对值小于 20Pa 时开启 P1-1 进行排风，以确保房间负压值-20~-50 范围内，P1-1 排风机排风量为 4050m³/h；（2）当人员进入前，开启排风机 P1-2~5 进行排风，同时开启补风机 S1-1 进行补风，当房间条件满足人员进入要求时，人员方可进行；P1-2~5 排风机的排风量分别为 15000m³/h；补风机 S1-1 补风量为 56031 m³/h；（3）当加速器运行前开启 P1-2~5 进行排风，使房间负压达到-200Pa，然后停止排风，开启空调 ZK-1 以保证温湿度要求；空调系统 ZK-1 的风量为 26500 m³/h；（4）当加速器运行过程中房间负压绝对值小于 150Pa 时，开启排风机 P1-1 进行排风，当房间负压绝对值大于 200Pa 时，停止排风，以确保实验时满足温湿度要求的前提下，房间负压值-150Pa~-200Pa 范围内。

低能离子辐射模拟装置排风口高于周围 200m 范围最高建筑 5m，排风口高度为 28m。

根据原环保部辐射安全与防护监督检查技术程序，表 10-4 列出了本项目拟采取的安全与防护设施设计方案。

表 10-4 本项目拟采取的安全与防护设施设计方案

项目	检查内容	是否设置	备注
场所 设施	入口电离辐射警示标志	√	在机房防护门设有电离警告标志
	入口处机器工作状态显示	√	机房防护门上方设有设备工作状态指示灯
	隔室操作	√	控制室与主机隔开
	迷道	√	机房设有迷道
	防护门	√	设有屏蔽门
	控制有防止非工作人员操作的锁定开关	√	加速器操作系统设有密码
	门机联锁系统	√	防护门与设备联锁
	照射室内监控设施	√	机房设有监控系统
	通风设施	√	设有通风系统
	照射室内紧急停机按钮	√	机房内设有紧急停机按钮
	控制台上紧急停机按钮	√	控制室控制设有紧急有停止按钮
	出口处紧急开门按钮	√	机房防护门内存设有紧急停机按钮
监测 设备	准备出束声光提示	√	机房设有声光报警装置
	便携式辐射监测仪器仪表	√	配备便携式 γ 和中子剂量率仪
	个人剂量计	√	每人一个
	个人剂量报警仪	√	每个辐射场所 2 个

10.3 申请者从事辐射活动能力评价

10.3.1 与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的符合情况

根据原环境保护部第 18 号令《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》使用射线装置的单位应具备的条件与法规的符合情况见表 10-5。对照结果表明，本项目采取的安全措施和辐射安全管理能够满足管理办法的要求。

表 10-5 项目执行“18 号令”要求对照表

安全和防护管理办法要求	本项目情况	符合情况
第五条 生产调试和使用场所，应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	本项目 2 台射线装置所在场所有完备的安全联锁系统，包括门机联锁、剂量联锁等。防护门门口显著位置设有电离辐射警示标识和中文警示说明，防护门上方设置工作状态指示灯。	符合
第九条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。	本项目 2 台射线装置场所配备了固定式和便携式 γ 、中子剂量率仪，定期对工作场所辐射水平进行监测，每年对工作场所周围环境的辐射水平进行监测一次。	符合
第十二条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当对本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度的评估报告。	建设单位每年 1 月 31 日前向北京市生态环境局提交上一年度辐射安全防护评估报告。	符合
第十七条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲，对直接从事生产、销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗	制定了辐射工作人员培训及考核计划。目前，本项目涉及辐射工作已参加或正在参加生态环境部门组织的考核。	符合

<p>第二十三条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测；发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。</p>	<p>所有从事辐射工作人员均配备了个人剂量计，并委托有资质单位进行个人剂量监测（每季度1次）。</p>	<p>符合</p>
--	---	-----------

10.3.2 对《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求满足情况

依据原环境保护部发布的《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的决定”（环境保护部 3 号令）的规定，对使用射线装置提出了具体条件，本项目具备的条件与法规要求的对照检查见表 10-6。

表 10-6 项目执行“3 号令”要求对照表

3 号令要求	本项目情况	符合情况
<p>第十五条 应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。</p>	<p>成立了辐射安全和防护管理小组，负责单位辐射安全与环境保护管理工作。</p>	<p>符合</p>
<p>第十五条 从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。</p>	<p>制定了辐射工作人员培训及考核计划。目前，全部辐射工作人员陆续正在参加生态环境部门组织的考核。</p>	<p>符合</p>
<p>第十六条 放射性同位素与射线装置使用场所所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。</p>	<p>本项目使用的 2 台射线装置场所设有完备的安全连锁系统，包括门机连锁、剂量连锁等。防护门门口显著位置设有电离辐射警示标识和中文警示说明，防护门上方设置工作状态指示灯。</p>	<p>符合</p>
<p>第十六条 配备必要的防护用品和监测仪器。</p>	<p>已配备 X/γ 剂量率仪、中子剂量率仪、剂量报警仪和个人剂量计等防护用品。</p>	<p>符合</p>
<p>第十六条 有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台帐管理制度、培训计划和监测方案。</p>	<p>已制定了一系列辐射安全管理制度，内容涵盖了操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台帐管理制度、培训计划和监测方案，并严格按照规章制度执行。</p>	<p>符合</p>

第十六条 有辐射事故应急措施。	已制定有辐射事故应急预案。	符合
第十六条 产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	产生的放射性废气的量很小，由通风系统排入环境，对环境的影响是可以接受的。产生的放射性固体废物设有贮存的废物坑，待其自行衰变一定时间后，申请清洁解控，不满足清洁解控送城市放射性废物库。	符合

10.4 三废的治理

本项目正常运行期间，产生的放射性废物主要是放射性废气和放射性固体废物。

(1) 放射性废气

本项目在加速器运行期间将产生感生放射性气体、臭氧及氮氧化物，低能离子辐照模拟装置泄露产生氟化物；产生的感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。

2 台射线装置所在机房设有排风系统，通过通风系统，将产生的感生放射性气体、臭氧、氮氧化物及氟化物排出。

(2) 放射性固体废物

本项目运行过程中，产生的放射性固体废物主要为照射的活化靶件，假设各种靶件的质量最大为 10g，其靶件材料主要为硅、铜、铝、环氧树脂、陶瓷、玻璃等。本次评价保守利用 Monte-Carlo 程序模拟了 50MeV 质子与各辐照材料靶件作用情况，计算输入条件为：

- (1) 束流参数：质子能量为50MeV，流强为10 μ A；
- (2) 加速器运行条件：连续出束30min；
- (3) 靶参数：直径30mm，厚度为30mm的靶。

计算得到停机冷却 1h 后各靶件的比活度见下表 10-7。

表 10-7 各种靶件比活度计算结果

靶件	核素	总活度, Bq	比活度, Bq/kg	靶件	核素	总活度, Bq	比活度, Bq/kg
铜靶	Mn-54	1.78E+04	1.78E+06	铝靶	H-3	2.75E+04	2.75E+06
	Mn-56	2.22E+06	2.22E+08		Be-7	1.28E+05	1.28E+07

	Fe-55	6.22E+04	6.22E+06		F-18	2.15E+08	2.15E+10
	Fe-59	1.18E+04	1.18E+06		Na-22	9.28E+05	9.28E+07
	Co-56	1.19E+04	1.19E+06		Na-24	3.36E+08	3.36E+10
	Co-57	8.07E+05	8.07E+07		Mg-27	1.64E+08	1.64E+10
	Co-58	6.70E+06	6.70E+08		合计	7.16E+08	7.16E+10
	Co-58M	4.99E+08	4.99E+10	玻璃 靶	H-3	2.37E+04	2.37E+06
	Co-60	4.92E+04	4.92E+06		Be-7	2.07E+06	2.07E+08
	Co-60M	5.26E+07	5.26E+09		F-18	1.59E+08	1.59E+10
	Co-61	1.77E+08	1.77E+10		Na-22	8.90E+04	8.90E+06
	Co-62	1.59E+04	1.59E+06		Na-24	2.59E+06	2.59E+08
	Co-62M	4.20E+06	4.20E+08		Mg-27	9.15E+05	9.15E+07
	Ni-57	2.60E+06	2.60E+08		Mg-28	1.10E+04	1.10E+06
	Ni-65	8.74E+07	8.74E+09		Si-31	5.45E+05	5.45E+07
	Cu-60	8.51E+08	8.51E+10		Cl-34	3.69E+06	3.69E+08
	Cu-61	1.08E+10	1.08E+12		Cl-38	5.97E+04	5.97E+06
	Cu-62	5.35E+09	5.35E+11		Ar-41	5.41E+04	5.41E+06
	Cu-64	4.51E+09	4.51E+11		K-38	3.26E+05	3.26E+07
	Cu-66	5.39E+06	5.39E+08		V-47	1.47E+06	1.47E+08
	Zn-62	1.17E+09	1.17E+11		合计	1.71E+08	1.71E+10
	Zn-63	1.31E+10	1.31E+12		Be-7	2.99E+04	2.99E+06
	Zn-65	2.70E+06	2.70E+08		F-18	4.02E+06	4.02E+08
	合计	3.66E+10	3.66E+12		Na-22	2.74E+04	2.74E+06
环氧 树脂 靶	H-3	4.99E+04	4.99E+06	陶瓷 靶	Na-24	8.25E+06	8.25E+08
	Be-7	1.31E+07	1.31E+09		Mg-27	2.68E+06	2.68E+08
	F-18	9.81E+06	9.81E+08		Al-29	2.89E+06	2.89E+08
	合计	2.30E+07	2.30E+09		Si-31	1.30E+06	1.30E+08
					合计	1.92E+07	1.92E+09

