核技术利用建设项目

苏州国家实验室材料综合研究设施新建项目（核技术利用）环境影响报告书

（公示版）



核技术利用建设项目

苏州国家实验室材料综合研究设施新建项目（核技术利用）环境影响报告书

建设单位名称：苏州国家实验室

建设单位法人代表（签名或签章）：徐南平

通讯地址：苏州工业园区若水路 388 号

邮政编码：215000　　联系人：陆兵

电子邮箱：[redacted]　　联系电话：[redacted]

打印编号：1764639670000

编制单位和编制人员情况表

项目编号	9fr2rb
建设项目名称	苏州国家实验室材料综合研究设施新建项目（核技术利用）
建设项目类别	55--172核技术利用建设项目
环境影响评价文件类型	报告书
一、建设单位情况	
单位名称（盖章）	苏州国家实验室
统一社会信用代码	12100000MB2001752B
法定代表人（签章）	徐南平
主要负责人（签字）	范国华
直接负责的主管人员（签字）	马骁骁
二、编制单位情况	
单位名称（盖章）	中国原子能科学研究院
统一社会信用代码	12100000400000309R
三、编制人员情况	

1. 编制主持人

姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
许慧萍	2014035110350000003512110052	BH009725	

2. 主要编制人员

姓名	主要编写内容	信用编号	签字
胡官正	第七章~第九章	BH058160	
黄娟	第五章和第六章	BH028967	
许慧萍	主持编制	BH009725	
严源	审核	BH013174	

罗欣	第三章和第四章	BH009733	罗欣
刘昕宇	第一章和第二章	BH049369	刘昕宇



许慧萍 00038

持证人签名:
Signature of the Bearer

管理号:20140351103500000035121100052
File No.

姓名:
Full Name 许慧萍

性别:
Sex 女

出生年月:
Date of Birth 1984.01

专业类别:
Professional Type /

批准日期:
Approval Date 2014年5月25日

签发单位盖章:
Issued by

签发日期: 2014 年 11 月 13 日
Issued on

本证书由中华人民共和国人力资源和社会保障部、环境保护部批准颁发。它表明持证人通过国家统一组织的考试,取得环境影响评价工程师的职业资格。

This is to certify that the bearer of the Certificate has passed national examination organized by the Chinese government departments and has obtained qualifications for Environmental Impact Assessment Engineer.

approved & authorized by
Ministry of Human Resources and Social Security
The People's Republic of China

approved & authorized by
Ministry of Environmental Protection
The People's Republic of China

编号: HP 00015976
No.

目 录

1 概述 1
1.1 项目名称、地点 1
1.2 项目概况 2
1.2.1 建设单位概况 2
1.2.2 项目背景、意义 2
1.2.3 建设规模 4
1.2.4 产业政策和规划符合性 9
1.2.5 周围环境概况 9
1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状 11
1.3 编制依据 11
1.3.1 法律、法规和规章 11
1.3.2 技术导则、标准 12
1.3.3 其它文件、资料 13
1.4 评价标准 13
1.4.1 剂量限值和剂量约束值 14
1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 15
1.4.3 放射性废物控制标准 16
1.4.4 其他标准 18
1.5 评价范围和保护目标 18
1.5.1 评价范围 18
1.5.2 环境保护目标 19
2 自然环境与社会环境状况 25
2.1 地理位置 25
2.2 自然环境状况 25
2.2.1 地形地貌 25
2.2.2 水文地质 25
2.2.3 气候特征 26
2.3 社会环境概况 26
2.3.1 人口 26
2.3.2 经济 26
2.3.3 文化教育 26
2.3.4 交通运输 26
2.4 辐射环境质量现状与评价 27
2.4.1 环境天然放射性水平 27
2.4.2 辐射环境现状监测 27
2.5 场址适宜性评价 34
3 工程分析与源项 36
3.1 项目规模与基本参数 36
3.1.1 概述 36
3.1.2 微观表征子系统 36

3.1.3 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块.....45
3.1.4 介观表征子系统（高亮度中子源装置）.....51
3.1.5 工业 CT.....59
3.2 工程设备与工艺分析.....64
3.2.1 微观表征子系统（光源）.....64
3.2.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块.....81
3.2.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）.....101
3.2.4 工业 CT.....110
3.3 辐射污染源项.....115
3.3.1 微观表征子系统（光源）.....115
3.3.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块.....137
3.3.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）.....150
3.3.4 工业 CT.....172
3.4 废弃物.....173
3.4.1 微观表征子系统（光源）.....173
3.4.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块.....174
3.4.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）.....174
3.4.4 工业 CT.....175
4 辐射安全与防护.....177
4.1 微观表征子系统（光源）.....177
4.1.1 场所布局与分区.....177
4.1.2 辐射屏蔽.....179
4.1.3 安全联锁系统.....185
4.1.4 辐射监测系统.....210
4.1.5 通风系统.....213
4.1.6 三废的治理.....215
4.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块.....218
4.2.1 场所布局与分区.....218
4.2.2 辐射屏蔽.....221
4.2.3 人身安全联锁系统.....225
4.2.4 辐射监测系统.....235
4.2.5 通风系统.....237
4.2.6 三废的治理.....243
4.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）.....245
4.3.1 场所布局与分区.....245
4.3.2 辐射屏蔽.....251
4.3.3 人身安全联锁系统.....256
4.3.4 辐射监测系统.....267
4.3.5 通风系统.....271
4.3.6 三废的治理.....278
4.4 工业 CT.....280
4.4.1 场所布局与分区.....280
4.4.2 辐射屏蔽.....280

4.4.3 安全联锁系统.....281
4.4.4 辐射监测系统.....284
4.4.5 通风系统.....286
4.4.6 三废的治理.....288
4.5 服务期满后的环境保护措施.....288
5 环境影响分析.....289
5.1 建设阶段对环境的影响.....289
5.2 运行阶段对环境的影响.....290
5.2.1 场所辐射水平.....290
5.2.2 人员受照剂量.....349
5.3 事故影响分析.....363
5.3.1 人员误入高辐射区.....363
5.3.2 人员受照剂量超出年剂量限值.....364
5.3.3 冷却水泄漏事故.....365
6 辐射安全管理.....366
6.1 机构与人员.....366
6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构.....366
6.1.2 辐射工作人员管理.....367
6.2 辐射安全管理规章制度.....367
6.3 辐射监测.....367
6.3.1 个人剂量监测.....368
6.3.2 工作场所监测.....368
6.3.3 环境监测.....369
6.3.4 监测设备.....370
6.4 辐射事故应急.....373
6.5 申请者从事辐射工作能力评价.....374
6.5.1 辐射安全与环境保护管理.....374
6.5.2 辐射工作人员培训.....375
6.5.3 工作场所的安全防护措施.....375
6.5.4 个人防护用品及监测仪器.....376
6.5.5 规章制度.....376
6.5.6 辐射事故应急.....377
6.5.7 放射性三废治理.....377
6.5.8 辐射工作能力综合评价.....378
6.6 环保投资一览表.....378
6.7 竣工环保验收一览表.....379
7 利益-代价分析.....384
7.1 利益分析.....384
7.2 代价分析.....385
7.3 正当性分析.....385
8 公众参与.....386
9 结论与建议.....387
9.1 项目工程概况.....387

9.2 辐射安全与防护措施.....387
9.2.1 选址、布局合理性分析.....387
9.2.2 辐射防护措施.....387
9.2.3 运行期放射性三废的治理和控制.....388
9.3 环境影响分析.....388
9.4 辐射安全管理.....388
9.5 建议和承诺.....389
9.5.1 建议.....389
9.5.2 承诺.....389
附件 1 备案证.....390
附件 2 非辐射环评批复.....391
附件 3 环境影响评价委托书.....392
附件 4 土地证明文件.....393
附件 5 辐射环境监测报告.....403
建设项目审批登记表.....425

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：苏州国家实验室材料综合研究设施新建项目（核技术利用）

建设地点：苏州工业园区桑田科学岛北岛，金鸡湖大道以北，吴淞江以南，常春藤路以东

建设性质：新建

建设单位：苏州国家实验室

建设规模：本项目拟建设材料全流程研发平台和多源表征系统，其中材料全流程研发平台包含[redacted]7 个模块。多源表征系统包括微观表征子系统、介观表征子系统、辐照子系统 3 个子系统，形成从原子级结构到材料功能分析的工具合集，实现原位、多源、跨尺度的表征能力。

本项目的非辐射环评已于 2025 年 3 月 10 日取得苏州工业园区生态环境局的批复，审批文号为 H20250037。主要建设内容为：面向材料重大科学问题、重大工程难题与产业技术问题，围绕最需要的材料研发、最尖端的表征技术、最前沿的研发范式，构建材料全流程研发平台、多源表征系统、数据智能系统的“三位一体”整体架构[redacted]3 个材料研究平台和多源表征系统、数据智能系统等 2 个支撑系统的“3+2”设施布局。

本次仅针对核技术利用相关的活动进行评价，具体内容为：拟在微观楼使用 1 套同步辐射光源装置（Ⅰ类射线装置），拟在介观楼使用 1 套高亮度中子源装置（Ⅰ类射线装置），拟在辐照楼使用 1 套中高能离子加速器装置（Ⅰ类射线装置）、1 台质子/氦离子加速器（Ⅱ类射线装置）和 1 台电子加速器（Ⅱ类射线装置），拟在技术安全楼使用 1 台高能工业 CT 装置（Ⅱ类射线装置）。

项目投资：项目总投资67.23亿元，其中环保投资约3.05亿元，约占总投资的4.54%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

苏州国家实验室[redacted]组建，[redacted]重大科技基础设施、分析测试与仪器等平台中心。

苏州国家实验室[redacted]项目建设可研批复。项目建设内容为材料全流程研发平台和多源表征系统，包含3个I类射线装置，分别为同步辐射光源装置、高亮度中子源装置和中高能离子加速器装置，以及3个II类射线装置，分别为1台高能工业CT、1台质子/氦离子加速器和1台电子加速器。设施建成后，对材料领域研发和实验室发展意义重大，为我国材料整体研究水平的提升提供战略性基础支撑平台。

苏州国家实验室材料综合研究设施新建项目于2025年7月16日取得苏州工业园区行政审批局备案证明（见附件1）。

1.2.2 项目背景、意义

[redacted]

本项目拟建设材料全流程研发平台和多源表征系统，其中材料全流程研发平台包含[redacted]7 个模块。多源表征系统包括微观表征子系统、介观表征子系统、辐照子系统 3 个子系统。微观表征子系统以需求为导向，采用新颖、独特的物理设计，选择成熟的先进技术，实现高性价比、多用途的目标。整机的可扩展性较强，可以实现其他多源的功能；同时保留了未来升级的可能，保证装置的先进性。针对能源材料研究子平台、极端制备与服役研究子平台的需求，一期共规划建设 10 条光束线站。介观表征子系统由 150MeV 的强流质子束直接打靶通过（p, n）反应实现，通过全局优化加速器、靶站、谱仪等装置。介观表征子系统包括了强流质子直线加速器，中子靶站，通用中子粉末衍射仪和高通量小角中子散射仪等模块。通用中子粉末衍射仪用于研究物质的晶体结构和磁结构，以满足来自材料科学、纳米科学、凝聚态物理和化学等众多领域的科学研究和工业应用的需求。高通量小角中子散射仪在凝聚态物质、磁性材料、生命科学和能源地质等领域有广泛的应用。辐照子系统开展空间辐照研究、材料器件改性、核能材料辐照效应探索等需求，建设一台功能完善、性能稳定、操作简单、性价比高、运行维护成本低的专用中高能离子加速器，作为应用型离子加速器，该装置具有离子范围广、能量覆盖宽、终端扫描面积大等特点。

根据材料全流程研发平台对先进表征手段的需求，构建包含光子（X 射线、高能工业 CT）、中子、离子、质子等多源表征系统，形成从原子级结构到材料功能分析的工具合集，实现原位、多源、跨尺度的表征能力。数据智能系统协同多源表征系统，在数据采集、数据存储、数据利用以及数据智能化方面，深度支撑材料全流程研发平台的智能研发需求。

1.2.3 建设规模

项目位于苏州工业园区桑田科学岛北岛，金鸡湖大道以北，吴淞江以南，常春藤路东侧，总用地面积约为35.4万平方米，总建筑面积约为21.7万平方米。

本项目拟建设材料全流程研发平台和多源表征系统，其中材料全流程研发平台包含[redacted]7个模块。多源表征系统包括微观表征子系统、介观表征子系统、辐照子系统3个子系统。

项目园区内拟建设微观楼、介观楼、辐照楼、综合实验楼、总控中心、测试楼、动力中心、110KV电站、技术安全楼等建筑，平面布局见图 1-1。本项目的非辐射环评已于2025年3月10日取得苏州工业园区生态环境局的批复，审批文号为H20250037（具体见附件2）。主要建设内容为：面向材料重大科学问题、重大工程难题与产业技术问题，围绕最需要的材料研发、最尖端的表征技术、最前沿的研发范式，构建材料全流程研发平台、多源表征系统、数据智能系统的“三位一体”整体架构，[redacted]3个材料研究平台和多源表征系统、数据智能系统等2个支撑系统的“3+2”设施布局。

本次仅针对核技术利用相关的活动进行评价，涉及到的建筑包括微观楼、介观楼、辐照楼和技术安全楼。微观楼位于苏州国家实验室园区的西北侧，辐照楼位于园区的南侧，介观楼位于园区的东侧，技术安全楼位于园区的东北角。具体的环评内容如下：

（1）微观表征子系统

微观表征子系统位于园区的西北侧，包括1#微观楼和12号公辅用房，1#微观楼为一栋地上三层科研建筑，12#公辅用房为地上二层建筑。1#微观楼拟使用 1 套同步辐射光源装置（下文简称“光源装置”），属于I类射线装置。装置主要功能区位于地上一层。光源装置主要由加速器系统（包括直线加速器、增强器和储存环）及光束线站系统组成，具体情况见表 1-1。

表 1-1 微观表征子系统拟使用射线装置情况

装置名称	组成	数量	主要技术指标
同步辐射光源装置	直线加速器	1 台	电子最高能量 160MeV； 单脉冲电荷量 1 ns、0.5 nC，多脉冲电荷量 10 ns、4 nC
	增强器	1 台	电子最高能量 3.0GeV、重复频率 2Hz
	储存环	1 台	电子最高能量 3.0GeV、流强 500mA
	光束线站	首批 10 条	D1 能源膜材料软共振专用线站（一线两站，240-2500 eV）
			D2 能源膜材料散射专用线站（一线三站，4.5-16 keV）
			D3 固态电池材料专用线站（一线两站，4.5-22 keV）
			D4 X 射线吸收谱学线站（4.5-30 keV，聚焦；10-50keV，非聚焦）
			D5 软 X 光电子能谱线站（一线两站，50-1500 eV）
			D6 原位表面衍射线站（一线两站，8-30 keV）
			D7 高能散射专用线站（一线两站串联，50-100 keV）
			D8 动态成像专用线站（一线三站串联，50-100 keV）
			D9 纤维材料专用线站（一线两站，8-15 keV）
			D10 原位纳米探针线站（5-22 keV）

（2）辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块位于园区南侧的辐照楼，辐照楼是一栋地上二层的建筑，其中辐照子系统拟使用 1 台中高能离子加速器装置，属于 I 类射线装置，空间光伏辐照全流程研发模块拟使用 1 台质子/氦离子加速器和 1 台电子加速器，属于 II 类射线装置。装置主要功能区位于地上一层。具体情况见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 辐照子系统装置组成情况

粒子	最高能量（MeV/u）	最大流强(ppp)
$^{12}C^{6+}$	500	2×10^{9}
$^{78}Kr^{18+}$	145	1×10^{8}
$^{209}Bi^{39+}$	60	1×10^{7}
备注：该装置可产生并加速从 He 到 Bi 的所有离子，此表中为该装置的三种典型粒子参数。		

表 1-3 空间光伏辐照全流程研发模块装置组成情况

名称	主要性能指标
质子/氦离子加速器	能量范围 0.2-3 MeV，最大流强 30 μA； 具备 He^{+}引出功能，最高能量 1.5MeV/u，最高束流 30 μA
电子加速器	束流能量 0.2-3 MeV，最大流强 180 μA

（3）介观表征子系统

介观表征子系统位于园区东侧的介观楼，介观楼是一栋局部地下一层，地上三层，局部四层的建筑。拟在介观楼使用 1 套高亮度中子源装置，属于 I 类射线装置，装置主要的功能区位于地上一层。高亮度中子源装置由 1 台直线加速器，1 个靶站和 2 台中子谱仪组成，2 台中子谱仪分别是高通量小角中子散射仪和通用中子粉末衍射仪，具体情况见表 1-4。

表 1-4 高亮度中子源装置组成情况

名称		参数
直线加速器	离子种类	质子
	出口能量	150 MeV
	峰值流强	50 mA
	平均功率	150 kW
靶站	质子能量	150MeV
	质子平均流强	1.0mA
	质子束流功率	150kW
	靶体	材料：钽 钽截面：170mm×100mm 轻水冷却，垂直维护
高通量小角中子散射仪	重复频率	50Hz
	中子波长范围	2~12Å
	[redacted]	[redacted]
通用中子粉末衍射仪	重复频率	50Hz
	中子波长范围	0.8～10 Å
	[redacted]	[redacted]

（4）工业 CT

本项目双能工业CT系统位于园区东北侧的技术安全楼，是一栋双层建筑。其中双能工业CT系统位于检测大厅内，为双层贯穿结构。其中高能X射线源是电子加速器打靶产生的X射线，能量最大为9.3MeV，属于II类射线装置。

根据《射线装置分类》的规定，光源装置、离子加速器装置和高亮度中子源装置的类别均属于I类射线装置。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（生态环境部令 第16号，2020年）以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第7号，2019年）的规定，本项目环境影响评价文件类别确定为编制环境影响报告书。因此，中国原子能科学研究院接受建设单位的委托，负责本项目的环评工作（委托书见附件3）。



图 1-1 项目总平面布置图

1.2.4 产业政策和规划符合性

1.2.4.1 产业政策符合性

本项目属于《产业结构调整指导目录》（2024 年本）中**鼓励类**第六项“**核能**”第 4 条“ 核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”项目，因此，本项目建设符合国家产业政策。

1.2.4.2 规划符合性

1.2.4.2.1 与《苏州工业园区总体规划（2012-2030）》符合性

本项目属于苏州工业园区产业发展规划中引导发展产业前端的基础研发，不属于本轮规划中的“逐步淘汰现状污染重、能耗高的造纸、化工等行业；限制发展劳动密集型、发展空间不大的纺织等行业……”，因此不违背《苏州工业园区总体规划（2012-2030）》相关规定。

1.2.4.2.2 与土地利用规划的符合性

本项目位于[redacted]位于苏州工业园区桑田科学岛北岛，金鸡湖大道以北，吴淞江以南，常春藤路东侧。建设单位于 2025 年 8 月 15 日取得了苏州工业园区规划建设委员会的《中华人民共和国国有建设用地划拨决定书》（见附件 4），明确该地块的用途为科研用地。

因此，项目符合土地利用规划要求。

1.2.5 周围环境概况

本项目建设地点位于苏州工业园区桑田科学岛北岛，金鸡湖大道以北，吴淞江以南，常春藤路东侧，地理位置见图 1-2。项目周边关系周边环境见图 1-3。北侧为吴淞江，南侧为金鸡湖大道，西侧是常春藤路，东侧是石泾港。

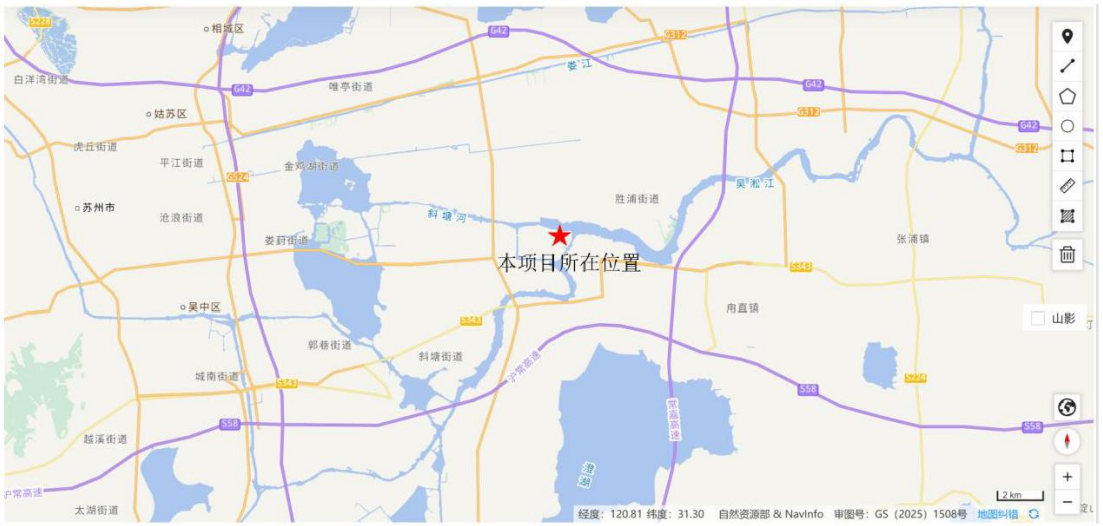


图 1-2 地理位置图



图 1-3 项目所在场址周围环境图

1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状

建设单位此前未从事过核技术利用相关活动，未申领过辐射安全许可证。

1.3 编制依据

1.3.1 法律、法规和规章

（1） 《中华人民共和国环境保护法》（中华人民共和国主席令 第 9 号，2015 年 1 月 1 日施行）；

（2） 《中华人民共和国环境影响评价法》（全国人民代表大会常务委员会，2018 年 12 月 29 日施行）；

（3） 《中华人民共和国放射性污染防治法》（中华人民共和国主席令 第 6 号，2003 年 10 月 1 日）；

（4） 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 第 709 号，2019 年 3 月 2 日修正版）；

（5） 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日修订版）；

（6） 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》(环境保护部令 第 18 号，2011 年 5 月 1 日施行）；

（7） 《关于发布<射线装置分类>的公告》（环境保护部 国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日）；

（8） 《建设项目环境保护管理条例》（国务院令 第 682 号，2017 年 10 月 1 日起施行）；

（9） 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（生态环境部令 第 16 号，2021 年 1 月 1 日起施行）；

（10）《产业结构调整指导目录》（2024 年本）；

（11）《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）；

（12）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号，2019 年 12 月 23 日）；

（13）《发布<建设项目竣工环境保护验收暂行办法>的公告》（国环规环评[2017]4 号，2017 年 11 月 22 日起施行）；

（14）《关于印发<核技术利用建设项目重大变动清单（试行）>的通知》（环办辐射函[2025]313 号）；

（15）《江苏省辐射污染防治条例》（2018 年修正本），江苏省第十三届人民代表大会常务委员会第二次会议第 2 号公告，2018 年 5 月 1 日起实施；

（16）《省生态环境厅关于进一步做好建设项目环境影响报告书（表）编制单位监管工作的通知》，苏环办〔2021〕187 号，2021 年 5 月 28 日发布；

（17）《江苏省生态环境厅关于印发辐射安全许可证办理等工作程序和规范的通知》，苏环规〔2025〕1 号，2025 年 9 月 21 日起施行；

（18）《江苏省辐射事故应急预案》（2020 年修订版），苏政办函〔2020〕26 号，2020 年 2 月 19 日发布。

1.3.2 技术导则、标准

（1）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；

（2）《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）；

（3）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

（4）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

（5） 《水质 总α放射性的测定 厚源法》（HJ898-2017）；

（6） 《水质总β放射性的测定 厚源法》（HJ899-2017）；

（7） 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

（8） 《职业性内照射个人监测规范》（GBZ 129-2016）；

（9） 《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-1985）；

（10）《粒子加速器辐射安全与防护规定》（GB5172-2025）；

（11）《电子直线加速器工业CT辐射安全技术规范》（HJ785-2016）；

（12）《环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T16145-2022）；

（13）《空气中放射性核素的γ能谱分析方法》（WS/T184-2017）；

（14）《水中氚的分析方法》（HJ1226-2020）；

（15）《大气污染物综合排放标准》（DB32/4041-2021）；

（16）《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）。

1.3.3 其它文件、资料

（1）《材料综合研究设施新建项目（核技术利用）环境影响评价委托书》（苏州国家实验室，2025年）；

（2）NCRP. Report NO.144. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. NCRP,2005；

（3）IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001；

（4）苏州国家实验室提供的与本项目相关的初步设计资料等其他技术资料。

1.4 评价标准

1.4.1 剂量限值和剂量约束值

1.4.1.1 剂量限值

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

（1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

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

2）任何一年中的有效剂量，50mSv。

（2）公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

1）年有效剂量，1mSv；

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

1.4.1.2 剂量约束值

（1）职业人员剂量约束值

参照《中国散裂中子源项目环境影响报告书》及其批复文件中批准的辐射工作人员剂量约束值，以 10mSv/a 作为高亮度中子源装置职业人员的年剂量约束值。

其他射线装置以职业照射剂量限值的 1/4 即 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值。

（2）公众剂量约束值

考虑未来苏州国家实验室园区的发展，以 0.25mSv/a 作为苏州国家实验室园区公众的剂量约束值，对于本次核技术利用新建项目来说，仍以 0.1 mSv/a 作为公众的剂量约束值。

1.4.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

1.4.2.1 高亮度中子源装置

参照《中国散裂中子源项目环境影响报告书》及其批复文件中的要求，高亮度中子源装置辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平按控制区（控制区 I、控制区 II）和监督区划分，如表 1-5 所示。其中：

（1）控制区 I：装置所在场所屏蔽体以内的区域，包括加速器隧道、靶站热室、中子开关驱动室、谱仪终端屏蔽体以内，以及放射性三废处理和存储间屏蔽体以内的区域等；

（2）控制区 II：包括靶站顶部、靶站谱仪维修间、氢设备间等，其剂量率控制水平按 25 μSv/h 执行；

（3）监督区：屏蔽体外相邻场所。

表 1-5 高亮度中子源装置屏蔽体外剂量率控制水平

场所		剂量率控制水平
控制区 I		装置所在场所屏蔽体以内的区域，限制人员进入
控制区 II		25μSv/h
监督区	居留因子 T≥1/2	2.5μSv/h
	居留因子 T＜1/2	≤10μSv/h
屏蔽体与土壤交界处*		5.5mSv/h

注：1）参照《中国散裂中子源项目环境影响报告书》及其批复文件，控制区 I 为装置所在场所屏蔽体以内的区域，运行期间无人员停留，停机期间限制人员进入。

2）*参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5.5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5.5mSv/h”作为各辐射工作场所地板外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

1.4.2.2 其他射线装置

参照相关规定，本项目其他射线装置所在辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平见表 1-6。

表 1-6 本项目其他射线装置所在辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

场所	位置	位置描述（居留因子）	剂量率控制水平，μSv/h
辐射工作场所	机房四周屏蔽墙、入口防护门外、机房顶	居留因子 T≥1/2	≤2.5
		居留因子 T＜1/2	≤10
	机房底板外	屏蔽体与土壤交界处*	5.5mSv/h

注：*参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5.5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5.5mSv/h”作为各辐射工作场所地板外表面与土壤交界处的剂量率控制水平。

1.4.3 放射性废物控制标准

1.4.3.1 放射性废液

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

（1）每月排放的总活度不超过 $10ALI_{min}$；

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

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

表 1-7 冷却水感生放射性核素排放限值

核素	单次排放限值 $1ALI_{min}$ （Bq）	单月排放限值 $10ALI_{min}$ （Bq）
^{3}H	1.11E+09	1.11E+10
^{7}Be	4.65E+08	4.65E+09

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中给出的相关核素的豁免活度和豁免浓度，如表 1-8 所示。

表 1-8 冷却水中相关核素的豁免活度和豁免浓度

核素	豁免活度，Bq	豁免浓度，Bq/g
^{3}H	1E+09	1E+06
^{7}Be	1E+07	1E+03

1.4.3.2 放射性固体废物

清洁解控参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中 A2.1 的规定“任何时间段内在进行实践的场所存在的给定核素的总活度或在实践中使用的给定核素的活度浓度不超过表 A1 所给出的或审管部门所规定的豁免水平”执行。GB18871-2002 附录 A 表 A1 中给出的与本项目相关的放射性核素的豁免活度浓度和活度如表 1-9 所示。对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比的和小于 1 时，方可给予豁免。放射性固体废物经监测后低于豁免水平的方可作为一般固体废物处理。

表 1-9 放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

核素	活度浓度，Bq/g	活度，Bq	核素	活度浓度，Bq/g	活度，Bq
^{3}H	1E+06	1E+09	^{56}Mn	1E+01	1E+05
^{7}Be	1E+03	1E+07	^{52}Fe	1E+01	1E+06
^{35}S	1E+05	1E+08	^{55}Fe	1E+04	1E+06
^{37}Ar	1E+06	1E+08	^{59}Fe	1E+01	1E+06
^{42}K	1E+02	1E+06	^{55}Co	1E+01	1E+06
^{43}K	1E+01	1E+06	^{56}Co	1E+01	1E+05
^{45}Ca	1E+04	1E+07	^{57}Co	1E+02	1E+06
^{47}Ca	1E+01	1E+06	^{58}Co	1E+01	1E+06
^{46}Sc	1E+01	1E+06	^{60}Co	1E+01	1E+05
^{47}Sc	1E+02	1E+06	^{61}Co	1E+02	1E+06
^{48}Sc	1E+01	1E+05	^{59}Ni	1E+04	1E+08
^{48}V	1E+01	1E+05	^{63}Ni	1E+05	1E+08
^{51}Cr	1E+03	1E+07	^{65}Ni	1E+01	1E+06

^{52}Mn	1E+01	1E+05	^{64}Cu	1E+02	1E+06
^{54}Mn	1E+01	1E+06	^{65}Zn	1E+01	1E+06

1.4.4 其他标准

1.4.4.1 NO_x 和 O_3 排放标准

本项目 NO_x 排放限值执行江苏省地方标准《大气污染物综合排放标准》（DB32/4041-2021）表 1 中氮氧化物（以 NO_2 计）“其他”有组织排放限值，室内 O_3 和 NO_x 浓度限值参照执行《工作场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 1-10。

表 1-10 O_3 和 NO_2 排放标准

污染物	排放标准	室内浓度限值	
	最高允许排放浓度，mg/m³	最高容许浓度，mg/m³	时间加权平均容许浓度，mg/m³
O_3	—	0.3	—
NO_2	100	—	5

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 评价范围

《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）“1.5 节评价范围和保护目标”中规定：“放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围），对于I类放射源或I类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”。

综合考虑装置的辐射源项及其对环境的影响程度，本项目光源装置的评价范围按加速器系统和光束线站系统分别考虑：加速器系统的电子最高能量为 3.0GeV，主要的辐射环境影响途径为瞬发辐射外照射以及运行期间排入环境的感生放射性气体对人员造成的辐射影响；光束线站利用加速器系统产生的同步辐射光开展实验研究，能量较低（最

高为 100keV），主要的辐射环境影响途径为瞬发辐射外照射。综上，光源装置取加速器系统屏蔽体外 100 米、光束线站棚屋外 50 米作为电离辐射环境影响评价范围。

本项目高亮度中子源装置、辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块的评价范围取装置屏蔽体外 100 米作为电离辐射环境影响评价范围，工业 CT 取装置屏蔽体外 50 米作为电离辐射环境影响评价范围。

综上，将上述各装置评价范围合并，作为本项目电离辐射环境影响评价范围，详见图 1-4。

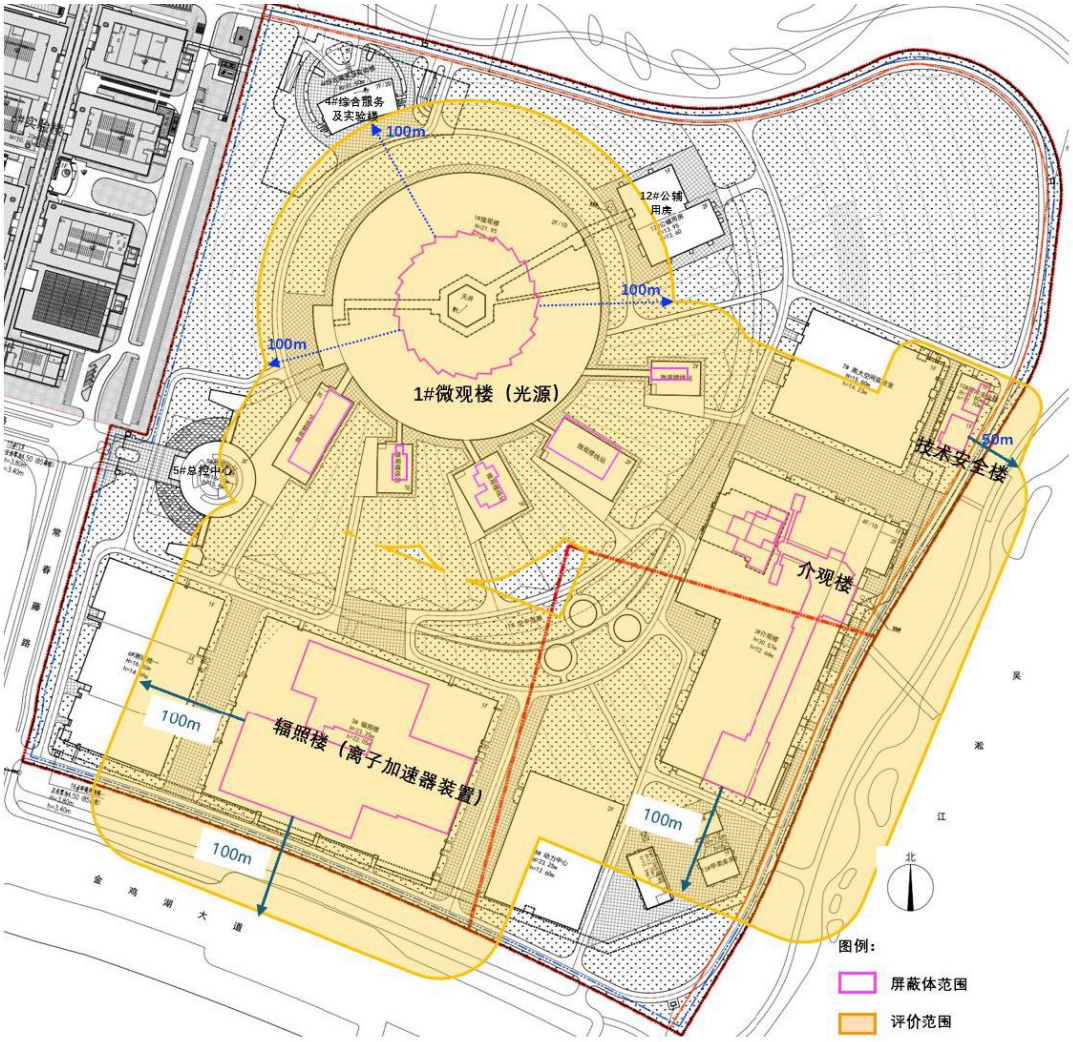


图 1-4 电离辐射评价范围及环境保护目标分布示意图

1.5.2 环境保护目标

1.5.2.1 光源装置环境保护目标

本项目光源装置辐射环境影响评价范围均位于园区内部，不涉及自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象。保护目标以光源装置相关的辐射工作人员、场所周围活动的其他工作人员及公众为主，详见表 1-11。

