

核技术利用建设项目

新增位移损伤效应试验终端项目

环境影响报告表



中国科学院国家空间科学中心

2025 年 9 月

生态环境部监制

核技术利用建设项目

新增位移损伤效应试验终端项目

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 .....	14
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 .....	17
表 8 环境质量和辐射现状 .....	24
表 9 项目工程分析与源项 .....	27
表 10 辐射安全与防护 .....	36
表 11 环境影响分析 .....	52
表 12 辐射安全管理 .....	52
表 13 结论与建议 .....	84
表 14 审批 .....	86

**表 1 项目基本情况**

建设项目名称	新增位移损伤效应试验终端项目				
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	北京市怀柔科学城核心区北京先进光源技术与测试平台园区 6 号楼 实验室 2				
立项审批部门	无		批准文号	无	
建设项目总投资(万元)	3000	项目环保投资(万元)	200	投资比例 (环保投资/ 总投资)	6.67%
项目性质	<input type="checkbox"/> 新建 <input checked="" type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它			占地面积 (m <sup>2</sup> )	541.8
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><b>1.1 建设单位概况</b></p> <p>中国科学院国家空间科学中心（以下简称“空间中心”）由 1958 年为研制“东方红一号”卫星而组建的中国科学院“581”组变迁而来，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，负责组织开展国家空间科学发展战略规划研</p>					

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与技术发展和试验工作。在六十多年的发展历程中，空间中心面向世界科技前沿和国家重大需求，牵头组织和承担了一大批重大科技项目，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。

截止 2025 年 7 月，空间中心正式职工 834 人，两院院士 2 人，国家杰出青年基金获得者 6 人，优秀青年科学基金获得者 4 人，海外优青 4 人，科技创新领军人才 6 人，青年拔尖人才 4 人，中国科学院百人 A 类领军 3 人，B 类青年 7 人，中国科学院关键技术人才 9 人。

## 1.2 核技术利用及辐射安全管理现状

### 1.2.1 核技术利用现状情况

空间中心现有辐射安全许可证颁发日期是 2022 年 6 月 28 日，许可证编号京环辐证[F0026]，有效期至 2027 年 6 月 27 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。

已获得许可使用的放射源 30 枚、射线装置 8 台，以上放射源和射线装置均履行了环保手续。空间中心射线装置环保手续履行情况见表 1-1，放射源环保手续履行情况见表 1-2。

表 1-1 空间中心已许可的射线装置环保手续履行情况（共 8 台）

序号	装置名称	类别	数量	使用部门	环评批复	验收时间
1	质子回旋加速器（50MeV）	II	1	空间环境效应研究室	京环审[2021]75 号	2022.10.17
2	电子加速器（200KeV）	II	1	探测室-怀柔园区	京环审[2010]515 号	2015.7.16
3	电子加速器（5MeV）	II	1	效应室-怀柔园区	xxx	xxx
4	电子束源（30KeV）	III	1	探测室-怀柔园区	京环审[2016]xxx 号	2016.12.22
5	电子加速器（2MeV）	II	1	探测室-怀柔园区	京环审[2010]515 号	2015.7.16
6	离子束源（30KeV）	III	1	探测室-怀柔园区	京环审[2016]xxx 号	2016.12.22
7	YTX3000 型自动 X 光检查系统	III	1	探测室-怀柔园区	xxx	/

8	电子/质子试验装置	III	1	探测室-怀柔园区	备案号: 202511011 600001189	/
---	-----------	-----	---	----------	-----------------------------	---

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	涉源部门	备案号
1	Am-241	V	3.7E+4Bq×1	探测室（源库）	京环审[2009]776 号
2	Am-241	IV	7.4E+8Bq×1	探测室（源库）	
3	Cs-137	V	2.59E+6Bq×1	探测室（源库）	
4	Sr-90	V	3.7E+6Bq×1	探测室（源库）	
5	Fe-55	V	3.7E+8Bq×1	探测室（源库）	
6	Pu-238	V	3.7E+8Bq×1	探测室（源库）	
7	Sr-90	V	3.7E+5Bq×1	探测室（源库）	
8	Sr-90	V	3.33E+9Bq×1	探测室（源库）	
9	Cf-252	V	2.0E+5Bq×1	未购置	
10	Sr-90	V	1.85E+9Bq×10	效应室（源库）	京环审[2010]214 号
11	Ba-133	V	3.7E+8Bq×1	未购置	京环审[2010]731 号
12	Cd-109	V	3.7E+9Bq×1	未购置	
13	Tl-204	V	3.7E+7Bq×2	未购置	
14	Sr-90	V	3.7E+8Bq×2	未购置	
15	Am-241	V	3.7E+5Bq×2	未购置	
16	Co-60	V	3.7E+7Bq×1	未购置	
17	Fe-55	V	3.7E+10Bq×1	未购置	
18	Cs-137	V	3.7E+7Bq×1	未购置	

### 1.2.2 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，组长由中心纪委书记承担，辐射防护负责人由探测室主任担任，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，辐射安全与环境保护小组名单见表 1-3。

表 1-3 辐射安全与防护管理小组名单

机构名称	中国科学院国家空间科学中心辐射安全和防护管理小组				
负责人	白鹭		电话	62582687	
序号	人员类别	姓名	职务或职称	工作部门	专/兼职
1	组长	白鹭	中心纪委书记	中心领导	兼职

2	副组长	任建华	副主任	综合办公室	兼职
3	辐射防护负责人	荆涛	主任	探测室	兼职
4	成员	李宏伟	副研究员	天气室效应中心	兼职
5	成员	张振龙	副研究员	试验中心	兼职
6	成员	吴洁雨	业务主管	综合办公室	专职
7	成员	刘春生	业务主管	条件处	兼职

## （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总纲、辐射安全管理体系和岗位职责，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，放射源及射线装置使用操作规程，放射源辐射防护事故应急预案，射线装置辐射防护事故应急预案，电子加速器辐射防护事故应急预案及中能质子辐照试验装置应急预案。

空间中心已制定的辐射安全管理制度能满足现有项目的需求。

## （3）辐射工作人员考核

空间中心现有辐射工作人员 51 人，现有辐射工作人员均已通过国家核技术利用辐射安全与防护培训平台考核。

## （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，并委托北京市化工职业病防治院（北京市职业病防治研究院）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 2024 年度辐射工作人员的个人剂量检测报告可知，2024 年度的个人剂量最大值为 0.164mSv，小于本单位剂量约束限值 2mSv/a。

## （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。

根据北京市化工职业病防治院 2024 年 8 月 29 日对空间中心辐射工作场所的例行监测报告显示，射线装置及放射源屏蔽体外各监测点的周围剂量当量率在（本底值 $\sim 0.17$ ） $\mu\text{Sv/h}$

之间，同时每半年自行对工作场所进行一次常规监测，检测报告齐全，检测结果均满足相关标准要求的控制水平  $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

#### （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，并每年开展应急演练。空间中心已于 2024 年 7 月 25 日组织开展辐射安全应急演练，总结经验教训，进一步完善应急预案。

#### （7）现有辐射监测仪器

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 空间中心现有监测仪器**

序号	仪器名称	型号	仪器状态	数量	备注
1	个人剂量报警仪	PM1610	在用	4	其它项目
2	多功能辐射监测仪	Model:900+	在用	3	其它项目
3	个人剂量报警仪	REN200	在用	1	其它项目
4	高灵敏环境 $\gamma$ 探测器	EGM-5	在用	1	其它项目
5	高气压电离室场所 $\gamma$ 监测	AGM-6	在用	4	其它项目
6	便携式 X/ $\gamma$ 剂量率仪	HRD-100	在用	2	质子加速器配备
7	便携式中子剂量率仪	NRD-100	在用	2	
8	个人剂量报警仪	PDG-100	在用	3	
9	个人剂量计	—	在用	每人一支	
10	固定式 $\gamma$ -中子剂量率仪	BEIS-RF11	在用	5 台（ $\gamma$ 探头 8 个，中子探头 2 个）	
11	固定式 $\gamma$ 剂量率监测仪	HA1100Med-P1	已安装，未投入使用	2 台（4 个探头）	
12	固定式中子剂量率仪	RP4005-WE	已安装，未投入使用	1 台（2 个探头）	

### 1.2.3 本项目与现有质子辐照实验装置的依托关系

现有 50MeV 质子辐照实验装置（最大能量 50MeV、最大流强  $10\mu\text{A}$ ）于 2021 年初筹建，并于 2021 年 8 月 23 日取得北京市生态环境局批复，批号为京环审[2021]75 号，其建设内容为一台 50MeV 质子加速器、1 条束流线及 1 个质子辐照实验终端（最大能量 50MeV、最大流强  $10\mu\text{A}$ ），主要用于器件及材料等样品的辐照效应测试与研究；因科研任务需要，2023 年计划利用已建成的 50MeV 质子加速器开展微束辐照实验，并于 2023 年 12 月 7 日



取得北京市生态环境局批复，批号为京环审[2023]79号，建设内容为1条束流线及1个微束实验终端（最大能量50MeV、最大流强10nA），主要用于细胞组织等样品的辐照效应测试与研究。目前，现有质子辐照实验装置包含以上所述一台50MeV质子加速器、2条束流线及2个实验终端。

现有质子辐照实验装置工作场所现状照片见下图（不包含微束实验终端）。



图 1-1 质子实验装置工作场所现状照片

现有质子辐照实验装置工作场所分为加速器大厅、辐照实验大厅及微束实验大厅三个区域，本项目拟在辐照实验大厅内将现有质子实验终端向南移动7.5m，移址后的终端为质子实验终端1（图1-1中a），在该终端西侧新增3个试验终端，由东向西依次为质子实验终端2（图1-1中b）、白光中子实验终端（图1-1中c）、准单能中子实验终端（图1-1中d）。拟建项目依托现有质子回旋加速器及其束流线（加速器大厅段）进行辐照实验，实验终端最大能量50MeV。

本项目利用现有辐照实验大厅的墙体（含屋顶）屏蔽、剂量率监测仪器、安全连锁系统、声光报警装置、巡检清场按钮、急停按钮、监控系统、通风系统等屏蔽防护措施，新增1台固定式中子剂量率监测仪、1台固定式 $\gamma$ 剂量率监测仪、1个移动式铅屏风，每个终端均新增设屏蔽措施，可满足相关标准及管理目标限值的要求。

### 1.3 项目概况

#### 1.3.1 建设目的及项目由来

位移损伤效应，又称空间辐射损伤效应或非电离能量损失效应，是空间高能带电粒子与航天器材料原子核发生弹性碰撞，导致晶格原子移位并形成内部缺陷的现象。该效应属于累积效应，损伤程度与辐射剂量相关，主要影响半导体器件、太阳电池等材料的载流子寿命及性能，导致输出功率下降或器件失效。引发该效应的辐射源包括地球辐射带的电子和质子，以及太阳宇宙线质子。

空间辐射效应地面模拟试验对于我国至今仍是缺项，本项目建成后可填补我国在该试验领域的空白，满足图像传感器、太阳电池、光电耦合器、激光二极管等光电器件的位移损伤效应研究及评估需求。其试验数据可在提升我国在轨卫星寿命及可靠性、支撑国产元器件及新型卫星载荷的研制等方面发挥重要作用。

由于本项目涉及新增 3 条束流线、3 个实验终端，需对新增实验终端进一步论证其辐射环境的影响，根据相关法律法规要求，需要重新编制环评报告报审管部门批复，因此特编制环境影响评价报告表。

#### 1.3.2 建设内容

拟建项目位于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（空间环境效应分析实验楼），基于现有 50MeV 质子加速器及束流线，拟在辐照实验大厅同室移位现有质子束流终端，并新增 3 条束流线及 3 个实验终端，分别为质子实验束流线及终端（最大能量 50MeV、最大流强 10 $\mu$ A）、准单能中子实验束流线及终端（最大能量 50MeV）、白光中子实验束流线及终端（最大能量 50MeV），用于空间辐射模拟实验与测试。质子加速器及其束流终端性能参数见表 1-5。

表 1-5 本项目涉及加速器及其实验终端情况

设备名称	主要参数	使用场所	辐照面积	用途	备注
CYCIAE-50 型质子回旋加速器	最大能量 50MeV、最大流强 10 $\mu$ A	加速器大厅（实验室 3）	/	加速并引出质子束流	现有
微束终端及其束流线	最大能量 50MeV、最大流强 10nA；照射方向：向上	微束实验大厅（实验室 5）	200mm×200mm	空间辐射模拟实验与测试，生物样品辐照效应测试与研究。	现有

质子实验束流线及终端 1	最大能量 50MeV、最大流强 10 $\mu$ A；照射方向：向南	辐照实验大厅（实验室 2）	200mm $\times$ 200mm	空间辐射模拟实验与测试，器件、材料等辐照效应测试与研究。	移位
质子实验束流线及终端 2	最大能量 50MeV、最大流强 10 $\mu$ A；照射方向：向西南	辐照实验大厅（实验室 2）	300mm $\times$ 300mm		新增
准单能中子实验束流线及终端	最大能量 50MeV；照射方向：向南	辐照实验大厅（实验室 2）	/		新增
白光中子实验束流线及终端	最大能量 50MeV；照射方向：向南	辐照实验大厅（实验室 2）	/		新增

本项目辐射工作场所为 6 号楼辐照实验大厅（实验室 2），加速器大厅及微束实验大厅装置保持现状不变。改造辐照实验大厅的现有辐照实验束流线，在其末端分出 2 条束流线，2 条束流线经磁铁优化束流线后，各自再分出 2 条束流线，至其实验终端。辐照实验大厅改造前后对照见图 1-2、图 1-3。

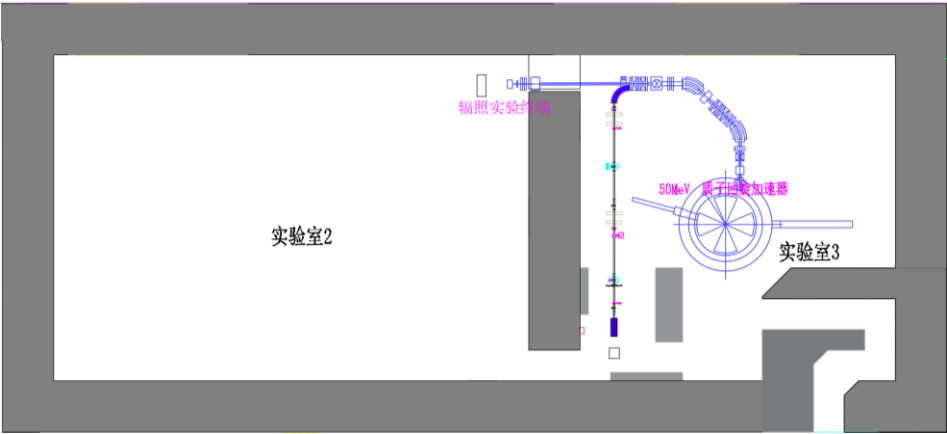


图 1-2 现有辐照实验终端平面布局图

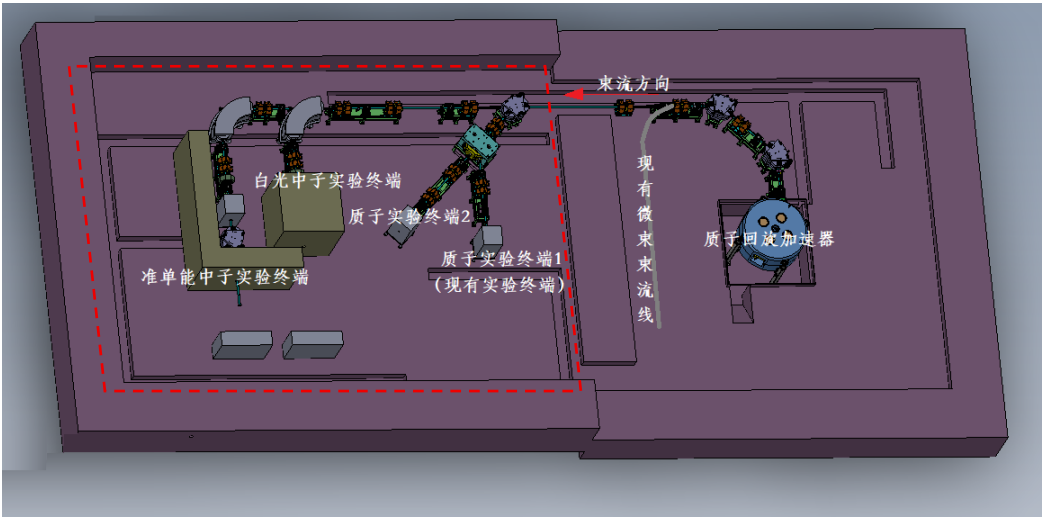


图 1-3 新增终端及束流线布局效果图（红色虚线为本项目建设区域）

### 1.3.3 项目变动情况

本次改造工程位于辐照实验大厅内，变动内容为新增 3 个实验终端及其束流线，将现有质子束流终端向南同室移动 7.5m，辐照实验大厅变动前后布局情况见图 1-2、图 1-3。为 4 个试验终端新增屏蔽措施：两个质子实验终端各设置一座长×宽×高 1500 mm× 500 mm × 2000 mm 的混凝土屏蔽体；白光中子实验终端和准单能中子实验终端共用一座混凝土屏蔽体。具体屏蔽措施见“10.1.3.2 本次拟增设辐射终端屏蔽措施”。在辐照实验大厅内新增一台 中子周围剂量当量率仪、一台  $\gamma$  辐射剂量率监测仪，安装在准单能中子屏蔽墙南侧。辐照实验大厅新增配一个移动式 20mmPb 铅屏风。本项目新增 2 名辐射工作人员。

### 1.3.4 劳动定员

本次改造拟新增 3 个实验终端，改造后一台质子回旋加速器配置 5 个实验终端，5 个实验终端不能同时出束，加速器每次运行只能一个实验终端进行工作。本项目开展后加速器利用率大大提高，可以在辐照实验大厅内一次放入 4 个样品（每个实验终端放置一个样品），依次进行 4 个实验，节省了更换样品时的等待时间（每次实验结束，进入实验大厅更换样品时需等待 2.5 小时）。

现有中能质子实验装置共配备 16 名辐射工作人员，其中，加速器及质子实验终端配备 11 人，微束实验终端配备 5 人。根据建设单位提供，本次改造后加速器存在连续 24 小时工作的情况，装置 24 小时连续运行期间，设置 3 班倒，每班 3 人，每班工作 8 小时/天。因此目前加速器及质子实验终端配备 11 人的配置能够满足日常工作需求，但考虑到辐照实验大厅 4 个终端进行 3 种不同的效应试验，本项目新增两名工作人员。至此中能质子实验装置辐射工作人员配置增至 18 人，其中 13 名工作人员负责加速器操作、辐照实验大厅内实验终端的运行及实验工作，5 人负责微束实验终端的运行。辐射工作人员配置情况见表 1-6。

表 1-6 项目辐射工作人员登记表

序号	姓名	职称	考核证书编号	证书有效期	备注
1	蔡明辉	副研究员	FS21BJ2300017	2021.04.07~2026.04.07	只参与微束终端运行工作
2	杨涛	副研究员	FS21BJ2300016	2021.04.07~2026.04.07	
3	许亮亮	助理研究员	FS21BJ2300015	2021.04.07~2026.04.07	

4	贾鑫禹	工程师	FS22BJ2300857	2022.07.22~2027.07.22	操作质子加速器运行、辐照终端实验
5	夏清	助理研究员	FS21BJ2301510	2021.07.29~2026.07.29	
6	马英起	正高级工程师	FS22BJ2300603	2022.06.20~2027.06.20	
7	周平	副研究员	FS21BJ2300043	2021.04.07~2026.04.07	
8	上官士鹏	高级工程师	FS22BJ2300979	2022.08.01~2027.08.01	
9	陶孟泽	助理研究员	FS21BJ2300085	2021.04.12~2026.04.12	
10	李宏伟	副研究员	FS21BJ2300099	2021.04.12~2026.04.12	
11	寇彬	实验师	FS21BJ2300101	2021.04.12~2026.04.12	
12	冀文涛	实验师	FS21BJ2300188	2021.04.12~2026.04.12	
13	王英豪	博士后	FS22BJ2301468	2022.09.08~2027.09.08	
14	张龙龙	副研究员	FS22BJ2300852	2022.07.21~2027.07.21	
15	赵旭	工程师	FS22BJ2301048	2022.08.12~2027.08.12	
16	胡紫楠	工程师	FS21BJ2302299	2021.12.09~2026.12.09	
17	新增 2 人待定				

### 1.3.5 项目周边环境情况

#### 1、项目周边环境情况

本项目位于北京市怀柔区永乐大街 1 号先进光源技术研发与测试平台园区（以下简称园区）6 号楼 1。园区占地 64 亩，主要面向先进光源关键技术的研发，形成从高质量 X 射线的产生、传输、探测到应用的核心技术创新整体，成为高新技术的研发地和成果转化的输出地。园区北侧隔永乐北三街为绿地；东侧隔雁栖东四路为绿地；南侧隔永乐北二街为北京建工集团怀柔科学城城市客厅；西侧隔雁栖东三路为中科院物理研究所。园区周边环境情况见图 1-4。



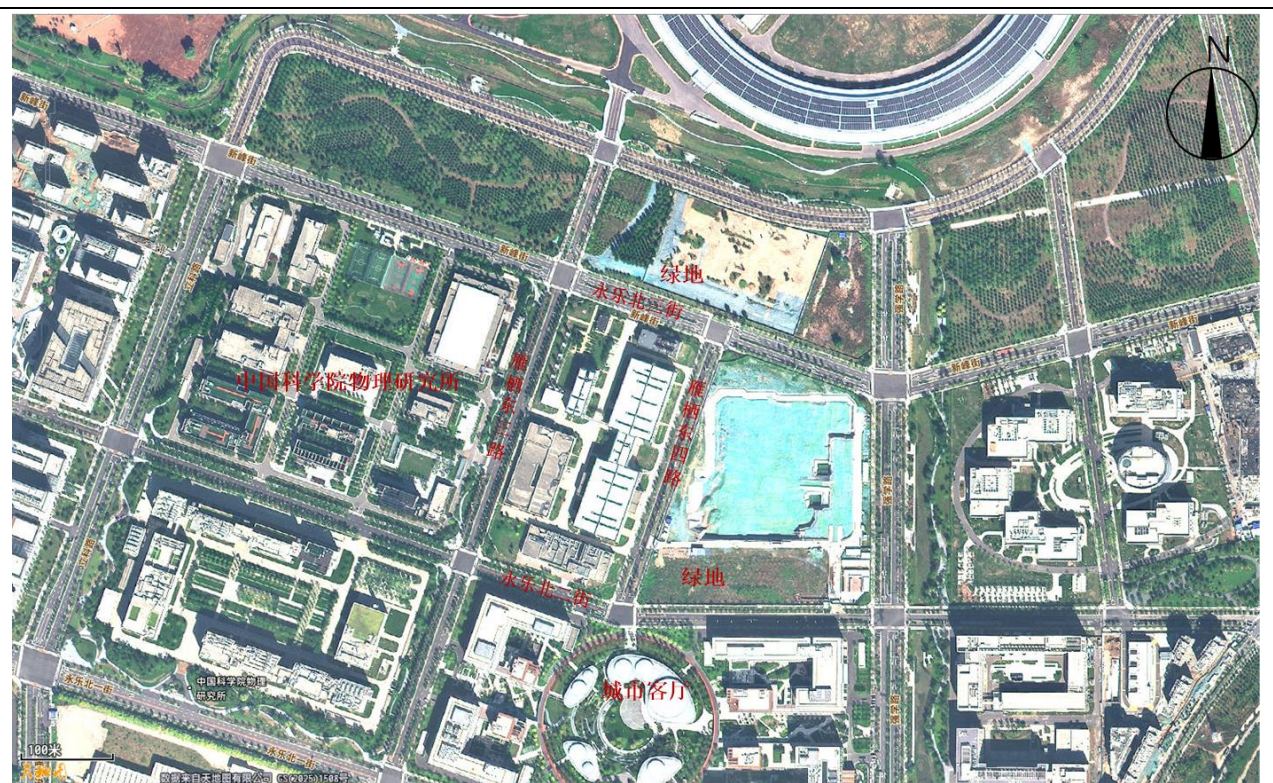


图 1-4 园区周边环境位置关系图

## 2、项目所在建筑周边环境

本项目所在 6 号楼位于园区最南端，6 号楼北侧自西向东依次为 1 号楼、2 号楼 C、储罐区、3 号低温试验楼、5 号变电站及 4 号楼。本项目 50m 评价范围内没有居民区、学校及行政办公等环境保护目标。