由表 10-7 可知，照射靶件中铜靶件照射后比活度最高，约为 $3.66E+12Bq/kg$ ，属于中放固体废物。其他材料靶件比活度均低于 $4E+11Bq/kg$ ，为低放固体废物，加速器每年各自照射靶件约 200 个。其靶件照射后进行相关性能实验后分别暂存在各自机房的废物坑中，机房废物坑尺寸为 $1m$ （长） $\times 1m$ （宽） $\times 2.5m$ （高），设有盖板，盖板厚度为 $0.5m$ ，两个废物坑的容积分别为 $2m^3$ 。暂存的放射性固体废物暂存一段时间后，满足清洁解控要求的申请解控，不满足清洁解控要求的送城市放射性废物库。两个机房废物库示意图见图 10-10。

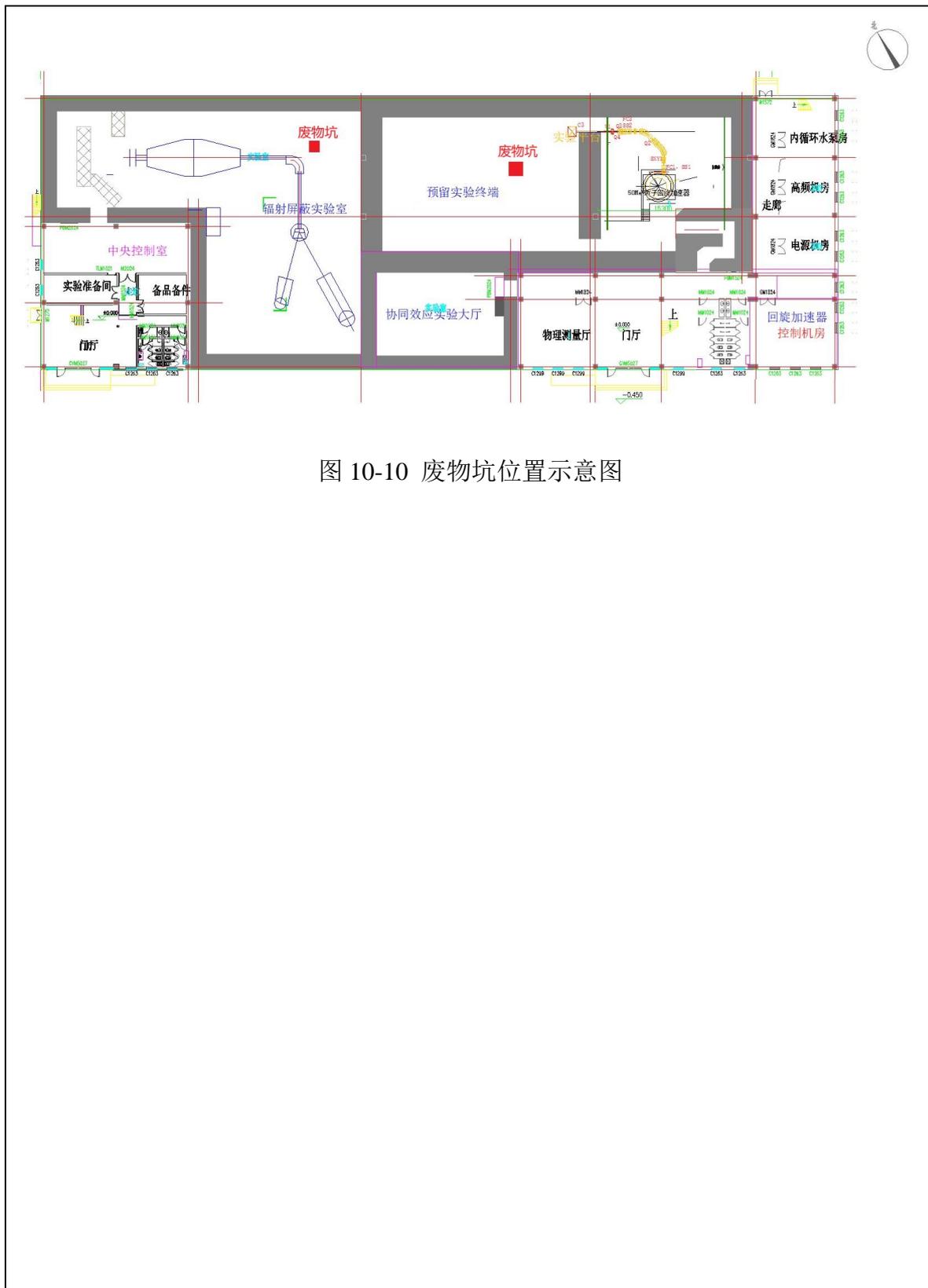


图 10-10 废物坑位置示意图

表 11 环境影响分析

11.1 建设或安装过程的环境影响

本项目位于已有建筑内，其场所建设阶段环评已取得原北京市环境保护局的批复（京环审【2017】90号）。

11.2 正常运行过程对环境的影响

11.2.1 中能质子辐照装置

11.2.1.1 源项

中能质子辐照装置包含一台 50MeV 质子回旋加速器、一条束流输运线与实验终端。其质子最大能量为 50MeV，最大流强为 10 μ A，运行期间主要束流损失环节见表 11-1。采用 FLUKA 模拟质子束轰击直径 20cm、厚度 10cm 靶材（硅、铜、铝、环氧树脂、陶瓷和玻璃靶）的中子能谱（左）和光子能谱（右）见图 11-1，其产额信息见表 11-2 和表 11-3。

表 11-1 主要束流损失环节

束流损失点		质子能量, MeV	靶材料	最大损失流强, μ A	损失方式
回旋加速器	回旋加速器内部	50	Al、Fe 或 Cu	0.5	环形均匀损失
扩束系统	扩束器 (W1)	50	Al 和 Pb	0.2	集中损失
	准直器 (C3)	50	Cu	1	集中损失
束流输运线	束流管道	50	Al	1	连续损失
实验台架	终端	50	硅、铜、铝、环氧树脂、陶瓷、玻璃等	10	集中损失

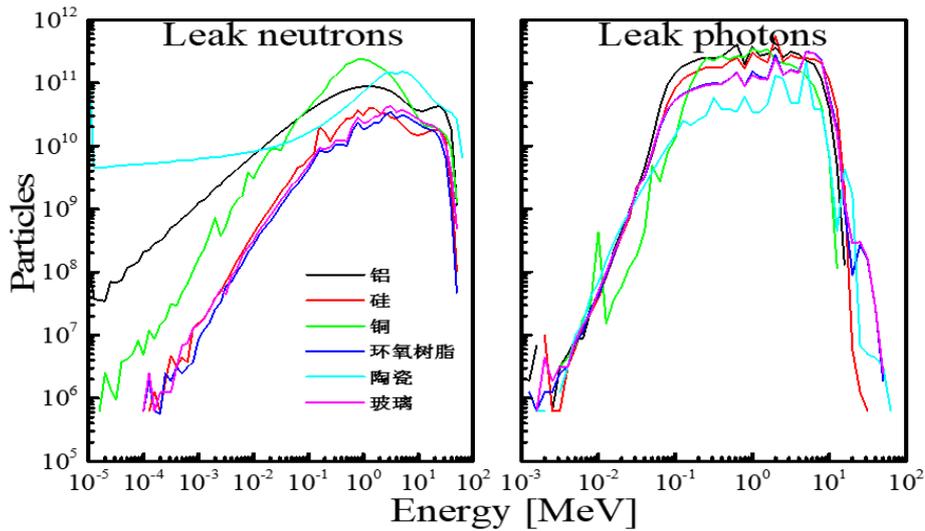


图 11-1 质子束轰击 C 和 Cu 的中子和光子能谱

表 11-2 质子束轰击不同靶材料的中子产额

E	铝	硅	铜	环氧树脂	陶瓷	玻璃
0~0.1keV	9.36E-05	5.34E-07	5.79E-06	3.39E-07	5.38E-03	6.27E-07
0.1keV~0.1MeV	3.76E-03	4.50E-04	2.90E-03	2.86E-04	3.07E-03	3.38E-04
0.1MeV~1MeV	1.06E-02	3.47E-03	2.37E-02	1.94E-03	6.11E-03	2.27E-03
1MeV~10MeV	1.04E-02	4.32E-03	1.89E-02	4.29E-03	2.02E-02	5.26E-03
10MeV~50MeV	3.38E-03	1.33E-03	1.66E-03	1.20E-03	5.46E-03	1.54E-03
Total	2.83E-02	9.58E-03	4.72E-02	7.71E-03	4.02E-02	9.42E-03