表 1-11 本项目光源装置辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

工作场所	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
加速器隧道	环内区域	0~8	技术走道	职业	10
		8~26	直线厅、空调机房、备品备件间、增强器电源厅、走道、卫生间、楼梯、测试间、储存环电源厅、空调机房、高频厅、强电间、弱电间、货梯等	职业	20
		26~40	天井	职业	5
	环外北侧	0~42	实验大厅、用户实验室、电梯厅、空调机房、设备运输大厅等	职业	10
		42~100	室外道路等	公众	20
	环外西侧	0~42	实验大厅、用户实验室、电梯厅、入口大厅等	职业	10
		42~100	室外道路等	公众	20
	环外南侧	0~42	实验大厅、用户实验室、变配电室、电梯厅、空调机房等	职业	30
		42~100	室外道路等	公众	20
	环外东侧	0~42	实验大厅、用户实验室、空调机房、楼梯间等	职业	30
		42~100	室外道路等	公众	20
	环外东北侧	80~100	12#公辅用房	公众	10
	上方	/	隧道屋面、实验大厅上空	/	/
	下方	/	设备管沟	/	/
D1 能源膜材料软共振专用线站	东侧	0~50	实验大厅、增强器-储存环隧道、技术走廊、备品备件间、空调机房、增强器电源厅、天井等	职业	5
	南侧	0~50	实验大厅、D2 能源膜材料散射专用线站、增强器-储存环隧道等	职业	5
	西侧	0~50	实验大厅、用户实验室、入口大厅等	职业	5
	北侧	0~50	实验大厅、用户实验室等	职业	10
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D2 能源膜材料散射专用线站	东侧	0~50	室外区域、D7 高能散射专用线站、用户实验室等	职业	5
	南侧	0~50	实验操作间、室外区域等	职业	5
	西南	25~50	5#总控中心		
	西侧	0~50	走廊、实验大厅、实验准备间、设备用房、空调机房、值班室等	职业	5
	北侧	0~50	实验大厅、用户实验室、空调机房等	职业	10

工作场所	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D3 固态电池材料专用线站	东侧	0~50	实验大厅、用户实验室、空调机房、室外区域等	职业	10
	南侧	0~50	实验大厅、用户实验室、D10 原位纳米探针线站等	职业	10
	西侧	0~50	实验大厅、增强器-储存环隧道、技术走廊、空调机房等	职业	5
	北侧	0~50	实验大厅、D5 软 X 射线光电子谱线站、D6 原位表面衍射线站等	职业	15
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D4 X 射线吸收谱学线站	东侧	0~50	实验大厅、用户实验室、D6 原位表面衍射线站、变配电间等	职业	10
	南侧	0~50	实验大厅、增强器-储存环隧道、直线加速器隧道、技术走廊、直线厅等	职业	5
	西侧	0~50	实验大厅等	职业	5
	北侧	0~50	实验大厅、空调机房、用户实验室、设备运输大厅等	职业	5
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D5 软 X 射线光电子谱线站	东侧	0~50	实验大厅、空调机房、用户实验室、	职业	5
	南侧	0~50	实验大厅、D3 固态电池材料专用线站、D10 原位纳米探针线站等	职业	20
	西侧	0~50	增强器-储存环隧道、技术走廊、空调机房、高频厅等	职业	10
	北侧	0~50	实验大厅、D6 原位表面衍射线站等	职业	10
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D6 原位表面衍射线站	东侧	0~50	实验大厅、空调机房、用户实验室等	职业	5
	南侧	0~50	实验大厅、D5 软 X 射线光电子谱线站、D3 固态电池材料专用线站等	职业	20
	西侧	0~50	增强器-储存环隧道、技术走廊、高频厅等	职业	10
	北侧	0~50	实验大厅、变配电间等	职业	5
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D7 高能散射专用线站	东侧	0~50	室外区域、D8 动态成像专用线站等	职业	10
	南侧	0~50	室外区域	公众	5
	西侧	0~50	室外区域、D2 能源膜材料散射专用线站等	职业	10
	北侧	0~50	室外区域、用户实验室、实验大厅等	职业	10
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/

工作场所	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
D8 动态成像专用线站	东侧	0~50	室外区域、D9 纤维材料专用线站等	职业	10
	南侧	0~50	室外区域等	公众	5
	西侧	0~50	室外区域、D7 高能散射专用线站等	职业	10
	北侧	0~50	室外区域、空调机房、实验大厅等	职业	10
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D9 纤维材料专用线站	东侧	0~50	室外区域等	公众	5
	南侧	0~50	室外区域等	公众	5
	西侧	0~50	室外区域、空调机房、用户实验室等	职业	5
	北侧	0~50	室外区域、用户实验室等	职业	5
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/
D10 原位纳米探针线站	东侧	0~50	室外区域等	公众	5
	南侧	0~50	室外区域等	公众	5
	西侧	0~50	室外区域、空调机房、实验大厅等	职业	5
	北侧	0~50	室外区域等	公众	5
	上方	/	实验棚屋上空	/	/
	下方	/	土层	/	/

1.5.2.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块环境保护目标

本项目辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射环境影响评价范围不涉及自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象。保护目标以装置相关的辐射工作人员、场所周围活动的其他工作人员及公众为主，详见表 1-12。

表 1-12 本项目辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

工作场所	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
辐照子系统和空间光伏辐照全流	北侧	0~4	走道	职业	67
		4~100	室外道路、总控中心等	公众	50
	西侧	0~100	51#终端实验控制室、51#终端实验准备间、中央控制室、洁净室、材料制备间、实验准备间、器件性能测试间等；门厅、强弱电间等	职业；公众	77
		35~100	室外道路、测试楼一等	公众	80

工作场所	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
程研发模块	南侧	0~32	冷却水站、工艺空调机房、工艺控制设备间、预留终端运行控制室、预留终端实验准备间等	职业	67
		32~100	室外道路、金鸡湖大道等	公众	50
	东侧	0~78	预留终端、21#终端运行控制室、预留终端实验准备间、预留终端运行控制室、束流洁净间、真空洁净间、设备转运大厅等。	职业	67
		78~100	室外道路、动力中心等	公众	30
	顶部上方	0~10	工艺空调机房、气瓶间、高频设备间、工艺控制设备间、设备转运大厅上空、工艺空调机房、工艺涉放排风机房等	职业	67
		0~10	开放式用户实验室、会议室、过厅等	公众	40
		10~100	屋面	/	/
	下方	/	土层	/	/

1.5.2.3 高亮度中子源装置环境保护目标

本项目高亮度中子源装置辐射环境影响评价范围不涉及自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象。保护目标以中子源装置相关的辐射工作人员、场所周围活动的其他工作人员及公众为主，详见表 1-13。

表 1-13 本项目高亮度中子源装置辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

工作场所	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
高亮度中子源装置	东侧	0~14	设备运输吊装大厅、新风空调机房、备品间、变配电室、通用设备机柜间等	职业	20
		14~100	室外绿化、道路等	公众	20
	西侧	0~50	离子源厅、辐射防护检查、辐射测量室、直线功率源大厅、运输通道、直线控制室、变配电室、靶站大厅（中子源大厅）等	职业	50
		50~100	室外绿化、道路、微观线站楼等	公众	20
	北侧	0~32	靶站大厅（中子源大厅）、排风中心、弱电间、强电间等	职业	20
		32~100	室外绿化、道路、测试楼等	公众	50
	南侧	0~100	室外绿化、道路、仓库、甲类库房、110kV 电站、动力中心等	公众	30
	上方	/	隧道顶部、走廊等	/	/
	下方	/	土层	/	/

1.5.2.4 工业 CT 环境保护目标

本项目工业 CT 辐射环境影响评价范围不涉及自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象。保护目标以工业 CT 相关的辐射工作人员、场所周围活动的其他工作人员及公众为主，详见表 1-14。

表 1-14 本项目工业 CT 辐射环境影响评价范围内环境保护目标情况

工作场所	方位	距离/m	周围环境	保护目标	人数/人
工业 CT	西侧	0~30	室外走道	公众	流动人口
		30~50	高大空间实验室	公众	20
	东侧	0~20	专用工位电气机房、排风间、防护门间、控制室、信息化机房、茶水间、送风间	职业	5
		20~50	室外走道	公众	流动人口
	北侧	0~10	专用工位配套间	职业	5
		10~30	液体废物处置室、固体废物处置室、男卫、女卫、样本准备室、样本处理室、伽马低本底测量室、液闪低本底测量室、技术安全管理室、低放污物临时储藏室、刻度观察室、气瓶间、茶水间、新风机房、刻度室、剂量仪器维修室、安全联锁调试间、备品物资间、会议室、综合实验室	公众	10
		30~50	室外走道	公众	流动人口
	南侧	0~10	CT 调制水冷间、强弱电间（配电间）、报警阀门间、样品存储间、工装存储间、信息化机房	公众	5
		10~50	室外走道	公众	流动人口
	上方	/	不上人屋面	/	/
	下方	/	泥土层	/	/

2 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

苏州位于长江三角洲中部、江苏省东南部，地处东经 119° 55′ ～121° 20′，北纬 30° 47′ ～32° 02′ 之间，东傍上海，南接浙江，西抱太湖，北依长江，总面积 8657.32 平方公里。

本项目建设地点位于苏州工业园区桑田科学岛北岛，金鸡湖大道以北，吴淞江以南，常春藤路东侧，地理位置见图 1-2。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

苏州市地势低平，平原占总面积的 55%。苏州分别隶属于两个一级的自然地理区：长江三角洲平原地区和太湖平原地区，分属于 4 个二级自然区：沿江平原沙洲区、苏锡平原区、太湖及湖滨丘陵区、阳澄淀泖低地区。地貌特征以平缓平原为上，苏州市的地势低平，自西向东缓慢倾斜，平原的海拔高度 3～4 米，阳澄湖和吴江一带仅 2 米左右。低山丘陵零星散布，一般高 100～350 米，分布在西部山区和太湖诸岛，其中以穹窿山最高（342 米），还有南阳山（338 米）、西洞庭山缥缈峰（336 米）、东洞庭山莫里峰（293 米）、七子山（294 米）、天平山（201 米）、灵岩山（182 米）、渔洋山（171 米）、虞山（262 米）、潭山（252 米）等。

2.2.2 水文地质

苏州市境内的苏州古城河港交错，湖荡密布，最著名的湖泊有位于西隅的太湖和漕湖；东有淀山湖、澄湖；北有昆承湖；中有阳澄湖、金鸡湖、独墅湖；长江及京杭运河贯穿市区之北。太湖水量北泄入江和东进淀泖后，经黄浦江入江；运河水量由西入望亭，南出盛泽；原出海的“三江”，今由黄浦江东泄入江，由此形成苏州市的三大水系。

2.2.3 气候特征

苏州属亚热带季风海洋性气候，核心特征为四季分明、气候温和、雨量充沛，年均气温约 18℃，年降水量 1000-1600 毫米，夏季高温多雨，冬季温和少雨。2024 年市区平均气温 18.3℃，降水量 1583.9 毫米。

2.3 社会环境概况

2.3.1 人口

2024 年末，苏州市常住人口 1298.7 万人，比上年末增长 0.2%，常住人口城镇化率 82.7%，比上年提高 0.22 个百分点。年末户籍总人口 794.9 万人，比上年末增长 1.1%。

2.3.2 经济

2024 年苏州市实现地区生产总值 26727.0 亿元，按可比价格计算比上年增长 6.0%，其中第一产业增加值 202.0 亿元，增长 3.1%；第二产业增加值 12516.7 亿元，增长 7.1%；第三产业增加值 14008.3 亿元，增长 5.0%，三次产业结构比例为 0.8∶46.8∶52.4。按常住人口计算，人均地区生产总值 20.6 万元，比上年增长 5.6%。

2.3.3 文化教育

2024 年，苏州市新改扩建中小学、幼儿园 73 所，新增学位 7.9 万个。年末拥有各级各类学校 869 所（不含幼儿园），其中普通高等学校 26 所；在校学生 191.9 万人，其中普通高等学校在校学生 30.4 万人；毕业生 41.1 万人，其中普通高等学校毕业生 7.8 万人；拥有专任教师 12.9 万人。年末全市共有幼儿园 1049 所，比上年末增加 15 所，在园幼儿 32.5 万人。张家港、常熟、太仓获评全国首批义务教育优质均衡发展县。苏州科技大学、常熟理工学院分别获批博士、硕士学位授权单位，中国中医科学院研究生院新校区投入使用。

2.3.4 交通运输

2024 年末，苏州市公路总里程 11190.6 公里，其中高速公路里程 619.9 公里。2024 年，沪苏湖高铁建成通车，苏州南站、盛泽站同步投运。通苏嘉甬、北沿江高铁加快建设，苏州北站枢纽配套、苏州东站枢纽及综合开发、沪苏锡常城际铁路太仓先导段等开工建设。全年铁路客运量 12412 万人次，旅客周转量 268.1 亿人公里，分别比上年增长 11.4%和 12.0%。铁路货运量 276.7 万吨，货物周转量 17.3 亿吨公里，分别比上年增长 12.3%和 12.2%。

2.4 辐射环境质量现状与评价

2.4.1 环境天然放射性水平

根据《全国环境天然贯穿辐射水平调查研究（1983-1990 年）》（全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组），江苏省环境天然γ辐射剂量率如下表所示。

表 2-1 江苏省环境天然γ辐射剂量率（nGy/h）

监测区域	范围	平均值	标准差
原野	33.1~72.6	50.3	7.5
道路	18.1~102.3	47.1	12.3
室内	50.7~129.4	89.7	17.3

2.4.2 辐射环境现状监测

为了解本项目拟建场址（以下简称“拟建场址”）及周围环境的辐射环境现状，评价单位委托江苏省苏核辐射科技有限责任公司（CMA 证书编号：221020340440）和中国原子能科学院辐射监测与评价研究室（CMA 证书编号：230012349756）对拟建场址及周围环境进行了辐射环境现状调查。监测报告见附件 5。

2.4.2.1 监测内容

根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征，本次辐射环境现状调查选取的监测对象为外照射。辐射环境现状监测对象和监测项目列于表 2-2。

表 2-2 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
1	外照射	环境地表γ辐射剂量率
		中子周围剂量当量率
2	土壤	Be-7、Na-22、总α、总β活度浓度
3	地表水	H-3、Be-7、总α、总β活度浓度
4	空气/气溶胶	Be-7、Na-24、Mn-52、Mn-54

2.4.2.2 监测/取样点位

环境地表γ辐射剂量率和中子周围当量剂量率的监测点位见图 2-1。由监测点位可知，在项目拟建场址、场址周围环境以及场址周边均设置了监测点位，能够反映拟建场址及邻近环境的辐射环境本底水平。因此，监测点位布设是符合相关标准规定的。

环境介质取样点位见图 2-2。



图 2-1 环境地表γ辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位图

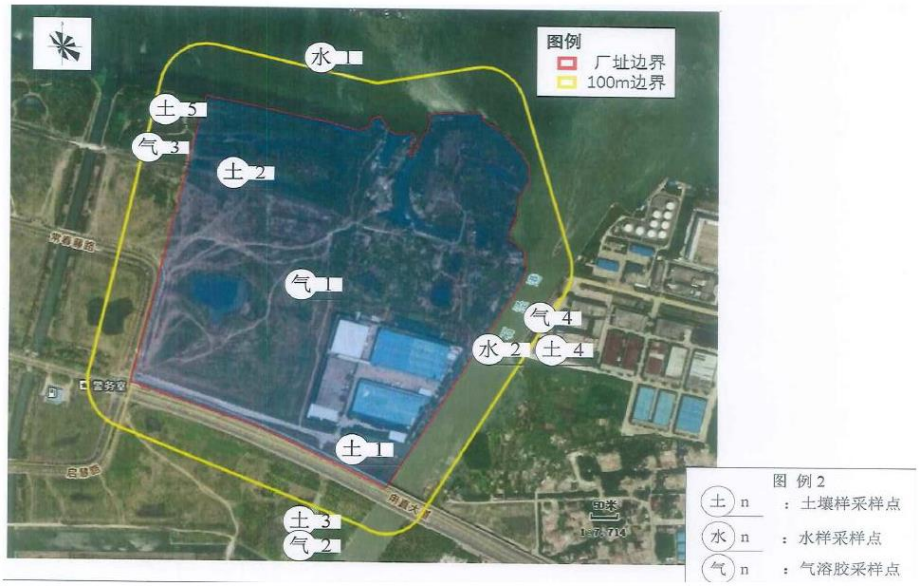


图 2-2 环境介质取样点位示意图

2.4.2.3 监测设备和监测方法

2.4.2.3.1 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-3。监测、分析时监测仪器设备均处于检定有效期内。

表 2-3 仪器设备及性能指标

仪器型号名称	仪器编号	监测时检定有效日期	主要技术性能指标
FH40G 型便携式 X-γ 辐射剂量率仪	028336（主机）、11047（探头）	2024.6.26-2025.6.25	能量响应：40keV~4.4MeV 测量量程：1nSv/h~100μSv/h
SIM-MAXN3020 型中子剂量当量仪	01812016	2024.11.21-2025.11.20	能量响应：0.025eV~16MeV 测量量程：0.1μSv/h~100mSv/h
GR4020 纯锗 γ 能谱仪	6592	2024.12.26-2026.12.25	能量范围：3keV~10MeV 能量分辨率：2.24keV
MPC9604 型低本底 α、β 测量仪	14251319	2024.1.17-2026.1.16	探测效率：α：76.0~77.1% β：84.1~85.9%
低本底液闪谱仪	2200266	2024.7.6-2025.7.7	重复性：0.7% 短期稳定性：0.02%
低本底 α/β 测量仪	1003	2025.3.12~2027.3.11	效率 α：≥65%，β≥35%
低本底 α/β 测量仪	2020-022	2025.3.12~2027.3.11	效率 α：≥65%，β≥35%

2.4.2.3.2 监测方法

监测方法列于表 2-4。

表 2-4 监测方法

序号	监测对象	监测项目	监测方法标准依据
1	外照射	环境地表γ辐射剂量率 中子周围剂量当量率	《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）。
2	土壤	Be-7、Na-22、总α、总β活度浓度	《环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T16145-2022）； 《水质总α放射性的测定 厚源法》（HJ898-2017）； 《水质总β放射性的测定 厚源法》（HJ899-2017）； 《空气中放射性核素的γ能谱分析方法》（WS/T184-2017）； 《水中氚的分析方法》（HJ1226-2020）。
3	地表水	H-3、Be-7、总α、总β活度浓度	
4	环境空气/气溶胶	Be-7、Na-24、Mn-52、Mn-54	

2.4.2.4 质量保证措施

（1）监测单位具备中国国家认证认可监督管理委员会颁发的《检验检测机构资质认定证书》，现场监测时间在其证书有效期内。监测项目在《检验检测机构资质认定证书附表》里批准的检验检测能力范围内。

（2）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；

（3）针对各类样品的采集，监测单位制定了操作规程，要求参加采样人员在实施采样前充分了解，并在采样过程中严格执行；

（4）采样器符合国家技术标准的规定，使用前须检验并确认其性能良好后方可采样，保证采样器和样品容器的清洁，防止交叉污染。

（5）采样后按规定方法进行暂存或预处理，并尽快送往实验室，做好样品交接工作；

（6）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；

（7）监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用；

（8）每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；

（9）由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；

（10）监测报告严格实行三级审核制度，经过校验、审核，最后由技术总负责审定。

2.4.2.5 监测结果与评价

2.4.2.5.1 外照射

本项目拟建场址及周围环境的环境地表γ辐射剂量率和中子剂量当量率监测结果见下表。

表 2-5 本项目拟建场址及周围环境地表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	环境地表γ辐射剂量率，nGy/h*	中子周围剂量当量率，μSv/h	备注
1	1#测点	84	<0.1	原野
2	2#测点	85	<0.1	道路
3	3#测点	80	<0.1	道路
4	4#测点	70	<0.1	道路
5	5#测点	68	<0.1	道路
6	6#测点	127	<0.1	道路
7	7#测点	118	<0.1	道路
8	8#测点	82	<0.1	原野
9	9#测点	60	<0.1	道路
10	10#测点	75	<0.1	原野
11	11#测点	75	<0.1	原野
12	12#测点	76	<0.1	原野
13	13#测点	82	<0.1	原野
14	14#测点	78	<0.1	道路
15	15#测点	81	<0.1	原野
16	16#测点	78	<0.1	原野
17	17#测点	78	<0.1	原野
18	18#测点	85	<0.1	原野
19	19#测点	87	<0.1	道路
20	20#测点	76	<0.1	原野
21	21#测点	83	<0.1	原野
22	22#测点	90	<0.1	原野

监测点位	点位描述	环境地表γ辐射剂量率，nGy/h*	中子周围剂量当量率，μSv/h	备注
23	23#测点	106	<0.1	原野
24	24#测点	92	<0.1	道路
25	25#测点	79	<0.1	道路
26	26#测点	81	<0.1	原野
27	27#测点	81	<0.1	原野
28	28#测点	56	<0.1	原野
29	29#测点	76	<0.1	道路
30	30#测点	64	<0.1	道路
31	31#测点	95	<0.1	道路
32	32#测点	63	<0.1	道路
33	33#测点	77	<0.1	道路
34	34#测点	69	<0.1	道路
35	35#测点（立成光电产业园西南角）	91	<0.1	道路

注*：表中结果已扣除仪器宇宙射线响应值（9.1nGy/h）。

由上表可知，本项目拟建场址及周围环境地表γ辐射剂量率水平在（56~127）nGy/h（扣除宇宙射线9.1nGy/h）范围内，中子剂量当量率未检出。根据《全国环境天然贯穿辐射水平调查研究（1983-1990 年）》，本项目拟建场址及周围环境γ辐射剂量率水平在江苏省环境γ辐射剂量率正常波动范围内内，项目周围环境的辐射环境质量现状无异常。

2.4.2.5.2 土壤

拟建场址土壤样品的分析测量结果见表 2-6。

表 2-6 土壤样品监测结果

样品名称和编号	检测项目	检测结果
项目地块内东南侧土壤	^{7}Be	＜6.61 Bq/kg
	^{22}Na	＜0.927 Bq/kg
	总 α	3.9E+02Bq/kg
	总 β	6.6E+02Bq/kg
项目地块内西北侧土壤	^{7}Be	＜6.44 Bq/kg
	^{22}Na	＜0.965 Bq/kg
	总 α	4.4E+02Bq/kg

样品名称和编号	检测项目	检测结果
	总 β	6.9E+02Bq/kg
项目地块外东南侧土壤	^{7}Be	＜13.6 Bq/kg
	^{22}Na	＜1.89 Bq/kg
	总 α	3.7E+02Bq/kg
	总 β	6.8E+02Bq/kg
项目地块外东侧土壤	^{7}Be	＜6.89 Bq/kg
	^{22}Na	＜1.03 Bq/kg
	总 α	3.7E+02Bq/kg
	总 β	6.8E+02Bq/kg
项目地块外西北侧土壤	^{7}Be	＜5.66 Bq/kg
	^{22}Na	＜0.871 Bq/kg
	总 α	3.3E+02Bq/kg
	总 β	6.1E+02Bq/kg

拟建场址土壤中核素 ^{7}Be、^{22}Na 活度浓度均小于探测限；总 α 活度浓度在（3.3~3.9）E+02Bq/kg 范围内；总 β 活度浓度在（6.1~6.9）E+02Bq/kg 范围内。

2.4.2.5.3 水样

拟建场址水样的监测结果见下表。

表 2-7 水样监测结果

样品编号	检测项目	结果
项目北侧地表水	^{7}Be	＜0.629 Bq/L
	^{3}H	＜2.4 Bq/L
	总 α	0.04Bq/L
	总 β	0.22Bq/L
项目东侧地表水	^{7}Be	＜0.625 Bq/L
	^{3}H	＜2.5Bq/L
	总 α	0.05 Bq/L
	总 β	0.29 Bq/L

拟建场址环境水样中 ^{7}Be 和 ^{3}H 活度浓度均小于探测限；总 β 活度浓度在(0.22~0.29)Bq/L 范围内；总 α 活度浓度在(0.04~0.05)Bq/L 范围内。

2.4.2.5.4 气溶胶

本项目拟建场址及周围环境气溶胶监测结果见下表。

表 2-8 气溶胶监测结果

样品名称和编号	检测项目	结果
项目地块内气溶胶取样	^{7}Be	7.12E-03 Bq/m^3
	^{24}Na	＜4.91E-06 Bq/m^3
	^{52}Mn	＜1.45E-05 Bq/m^3
	^{54}Mn	＜2.09E-06 Bq/m^3
项目地块外东南气溶胶取样	^{7}Be	4.47E-04 Bq/m^3
	^{24}Na	＜4.72E-06 Bq/m^3
	^{52}Mn	＜1.42E-05 Bq/m^3
	^{54}Mn	＜2.14E-06 Bq/m^3
项目地块外西北气溶胶取样	^{7}Be	1.69E-04 Bq/m^3
	^{24}Na	＜4.72E-06 Bq/m^3
	^{52}Mn	＜1.39E-05 Bq/m^3
	^{54}Mn	＜2.15E-06 Bq/m^3
项目地块外东气溶胶取样	^{7}Be	2.11E-04 Bq/m^3
	^{24}Na	＜5.01E-06 Bq/m^3
	^{52}Mn	＜1.42E-05 Bq/m^3
	^{54}Mn	＜1.88E-06 Bq/m^3

拟建场址气溶胶中放射性核素 ^{24}Na、^{52}Mn、^{54}Mn 均未检出，^{7}Be 的活度浓度在（0.169~7.12）E-03 Bq/m^3 范围内。

2.5 场址适宜性评价

本项目选址位于苏州工业园区桑田科学岛北岛，金鸡湖大道以北，吴淞江以南，常春藤路东侧，该地块规划用地性质为科研用地，项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响射线装置稳定运行和安全使用的颠覆性因素。

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

环境现状调查结果表明，项目拟建场址及周围环境的辐射环境质量良好，环境电离

辐射水平均处于当地天然本底波动范围内。

综上所述，本项目选址适宜开展所申请的核技术利用活动。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

3.1.1 概述

本项目拟建设材料全流程研发平台和多源表征系统，其中材料全流程研发平台包含[redacted]7 个模块。多源表征系统包括微观表征子系统、介观表征子系统、辐照子系统 3 个子系统。[redacted]主要规划建设材料专用微观表征子系统、介观表征子系统和辐照子系统，形成从原子级结构到材料功能分析的工具合集，实现原位、多源、跨尺度的表征能力。

材料综合研究设施园区内拟建设微观楼、介观楼、辐照楼、综合实验楼、总控中心、测试楼、动力中心、110kV 电站、技术安全楼等建筑，具体的平面布置情况见图 1-1。本项目的非辐射环评已于 2025 年 3 月 10 日取得苏州工业园区生态环境局的批复，审批文号为 H20250037（具体见附件 2）。主要建设内容为：面向材料重大科学问题、重大工程难题与产业技术问题，围绕最需要的材料研发、最尖端的表征技术、最前沿的研发范式，构建材料全流程研发平台、多源表征系统、数据智能系统的“三位一体”整体架构，构建极端制备与服役、限域效应、原子级构筑等 3 个材料研究平台和多源表征系统、数据智能系统等 2 个支撑系统的“3+2”设施布局。

本次仅针对核技术利用相关的活动进行评价，涉及到的建筑包括微观楼、介观楼、辐照楼和技术安全楼。微观楼位于园区的西北侧，辐照楼位于园区的南侧，介观楼位于园区的东侧，技术安全楼位于园区的东北角。

3.1.2 微观表征子系统

微观表征子系统位于园区的西北侧，包括 1#微观楼和 12 号公辅用房。1#微观楼为一栋地上三层科研建筑，屋面高度约 15 米，建筑面积 65136 平方米。12#公辅用房位

于 1#微观楼东北侧，为地上二层，主要功能为 1#楼的动力用房，不涉及辐射工作场所。

1#微观楼拟使用 1 套同步辐射光源装置，主要功能区位于地上一层，由直线加速器隧道、增强器-储存环隧道、实验大厅、外环实验室及内环设备用房区组成，周长约 288m 的地上增强器-储存环隧道将空间分为环内和环外区域。中央控制室位于二层西北侧。

增强器-储存环隧道与直线加速器隧道相连，之间用混凝土墙进行分隔。直线加速器隧道位于环内北侧区域，净宽为 3.0m。增强器-储存环隧道半径约 50.0m，净高 3.5m，最小净宽约 5.3m，增强器-储存环隧道外侧为锯齿墙，增强器-储存环隧道与内环设备用房之间设约 7.5m 宽内技术走廊。内环设备用房包含电源厅、高频厅、预留用房等。

增强器-储存环隧道外环区域由内向外分别为实验大厅、外环通道、用户实验区等，总宽度约 75m。西侧为建筑主入口。实验大厅共设 1 个设备运输口，位于地块北侧。实验大厅内沿环共设 2 座连桥，连桥在二层连接外环实验区通道与内环设备用房。外环通道以外主要为用户实验区，总共三层，主要设置中央控制室、加速器数据库机房等设备用房以及用户实验室。

光束线站由实验棚屋及配套设备用房组成。实验大厅内有五条光束线站，分别为 D1、D3、D4、D5、D6 线站。实验大厅外的主体建筑南侧及东侧布置其余五条超长光束线站，光束线隧道通过用户实验区穿出环外，隧道末端布置相应的实验线站及其设备用房，环外线站中 D2、D7、D8、D9 均为三层建筑，D10 为二层建筑，其平面形式均为建筑中心布置棚屋，棚屋周围设置局部二层或三层的实验室及配套设备用房。