## 3、核技术利用场所周边环境

6 号楼为空间环境效应分析实验楼，楼体东西走向划分为东楼、西楼两部分，东楼主体一层，部分二层，主要为中能质子辐照装置配套辅助用房；西楼主体一层，部分二层，主要为低能离子辐照模拟装置配套辅助用房。东楼、西楼之间有实体墙分隔，无互通通道。东楼、西楼在一层各自使用一个大门进出，工作环境不交叉。本项目工作场所位于东楼一层辐照实验大厅，与加速器大厅之间利用门洞相通，共用加速器大厅防护门。加速器大厅东侧为走廊；南侧为走廊、实验室（未利用）；西侧为低能离子辐照实验大厅（未运行）；北侧为室外空地；无楼上、楼下建筑。

经现场踏勘，本项目所在辐射工作场所周边环境未发生变化，保护目标仍为 6 号楼内

的职业工作人员、2 号楼 C 楼和 1 号楼建筑内工作的公众人员及室外活动的公众人员，无新增保护目标。

### 1.3.6 辐射工作场所布局

本项目辐射工作场所布局未发生变化，辐照实验大厅层高 7.2m，南北宽 21m，东西长 25.8m，建筑面积 541.8m<sup>2</sup>；加速器大厅层高 14.4m，南北宽 21m，东西长 20m，建筑面积 420m<sup>2</sup>。辐照实验大厅、加速器大厅均为一层混凝土结构，大厅间利用门洞互相连通。

### 1.4 本项目产业政策符合性

本项目新增的实验终端属于Ⅱ类射线装置项目改造，依据《产业结构调整指导目录（2024 年本）》中“第一类鼓励类”“十四、机械”中“1. 科学仪器和工业仪表：用于辐射、有毒、可燃、易爆、重金属、二噁英等检测分析的仪器仪表，水质、烟气、空气检测仪器，药品、食品、生化检验用高端质谱仪、色谱仪、光谱仪、X 射线仪、磁共振波谱仪、自动生化检测系统及自动取样系统和样品处理系统，科学研究、智能制造、测试认证用测量精度达到微米以上的多维几何尺寸测量仪器，**自动化、智能化、多功能材料力学性能测试仪器**，工业 CT、三维超声波探伤仪等无损检测设备，用于纳米观察测量的分辨率高于 3.0 纳米的电子显微镜，各工业领域用高端在线检验检测仪器设备”，本项目属于“自动化、智能化、多功能材料力学性能测试仪器”类项目，属于鼓励类，符合国家产业政策。本项目不属于《北京市新增产业的禁止和限制目录（2022 年版）》中禁止和限制项目。因此，本项目的建设符合国家及地方产业政策要求。

### 1.5 实践正当性及建设必要性

现有质子实验终端 1 辐照面积 200mm×200mm，无法满足大型材料的辐照需求，且受时间联锁（每次辐照结束后 2.5 小时方可打开防护门）的限制，更换样品需间隔 2.5 小时，通常一天辐照 2~3 个样品，当辐照量较多时，难以保证按时完成工作任务。针对以上难题，本次新增质子实验终端 2，辐照面积 300mm×300mm，不但解决了大型材料的辐照难题，还能同时在两个终端上放置样品，依次进行辐照，减少了更换样品时等候 2.5 小时开门的时间，提高了辐照效率。本项目利用白光中子源、准单能中子源用于开展空间辐射效应地面模拟试验，满足了材料的位移损伤效应研究及评估需求。其试验数据可提升我国在

轨卫星寿命及可靠性、支撑国产元器件及新型卫星载荷的研制等方面发挥重要作用。尽管本项目实验终端对周边环境有少许辐射影响，但是借助上述设备用于空间环境效应地面模拟实验，推进了我国航天事业的发展与进步，填补了我国在该试验领域的空白，所获社会利益远大于其产生的辐射危害，故上述设备的使用具有实践正当性和建设必要性。



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
	无							

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
	无									

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)	最大流强 (mA)	用途	工作场所	备注
1	质子回旋加速器	II	1台	CYCIAE-50	质子	50MeV	0.01 mA	用于空间辐射模拟实验与测试，材料等辐照效应测试与研究。	怀柔科学城核心区 6 号楼加速器大厅（实验室 3）、及辐照实验大厅（实验室 2）	质子回旋加速器为现有射线装置，在辐照实验大厅内新增3个试验终端

(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
	无								

(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 (μA)	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	
	无												



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，2020 年 12 月 25 日生态环境部令 20 号修改版；</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) 《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>(11) 《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>(12) 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> <p>(13) 《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>(14) 关于发布《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》的公告（国环环评〔2017〕4号），原环境保护部，2017年11月20日。</p>
技术标准	<p>(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；</p> <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) 《环境<math>\gamma</math>辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)；</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第1部分：化学有害因素》(GBZ2.1-2019)。</p>
其他	<p>(1) 《放射性物质排放的环境影响评估》IAEA NO.19 号报告；</p> <p>(2) 《AdvancedPhoton Source: Radiological Design Considerations》（APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July1991）；</p> <p>(3) 建设单位提供的相关技术资料。</p>

表 7 保护目标与评价标准

<div><div>7.1 评价范围</div><p>为确保辐射场所周围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，“以项目实体边界为中心，放射性同位素生产项目（放射性药物生产除外）的评价范围半径不小于 3km；放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目的评价范围，甲级取半径 500m 的范围，乙、丙级取半径 50m 的范围。放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围）”。本次评价范围为实验室 2、实验室 3 屏蔽墙体外 50m 的区域范围，其评价范围图见图 7-1。</p><div><p>图 7-1 本项目所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围示意图</p></div></div>	<div><div>7.2 保护目标</div><p>本项目建设地址位于怀柔科学城先进光源技术研究与测试平台园区 6 号楼，该楼东侧为雁栖东四路、绿地；南侧为永乐北二街；西侧为绿地；北侧为</p></div>
--	--

1 号楼、2 号楼 C。本项目在 6 号楼一层北侧偏东，本项目评价范围内保护目标分布情况见表 7-1。

表 7-1 评价范围内保护目标及人口分布情况

分类	方位	保护目标名称	最近距离 (m)	人数	保护对象
该建筑内 保护目标	一层	东侧	弱电间、内循环水泵房、高频机房、电源机房	3-10m	约 13 人 本项目辐射工作人员
		东侧	走廊	0-3m	
		东南侧	加速器控制机房	2m	
		南侧	门厅、实验准备间 1、物理测量厅 1、协同效应实验大厅、走廊、卫生间	0-12m	
	西侧	低能离子模拟辐照装置所在房间（实验室 1）	0-37m	0 人	/
	二层	东侧	配电间、高频配电间、器件检测实验室、电子学实验室	3-10m	约 5 人 本项目辐射工作人员
		东侧	走廊	0-3m	
		南侧	走廊	0-3m	
		南侧	实验准备间、休息间、物理测量厅、配套实验室用房	3-12m	
外部 保护目标	北侧	道路	0-12m	流动人员	行人
	北侧	2 号楼 C	10-50m	约 20 人	该建筑内办公人员
	北侧偏西	1 号楼	12-50m	约 20 人	该建筑内办公人员
	西侧	绿地	37-50m	0 人	/
	东侧	绿地	10-25m	0 人	/
	东侧	道路	25-45m	流动人员	行人
	东侧	绿地	45-50m	0 人	/
	南侧	空地	12-28m	流动人员	该建筑内办公人员
	南侧	道路	28-50m	流动人员	行人

由上表可知，本项目环境保护目标主要为职业工作人员、2 号楼 C 号楼和 1 号楼建筑内工作的公众人员及室外活动的公众人员。

### 7.3 评价标准

### 7.3.1 剂量限值及剂量约束值

#### 7.3.1.1 剂量限值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-85）中相关标准及规定，工作人员的职业照射和公众照射的剂量限值如下：

##### （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

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 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）建设单位现有辐射工作人员剂量约束值为 2mSv/a，本项目辐射工作人员剂量约束值参考现有剂量约束值，即建设单位工作人员剂量约束值为 2mSv/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 辐射剂量率控制水平

本项目辐射剂量率控制水平主要应综合考虑以下因素：

（1）根据人员剂量约束值、工作时间及关注点位的居留因子推导出辐射



剂量率控制水平。本项目工作人员剂量约束值为 2mSv/a，加速器年出束约 2000h，机房墙和入口门外为走廊、其他设备机房及室外空地，关注点位的居留因子取 1/4，辐射剂量率控制水平为 4 $\mu$ Sv/h。

(2) 参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.5-2015)中按照关注点人员居留因子的不同，确定关注点的最高剂量率参考控制水平：

a)人员居留因子  $T \geq 1/2$  的场所：  $H \leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ；

b)人员居留因子  $T < 1/2$  的场所：  $H \leq 10\mu\text{Sv/h}$ 。

本项目关注点位的居留因子取 1/4，最高剂量率参考控制水平为 10 $\mu$ Sv/h。

(3) 拟建项目依托的质子加速器环评批复中要求，各面屏蔽体外的辐射剂量率不大于 2.5 $\mu$ Sv/h。

综上，本项目所在辐射工作场所关注点处辐射剂量率控制水平，取 (1) 中导出剂量率控制水平、(2) 中参考控制水平和 (3) 中生态环境部门要求较小者，确认加速器大厅、辐照实验大厅四周屏蔽体外、防护门外及屋顶剂量率控制水平为 2.5 $\mu$ Sv/h。

### 7.3.3 放射性固体废物

本项目辐照样品为航天材料，辐照后由委托单位回收进行科学研究，因此本项目不涉及放射性固体废物。

### 7.4 非放射性控制值

本项目 NO<sub>x</sub> 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 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub> 浓度限值参照执行《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》(GBZ2.1-2019)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 7-2。

表 7-2 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 <sup>3</sup>	最高允许排放速率，kg/h	最高容许浓度，mg/m <sup>3</sup>	时间加权平均容许浓度，mg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	——	——	0.3	——

NO <sub>x</sub>	100	0.215*	——	5
-----------------	-----	--------	----	---

注：根据《大气污染物综合排放标准》（DB11/501-2017），“排气筒高度应高于周围 200m 半径范围内的建筑物 5m 以上，不能达到该项要求的，最高允许排放速率应按照表 1、表 2 或表 3 所列排放速率限值的 50%执行或根据 5.1.3 节确定的排放速率限值的 50%执行”。本项目所在场所半径 200m 范围内最高建筑为 3#低温厅屋顶水箱间，其高度为 22.8m，本项目废气排风口高度为 15.85m，小于周围 200m 最高建筑的高度。根据《大气污染物综合排放标准》（DB11/501-2017），本项目 NO<sub>x</sub> 取排放口 15m 对应的最高允许排放速率按照（DB11/501-2017）表 3 中对应数值 50%执行。

### 7.5 参考资料

参考北京市环境保护科学研究所于 1992 年 11 月在《辐射防护》第 12 卷第 6 期发表的《北京市环境天然贯穿辐射水平调查研究》一文，可知怀柔区环境天然  $\gamma$  辐射水平见表 7-3。

表 7-3 怀柔区环境天然  $\gamma$  辐射水平（单位：nGy/h）

项目	原野	道路	室内
测值范围	40.2~77.7	37.8~79.5	57.8~143.1
均值±标准差（按点加权）	62.0±10.6	58.6±12.3	80.1±35.2

注：测量值已扣除宇宙射线响应值。

表 8 环境质量和辐射现状

<b>8.1 项目地理位置</b> <p>本项目位于怀柔科学城核心区 6 号楼，其东侧、南侧为市政道路，西侧为绿地，北侧为怀柔科学城核心区 2 号楼 C 和 1 号楼。本项目 50m 范围内没有居民区、学校及行政办公等环境保护目标。</p> <p>本项目所在辐照实验大厅位于 6 号楼建筑内的东北侧，无地下层。质子辐照装置东墙外为走廊，南墙外为走廊、物理测量厅 1、准备实验间 1 及预留的协同效应实验大厅，西墙外为低能离子辐照模拟装置所在辐射屏蔽实验大厅，北墙外为道路。</p>			
<b>8.2 项目所在区域辐射环境质量情况</b> <p>为掌握本项目辐射环境背景水平，委托核工业北京化工冶金研究院于 2025 年 9 月 29 日对本项目拟建工作场所和周围环境进行了辐射环境本底水平监测（编号：2025HYAFX-06025）。</p>			
<b>8.2.1 监测项目</b> <p>本环评监测项目包括：（1）<math>\gamma</math> 辐射剂量率；（2）中子周围剂量当量率。</p>			
<b>8.2.2 监测仪器</b> <p>本次监测使用的监测设备及主要技术性能指标见表 8-1。</p>			
<b>表 8-1 监测设备及主要技术性能指标</b>			
仪器名称	型号	主要技术性能指标	检定单位/有效日期
剂量率仪	FH40G 型（YQ-HJ-0172）	测量范围：10nGy/h~100μGy/h； 能量范围：30keV~4.4MeV。	中国计量科学研究院 2025.3.10~2026.3.9
中子周围剂量当量率仪	BH3105 型（YQ-HJ-0008）	测量范围： 100nSv/h~100mSv/h； 能量范围：热中子~14MeV。	中国计量科学研究院 2025.7.2~2026.7.1
<b>8.2.3 监测方法</b> <p>采用便携式剂量率仪和中子周围剂量当量率仪，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 10 次，每次间隔 10 秒钟，取</p>			

平均值。

### 8.2.4 监测布点

依据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）和《环境 $\gamma$ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）中的有关布点原则和方法，结合本次检测的实际情况，选取本项目所在位置及四周环境保护目标处进行布点监测，监测点位布设如图 8-1 所示。

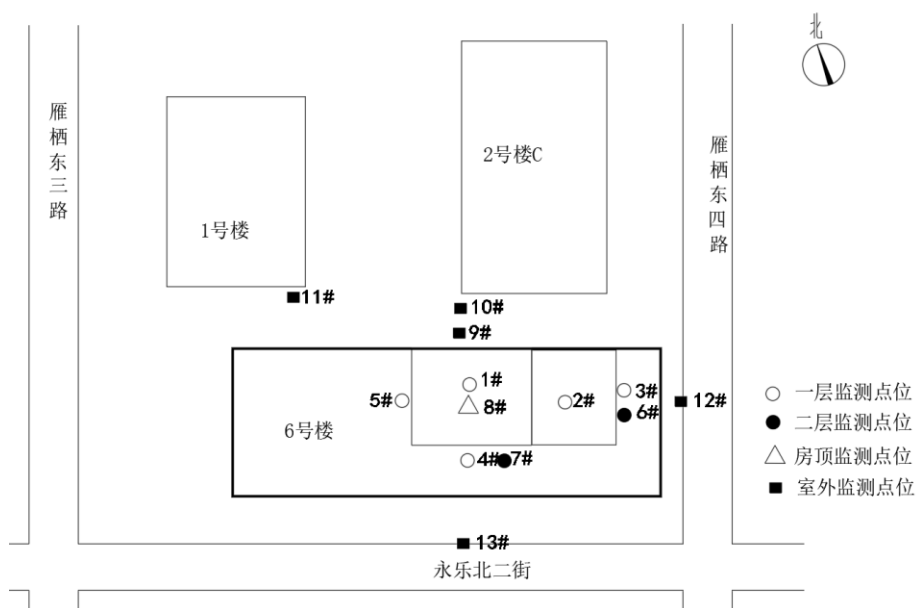


图8-1 监测布点示意图

### 8.2.5 质量保证措施

- (1) 合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性。
- (2) 监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗。
- (3) 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用。
- (4) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录。
- (5) 监测报告严格实行三级审核制度，经过校对、校核，最后由技术总负责人审定。
- (6) 通过国家级计量认证及中国实验室国家认可委员会认可。

### 8.2.6 监测结果

$\gamma$  辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果见表 8-2。

表 8-2 本项目周围辐射环境本底监测结果

序号	监测点位描述	$\gamma$ 辐射剂量率 (nGy/h)		中子周围剂 量当量率监 测结果 (nSv/h)
		监测结 果	标准偏 差	
1	本项目辐照实验大厅中心	81.4	1.1	<LLD <sub>n</sub>
2	加速器大厅中心	84.2	1.4	<LLD <sub>n</sub>
3	加速器大厅东墙外 30cm 处 (走廊)	80.4	1.9	<LLD <sub>n</sub>
4	辐照实验大厅南墙外 30cm 处 (走廊)	86.0	2.0	<LLD <sub>n</sub>
5	辐照实验大厅西墙外 30cm 处 (实验室 1)	100	1.5	<LLD <sub>n</sub>
6	二层加速器大厅东墙外 30cm 处 (走廊)	84.2	1.2	<LLD <sub>n</sub>
7	二层辐照实验大厅南墙外 30cm 处 (走廊)	98.3	1.8	<LLD <sub>n</sub>
8	辐照实验大厅上方屋顶	58.3	1.2	<LLD <sub>n</sub>
9	辐照实验大厅北墙外 30cm 处 (室外空地)	62.7	1.1	<LLD <sub>n</sub>
10	2 号楼 C 南侧空地	65.2	1.3	<LLD <sub>n</sub>
11	1 号楼南侧空地	62.3	1.2	<LLD <sub>n</sub>
12	6 号楼东侧人行道	37.5	1.5	<LLD <sub>n</sub>
13	6 号楼南侧人行道	53.5	0.6	<LLD <sub>n</sub>

注：(1) 参照《环境  $\gamma$  辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)，空气比释动能和周围剂量当量的换算系数取 1.20Sv/Gy 进行计算；

(2) LLD<sub>n</sub>=0.1 $\mu$ Sv/h。

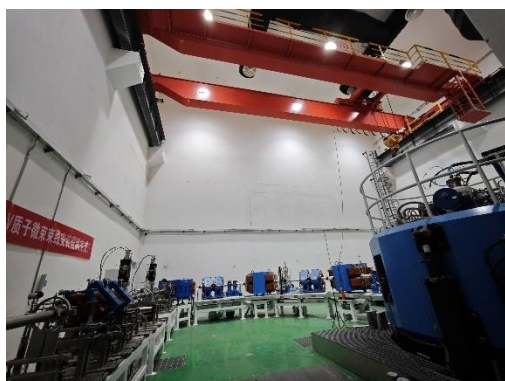
由表 8-2 可知：6 号楼周边测点的  $\gamma$  辐射剂量率监测结果在 (37.5~65.2) nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均为小于仪表探测限；6 号楼内测点的  $\gamma$  辐射剂量率监测结果在 (58.3~100) nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限。以上结果均已扣除宇宙射线响应值。参照《北京市环境天然贯穿辐射水平调查研究》(辐射防护第 12 卷第 6 期，1992 年 11 月) 调查结果，怀柔区扣除仪器宇宙射线响应值后的原野  $\gamma$  辐射水平为 (40.2~77.7) nGy/h，道路  $\gamma$  辐射水平为 (37.8~79.5) nGy/h，室内  $\gamma$  辐射水平为 (57.8~143.1) nGy/h。本项目拟建场所及周围环境中  $\gamma$  辐射剂量率处于北京市辐射环境天然本底范围之内，项目区域  $\gamma$  辐射剂量率本底水平未见异常，其中子剂量率监测值均低于探测限。

对比近年来项目所在区域辐射环境本底检测结果(室内：54.8~118.6nGy/h，室外：65.4~89.2nGy/h)，本项目区域  $\gamma$  辐射剂量率本底无明显变化。

表 9 项目工程分析与源项

<b>9.1 设备组成及工作方式</b>			
<b>9.1.1 现有质子辐照实验装置组成及工作原理</b>			
现有质子辐照实验装置主要包含一台 50MeV 质子回旋加速器、两条束流输运线与两个实验终端。设备的主要技术指标见表 9-1。			
<b>表 9-1 现有质子试验装置的主要技术指标</b>			
设备组成	项目	指标参数或内容	备注
50MeV 质子回旋加速器	加速粒子种类	负氢离子	
	引出束流粒子种类	质子	
	束流引出方式	剥离引出	
	加速器引出束流最大流强	10μA	可调
	加速器尺寸	Φ4m×2.5m	
	高频发射机功率	100KW	
	高频加速最大电压	90kV	
	加速器总功率	约 260KW	
辐照实验终端	实验靶站接收的束流最大能量	50MeV	
	实验终端靶上最大流强	10μA	
	靶站束流扫描面积	20cm ×20cm	照射野
	束流输运线最大流强	10μA	
微束实验终端	实验靶站接收的束流最大能量	50MeV	
	实验终端靶上最大流强	10nA	
	靶站束流扫描面积	20cm ×20cm	照射野
	束流输运线最大流强	10μA	
现有中能质子实验装置平面及立面布置如图 9-1 所示，现状照片见图 9-2。			
 <p>一层平面布置</p>		 <p>工作场所立面布局</p>	
 <p>微束实验终端</p>		 <p>束流方向</p>	

图 9-1 现有中能质子实验装置平面及立面布置示意图



加速器大厅



辐照实验大厅（本项目拟建地点）

图 9-2 质子实验装置工作场所现状照片

### 9.1.1.1 现有质子辐照实验装置组成

#### 1、50MeV 质子回旋加速器

50MeV 质子回旋加速器是一台紧凑型回旋加速器，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。引出质子束流能量 30MeV~50MeV，引出束流流强 10nA~10μA。

回旋加速器直径约 4 米，高度 2.5 米，总重量约 100 吨。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。

其加速器示意图见 9-3。

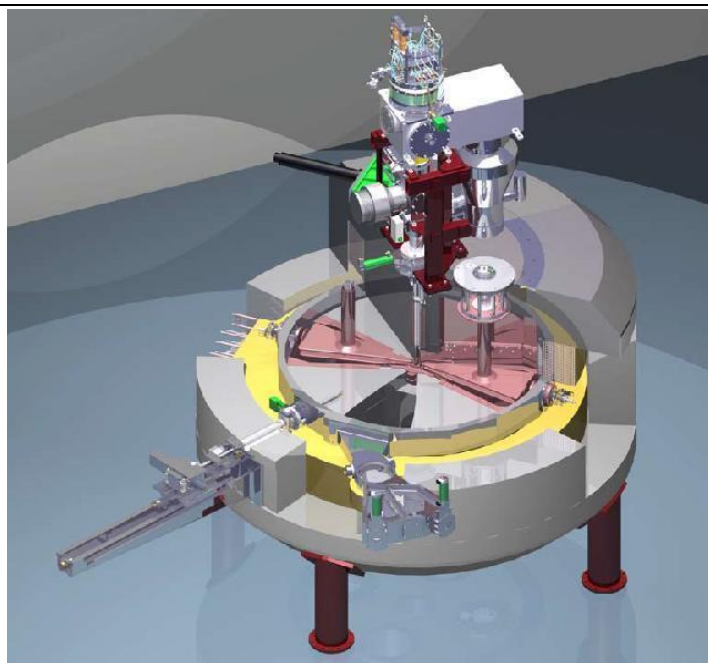


图 9-3 回旋加速器示意图

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，磁铁材料含有 C、Mn、Al 和 Ni 等元素，其中含碳量低于 0.025%、Mn 含量低于 0.3%、Al 含量 0.3%~0.5%、Ni 含量低于 0.05%。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  $1 \times 10^{-7}$  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。