表 11-3 质子束轰击不同靶材料的光子产额

E	铝	硅	铜	环氧树脂	陶瓷	玻璃
0.1keV~0.1MeV	4.82E-03	2.66E-03	4.78E-04	2.02E-03	6.54E-04	2.05E-03
0.1MeV~1MeV	4.30E-02	2.98E-02	3.42E-02	1.63E-02	5.87E-03	1.57E-02
1MeV~10MeV	3.76E-02	4.05E-02	2.74E-02	2.98E-02	1.14E-02	2.86E-02
10MeV~50MeV	7.90E-05	6.27E-04	1.82E-06	3.31E-04	1.04E-04	2.93E-04
Total	8.56E-02	7.36E-02	6.21E-02	4.85E-02	1.81E-02	4.67E-02

从表 11-2 和表 11-3 可知，质子束轰击铜时产生的中子产额最高，铝靶的光子产额最高，但各靶材的光子产额差别不大。综合比较下，保守采用质子束流轰击 Cu 靶进行辐射防护计算。

11.2.1.2 屏蔽体外剂量率计算

采用 FLUKA 模拟计算能量 50MeV、流强 10 μ A 质子回旋加速器实验过程中各屏蔽体外剂量率，FLUKA 程序屏蔽计算模型见图 11-2 和图 11-3，运行时屏蔽体外剂量率计算结果分别见图 11-4 和图 11-5。