微观表征子系统总体布局见图 3-1，主体建筑各层布局见图 3-2 至图 3-4，剖面图见图 3-5~图 3-12。

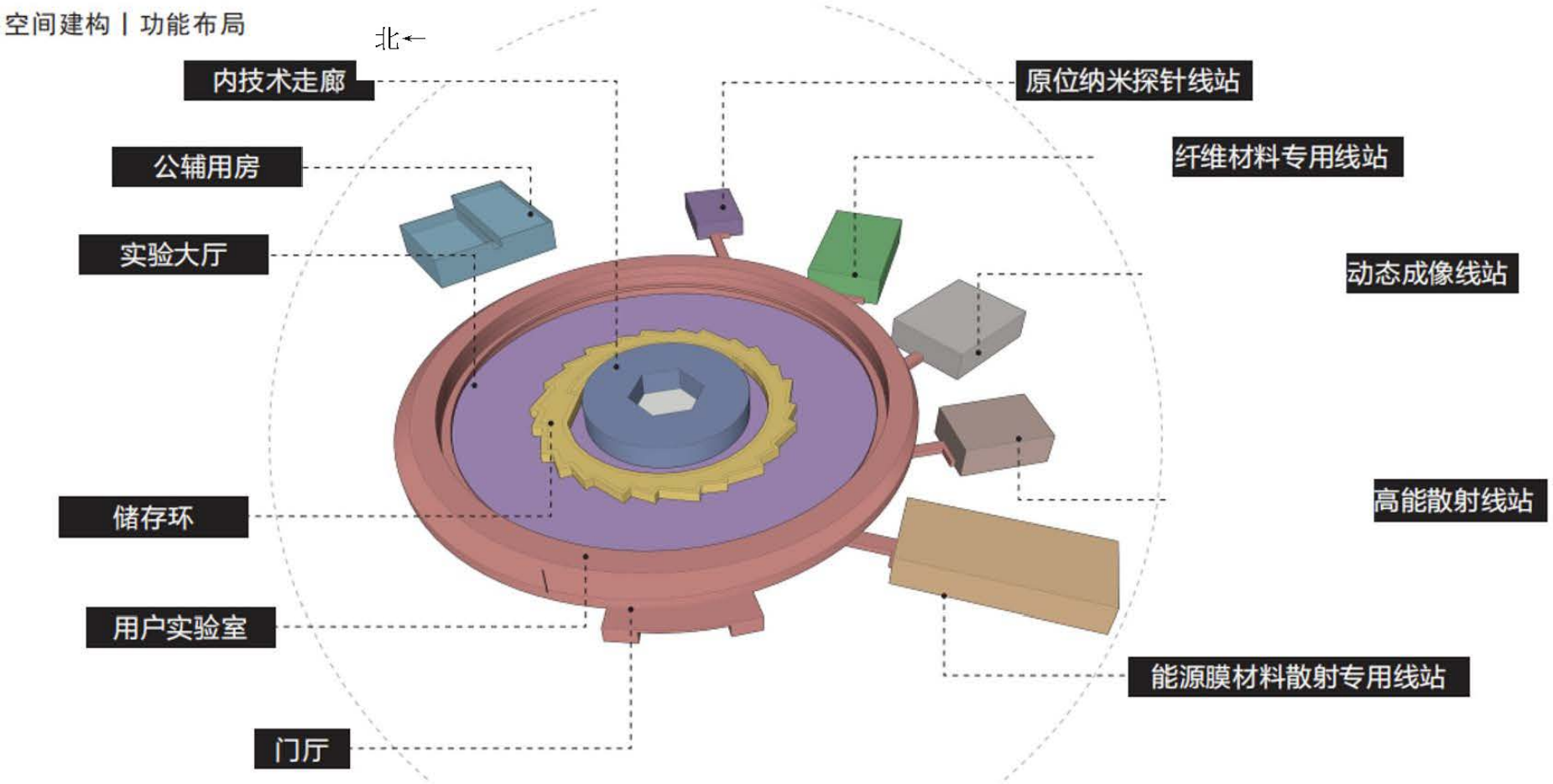


图 3-1 微观表征子系统功能布局示意图



图 3-2 微观表征子系统一层布局示意图



图 3-3 微观表征子系统二层布局示意图

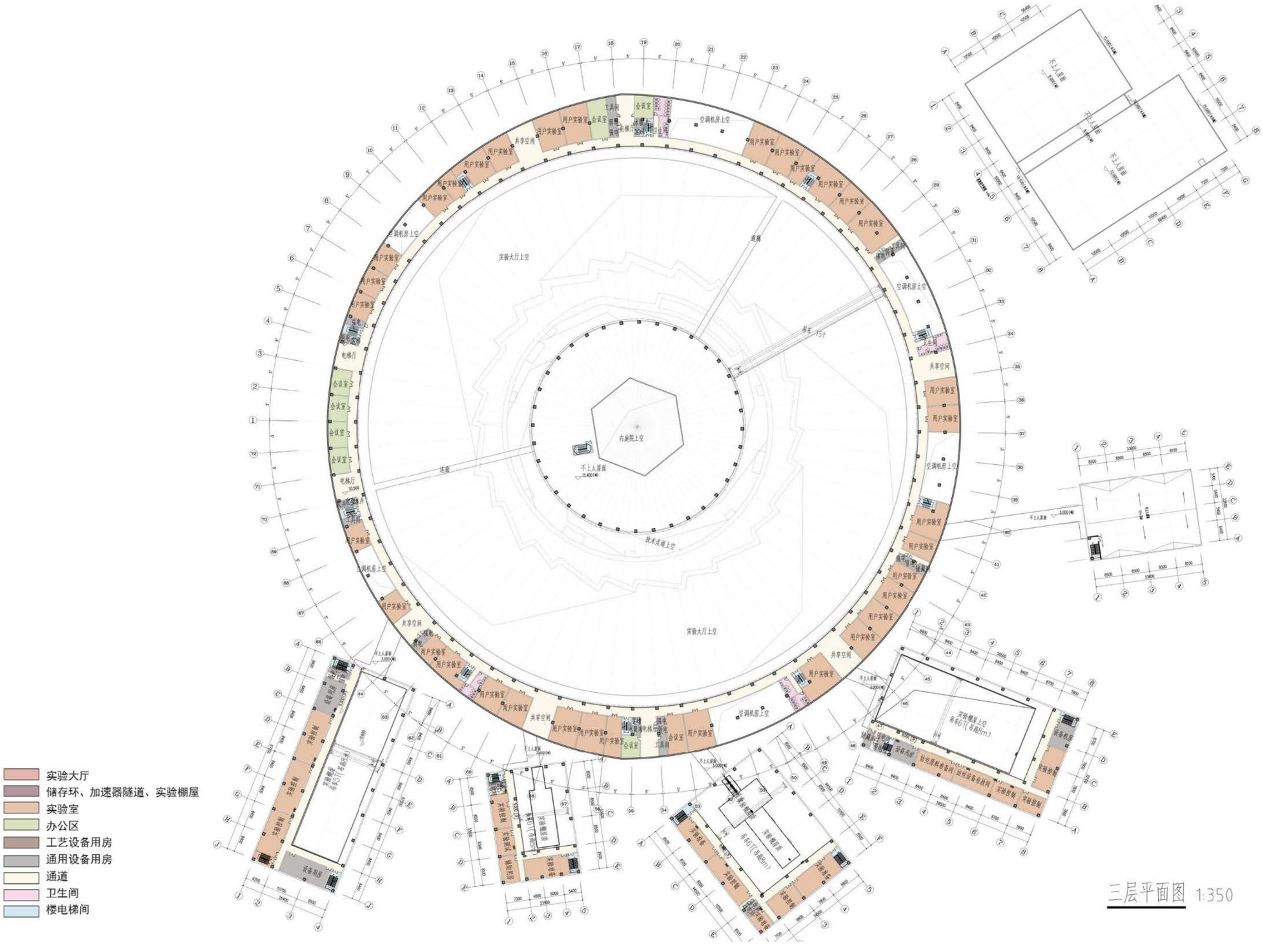


图 3-4 微观表征子系统三层布局示意图

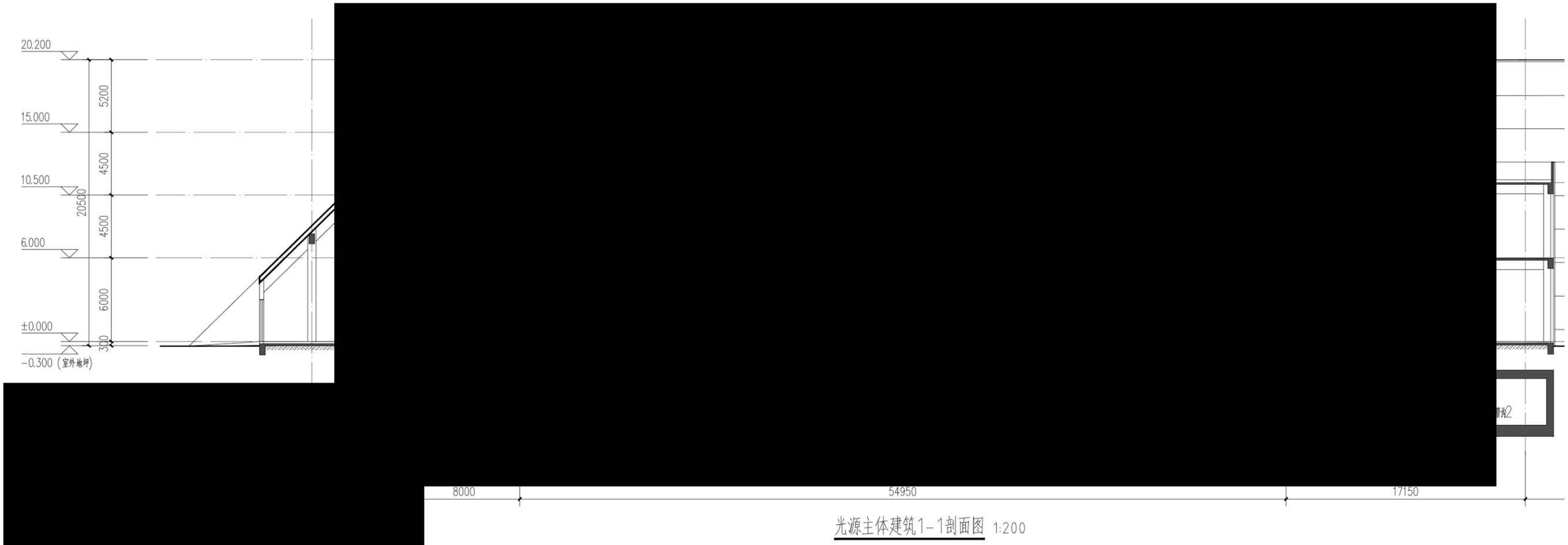


图 3-5 微观表征子系统主体建筑剖面图 1

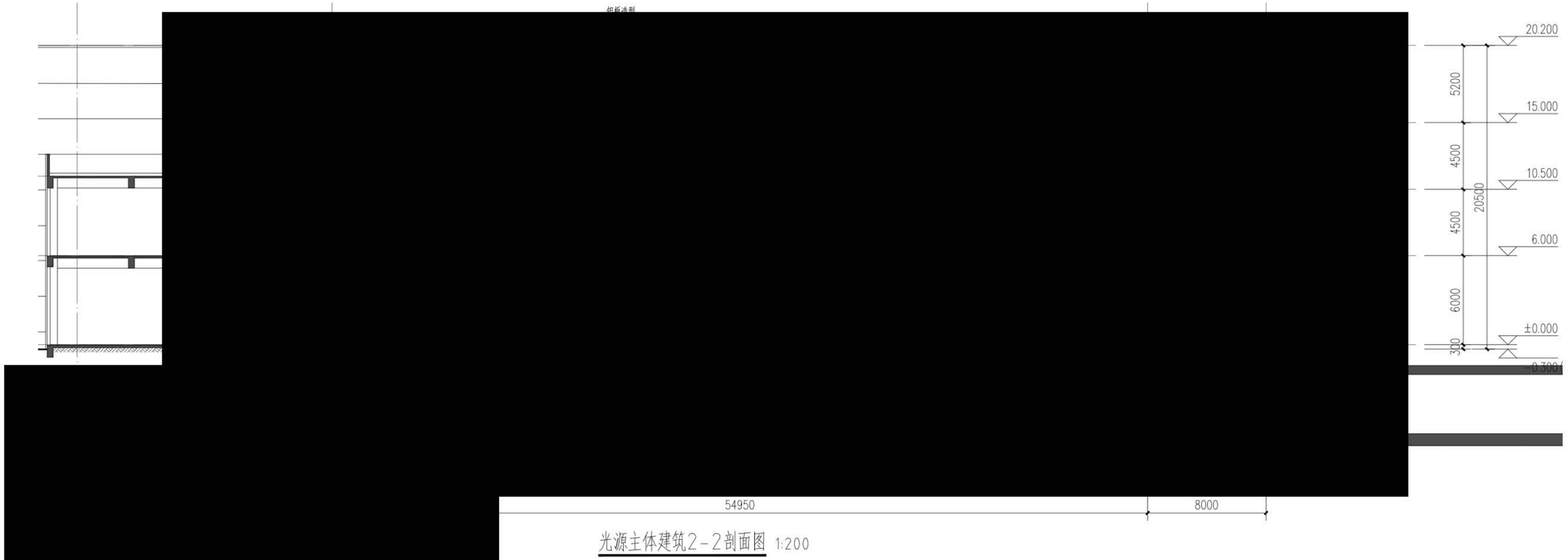
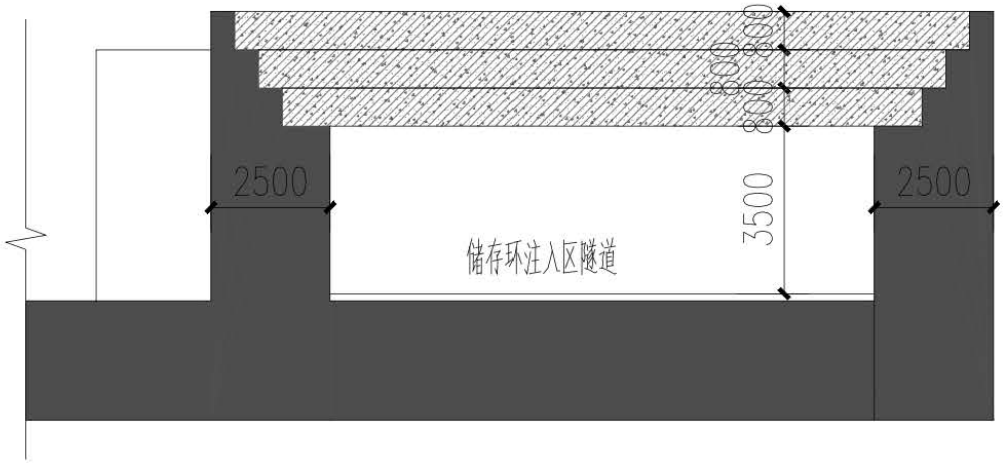
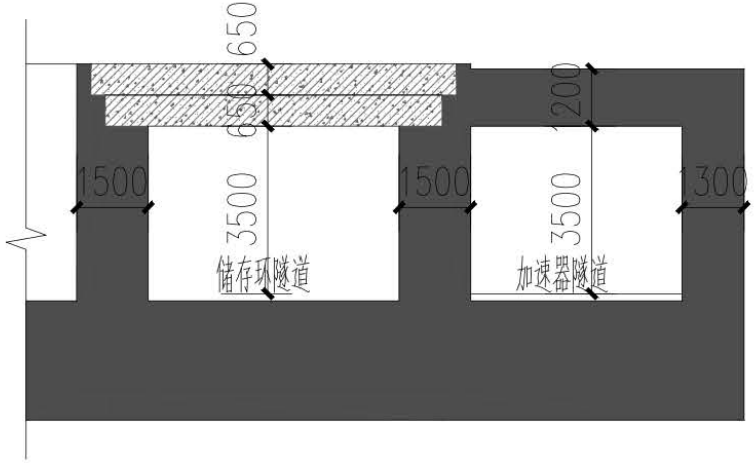


图 3-6 微观表征子系统主体建筑剖面图 2



注入区隧道剖面图 1:200



加速器引出段隧道剖面图 1:200

图 3-7 微观表征子系统加速器隧道剖面图

3.1.3 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块位于整个园区南侧辐照楼，占地面积约23161 ㎡，总建筑面积约 38630 ㎡，为地上二层建筑，建筑规划高度约 22 米。

首层主要包含两大部分功能：辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块及相关工艺配套用房。其中辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块包含 ECR 离子源、直线（高能线）加速器隧道/同步加速器大厅、质子电子终端、材料辐照终端、电子加速器大厅、质子/氦离子加速器大厅、21#低能离子辐照终端、51#单粒子效应研究终端和预留终端等；工艺配套用房包含中央控制室、实验控制间、实验准备间、ECR 设备间、工艺空调机房、冷却水站等配套机房。

4.500 标高夹层主要功能为工艺配套用房及通用设备用房，主要包含工艺空调机房、舒适性空调机房、气瓶间、楼梯间及电梯厅等。

二层主要包含三大部分功能：工艺配套用房、实验区及通用设备用房。其中工艺配套用房包含高频设备间、工艺空调机房、工艺涉放排风机房等；实验区包含实验室、开放讨论区、茶水间、卫生间、工具间、探测器电子学实验室及会议室；通用设备用房包含设备间、汇聚机房、排风机房兼空调机房、通用机房、气瓶间、通用变配电房、空调机房及排风机房等。

各层的平面布局图和剖面图见图 3-8~图 3-12。

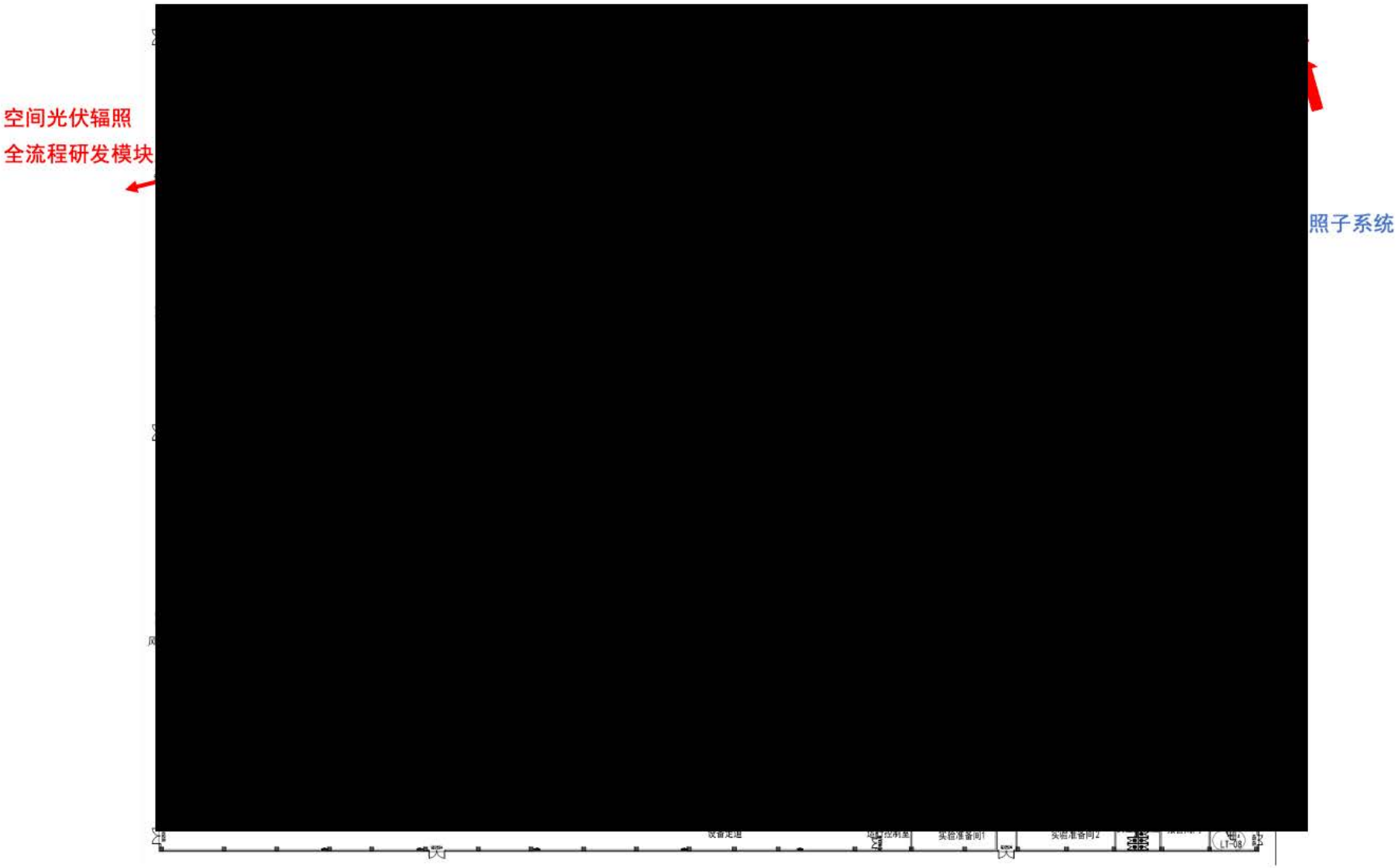


图 3-8 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块地上一层平面图

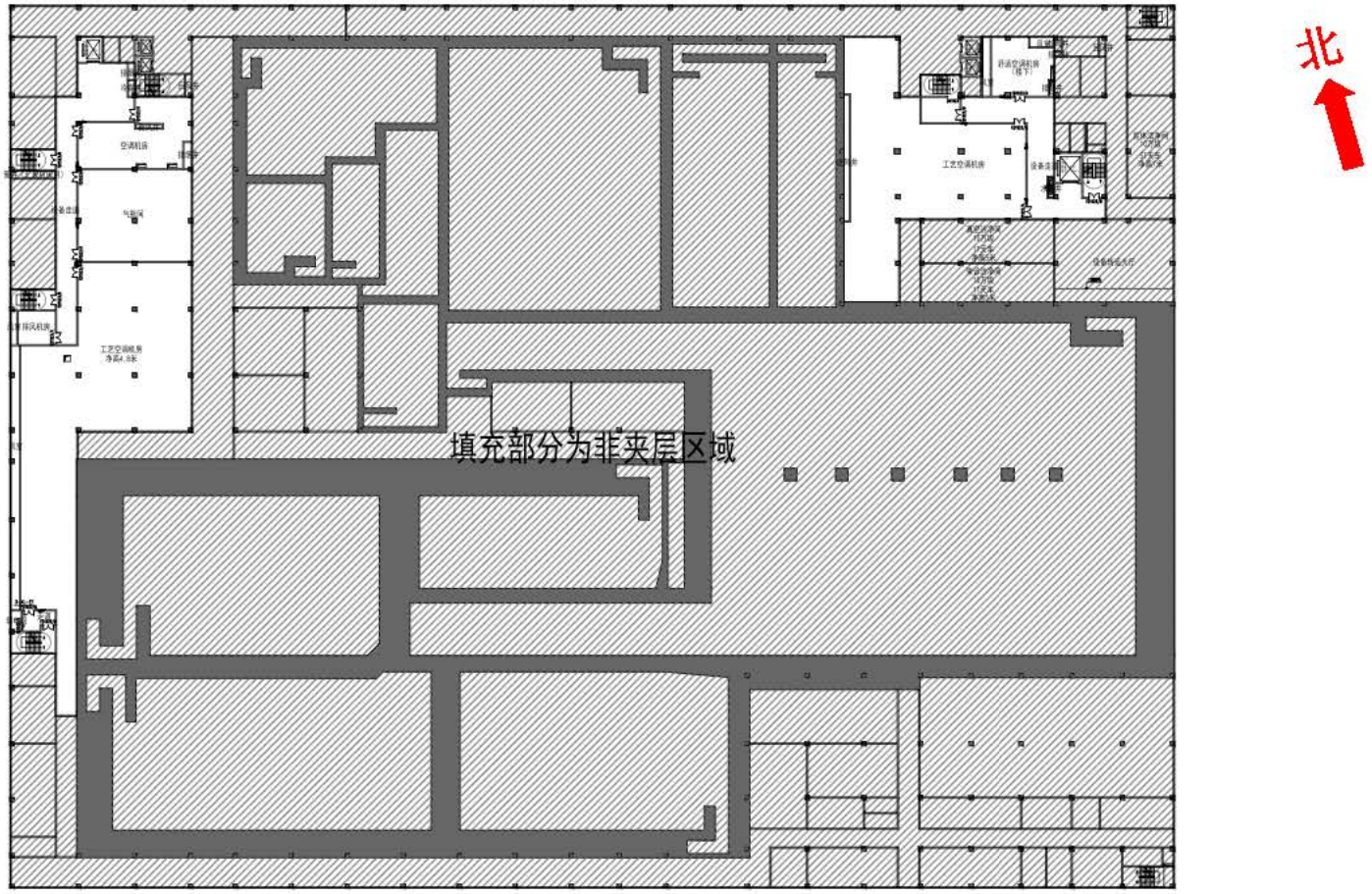


图 3-9 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块夹层平面图

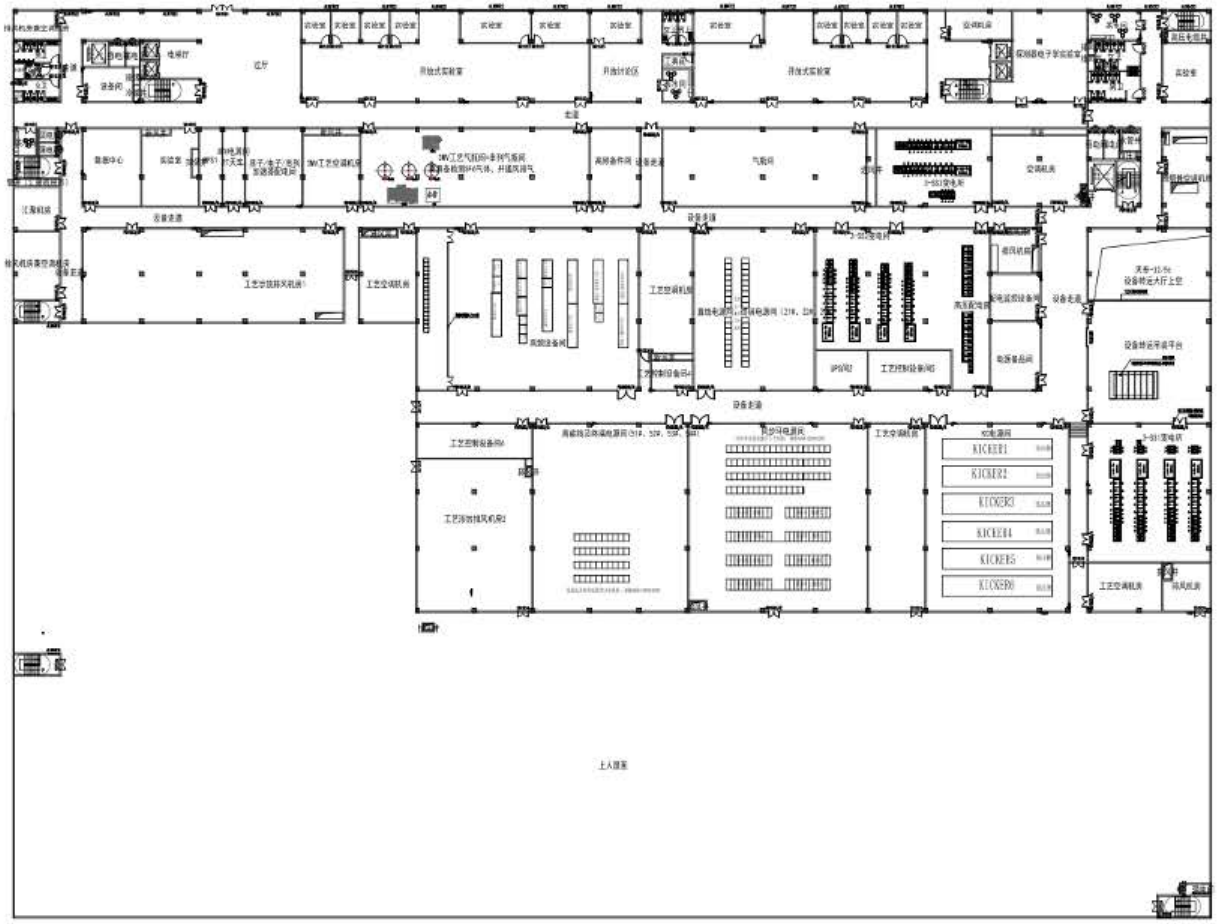


图 3-10 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块地上二层平面图

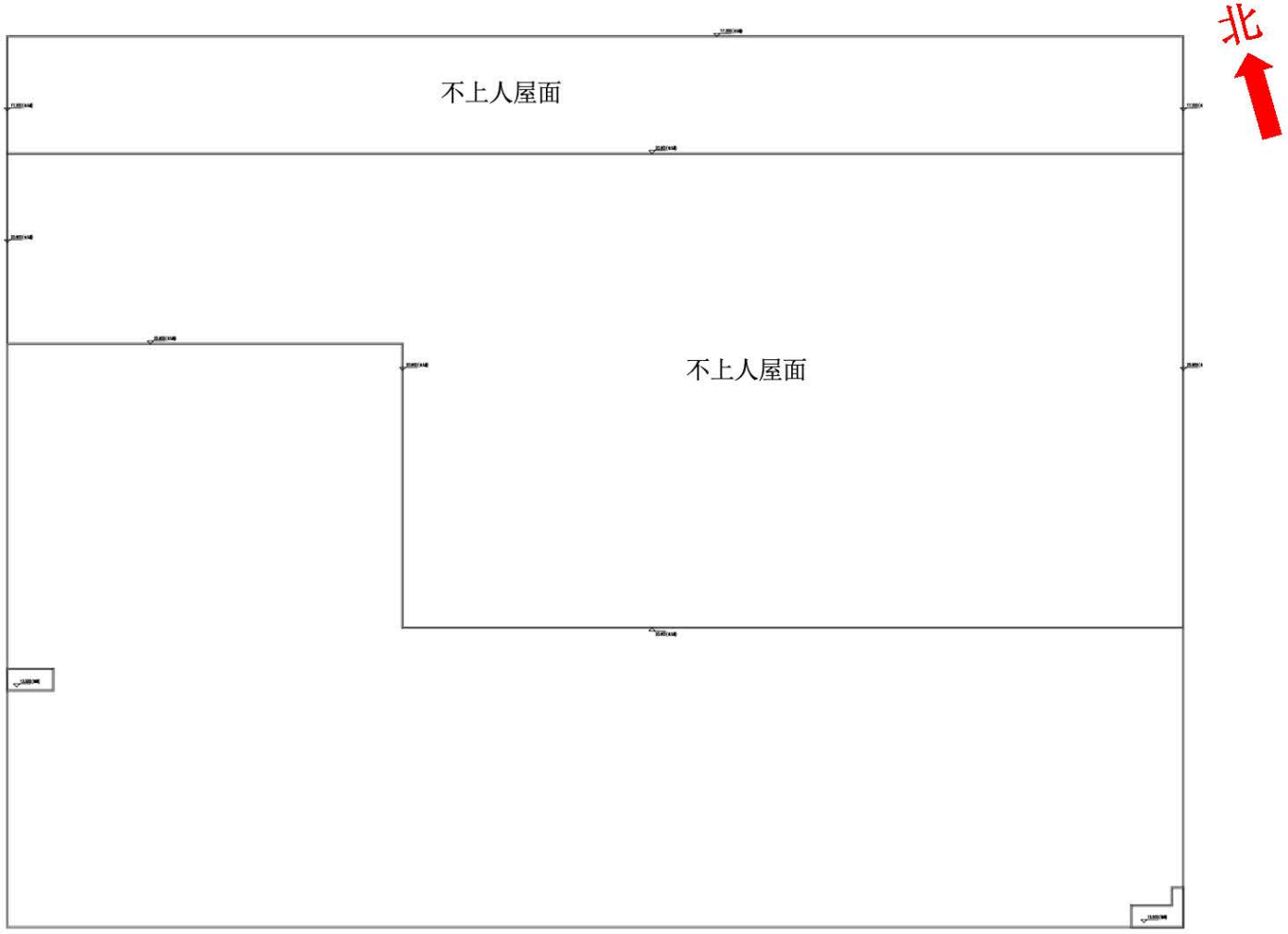


图 3-11 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块屋面

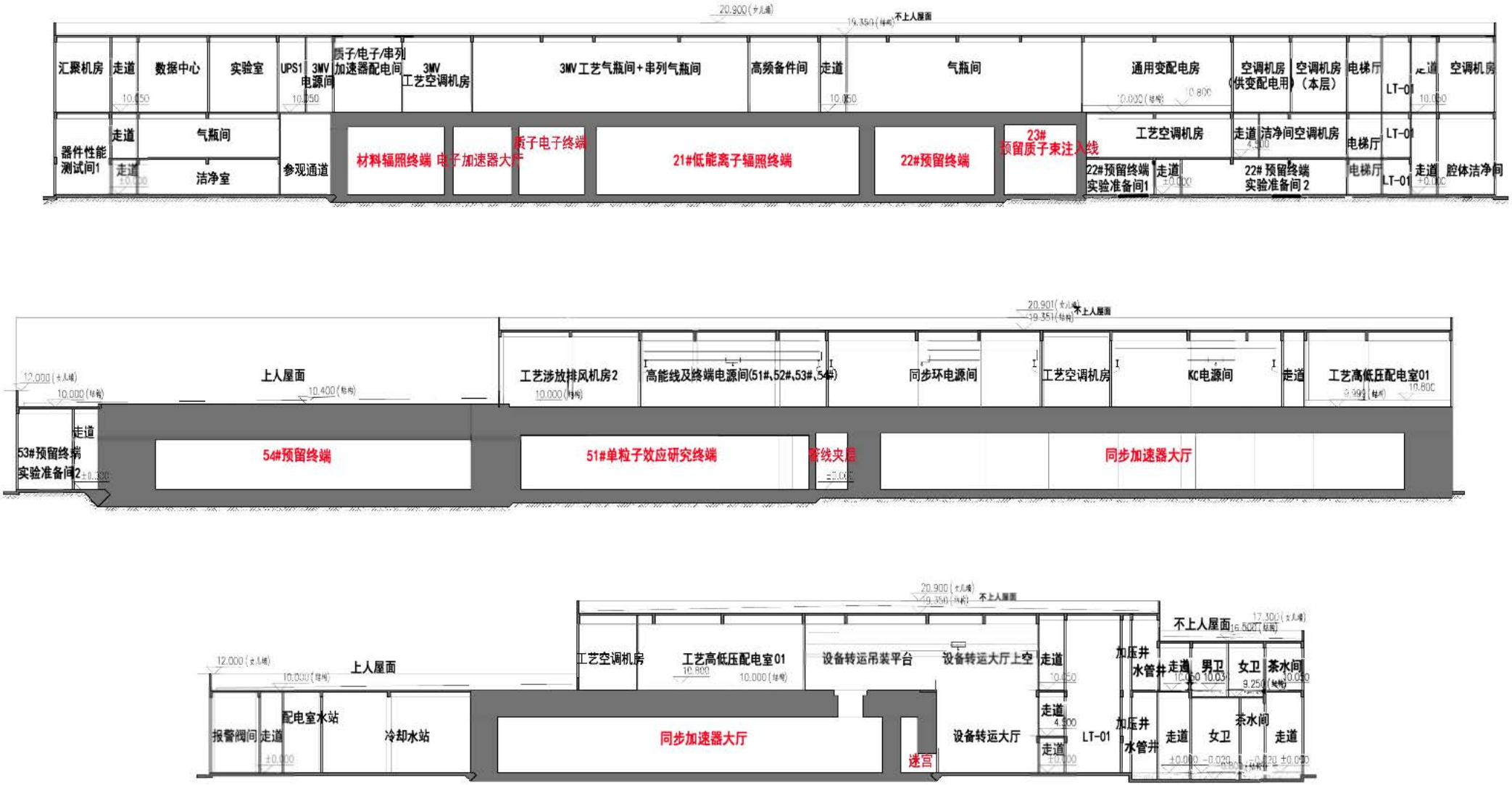


图 3-12 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块剖面图

3.1.4 介观表征子系统（高亮度中子源装置）

介观表征子系统位于园区东侧的介观楼内，介观楼是一栋局部地下一层、地上三层、局部四层的建筑，建筑面积为 4.6 万平方米。各层具体的布置见表 3-1，各层的平面布局图和剖面图见图 3-13~图 3-19。拟在介观楼使用的高亮度中子源装置主要布置在地上一层。