## 2、质子束流线

质子束流强度最大为  $10\mu\text{A}$ ，能量最大为 50MeV。束流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、狭缝以及配套的支架等设备组成。



### 9.1.1.2 现有质子辐照实验装置工作方式

#### 1、现有回旋加速器工作原理

回旋加速器的工作原理如图 9-4 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：

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

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。

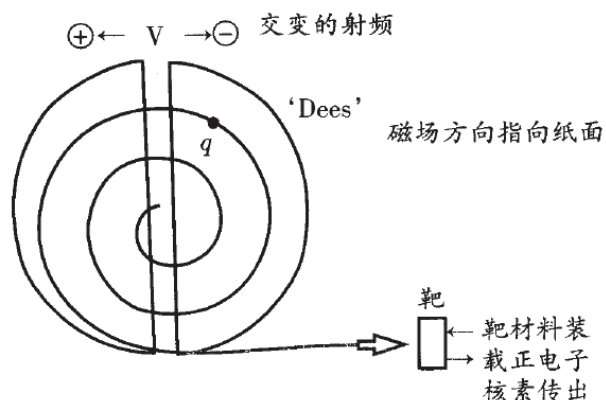


图 9-4 回旋加速器的工作原理简图

## 2、现有质子束流线与实验终端工作方式

质子束流线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。

质子束流引出加速器后通过 2 台偏转磁铁、聚焦磁铁、束流诊断装置、扩束器、限束器等元件一条束流线向西进入到辐照实验大厅的实验靶站，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；另一条束流线（微束束流线）在加速器大厅通过 1 台偏转磁铁将质子束向南偏转引出，再经 1 台偏转磁铁将质子束向上输运到二层夹层的微束实验靶站。束流传输线利用准直狭缝和电磁场对质子束流强度进行控制，使得质子束流强降低，束流品质得到保证，同时对经过控制后的束流进行监测，通过三组合四极磁铁聚焦系统将质子束聚焦至微米束斑。通过狭缝及磁铁的作用，质子束流强度从  $1\mu\text{A}$  降低到  $10\text{nA}$ ，甚至更低。束流在到达实验靶站后，利用微米束斑对生物样品进行辐照效应测试与研究。

现有两个实验终端不能同时出束。微束束流线在引出端设置引流开关，控制两条束流线的输运方向。引流开关打开， $90^\circ$  偏转磁铁工作，将束流线内质子束流全部引至微束束流线，一层辐照实验终端无法工作；引流开关关闭， $90^\circ$  偏转磁铁不工作，质子束流径直向西到达一层辐照实验终端，微束实验终端无法工作。

### 9.1.2 本次设备改造情况

本次改造涉及原质子实验终端向南同室移动 7.5m，移动后为质子实验终端 1，在该终端西侧增加 3 个实验终端，依次为质子实验终端 2、白光中子实验终端、准单能中子实验终端。本次改造平面布局图及效果图见图 9-5、图 9-6。

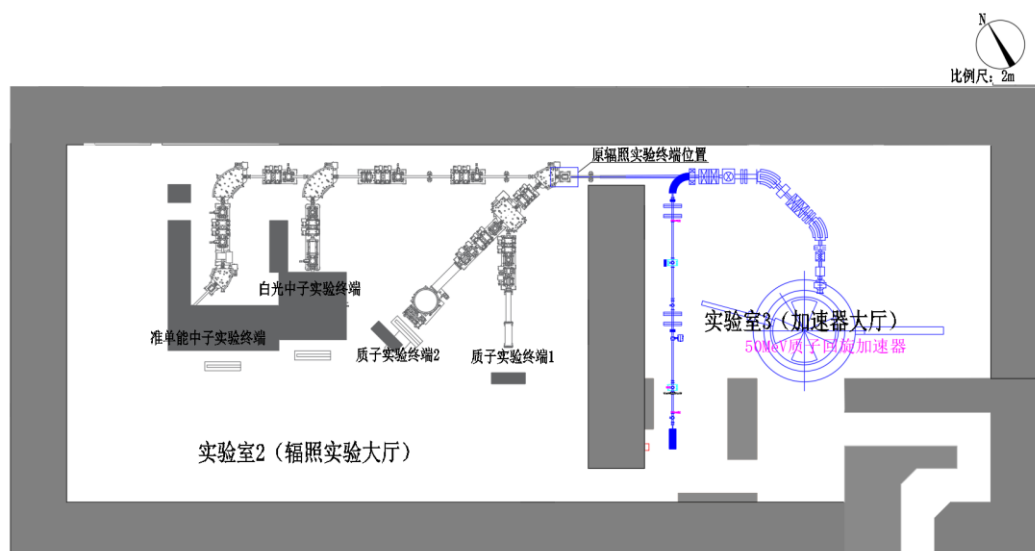


图 9-5 本项目工作场所平面布局图

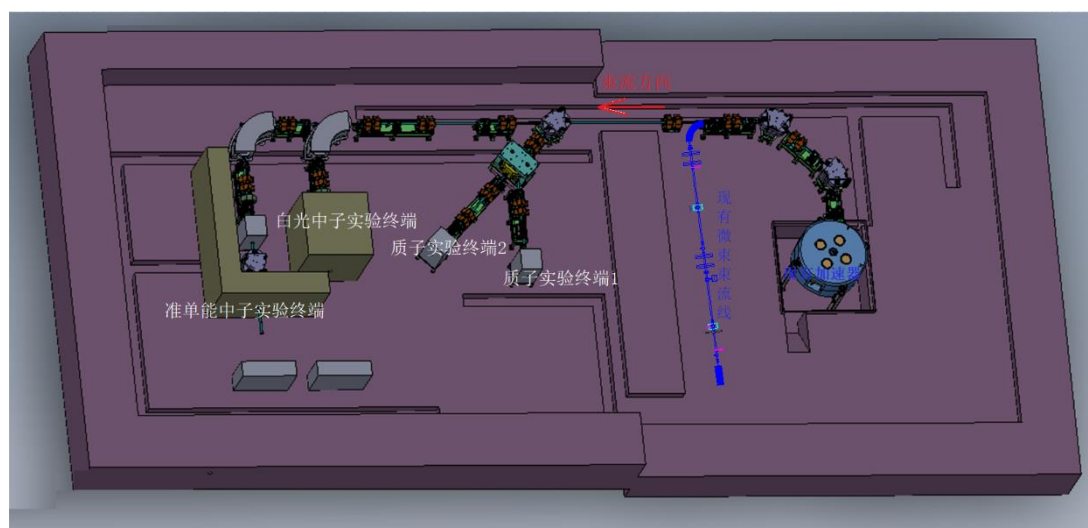


图 9-6 本项目工作场所布局效果图

#### 9.1.2.1 质子实验终端 1 及其束流线

##### 1、质子实验 1 束流线（新增）

在质子束流进入辐照实验大厅后，通过一台 45°偏转磁铁将质子束流偏转

至西南方向，偏转后的质子经由一台 $\pm 45^\circ$ 开关磁铁分配至辐照实验终端（此终端为现有质子终端，仅进行位置移动）。

## 2、质子实验终端 1（原有终端移位）

在质子实验终端 1 用质子束辐照样品至一定注量，得出其在不同质子注量下的响应曲线，从而对器件、材料等进行辐照效应测试与研究。质子束最大能量 50MeV，质子束流最大密度  $5 \times 10^9 \text{p/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。由于质子最大辐照面积为  $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ ，即  $400\text{cm}^2$ ，计算得到质子最大流强  $2.4\mu\text{A}$ 。

本次改造为原质子辐照末端新增质子收集器，收集器材料为防锈铝，收集最高能量 50MeV，最大流强  $10\mu\text{A}$  的质子，使用混凝土对该质子收集器进行屏蔽，连续质子试验 1 小时，结束后 1 小时该收集器侧向 90 度 1m 处的残余剂量率不大于  $2\text{mSv/h}$ 。

质子辐照终端的质子收集器嵌入屏蔽体内，屏蔽体留有凹槽。

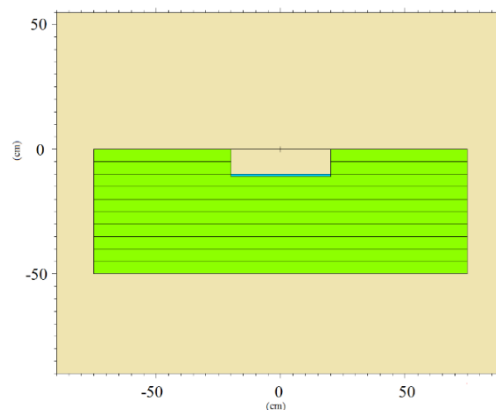


图 9-7 质子收集器平面示意图

### 9.1.2.2 质子实验终端 2 及其束流线

#### 1、质子实验束流线

在质子束流进入辐照实验大厅后，通过一台  $45^\circ$  偏转磁铁将质子束流偏转至西南方向，偏转后的质子经由一台 $\pm 45^\circ$ 开关磁铁分配至质子实验终端 2。

#### 2、质子实验终端 2

质子实验靶站终端的工作原理即直接使用质子轰击实验样品进行实验，质子最大能量 50MeV，质子最大流强  $5 \times 10^{10} \text{p/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。质子最大辐照面积为  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，即  $900\text{cm}^2$ ，计算得到质子最大流强  $7.2\mu\text{A}$ 。质子束末端安装有真空实验靶室，内部设置有移动样品台架，用以安装实验样品，该真空靶室

由两组分子泵机组抽真空，保证靶室内部  $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$  的真空度。

质子辐照末端为质子收集器，同质子实验 1。

### 9.1.2.3 白光中子实验终端及其束流线

#### 1、白光中子实验束流线

在质子束流进入辐照实验大厅后，当质子实验两个终端的偏转磁铁不工作，质子束流将继续向西传输，经过四极透镜聚焦、束流诊断元件监测束流、真空泵机组对管道真空进行控制及真空规进行管道真空度的实时监测，之后通过 90 度偏转磁铁将质子束流偏转，再经四极透镜、真空泵机组至白光中子实验终端。

#### 2、白光中子实验终端

加速器产生的质子经束线传输后至终端与钨靶反应产生白光中子，质子的能量范围  $30 \text{MeV} - 50 \text{MeV}$ ，流强最高为  $7.2 \mu\text{A}$ 。钨靶整个安装于屏蔽体内。

钨靶是白光中子束线的核心部件，其性能直接决定产生中子的品质。通过高能质子轰击重金属钨靶是一种产生高通量中子的有效机制。钨金属硬度高、熔点高、常温下不受空气侵蚀且化学性质比较稳定。如图 9-8 所示，在钨外部包裹一层导热性更好的铜，仅在质子入射处根据打靶束斑情况开一定尺寸的圆孔露出钨靶。铜和钨一起形成白光中子靶件，整体侵入冷却水箱中，水箱与外部冷却水循环系统连接，根据打靶功率和靶系统温度分布设置冷却水流速，以控制靶体散热效果。

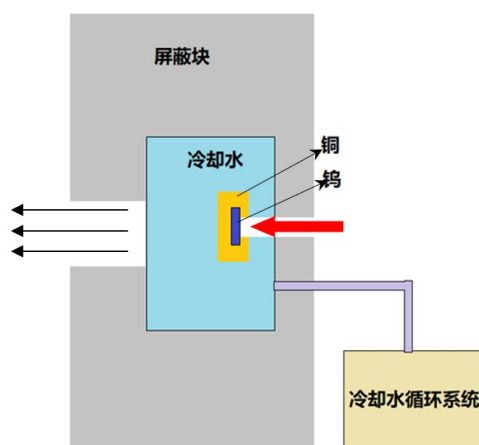


图 9-8 白光中子钨靶结构示意图

#### **9.1.2.4 准单能中子实验终端及其束流线**

##### **1、准单能中子实验束流线**

当两个质子实验终端及白光中子实验终端的偏转磁铁均不工作，质子束流将继续向西传输，经四极透镜聚焦、通过 90 度偏转磁铁将质子束流偏转至准单能中子实验终端。

##### **2、准单能中子实验终端**

加速器产生的质子经束线传输后进入准单能中子靶室与锂靶反应产生准单能中子，质子最大能量 50MeV，流强最高为 7.2 $\mu$ A。未参与反应的质子穿过靶室通过清扫磁铁偏转 45 度后进入由混凝土包围的石墨法拉第桶。质子打靶产生的准单能中子束流，经中子束流准直器准直后，到达实验区，辐照样品进行试验。

#### **9.1.3 操作流程**

(1) 工作人员佩戴好个人剂量计，使用手持式剂量仪测量确定实验终端靶附近剂量不超过规定值；

(2) 将实验样品安装到实验靶架上；

(3) 确定水、电、气等辅助设备开启；

(4) 确定真空开启；

(5) 确定大厅内无人，按照顺序进行清场，关屏蔽门，开加速器，进行束流调试工作；

(6) 进行质子/白光中子/准单能中子辐照实验；

(7) 实验结束后，关闭加速器；

(8) 等待一段时间，观察监控仪表显示实验大厅内剂量率水平低于 1 $\mu$ Sv/h，显示大厅内剂量合格后，开启屏蔽门，使用手持式剂量仪测量确定大厅可以进入后，进入大厅取出样品。

#### **9.1.4 人员配备情况**

现有质子辐照实验装置共配备 16 名辐射工作人员，其中，加速器及质子实验终端配备 11 人，微束实验终端配备 5 人。根据建设单位提供，现有质子辐照实验装置年出束时间在 2000h 左右，本次改建后其加速器年出束时间最大

2200h, 拟新增 2 名工作人员。

## **9.2 污染源分析**

### **9.2.1 正常工况下污染源分析**

(1) 中能质子辐照装置会产生中子, 伴生  $\gamma$  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、设备冷却水及空气相互作用发生活化, 产生感生放射性, 其中活化部件和感生放射性气体对工作人员及周围环境造成辐射影响, 活化的冷却水循环使用, 正常情况下不外排, 对环境影响很小;

(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。

### **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实验室内; 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、 $\gamma$  射线的外照射; 3) 束流引流系统正常工作时, 束流引出端口处不会出现漏束, 漏束是指任一实验终端工作时, 束流管中质子流未全部引入该终端束流管, 而是部分质子束流径直进入其他束流管道, 只有在引流系统设备故障时, 才会发生漏束情况, 导致两个终端同时出束, 对周边环境辐射影响增加。

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

本项目拟增加的 3 条束流线及 3 个束流终端位于怀柔科学城核心区 6 号楼实验室 2 辐照实验大厅内。其周围情况见表 10-1。

**表 10-1 辐射工作场所周围情况**

设备	所在楼层	东侧	南侧	西侧	北侧	楼上
中能质子辐照装置	一层	走廊、机房、泵房及控制机房	门厅、走廊、物理测量厅、实验准备间及预留协同效应实验大厅	辐射屏蔽实验室	室外绿地、道路	屋顶
	二层	走廊、配电间、器件检测实验室及电子学实验室	走廊、休息间、备件间、物理测量厅、实验准备间	——	——	——
	三层	屋面	走廊、清洁间	屋面	——	屋顶

#### 10.1.2 辐射防护分区

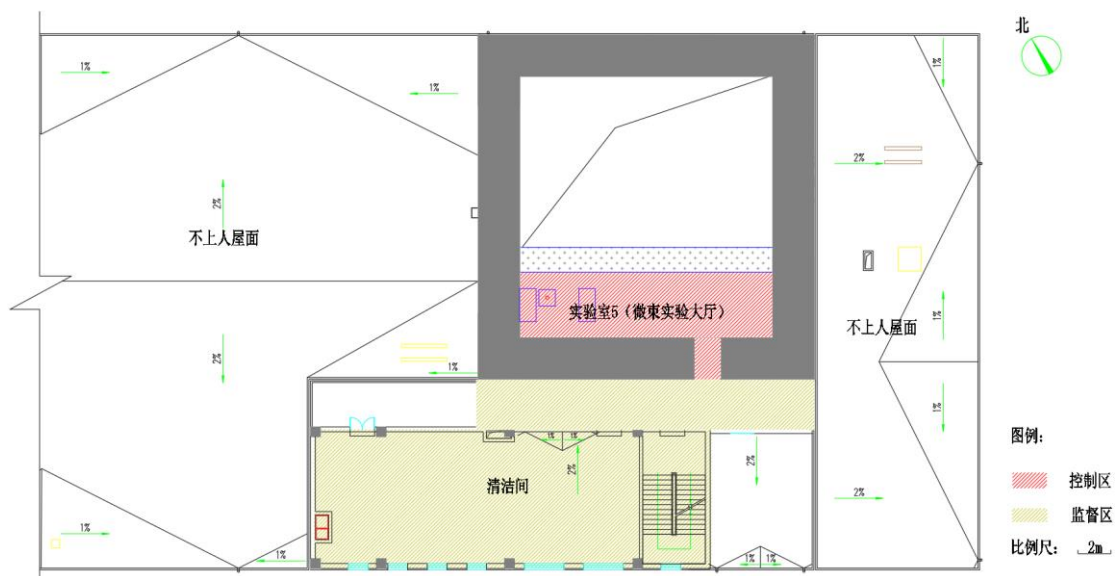
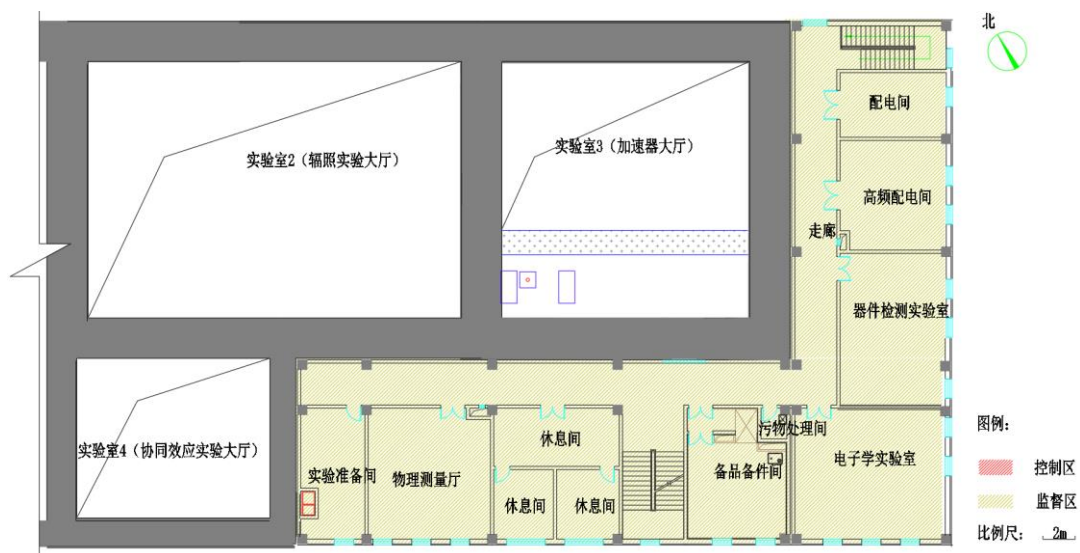
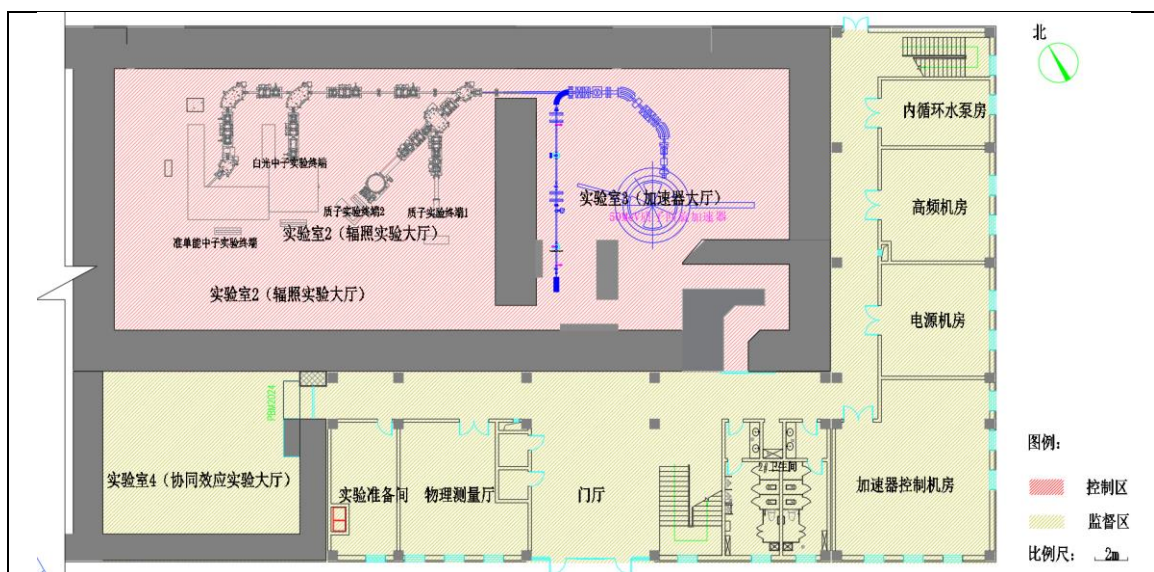
本项目辐射工作场所采取分区管理，需要采取防护措施的区域为控制区，不需要采取专门的防护手段或安全措施、但需对职业照射条件进行监督评价的区域为监督区。具体分区如下：

控制区：中能质子辐照装置所在的辐照实验大厅、加速器大厅和微束终端实验大厅。

监督区：一层除加速器大厅、辐照实验大厅外的其他区域，二层除加速器大厅、辐照实验大厅及微束终端实验大厅外的其他区域，三层改造屋顶区域增设监督区，包括新建楼梯间与加速器大厅间走廊、楼梯间改造原空置房间为清洁间、空调机房配电间。以上分区仅指 6 号楼东楼，6 号楼东楼为中能质子辐照装置工作区域，西楼为低能离子辐照模拟装置工作区域，两区域在一层各自设有门禁系统，楼内有墙体分隔，不互通。本项目从建筑外进入监督区的大门设有门禁系统，只有授权的本项目辐射工作人员才能进去，其他人员无法进入。

辐射防护分区具体划分情况见图 10-1～图 10-3。





### 10.1.3 辐射防护屏蔽

#### 10.1.3.1 现有建筑物屏蔽措施

本项目依托加速器大厅、辐照实验大厅及微束实验大厅实体屏蔽措施，具体见表 10-2。

表 10-2 中能质子辐照装置所在机房屏蔽

区域	墙体	屏蔽体材料	厚度, m	备注
加速器大厅	东墙、南墙、西墙、北墙	混凝土	2.5	原有
	迷道内墙	混凝土	1.5	原有
	迷道外墙	混凝土	2.0	原有
	屋顶	混凝土	2.0	原有
	防护门	石蜡+铅	0.33	原有
辐照实验大厅	东墙、南墙、西墙、北墙	混凝土	2.5	原有
	屋顶	混凝土	2.0	原有
微束终端实验大厅	东墙、南墙、西墙	混凝土	2.5	原有
	北墙	混凝土	1.5	原有
	屋顶	混凝土	2.0	原有
	地板	混凝土	1.3	原有
	防护门	聚乙烯+铅	0.33	原有