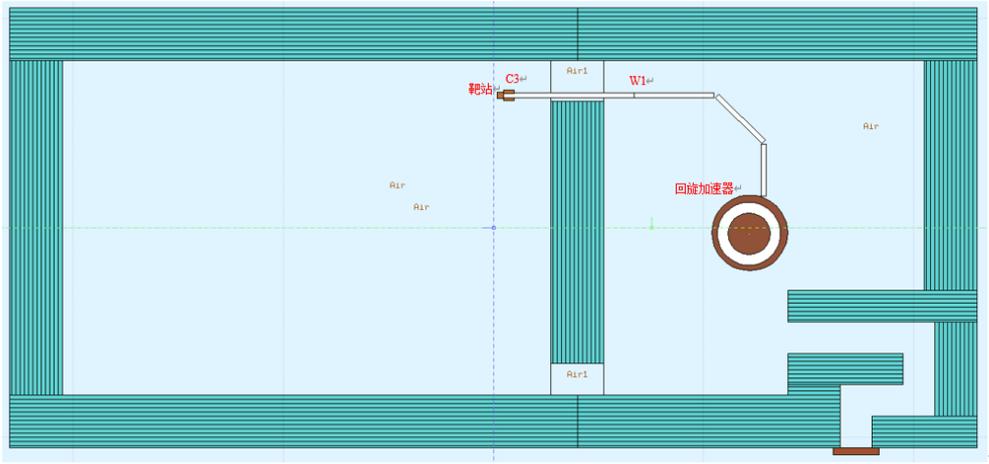


图 11-2FLUKA 程序屏蔽计算模型平面图

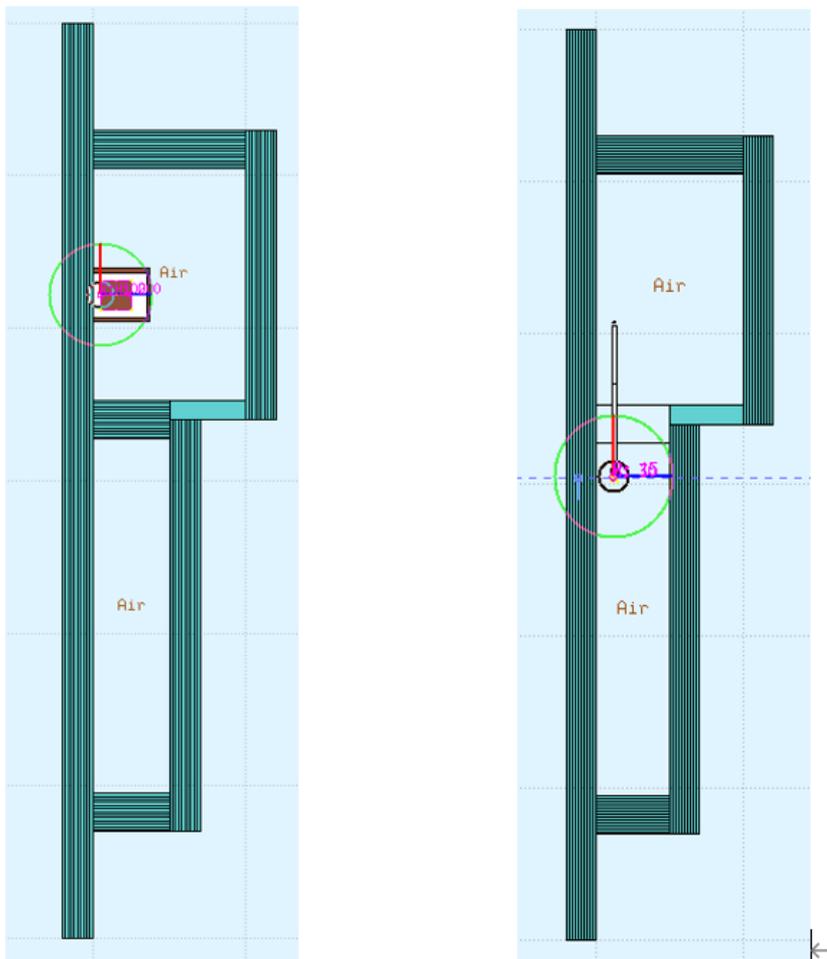


图 11-3FLUKA 程序屏蔽计算模型剖面图

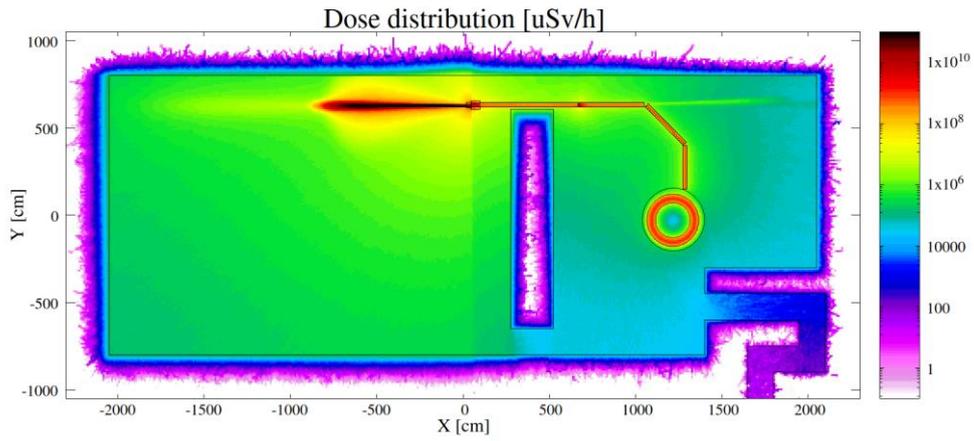


图 11-4 中能质子辐照装置运行时剂量率计算结果平面分布图

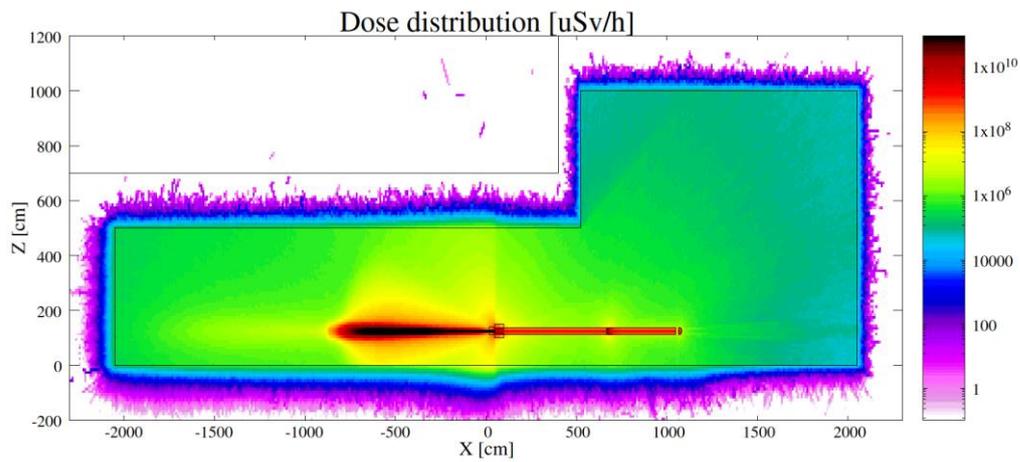


图 11-5 中能质子辐照装置运行时剂量率模拟计算结果剖面分布图

关注点位置图及剂量率水平分别见图 11-6 和表 11-4。

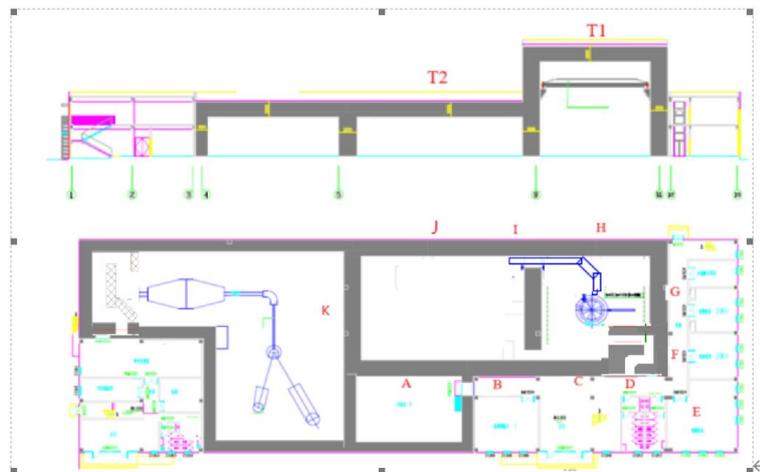


图 11-6 中能质子辐照装置所在场所四周关注点示意图

表 11-4 中能质子辐照装置关注点剂量率

关注点位置	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
A	1.00E-03
B	1.00E-03
C	1.00E-03
D	3.01E-01
F	1.49E-03
G	2.80E-03
H	6.07E-03
I	1.39E-01
J	3.24E-03
T1	1.71E-03
T2	1.80E-02
K	1.00E-03

从剂量率计算结果可知, 中能质子辐照装置运行期间, 其四周剂量率最大点为 D 点, 即防护门外 30cm 处, 剂量率为 $3.01\text{E-}01\mu\text{Sv/h}$, 小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 剂量率控制水平。

11.2.1.3 感受放射性废气

加速器运行期间初级粒子或次级粒子与空气的 N、O、H 等相互作用产生放射性气体, 其放射性核素主要通过热中子俘获 (n, 2n)、(γ , n) 反应和散裂反应而产生放射性核素, 其空气感生放射性核素中主要考虑 ^{41}Ar 。

^{41}Ar 的年排放量由下式计算:

$$Q = \lambda R N \phi \sigma t$$

$$N = \frac{\rho}{M} \times f \times \theta \times N_A$$

式中:

Q 为核素 ^{41}Ar 年排放量, Bq/a;

λ 为核素 ^{41}Ar 的衰变常数, $1.07\text{E-}04\text{s}^{-1}$;

R 为中能质子辐照装置场所内空气的等效球半径, cm; 加速器大厅和终端体积约为 3924m^3 , 由此可计算得出等效球半径为 979cm。

N 为单位体积空气中的 ^{40}Ar 原子数, 计算结果见下表 11-5。

ϕ 为中子发射率, $2.92E+12n/s$;

σ 为 ^{40}Ar 的活化截面, $660\text{mb}=6.60E-25\text{cm}^2$;

t 为加速器年出束时间 500h , 即 $1.80E+06\text{s}$ 。

ρ 为空气的密度, g/cm^3 ;

M 为靶核的原子质量, g ;

f 为母核在空气中的质量份额;

θ 为母核的同位素丰度;

N_A 为阿伏伽德罗常数, $6.023E+23$ 。

表 11-5 单位体积空气中靶核数目的计算结果

核素	M, g	f	ρ , g/cm^3	θ , %	N_A	N, 个/ cm^3
^{40}Ar	40	4.60E-03	1.21E-03	99.60	6.023E+23	8.31E+16

由此可计算得出, ^{41}Ar 年排放量为 $5.94E+10\text{Bq/a}$ 。

11.2.1.4 天空反散射

穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射, 由于空气的散射作用, 将有部分又回到地面。天空散射几乎完全由中子引起。透过屏蔽墙的快中子以及少量残存的高能中子在空气中不能被有效地阻止, 在空气中发生一次次散射, 低能中子被散射回地面。这些中子就是天空散射辐射的来源。天空散射随加速器开机产生, 加速器停机便立刻消失。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。

中能质子辐照装置屋顶为 2m 混凝土, 根据剂量率计算结果, 屋顶外剂量率为 $1.8E-02\mu\text{Sv/h}$, 因此, 可不考虑天空反散射的影响。

11.2.2 低能离子辐射模拟装置

11.2.2.1 源项

低能离子辐射模拟装置离子为质子和重离子, 其质子最高能量为 12MeV , 重离子总能量最高为 30MV ; 流强最大为 0.1mA , 采用 FLUKA 模拟不同单个入射离子束轰 Cu 靶的中子能谱和光子能谱, 其产额情况分别见图 11-7、表 11-6 和表 11-7。

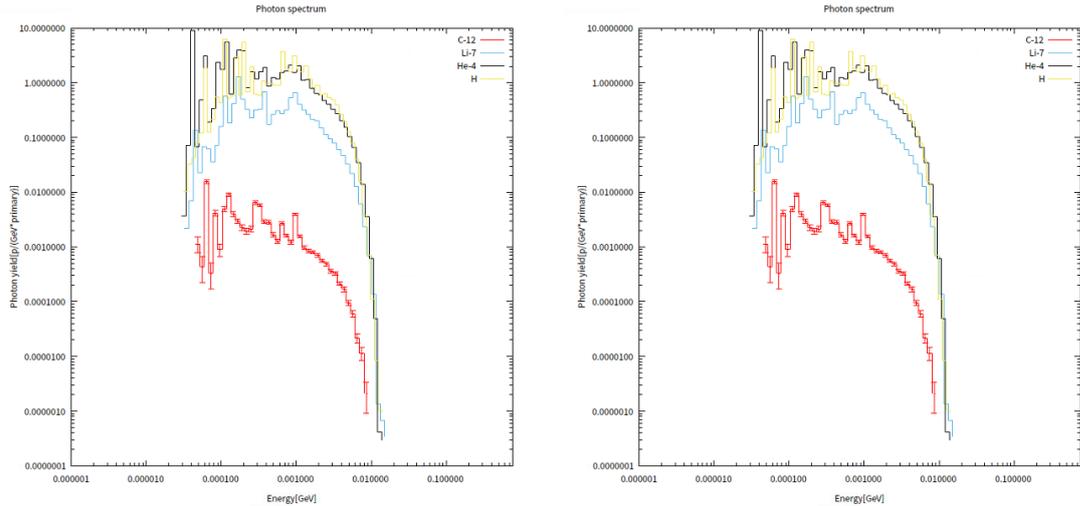


图 11-7 不同离子轰击 Cu 靶中子和光子能谱

表 11-6 不同离子轰击 Cu 的中子产额 (neutron/proton) 计算结果

E	质子	氦离子	锂离子	碳离子
0~0.1keV	3.17E-08	1.29E-08	2.50E-09	0.00E+00
0.1keV~0.1MeV	1.62E-05	2.61E-05	8.12E-06	2.00E-08
0.1MeV~1MeV	3.13E-04	4.16E-04	1.45E-04	3.62E-07
1MeV~10MeV	4.47E-04	8.98E-04	4.49E-04	8.38E-07
>10MeV	0.00E+00	1.37E-05	1.53E-05	4.98E-09
Total	7.75E-04	1.35E-03	6.18E-04	1.22E-06

表 11-7 不同离子轰击 Cu 的光子产额 (photon/proton) 计算结果

E	质子	氦离子	锂离子	碳离子
0.1keV~0.1MeV	2.88E-05	1.35E-04	5.45E-06	2.08E-07
0.1MeV~1MeV	1.66E-03	1.56E-03	3.94E-04	2.65E-06
1MeV~10MeV	2.66E-03	2.08E-03	5.25E-04	1.92E-06
>10MeV	3.34E-09	7.50E-08	1.99E-07	0.00E+00
Total	4.35E-03	3.78E-03	9.25E-04	4.78E-06