表 3-1 介观表征子系统不同楼层功能布局分布

楼层		布局分布
地下一层		水冷却系统设备区、取样间、维修间、电气间、液体污染物存放区、低放污水罐间、废物存储区、通用设备间等房间
地上一层	东侧	低温厅、卫生间、排风中心、污物转运厅、放射性废物暂存厅、压缩空气站、冷却风机房、供配电间、水冷泵房、空调机房、侯梯厅、备品间、氢气房等房间
	中间区域	直线加速器主隧道、直线加速器副隧道、离子源厅、废液存储间、废束站 1、废束站 2、靶站中心、高通量小角中子散射仪、通用中子粉末衍射仪等房间
	西侧	直线功率源大厅、离子源热备份室、辐射防护检查、辐射测量室、运输通道、直线工艺配电房、总高压配电房、直线控制室、卫生间、电梯厅、参观通道、热室、中控室、接待室等
地上二层		卫生间、茶水活动间、空调机房、工艺预留设备用房、机柜间、电源间、排风机房、隧道顶部、直线功率源大厅上空、高通量小角中子散射仪上空、通用中子粉末衍射仪上空、谱仪实验室、电梯厅等
地上三层		卫生间、弱电间、茶水活动间、空调机房、制冷机房、计算机房、排风机房、设备运输吊装大厅、隧道顶部上空、直线功率源大厅上空、谱仪实验室等
地上四层		空调机房、排烟机房、谱仪实验室、茶水间、卫生间、会议室、电梯厅、办公室、强电间、弱电间等

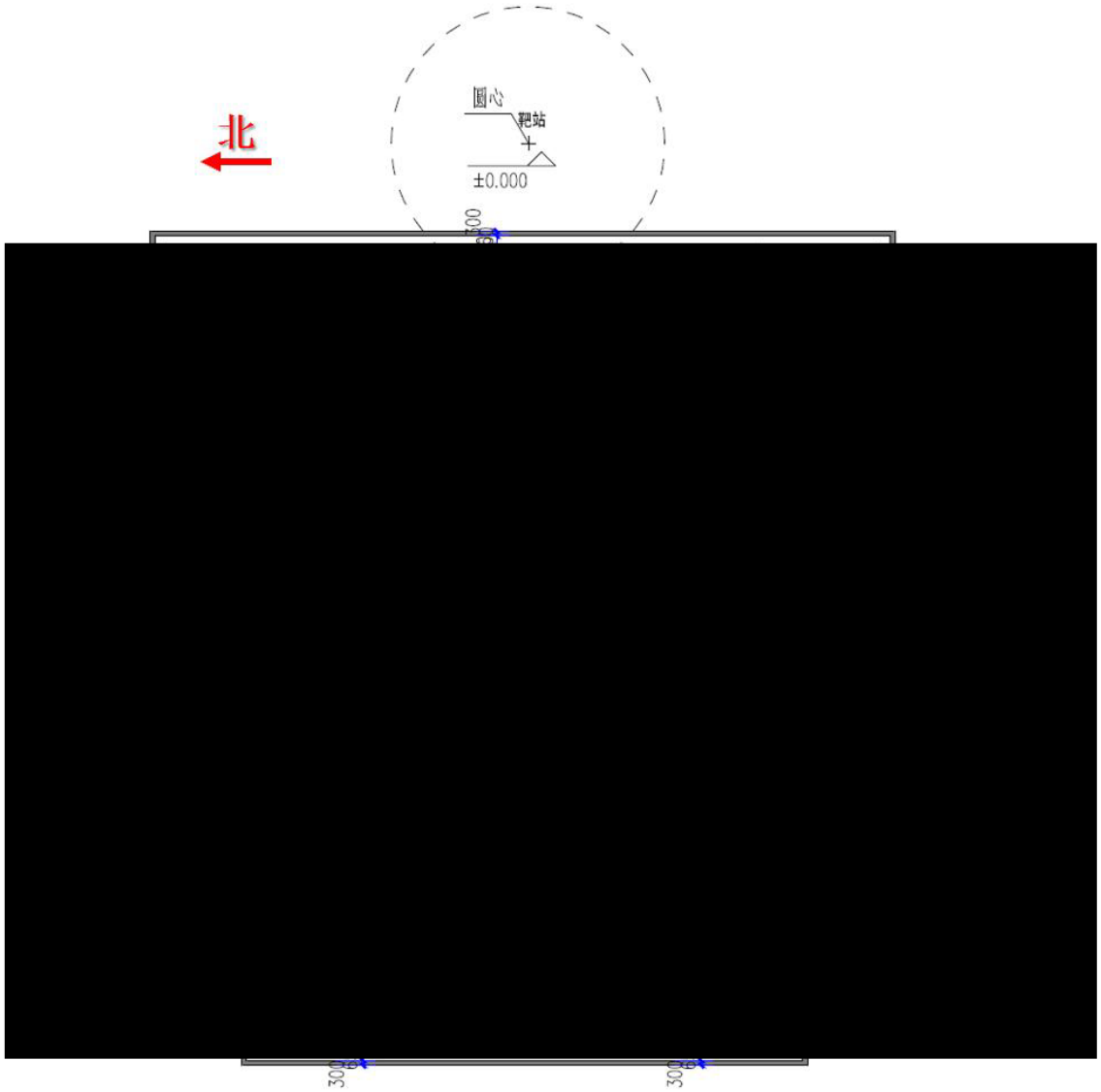


图 3-13 介观表征子系统地下一层平面布局图

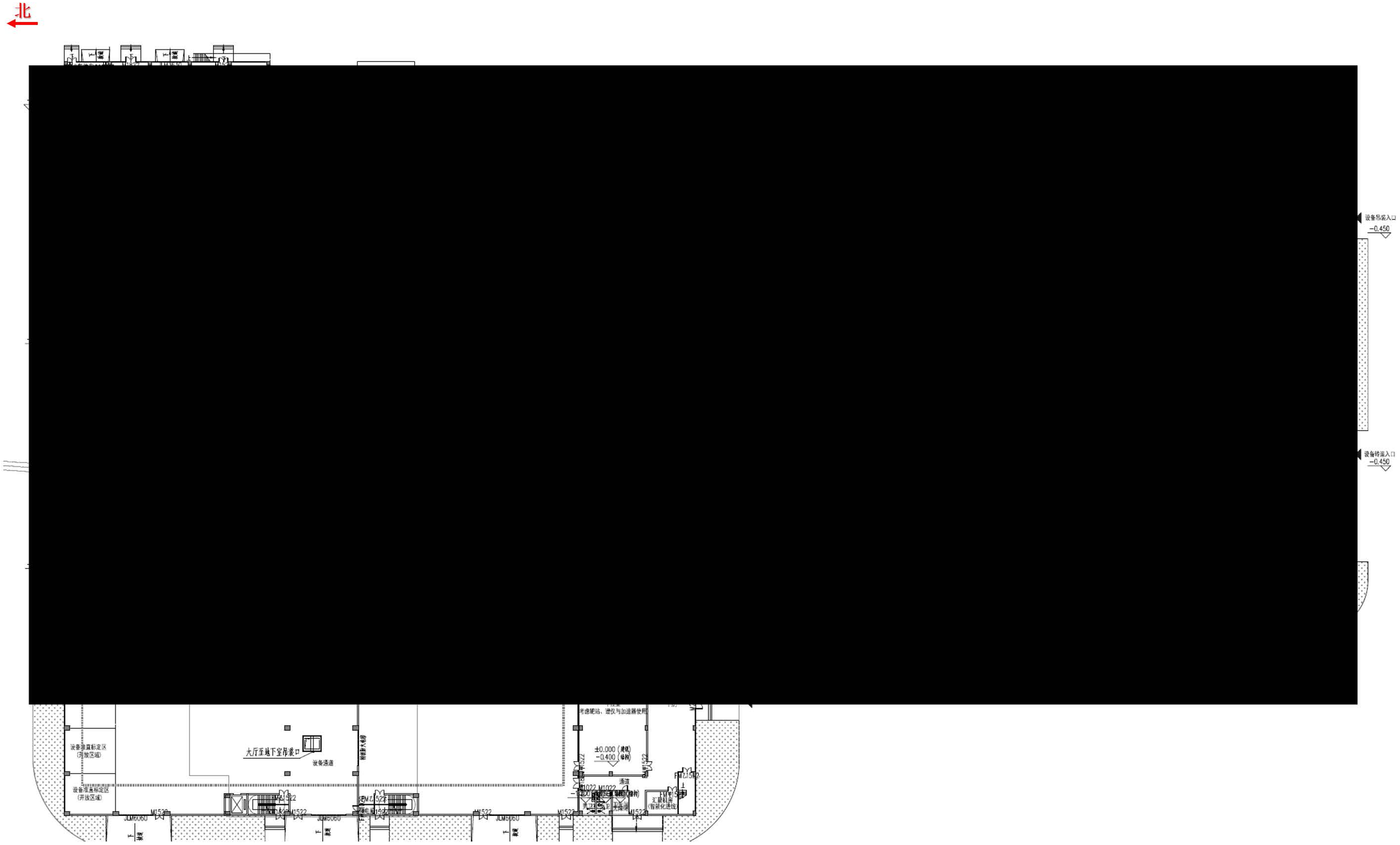


图 3-14 介观表征子系统地上一层平面布局图

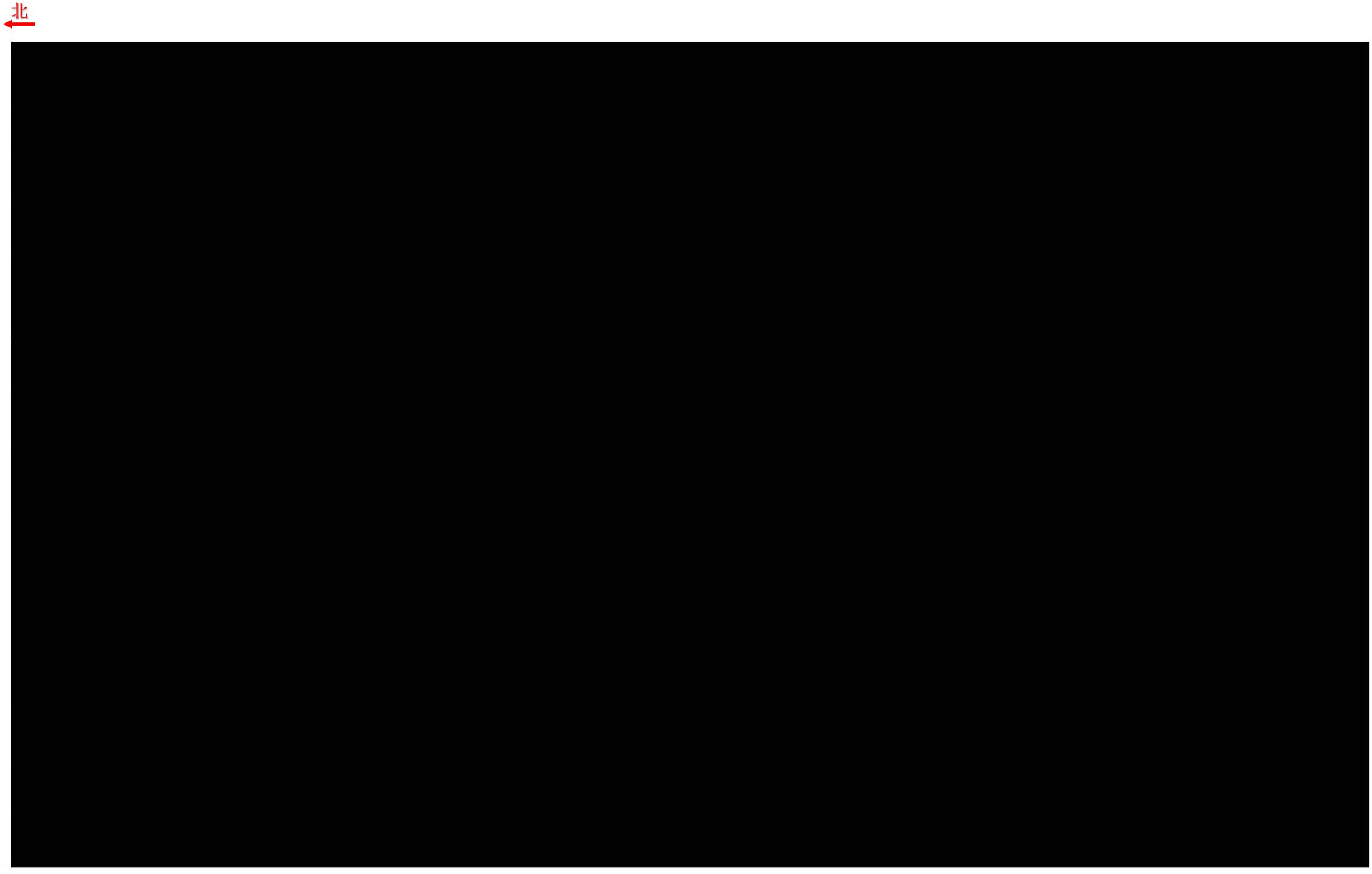


图 3-15 介观表征子系统地上二层平面布局图



图 3-16 介观表征子系统地上三层平面布局图



图 3-17 介观表征子系统地上四层平面布局图

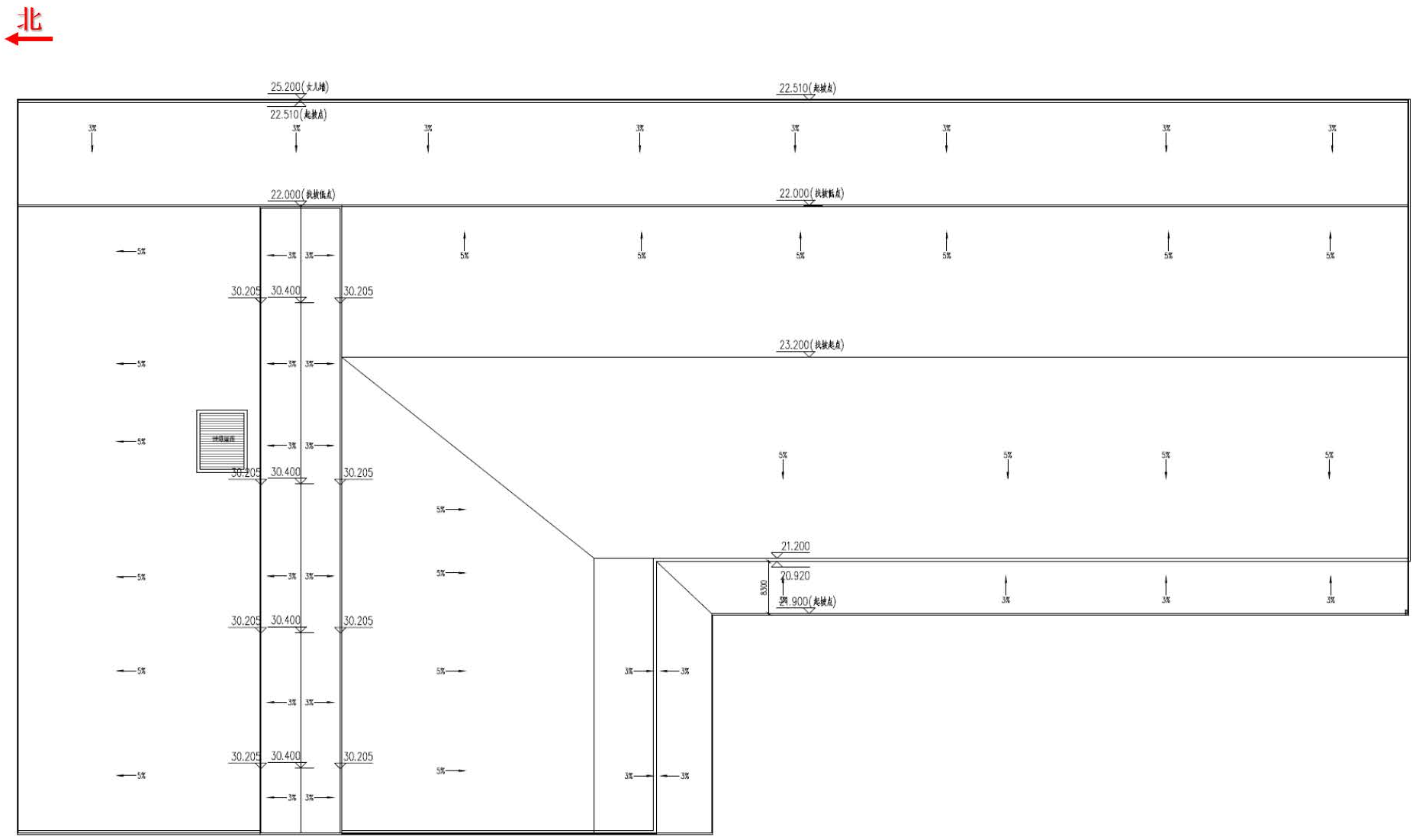


图 3-18 介观表征子系统屋顶平面布局图

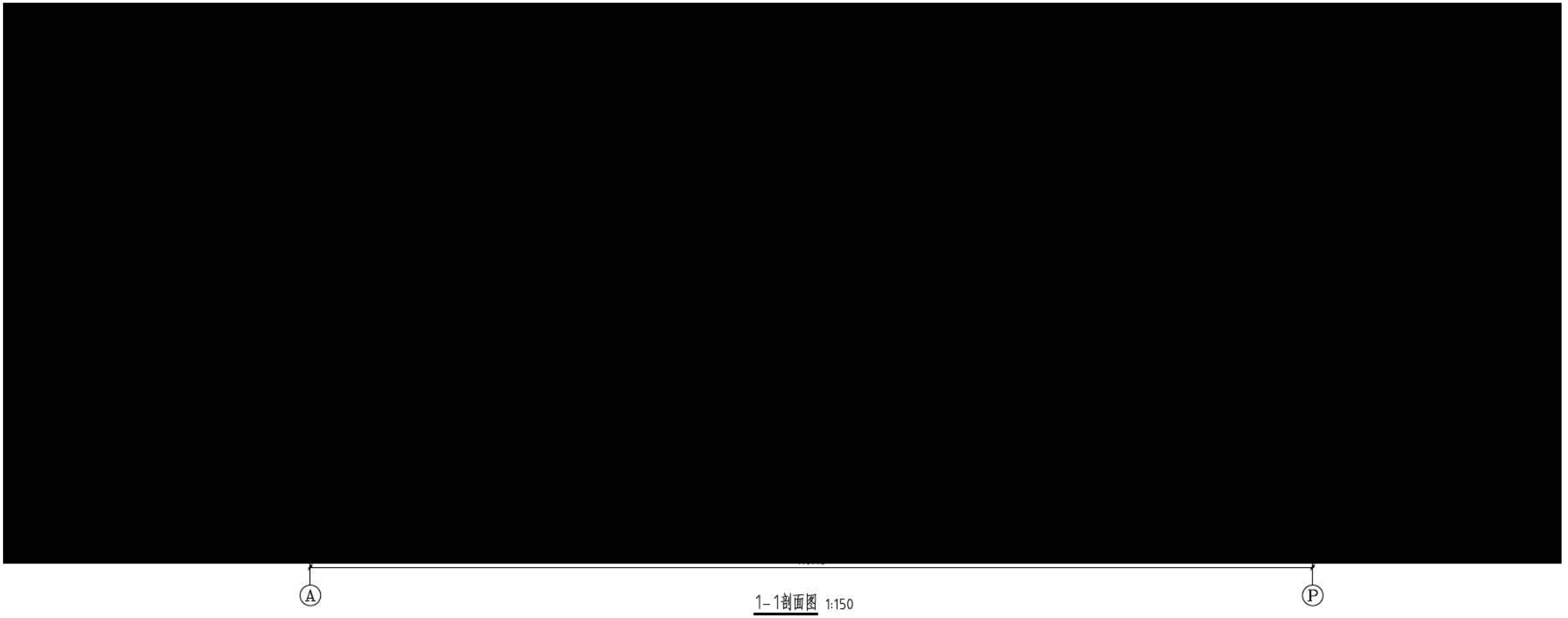


图 3-19 介观表征子系统剖面布局图

3.1.5 工业 CT

本项目双能工业 CT 系统拟建于技术安全楼，技术安全楼为双层建筑，总建筑面积 2244.88 平方米。其中双能工业 CT 系统位于检测大厅内，为双层贯穿结构，检测大厅混凝土屏蔽墙内部长 17.40m，宽 13.40m，高 10.25m，设备地坑深 2.60m。

检测大厅位于技术安全楼的西南侧。其一层的北侧紧邻专用工位配套件和送风间，东侧紧邻专用工位电气机房、排风间、防护门间和控制室，南侧紧邻 CT 调制水冷间、样品存储间和工装存储间，西侧为楼外空地，如图 3-20 所示；其二层的北侧紧邻刻度观察室、气瓶间、茶水间和新风机房，东侧和南侧为不上人屋面，西侧为室外空间，如图 3-21 所示；其屋顶为不上人屋面，如图 3-22 所示。剖面图如图 3-23 所示。

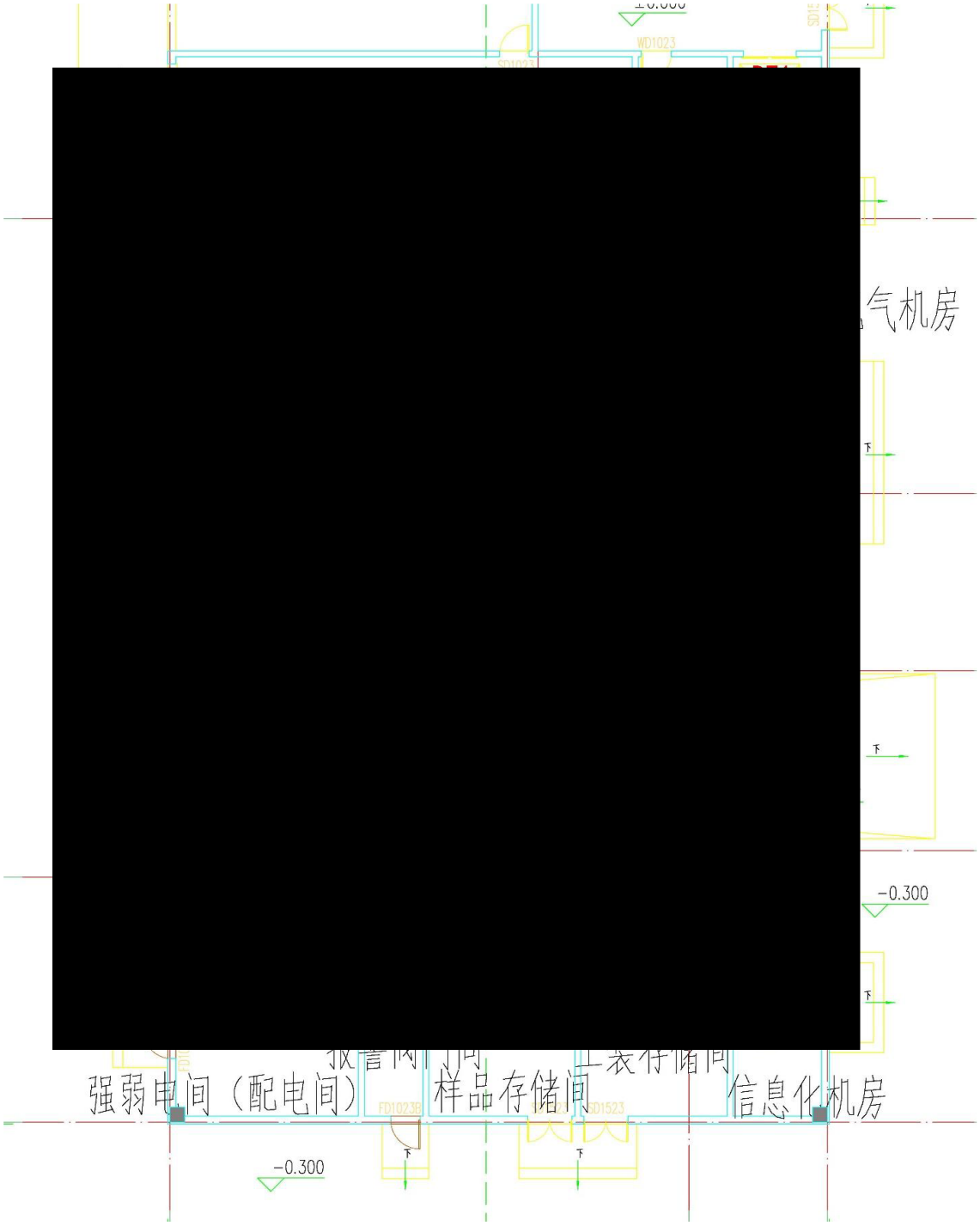


图 3-20　技术安全楼一楼平面布局图

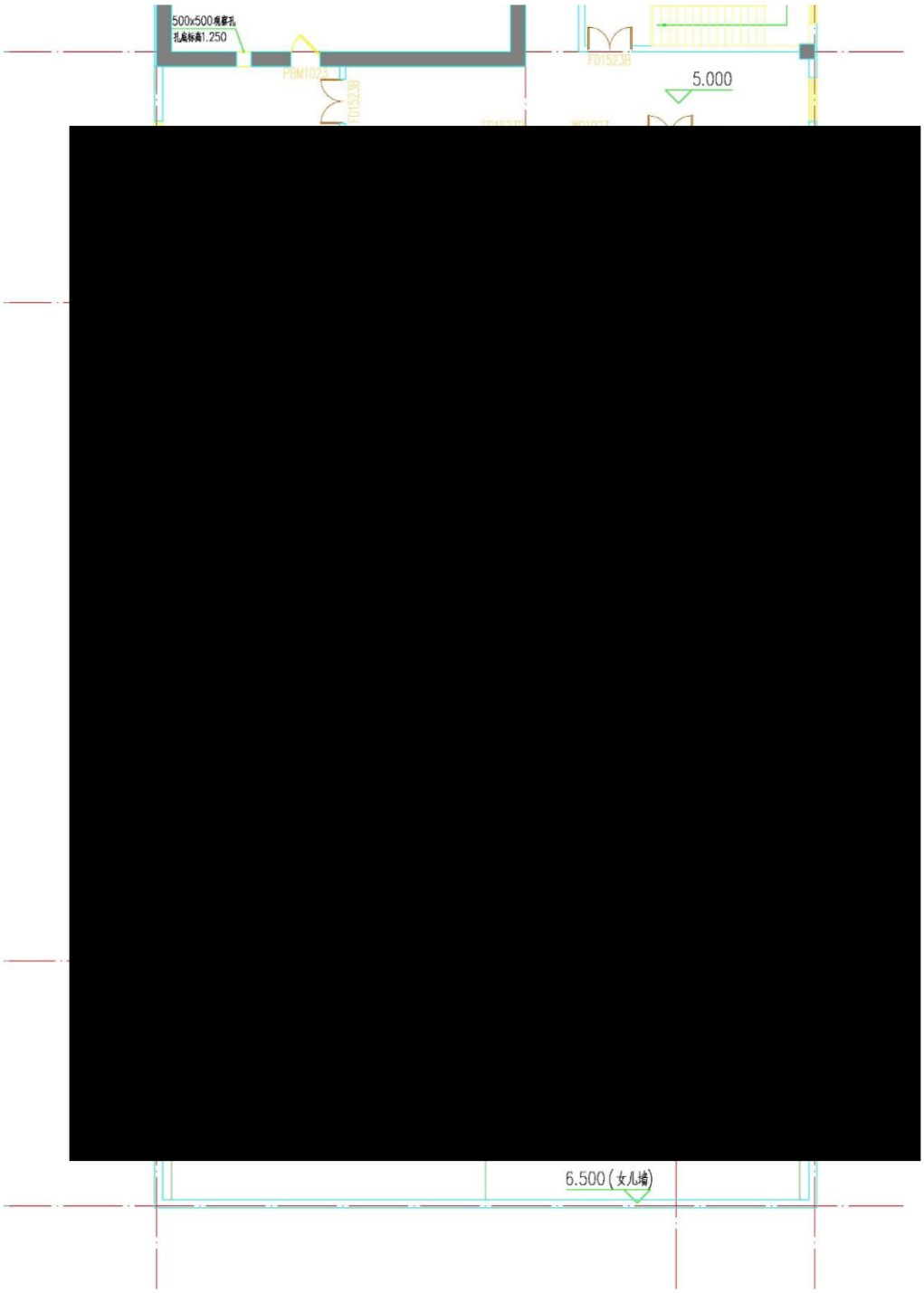


图 3-21　技术安全楼二楼平面布局图

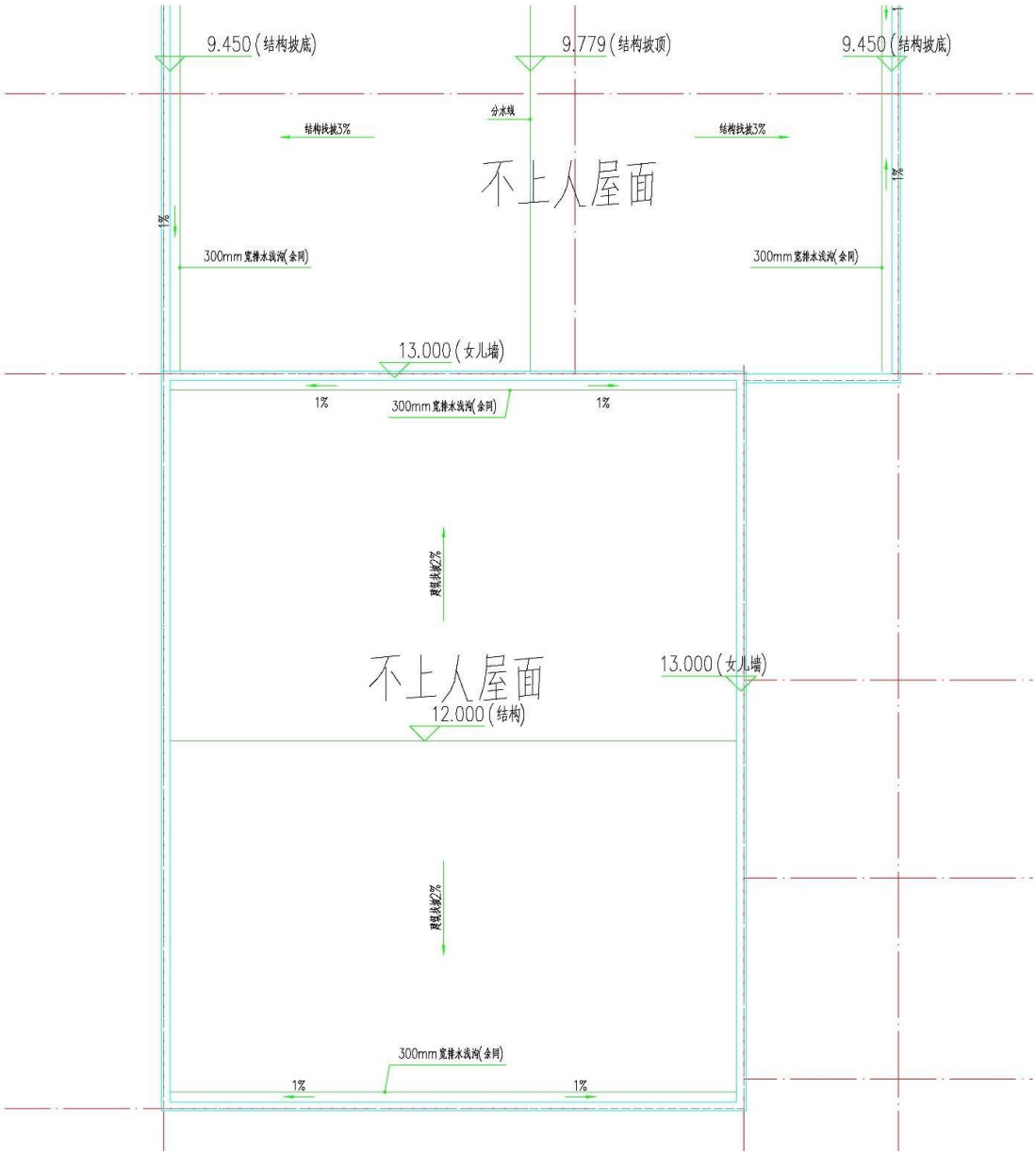


图 3-22　技术安全楼屋顶平面布局图



图 3-23　技术安全楼剖面布局图

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 微观表征子系统（光源）

3.2.1.1 装置原理及主要参数

本项目微观表征子系统（光源）是一台同步辐射装置，原理简要描述如下：电子直线加速器可将电子加速到最高能量 160MeV，通过低能传输线注入到增强器；增强器将电子加速到 3.0GeV 后，通过高能传输线注入到储存环；电子束流通过储存环不同直线节的插入件产生同步辐射 X 射线，经对应的光束线引至实验站。在实验站内，X 射线被利用来照射实验样品开展同步辐射实验。