#### 10.1.3.2 本次拟增设辐射终端屏蔽措施

本项目沿用现有辐射工作场所的屏蔽措施。另外，4 个实验终端中质子和中子的能量较高，高能量的中子具有极强的穿透能力需要对其进行专门的辐射屏蔽防护；高能量的质子与试验样品、样品架等相互作用产生穿透力极强的中子，需要对其进行辐射防护；实验过程中产生  $\gamma$  辐射，也需要对其进行防护屏蔽，以保证实验安全。本次改造 4 个实验终端均新增屏蔽措施，具体屏蔽方案及其可行性分析如下所述。

##### 1、质子实验终端屏蔽方案及屏蔽效果分析

###### (1) 屏蔽方案

质子实验终端 1 及质子实验终端 2 的屏蔽措施一致，为一座 1500mm×2000mm×500mm（长×高×厚）的混凝土屏蔽墙，位于束流前向 1100mm 处。混凝土屏蔽体

内嵌入废束收集器（铝板），用于收集辐照样品后的质子束。废束收集器中心高度距地面 1250mm（质子入射高度），是一个 400mm×400mm（长×宽）的内凹型孔洞，深度 100mm，内凹面覆铝板。内凹区内预埋两片厚度为 10mm 的钢板，尺寸为 120mm×120mm，两件预埋 Q235A 钢板与混凝土屏蔽浇注为一体，用于铝板的固定安装。质子束流辐照样品后直接入射到铝收集器上，质子终端废束收集器总体设计如图 10-4 所示。

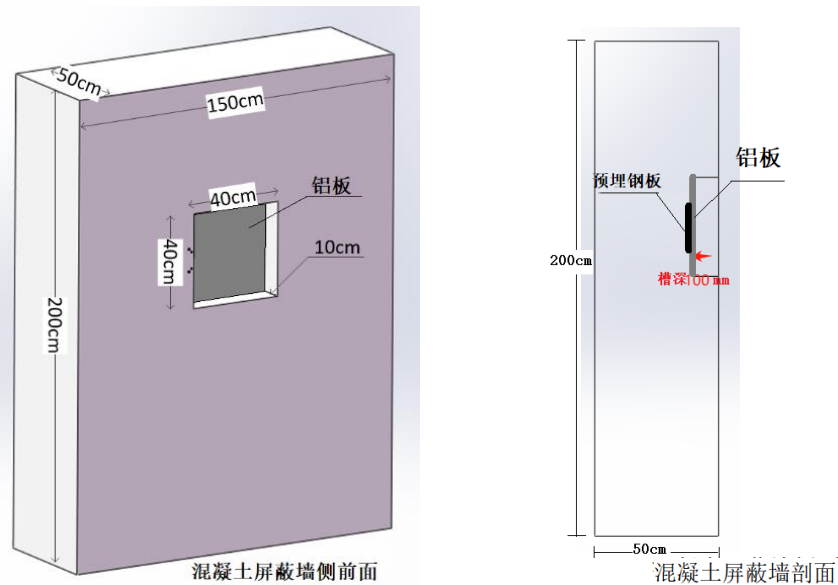


图 10-4 质子终端废束收集器示意图

## （2）屏蔽效果分析

普通混凝土成本低，是常用屏蔽材料，可用于质子束流停束体屏蔽。此外，高纯铝作为质子束流停束体材料，与混凝土搭配使用可提高对质子束流的屏蔽效果。

为掌握本项目屏蔽措施的屏蔽效果，采用粒子输运模拟程序 MCNP 进行屏蔽计算。MCNP 是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室开发的一款基于蒙特卡罗方法的通用粒子输运模拟程序，广泛应用于核工程、辐射防护、医学物理等领域。计算源强为能量 50MeV、最大流强  $10\ \mu\text{A}$  的质子源，质子通量  $6.25 \times 10^{13}\ \text{p/s}$ ，涉及的材料包括：C30 标号钢筋混凝土、密度  $2.7\text{g/cm}^3$  高纯铝板及空气。计算模型中包含空气环境，即考虑了空气对中子和  $\gamma$  射线的散射效应。

质子入射废束收集器，屏蔽体周围中子剂量率和  $\gamma$  辐射剂量率分布情况如下

图所示。

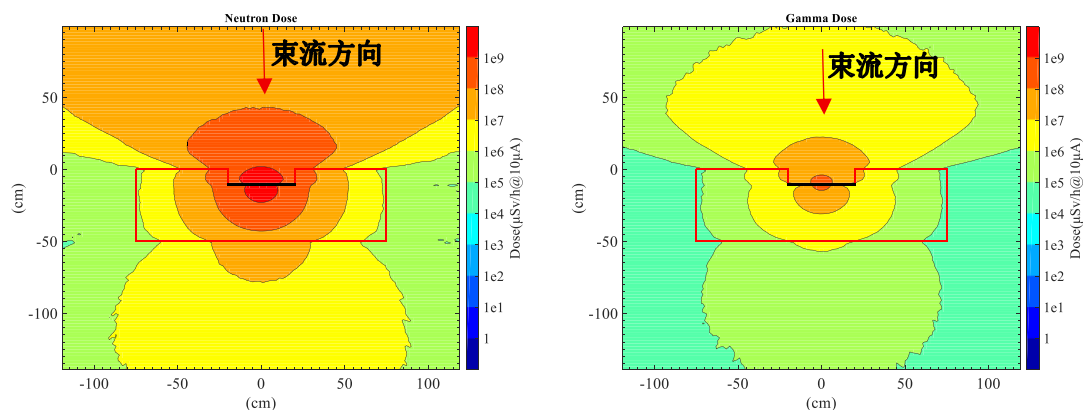


图 10-5 过质子束流中心的水平方向中子剂量率（左）和  $\gamma$  剂量率（右）分布图

由图 10-5 可知，质子入射废束收集器，废束收集器内剂量率最高，废质子束经收集后，屏蔽墙周围区域中子剂量率及  $\gamma$  辐射剂量率均有所下降，屏蔽措施设置合理。

## 2、白光中子实验终端屏蔽方案及屏蔽效果分析

### （1）屏蔽方案

中子束线屏蔽体包括白光中子束线屏蔽体和准单能中子屏蔽体，两个终端共用一座混凝土屏蔽体，屏蔽体总体结构见图 10-6。屏蔽体主要由中子靶、准直器、钢筋混凝土、含硼聚乙烯、铅等材料组成。

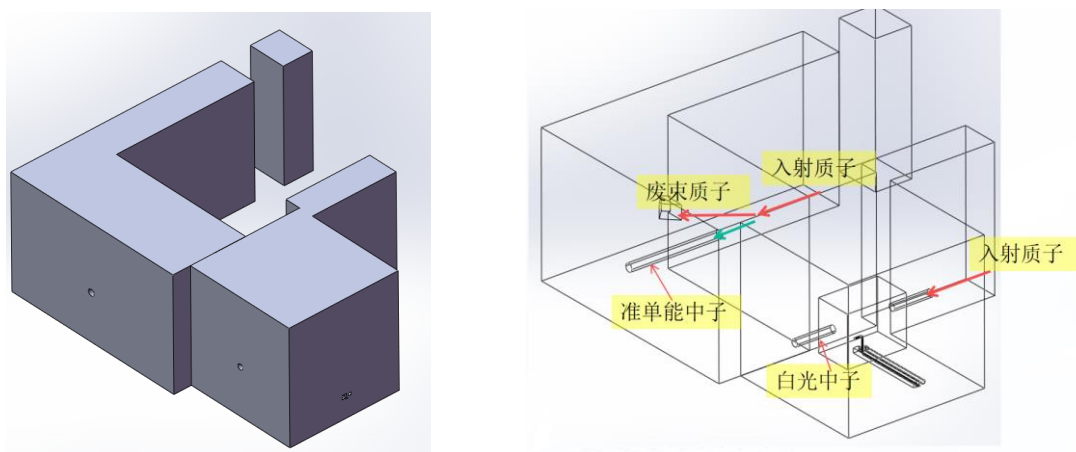


图 10-6 中子实验终端屏蔽体效果图及结构图

屏蔽体采用混凝土垒砌而成，采用 2cm 含硼聚乙烯板贴表面，然后再贴一层

1cm 铅板，最后喷漆进行表面装饰。混凝土屏蔽体主要用于屏蔽中子及  $\gamma$  辐射。图 10-7 是束流水平面的截面图，灰色部分是碳钢准直器。

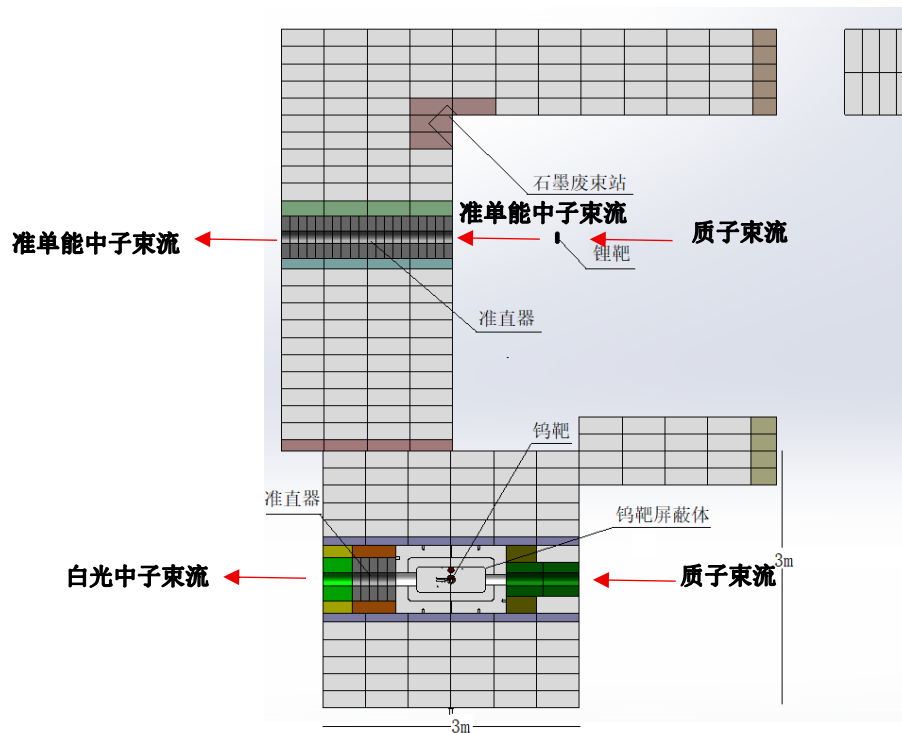


图 10-7 屏蔽体平面布局图

白光中子屏蔽体由混凝土和低碳钢屏蔽体组成，从内到外分别包含了钨靶、钢屏蔽体和混凝土屏蔽体。钨靶外部是低碳钢屏蔽体，低碳钢屏蔽体外形为长方体，由四块对称的半槽组成，图 10-8（左）是碳钢屏蔽体下半槽，顶部还有同样对称的半槽，图 10-8（中）是钨靶屏蔽体，图 10-8（右）是准直器结构图。

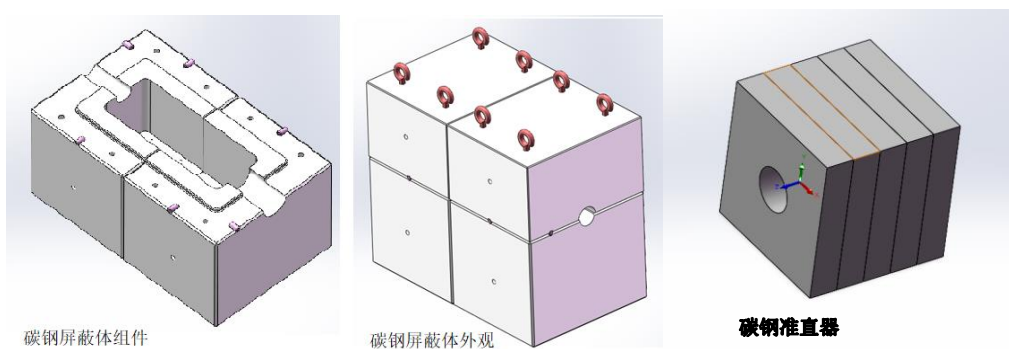


图 10-8 钢屏蔽体构件及拼装图

钨靶屏蔽体有质子束流入口和中子束流出口，通道直径 12cm，中子束流出口与白光中子准直器连接。准直器主要由碳钢组成，白光准直器长度为 0.5m。准直



器都采用 10cm 厚的 5 块碳钢打孔拼叠，中间带吊装孔，拼叠后用螺丝整体锁住，然后外部采用混凝土覆盖，确保没有缝隙。

## （2）屏蔽效果分析

白光中子实验终端屏蔽计算方法同质子实验终端，计算源强为能量 50MeV、最大流强  $10\ \mu\text{A}$  的质子源，入射钨靶经屏蔽防护措施后对周围的剂量率贡献值。

加速器向白光中子实验终端供束，屏蔽体周围中子剂量率和  $\gamma$  辐射剂量率分布情况如下图所示。

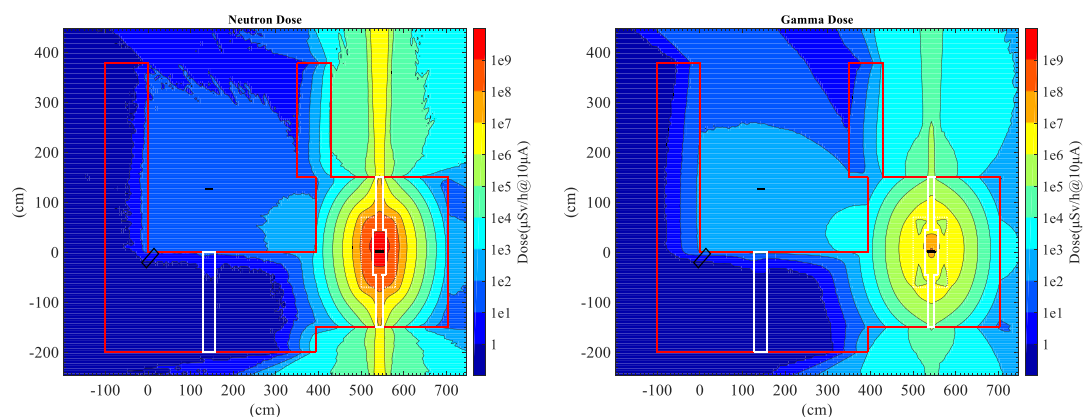


图 10-9 过质子束流中心的水平方向中子剂量率（左）和  $\gamma$  剂量率（右）分布图

上图可以看出，质子入射钨靶产生的中子剂量率高过靶体产生的  $\gamma$  剂量率约两个数量级，但在普通混凝土屏蔽体外主要是  $\gamma$  剂量，且  $\gamma$  剂量率高于中子的约一个数量级，屏蔽体外的  $\gamma$  剂量率来自于中子与屏蔽材料的相互作用。图 10-9 显示，屏蔽体外中子剂量率及  $\gamma$  辐射剂量率均有所下降，屏蔽措施设置合理。

## 3、准单能中子实验终端

准单能中子束流通过质子打锂靶产生中子，出射中子束流与入射的质子束流在同一条直线上，废质子束流通过偏转磁铁偏转  $45^\circ$  打到角落的石墨上。混凝土屏蔽体结构见图 10-7。准单能中子准直器是宽度为 50cm，内孔直径 15cm，长度 2m 的碳钢组成，准直器结构见图 10-10（左）。质子打锂靶后的废束通过偏转磁铁偏转  $45^\circ$ ，打到屏蔽墙角落的石墨废束站上，石墨废束站见图 10-10（中）、图 10-10（右）。

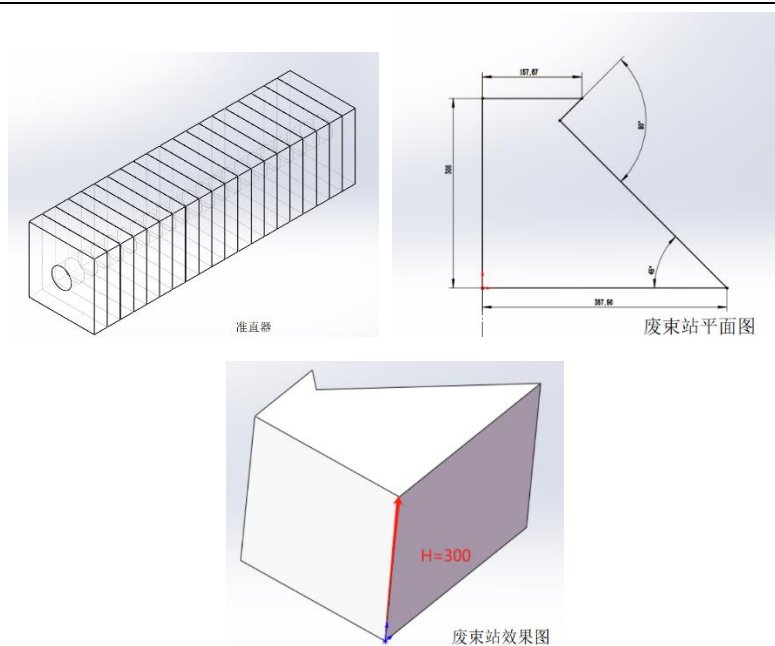


图 10-10 准单能中子屏蔽体组件

## (2) 屏蔽效果分析

准单能中子实验终端屏蔽计算方法同质子实验终端，计算源强为能量 50MeV、最大流强  $10 \mu A$  的质子源，入射锂靶、废束站经屏蔽防护措施后对周围的剂量率贡献值。

加速器向准单能中子实验终端供束，屏蔽体周围中子剂量率和  $\gamma$  辐射剂量率分布情况如下图所示。

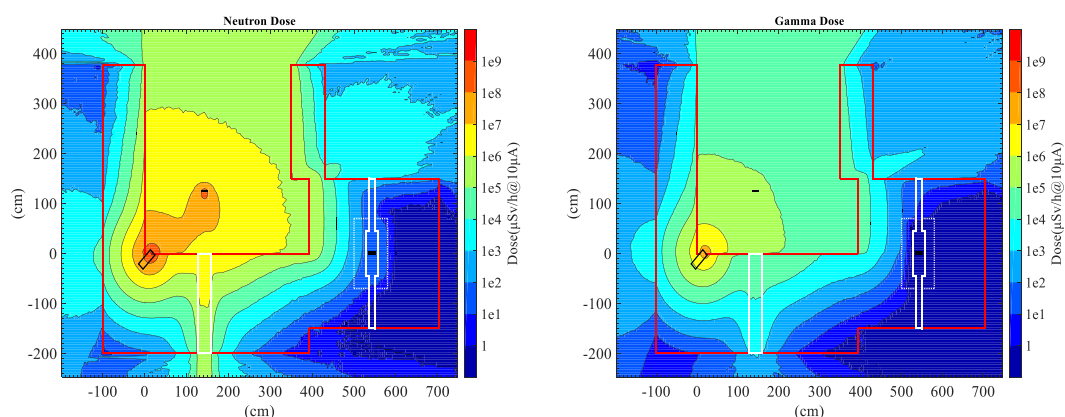


图 10-11 过质子束流中心的中子剂量（左）和  $\gamma$  剂量（右）分布图

上图可以看出，质子入射锂靶和石墨废束站产生的中子剂量率高过靶体产生

的 $\gamma$ 辐射剂量率近两个数量级，普通混凝土屏蔽体外也主要是中子剂量，且高过 $\gamma$ 剂量值约一个数量级，主要是由于普通混凝土屏蔽体内无可慢化和屏蔽快中子的钢屏蔽材料。图 10-11 显示，屏蔽体外中子剂量率及 $\gamma$ 辐射剂量率较屏蔽体内均有所下降，屏蔽措施设置合理。

## 10.2 辐射安全与防护措施

本项目沿用辐照实验大厅内现有安全联锁系统、清场系统及监测设备等辐射安全与防护措施，在此基础上，本次改造拟新增一个移动式铅屏风、增设 1 台固定式中子剂量率监测仪、1 台固定式 $\gamma$ 剂量率监测仪。

本项目辐射安全与防护措施设置情况如下：

### 10.2.1 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 10-12。



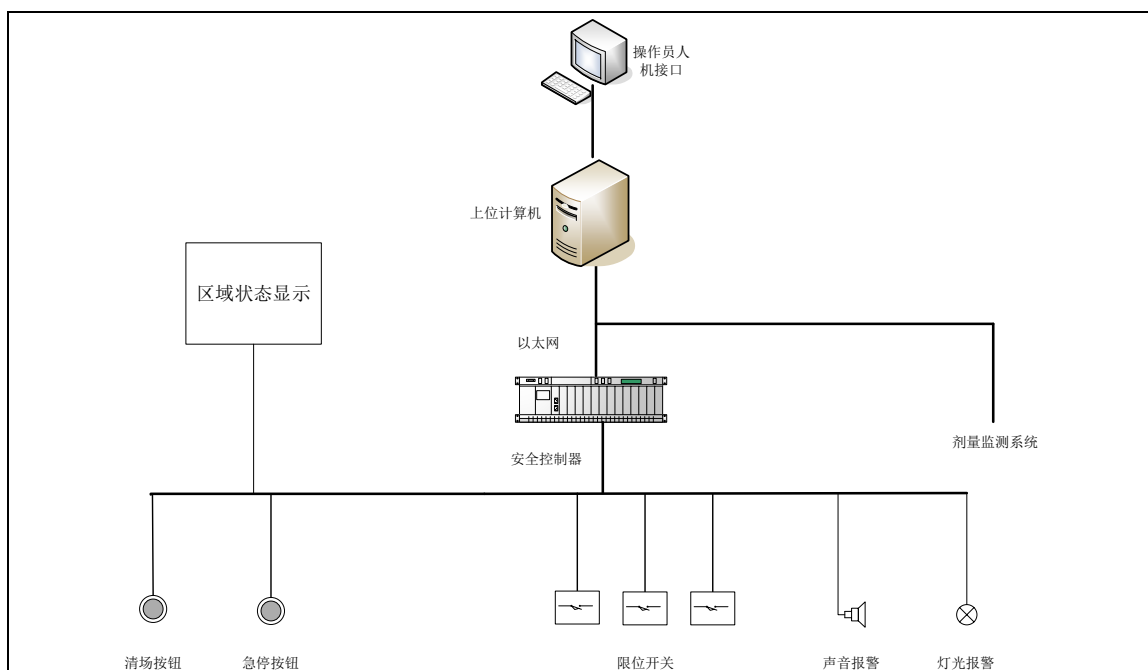


图 10-12 安全联锁系统组成示意图

## （2）系统组成

安全联锁系统主要包括以下几个部分：

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：加速器大厅防护门和加速器联锁，防护门设有限位开关，防挤压功能，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、辐照实验大厅设有声光报警装置，共设置了 2 套声光报警装置；机房防护门上方和控制机房设有三色状态指示灯。

④急停按钮：在加速器大厅四面墙体和回旋加速器地坑、辐照实验大厅四面墙体、迷道、控制台等装有醒目的急停按钮，共设置了 14 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，急停按钮位置见图 10-13。