根据图 11-7、表 11-6 和表 11-7 可知,本项目保守采用该装置采用 ^4He 离子打靶进行辐射防护计算。

11.2.2.2 屏蔽体外剂量率计算

采用 FLUKA 模拟计算总能量 30MV、最大流强为 0.1mA 的 ^4He 离子轰击东侧终端 Cu 靶时各屏蔽体外剂量率水平,FLUKA 程序屏蔽计算模型见图 11-8 和图 11-9,计算结果分别见图 11-10 和图 11-11。

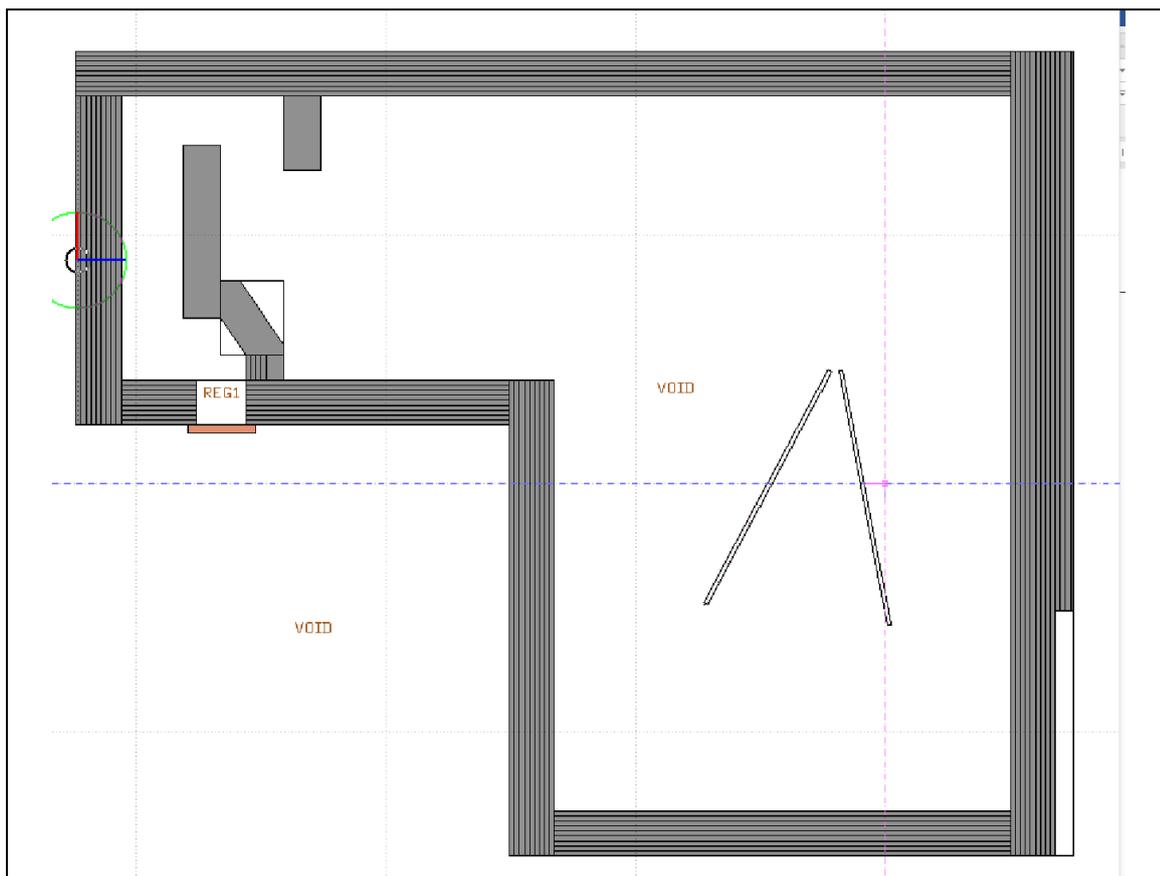


图 11-8FLUKA 程序屏蔽计算模型平面图

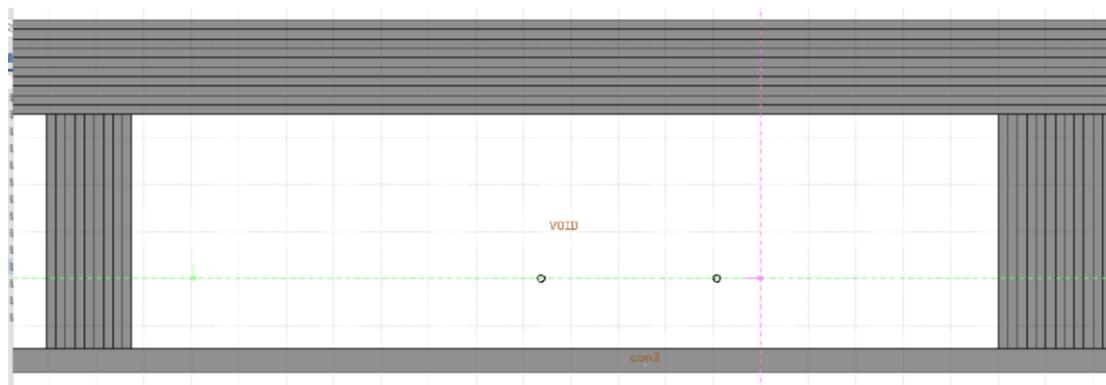


图 11-9FLUKA 程序屏蔽计算模型剖面图

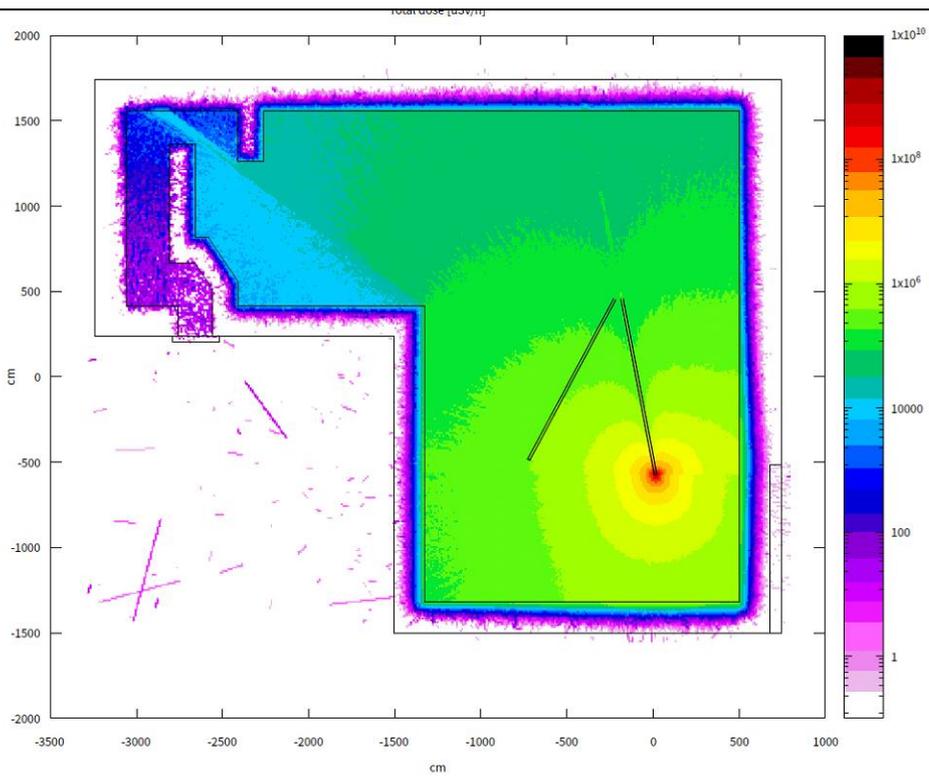


图 11-10 低能离子辐照模拟装置运行时剂量率计算结果平面图

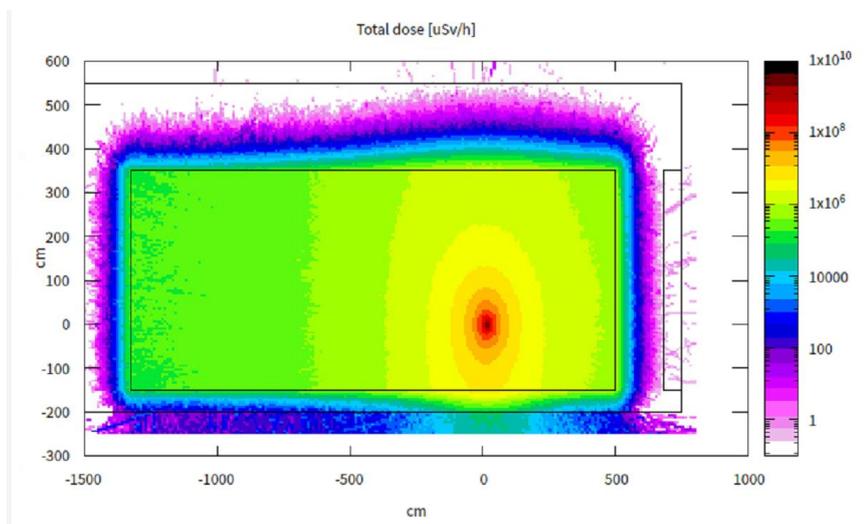


图 11-11 低能离子辐照模拟装置运行时剂量率计算结果剖面图

其屏蔽体外关注点示意图及其剂量率水平分布见图 11-12 和表 11-8。

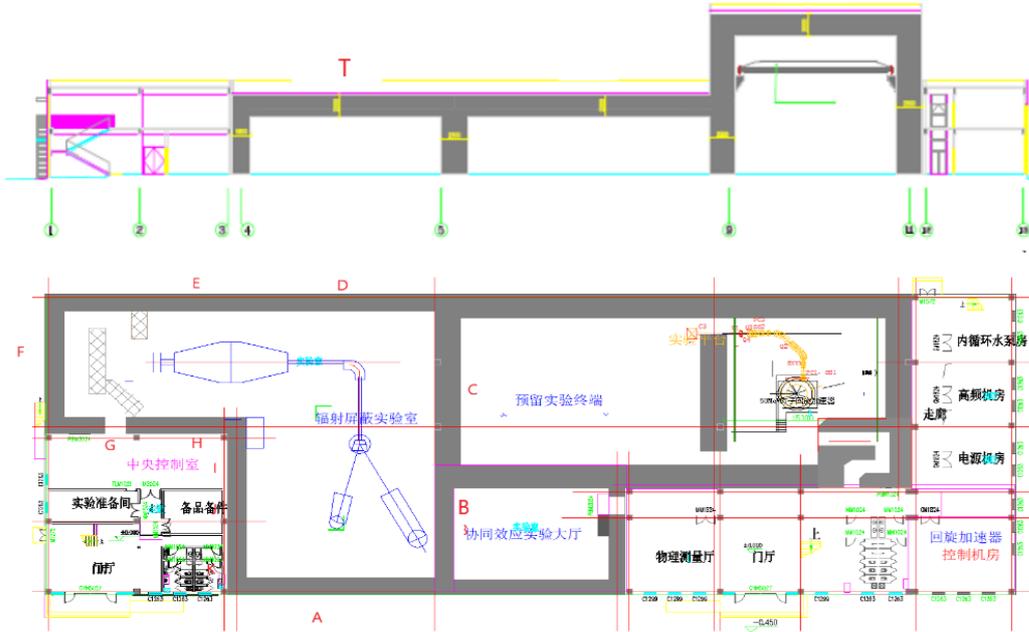


图 11-12 低能离子辐射模拟装置屏蔽体外关注点示意图

表 11-8 低能离子辐射模拟装置关注点剂量率

关注点	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
A	1.0E-02
B	6.0E-01
C	8.0E-02
D	5.0E-02
E	8.0E-03
F	2.0E-03
G	1.0E-01
H	6.0E-02
I	4.0E-02
J	8.0E-02
K	4.0E-02
T	1.0E-01

从以上计算结果可知，低能离子辐射模拟装置运行期间使用东侧终端时，其屏蔽体外剂量率最大值为 B 点，东墙外 30cm（即协同效应实验大厅，该实验大厅为预留场所），剂量率为 $0.6\mu\text{Sv/h}$ ，小于剂量率控制值 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。类比分析当其运行时使用西侧终端时，则其 I、J、K 点剂量率最大不超过 $0.6\mu\text{Sv/h}$ 。

因此，本项目采用 FLUKA 模拟计算低能离子辐射模拟装置运行期间，其屏蔽体外剂量率最大值为 $0.6\mu\text{Sv/h}$ ，小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 控制值。

11.2.2.3 感生放射性废气

参考 11.2.1.3 计算模式， ^{41}Ar 的年排放量由下式如下：

$$Q = \lambda RN\varphi\sigma t$$

$$N = \frac{\rho}{M} \times f \times \theta \times N_A$$

式中：

Q 为核素 ^{41}Ar 年排放量，Bq/a；

λ 为核素 ^{41}Ar 的衰变常数， $1.07\text{E}-04\text{s}^{-1}$ ；

R 为低能离子辐照装置场所内空气的等效球半径，cm；加速器大厅和终端体积约为 3642m^3 ，由此可计算得出等效球半径为 955cm 。

N 为单位体积空气中的 ^{40}Ar 原子数， $8.31\text{E}+16$ 个/ cm^3 。

φ 为中子发射率， $8.44\text{E}+12\text{n/s}$ ；

σ 为 ^{40}Ar 的活化截面， $660\text{mb}=6.60\text{E}-25\text{cm}^2$ ；

t 为加速器年出束时间 500h ，即 $1.80\text{E}+06\text{s}$ 。

由此可计算得出， ^{41}Ar 年排放量为 $1.67\text{E}+11\text{Bq/a}$ 。