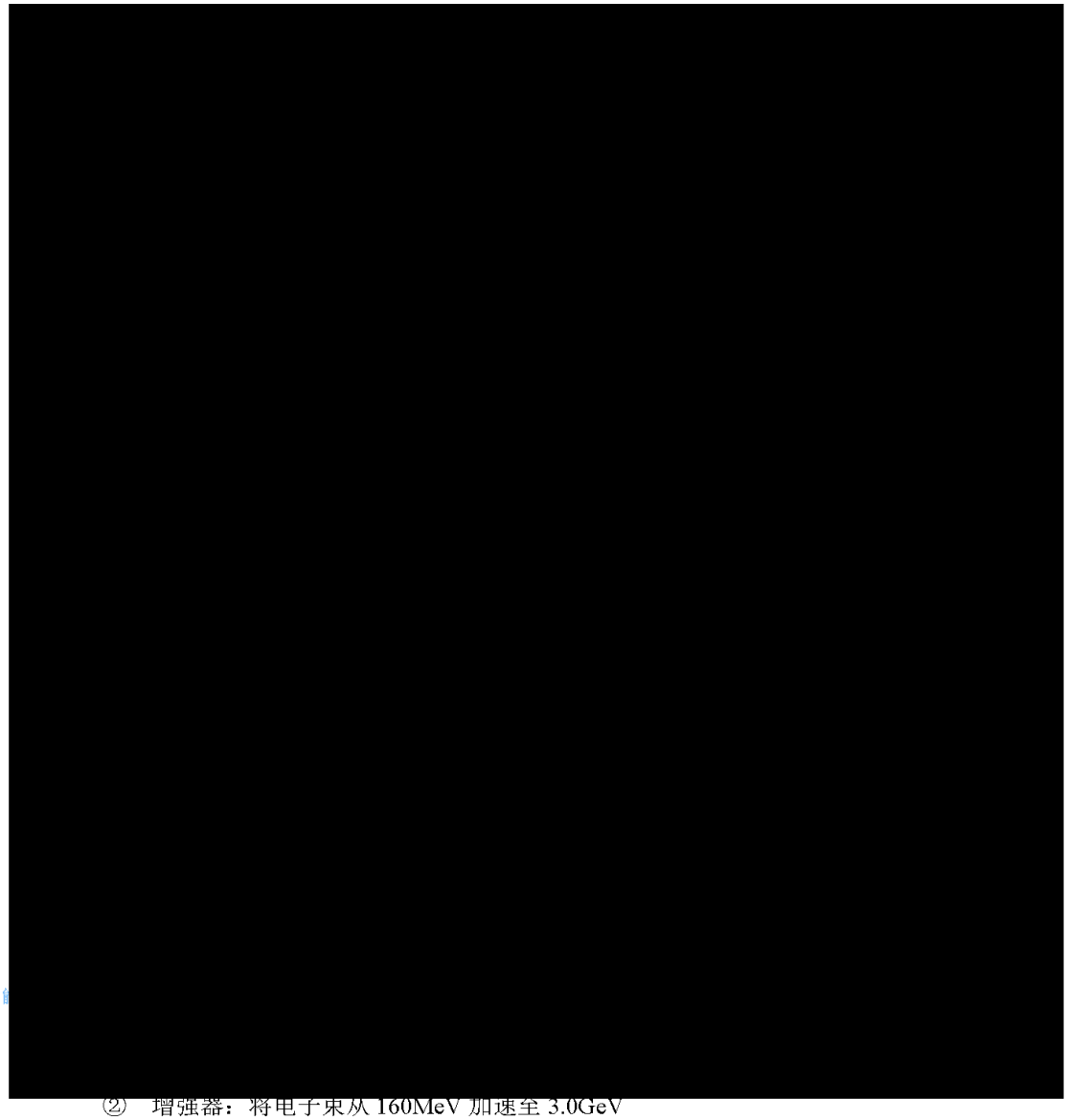
光源装置加速器及光束线站的主要参数分别见表 3-2、表 3-3，总体布局及工艺流程见图 3-24。

表 3-2 光源加速器主要参数一览表

储存环		
束流最高能量/GeV		3.0
束流最大流强/mA		500
环周长/m		288
长直线节数量和长度/m		12×5.0
标准直线节数量和长度/m		12×3.0
增强器		
注入能量/GeV		0.16
引出能量/GeV		3.0
重复频率/Hz		2
周长/m		266.4
直线加速器		
最高能量/MeV		160
束流	单脉冲电荷量	1 ns、0.5 nC
	多脉冲电荷量	10 ns、4 nC

表 3-3 光源首批光束线站概况一览表

线站名称	光源	能区	实验站			主要科学目标
D1 能源膜材料软共振专用线站	波荡器	240-2500 eV	共振软 X 射线散射实验站	软 X 射线吸收谱实验站		能源环境领域关键功能材料的跨尺度和动力学研究
D2 能源膜材料散射专用线站	波荡器	4.5-16 keV	高通量散射实验站（H1 实验站）	碳分子筛实验站（H2 实验站）	质子膜实验站（H3 实验站）	能源薄膜材料的跨时空尺度原位研究
D3 固态电池材料专用线站	扭摆器	4.5-22 keV	XAFS、XRD 实验	TXM 实验站		锂离子电池在充放电过程中的原位及非原位研究
D4 X 射线吸收谱学线站	扭摆器	4.5-30 keV，聚焦; 10-50 keV，非聚焦	吸收谱学实验站			能源材料领域关键材料的原位动态研究
D5 软 X 射线光电子谱线站	波荡器	50-1500 eV	近常压光电子谱实验站	角分辨光电子谱实验站		能源和电子信息领域功能材料的性质和作用机理研究
D6 原位表面衍射线站	波荡器	8-30 keV	通用表面衍射实验站	原位设备平台耦合衍射实验站		纳米科学、凝聚态物理和软物质等领域材料的界面和表面研究
D7 高能散射专用线站	超导扭摆器	50-100 keV	小型原位设备实验站	大型原位设备实验站		深海空天领域工程材料的服役及近服役条件下的原位研究
D8 动态成像专用线站	超导扭摆器	50-100 keV	小型原位设备实验站	动态快速成像实验站	风洞成像实验站	深海空天工程材料的微纳组织结构与服役性能间的构效关系研究
D9 纤维材料专用线站	波荡器	8-15 keV	微聚焦 μSAXS 实验站	工业应用实验站		碳纤维生产制备全流程全链条的研发表征
D10 原位纳米探针线站	波荡器	5-22 keV	纳米探针实验站			关键工程材料极端制备与服役过程微结构的演化机制



② 增强器：将电子束从 160MeV 加速至 3.0GeV

③ 储存环：环内电子束产生同步辐射光

④ 光束线：按实验需求对同步辐射光进行调制，随后传输到实验站

⑤ 实验站：样品安放与实验表征

图 3-24 光源装置总体布局及工艺流程示意图

3.2.1.2 装置组成

微观表征子系统（光源）主要由直线加速器、增强器、储存环、光束线站构成。直线加速器把热阴极电子枪发射的电子束加速到 160 MeV，然后经过低能传输线送入增强器。增强器将直线加速器输入的电子束由 160 MeV 提升到 3.0GeV，经由高能传输线注

入到储存环中。储存环电子最高能量为3.0 GeV，周长288米，最大束流流强500 mA，发射度约1 nm·rad，可保持长期运行，为10条光束线站稳定供光。整个光源装置束流中心高度是1.3米。

3.2.1.2.1 直线加速器

光源的直线加速器位于装置东北区域的直线加速器隧道内，主要由电子枪和聚束段、主加速器、低能传输线及微波、脉冲功率源、真空、机械、控制、束测、磁铁、电源、工艺等系统组成。直线加速器在束流线上的布局包括1台100 kV的热阴极栅控电子枪、1套次谐波聚束器SHB（Sub-harmonic buncher，SHB）、1套行波聚束器（Buncher）、4根3 m长等梯度的S波段SLAC型加速管及相应微波功率源、2套三合一四极磁铁组及2个束流测量站等。第一个束流测量站位于聚束器出口处，主要用于聚束系统的调试；第二个束流测量站位于最后一个加速器出口，主要用于测量直线加速器出口的束流参数。直线加速器的技术参数见表 3-4，总体布局见图 3-25。

表 3-4 光源直线加速器技术参数

参数	值
电子最高能量	160 MeV
束流	单脉冲电荷量1 ns、0.5 nC 多脉冲电荷量10 ns、4 nC
中心能量稳定度	0.5%
能散度	0.5% (rms)
归一化发射度	50 mm·mrad
工作频率	2997.924 MHz
次谐波频率	499.654 MHz

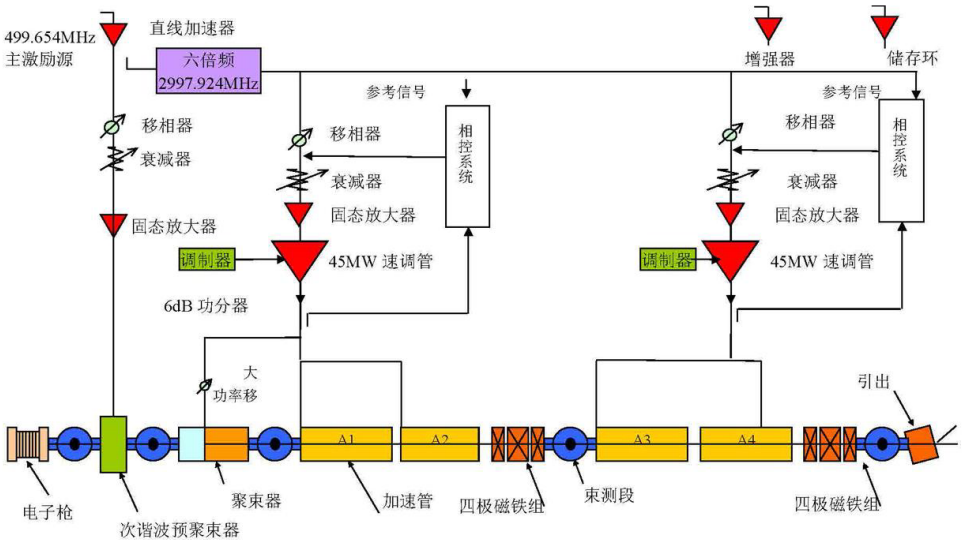


图 3-25 光源直线加速器总体布局示意图

3.2.1.2.2 增强器

光源的增强器周长约 266.4m，与储存环共用隧道。增强器是一台高能电子同步加速器，作用是把从直线加速器传输来的 160 MeV 电子束加速到储存环所需的最高能量 3.0 GeV，然后注入到储存环，主要由磁聚焦结构、高能传输线及高频、真空、机械、控制、束测、注入引出、磁铁、电源、工艺等系统组成，技术参数见表 3-5，总体布局见图 3-26。

表 3-5 光源增强器主要参数

参数	值
注入能量	0.16 GeV
引出能量	3.0 GeV
重复频率	2 Hz
周长	266.4 m

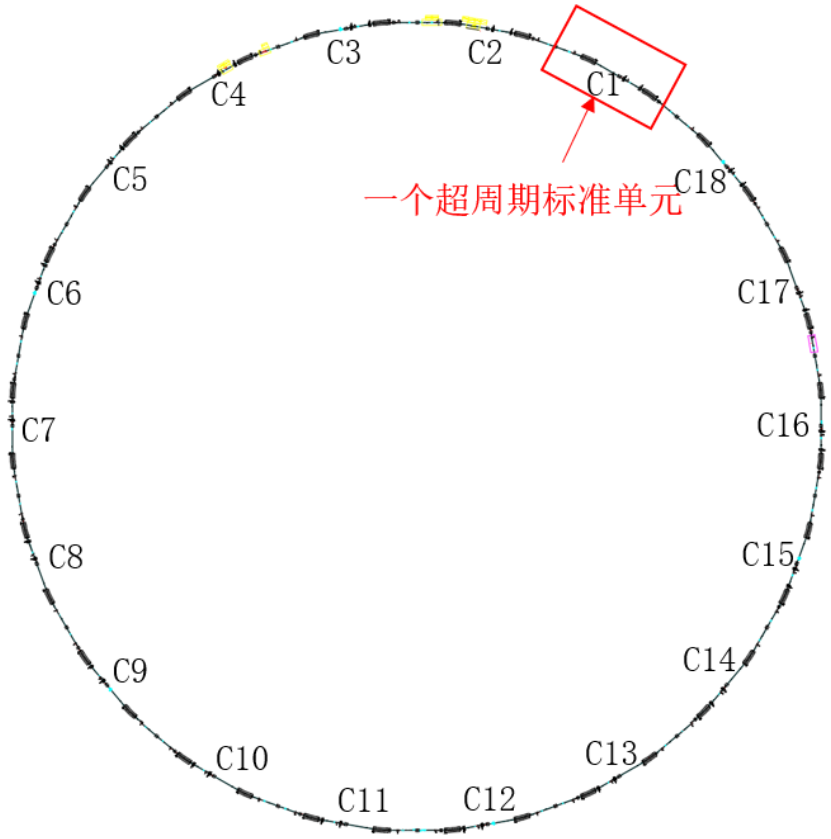


图 3-26 光源增强器总体布局示意图

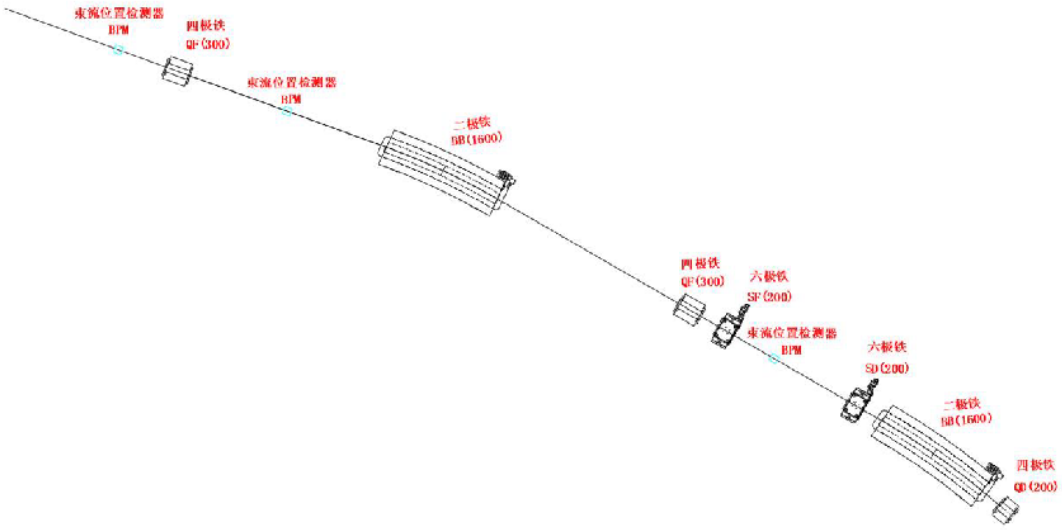


图 3-27 光源增强器一个超周期标准单元布局图

增强器的注入采用单圈注入的方式，注入系统由一个切割磁铁和一个大孔径冲击磁铁组成。能量为 160 MeV 的电子束流从直线加速器引出，经过低能传输线（LTB）到达增强器注入系统的切割磁铁，切割磁铁将束流偏转，然后又经过 QD 四极磁铁与增强器的平衡轨道相交，最后在大孔径冲击磁铁的作用下，注入到增强器的中心轨道。冲击磁铁放在 QD 四极磁铁后面可以降低冲击磁铁的踢角。增强器注入系统的布局见图 3-28，注入点位置见图 3-29。

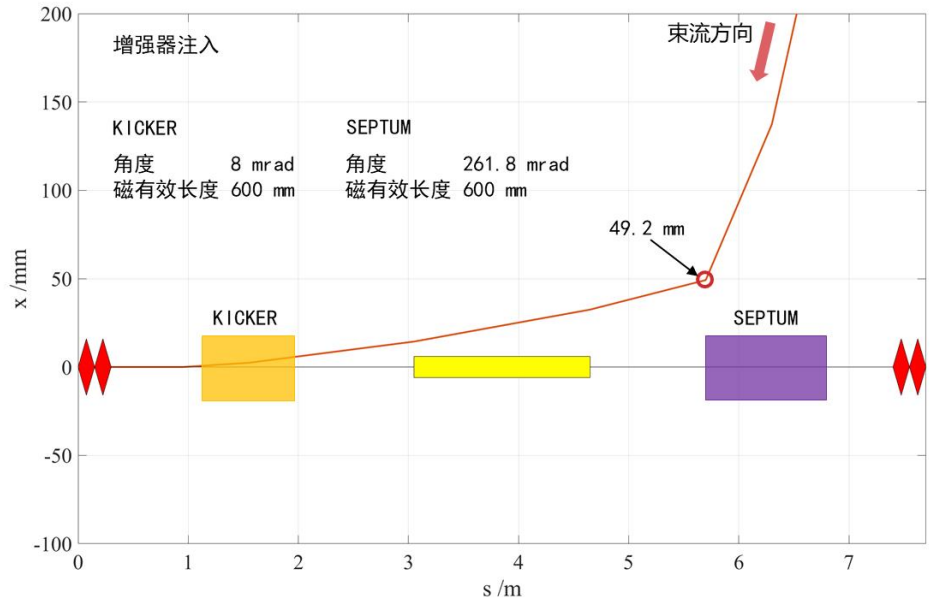


图 3-28 光源增强器注入系统布局示意图

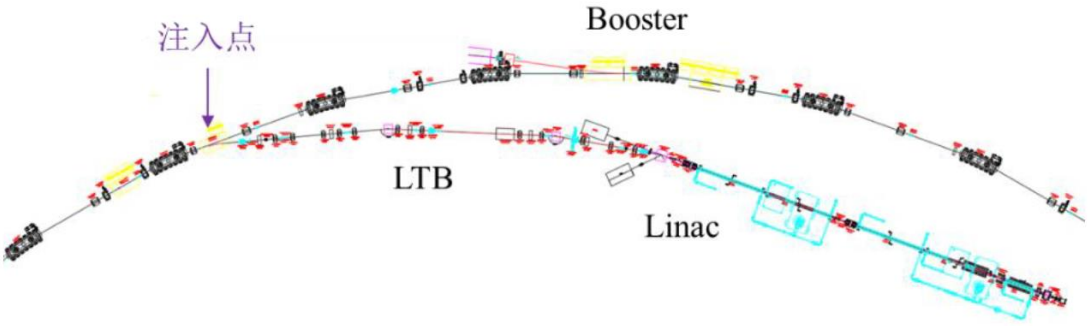


图 3-29 光源增强器注入点位置

增强器的引出采用单圈快引出的方式。增强器的引出系统由 2 块冲击磁铁和 2 块切割磁铁组成。引出束流在 2 块冲击磁铁的作用下偏离增强器的中心轨道。束流经过一块 QD 四极磁铁后，又在两块切割磁铁的作用下偏转，之后束流进入高能传输线（BTS），并最终经储存环的注入系统进入储存环。增强器引出系统的布局见图 3-30，引出点位置见图 3-31。

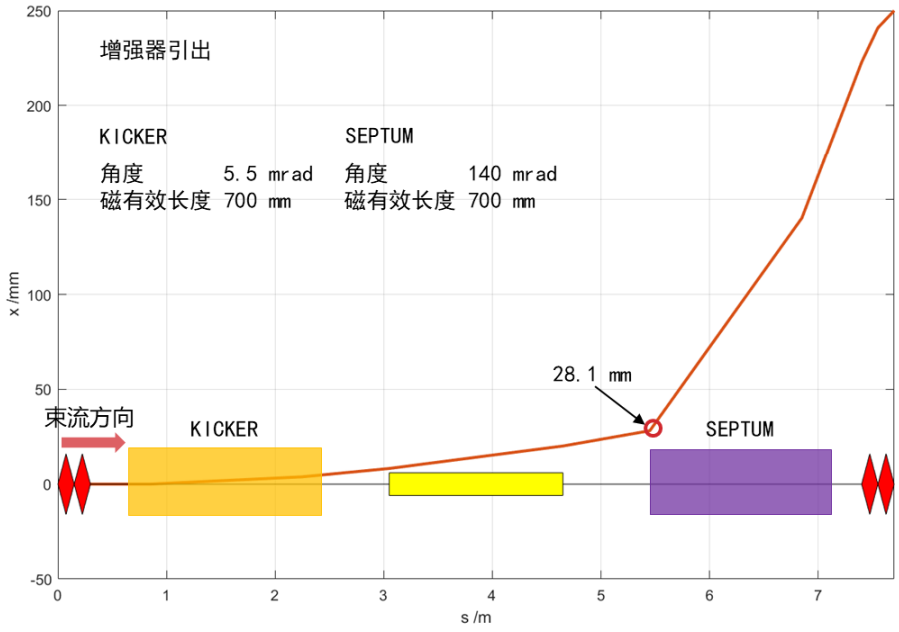


图 3-30 光源增强器引出系统布局示意图

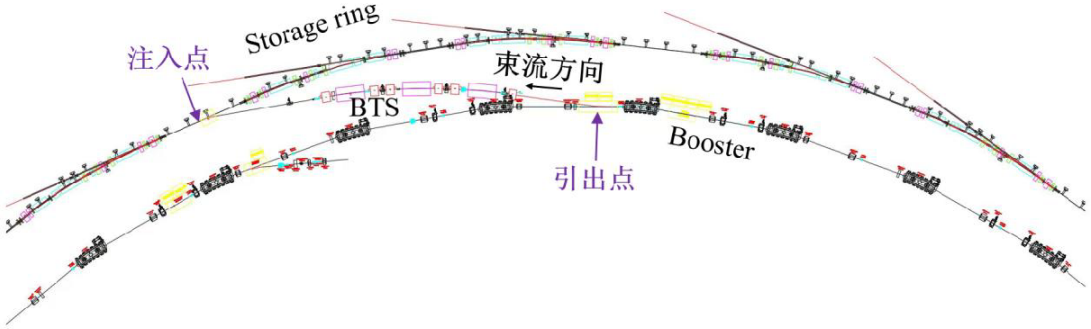


图 3-31 光源增强器引出点位置示意图

3.2.1.2.3 储存环

储存环是一种大型环形粒子加速器，内部电子束在磁铁电磁场（主要是二极磁铁偏转、四极磁铁聚焦）作用下沿环形轨道运行。利用高频电场持续补充电子束的辐射损失，实现电子束以固定速度（能量）运转。

光源的储存环周长约 288m，与增强器共用隧道。整个储存环由 12 个相同的 DTBA（双重三弯铁消色散结构单元）排列组成，每个 DTBA 长 24 米，可对半分成 2 个互相对称的模块，见图 3-34。主体设备主要由磁铁、真空以及束测元件构成；直线节是各类不同插入件的安装位置，分为两种，长度分别为 5.0 米和 3.0 米，共计 24 个。储存环的技术参数见表 3-6，总体布局见图 3-35。

表 3-6 光源储存环主要参数

参数	值
束流最高能量/ GeV	3.0
束流最大流强/ mA	500
环周长/ m	288
长直线节数量和长度 / m	12×5.0
标准直线节数量和长度 / m	12×3.0
高频频率/ MHz	499.654



图 3-32 光源储存环半个标准单元设备三维图

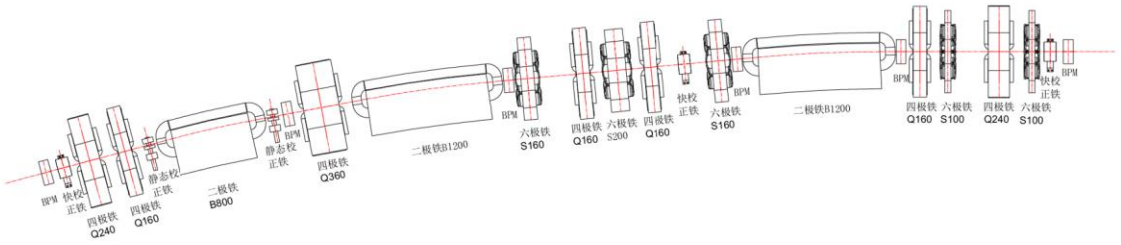


图 3-33 光源储存环半个标准单元设备布局图

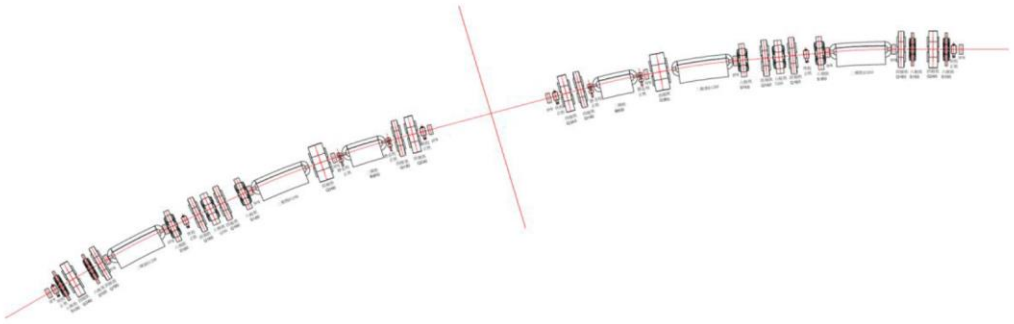


图 3-34 光源储存环一个标准单元布局图（沿中心线两侧束流元件对称布置）

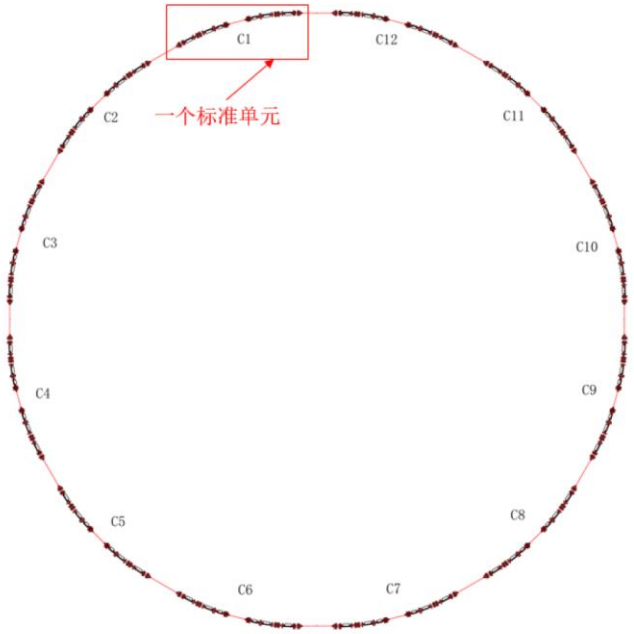


图 3-35 光源储存环总体布局示意图

3.2.1.2.4 光束线站

微观表征子系统的光束线站组成部分包括前端区、光束线、实验站。

前端区是连接储存环和光束线之间的超高真空段。其主要作用是为储存环提供真空保护、屏蔽有害的高能辐射、吸收多余的辐射功率、限制同步辐射的出口尺寸和保护下游光学元件等。

光束线是包含光学、超高真空、精密机械、电子学控制、辐射安全等多种技术为一体的高技术设备。主要功能是对同步光进行单色化、聚焦、传输等处理，以满足不同的实验研究需求。

实验站是用户利用光束线引出的同步光开展实验研究的装置。实验站通常包括样品操作台与样品环境、探测器与数据采集系统、辐射安全系统等。

微观表征子系统首批建设 10 条插入件光束线站，包括：能源膜材料软共振专用线站、能源膜材料散射专用线站、固态电池材料专用线站、X 射线吸收谱学线站、软 X 射线光电子谱线站、原位表面衍射线站、高能散射专用线站、动态成像专用专用线站、纤维材料专用线站、原位纳米探针线站。插入件采用了技术成熟的 4.2 T 超导 Wiggler、常规 Wiggler、EPU 和真空室内 Undulator，实现了光子能区从 50 eV 到 100 keV 的宽能区覆盖。单色器采用光栅单色器、液氮冷却双晶单色器和高能劳尔单色器等成熟技术。光束线站系统各线站主要功能见表 3-7。各光束线站布局见图 3-36 至图 3-45。

表 3-7 光源各条光束线站主要功能表

线站名称	光源	能区	实验站			主要科学目标
D1 能源膜材料软共振专用线站	波荡器	240-2500 eV	共振软 X 射线散射实验站	软 X 射线吸收谱实验站		能源环境领域关键功能材料的跨尺度和动力学研究
D2 能源膜材料散射专用线站	波荡器	4.5-16 keV	高通量散射实验站（H1 实验站）	碳分子筛实验站（H2 实验站）	质子膜实验站（H3 实验站）	能源薄膜材料的跨时空尺度原位研究
D3 固态电池材料专用线站	扭摆器	4.5-22 keV	XAFS、XRD 实验	TXM 实验站		锂离子电池在充放电过程中的原位及非原位研究
D4 X 射线吸收谱学线站	扭摆器	4.5-30 keV，聚焦; 10-50 keV，非聚焦	吸收谱学实验站			能源材料领域关键材料的原位动态研究
D5 软 X 射线光电子谱线站	波荡器	50-1500 eV	近常压光电子谱实验站	角分辨光电子谱实验站		能源和电子信息领域功能材料的性质和作用机理研究
D6 原位表面衍射线站	波荡器	8-30 keV	通用表面衍射实验站	原位设备平台耦合衍射实验站		纳米科学、凝聚态物理和软物质等领域材料的界面和表面研究
D7 高能散射专用线站	超导扭摆器	50-100 keV	小型原位设备实验站	大型原位设备实验站		深海空天领域工程材料的服役及近服役条件下的原位研究
D8 动态成像专用线站	超导扭摆器	50-100 keV	小型原位设备实验站	动态快速成像实验站	风洞成像实验站	深海空天工程材料的微纳组织结构与服役性能间的构效关系研究
D9 纤维材料专用线站	波荡器	8-15 keV	微聚焦 μSAXS 实验站	工业应用实验站		碳纤维生产制备全流程全链条的研发表征
D10 原位纳米探针线站	波荡器	5-22 keV	纳米探针实验站			关键工程材料极端制备与服役过程微结构的演化机制



图 3-36 D1 能源膜材料软共振专用线站布局示意图



图 3-37 D2 能源膜材料散射专用线站布局示意图

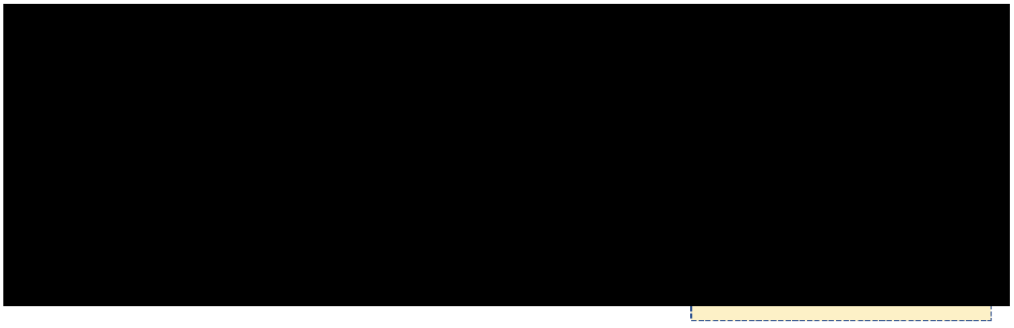


图 3-38 D3 固态电池材料专用线站布局示意图



图 3-39 D4 X 射线吸收谱学线站布局示意图



图 3-40 D5 软 X 射线光电子谱线站布局示意图

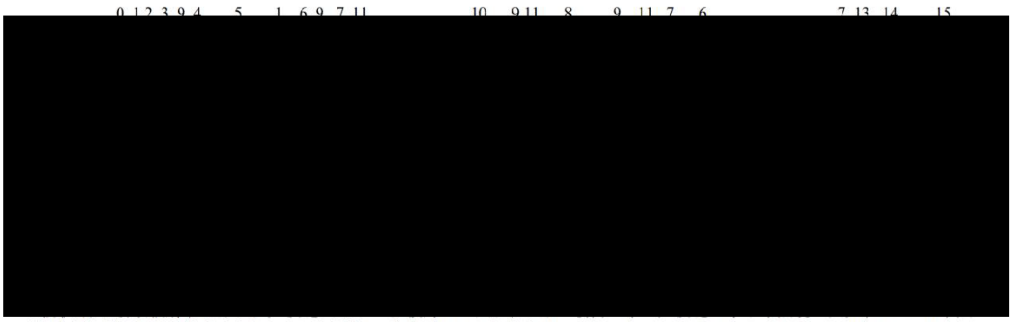
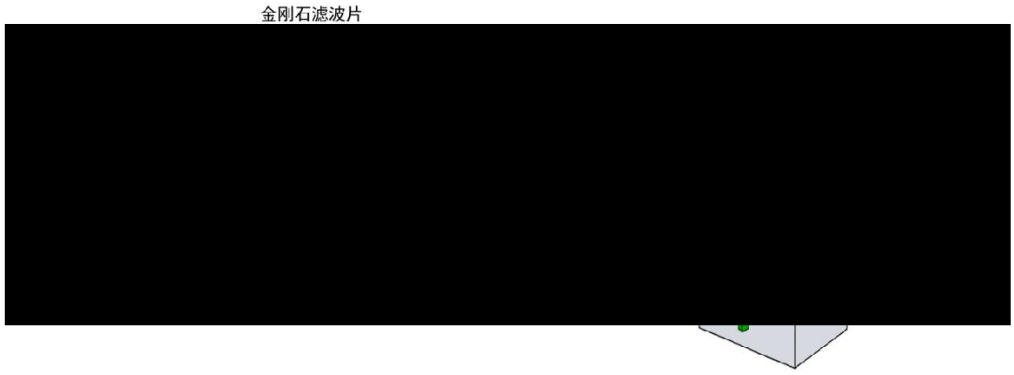


图 3-41 D6 原位表面衍射线站布局示意图



模式 1：非聚焦散射模式



模式 2：聚焦散射模式

图 3-42 D7 高能散射专用线站布局示意图



图 3-43 D8 动态成像专用线站布局示意图



图 3-44 D9 纤维材料专用线站布局示意图



图 3-45 D10 原位纳米探针线站布局示意图

3.2.1.3 工作模式及人员配置

3.2.1.3.1 工作模式

光源装置在调试期间及正常运行期间的出束时间分别见表 3-8、表 3-9。

表 3-8 光源装置出束时间（调试期间）

名称	调试工况束流参数	调试天数，天	每天出束时间，h	总出束时间，h
直线加速器	见表 3-27、表 3-28、表 3-29	100	20	2000
低能传输线	见表 3-27、表 3-28	50	20	1000
增强器	见表 3-27、表 3-28、表 3-30	100	20	2000
高能传输线	见表 3-27、表 3-28、表 3-30	50	20	1000
储存环	见表 3-27、表 3-28、表 3-30	180	24	4320
各光束线站	储存环电子最高能量 3.0GeV、最高流强 300mA	90	24	2160