⑤巡检清场按钮：在加速器大厅、辐照实验大厅设有巡检清场按钮，共设置

了 11 个巡检清场按钮，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 10-13 绿色路线），完成清场后，才能关闭防护门进行供束操作。

⑥剂量连锁：为掌握加速器运行时  $\gamma$  射线、中子的剂量率水平，了解加速器运行时经迷道散射和防护门屏蔽后剂量率变化情况。建设单位已设置 4 台固定式  $\gamma$  辐射剂量率监测仪、1 台固定式中子剂量率监测仪，在加速器大厅、辐照实验大厅、防护门外共设置了 8 个固定式  $\gamma$  剂量率仪监测点、2 个中子剂量率仪监测点，本项目增设 1 个固定式中子剂量率监测点、1 个固定式  $\gamma$  剂量率监测点，监测点布设在准单能中子实验终端南侧；当剂量率仪中剂量率超过  $2.5 \mu\text{Sv/h}$  时发出警报信号，并禁止从门外开启防护门。

⑦紧急开门按钮：在加速器大厅出口处内墙设有 1 个紧急开门按钮。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连锁系统自动切断束流。

⑧钥匙控制系统：加速器控制机房控制台设置有连锁钥匙，当钥匙拔出后，加速器不能供束。运行人员将该钥匙插入大厅防护门控制箱，才能进行开关门操作，防护门在打开状态下也不能供束。运行人员进行清场后，关闭防护门，将钥匙插回到控制台后，加速器才允许供束。

⑨设有视频监控系统，在加速器大厅、辐照实验大厅共安装 16 个摄像头，视频监控系统覆盖加速器大厅和辐照实验大厅全区域。

另外，在机房门口标有电离辐射警示标志，并有“当心电离辐射”警示语；。

安全连锁关键设备位置图及情况分别见图 10-13 和表 10-3。

**表 10-3 质子辐照装置场所连锁关键设备情况表**

关键设备名称	位置	总数	备注
门机连锁装置	加速器、防护门	1 套	现有
急停按钮	辐照实验大厅四周墙体、加速器大厅四周墙体、加速器大厅中回旋加速器地坑、迷道、控制台	14 个	现有
巡检清场按钮	辐照实验大厅四周墙体、加速器大厅四周墙体、迷道	11 个	现有
声光报警装置	加速器大厅、辐照实验大厅、	2 套	现有
三色状态指示灯	防护门、控制机房	2 个	现有

固定式 $\gamma$ 辐射剂量率监测仪	辐照实验大厅、加速器大厅、防护门外、迷道口、防护门外	4 台（8 个探头）	现有
	辐照实验大厅	1 台（1 个探头）	新增
固定式中子剂量率监测仪	加速器大厅、防护门外	1 台（2 个探头）	现有
	辐照实验大厅	1 台（1 个探头）	新增
钥匙控制系统	防护门边上	1 套	现有
紧急开门按钮	加速器大厅防护门内墙	1 个	现有
视频监控系统	辐照实验大厅四周墙体、加速器大厅四周墙体、加速器大厅中回旋加速器地坑、迷道	16 个	现有

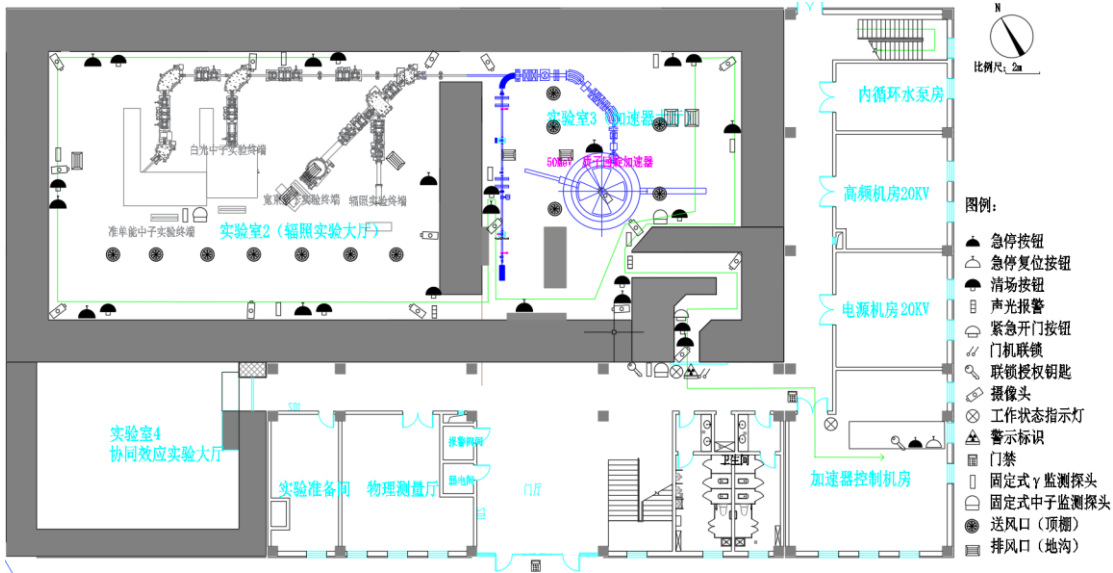


图 10-13 本项目工作场所安全联锁关键设备位置图（绿线为清场路径）

10.2.2 通风系统

拟建项目依托加速器大厅和辐照实验大厅现有通风换气系统，其通风系统采用顶棚送风、地下管道排风的方式进行通风换气。通风管道穿墙采用地下挖坑“U”型穿墙。加速器大厅和辐照实验大厅各设有 1 套排风系统、1 套送风系统和一套空调系统。

室内排风系统出风口设置情况如下：加速器大厅室内设有 4 个出风口，2 个出风口考虑回旋加速器运行时活化气体排放，因此布设在回旋加速器附近，另 2 个出风口布设考虑整个房间排风情况；辐照实验大厅设置 3 个出风口，2 个出风

口位于拟建质子实验终端 2 附近，另 1 个出风口位于准单能中子实验终端西侧。

室内排风系统送风口主要分布在加速器及实验终端上方，有利于房间内的空气循环流动。

加速器大厅和辐照实验大厅分别在屋顶设置 1 个活性炭纤维吸附式净化箱，活性炭过滤效率为 90%，当过滤装置上设置的压差显示器显示过滤器的阻力是初始阻力的 2 倍时更换过滤器。加速器大厅屋顶活性炭纤维吸附式净化箱尺寸为 1800mm×3230mm×2430mm，活性炭净重约为 150kg，辐照实验大厅屋顶活性炭纤维吸附式净化箱尺寸为 1800mm×2530mm×2130mm，活性炭净重约 100kg，加速器大厅排风管道经活性炭纤维吸附式净化箱的活性炭吸附处理后，经排风口外排，排风口高度 15.85m。

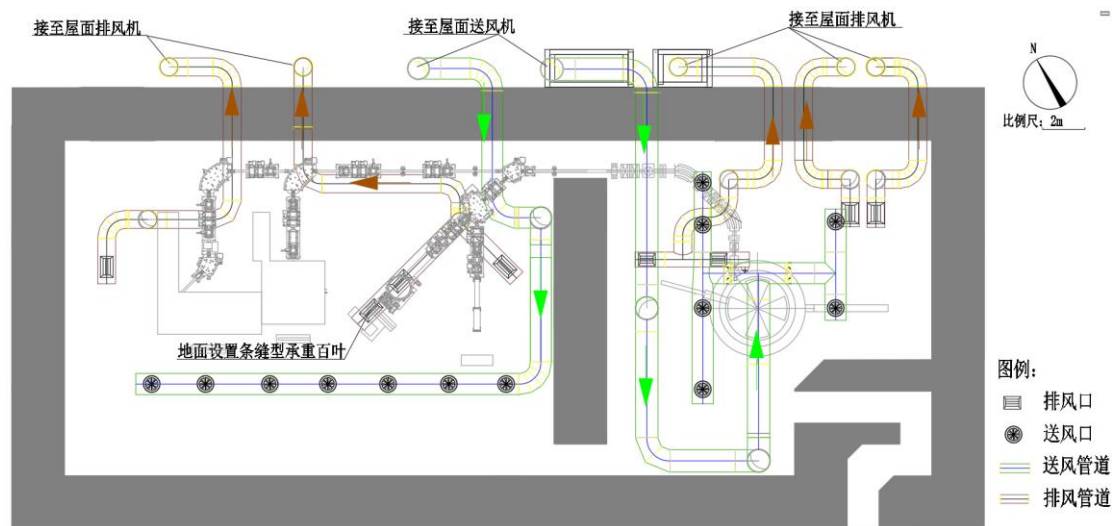


图 10-14 加速器大厅及辐照实验大厅通风系统平面布局图

### 10.3 三废的治理

由于本项目是在中能辐照装置原有辐射工作场所增设实验终端，其三废产生及处理情况与原项目基本一致，具体如下：

#### （1）放射性废气

本项目所在中能质子辐照装置加速器运行期间将产生感生放射性气体、臭氧及氮氧化物；产生的感生放射性核素主要为  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$ ，其半衰期分别

为 20.39min、9.96min、2.04min 和 1.83h 均为短半衰期核素，因此产生的感生放射性废气主要为  $^{41}\text{Ar}$ ，通过表 11.2.3 一节计算得出 Ar-41 年排放量为  $1.21\text{E}+11\text{Bq/a}$ ，其他非放气体排放速率和排放浓度满足表 7-2 中排放要求。

本项目依托现有排风系统，排放的废气经活性炭过滤后由高于本建筑最高处（加速器大厅高度为 14.85m）1m 的排放口排放。

### （2）放射性废水

本项目运行过程中造成设备冷却循环水活化。采用 FLUKA 程序模拟计算放射性废水结果可知，冷却水中活化产物主要为  $^3\text{H}$  和  $^7\text{Be}$ ，其活度分别为  $7.12\text{E}+09\text{Bq}$  和  $2.67\text{E}+07\text{Bq}$ 。

由于该装置冷却水正常情况下循环使用，不外排，不会对环境造成辐射影响。事故情况下导致冷却水泄露，将通过电缆沟设置的坡度自然流到集水坑，该集水坑位于辐照实验大厅北侧，容积为  $1.5\text{ m}^3$ 。中能质子辐照模拟装置循环冷却水系统首次加注循环水量约  $1\text{m}^3$ ，因此其冷却水总量为  $1\text{m}^3$ ，即使发生冷却水事故或者设备检修时需要排放冷却水，其集水坑的容积能满足循环冷却水全部排放的容积要求，不会导致放射性废水泄露对环境造成辐射影响。

### （3）放射性固体废物

本项目辐照样品为航天材料，辐照后由委托单位回收进行研究，因此本项目不涉及放射性固体废物。

## 10.4 辐射安全防护措施可行性分析

参考生态环境部（国家核安全局）《电子辐照加速器监督检查技术程序（2020 版）》（NNSA/HQ-08-JD-IP-022），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
A 出入口控制	入口电离辐射警告标志	√	在防护门设有电离警告标志
	入口加速器工作状态显示	√	防护门上方设有设备工作状态指示灯

	厅门连锁钥匙开关（辐照室、主机室）	√	防护门边设连锁钥匙开关
	视频监控系统	√	大厅内设有监控系统
	门内紧急开门按钮	√	防护门内设有紧急开门按钮
	紧急出口指示	√	大厅内设置紧急出口指示
	应急照明	√	大厅内设应急照明装置
B 安全连锁	控制台和加速器厅门同一把钥匙（或钥匙牢固串联）	√	控制台和加速器大厅门用同一把钥匙
	门与加速器高压触发连锁	√	设置门与加速器高压触发连锁
	加速器开机前声、光报警	√	大厅内设置声光报警装置
	辐照室、主机室内固定式辐射剂量监测仪，且与门连锁	√	大厅设置固定式 $\gamma$ 和中子剂量率仪，且与门连锁
	通风系统与加速器连锁	√	通风系统与加速器连锁
	火灾报警仪、且与通风连锁	--	不适用
	控制台上复位确认按钮	√	控制台上设置复位确认按钮
	清场巡更系统	√	大厅内设置巡检清场按钮
	传输系统与束流连锁	--	不适用
	人员通道 2~3 道防误入装置（光电、红外等）	--	不适用
	货物进出通道 2~3 道防误入装置	--	不适用
C 紧急停机装置	控制区内醒目位置设置紧急停机按钮（或拉线开关）、并附说明指示	√	大厅内设有紧急停机按钮、并附说明指示
	控制台紧急停机按钮	√	控制机房控制台设有紧急停机按钮
D 监测设备	控制区内固定式辐射剂量监测仪	√	加速器大厅、辐照实验大厅共设置固定式 $\gamma$ 剂量率仪 5 台（9 个探头）和中子剂量率仪 2 台（3 个探头）
	个人剂量报警仪	√	已配备 3 个
	个人剂量计	√	每人一个
	便携式辐射监测仪器仪表	√	已配备便携式 $\gamma$ 和中子剂量率仪
E 其他	必要应急物资等	√	已有铅衣、警戒带等应急物品

由上表对照情况可知，本项目的辐射安全防护设施与运行方案设计合理，满足生态环境部相关监督检查的要求。

**表 11 环境影响分析**

### **11.1 建设或安装过程的环境影响**

本次改造依托已有辐射工作场所，其依托的射线装置（质子回旋加速器）环评已取得原北京市环境保护局的批复，批文为京环审[2021]75 号。本项目施工期主要涉及安装工程，无土建工程，建设阶段对环境的影响及应采取的措施如下：

（1）固体废物：项目施工期间产生的固废主要有设备包装物以及少部分施工人员产生的生活垃圾。设备包装物可回收部分出售给废品回收公司综合利用，不可回收部分和生活垃圾一同交由环卫部门统一及时清运处理。

（2）废水：项目施工期间产生的废水主要为施工人员日常生活产生的生活污水，生活用水量为  $2\text{m}^3/\text{d}$ ，日排放量为  $1.6\text{m}^3/\text{d}$ ，生活污水依托 6 号楼内厕所，经化粪池预处理后，纳入市政污水管网。

空间中心在施工阶段采取上述污染防治措施，将施工期的影响控制在局部区域内，对周围环境影响较小。

### **11.2 正常运行过程对环境的影响**

本项目包含 4 条束流输运线与 4 个实验终端，其中新增实验终端 3 个，同室移位实验终端 1 个。终端分别为：现有质子实验终端 1，其质子最大能量为  $50\text{MeV}$ ，最大流强  $10\mu\text{A}$ ；质子实验终端 2，其质子最大能量为  $50\text{MeV}$ ，最大流强  $10\mu\text{A}$ ；白光中子实验终端，其中子最大能量为  $50\text{MeV}$ ；准单能中子实验终端，其中子最大能量为  $50\text{MeV}$ 。其中任何一个终端工作时，其他终端均不工作，因此本次环评分别估算辐照实验大厅内每个实验终端单独工作时对周围环境及人员的影响。

#### **11.2.1 预测模式**

##### **1、预测模式可靠性分析**

FLUKA（蒙卡粒子输运工具）是一款通用蒙特卡罗粒子输运模拟软件，适用于 Linux 及 UNIX 系统。其应用涵盖加速器屏蔽设计、探测器研发、宇宙射线研究、医学物理、剂量学及辐射防护等领域。该软件采用微观物理模型模拟多种粒子传输，支持光子、电子、中子、重离子及  $\mu$  介子等粒子类型，具备改进的组合几何（CG）算法处理复杂结构。

本次评价采用软件预测与实测结果对比分析的方法，来验证 FLUKA 软件预测的可行性。数据来自 2021 年已批复的《使用 II 类射线装置项目环境影响报告表》（批

复文号：京环审[2021]75 号），及 2023 年该项目辐射工作场所《检测报告》。该项目辐射工作场所为本次改造项目所在场所，依托加速器及工作参数一致，因此具有可比性。

(1) 计算条件

设备名称/型号：质子回旋加速器/ CYCIAE-50 型

工作场所：6 号楼加速器大厅（实验室 3）、辐照实验大厅（实验室 2）

束流参数：质子能量为 50MeV，流强为 10 μ A

束损环节：扩束系统、束流线、辐照终端

(2) 关注点及监测点布设

报告表中关注点位置图见图 11-1，共 13 个点，布设在屏蔽墙四周、屋顶及操作位。

报告表中关注点位置图见图 11-1。

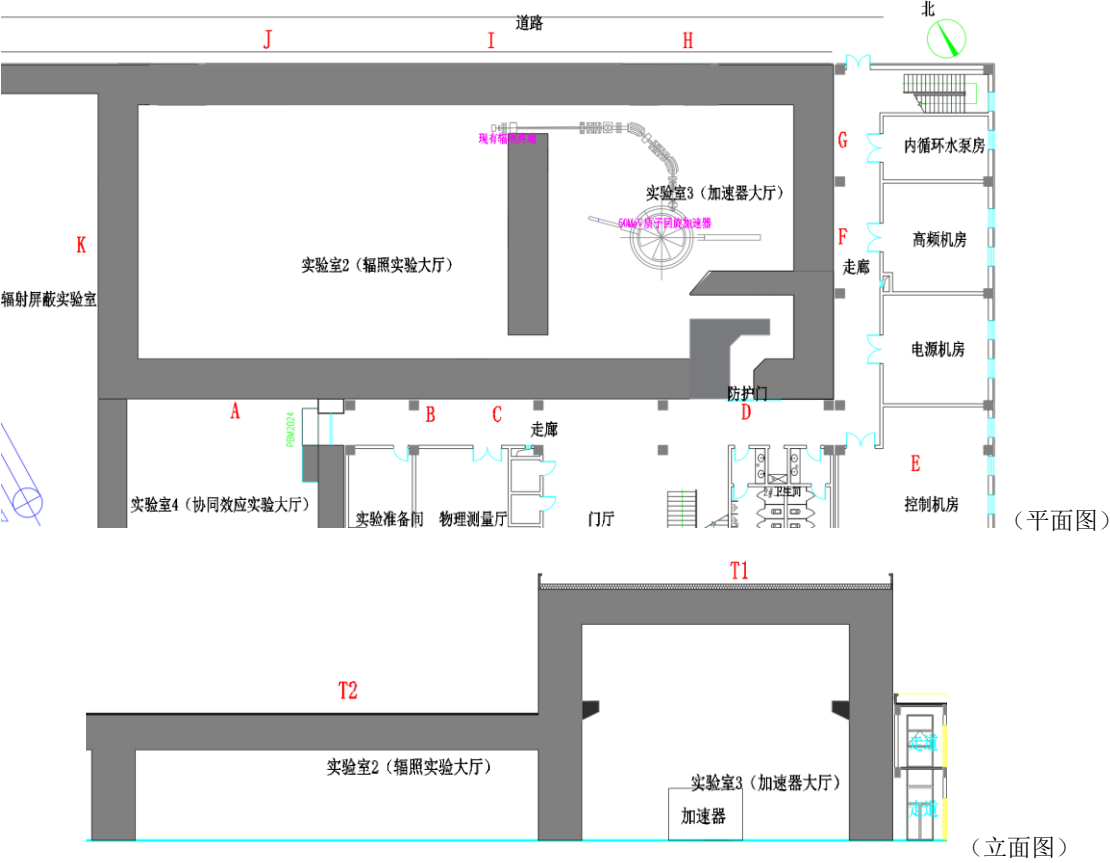


图 11-1 质子辐照装置所在场所四周关注点示意图

(3) 预测值与实测值对比分析

质子辐照装置关注点处剂量率预测值与实测值对比见表 11-1。



表 11-1 质子辐照装置关注点处剂量率预测值与实测值对比

关注点位置	距离	剂量率（包括中子和 $\gamma$ ），nSv/h	
		预测值*	实测值**
A（南墙外预留协同效应实验大厅）	距终端 20.7m	1.0	5.0
B（南墙外走廊）	距终端 18.1m	1.0	6.9
C（南墙外走廊）	距终端 16.9m	1.0	5.0
D（防护门外）	距加速器中心点 11.4m	301	106
E（加速器控制机房）	距加速器中心点 18.9m	1.0	12.0
F（加速器大厅东墙外）	距加速器中心点 11.1m	1.49	1.0
G（加速器大厅东墙外）	距加速器中心点 12.6m	2.80	-4.0
H（加速器大厅北墙外道路）	距加速器中心点 11m	6.07	17.0
I（辐照实验大厅终端北墙外道路）	距终端 4.5m	139	12.0
J（辐照实验大厅北墙外路）	距终端 11.3m	3.24	14.0
T1（加速器大厅顶部）	距加速器中心 13.5m	1.71	2.2
T2（辐照实验大厅顶部）	距终端 5.85m	18.0	-0.4~6.0
K（西墙外辐射屏蔽实验室）	距终端 25.3m	1.00	-2.0~4.0

注：\*表中预测值为原报告表中 FLUKA 软件的运算结果。

\*\*表中实测值=出束时监测值-未出束时监测值。根据前式得出的实测值为附加剂量率，不包括宇宙射线影响值及环境本底值。

由表 11-1 可以看出，预测值 $\geq 18.0\text{nSv/h}$ 的点位，预测值均大于实测值。预测值 $< 18.0\text{nSv/h}$ 的点位，预测值与实测值相当。个别点位如 A、B、C、E、H、J、T1 点实测贡献值略高于预测值，再如 G、T2、K 点实测贡献值为负数，原因是监测点处实际贡献值太小，出束和未出束工况下的监测值均为环境本底值，此时监测仪器受仪器灵敏度、宇宙射线及周围环境影响较大，两者差值不能体现实测值大小。因此选取预测值 $\geq 18.0\text{nSv/h}$ 的预测值与实测值进行对比可知，两值偏差不大，且预测值比实测值更加保守，预测结果可靠，FLUKA 软件适用于本次环评的预测分析。

## 2、预测模型及束损环节

### （1）预测模型

本次改建终端辐照材料为电子器件、电气材料等，成分主要为：铜、铝、环氧

树脂、玻璃、陶瓷等；束流管道材料主要为：铝、铁、铜等；靶件（或废束站）材料为钨靶、锂靶、铝、石墨。预测模型分别采用 FLUKA 模拟计算质子能量 50MeV、10 $\mu$ A 流强损失在主束损点和终端靶件（或废束站）时屏蔽体外剂量率（包括中子和  $\gamma$ ）。