11.2.2.4 天空反散射

穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射，由于空气的散射作用，将有部分又回到地面。天空散射几乎完全由中子引起。透过屏蔽墙的快中子以及少量残存的高能中子在空气中不能被有效地阻止，在空气中发生一次次散射，低能中子被散射回地面。这些中子就是天空散射辐射的来源。天空散射随加速器开机产生，加速器停机便立刻消失。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。

本项目低能离子辐射模拟装置屋顶为 2m 混凝土，根据剂量率计算结果，屋顶外剂量率为 $0.1\mu\text{Sv/h}$ ，因此，可不考虑天空反散射的影响。

11.2.3 工作人员受照剂量

本项目涉及辐射工作人员为中能质子辐照装置工作人员和低能离子辐射模拟装置工作人员，加速器运行期间，对本项目工作人员的辐射影响主要来自加速器开机出束产生的瞬时辐射以及加速器停机后，人员进入更换靶件及对靶件进行相

关实验受活化结构部件的辐射影响。

(1) 瞬时辐射照射

工作人员所受瞬时辐射照射剂量可由下式计算。

$$H=D\times t$$

式中：

H 为工作人员年受照剂量，mSv/a；

D 为工作人员所在区域剂量率，mSv/h；

t 为工作人员年受照时间，h/a。

加速器运行期间时，工作人员分别位于控制室内，各控制室剂量率水平分布见表 11-4 和表 11-8，工作人员受照剂量计算结果见下表 11-9。

表 11-9 工作人员受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平， $\mu\text{Sv/h}$	受照时间，h	受照剂量，mSv/a
中能质子辐照装置控制室	3.01E-01(保守取防护门外 30cm 剂量率)	1000	3.0E-01
低能离子辐照模拟装置控制室	6.0E-01 (保守取加速器运行时使用左侧终端 I 点剂量率)	1000	6.0E-01

(2) 活化结构部件的影响

根据业主单位提供的资料，本项目主要的活化结构部件是辐照靶件。根据其科研院所该类实验经验，一般活化靶件 0.5m 处剂量率降至 $10 \mu\text{Sv/h}$ 以下才对其辐照靶件进行其他相关性能参数实验，保守假设本项目辐照靶件 0.5m 处剂量率降至 $25 \mu\text{Sv/h}$ 以下时，工作人员才近距离对辐照后的靶件进行拆除及其他相关实验。每台加速器每年近距离处理靶件约 200 次，每次平均半小时，则辐射工作人员近距离接触时间最多为 100h，由此计算得出其工作人员近距离接触靶件年受照剂量为 2.5mSv。

(3) 本项目工作人员受照剂量小结

综上所述，本项目辐射工作人员由于加速器开机出束所致外照射有效剂量与接触活化结构部所致有效剂量见表 11-10。

表 11-10 工作人员受照剂量

工作区域	瞬时辐射照射剂量, mSv/a	活化结构部件照射剂量, mSv/a	受照剂量, mSv/a
中能质子辐照装置控制室	3.0E-01	2.5	2.8
低能离子辐照模拟装置控制室	6.0E-01	2.5	3.1

从表 11-10 可知, 工作人员受照剂量最大约为 2.9mSv/a, 由于本项目辐射工作人员为现有辐射工作人员, 2020 年度个人剂量监测报告可知工作人员年受照剂量最大为 0.168mSv/a, 叠加后工作人员年受照剂量最大为 3.27mSv/a, 小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

另外, 根据模拟计算可知, 中能质子辐照装置运行期间对其西侧的低能离子辐照装置机房的剂量率贡献值为 1nSv/h, 而低能离子辐照装置运行期间对其东侧中能质子辐照装置终端机房的剂量率贡献值为 80nSv/h, 正常情况下工作人员只有换靶的时候才会进入机房, 操作时间较短, 因此该两台加速器运行时对临近机房辐射工作人员的辐射影响很小, 可忽略不计。