表 3-9 光源装置出束时间（正常运行期间）

名称	年出束时间，h
直线加速器	7000
低能传输线	7000
增强器	7000
高能传输线	7000
储存环	7000
各光束线站	5000

3.2.1.3.2 人员配置

光源相关辐射工作人员具体配置情况见下表。

表 3-10 光源相关辐射工作人员配置情况

岗位名称	工作内容	工作地点	人数	工作模式	是否从事除光源外的其他辐射工作
光源加速器工程师	光源电子加速器建设与运维	光源大厅、电子加速器隧道	50	全职；三班倒运行值班，每年出束值班不超过 1800h；每年进入隧道运维作业不超过 200h	否
光束线工程师	光束线站建设与运维	光源大厅、电子加速器隧道束线前端区	100	全职；三班倒运行值班，每年出束值班不超过 1800h；每年进入隧道运维作业不超过 200h	否
同步辐射实验人员	同步辐射实验	光源大厅与实验站	82	全职；三班倒运行值班，每年出束值班不超过 2000h	否
辐射防护工程师	光源、高亮度中子源装置、离子源辐射防护日常管理与技术支持	总控中心及园区内全部辐射工作场所	20	全职；三班倒，每年出束运行值班 1800h，每人每年控制区运维作业现场安全管理与技术支持不超过 200h	是，同时轮班负责其他射线装置的辐射防护工作
通用技术工程师	负责公用设施、通用系统运维	综合测试楼工作，动力中心总控中心，微观楼、辐照楼、介观楼内	40	全职；三班倒运行值班，每年出束值班不超过 1800h；每年进入隧道运维作业不超过 200h	是，同时轮班负责公用设施、通用系统运维

3.2.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

3.2.2.1 辐照子系统

3.2.2.1.1 装置原理及主要参数

辐照子系统将通过一台中高能离子加速器装置提供高性能的多离子辐照源，支撑离子与材料及器件相互作用机制的深入研究。中高能离子束流凭借其高能量沉积率、突出的相对生物学效应和精确的束流定位能力，在航天、核能材料、生物医学及农业科技等诸多领域展现出广泛的应用潜力。

离子加速器装置由 ECR 离子源、直线注入器、同步加速器、实验终端（包括 21#低能离子辐照终端（以下简称“21#终端”）和 51#单粒子效应研究终端以下简称“51#终端”）。ECR 离子源可产生氦离子至铋离子的束流，首先通过直线加速器进行预加速，经过注入线传输至到同步加速器，同步加速器可以进一步将重离子加速，将束流引出 51#终端，开展材料科学实验研究，同时为了满足 21#终端的实验需求，在直线加速器中段设置了引出点，引出重离子束流至 21#终端开展材料辐照（如核能材料）及离子束分析，装置示意图见图 3-46，本次评价中的实验终端仅包括 21#终端和 51#终端，其他终端区域为二期预留终端，不在本次评价范围。



图 3-46 辐照子系统布局示意图

离子加速器装置产生并加速从 He 到 Bi 的所有离子，其中三种典型粒子参数指标如表 3-11 所示，三种典型粒子中，^{12}C 的单核能最高，流强最大。

表 3-11 离子加速器设计束流参数

粒子	最高能量（MeV/u）	最大流强(ppp)
$^{12}C^{6+}$	500	2×10^{9}
$^{78}Kr^{18+}$	145	1×10^{8}
$^{209}Bi^{39+}$	60	1×10^{7}
备注：该装置可产生并加速从 He 到 Bi 的所有离子，此表中为该装置三种典型粒子的束流参数		

3.2.2.1.2 工作原理

3.2.2.1.2.1离子源

本项目拟采用 ECR 离子源，可产生氦离子至铋离子的束流，如图 3-47 所示。

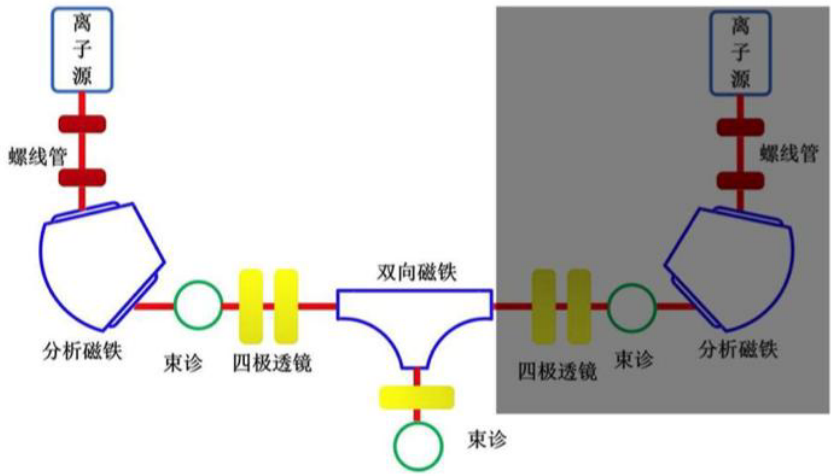


图 3-47 离子源注入系统布局图

表 3-12 离子源束流指标参数

离子种类	束流流强（eμA）	束流能量（keV/u）	束流归一化 RMS 发射度（π mm·mrad）
$^{12}C^{4+}$	400	4	0.2
$^{78}Kr^{19+}$	100		
$^{209}Bi^{32+}$	50		0.15
备注：本项目离子源可产生从 He 到 Bi 的所有离子，此表中为三种典型粒子参数			

3.2.2.1.2.2直线加速器

重离子加速器采用常温直线加速器作为注入器。该直线加速器可以为同步环形加速器提供 4 MeV/u、高流强的重离子束；同时还可以为低能离子辐照终端提供 1MeV/u 连续波束流。直线加速器总体布局图如图 3-48 所示，主要由低能束流传输线(LEBT)、RFQ 直线加速器、中能束流匹配线(MEBT)、IH 型 DTL 加速器组成，直线加速器总体参数见表 3-13。

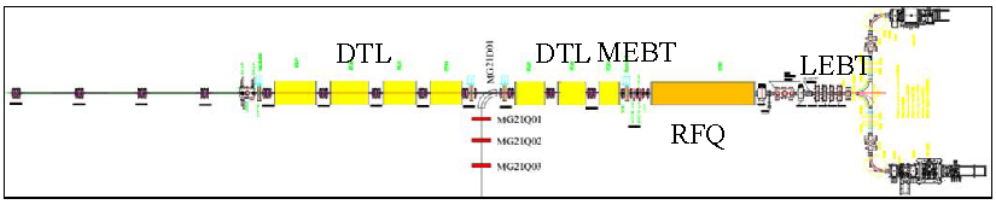


图 3-48 直线加速器示意图

表 3-13 直线加速器总体参数

离子源	
粒子种类	C, Kr, Bi 等
ECR 离子源	$^{12}C^{4+}$,$^{78}Kr^{19+}$,$^{209}Bi^{32+}$等
束流流强（eμA）	20.0~800.0
束流发射度（πmm·mrad）（归一化 90%）	0.8（$^{12}C^{4+}$）0.6（$^{78}Kr^{19+}$,$^{209}Bi^{32+}$）
引出电压（KV）	12~30
RFQ	
注入能量（keV/u）	4.0
引出能量（keV/u）	300.0
高频频率(MHz)	81
高频占空比	0.1~100%
传输效率(设计)	≥90%
输出束流发射度(πmm·mrad)	0.5
DTL	
输入能量（keV/u）	300.0
引出能量（MeV/u）	1.0（CW）/4.0（0.1%）
高频频率（MHz）	81（CW）/162（0.1%）
高频占空比	0.1%
输出束流发射度(πmm·mrad)（归一化 90%）	1.0（$^{12}C^{4+}$）0.75（$^{78}Kr^{19+}$,$^{209}Bi^{32+}$）
输出束流动量分散（%）	<±0.15
束流传输效率	≥80%

ECR 离子源可产生不同种类、不同电荷态的离子束，如 C、Kr、Bi 等，输出能量为 4 keV/u；经过 LEBT 进行束流横向匹配，注入到 RFQ 中加速到 300 keV/u；再经过 MEBT 对束流进行六维相空间匹配，使其满足 IH 型 DTL 直线加速器的注入要求；经过 7 台 DTL 加速至 4.0 MeV/u。在 DTL 直线加速器后，散束器用于控制束流相对动量分散，使其达到同步加速器注入的要求。

3.2.2.1.2.3 21#低能离子辐照终端

21#低能离子辐照终端位于直线加速器 3 号 DTL 后，可将经过初级加速的束流传输至终端开展实验。在终端束线的末端放置扫描磁铁，用于将束斑展宽至所需尺寸，最大扫描面积为 200×200 mm^2。低能终端束流基本参数如表 3-14 所示。

表 3-14 低能离子辐照终端束流参数

低能离子辐照终端束线	粒子种类	$^{4}He^{+}$~$^{209}Bi^{39+}$
	粒子能量（MeV/u）	1
	磁刚度（Tm）	0.57~1
	接收度（π mm·mrad）	2
	动量接收度	±7‰
	终端扫描面积（mm^2）	200×200

21#终端共计 2 台二极铁、9 台四极铁、4 台校正铁、2 台扫描铁以及束诊、真空等系统设备。

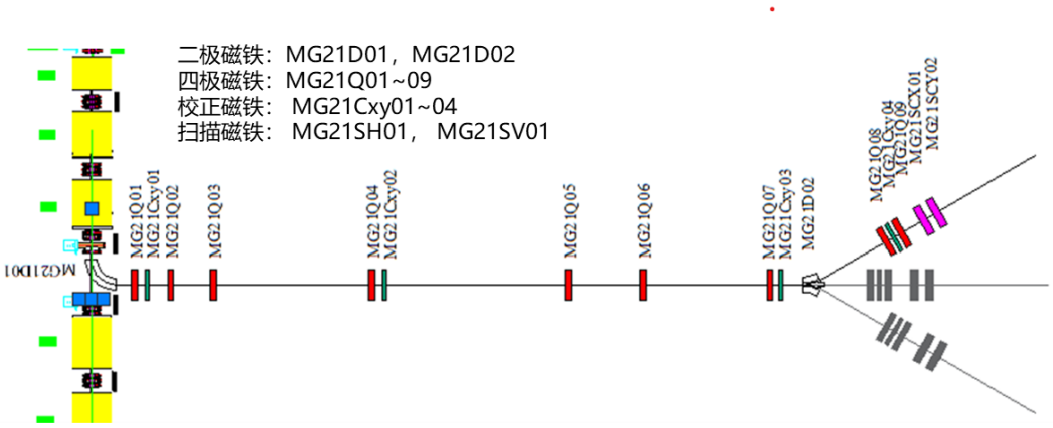


图 3-49 21#终端总体布局图

21#终端主要用于材料辐照（如核能材料）及离子束分析。低能离子束线可提供 1MeV/u 的重离子束，可对核能材料进行重离子辐照；同时可以与空间光伏辐照全流程研发模块的质子/氦离子加速器联用，由质子/氦离子加速器引出一条束线，产生氢、氦离子，在终端位置对核能材料进行双束辐照。质子/氦离子加速器也可单独使用，用于离子束分析。

3.2.2.1.2.4同步加速器注入线

同步加速器注入线连接重离子直线加速器与同步加速器，同时实现直线加速器低真空与同步环高真空的平滑过渡。注入线由 2 台水平二极磁铁、13 台四极磁铁和 5 台双向校正磁铁组成，注入线的主要束流参数如示意图见图 3-50。为了更好的实现同步环注入束流的要求，注入线布置了若干束诊元件，包括束流剖面测量、流强测量、束流 Twiss 参数测量等，注入线的主要束流参数如表 3-15 所示。

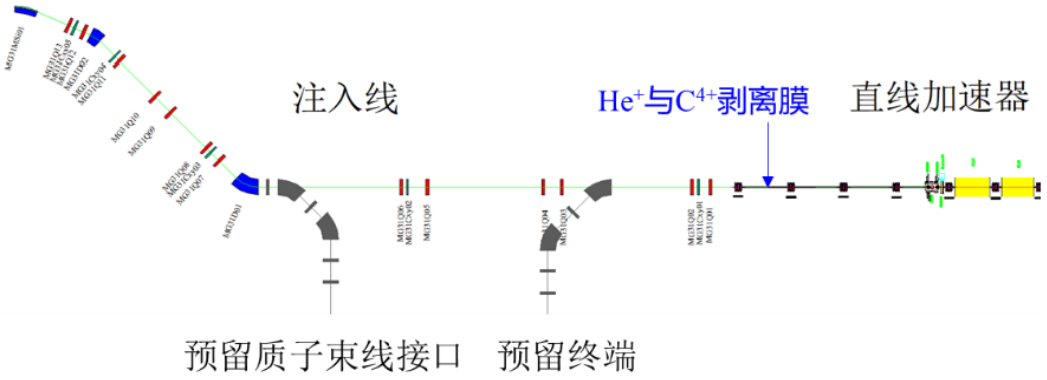


图 3-50 注入线总体布局图

表 3-15 注入线主要束流参数

粒子种类	$^{12}C^{6+}$、$^{78}Kr^{19+}$、$^{209}Bi^{32+}$等
粒子能量 (MeV/u)	4 (HI)
磁刚度 (Tm)	0.57~2
接收度 (π mm·mrad)	20×20
动量接收度	±1.5‰

3.2.2.1.2.5同步加速器

离子加速器系统同步加速器由 12 块二极磁铁和 36 块四极磁铁的 Triplet 结构组成，环周长为 121.2 m，共 2 个超周期，整体呈跑道形。可加速从氦离子到铋束的所有离子，最大磁刚度为 7.5 Tm，并尽可能的采用相同规格的磁铁、尽可能采用同规格磁铁串联的方式供电以提高束流的动力学稳定性。同步加速器的总体布局见图 3-51，同步加速器主要参数见表 3-16。同步加速器同时通过慢引出系统是将环中的束流慢引出至 51#单粒子效应研究终端开展相关实验。

表 3-16 同步加速器主要束流参数

主参数	周长（m）：约 121
	磁刚度（Tm）：0.57～7.5
	加速时间（s）：0.16（C^{6+}）
	运行周期(s)：0.3~6.0
束流参数	离子种类： C^{6+}、Kr^{19+}、Bi^{32+}等
	最高能量（MeV/u）：500(C^{6+}), 60 (Bi^{32+})
	环内最高离子数(ppp)：C：5.0×10^{9}；Bi：5.0×10^{7}
	终端注量率(pps/cm^2)：1×10^{2}~1×10^{6}
注入束	能量(MeV/u)：4.0(HI), 30(p)
	磁刚度（Tm）：0.57~2
	动量分散(δP/P)：≤±1.5×10^{-3}(HI)，≤±1.0×10^{-3}(p)
	发射度（πmm·mrad）：≤16($^{12}C^{6+}$)，12 (other HI)
引出束	能量(MeV/u)：100~500 (C), 300~1200(p)
	磁刚度（Tm）：2.6~7.5
	动量分散(δP/P)：±7×10^{-4}（快引出），±1×10^{-3}（（慢引出）
	发射度（πmm·mrad）：70×10（快引出），1×10（慢引出）
lattice	超周期：2
	工作点：Q_x / Q_y = 3.72 / 3.74
	接受度 A_h /A_v(π mm·mrad)：200/30 (δP/P= ±0.5%)
分系统	
磁铁	B 铁场强（T）：0.1140~1.488 (ρ=5 m)
	Q 铁场强（T/m）：0.50~9.69
高频	回旋频率范围（MHz）：0.22~2.23
	最高电压（kV）：12.5
	精度：好于 100Hz (dE/E=0.5‰)
	谐波数： h=1

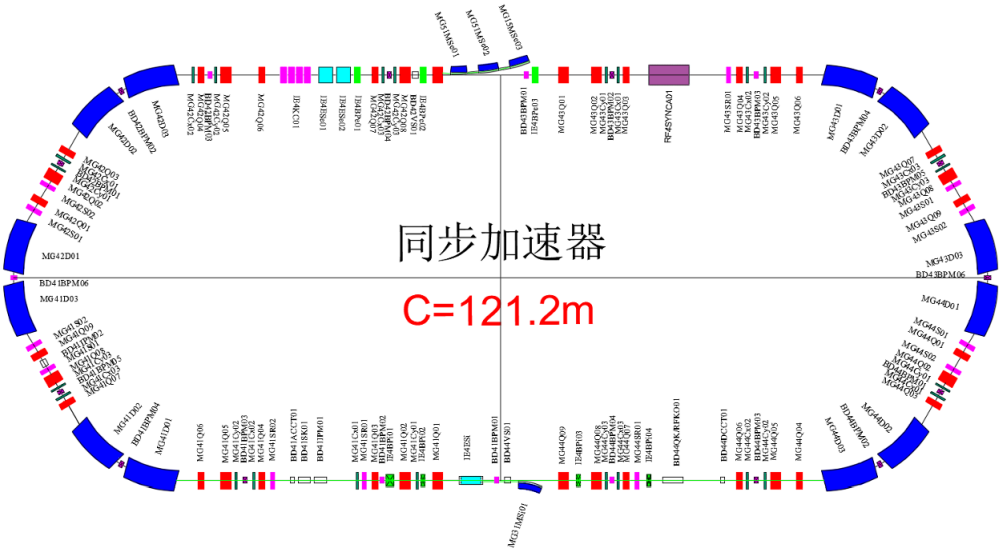


图 3-51 同步加速器总体布局示意图

3.2.2.1.2.6 51#单粒子效应研究终端

本次评价中，同步加速器引出的重离子通过高能线后在 51#单粒子效应研究终端（简称“51#终端”）开展材料辐照研究和交叉学科研究。高能线总体布局见图 3-52，本次仅评价 51#终端，其他终端为二期预留终端，不在本次评价范围。高能线设计束流基本参数见表 3-17。

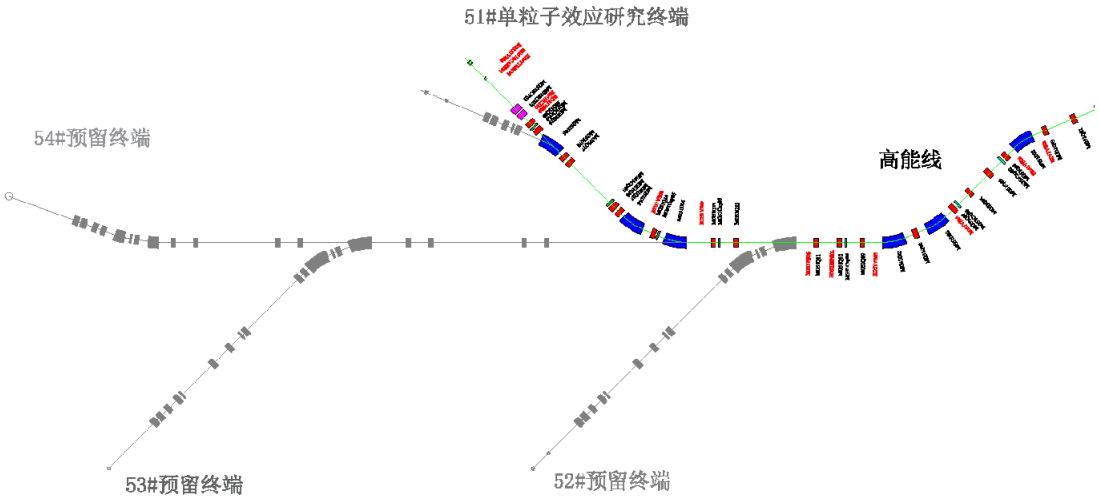


图 3-52 离子加速器系统高能束线及终端布局图

表 3-17 高能线束流参数

粒子种类与能量 (MeV/u)	$^{12}C^{6+}$：100~500、$^{78}Kr^{19+}$：40~145、$^{209}Bi^{32+}$：40~60 等
磁刚度 (Tm)	2.6~7.5
快引出发射度 (π mm·mrad)	70×10
慢引出发射度 (π mm·mrad)	1×10
快引出动量分散	±0.7‰
慢引出动量分散	±1‰
终端扫描面积 (mm^2)	300×300
终端扫描面积 (mm^2)	300×300

51#单粒子效应研究终端共计 2 条束线，两条束线开展实验一致。51#单粒子效应研究终端在束线末端放置扫描磁铁，用于将束斑展宽至所需尺寸，最大扫描面积为 300×300 mm^2。单粒子效应终端可提供高能离子束流，以 Ar、Kr、Bi 等离子为主，可对电子元器件及材料进行离子辐照，主要用于电子元器件单粒子效应及材料辐照效应研究。

实验终端为电子元器件单粒子效应及材料辐照效应研究提供真空或大气辐照环境，同时需配备离子束流的注量率、束斑面积、束斑均匀度等必要的束流探测设备。通过真空和大气四维移动平台可实现待测样品的精确平动和转动。实验终端靶室研制目标为满足真空辐照实验的束斑面积 200×200 mm^2，大气辐照实验的束斑面积 300×300 mm^2，终端重离子探测器探测注量率能力覆盖 1×10^2~1×10^6 ions/(cm^2·s)，通过四象限狭缝可快捷的调节束斑面积从 10 mm×10 mm~300 mm×300 mm。

实验终端系统由真空靶室系统和大气平台系统两大部分组成。真空靶室系统的管道直径 300 mm, 满足真空辐照实验束斑面积 20×20 cm^2 的设计需求。与前束线连接处设计一个真空插板阀，用于实验准备及进行中隔断束线的真空。在管道腔体的一个平面的上下左右各预留法兰接口，用于四象限狭缝的安装。另外，在管道腔体上还需预留接口用于闪烁体探测器、荧光靶等束流诊断设备的安装。真空腔室为柱形，直径 1200 mm，高度 1000 mm。分子泵和初抽干泵组合实现真空度达到 1×10^{-5} Pa（空载）。真空腔室内设计一套真空四维移动平台。此外，真空腔一侧还安装有搭配步进电机的二次电子探测器。腔室侧面设计一 400×360 mm 的活门，用于实验人员手动装卸样品。在真空腔室其他适

当位置设计了多种规格的法兰接口，用于各规格线缆、高低真空规管、放气阀、分子泵、观察窗等的安装。在沿束流方向的腔室一侧设计一个 30×30 cm^2 的束流引出窗，用于大气环境下的辐照实验，满足大气辐照实验束斑最大至 30×30 cm^2。大气平台为一套四维移动平台，用于在大气环境下样品的安装、平动、转动等需求。在大气平台与束流引出窗之间，预留安装接口用于积分电离室、分条电离室、降能片等设备的安装。实验终端系统的三维示意图见图 3-53。

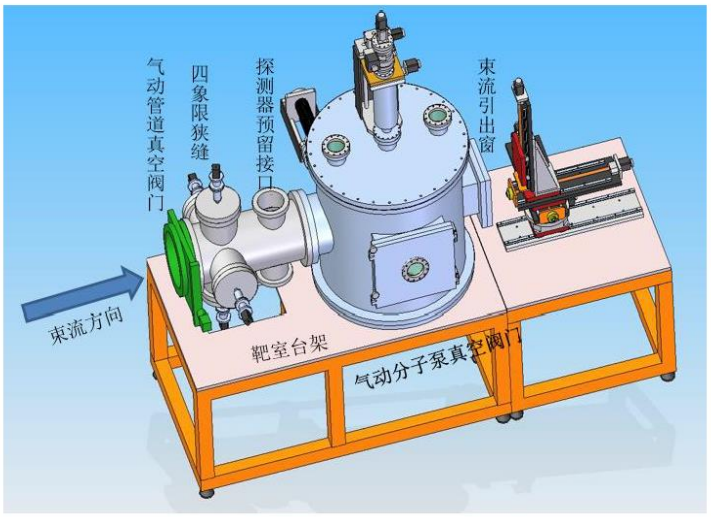


图 3-53 高能实验终端系统三维示意图

3.2.2.1.3 工作流程

中高能离子加速器运行期间完整的工艺流程如下：

（1）启动中高能离子加速器装置前，确保安全连锁、辐射监测、冷却水、电源、真空及控制等系统均处于正常工作状态，并满足出束运行条件。经系统自检和人工复核确认无异常后，方可启动装置。

（2）首先启动 ECR 离子源，为直线加速器提供稳定、可控的离子束流。离子束经直线加速器加速至设定能量后，通过注入线注入同步加速器，同时可向 21#低能离子辐照终端输出低能束流以开展相关实验。离子在同步加速器中进一步加速至高能区后，经高能传输束线输送至 51#单粒子效应研究终端，为器件辐照实验提供高质量、稳定的实验束流。

（3）在加速器装置出束过程中，控制系统实时监测各关键子系统的运行参数，包括离子源、真空度、磁场强度、束流位置与强度、冷却水温度及流量、辐射剂量率等，确保装置安全、稳定运行。运行期间，应严格遵守操作规程，未经许可不得随意调整设备参数或更改系统设置。

（4）当辐照实验完成后，按照规定的停机顺序依次关闭 ECR 离子源、直线加速器、同步加速器等系统。停机后，对安全连锁、辐射监测、电气、冷却水及真空等系统进行全面检查与维护，确认设备处于安全状态。运行数据与设备工作日志应完整记录，包括束流参数、设备状态、报警信息及维护记录等，为后续分析和装置运行优化提供依据。

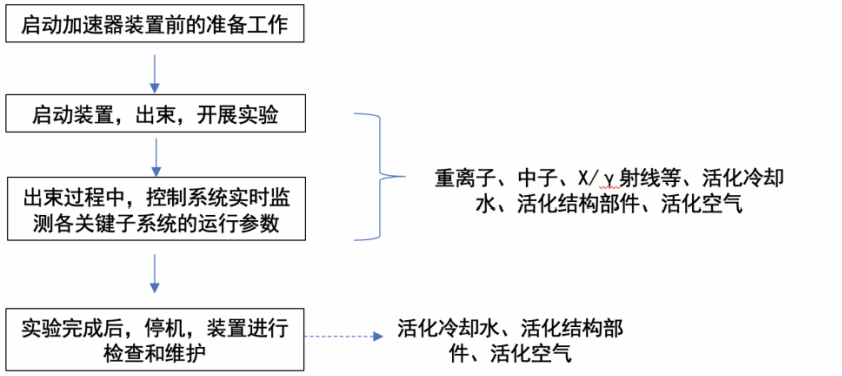


图 3-54 辐照子系统工作流程

具体的运行工况如下：

（1） 仅中高能离子加速器 21#低能离子辐照终端出束：

1）中高能离子加速器装置重离子辐照：中高能离子加速器装置为 21#低能离子辐照终端提供 1MeV/u 的重离子束，可对核能材料进行重离子辐照；21#低能离子辐照终端处于实验状态时，低能离子束线束流闸打开，允许离子传输至终端。

2）双束辐照：中高能离子加速器装置为 21#低能离子辐照终端提供 1MeV/u 的重离子束时，空间光伏辐照全流程研发模块的质子/氦离子加速器与其联用，由质子/氦离子加速器引出一条束线，提供质子、氦离子，在终端位置对核能材料进行双束辐照。质子

/氦离子加速器束线也可单独使用，利用质子及氦离子用于离子束分析。当与空间光伏辐照全流程研发模块的质子氦离子加速器联用时，低能离子束线和质子氦离子加速器束线束流闸打开，允许离子、质子及氦离子传输至终端。

3）质子氦离子离子束分析：当质子氦离子加速器束线单独用于离子束分析时，束线束流闸打开，允许质子及氦离子传输至终端。

4）其他工况下（如实验人员更换样品，或者设备现场维护与调试等），低能离子束线和质子氦离子加速器束线束流闸落下，阻挡离子、质子及氦离子进入终端。实验人员将准备好的样品安放到终端处开展科学实验。

（2）仅中高能离子加速器 51#终端的实验出束：

51#终端共两条束线，工况分为两种：束线 1 工作时，束线 2 不工作；或束线 2 工作时，束线 1 不工作；两条束线不可同时工作。当终端处于实验状态时，51#单粒子效应研究终端束流闸打开，允许离子经束线 1 或束线 2 传输至终端。其他工况下（如实验人员更换样品，或者设备现场维护与调试等），束流闸落下，阻挡离子进入终端。

（3）中高能离子加速器 21#终端和 51#终端的实验均出束：

中高能离子加速器21#终端和51#终端利用踢轨磁铁可实现同时出束。同时出束时，低能离子束线束流闸打开，允许离子传输至 21#终端；51#终端束流闸也打开，允许离子经束线 1 或束线 2 传输至终端。

3.2.2.2 空间光伏辐照全流程研发模块

3.2.2.2.1 装置原理及主要参数

空间光伏辐照全流程研发模块（简称“辐照模块”）主要包含质子/氦离子加速器大厅、电子加速器大厅、质子电子终端和材料辐照终端，布局见图 3-55 所示。

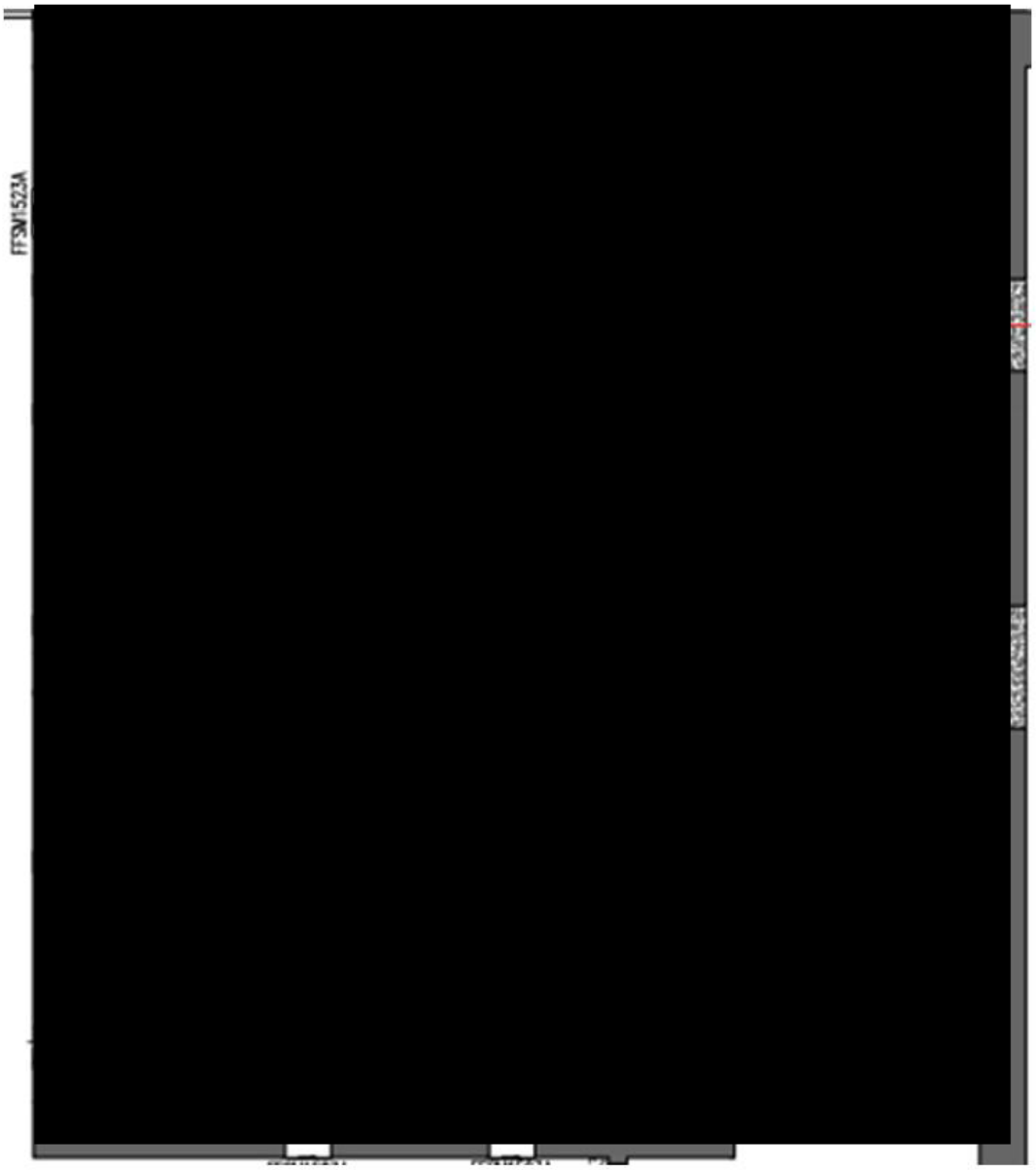


图 3-55 空间光伏辐照全流程研发模块布局示意图

辐照模块主要性能指标如表 3-18 所示。

表 3-18 辐照模块主要性能指标

子模块	组成	主要性能指标
质子氦离子辐照研究子模块	质子氦离子加速器及束流传输	能量范围 0.2-3 MeV，最大流强 30 μA； 具备 He^+引出功能，最高能量 1.5MeV/u，最高束流 30 μA；
	质子及氦离子辐照终端	316 不锈钢真空腔体，真空度≤ 1×10^{-8} mbar； 样品温度（-150 ℃~ 400 ℃），控温精度≤ 0.1°，样品台和样品处分别设置 K 型热偶； 样品台预留 4 个电极引线，由样品台 feedthrough 引出，用于太阳电池 I-V 性能测试； 样品台可以转动； 质子及氦离子束流从上向下引入辐照终端，垂直辐照水平放置样品，兼容不同大小、形状、类型的样品辐照； 质子及氦离子束流扫描范围可调，辐照终端辐照面积 20cm×20cm； 辐照面积上束流强度不均性≤10%； 束流强度和不均匀性可以原位测量； AM0 模拟太阳光源入射方向和质子及氦离子束流成 15°夹角，模拟太阳光源和质子及氦离子束流在垂直于样品台的同一水平面上； AAA 级 AM0 模拟太阳光源，光斑面积 10 cm×10 cm；样品处光强高于 1366 W/m²；光强可以从 0~100%个太阳范围调节。
电子辐照研究子模块	电子加速器及束流传输	束流能量 0.2-3 MeV，最大流强 180 μA；
	电子-质子耦合辐照终端	316 不锈钢真空腔体，真空度≤ 1×10^{-8} mbar； 样品温度（-150 ℃~ 400 ℃），控温精度≤ 0.1°，样品台和样品处分别设置 K 型热偶； 样品台预留 4 个电极引线，由样品台 feedthrough 引出，用于太阳电池 I-V 性能测试； 样品台可以转动； 电子、质子束流扫描范围可调，辐照终端扫描面积 20cm×20cm； 辐照面积上束流强度不均性≤10%； 束流强度和不均匀性可以原位测量； 电子束流和质子束流成 30°夹角，模拟太阳光源置于角平分线上； AAA 级 AM0 光源，光斑面积 10 cm×10 cm；样品处光强高于 1366 W/m²，光强可以从 0~100%个太阳范围调节。
材料原位辐照研究子模块	电子加速器及束流传输	束流能量 0.2-3 MeV，最大流强 180 μA；
	材料制备系统	腔体：材料 SS316，直径 350 mm; 样品台：2 英寸，兼容旗形样品托； 温度：150K-1000K； 中温源温度范围：300-1400℃； 低温源温度范围：100-1100℃； 原位检测设备：15keV RHEED； 膜厚分辨率：0.15 Å。
	原位辐照腔体	腔体材料 μ-metal; 背景真空度小于 5×10^{-10} mbar； 电子均匀辐照面积：2 cm×2 cm；