FLUKA 程序屏蔽计算模型见图 11-2、图 11-3。

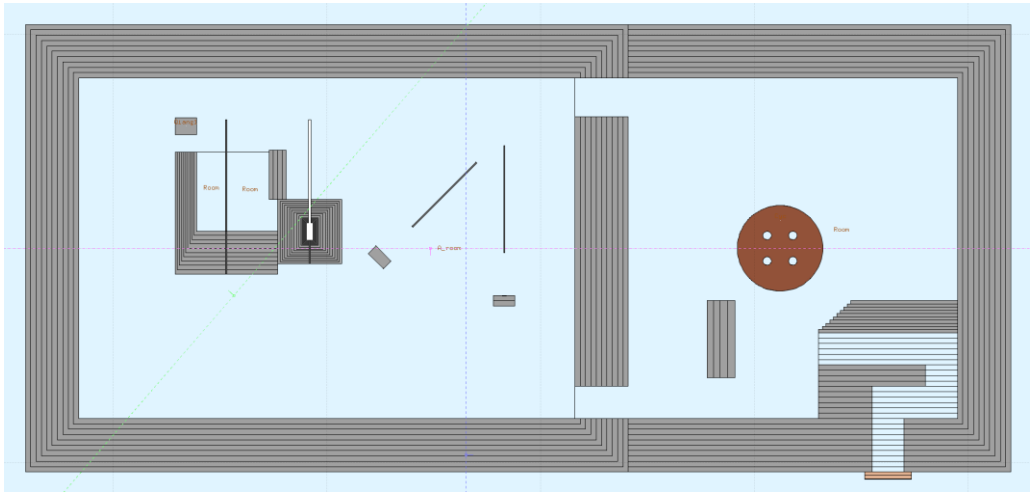


图 11-2 FLUKA 程序屏蔽计算模型平面图

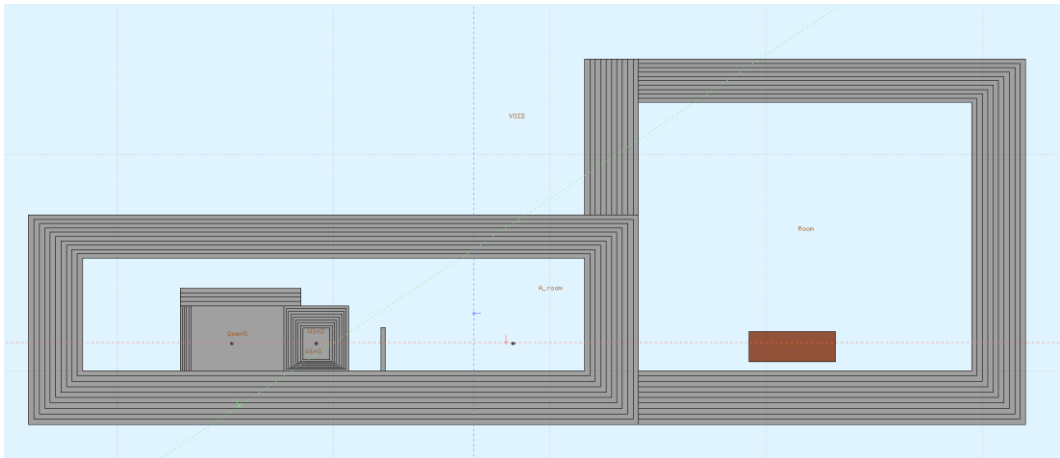


图 11-3 FLUKA 程序屏蔽计算模型立面图

（2）束流损失环节

预测模型主要束流损失环节见表 11-2。

表 11-2 拟预测模型主要束流损失环节

束流损失点		质子能量，MeV	材料	最大损失流强， $\mu$ A	损失方式
束流线	偏转磁铁	50	Fe	1	集中损失
质子实验终端 1 及其束流线		50	Al	10	集中损失
质子实验终端 2 及其束流线		50	Al	10	集中损失

白光中子实验终端及其束流线	终端	50	W	10	集中损失
准单能中子实验终端及其束流线	终端	50	Li	10	集中损失

(3) 关注点位分布

各实验终端工作时，屏蔽体外关注点分布见图 11-4～图 11-6。

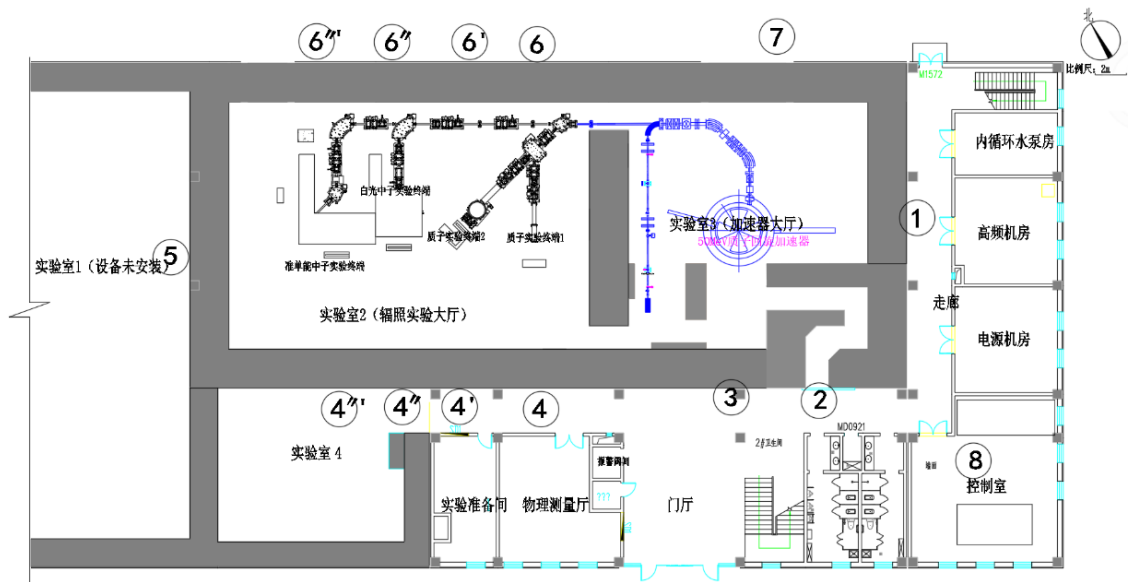


图 11-4 本项目一层关注点分布图

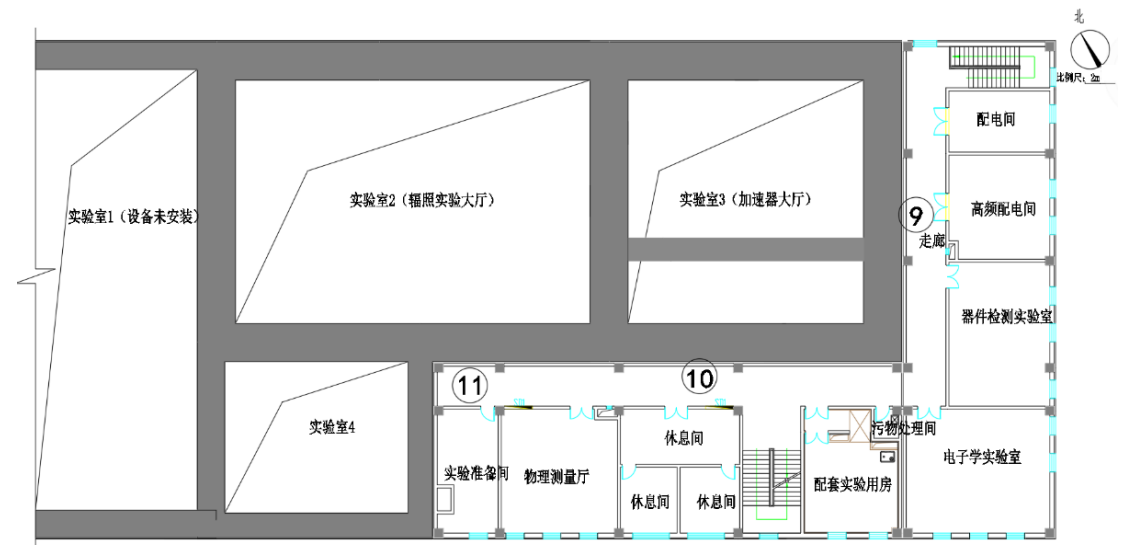


图 11-5 本项目二层关注点分布图

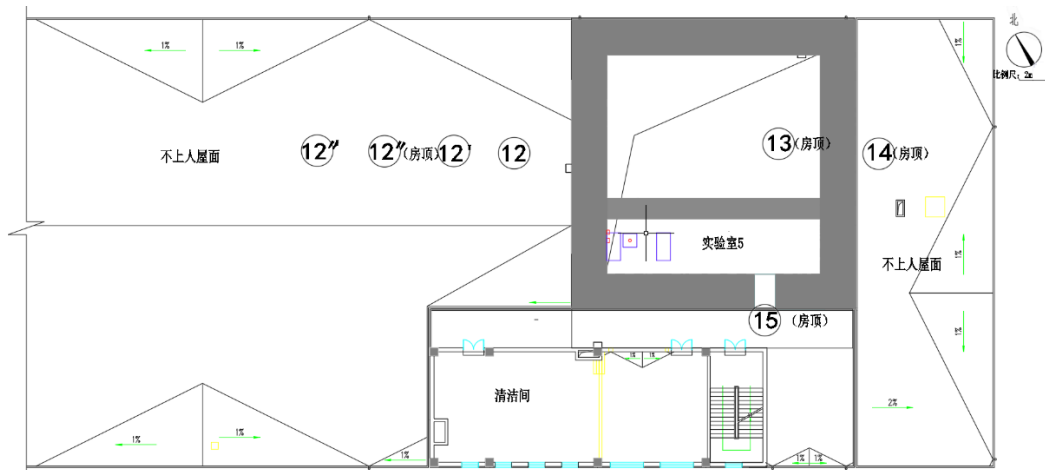


图 11-6 本项目二层房顶关注点分布图

## 11.2.2 屏蔽体外剂量率计算

### 11.2.2.1 本次改造终端运行时屏蔽体外剂量率水平

#### 1、质子实验终端 1

质子束终端 1 运行时，回旋加速器引出 50MeV 质子束后经束流传输线到达终端，束流传输中估计损失  $1\mu\text{A}$ 。在质子实验终端 1，保守采用 50MeV/ $10\mu\text{A}$  质子束流全部沉积在束流收集器进行运算，质子束流收集器材料为铝，质子束流垂直轰击在收集器内。在此过程中产生的辐射主要为中子射线和  $\gamma$  射线。采用 FLUKA 蒙特卡罗模拟程序进行质子束轰击铝板产生的瞬发辐射剂量率计算结果见图 11-7～图 11-9、表 11-3。

束流损失点	材料	损失束流	损失方式
加速器大厅束流线偏转磁铁	铁	50MeV、 $1\mu\text{A}$	集中损失
辐照实验大厅质子收集器	铝	50MeV、 $10\mu\text{A}$	集中损失

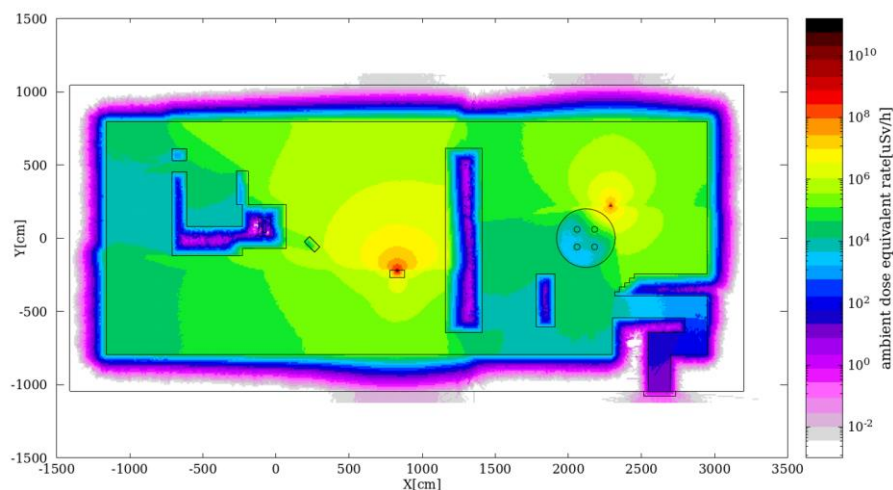


图 11-7 质子实验终端 1 运行时一层剂量率计算结果平面分布图

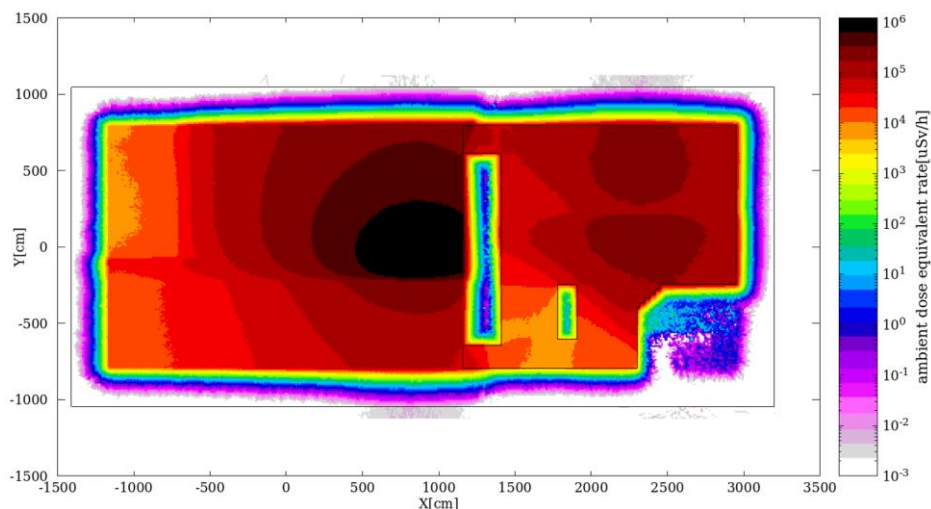


图 11-8 质子实验终端 1 运行时二层剂量率计算结果平面分布图

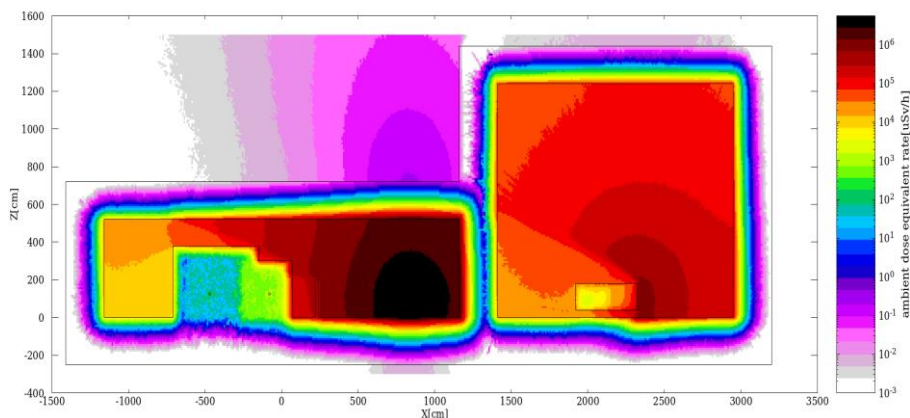


图 11-9 质子实验终端 1 运行时立面剂量率计算结果分布图

表 11-3 质子实验终端 1 实验时各屏蔽墙外剂量率情况

关注点	位置描述	剂量率（包括中子和 $\gamma$ ）， $\mu\text{Sv/h}$
1	一层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	3.94E-04
2	一层加速器大厅防护门外 30 cm 处	1.28E-01
3	一层加速器大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	9.92E-04
4	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	2.36E-02
5	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm 处（实验室 1 内）	1.63E-04
6	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm 处西（室外绿地）	3.76E-03
7	一层加速器大厅北墙外 30 cm 处（室外绿地）	1.46E-02
8	操作位（一层控制室）	1.39E-03
9	二层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	3.11E-04
10	二层加速器大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	3.20E-04

11	二层辐照实验大厅南墙外 30 cm处东（走廊）	3.89E-03
12	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm处（不上人屋面）	1.26E-01
13	加速器大厅房顶外 30 cm处（不上人屋面）	5.06E-03
14	三层加速器大厅东墙外 30 cm处（不上人屋面）	7.38E-05
15	三层微束实验大厅防护门外 30 cm处（走廊）	6.62E-05

注： 4、6、12 点为质子实验终端 1 与屏蔽墙垂直距离最近点位。

从上表中可以看出，质子实验终端 1 工作时屏蔽墙外 30cm 处剂量率最大位于一层防护门外 30cm 处，其值为 0.128 $\mu$ Sv/h，小于屏蔽体外剂量率控制值 2.5 $\mu$ Sv/h。

## 2、质子实验终端 2

质子束终端 2 运行时，回旋加速器引出 50MeV 质子束后经束流传输线到达终端，束流传输中估计损失 1  $\mu$  A。在质子实验终端 2，保守采用 50MeV/10  $\mu$  A 质子束流全部沉积在束流收集器进行运算，质子束流收集器材料为铝，质子束流垂直轰击在收集器内。在此过程中产生的辐射主要为中子射线和  $\gamma$  射线。采用 FLUKA 蒙特卡罗模拟程序进行质子束轰击铝板产生的瞬发辐射剂量率计算结果见图 11-10～图 11-12、表 11-4。

束流损失点	材料	损失束流	损失方式
加速器大厅束流线偏转磁铁	铁	50MeV、1 $\mu$ A	集中损失
辐照实验大厅质子收集器	铝	50MeV、10 $\mu$ A	集中损失

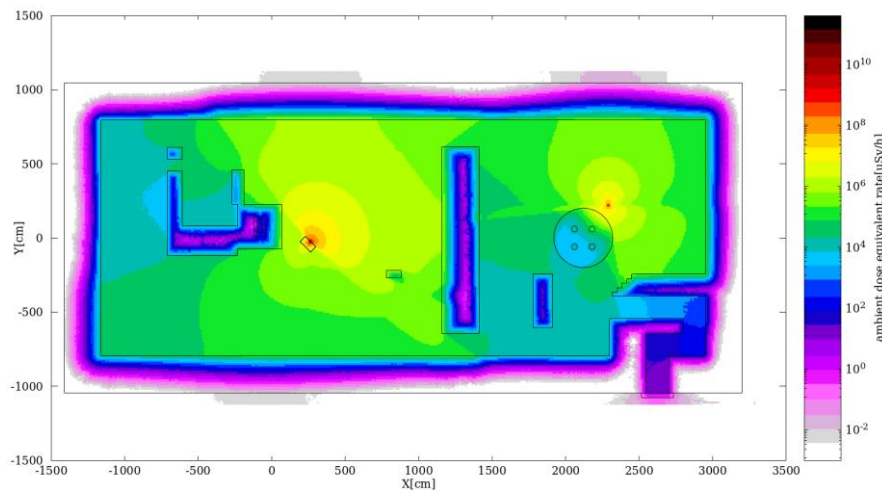


图 11-10 质子实验终端 2 运行时一层剂量率计算结果平面分布图

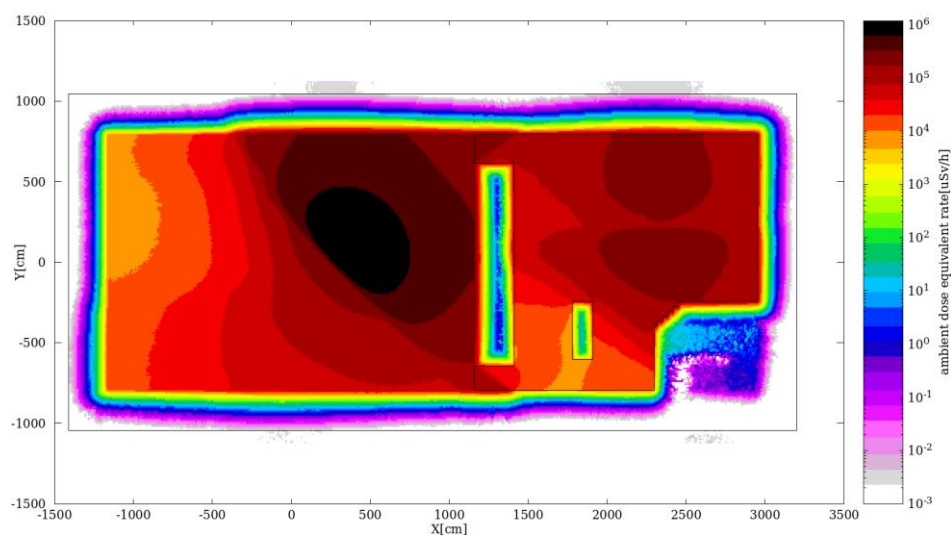


图 11-11 质子实验终端 2 运行时二层剂量率计算结果平面分布图

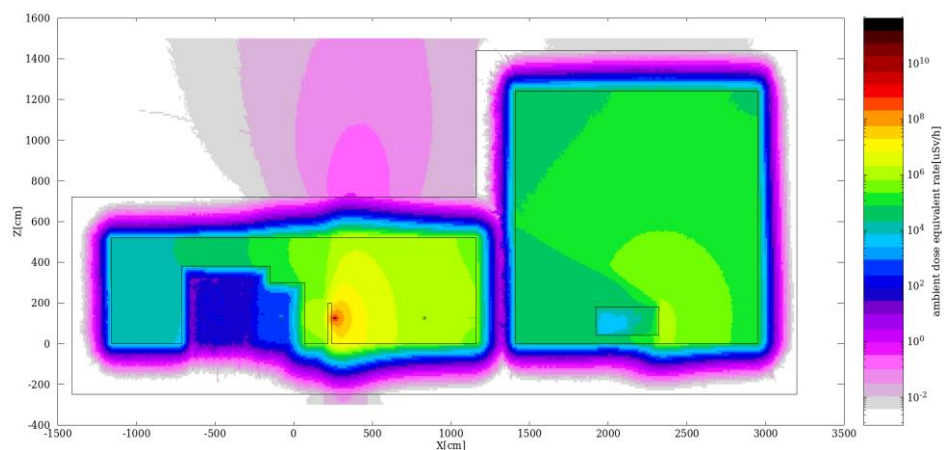


图 11-12 质子实验终端 2 运行时立面剂量率计算结果分布图

表 11-4 质子实验终端 2 实验时各屏蔽墙外剂量率情况

关注点	位置描述	剂量率（包括中子和 $\gamma$ ）， $\mu\text{Sv/h}$
1	一层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	4.93E-04
2	一层加速器大厅防护门外 30 cm 处	1.60E-01
3	一层加速器大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	1.71E-03
4	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	5.51E-03
5	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm 处（实验室 1 内）	1.71E-03
6	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm 处西（室外绿地）	5.38E-03
7	一层加速器大厅北墙外 30 cm 处（室外绿地）	1.48E-02
8	操作位（一层控制室）	5.29E-04
9	二层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	1.31E-04
10	二层加速器大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	3.71E-04
11	二层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处东（走廊）	1.87E-03



12	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm处（不上人屋面）	2.02E-01
13	加速器大厅房顶外 30 cm处（不上人屋面）	5.24E-03
14	三层加速器大厅东墙外 30 cm处（不上人屋面）	1.15E-04
15	三层微束实验大厅防护门外 30 cm处（走廊）	1.32E-04

注： 4、6、12 点为质子实验终端 2 与屏蔽墙垂直距离最近点位。

从上表中可以看出，质子实验终端 2 工作时屏蔽墙外 30cm 处剂量率最大为一层防护门外 30cm 处，其值为 0.215 $\mu$ Sv/h，小于屏蔽体外剂量率控制值 2.5 $\mu$ Sv/h。

### 3、白光中子实验终端工作时屏蔽体外剂量率水平

白光中子源终端运行时，回旋加速器引出 50MeV 质子束后经束流传输线到达终端，在束流传输中估计损失 1  $\mu$  A。在白光中子实验终端，50MeV/10  $\mu$  A 质子束流轰击钨靶反应产生白光中子进行实验，保守采用 50MeV/10  $\mu$  A 质子束流全部损失在钨靶内进行运算，在此过程中产生的辐射主要为中子射线和伽马射线。采用 FLUKA 蒙特卡罗模拟程序进行质子束轰击铝板产生的瞬发辐射剂量率计算结果见图 11-13～图 11-15、表 11-5。

束流损失点	材料	损失束流	损失方式
加速器大厅束流线偏转磁铁	铁	50MeV、1 $\mu$ A	集中损失
辐照实验大厅中子靶	钨	50MeV、10 $\mu$ A	集中损失