11.2.4 公众受照剂量

本项目正常运行时对周围公众的辐射影响主要来自加速器运行期间开机出束产生的瞬时辐射的直接照射以及感生放射性气体的排放造成的空气浸没外照射。

(1) 加速器开机运行产生的瞬时辐射照射

瞬时辐射照射的影响对象主要考虑该两台加速器运行期间从其周围道路经过的公众, 屋顶和该建筑内部正常情况下无普通公众进入, 因此主要考虑从辐射工作场所外围道路经过的公众所受瞬时辐射照射剂量, 计算公式由如下:

$$H = D \times t \times T \times 1$$

H 为公众的年受照剂量, mSv/a;

D 为公众所在区域剂量率, mSv/h;

t 为公众年受照时间, 1000h/a。

T 为居留因子。

从屏蔽体外剂量率计算结果可知, 公众可经过的地方剂量率最大点为质子回旋加速器终端北屏蔽墙外 I 点, 其剂量率为 0.139 μ Sv/h, 假设其居留因子为 1/4,

则公众受照剂量最大为 3.48E-02mSv/a。

(2) 放射性气体排放造成的辐射影响

根据前面的分析，本项目排放的放射性气体主要为 ^{41}Ar ，两台加速器运行期间 Ar-41 年排放总量为 2.27E+11Bq，其照射途径主要考虑空气浸没外照射。本项目排风口参数见表 11-11。

表 11-11 本项目放射性排风口参数

排风高度, m	最靠近关注点的建筑物的最大截面积 A_b , m ²	临近最高建筑物高度 H_b , m
7.5 或 28m	885	22.8

由表 11-11 可知，本项目排风口高度 $H < 2.5H_b$ （临近最高建筑物高度）。根据 IAEA NO.19 号报告， $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$ 时，关注点处地面空气浓度可由下式计算：

$$C_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K}$$

式中，

$C_{a,i}$ 为下风向 x （m）距离处的核素 i 的地面空气浓度，Bq/m³；

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

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s；

u_a 为释放高度上年平均风速，m/s，取值 1m/s；

K 为经验常数，m，取值 $K=1m$ ；

空气浸没外照射剂量可由下式计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A$$

式中：

H_A 为空气浸没照射所致年受照剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；

S_f 为建筑物屏蔽因子，对个人取 0.7；

G 为 Ar-41 空气浸没外照射剂量转换因子，为 6.13E-14(Sv/s)/(Bq/m³)；

则计算得出 Ar-41 对周围公众造成的受照剂量为 4.30E-02mSv/a。

(3) 公众受照剂量

叠加后公众年受照剂量为 7.78E-02mSv，低于公众剂量约束值 0.1 mSv/a。

11.2.5 非放射性气体影响

(1) 臭氧及氮氧化物

在光子的作用下，空气中的氧气可吸收辐射能量，发生辐射分解，生成氧原子，氧原子与空气中的 O₂ 结合生成 O₃，O₃ 再与空气中的 NO 结合生成 NO₂。根据 NCRP NO.144 报告，场所内的 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度可利用下式计算。

$$N_{sat} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + R}$$
$$C = N \frac{M}{N_A}$$

式中，

C 为场所内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度，g/m³；

N 为房间内单位体积的气体分子个数，个/m³；

g 为空气中单位光子能量沉积形成的气体分子数，eV⁻¹；

α 为气体分子的化学分解速率，s⁻¹；

κ 为单位光子能量沉积形成的分子数目，eV⁻¹·m³；

R 为房间换气次数，s⁻¹；

M 为气体的摩尔质量，g/mol；

N_A 为阿伏伽德罗常数，6.022×10²³mol⁻¹；

I 为空气中单位体积单位时间的光子能量沉积，eV/m³·s，根据《辐射防护基础》（李星洪等，原子能出版社）P39 页公式（2.19），I 可由下式计算：

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

式中，

K 为光子在空气中的比释动能率，J/kg·s；

φ 为光子注量率，p/m²·s，采用距靶点 1m 处的光子注量率作为场所内平均光子注量率进行保守计算；

ρ 为空气的密度，kg/m³；

μ_{en}/ρ 为光子在空气中的质能吸收系数, m^2/kg ;

E 为光子能量, J, ($1\text{MeV}=1.6\times 10^{-13}\text{J}$)。

表 11-12 各参数取值

参数	取值	来源
g	O ₃ : 0.103 eV ⁻¹ ; NO ₂ : 0.048 eV ⁻¹	NCRP NO.144 报告 P358
α	$2.3\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$	NCRP NO.144 报告 P359
κ	O ₃ : $5.0\times 10^{-24}\text{ eV}^{-1}\cdot\text{m}^3$; NO ₂ : $1.4\times 10^{-22}\text{ eV}^{-1}\cdot\text{m}^3$;	文献*
R	中能质子辐照装置场所: 4.14×10^{-4} 低能离子辐照装置场所: $3.85\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$	
M	M(O ₃)=48 g/mol M(NO ₂)=46 g/mol	——
N _A	$6.022\times 10^{23}\text{ 1/mol}$	——
ρ	1.29kg/m^3	——
μ_{en}/ρ	1.445 m^2/kg	《辐射防护基础》P45 页表 2-2, 保守取 0.05MeV 光子在空气中的质能吸收系数
E	$10\text{MeV}=1.6\times 10^{-12}\text{J}$	——

注: *取值来自文献《Advanced Photon Source: Radiological Design Considerations》(APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July 1991) P54。

中能质子辐照装置和低能离子辐照模拟装置所在场所 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度和排放速率计算结果列于表 11-13。由计算结果可知结合表 7-3 可知, 该两个场所 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度低于工作场所 O₃ 和 NO_x 的最大容许浓度限值, NO_x 排放速率和排放浓度低于其排放速率限值。

表 11-13 工作场所内 O₃ 和 NO₂ 饱和浓度和排放速率计算结果

场所名称	饱和浓度, mg/m^3		排放速率, kg/h	
	O ₃	NO ₂	O ₃	NO ₂
中能质子辐照装置	1.22E-03	5.47E-04	3.01E-06	1.35E-06
低能离子辐照装置	7.44E-04	3.32E-04	7.17E-06	3.20E-06

(2) 氟化物

本项目使用的低能离子辐照模拟装置使用 SF₆ 绝缘高压, 减少高压击穿放电。根据国外同类加速器运行经验, 每年需要补充 SF₆ 气体量为 30-40kg, 如果长期不使用加速器会将气体收到压力储罐中, 其泄漏量更小, 保守假设本项目泄漏量按照 44kg 考虑, 则其气体泄露率为 0.005kg/h, 由本项目排风系统可知, 该机房加速器停机或运行时使用 P1-1 排风, 排风量为 4050 m^3/h , 则其排放浓度为 1.23 mg/m^3 ,

排放速率不超过 0.005kg/h。

由计算结果结合表 7-3 可知，本项目 SF₆ 的排放速率和排放浓度均满足要求，由于该机房 24 小时通风，且在人员进入前加大排风量，因此，人员进入该机房其氟化物的浓度远远低于室内浓度限值。

11.3 事故影响分析

11.3.1 事故分析

(1) 工作人员误留或非工作人员误闯加速器机房

工作人员误留机房或非工作人员误闯正在出束的机房，造成人员不必要的照射。由于加速器设施有较为完善的安全联锁系统，发生这类事故的机率很小，是可以接受的。

(2) 冷却水泄露事故

本项目冷却水循环使用，正常情况不外排，当管道泄露发生冷却水泄露时，其泄露的冷却水收集到机房内设置的废水收集池，两个加速器机房废水收集池的容积分别为 1.5m³，能满足事故情况下冷却水泄漏的收集，较少对环境的影响。

11.3.2 事故应急措施

建设单位制定了《辐射事故应急预案》，预案中明确了应急指挥机构、人员组成及分工、应急启动、应急器材，发生辐射事故时的报告、通讯联络方式、应急能力的维护等，并规定在条件允许时开展应急演练。

11.3.3 风险防范措施

可采取以下措施降低工作人员误留或非工作人员误闯加速器机房的发生概率：

为防止加速器工作状态下误入加速器机房，在加速器机房的防护门上安装门机联锁。只有当防护门完全关闭后，加速器才能进行运行、出束。

②安全联锁装置定期检查、维护，确保始终保持良好的工作状态，门机联锁正常方可开机。

③在加速器工作之前，工作人员必须确认没有其他无关人员在机房内滞留，

然后方可关闭门。

④在加速器机房防护门外设工作状态指示灯及电离辐射警示标志，在加速器启动前，声光报警装置发出警告信号，以便人员在产生辐射前安全撤离。

⑤加速器机房内墙壁和控制台装有醒目的急停按钮，一旦发现异常情况，按下急停按钮可立即切断供束。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

12.1.1 辐射安全管理机构

空间中心现已成立了辐射安全与防护管理小组作为专门管理机构,并指定了专人负责辐射安全与环境保护管理工作,具体情况见表 1-4。现有的辐射安全管理机构能满足本项目的需求。