子模块	组成	主要性能指标
		采用旗型样品架； 温度范围：150-800K。
	光电子能谱	180 度半球能量分析器，入口有 Alpha Plate； Ag 标样测试 Ag3d5/2 半峰宽≤0.6 eV；通过能 1 - 400 eV 连续可调； 支持扫描和快照模式（快照模式分析范围≥20 eV）。
	真空拉曼/时间分辨荧光光谱	腔体材料 SS316； 样品温度 100-600K； 极限真空优于 5×10^{-10} mbar； 光学空间分辨率 ＜1 μm； 拉曼光谱收集范围：80～4000 cm^{-1}； 拉曼光谱分辨率：2 cm^{-1}； 荧光光谱收集范围：410～700 nm；
	扫描电子显微镜	二次电子成像分辨率：0.5 nm @15 kV，1.0 nm @1 kV； 能谱仪元素探测范围：B(5)~Cf(98)； 能谱仪分辨率：MnKa≤129eV @100000cps； 阴极荧光光谱分辨率：＜0.1nm 样品室真空度：优于 6.3×10^{-6} mbar；
	真空互联样品传递转移系统	腔体材料 SS316； UFO 极限真空度：5×10^{-10} mbar； 机械臂：距离 810 mm，角度 360°； 快速进样腔极限真空度：5×10^{-8} mbar； 样品台：12 个旗型样品停放工位； 超高真空手提箱：5×10^{-10} mbar；

3.2.2.2.2 工作原理

3.2.2.2.2.1质子/氦离子辐照研究子模块

质子氦离子辐照研究子模块主要包括质子氦离子加速器、束流传输系统和质子及氦离子辐照终端。质子及氦离子辐照终端可通过模拟太空质子辐照环境，对太阳电池器件效率进行原位辐照研究；还可同时可实现电子-质子耦合辐照，模拟太空电子和质子辐照环境，具体的组成示意图见图 3-56，具体的组成部分如下：

（1）质子/氦离子加速器，包括高压端设备、高压发生器、加速器结构和真空系统等；

（2）束流输运系统，包括四极透镜、束流校正的电磁铁、分析磁铁、束流偏转的开关磁铁、用于扫描的扫描磁铁和束流输运线真空等；

（3）束流诊断，包括法拉第筒、荧光靶、双向狭缝等；

（4）质子及氦离子辐照终端，包含定制超高真空系统、定制超高真空高低温样品架、定制法拉第杯阵列、AM0 模拟太阳光源、I-V 测试系统等;

（5）辅助系统，包括绝缘气体系统，常规部件水冷系统、电源系统、控制系统等。

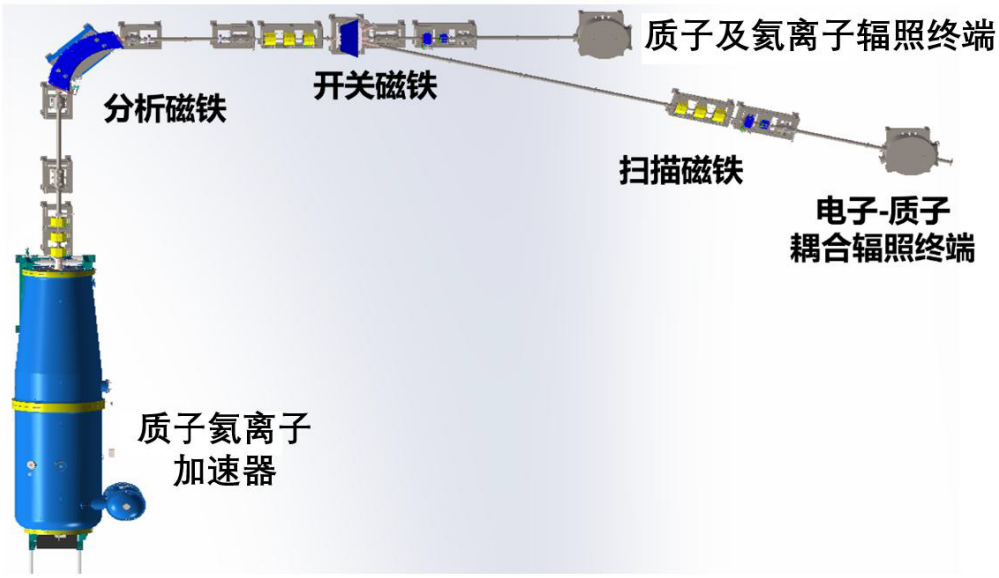


图 3-56 质子/氦离子加速器及束流传输系统和辐照终端三维布局图

3.2.2.2.2.2 电子辐照研究模块

电子辐照研究子模块主要包括电子加速器、束流传输系统和电子-质子耦合辐照终端，电子-质子耦合辐照终端可通过模拟太空电子和质子辐照环境，对太阳电池器件效率进行原位辐照研究，具体的组成示意图见图 3-57，具体的组成部分如下：

（1）电子加速器，包括电子枪系统、高压发生器、加速管系统和真空系统等；

（2）束流传输系统，包括螺线管磁铁、束流校正的电磁铁、分析磁铁、束流偏转的开关磁铁和用于扫描的扫描磁铁等；

（3）束流诊断，包括法拉第筒、荧光靶、双向狭缝等；

（4）电子-质子耦合辐照终端，包含定制超高真空系统、定制超高真空高低温样品架、定制法拉第杯阵列、AM0 模拟太阳光源、I-V 测试系统等；

（5）辅助系统，包括绝缘气体系统，常规部件水冷系统、电源系统、控制系统等。

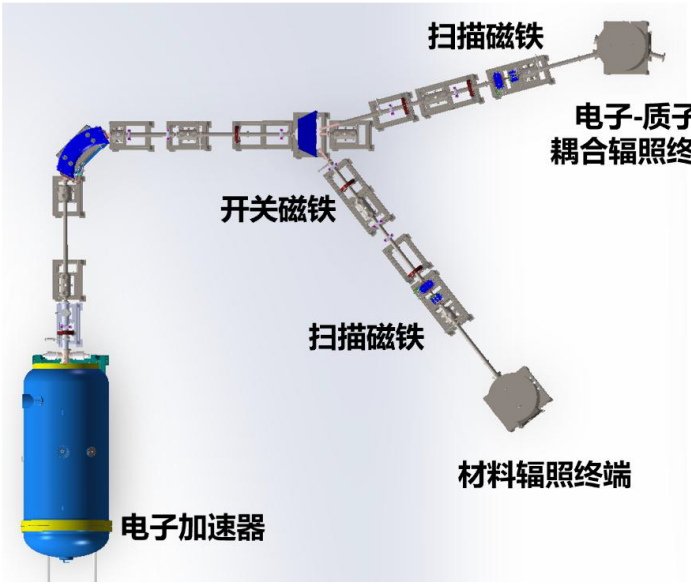


图 3-57 电子加速器及束流传输系统和辐照终端布局图

3.2.2.2.2.3 材料原位辐照研究模块

材料原位辐照子模块包括电子加速器及束流传输系统和材料辐照终端。其中电子加速器及束流传输系统能够提供满足光伏器件空间辐照研究技术参数要求的电子束流；材料辐照终端模块能为旗型或 2 英寸样品提供原位生长、原位检测与原位传输的一体化功能支持。该互联系统能够实现光伏材料辐照损伤机制研究，促进理性设计开发抗辐照光伏材料和器件，具体的组成部分如下：

（1）电子加速器（与电子辐照研究子模块共用），包括电子枪系统、高压发生器、加速管系统和真空系统等；

（2）束流传输系统，包括螺线管磁铁、束流校正的电磁铁、分析磁铁、束流偏转的开关磁铁和用于扫描的扫描磁铁等；

（3）束流诊断，包括法拉第筒、荧光靶、双向狭缝等；

（4）材料辐照终端由原位辐照光电子能谱系统（包含电子束引入端口和材料辐照样品台）、分子束外延薄膜生长系统、拉曼/时间分辨荧光系统、高分辨扫描电子显微

镜（HR-SEM），以及圆形传样系统、中转腔、快速进样腔组成，其结构示意图如图3-58所示。材料辐照终端各组成部分采用真空互联方式连接，样品在光电子能谱系统完成电子辐照后，可以在真空条件下各互联系统间自由传输。

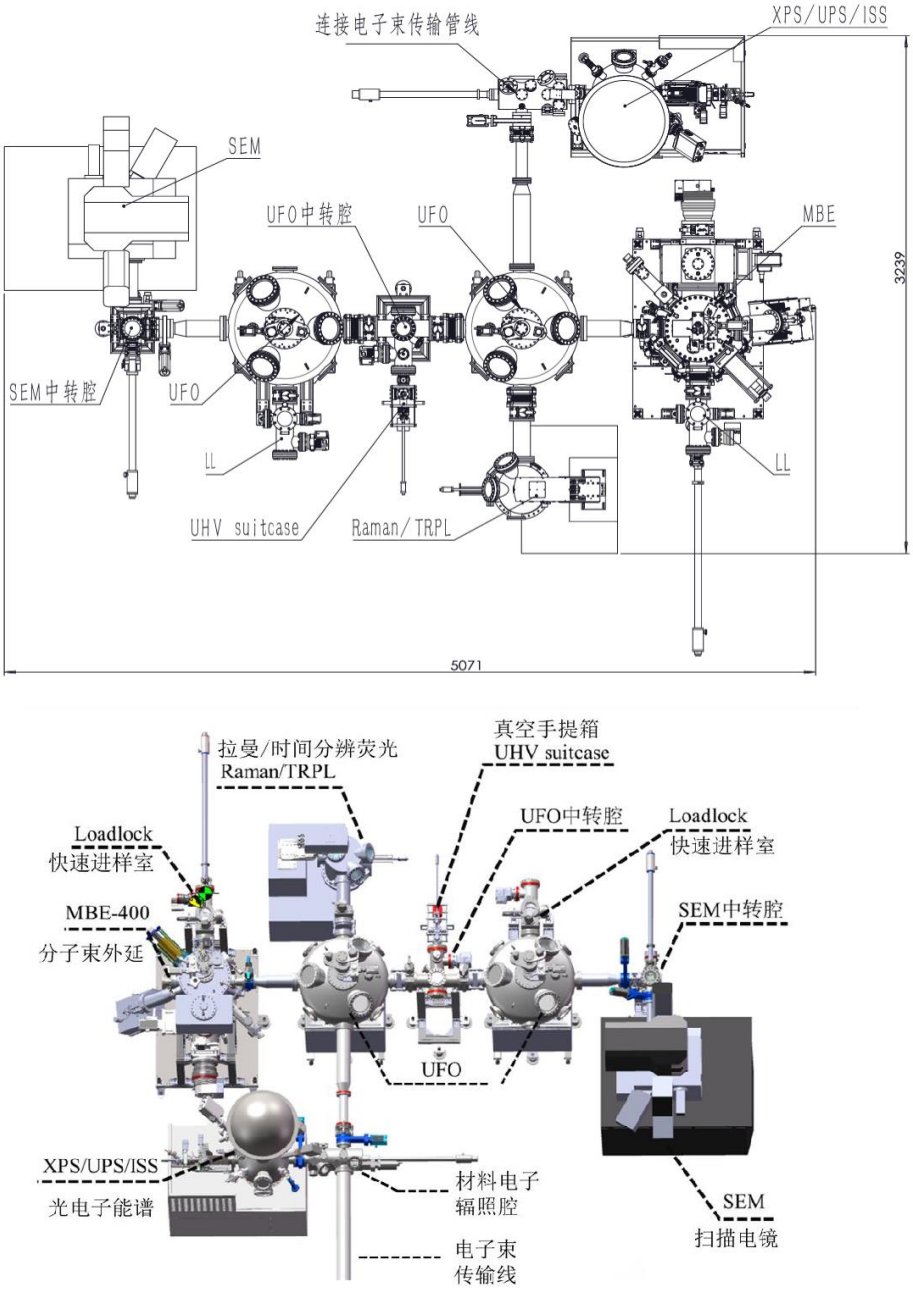


图 3-58 材料辐照终端设计图

3.2.2.2.3 工艺流程

空间光伏辐照全流程研发模块运行期间完整的工艺流程如下：

（1） 出束前的准备工作

实验人员将待测样品安装在辐照终端样品台，并抽真空到辐照所需真空，确保辐照终端与束线连接阀都处于真空状态；设置样品辐照温度；辐照终端真空和样品温度稳定后，准备出束进行辐照实验。

（2） 辐照终端处于实验状态时，束流闸打开，允许质子及氦离子束或电子束传输至终端；其它工况下（如实验人员更换样品，或者设备现场维护与调试等），束流闸落下，阻挡高能粒子进入终端。实验人员将准备好的样品安放到终端处开展科学实验。进行辐照实验时，工作人员需要进入辐照终端区域，将实验样品放置在辐照终端样品台上，然后人员撤离，关闭屏蔽门，在控制操作台按流程进行操作。根据实验需求，设置辐照粒子能量、束流、辐照面积、辐照时间等参数，启动加速器，打开束线光闸进行辐照实验。

（3） 实验完毕工作人员关闭加速器，进入屏蔽区，取出实验样品。

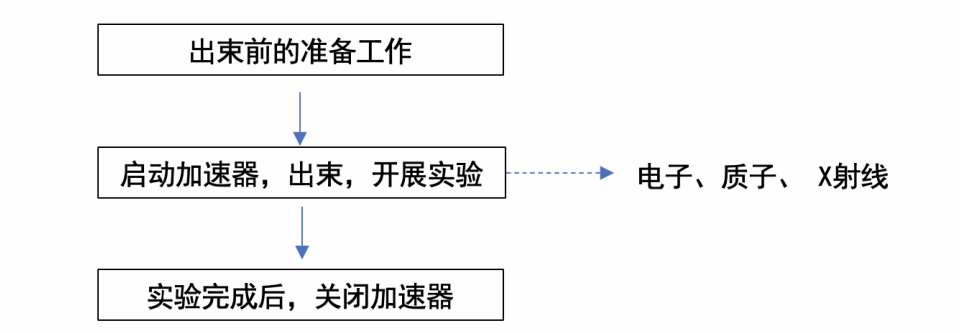


图 3-59 空间光伏辐照全流程研发模块工作流程

具体的运行工况如下：

（1） 质子及氦离子独立辐照运行工况

质子/氦离子加速器可以提供质子及氦离子束流，束流可以输运到质子及氦离子辐照终端对空间光伏器件进行质子或氦离子辐照实验。

（2） 电子束独立运行辐照工况

电子加速器可以提供电子束流，电子束流可以输运到材料辐照终端，对空间光伏材料进行电子束辐照实验。

（3） 电子和质子同时辐照运行工况

电子加速器和质子氦离子加速器可以同时提供电子和质子束流，将束流引入到电子-质子耦合辐照终端，进行电子-质子耦合辐照实验。

3.2.2.3 工作模式及人员配置

辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块工作模式及人员配置见下表，年出束时间为 7500h。

表 3-19 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块人员配备

岗位名称	工作内容	工作地点	人数	工作模式	是否从事其他辐射工作
离子源加速器工程师	离子加速器建设与运维	中央控制室、同步加速器大厅	36	全职；三班倒运行值班，每年监督区值班不超过 2000h/人；每年控制区运维作业现场安全管理与技术支持不超过 200h/人。	否
离子辐照终端实验人员	离子辐照终端建设与运维	21#终端运行控制室、51#终端实验控制室、21#终端和 51#终端	23	全职；三班倒运行值班，每年监督区值班不超过 1500h/人；每年控制区运维作业现场安全管理与技术支持不超过 200h/人。	否
加速器工程师	质子/氦离子、电子加速器建设与运维	实验控制室 2、质子/氦离子、电子加速器大厅	2	每年出束值班不超过 2000h/人；每年控制区运维作业现场安全管理与技术支持不超过 200h/人。	否
辐照终端实验人员	空间光伏辐照终端建设与运维	实验控制室 2、质子电子终端、材料辐照终端	3	全职；两班倒运行值班，每年出束值班不超过 2000h/人；每年控制区运维作业现场安全管理与技术支持不超过 200h/人。	否
辐射防护人员	人员进出辐射区管理、联锁系统恢复	中央控制室、同步加速器大厅等	3	全职；三班倒，每年监督区运行值班 2000h/人；每年控制区运维作业现场安全管理与技术支持不超过 200h/人。	否

3.2.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）

3.2.3.1 装置组成及主要参数

高亮度中子源装置采用紧凑型、高亮度技术路线，靶体设计为钽靶，可实现质子束流打靶能量 150MeV，打靶功率≥150kW，重复频率 50 Hz，本次建设 1 个靶站和 2 台中子谱仪，包括 1 台高通量小角中子散射仪和 1 台通用中子粉末衍射仪，并预留 8 条中子束线孔道，同时预留第二靶站及加速器升级可能性。整体布局如下图所示。



图 3-60 高亮度中子源装置组成示意图

3.2.3.2 工作原理

3.2.3.2.1 直线加速器

加速器整体布局如图 3-61 所示，由电子回旋共振（ECR）型离子源产生 55keV 的稳定可靠质子束流，经低能传输段（LEBT）的输运后分别被相同的射频四极加速器（RFQ）加速到 3.0MeV，再经过中能传输段（MEBT1）的传输和横向、纵向匹配，进入漂移管直线加速器（DTL）加速到 65MeV，再经过中能传输段（MEBT2）的传输和横向匹配，进入 Pi 模直线加速器（PIMS）加速至 150MeV。最终，束流经高能传输段（HEBT）传输至靶站，实现高效中子产生。



图 3-61 高亮度中子源装置直线加速器整体布局图

直线加速器基本设计参数如表 3-20 所示。直线加速器设计峰值流强 50 mA，输出能量为 150MeV，束流功率 150kW。

表 3-20 直线加速器设计参数

参数	值	单位
离子种类	Proton	/
出口能量	150	MeV
峰值流强	50	mA
宏脉冲长度	400	μs
束流占空比	2%	/
重复频率	50	Hz
平均功率	150	kW

3.2.3.2.2 靶站

靶站作为介观表征子系统的重要组成部分之一，它是将加速器输出的高能质子脉冲转化成适合中子散射用的慢中子脉冲的设施。根据功能划分，靶站由 10 个系统组成，分别为：中子物理系统、靶体系统、慢化器反射体系统、中心容器系统、中子束线开关系统、屏蔽体系统、低温系统、靶站水冷系统、遥控维护系统以及靶站控制系统。靶站组成、布局及功能如表 3-21 所示。

图 3-62 为靶站立面剖视图，靶站总高 8.2m，直径为 Φ9m。图 3-63 为靶站结构简图，靶站核心为靶-慢化器-反射体，靶采用钽靶，使用两个慢化器耦合液氢慢化器和耦合水慢化器，主要指标见表 3-22。

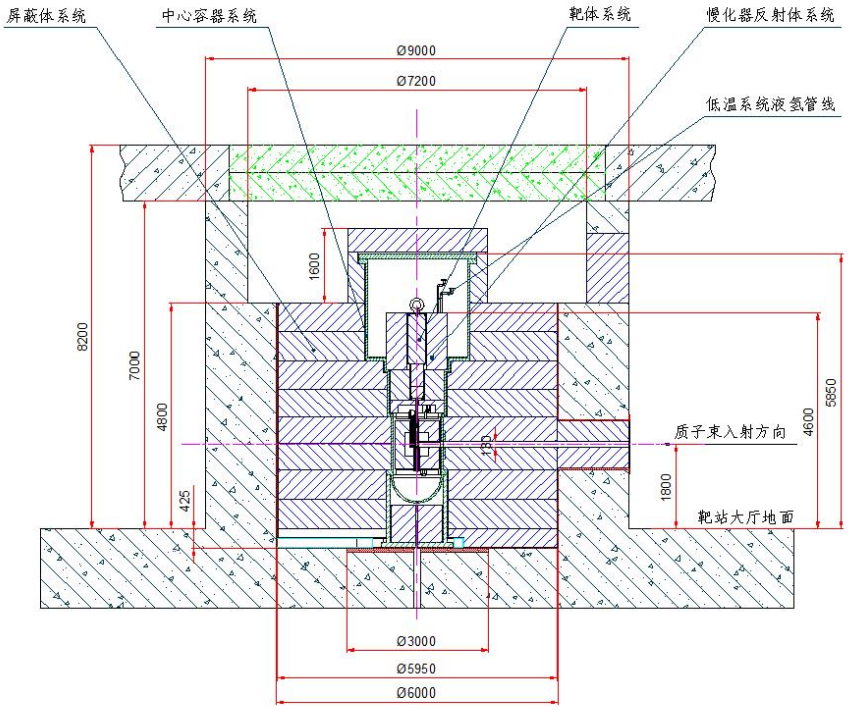


图 3-62 靶站立面剖视图

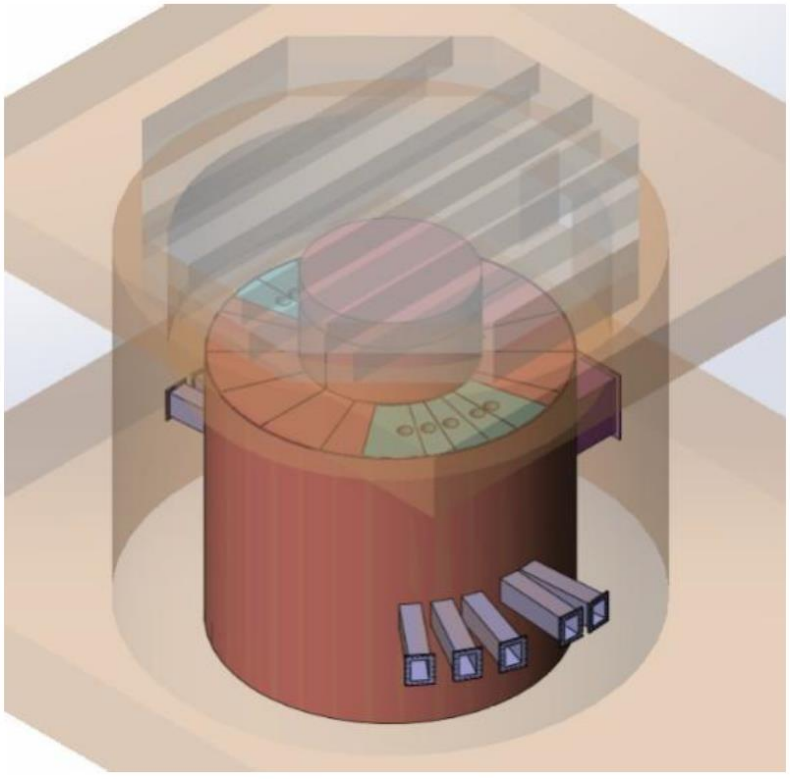


图 3-63 靶站结构简图

表 3-21 靶站组成、布局及功能

系统	组成	布局及功能
中子物理系统	靶站、谱仪的物理设计计算	系统提供靶站和谱仪的物理设计计算、屏蔽计算等
靶体系统	由靶体插件、靶体测试平台、屏蔽体、靶体支撑座和靶体控制等组成。	提供靶体供质子轰击产生中子，其组成包括核心部件为靶体。靶体是散裂中子源中子产生的源头，高能质子束流轰击重金属靶材，通过散裂反应产生中子，为中子散射实验研究提供的中子束流。为了保证靶体的正常运行，靶体需要定期的更换。
慢化器反射体系统	由耦合液氢慢化器、耦合水慢化器、反射体插件、反射体插件、铍反射体等组成。	将质子打靶产生的高能中子慢化为可供谱仪进行中子散射实验研究用的低能中子； 反射体由金属铍和铁组成； 铍铁反射体将靶和慢化器包围起来，被密封于铝容器内。
中心容器系统	包括靶体（Target）、慢化器（Moderator）、反射体（Reflector）及屏蔽体等组件。	为散裂反应核心区域提供氦气气氛保护，以减少放射性气体的产生，同时防止放射性气体及活化的冷却介质的泄漏，并为靶体系统、慢化器&反射体系统、质子束窗系统提供安装接口，为质子束及中子束提供输运孔道。
中子束线开关系统	由机械系统、液压系统、中子束线开关控制系统、真空系统组成。	包括 10 道垂直上下中子束线开关，中子束线开关由液压驱动，在束线开关上部有屏蔽块对驱动设备进行屏蔽。每个中子束线开关重约 7 吨安装位置从靶站中心 1.5 米开始到 2.85 米，厚度 1.35 米。为降低辐射，避免喷流效应，选用台阶形状，在束线开关上部有屏蔽块对驱动设备进行屏蔽。
屏蔽体系统	主要包括以下子系统：靶站基板、靶站密封筒、靶站穿墙管及其内部临时混凝土屏蔽、钢屏蔽体、混凝土屏蔽围墙，以及顶部混凝土天花板等。	用于保护工作人员的辐射安全，防止活化气体、活化水等向靶站外部溢出。屏蔽体将为中子谱仪提供中子引出孔道供谱仪开展中子实验，同时屏蔽体还为靶体和慢化器反射体的维护提供通道。
低温系统	包括氢循环系统、氦制冷系统和氢安全系统三部分。	满足靶站液氢中子慢化器正常运行。
靶站水冷系统	包括载热剂系统、水质净化系统、消氢系统以及真空系统，辅助系统包括放射性废液排放系统、二次水系统、通风系统、压缩空气系统及冷冻水系统，及与上述系统相关的测量系统、电气系统及控制系统等。	服务靶站核心设备（靶体、慢化器、反射体、质子束窗等），实现冷却、慢化、净化、传质等功能。
遥控维护系统	利用机械手透过铅玻璃防护窗进行所需的维护和更换工作。	安全、可靠、合理、有效地实现对靶站维护对象（靶体插件、慢化器反射体插件、中子束窗、质子束窗、中子束线开关插件以及离子交换器、树脂捕集器和过滤器等关键设备或部件）的维护更换，并可靠实现放射性废物有效缩容、装载及储存与退役，同时具备一定应对异常工况或特殊工况下的应急处理能力，以保障靶站长期稳定运行。
靶站控制	采用实验物理及工业控制系统	实现靶站谱仪的总体监测和控制。

系统	组成	布局及功能
系统	（Experimental Physics and Industrial Control System）EPICS 作为顶层分布式控制软件。	

表 3-22 靶站主要技术指标

名称	参数
质子能量	150MeV
质子平均流强	1.0mA
质子束流功率	150kW
质子脉冲宽度	400μs
质子束斑分布	150mm×80mm，均匀分布
脉冲重复频率	50Hz
靶体	材料：钽 钽截面：170mm×100mm 轻水冷却，垂直维护
耦合液氢慢化器	高：3 cm，宽：5cm，长：20cm 100%仲氢、20K
耦合水慢化器	高：5 cm，宽：5cm，厚：5cm 轻水（H_2O）、300K
铍反射体	直径：Ø40cm，高：40cm
不锈钢反射体	直径：Ø 100cm，高：100cm
屏蔽体	2.5m 钢+1.5m 普通混凝土
中子孔道	10 条（预留 8 条）
中子束线开关	10 套，水压驱动，重复定位精度±1mm
靶站低温系统	氦制冷量：1800W@20K 氢循环流量：70g/s

3.2.3.2.3 中子谱仪

（1）高通量小角中子散射仪

谱仪总长度为 25.5m，采用 3.8m 长的弯导管去除来自耦合液氢慢化器的快中子和 γ 射线本底，可用中子波长为 [redacted]。光路上采用经典的小孔准直光路，样品位于距慢化器 14m 位置。为了保证原位实验测试时，能够覆盖宽 Q 值范围，分别在距样品 1m 和 6m 位置布置了高角和低角探测器阵列。同时，为满足不同实验探测尺度要求，低角探测器设计成可在真空散射腔中移动，以改变探测器-样品距离，进而实现不同 Q 值范围的调整和优化，相关结构如图 3-64 所示，主要指标如表 3-23 所示。

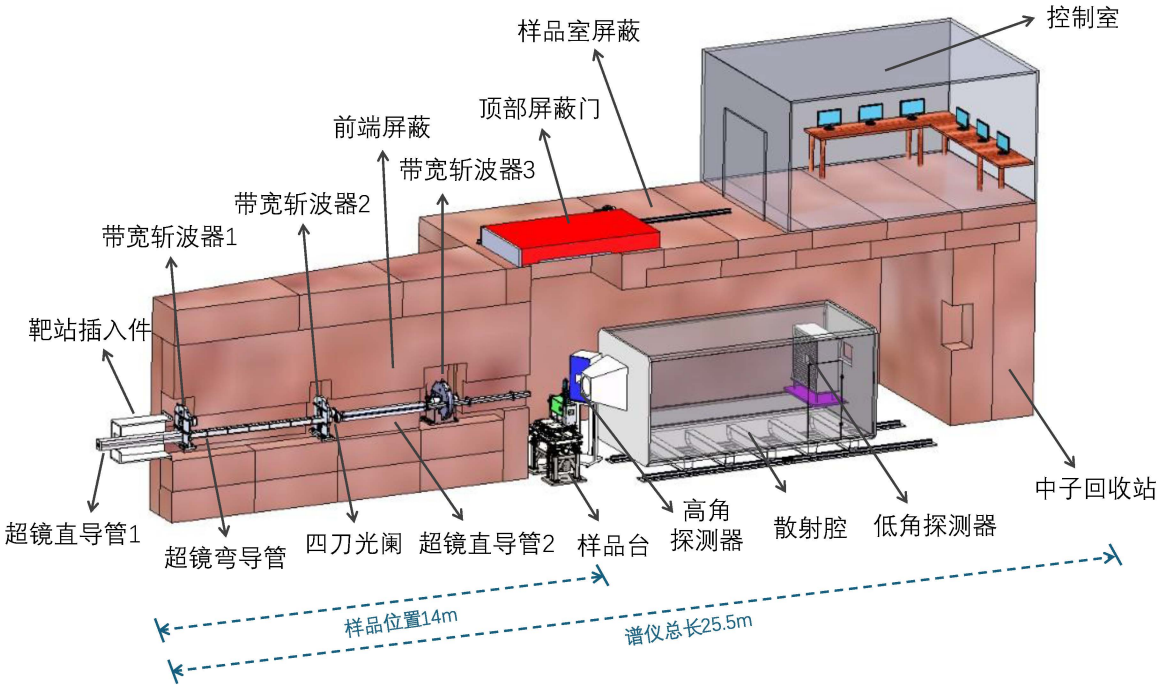


图 3-64 高通量小角中子散射仪结构示意图

表 3-23 高通量小角散射仪基本参数

慢化器	[redacted]
重复频率	[redacted]
中子带宽	[redacted]
中子波长范围	[redacted]
最小 Q 值	[redacted]
最大 Q 值	[redacted]
样品到慢化器距离	[redacted]
样品到探测器距离	[redacted]
中子通量验收指标	[redacted]

（2）通用中子粉末衍射仪

通用中子粉末衍射仪使用中子波长范围是[redacted]，其中样品到慢化器距离为≥30m，样品到探测器距离为≥0.8m，对应的晶面间距分辨率为[redacted]，样品处中子通量验收指标[redacted]。通用中子粉末衍射仪主要用于研究物质的晶体结构和磁结构，应用涵盖物理、化学、材料、能源和生物等学科领域，获得包括（有机/无机）化合物、合金、电池、蛋白质晶体、分子筛以及金属-有机物框架等样品中微观结构的信息，如空间

群、对称性、原子的占有率及热震动参数、结晶性、应力与应变、磁相变后的磁结构等，也能用于未知物质的成分和未知结构的测定。

该谱仪的基本设计方案如下图所示，其中包括中子导管、斩波器、样品腔和散射室、监测器、探测器及数据获取系统、数据采集和分析系统、直射束流垃圾桶及屏蔽设施等，主要指标如下表所示。

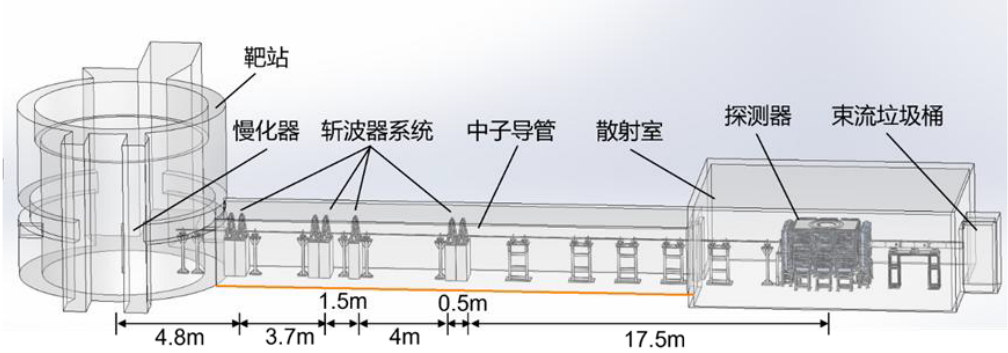


图 3-65 通用中子粉末衍射仪的基本结构示意图

表 3-24 通用中子粉末衍射仪基本参数

慢化器	耦合液氢慢化器
重复频率	[redacted]
中子波长范围	[redacted]
样品到慢化器距离	[redacted]
样品到探测器距离	[redacted]
晶面间距分辨率	[redacted]
中子通量验收指标	[redacted]