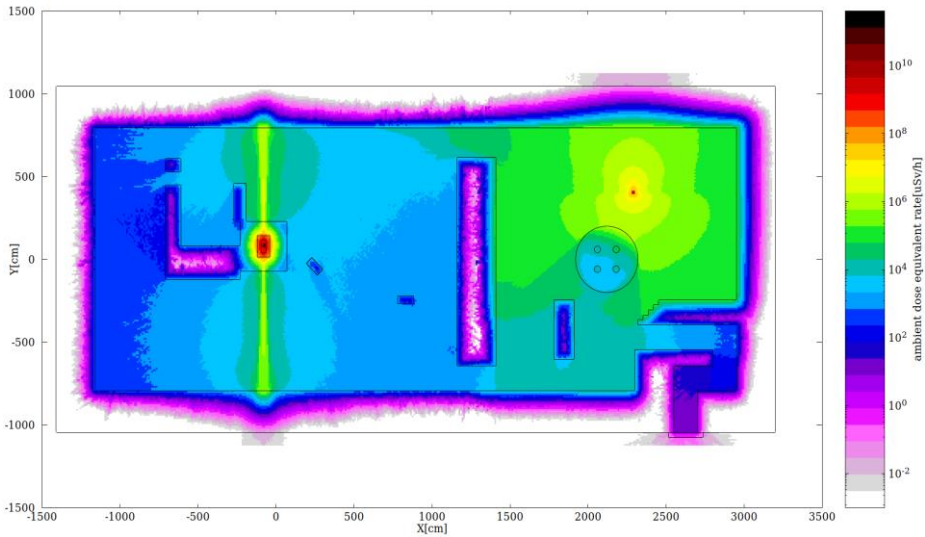


图 11-13 白光中子实验终端运行时一层剂量率计算结果平面分布图



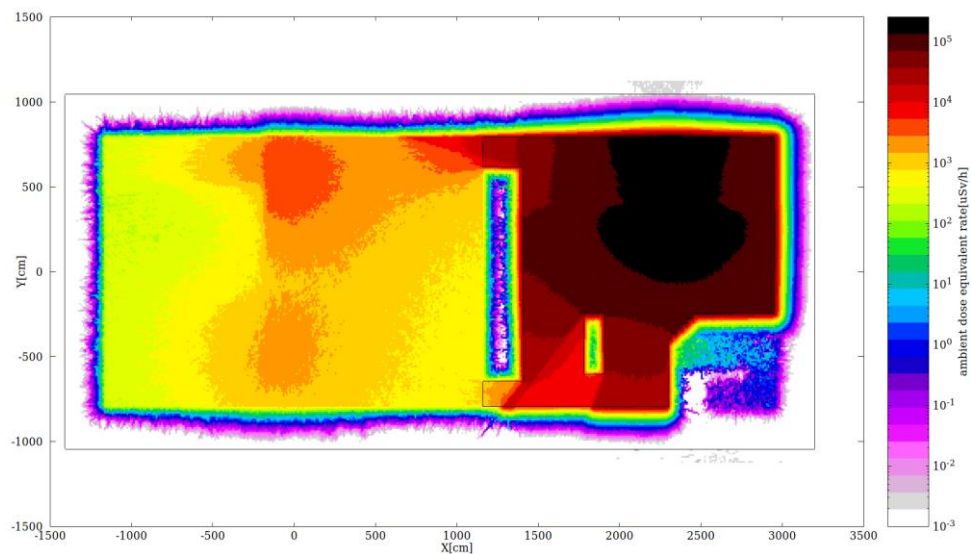


图 11-14 白光中子实验终端运行时二层剂量率计算结果平面分布图

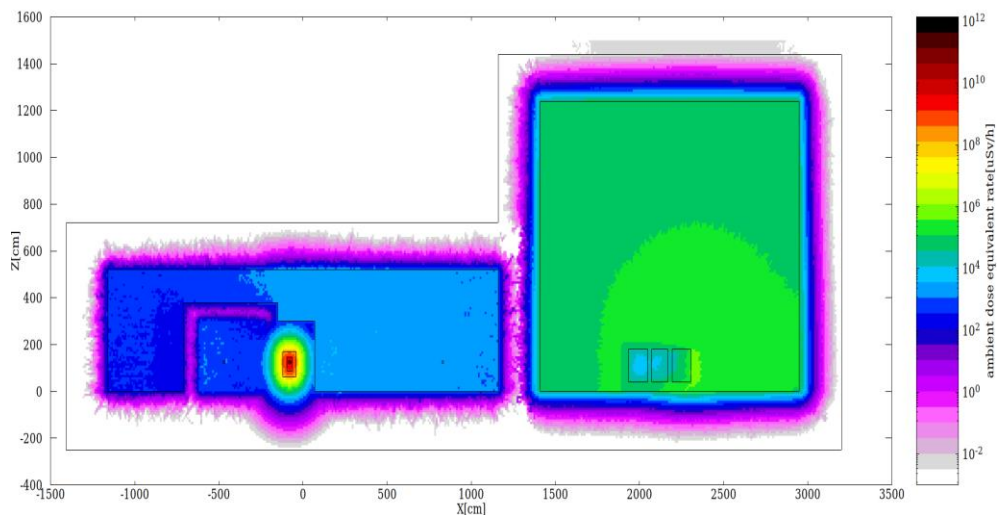


图 11-15 白光中子实验终端运行时立面剂量率计算结果分布图

表 11-5 白光中子实验终端运行时各屏蔽墙外剂量率情况

关注点	位置描述	剂量率（包括中子和 $\gamma$ ）， $\mu\text{Sv/h}$
1	一层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	5.94E-04
2	一层加速器大厅防护门外 30 cm 处	1.21E-01
3	一层加速器大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	6.82E-04
4	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	1.72E-02
5	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm 处（实验室 1 内）	1.13E-05
6	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm 处西（室外绿地）	5.87E-04
7	一层加速器大厅北墙外 30 cm 处（室外绿地）	2.66E-02
8	操作位（一层控制室）	1.23E-03
9	二层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	3.11E-04

10	二层加速器大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	7.04E-04
11	二层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处东（走廊）	2.59E-04
12	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm 处（不上人屋面）	2.86E-04
13	加速器大厅房顶外 30 cm 处（不上人屋面）	5.27E-03
14	三层加速器大厅东墙外 30 cm 处（不上人屋面）	6.35E-05
15	三层微束实验大厅防护门外 30 cm 处（走廊）	9.25E-06

注：（1） 4、6、12 点为白光中子实验终端与屏蔽墙垂直距离最近点位。

（2）\*表中剂量率为中子与  $\gamma$  辐射的总剂量率值。

从上表中可以看出，白光中子实验终端工作时屏蔽墙外 30cm 处剂量率最大为一层防护门外 30cm 处，其值为 0.159 $\mu$ Sv/h，小于屏蔽体外剂量率控制值 2.5 $\mu$ Sv/h。

#### 4、准单能中子实验终端工作时屏蔽体外剂量率水平

准单能中子源终端运行时，回旋加速器引出 50MeV 质子束后经束流传输线到达终端，在束流传输中估计损失 1  $\mu$  A。在准单能中子实验终端，50MeV/10  $\mu$  A 质子束流轰击锂靶反应产生准单能中子进行实验，废质子束通过偏转磁铁引入废束收集器内，废束收集器材料为石墨保守采用 50MeV/10  $\mu$  A 质子束流全部损失在石墨收集器内进行运算，在此过程中产生的辐射主要为中子射线和伽马射线。使用 FLUKA 蒙特卡罗模拟程序进行质子束轰击锂靶产生的瞬发辐射剂量率计算结果见表 11-6。

束流损失点	材料	损失束流	损失方式
加速器大厅束流线偏转磁铁	铁	50MeV、1 $\mu$ A	集中损失
辐照实验大厅废束收集器	石墨	50MeV、10 $\mu$ A	集中损失

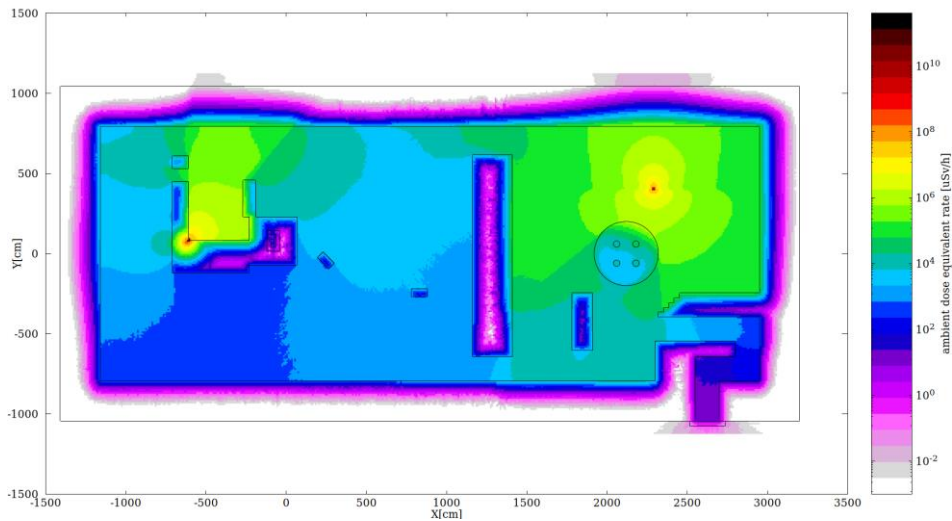


图 11-16 准单能中子实验终端运行时一层剂量率计算结果平面分布图

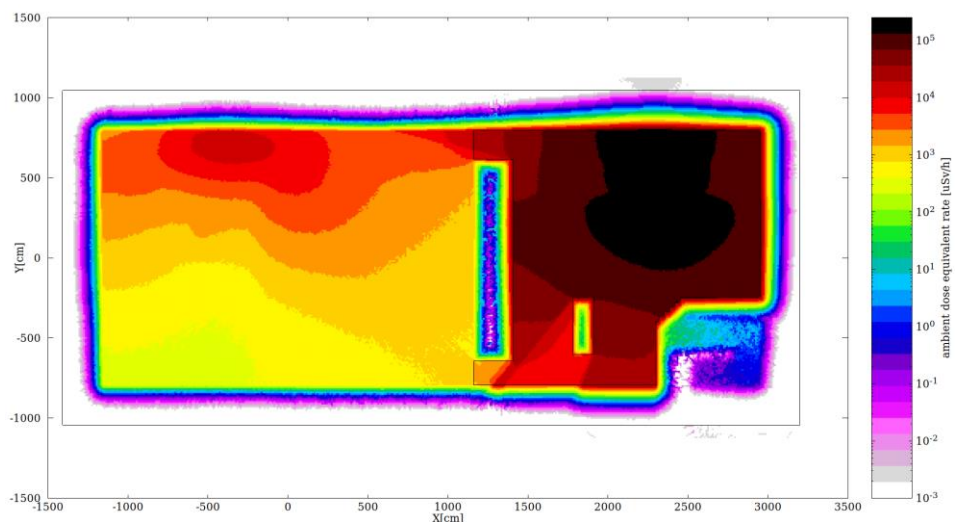


图 11-17 准单能中子实验终端运行时二层剂量率计算结果平面分布图

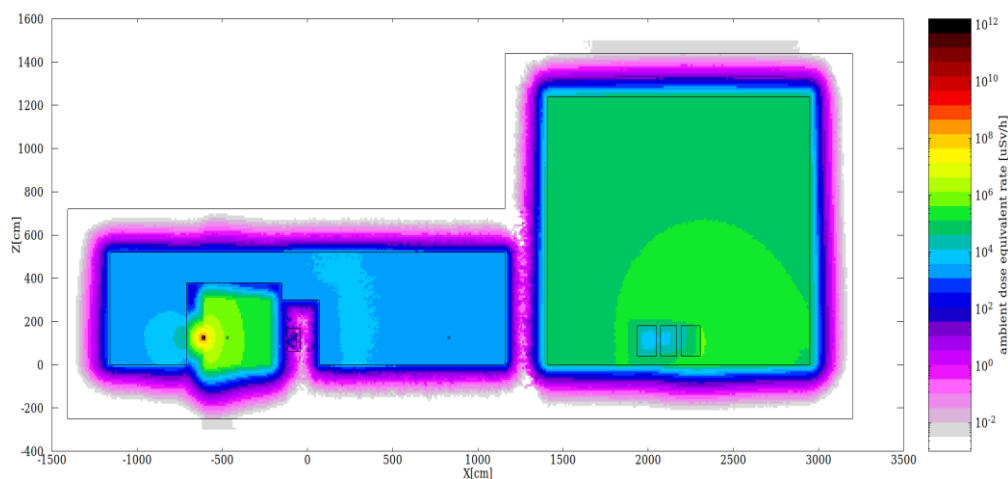


图 11-18 准单能中子实验终端运行时立面剂量率计算结果分布图

表 11-6 准单能中子实验终端实验时各屏蔽墙外剂量率情况

关注点	位置描述	剂量率（包括中子和 $\gamma$ ）， $\mu\text{Sv/h}$
1	一层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	5.65E-04
2	一层加速器大厅防护门外 30 cm 处	9.81E-02
3	一层加速器大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	7.79E-04
4	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处（走廊）	3.33E-06
5	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm 处（实验室 1 内）	1.38E-04
6	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm 处西（室外绿地）	3.92E-03
7	一层加速器大厅北墙外 30 cm 处（室外绿地）	2.50E-02
8	操作位（一层控制室）	7.31E-04
9	二层加速器大厅东墙外 30 cm 处（走廊）	3.42E-04

10	二层加速器大厅南墙外 30 cm处（走廊）	5.72E-04
11	二层辐照实验大厅南墙外 30 cm处东（走廊）	3.85E-04
12	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm处（不上人屋面）	1.33E-03
13	加速器大厅房顶外 30 cm处（不上人屋面）	6.10E-03
14	三层加速器大厅东墙外 30 cm处（不上人屋面）	1.51E-04
15	三层微束实验大厅防护门外 30 cm处（走廊）	3.24E-04

注：4、6、12 点为准单能中子实验终端与屏蔽墙垂直距离最近点位。

从上表中可以看出，准单能中子实验终端工作时屏蔽墙外 30cm 处剂量率最大为一层防护门外 30cm 处，其值为 0.098 $\mu$ Sv/h，小于屏蔽体外剂量率控制值 2.5 $\mu$ Sv/h。

## 5、屏蔽体外剂量率水平汇总

各终端工作时屏蔽体外剂量率水平见下表。

表 11-7 准单能中子实验终端实验时各屏蔽墙外剂量率情况

关注点	位置描述	剂量率（包括中子和 $\gamma$ ）， $\mu$ Sv/h			
		质子终端 1	质子终端 2	白光中子终端	准单能中子终端
1	一层加速器大厅东墙外 30 cm处（走廊）	3.94E-04	4.93E-04	5.94E-04	5.65E-04
2	一层加速器大厅防护门外 30 cm处	1.28E-01	1.60E-01	1.21E-01	9.81E-02
3	一层加速器大厅南墙外 30 cm处（走廊）	9.92E-04	1.71E-03	6.82E-04	7.79E-04
4	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm处（走廊）	2.36E-02	5.51E-03	1.72E-02	3.33E-06
5	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm处（实验室 1 内）	1.63E-04	1.71E-03	1.13E-05	1.38E-04
6	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm处西（室外绿地）	3.76E-03	5.38E-03	5.87E-04	3.92E-03
7	一层加速器大厅北墙外 30 cm处（室外绿地）	1.46E-02	1.48E-02	2.66E-02	2.50E-02
8	操作位（一层控制室）	1.39E-03	5.29E-04	1.23E-03	7.31E-04
9	二层加速器大厅东墙外 30 cm处（走廊）	3.11E-04	1.31E-04	3.11E-04	3.42E-04
10	二层加速器大厅南墙外 30 cm处（走廊）	3.20E-04	3.71E-04	7.04E-04	5.72E-04
11	二层辐照实验大厅南墙外 30 cm处东（走廊）	3.89E-03	1.87E-03	2.59E-04	3.85E-04
12	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm处（不上人屋面）	1.26E-01	2.02E-01	2.86E-04	1.33E-03
13	加速器大厅房顶外 30 cm处（不上	5.06E-03	5.24E-03	5.27E-03	6.10E-03

	人屋面)				
14	三层加速器大厅东墙外 30 cm 处 (不上人屋面)	7.38E-05	1.15E-04	6.35E-05	1.51E-04
15	三层微束实验大厅防护门外 30 cm 处(走廊)	6.62E-05	1.32E-04	9.25E-06	3.24E-04

从上表中可以看出,屏蔽墙外 30cm 处剂量率最大为质子实验终端 2 工作时一层防护门外 30cm 处,其值为 0.16 $\mu$ Sv/h,小于本项目剂量率控制水平 2.5 $\mu$ Sv/h。

#### 11.2.2.2 现有辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平

根据该辐射工作场所 2023 年《检测报告》可知,其现有质子实验终端最大工况(50MeV/10 $\mu$ A)运行时,屏蔽体外剂量率最大值为防护门外 30cm 处,其  $\gamma$  剂量率为 106nSv/h,中子剂量率未检出,小于剂量率控制水平 2.5 $\mu$ Sv/h。

#### 11.2.3 感生放射性废气

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)、( $\gamma$ , n)反应和散裂反应而产生放射性核素,产生  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$  等放射性核素,其半衰期分别为 20.39min、9.96min、2.04min 和 1.83h,由于  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  半衰期较短,因此,本项目其空气感生放射性核素中主要考虑  $^{41}\text{Ar}$ ,场所工作时间为 2200h。

$^{41}\text{Ar}$  的年排放量按公式 1 计算。

$$Q = \lambda R N \phi \sigma t \cdots \cdots \cdots \text{公式 1}$$

式中:

$Q$  为核素  $^{41}\text{Ar}$  年排放量, Bq/a;

$\lambda$  为核素  $^{41}\text{Ar}$  的衰变常数, 1.07E-04s<sup>-1</sup>;

$R$  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<sup>3</sup>, 由此可计算得出等效球半径为 979cm;

$\phi$  为中子发射率, 2.92E+12n/s;

$\sigma$  为  $^{40}\text{Ar}$  的活化截面, 610mb=6.10E-25cm<sup>2</sup>;

$t$  为加速器年出束时间 2200h, 即 7.92E+06s。

$N$  为单位体积空气中的  $^{40}\text{Ar}$  原子数, 按公式 2 计算。

$$N = \frac{\rho}{M} \times f \times \theta \times N_A \dots\dots\dots \text{公式 2}$$

式中：

$\rho$  为空气的密度，取  $1.21\text{E-}03\text{g/cm}^3$ ；

$M$  为靶核的原子质量，取  $40\text{g}$ ；

$f$  为母核在空气中的质量份额，取值  $4.60\text{E-}03$ ；

$\theta$  为母核的同位素丰度，取值  $99.6\%$ ；

$N_A$  为阿伏伽德罗常数， $6.023\text{E+}23$ 。

经计算可知， $^{40}\text{Ar}$  原子数  $N$  为  $8.35\text{E+}16$  个/ $\text{cm}^3$ 。

以上可计算得出， $^{41}\text{Ar}$  年排放量为  $1.23\text{E+}11\text{Bq/a}$ 。

#### 11.2.4 天空反散射

穿过屋顶屏蔽墙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。天空反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。

根据本项目工作场所监测结果结合本次新增终端运行过程中模拟计算可知，屋顶中子和  $\gamma$  剂量率最大值  $202\text{nSv/h}$ ，因此，可不考虑天空反散射的影响。

#### 11.2.5 工作人员受照剂量

本项目涉及辐射工作人员为中能质子加速器辐射工作人员，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，人员进入更换受照样品及对其进行相关测试受活化靶件的辐射影响。本项目设置通风系统，通风次数为  $6$  次/h，工作人员在加速器停机后  $2.5\text{h}$ ，且仪表显示室内剂量率低于  $1\mu\text{Sv/h}$  后方可进入辐照实验大厅，此时大厅内空气感生放射性核素的活度浓度较低，且工作人员在辐照实验大厅内仅进行辐照样品的更换工作，不进行实验及长时间停留，工作场所放射性气体对工作人员影响较小，本次环评不考虑活化空气对工作人员的浸没外照射和吸入内照射。

##### (1) 瞬时辐射照射

工作人员所受瞬时辐射照射剂量按公式 3 计算。

$$H=D \times t \cdots \cdots \cdots \text{公式 3}$$

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，工作人员位于控制室内，换靶及维修维护时主要受临近机房及自身装置关键靶件活化的辐射影响，剂量率水平保守取工作场所预测最大值 160nSv/h。工作人员受照剂量为计算结果见表 11-8。

**表 11-8 工作人员瞬时辐射受照剂量估算结果**

人员	剂量率水平， $\mu\text{Sv/h}$	临近机房剂量率贡献值， $\mu\text{Sv/h}$	受照时间，h	受照剂量，mSv/a
辐照终端操作人员	保守取工作场所关注点预测最大值	0.16	2200	0.352

## (2) 活化靶件的影响

本项目涉及场所主要的活化靶件是航天材料，根据建设单位提供，在停束 2.5 小时，且辐射工作场所内固定式  $\gamma$  辐射剂量率监测仪显示室内各监测点位的剂量率降至  $2.5\mu\text{Sv/h}$  以下时，工作人员手持便携式  $\gamma$  剂量率监测仪进入实验大厅，将铅屏风推至实验终端活化程度较严重部位进行遮挡，测试辐照终端靶件表面剂量率降至  $2.5\mu\text{Sv/h}$  以下时，才近距离对辐照后的靶件进行拆除，并进行相关测试，每年照射靶件约 400 个，每个靶件拆解时间为 10min，测试时间为 2h。则受靶件活化影响工作人员受照剂量情况见表 11-9。

**表 11-9 工作人员受靶件活化受照剂量估算结果**

人员	工作区域	剂量率水平， $\mu\text{Sv/h}$	受照时间，h	受照剂量，mSv/a
辐照终端操作人员	辐照实验大厅	2.5	67	0.168
	相应性能测试房间	2.5	800	2.00
合计	/			2.168

## (3) 本项目工作人员受照剂量小结

本项目辐射工作人员受照剂量见表 11-10。

表 11-10 工作人员受照剂量

工作人员	瞬时辐射照射剂量， mSv/a	活化靶件照射剂 量， mSv/a	受照剂量， mSv/a
辐照终端	0.352	2.168	2.52

根据本项目人员配备情况可知，本项目操作人员共配备 13 人，分成 3 班进行辐照工作，每班 3 人，4 人机动，则工作人员受照剂量最大约为 0.84mSv/a。辐照终端实验更换靶件及相关性能测试实行 1 人/次轮流操作，且不参与本项目微束终端运行工作，以上结果偏保守。参考 2024 年度个人剂量监测报告可知，其工作人员 2024 年度受照剂量最大为 0.164mSv/a，均低于设备检出限，小于工作人员剂量约束值 2mSv/a。

#### 11.2.6 公众受照剂量

本项目所在建筑大门口设有门禁系统，正常情况下只有本项目涉及的辐射工作人员才能进入，非本项目辐射工作人员无法进入，因此，本项目正常运行时造成辐射影响的公众主要包括：（1）为从周边道路经过的公众；（2）北侧在 2 号楼 C 和 1 号楼工作的人员。本项目从周边道路经过的公众其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，在其北侧 2 号楼 C 号楼和 1 号楼内工作的人员受距离和建筑物自身屏蔽的影响，其人员受加速器运行期间开机出束产生的瞬时辐射影响可忽略，主要考虑受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

本项目保守按照白光中子实验终端运行时在 6 号楼北墙外 30 cm 处（加速器大厅）的贡献值  $2.66\text{E-}02\mu\text{Sv/h}$  对从周边经过的公众进行受照剂量计算，公众受照时间保守取加速器计算公式如下：

$$H = D \times t \times T \dots\dots\dots \text{公式 4}$$

式中：



$H$  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, 2200h/a;