为保证国家、北京市辐射安全和环境保护相关法律、法规及标准得到执行,辐射安全与防护管理小组具体职责包括:

- (1) 负责组织本单位各项辐射安全管理制度的编制、修订、完善及实施;
- (2) 负责每年度组织辐射工作人员的相关管理法规及单位规章制度的宣传、培训和考核;
- (3) 负责组织制定本单位辐射事故(件)应急预案并每年度组织 1 次演练,辐射事故(件)状况时及时启动应急预案。

12.2.2 辐射工作人员

本项目涉及 12 名辐射工作人员,该 12 名辐射工作人员已通过了生态环境部门组织的辐射安全与防护考核,辐射工作人员按要求每五年考核一次。

12.2 辐射安全管理规章制度

从表 1 的 1.2.3 节可知,空间中心现已制定了辐射安全管理制度,这些制度包括了辐射安全管理体系和岗位职责,辐射安全操作规程,辐射防护及安保措施,设备检修维护制度,人员培训制度,台账管理制度,监测方案,辐射应急预案等,已制定的制度完善后能满足本项目的需求。

12.3 辐射监测

空间中心现有辐射工作场所已建立了辐射监测方案,已包括个人剂量监测、工作场所监测、辐射环境监测。针对本项目,其具体监测情况如下:

12.3.1 个人剂量监测

空间中心已制订了辐射工作人员个人剂量监测方案,本项目辐射工作人员个

剂量监测纳入现有辐射计划体系,按要求进行个人剂量监测,并建立相应的档案。

空间中心辐射工作人员的个人剂量监测目前已委托有资质单位承担,监测频率为每季度检测一次。单位严格要求辐射工作人员按照规范佩戴个人剂量计,由专人负责收集送检更换。

本项目辐射工作人员为现有辐射工作人员,均已按要求进行了相关的个人剂量监测。

12.3.2 辐射工作场所及环境监测

(1) 工作场所监测

空间中心每年委托有资质的单位对辐射工作场所进行工作场所监测,采取定点监测和巡测相结合的方式监测射线装置机房周围的辐射水平,重点监测机房门口/门缝、四周墙外、屋顶和辐射工作人员操作位置等场所,监测频次为1次/年。监测布点设置情况见表12-1。

表 12-1 本项目辐射工作场所监测布点设置情况

中能质子辐照装置工作场所		低能离子辐射模拟装置工作场所	
监测点位	点位描述	监测点位	点位描述
1~2	终端南墙外协同效应实验大厅	1	南墙1外东侧
3	终端南墙外协同效应实验大厅门口	2	防护门外
4	南墙外走廊	3	南墙1和西墙拐角
5	加速器大厅南墙外走廊	4	西墙外备品备件间
6	防护门口	5	西墙外走廊
7	回旋加速器控制室	6~7	西墙外洗手间
8~10	加速器大厅东墙外走廊	8~10	南墙2外
11~12	加速器大厅北墙外	11~13	东墙外协同效应实验大厅
13	束流通道北墙外	14~16	东墙外中能质子辐照装置终端
14~16	终端北墙外	17~19	北墙外
17~18	终端西墙外低能辐照装置实验室	20	迷道外墙外
19-24	终端顶部	21~26	顶部
25-26	加速器大厅二层南墙外走廊		
27~29	加速器大厅二层东墙外走廊		
30~38	回旋加速器顶部		

为加强单位辐射安全管理,空间中心配备X-γ巡检仪和中子辐射剂量率仪开展工作场所自测,监测频次不低于1次/半年。

(2) 环境辐射水平监测

委托有资质的单位进行环境辐射水平监测，监测频次为1次/年，监测点位包括射线装置所在建筑物四周环境。

12.3.3 辐射监测设备

本项目拟配备监测设备见表 12-2。

表 12-2 本项目拟配备监测仪器

序号	仪器名称	型号	数量	备注
1	便携式 X/γ 剂量率仪	R900+	2 台	利旧
2	便携式中子剂量率仪	待定	2 台	新增
3	个人剂量报警仪	PM1610	2 台	利旧*
4	个人剂量报警仪	待定	2 台	新增（中能质子辐照场所）
5	个人剂量计	—	每人一个	

*注：利旧个人剂量报警仪为低能离子辐照装置实验室人员配备，其个人剂量报警仪是配备到个人。

12.4 辐射应急措施

空间中心已制定了辐射应急预案，该预案经修订后能够满足本项目的需求。根据《中华人民共和国污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等法律法规的要求，一旦发生辐射事故，应立即启动应急程序，妥善处理，保护工作人员及公众的安全。

现有应急预案中进一步明确规定处理事故分级、应急措施等内容，另外应将本项目内容纳入现有应急预案中，完善后的预案能够满足本项目需要。

12.5 项目环保验收内容建议

按照《关于做好辐射类建设项目竣工环境保护验收工作的通知》（京环办【2018】24号）的要求，本项目建成后3个月内开展竣工环境保护验收工作，验收报告编制完成后5个工作日内，公开验收报告，公示期限不少于20个工作日。

根据项目实际情况，评价单位建议本项目竣工环保验收的内容见表 12-3。

表 12-3 项目环保验收内容建议表

序号	验收内容	验收要求	
1	环保资料	本项目审批后的环境影响报告表、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。	
2	辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。	
3	人员要求	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
4	辐射防护与安全措施	1.辐射工作场所分区，2.安全连锁系统，3.通风系统，4.场所辐射监测系统	
5	放射性三废处理设施	废气	辐射工作场所设有通风系统，按照环评要求的排风口排放。
		废水	场所设有事故废水收集池；
		固体废物	场所设有放射性固体废物坑。
6	辐射监测	环境监测	制定环境辐射监测计划，至少每年开展 1 次。
		个人剂量监测	每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天，并建立辐射工作人员个人剂量档案。配备一定数量的个人剂量报警仪。
		监测设备	1.固定式 γ 探测器和中子探测器；2.便携式 X/ γ 剂量率仪；3. 便携式中子剂量率仪； 4.个人剂量报警仪； 5.个人剂量计。

表 13 结论与建议

13.1 结论

(1) 项目概况

本项目在怀柔科学城核心区 6 号楼建设使用 2 台 II 类射线装置，分别为低能离子辐照模拟装置（涉及使用串列加速器 1 台，质子最大能量为 12MeV，重离子总能量最大不超过 30MV）和中能质子辐照装置（涉及使用 50MeV 质子回旋加速器 1 台）。项目建成后将有效提高我国空间科学卫星及有效载荷研制研究水平。

本项目使用场所建筑面积 4169 平方米，占地面积 2994 平方米，用地性质属于科研用地。

(2) 实践正当性

本项目的建设符合国家相关的法律规定和国家产业政策。建设项目目的明确、理由正当，同时具备了技术、人员和经费等条件。

(3) 环境影响分析

本项目所在场所及周围区域的本底辐射水平在北京市本底辐射水平范围内，属正常水平。

本项目正常运行期间，辐射工作场所屏蔽体外剂量率满足 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 控制要求；项目运行期间工作人员所受的最大个人年有效剂量为 3.27mSv/a ，低于其剂量约束值 5mSv/a ；项目运行期间对周围公众造成的最大剂量为 $7.78\text{E-}02\text{mSv/a}$ ，低于其剂量约束值 0.1mSv/a 。

本项目正常运行时产生的非放射性废气主要为加速器运行期间产生的 O_3 、氮氧化物和氟化物，场所内 O_3 、 NO_x 和氟化物浓度低于工作场所最大容许浓度限值，产生的放射性废气排放速率低于其排放速率限值。

综上所述，本项目运行期间，在充分落实本报告表提出的污染防治措施和有效执行辐射安全管理制度后，具备从事相应辐射工作的技术能力和安全防护措施，其运行对周围环境产生的辐射影响能符合环境保护的要求，故从辐射环保角度分析，本项目是可行的。

建议和承诺

(1) 按照要求完善规章制度并保证各种规章制度和操作规程的有效执行，

接受生态环境部门的监督检查并及时整改检查中发现的问题。

(2) 按《放射性同位素与射线装置安全与防护管理办法》(环保部 18 号令)等法规的要求开展个人剂量监测、工作场所监测和环境监测工作等工作。

(3) 项目建设和运行过程中, 加强内部监督管理, 接受生态环境部门的监督检查。

(4) 本项目竣工后, 建设单位应根据“关于发布《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》的公告(国环规环评[2017]4 号)”及国家相关规定的要求及时组织该建设项目竣工环境保护验收, 编制环境保护验收监测报告。确保建设项目配套建设的环境保护设施验收合格后, 主体工程方可投产运行。

表 14 审批

下一级环保部门预审意见:

公 章

经办人

年 月 日

审批意见:

公 章

经办人

年 月 日