$T$  为居留因子, 取 1/4。

由公式 4 得到公众受照年有效剂量最大为 1.46E-02mSv/a。

## (2) 放射性气体排放造成的辐射影响

本项目放射性气体造成的辐照影响主要为从周围道路经过的公众和北侧 2 号楼 C 和 1 号楼工作的人员。据公式 1、公式 2 计算结果, 本项目运行期间 Ar-41 年排放总量为 1.23E+11Bq/a, 其照射途径主要考虑空气浸没外照射。

本项目排风口高度 15.85m, 临近最高建筑物高度  $H_b$  为 22.8m, 最靠近关注点的建筑物的最大截面积  $A_b$  为 824 m<sup>2</sup>, 根据《放射性物质排放的环境影响评估》IAEA NO.19 号报告,  $H \leq 2.5H_b$  (临近最高建筑物高度), 且  $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$  时, 地面空气浓度计算见公式 5。

$$C_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \dots\dots\dots \text{公式 5}$$

式中:

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

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

$Q_i$  为放射性核素  $i$  的年均排放率, Bq/a;

$\mu A$  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计算见公式 6。

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \dots\dots\dots \text{公式 6}$$

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;

$G_A$  为 Ar-41 空气浸没外照射剂量转换因子, 为  $6.13E-14(Sv/s)/(Bq/m^3)$ ;

计算得出北侧建筑内公众  $H_A$  为  $4.05E-02mSv/a$ ; 从周围道路经过的公众为  $1.45E-02mSv/a$ 。

### (3) 公众受照剂量

根据计算结果可知, 从周围道路经过的公众受照剂量为  $2.91E-02mSv/a$ , 北侧 2 号楼 C 和 1 号楼建筑内工作人员受照剂量为  $4.05E-02mSv/a$ , 均低于公众剂量约束值  $0.1mSv/a$ 。

#### 11.2.7 非放射性气体影响分析

空气中的  $O_2$  在光子的作用下, 发生辐射分解, 生成氧原子, 与空气中的  $O_2$  和  $NO$  结合, 生成  $O_3$  和  $NO_2$ , 他们是与辐射相关的非辐射危害因素。 $O_3$  的主要毒性是氧化作用, 对粘膜有很强的刺激作用, 中毒症状为肺功能下降, 呼吸道感染、鼻炎等。根据 NCRP NO.144 报告, 场所内的  $O_3$  和  $NO_2$  饱和浓度用公式 7 计算。

$$C = N \frac{M}{N_A} \dots \dots \dots \text{公式 7}$$

式中:

$C$  为场所内  $O_3$  和  $NO_2$  饱和浓度,  $g/m^3$ ;

$M$  为气体的摩尔质量,  $g/mol$ ,  $M(O_3)=48 g/mol$ ,  $M(NO_2)=46g/mol$ ;

$N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $6.022 \times 10^{23} mol^{-1}$ ;

$N$  为房间内单位体积的气体分子个数, 个/ $m^3$ , 按公式 8 计算。

$$N = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + R} \dots \dots \dots \text{公式 8}$$

式中:

$g$  为空气中单位光子能量沉积形成的气体分子数,  $\text{eV}^{-1}$ , 根据 NCRP NO.144 报告,  $\text{O}_3$  取值  $0.103\text{eV}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2$  取值  $0.048\text{eV}^{-1}$ ;

$I$  为空气中单位体积单位时间的光子能量沉积,  $\text{eV}/\text{m}^3\cdot\text{s}$ , 根据 FULUKA 模拟运算取值  $1.69\times 10^{15} \text{eV}/\text{m}^3\cdot\text{s}$ 。

$\alpha$  为气体分子的化学分解速率,  $\text{s}^{-1}$ , 根据 NCRP NO.144 报告, 取值  $2.3\times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ;

$\kappa$  为单位光子能量沉积形成的分子数目,  $\text{eV}^{-1}\cdot\text{m}^3$ , 根据文献《Advanced Photon Source: Radiological Design Considerations》(APS-LS-141 Revised, H.J.MoE, July 1991),  $\kappa(\text{O}_3)$ 取值  $5.0\times 10^{-24} \text{eV}^{-1}\cdot\text{m}^3$ ,  $\kappa(\text{NO}_2)$ 取值  $1.4\times 10^{-22} \text{eV}^{-1}\cdot\text{m}^3$ ;

$R$  为房间换气次数, 本项目为  $4.14\times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ;

质子辐照装置所在场所  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_2$  饱和浓度和排放速率计算结果见表 11-11。

表 11-11 工作场所内  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_2$  饱和浓度和排放速率计算结果

污染因子	饱和浓度, $\text{mg}/\text{m}^3$	排放速率, $\text{kg}/\text{h}$	标准限值		
			室内浓度限值, $\text{mg}/\text{m}^3$	最高允许排放浓度, $\text{mg}/\text{m}^3$	最高允许排放速率, $\text{kg}/\text{h}$
$\text{O}_3$	2.15E-02	5.30E-05	0.3	——	——
$\text{NO}_2$	9.62E-03	2.37E-05	5	100 ( $\text{NO}_x$ )	0.215 ( $\text{NO}_x$ )

由上表可知, 本项目涉及场所  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_2$  饱和浓度低于工作场所  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_x$  的最大容许浓度限值,  $\text{NO}_x$  排放速率和排放浓度低于其排放限值。

## 11.3 事故影响分析

### 11.3.1 事故分析

#### (1) 事故风险类型

本项目质子加速器按照II类射线装置进行管理。其主要事故风险为: ①工作人员误留加速器大厅或辐照实验大厅导致的误照射。②加速器机房的门机联锁失效、门禁失效, 无关人员误入加速器机房或实验大厅发生误照射。③设备故障使引流系统工作电流降低, 导致 4 个辐照终端同时出束。

## (2) 误照事故剂量估算

事故情景一：假设射线装置检修过程中，设备故障，工作人员误留辐照实验大厅内，发现加速器运行后立即按下急停按钮。

根据模拟计算结果，装置运行时，质子实验终端剂量率水平最高，约 10000Sv/h，该区域往往人员不可达，人员可达处剂量率最高约为 100Sv/h。保守取 1min 为工作人员在该事故发生期间的受照时间，由此可计算得工作人员误留辐照实验大厅时的受照剂量约为 1.67Sv。

事故情景二：射线装置所在场所的门机联锁、门禁同时失效，无关人员误入加速器机房或实验大厅，发现设备运行后即刻返回。

无关人员受照剂量主要考虑离防护门较近区域剂量率水平，通过模拟计算结果，可以估算出进入防护门后到达加速器所在区域或实验终端剂量率约为 10mSv/h，假设人员闯入后从进入到大厅发现误入，至返回到防护门外时间为 1min，则人员受照剂量约为 0.167mSv。

## (3) 冷却水泄露事故

本项目涉及加速器冷却水循环使用，正常情况不外排，当管道泄露或维修维护时发生冷却水泄露，其泄露的冷却水通过电缆沟设置的坡度自然流到事故废水收集的集水坑中，循环系统冷却水总量为 1m<sup>3</sup>，加速器所在实验室事故废水收集的集水坑容积为 1.5m<sup>3</sup>，能满足事故情况下冷却水全部泄漏量的收集，因此，正常情况下不会造成冷却水泄露对外环境的影响。

### 11.3.2 辐射事故应急措施

#### (1) 人员误留事故应急措施

加速器大厅、辐照实验大厅四面墙体共设置了 14 个急停按钮，一旦人员误留在大厅内，误留人员可选择最近的急停按钮按下，加速器立即停止出束，从而减少人员照射剂量。加速器防护门内设有紧急开门按钮，误留人员可通过紧急开门按钮打开防护门离开。另外，加速器所在场所设有视频监控系统，控制台设有急停按钮，加速器操作人员通过视频监控发现人员误留，也可按下控制台急停按钮使得加速器

停止出束，减少误留人员照射剂量。

## （2）无关人员误入事故措施

由外环境进入本项目所在建筑的门设有门禁系统，只有授权的本项目辐射工作人员才能进入该建筑，其他人员无法进入本项目所在建筑。另外，本项目加速器安全联锁系统中设有门机联锁，防护门一旦打开加速器立即停止出束，即使发生人员闯入由于加速器已停机对误闯人员辐射影响很小；另外中能质子加速器及其终端所在场所设有无死角的视频监控系统，控制台工作人员通过视频监控系统发现人员误闯时可通过按下控制台的急停按钮使得加速器停止出束，减少因门禁系统和门机联锁系统失效情况下人员闯入造成的辐射影响。

此外，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。一旦发生辐射事故，会立即启动应急预案，将事故危害降低到最小程度。

### 11.3.3 风险防范措施

本项目采取以下措施降低工作人员误留或无关人员误闯加速器机房的发生概率：

①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，加速器才能运行、出束。

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

③在加速器工作之前，工作人员通过巡检清场确认没有其他无关人员在场所内滞留，然后方可关闭防护门。

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加速器所在场所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。

⑥从外环境进入本项目所在建筑的门设有门禁系统，只有授权的本项目辐射工作人员才能进入该建筑，其他人员无法进入本项目所在建筑。

**表 12 辐射安全管理**

<p><b>12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置</b></p> <p><b>12.1.1 辐射安全管理机构</b></p> <p>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 1-3。现有的辐射安全管理机构能满足本项目的需求。</p> <p>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：</p> <p>（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；</p> <p>（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；</p> <p>（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。</p> <p><b>12.1.2 辐射工作人员</b></p> <p>本项目涉及 18 名辐射工作人员，该 18 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。</p>
<p><b>12.2 辐射安全管理规章制度</b></p> <p>空间中心现已制定了辐射安全管理制度，这些制度包括了总纲、辐射安全管理体系和岗位职责，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，放射源及射线装置使用操作规程，放射源辐射防护事故应急预案，射线装置辐射防护事故应急预案，电子加速器辐射防护事故应急预案及中能质子辐照试验装置应急预案。</p> <p>建设单位已制定了辐射安全管理规章制度，将根据本项目情况完善现有辐射事故应急预案，并完善监测方案、操作规程、岗位职责等制度。</p>
<p><b>12.3 辐射监测</b></p>

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。本项目涉及的个人剂量监测、场所监测和辐射环境监测已纳入建设单位现有辐射监测方案中。由于本项目涉及对原有已批复场所的改造，因此其工作场所监测方案有所调整。本项目涉及具体监测情况如下：

### 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人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，监测频度为每季度检测一次。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 辐射工作场所监测

#### 1、自行监测和委托监测

本项目工作场所监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型。自行监测采用安装固定式在线监测仪表和便携式监测仪表相结合的方式，每年委托有资质单位监测一次，监测数据记录存档。本项目辐射工作场所监测计划见表 12-1，辐射工作场所监测布点示意图见图 12-1～图 12-3。

表 12-1 本项目辐射工作场所监测计划

监测类别	监测方式	监测内容	监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	固定式仪表监测	贯穿辐射	$\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量当量率	中子和 $\gamma$ 剂量率固定式在线监测设备	实时
	便携式仪表监测			实验室四周和屋顶屏蔽墙体外、防护门外，具体见图 12-1～图 12-3	1 次/半年
委托监测	便携式仪表巡测	贯穿辐射	$\gamma$ 辐射剂量率、中子剂量当量率	同自行监测点位	1 次/年



	低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量 仪	循环 冷却 水	总 $\alpha$ 、总 $\beta$	在冷却水收集的集水坑取样	发生 冷却 水泄 露时
--	-----------------------------------	---------------	-----------------------	--------------	----------------------

## 2、监测方案

监测范围：射线装置周围可能受到影响的区域。

监测布点：屏蔽墙四周、房顶、防护门及操作位。

监测布点情况见表 12-2。

表 12-2 辐射工作场所周围剂量当量率监测点位一览表

关注点	位置描述	剂量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )
1	一层东墙外 30 cm 处北（走廊）	
2	一层东墙外 30 cm 处中（走廊）	
3	一层东墙外 30 cm 处南（走廊）	
4	一层加速器大厅防护门外 30 cm 处	
5	一层加速器大厅南墙外 30 cm 处东（走廊）	
6	一层加速器大厅南墙外 30 cm 处西（走廊）	
7	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处东（走廊）	
8	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处中（走廊）	
9	一层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处西（实验室 4 内）	
10	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm 处南（实验室 1 内）	
11	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm 处中（实验室 1 内）	
12	一层辐照实验大厅西墙外 30 cm 处北（实验室 1 内）	
13	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm 处西（墙外绿地）	
14	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm 处中（墙外绿地）	
15	一层辐照实验大厅北墙外 30 cm 处东（墙外绿地）	
16	一层加速器大厅北墙外 30 cm 处西（墙外绿地）	
17	一层加速器大厅北墙外 30 cm 处中（墙外绿地）	
18	一层加速器大厅北墙外 30 cm 处东（墙外绿地）	
19	操作位（一层控制室）	
20	二层加速器大厅东墙外 30 cm 处北（走廊）	
21	二层加速器大厅东墙外 30 cm 处中（走廊）	
22	二层加速器大厅东墙外 30 cm 处南（走廊）	
23	二层加速器大厅南墙外 30 cm 处东（走廊）	
24	二层加速器大厅南墙外 30 cm 处中（走廊）	
25	二层加速器大厅南墙外 30 cm 处西（走廊）	
26	二层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处东（走廊）	
27	二层辐照实验大厅南墙外 30 cm 处西（走廊）	
28	三层加速器大厅东墙外 30 cm 处北（不上人屋面）	
29	三层加速器大厅东墙外 30 cm 处中（不上人屋面）	
30	三层加速器大厅东墙外 30 cm 处南（不上人屋面）	

31	三层微束实验大厅防护门外 30 cm处（走廊）	
32	三层微束实验大厅南墙外 30 cm处东（走廊）	
33	三层微束实验大厅南墙外 30 cm处西（走廊）	
34	三层微束实验大厅西墙外 30 cm处南（走廊）	
35	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm处东（不上人屋面）	
36	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm处中（不上人屋面）	
37	三层辐照实验大厅房顶外 30 cm处西（不上人屋面）	
38	三层微束实验大厅西墙外 30 cm处北（不上人屋面）	
39	加速器大厅房顶外 30 cm处北（不上人屋面）	
40	加速器大厅房顶外 30 cm处中（不上人屋面）	
41	加速器大厅房顶外 30 cm处南（不上人屋面）	

本项目监测布点图如下所示。

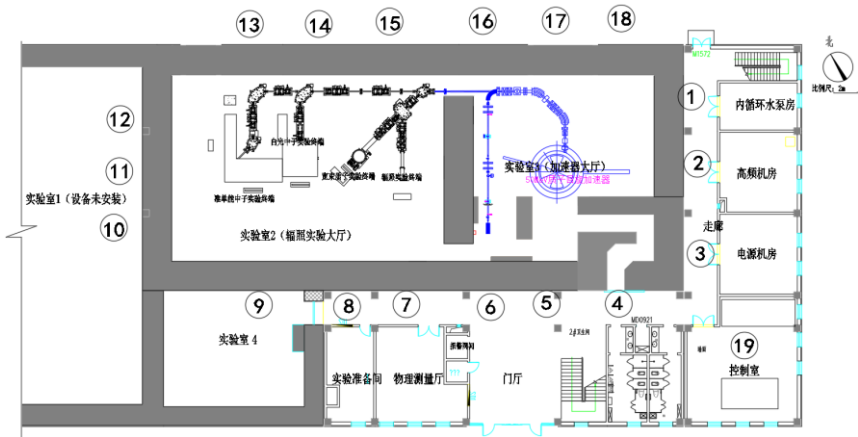


图 12-1 一层屏蔽墙外监测布点图

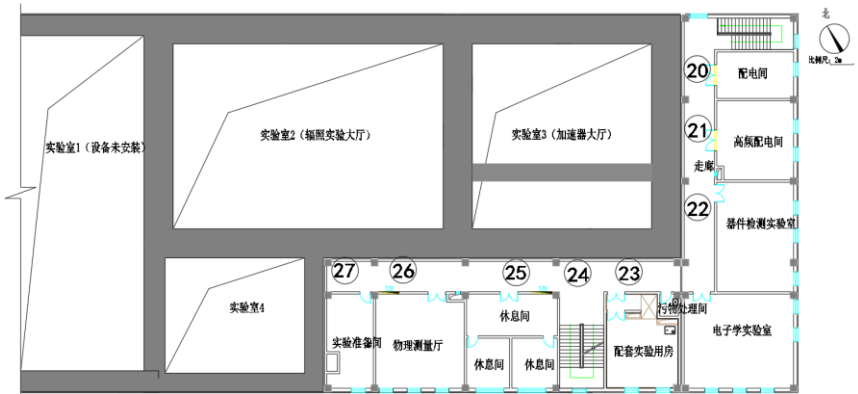


图 12-2 二层屏蔽墙外监测布点图

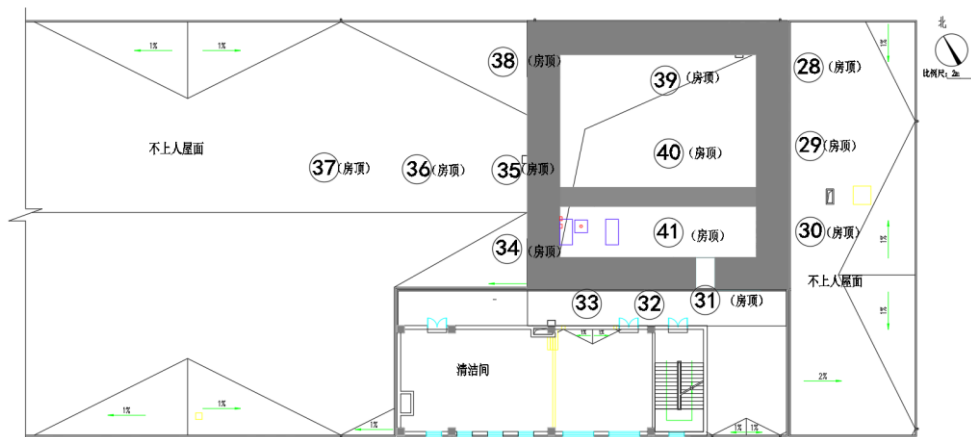


图 12-3 房顶监测布点图

### 12.3.3 防护用品及监测设备

本项目涉及防护用品及监测设备配备情况见表 12-3。

表 12-3 本项目防护用品及监测仪器配备情况表

序号	仪器设备名称	型号	数量	备注
1	便携式 X/γ 剂量率仪	—	2 台	原有
2	便携式中子剂量率仪	—	2 台	原有
4	个人剂量报警仪	—	3 台	原有
5	个人剂量计	—	每人一支	原有
6	固定式 γ-中子剂量率仪	—	5 台 (10 个探头)	原有
7	铅当量 0.5mm 铅衣	—	2 件	原有
8	固定式 γ 剂量率仪	HA1100Med-P1	2 台 (4 个探头)	原有
9	固定式中子剂量率仪	RP4005-WE	1 台 (2 个探头)	原有
10	固定式 γ 剂量率仪	待定	1 台 (1 个探头)	辐照实验大厅 新增
11	固定式中子剂量率仪	待定	1 台 (1 个探头)	
12	移动式铅屏风	20mmPb	1 个	

### 12.4 辐射应急措施

空间中心已制定了辐射应急预案，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、应急演练等内容，能满足本项目需求。

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。

## 12.5 申请者从事辐射活动能力评价

### 12.5.1 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 12-4。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 12-4 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。	本项目所在场所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。	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。	本项目涉及场所已配备了固定式和便携式 $\gamma$ 、中子剂量率仪，本项目拟新增 1 台固定式 $\gamma$ 剂量率仪、1 台中子剂量率仪；每年委托有资质单位对工作场所周围环境的辐射水平进行监测一次并出具监测报告。	落实符合
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，建设单位辐射工作人员均在国家核技术利用辐射安全与防护培训平台通过辐射安全与防护考核。	符合

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。	拟为新增 2 名辐射工作人员均配备个人剂量计，并委托有资质单位进行个人剂量监测（每季度 1 次）。	落实 后符合
---	---	-----------

### 12.5.2 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 12-5。

表 12-5 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
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。	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。	符合
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。	制定了辐射工作人员培训及考核计划。目前，全部辐射工作人员已参加生态环境部门组织的考核。	符合
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。	本项目工作场所设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
第十六条 配备必要的防护用品和监测仪器。	本项目新增 1 台固定式 $\gamma$ 剂量率仪、1 台中子剂量率仪；新增 1 个移动铅屏风。	落实 后符合
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。	已制定了一系列辐射安全管理制度，本项目应完善监测方案、操作规程等制度	落实 后符合
第十六条 有辐射事故应急措施。	场所设有辐射事故应急措施，建设单位将根据本项目情况对现有辐射事故应急预案完善。	落实 后符合
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。	符合

以上对照分析可知，建设单位从事本项目辐射活动的技术能力基本符合相应法律法规的要求。

## 12.6 验收监测内容及要求

新建、改建、扩建辐射工作场所的辐射防护设施，应当与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用，建设项目“三同时”验收内容和要求见表 12-6。

表 12-6 项目竣工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	布局和安全措施	实验终端、束流线及辐射防护设施的建设和布局与环评报告表描述内容一致。	
3	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。	
4	人员培训	辐射工作人员参加生态环境部组织的考核，并成绩合格。	
5	放射性三废处理设施	废气	辐射工作场所设有通风系统。
6	辐射监测	环境监测	制定环境辐射监测计划，自行监测至少每半年开展 1 次，委托检测至少每年开展 1 次。
		个人剂量监测	每名辐射工作人员配置个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 90 天，并建立辐射工作人员个人剂量档案。
		监测设备及防护用品	1.固定式 $\gamma$ 探测器和中子探测器，新增 1 台固定式 $\gamma$ 探测器和 1 台中子探测器；2.新增 2 个人剂量计。

表 13 结论与建议

### 13.1结论

#### (1) 项目概况

本项目位于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(空间环境效应分析实验楼)，基于现有 50MeV 质子加速器及束流线，拟在辐照实验大厅同室移位现有质子束流终端，并新增 3 条束流线及 3 个实验终端，分别为质子实验束流线及终端（最大能量 50MeV、最大流强 10 $\mu$ A）、准单能中子实验束流线及终端（最大能量 50MeV）、白光中子实验束流线及终端（最大能量 50MeV），用于空间辐射模拟实验与测试。

#### (2) 实践正当性

尽管本项目实验终端对周边环境有少许辐射影响，但是借助上述设备用于空间环境效应地面模拟实验，推进了我国航天事业的发展与进步，填补了我国在该试验领域的空白，所获社会利益远大于其产生的辐射危害，故上述设备的使用具有实践正当性和建设必要性。

#### (3) 环境影响分析

本项目所在场所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 $\mu$ 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 0.84mSv/a，低于其剂量约束值 2mSv/a；项目运行期间对周围公众造成的最大剂量为 0.0405mSv/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<sub>3</sub> 和氮氧化物，场所内 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 浓度低于工作场所最大容许浓度限值，产生的 NO<sub>x</sub> 排放速率和排放浓度低于其排放限值；本项目正常情况下不产生放射性废水。

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。

### **13.2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等工作。

（3）日常工作中，工作人员合理穿戴防护用品，加强内部监督管理。

（4）项目运行前，须及时办理辐射安全许可证，取得辐射安全许可后方投入运行。

（5）本项目竣工后，建设单位应及时组织该建设项目竣工环境保护验收，编制竣工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：

审批意见：