3.2.3.3 工艺流程

基于强流直线加速器的高亮度中子源采用常温加速器技术，建设强流质子注入线，并预留负氢离子束注入接口。电子回旋共振（ECR）离子源产生质子束，RFQ 加速器将质子束加速至 3MeV 后经过中能束运线（MEBT）输运至漂移管（DTL）加速器和 π 模（PIMS）加速器，将束流能量依次加速至 65MeV 和 150MeV。150MeV 的高能质子束经过高能束运线（HEBT）输运至中子靶站处。功率约 150kW 的质子束轰击产生钽靶产

生大量快中子，快中子经过耦合液氢慢化器中慢化后输出短脉冲、高通量的冷、热中子，通过中子束线提供给中子谱仪。在中子谱仪处，用户利用中子照射样品开展相关实验。

中子谱仪处于实验状态时，中子闸门打开，允许中子传输至谱仪；其他工况下（如实验人员更换样品，或者设备现场维护与调试等），中子闸门落下，阻挡中子进入谱仪。



① 强流直线加速器：将质子束加速至 150 MeV

② 靶站：质子束打靶产生中子后经过慢化器和反射体

③ 谱仪：输运中子至样品处并进行衍射、散射等实验

图 3-66 高亮度中子源装置辐射工艺流程

在加速器检修时，先停机 4 小时，一方面使空气的放射性核素基本排空，不对检修人员造成内照射；另一方面使剂量贡献很大的短寿命核素基本衰减掉。此时，可以进入加速器控制区进行剂量测量和检修工作。

辐射工作人员通过远程操作旧靶拆卸和新靶安装。旧靶拆卸流程为：1、打开靶心屏蔽；2、断开管路接头；3、安装转运容器；4、吊起靶体；5、关闭转运容器门；6、整体吊运至热室顶部；7、打开转运容器门；8、靶体运输进入热室；9、热室内检查；10、靶体运输进入屏蔽容器；11、屏蔽容器关盖；12、屏蔽容器整体吊运至地下室；13、暂存至装置退役。见图 3-67。

新靶安装流程为：1、新靶调试合格后安装到转运容器内部；2、转运容器带新靶运输到靶心；3、安装转运容器；4、打开转运容器门；5、卸下靶体；6、关闭转运容器门；

7、转运容器吊离靶心；8、连接靶体管道；9 靶体通水，通过密封测试；10、关闭靶站盖板。

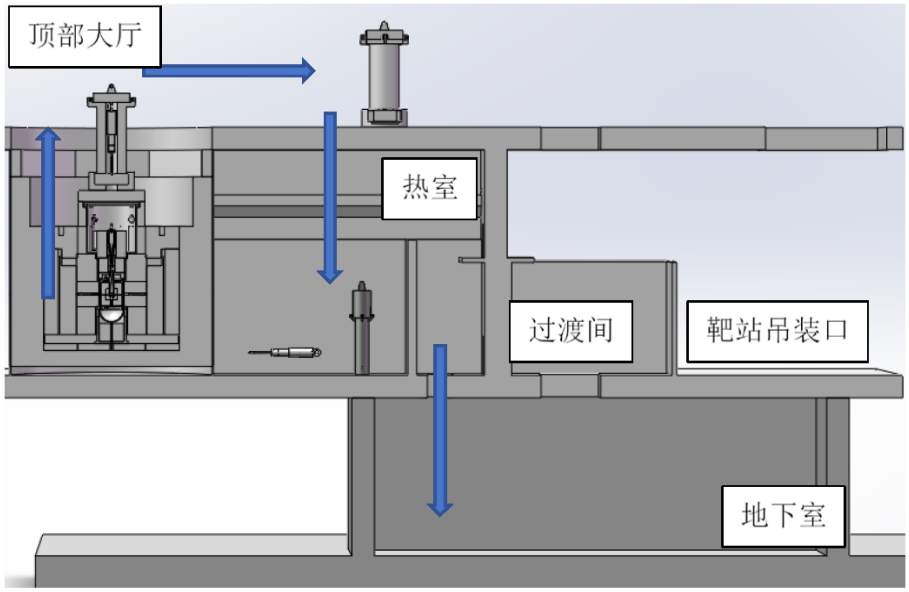


图 3-67 靶体拆卸流程示意图

3.2.3.4 工作模式及人员配置

3.2.3.4.1 工作模式

高亮度中子源装置的年使用规划及出束时间见表 3-25。谱仪每年运行 5000h。

表 3-25 高亮度中子源装置的年使用模式

装置	每年出束时间	备注
高亮度中子源装置	6000h	参考 CSNS（中子出束 5000h）

3.2.3.4.2 人员配置

高亮度中子源装置的辐射工作人员共有四类，分别是运行值班人员，维修维护人员，辐射防护人员和谱仪运行维护人员，具体配置情况见表 3-26。

表 3-26 高亮度中子源装置辐射工作人员配置情况

岗位名称	工作内容	工作地点	人数	是否从事其他辐射工作
运行值班	装置运行	中控室	46	否
维修维护	设备检修	隧道、靶站、谱仪等控制区，设备厅	28	否
辐射防护	辐射防护	控制室及控制区	6	否
谱仪运行维护	谱仪实验	谱仪和谱仪大厅	20	否

3.2.4 工业 CT

3.2.4.1 装置原理

本项目为电子加速器，采用花瓣加速器结合旋转靶的技术路线，利用花瓣加速器产生的高能高功率电子束经过磁铁横向聚焦后在旋转靶上形成微焦点，并经过韧致辐射产生 X 射线，其主要构成包括注入器、主加速器、功率源、旋转靶、束流诊断、控制系统等部件。

40kV 的 RF 栅控电子枪将热阴极上的电子束高品质引出，经聚束腔进一步缩短脉冲宽度，然后注入到高频加速腔中加速。电子束每经过高频腔一次加速后得到 0.67MeV 能量，在磁铁的控制下经过 14 次加速，实现电子束在加速器出口达到 9.3MeV 动能。本项目在电子束第三次加速完成后，增加了一个束流传输线，可将电子束传输到加速器出口位置，进而实现 9/2MeV 出口电子束的便捷切换。功率源、束流诊断统、加速器控制和真空为电子束的加速提供能量、监测、控制等保障条件。加速器引出的高品质电子束约 1cm 尺寸经聚焦磁铁聚焦后，形成直径小于 0.1mm 的电子束斑轰击在旋转靶上转换为 X 射线，经前准直器调控后，形成大剂量率（8500cGy/min）微焦点 X 射线源。设计的花瓣加速器产生的高品质电子束时间占空比最高可达 20%，从而微小的电子束斑在旋转靶上形成圆弧形状轨迹，在靶材金属可承受的极限范围内实现尽可能高的剂量率。

图 3-68 为 X 射线源的布局示意，其中 2MeV 能量输出从第三次加速出口引出。设备的三维结构示意图如图 3-69 所示。

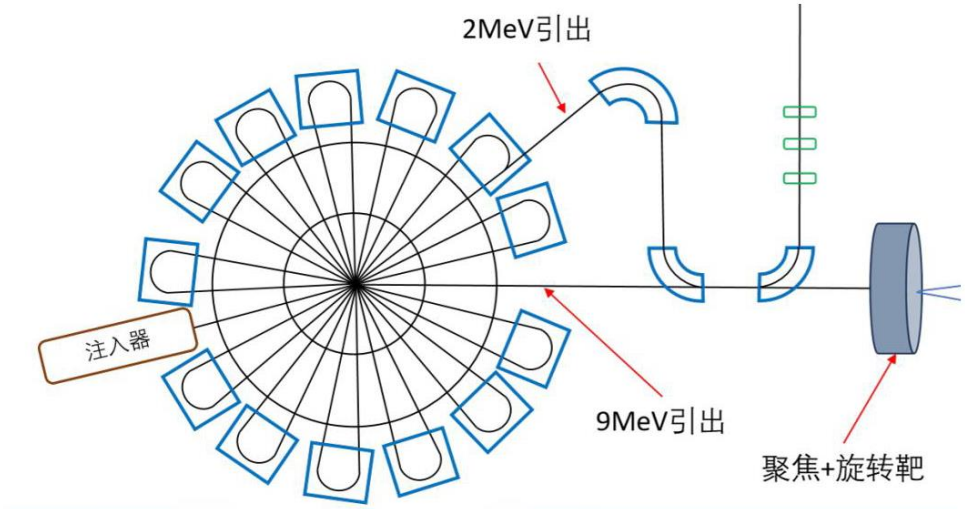


图 3-68　X 射线源的布局示意图

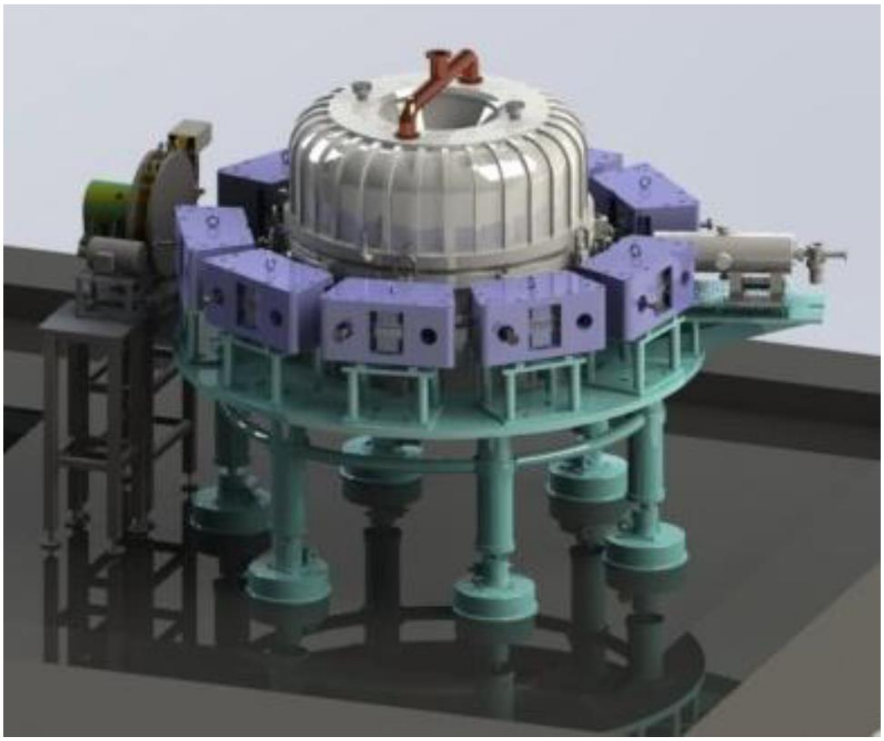


图 3-69 基于花瓣加速器的微焦点 X 射线三维结构示意图

1）注入器

在花瓣加速器中，注入器是束流传输的第一部分，决定了后续部分束流品质的下限。花瓣加速器注入器主要由射频栅控电子枪和聚束腔构成。本项目采用微波栅控的电子枪技术方案。即通过在电子枪的栅极上同时加载与高频加速腔同频率的短脉宽电压（几百伏特）和一个反向抑制的直流偏压来实现所需的 215MHz 短脉宽的引出电子束时间结构，

产生纳秒量级长度的电子束脉冲。电子枪由阴极、阳极和栅极构成，结构如图 3-70 所示。本项目提出引入纵向聚束腔的注入器技术方案，可通过能量调制导致的速度调制，进一步压缩束流的脉冲宽度，如图 3-71 所示。

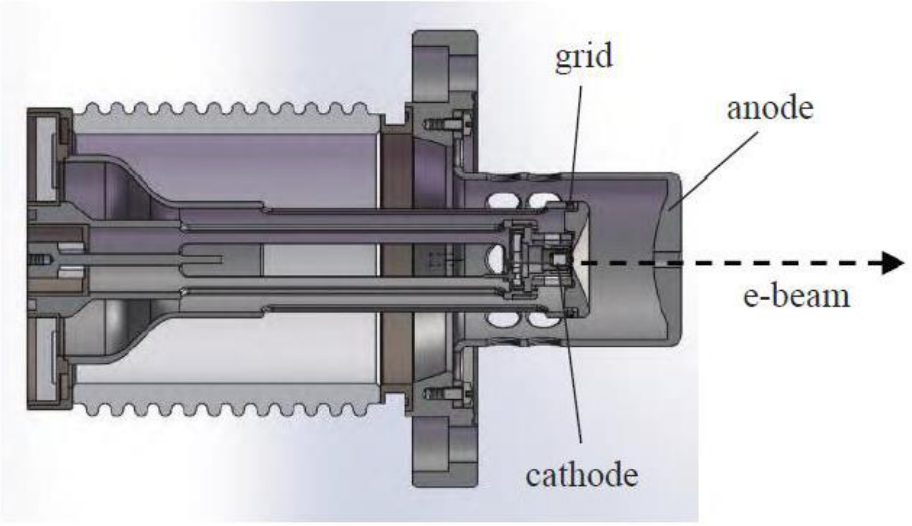


图 3-70 电子枪结构

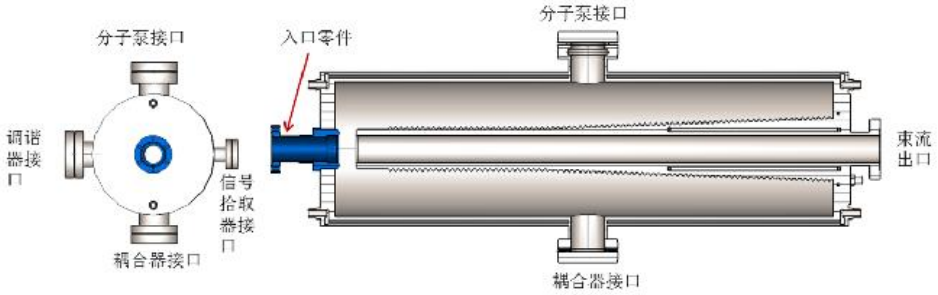


图 3-71 聚束腔工程设计示意图

2）主加速器

主加速器包含高频加速腔、各类型磁铁及电源。其中，高频加速腔是射频加速器的能量源泉，起到了对电子束加速的作用；偏转磁铁实现电子束的导向与传输，并且为电子束的横向聚焦提供一定的弱聚焦能力；校正磁铁实现电子束水平/垂直方向的轨迹校正；磁铁电源则为各种磁铁提供励磁的恒定电流源。

3）功率源

按照高频加速腔的功率损耗，以及束流负载情况，功率源需要实现 215MHz/85kW 的输出能力。本项目选择模块化的固态功率源技术路线实现。

4）旋转靶

目前常用的加速器靶主要有液态靶和固态靶两种。液态靶传热性能较好，但是可选的液态金属限制较大，并且还具有流动稳定性弱、腐蚀性较强以及系统复杂等缺点。固体靶主要分为移动靶或固定靶。对于高剂量微焦点的X射线源，使用的电子束流强高、焦斑小，能量沉积极为集中，靶材散热压力大，冷却介质高速流动给基体降温的方法难以满足使用要求。目前对于高能量沉积的处理一般为高速旋转大面积靶片的方法，增加有效使用的靶面积，降低局部能量沉积密度，进而降低靶片温升，因此本项目采用旋转靶的方式，纾解微焦点带来的转换靶热量集中的问题。

5）束流诊断

束流诊断系统的主要功能是实现电子束加速、传输过程中的位置、束斑参数的诊断能力，为装置的束流调试实验提供必要的测试手段。束流位置测量采用BPM探头，对注入器聚束前后、加速腔的每个pass以及束流传输线上的多个位置进行束心横向位置的在线监测，为加速器和传输线中的束心轨道调节提供测量数据；束斑测量采用闪烁体成像屏，对束流聚焦和传输的关键位置进行束斑横向分布的截断式测量，为加速器中束流传输和聚焦状态的调节提供参考。

6）控制系统

控制系统是一套高度集成的、通过友好的图形操作界面，对分布在加速器系统、精密机械扫描系统、CT成像系统的各种组件及设备进行监测和控制，确保在辐射、高功率环境下运行稳定、可靠、安全。

3.2.4.2 主要参数

本系统平均流强1mA，可产生高能X射线源或低能X射线源，其中高能X射线源的X射线能量为9.0±0.3 MeV，X射线焦点尺寸（FWHM）≤100 μm，正向1m处最大剂量率为8500cGy/min，低能X射线源的X射线能量为2.0±0.3 MeV，X射线焦点尺寸（FWHM）≤100μm，正向1m处最大剂量率为200cGy/min。侧向及后向剂量率损失不超过1‰。

可检工件最大直径为1500mm；可检工件最大高度为2000mm；CT检测最大等效钢厚为300mm；可检工件最大重量为2000kg。

3.2.4.3 装置组成

高能工业CT系统装置组成部分为：X射线源子系统、探测器子系统、机械扫描子系统、CT控制及图像处理子系统、辐射安全防护子系统。

X射线源子系统由RF栅控电子枪、聚束腔、高频加速腔、高频功率源、加速器控制、磁铁、旋转靶、前准直器、束流诊断、真空、水冷等构成。

探测器子系统由面阵探测器和弧形线阵探测器，同时配备射线屏蔽保护装置。探测器子系统主要用于接收X射线，并将X射线进行转换、处理为大动态范围、高信噪比的数字信号。面阵探测器采用高精度高分辨大动态范围面阵列探测器，通过进行射线屏蔽设计，可大大提高面阵探测器使用寿命；同时通过面阵后准直栅格屏蔽设计，可有效减少射线散射对图像质量产生的影响。

机械扫描子系统由通用模块机械扫描单元、专用模块机械扫描单元和扫描控制电气单元组成。机械子扫描系统作为整个系统的物理承载运动平台，可为探测器、被检测工件等提供CT检测所需的多轴高精度运动，主要包括工件分度运动、工件升降运动、工件沿射线方向运动、线阵/面阵切换运动等。机械扫描子系统主体结构部件采用精密铸造铸铁件，通过时效处理确保结构长期精度稳定；运动主要采用高精度滚珠丝杠副+直线导轨副传动形式，通过伺服控制系统搭配末端位置精确测量反馈实现运动精度的精确控制。

CT控制及图像处理子系统包括软件和硬件部分。软件由CT扫描控制软件、二维图像重建软件、三维图像重建处理软件和AI缺陷识别软件等组成，硬件部分由采集控制工作站、计算机图像重建工作站、打印机、网络交换机、不间断电源（UPS）和AI缺陷识别硬件群等组成。CT控制及图像处理子系统主要用于扫描参数设置和调整，扫描过程控制以及图像重建、校正、处理、分析、储存以及图像缺陷智能识别等。本子系统所有软件均为自主开发，软件功能强大，优化迭代速度快，支持定制化开发，可确保在设备整个寿命周期内适配软件均可及时进行升级更新。

辐射安全防护子系统作为辐射防护工房的配套装置，主要由安全联锁、安全警示、视频监控等组成，主要用于防止辐射事故发生，减轻辐射事故严重程度，确保工作人员及公众、环境安全。

3.2.4.4 工艺流程

对于体积较小的工件，工作人员通过迷道将其带入检测机房；对于体积较大的工件，在检测大厅北侧有一可移动混凝土屏蔽门，打开该屏蔽门运进检测机房。

在进行无损检测工作时，工作人员将工件放置于检测机房中的检测平台上，关好所有屏蔽门，并完成清场后，在操作台前按规程进行操作：调整探头对准工件，根据工件的具体情况将射线装置的参数调至最佳状态，然后启动射线机，X 射线束穿透工件投射到与其对应的图像接收系统上，图像系统将其传送到显示器上，工作人员在显示器上观察到工件的 X 射线图像。

检测结束后，工作人员关闭射线机，等待 30min 使得检测大厅内臭氧浓度降低到一定水平后，取出工件，继续进行下一个工件的检测工作。

3.3 辐射污染源项

3.3.1 微观表征子系统（光源）

本装置为高能电子加速器，其辐射源项包括瞬发辐射和感生放射性两大部分。瞬发辐射来源主要有：（1）束流包络周边粒子沿途随机损失在管壁（可视为均匀损失）；（2）整个束团突然丢失（束团 100%损失）；（3）注入器和储存环的点损失，以及调束打到废束桶的点损失；（4）电子在储存环中绕环运动发出的同步辐射光。除同步辐射光能量较低（<1 MeV），不会引起感生放射性外，其余途径产生的瞬发辐射能量可以达到入射电子能量，还会同时产生感生放射性。

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

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

瞬发辐射会引起加速器部件的活化，特别是束流损失较大处的部件，从而使检修人员受到辐射照射和产生一定量的活化固体废物，还会引起束流传输隧道中空气的活化（主要活化产物是 C-11、N-13、O-15 等），以及设备冷却水的活化（主要活化产物是 Be-7 和 H-3 等），这些放射性物质的排放可能会对环境造成一定的影响。此外穿过设备底层屏蔽而进入土壤的中子还会引起土壤和地下水的活化，也有可能对环境造成影响。

γ 射线会引起加速器房间及束流传输隧道空气中分子原子的电离产生自由基，自由基的结合会产生非放射性的有害物质（主要是 O_3、NO_x 和 HNO_3），这些物质的排放也会对环境带来一定的影响。

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

3.3.1.1 瞬发辐射源

光源的束损点位编号对应位置见图 3-72。所有束流损失点位的高度均为距离地板 1.3m。束流损失参数见表 3-27 至表 3-30。

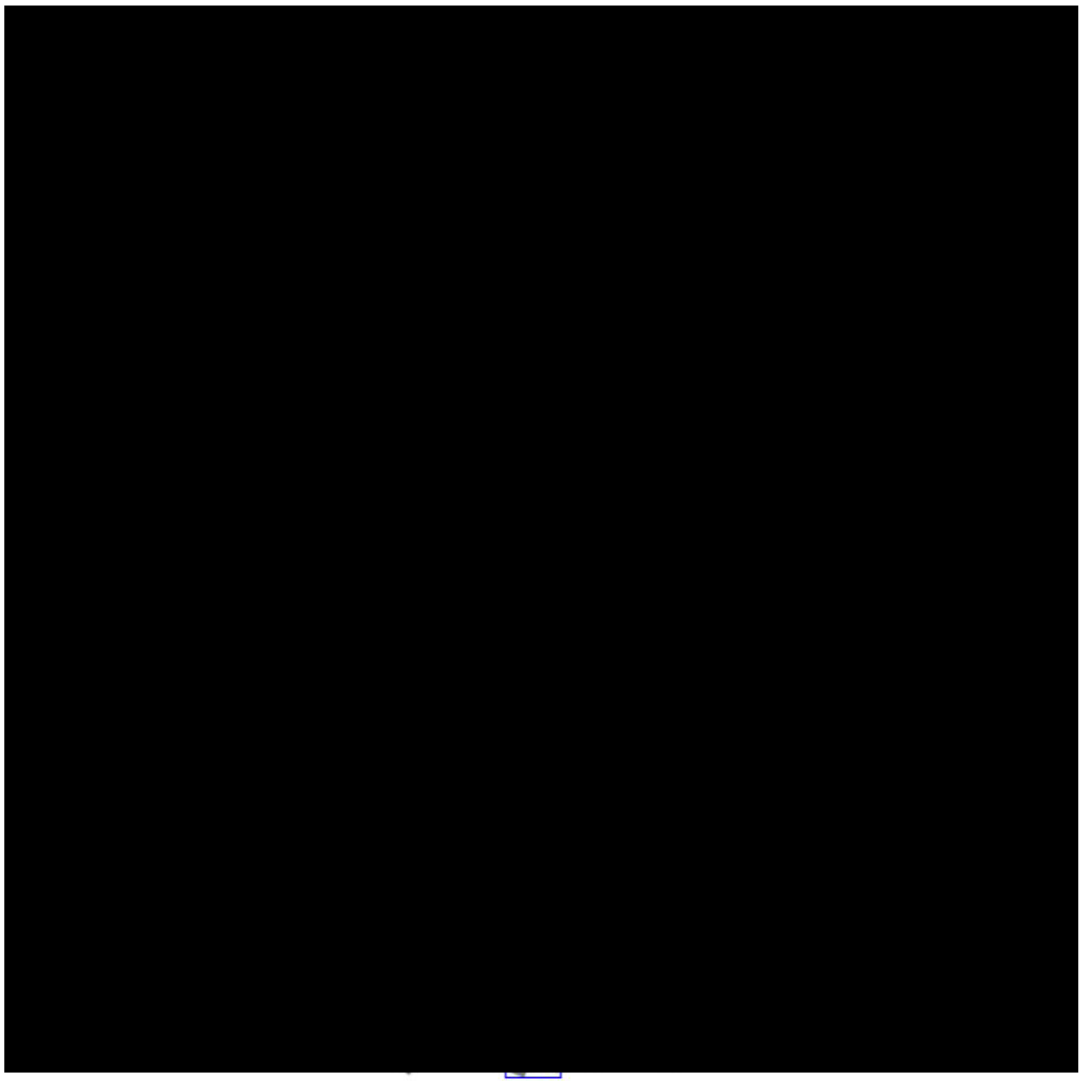


图 3-72 光源各区域束损点位、屏蔽墙、屏蔽门、迷宫及风管孔编号位置图

表 3-27 光源正常运行及调试期间束流损失点位及相关束损参数

区域	束流损失点位	能量	损失流强	损失功率	靶材料
直线隧道	L1 聚束器	16MeV	3.5nA	0.056W	铁
	L2 加速段	160MeV	0.6nA	0.096W	铁
	M1 分析铁	160MeV	1.0nA	0.16W	铁
	D1 废束桶	160MeV	10nA	1.6W	内层石墨；中间层铁；外层聚乙烯
	D2 废束桶	160MeV	10nA	1.6W	内层石墨；中间层铁；外层聚乙烯
	C1 低能传输线刮束器	160MeV	2.0nA	0.32W	钨铜
	LB1 低能传输线	160MeV	0.5nA	0.08W	铁
增强器-储存环隧道	LB1 低能传输线	160MeV	0.5nA	0.08W	铁
	B1 增强器注入区	160MeV	2.1nA	0.336W	铁
	B2 增强器整环	3.0GeV	0.41nC/s	1.23W	铁
	E1 增强器引出区	3.0GeV	1.03nA	3.09W	铁
	C2 高能传输线刮束器	3.0GeV	0.24nA	0.72W	钨铜
	HB1 高能传输线全段	3.0GeV	0.06nA	0.18W	铁
	R1 储存环注入区	3.0GeV	2.28nA	6.84W	铁
	R2 储存环整环	3.0GeV	59.6nC/h	—	铁

表 3-28 光源正常运行和调试期间束流参数和束流损失假设

区域	额定工作束流		束损位置	束流能量（GeV）	恶劣条件平均束流损失率	束损特征
	（nC/s）	（e/s）				
直线加速器	10	6.24E+10	低能段（聚束段）	0.016	35%	局部
			加速段	0.16	5%	分布
			加速管暗电流	0.16	1%	分布
			分析铁	0.16	10%	点损
低能传输线	6.2	3.87E+10	刮束器	0.16	32%	点损
			其他地方	0.16	8%	分布
增强器	4.1	2.56E+10	增强器注入区	0.16	50%	局部
			增强器环	0.15~3.0	10%	分布
			增强器引出区	3.0	25%	局部
高能传输线	3.0	1.87E+10	刮束器	3.0	8%	点损
			其他地方	3.0	2%	分布
储存环	2.85	1.78E+10	注入区	3.0	80%	局部
	—	环内电子数 3.0E+12	整环	3.0	100%（束流寿命 10 小时）	分布

*注：1）储存环区域注入完成后环内最多电子数 3×10^{12} 个电子，约 480nC；2）top-up 注入，储存环束流寿命 10 小时，单次注入时间 5s，每次注入 1 mA，约间隔 5 分钟注入一次。

表 3-29 光源直线段调束用束流垃圾桶束流参数

废束桶编号	名称或位置	电子能量	流强	偏转角度	年平均使用时间（小时）
1	直线加速器出口 1	160 MeV	10 nA	45°	第 1 年：4000 小时；第 2 年：2000 小时；第 3 年及以后 500 小时
2	直线加速器出口 2	160 MeV	10 nA	0°	第 1 年：4000 小时；第 2 年：2000 小时；第 3 年及以后 500 小时

表 3-30 光源运行时的单次事故束流损失假设

区域	单次损失电子数
增强器	2.56E+10
储存环	3.00E+12

3.3.1.2 天空反散射

天空反散射来自于大气对辐射的反散射，当加速器所在机房屋顶未加屏蔽或屏蔽体很薄时，穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射，由于空气的散射作用，将有部分又回到地面。根据文献《天空反照》（郑华智），对质子加速器、重离子加速器、甚至是一些能量较高的电子加速器，天空反散射剂量的主要成分都是中子，其能谱分布在热中子和加速器粒子能量之间。天空散射随装置开机产生，装置停机后便立刻消失，其大小取决于屏蔽体的厚度。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。根据表 5-5 的辐射屏蔽计算结果，光源隧道顶板外剂量率最大值为 2.20μSv/h（位于注入区隧道顶板 ST2 外）。由此可见，光源各区域顶板外瞬时剂量率均低于剂量率控制水平。因此，本项目光源可不考虑天空反散射的影响。

3.3.1.3 感生放射性

3.3.1.3.1 空气的感生放射性

3.3.1.3.1.1静态空气中感生放射性核素的产生

光源运行时损失的束流与周围介质相互作用产生轫致辐射（电磁级联辐射的一种），轫致辐射产生的中子与空气中稳定元素散裂作用应产生^{13}N、^{15}O、^{11}C等放射性核素。根据NCRP 144号报告对电子加速器在空气中产生的放射性的计算结果，空气中其它核素的产生量比^{13}N、^{15}O、^{11}C中最少核素（^{11}C）还要低一倍以上；^{41}Ar核素比以

上三种核素中最少核素（^{11}C）至少低2个量级；此外，H.J.Moe也给出了当空气中放射性浓度达到饱和时几种重要放射性核素的活度比: A[^{13}N]:A[^{15}O]:A[^{11}C] = 88.6%:9.5%:1.9%；同时，综合考虑核素的毒性和半衰期等因素，空气中活化产物的计算主要针对^{11}C、^{13}N和^{15}O这三种核素。

排放的放射性气体的活度和放射性浓度的计算公式为：

$$A_{sat} = \frac{\lambda_R WfY(1-e^{-x/\lambda})(1-e^{-(\lambda_R+kFR_i/V)t_i})}{\lambda_R + kFR_i/V}$$

$$C_{sat} = \frac{A}{V} \qquad (3.3.1.3.1.1\text{-}1)$$

光源活化空气的计算参数和结果如下表所示。

表 3-31 光源活化空气的活度计算参数

参数	物理意义	取值/计算结果	单位
A	隧道内放射性气体核素的活度	A=CV $V_{直线加速器隧道}$=300m^3,$V_{增强器和储存环隧道}$=6703m^3	Bq
C	隧道内放射性气体核素的放射性浓度	计算得出	Bq/m^3
λ_R	放射性核素的衰变常数 λ_R =ln2/$T_{1/2}$	$T_{1/2}$[^{13}N]=9.965 min，λ_R[^{13}N]=1.159×10^{-3} $T_{1/2}$[^{15}O]=2.037 min，λ_R[^{15}O]=5.67×10^{-3} $T_{1/2}$[^{11}C]=20.39 min，λ_R[^{11}C]=5.666×10^{-4}	1/s
W	电子束损失功率	输入参数	J/s
f	电子束的能量转化成韧致辐射并逃逸到空气中的比例	0.5	
Y	放射性核素产额 Y=1.21×10^{8}Z$^{0.66}$ Z 为空气的有效核电荷数	Z= 7.26(air) Y=4.5×10^8	n/J
x	光子在空气中走过的路程 $x=a\int_0^{\theta_0}\sec\theta\,d\theta\Big/\int_0^{\theta_0}d\theta$	a 为辐射源到屏蔽墙的垂直距离 θ为韧致辐射与源到屏蔽墙垂线的夹角 q_0 是韧致辐射不被加速器部件及周围物体吸收而能发射到空气中的最大角度， 取 q_0＝89°≈1.553 rad 最保守距离顶墙最远：a=25m，x=75m	m
λ	韧致辐射在空气中的线性衰减长度	385（保守值，取自文献）	m
k	隧道内放射性核素在空气中的混合不均匀系数	1/3	/

表 3-32 光源活化空气的活度计算结果

隧道区域	核素	$T_{1/2}$ (s)	静态饱和活度，Bq	静态饱和活度浓度，Bq/cm^3
直线加速器隧道	C-11	1223.4	1.23E+06	4.08E-03
	N-13	597.9	5.71E+07	1.90E-01
	O-15	122.22	6.13E+06	2.04E-02
增强器-储存环隧道	C-11	1223.4	9.67E+06	1.44E-03
	N-13	597.9	4.51E+08	6.73E-02
	O-15	122.22	4.83E+07	7.21E-03
所有隧道总计	C-11	1223.4	1.09E+07	1.56E-03
	N-13	597.9	5.08E+08	7.25E-02
	O-15	122.22	5.45E+07	7.78E-03

3.3.1.3.1.2向环境排风状态下空气的感生放射性

为避免活化空气从隧道里沿缝隙泄漏到工作场所对工作人员造成辐射，需要保持加速器隧道内空气对工作场所有一定的负压，也就是需要将隧道内的活化空气抽走，通过排风口排放到环境中。对加速器运行、停机时刻加速器内静态空气产生的某种放射性核素的活度随时间变化关系可以分别用下面两式表示：

$$S_{t_i} = S_{sat}\left(1 - e^{-\lambda t_i}\right) \qquad (3.3.1.3.1.2\text{-}1)$$

$$S_{t_c} = S_{sat}\left(1 - e^{-\lambda t_i}\right)e^{-\lambda t_c} \qquad (3.3.1.3.1.2\text{-}2)$$

式中，S_{t_i}、S_{t_c}分别是加速器运行和停机时的活度，t_i、t_c分别是照射时间和冷却时间，λ是该放射性核素的物理衰变常数。S_{sat}表示静态饱和活度：

$$S_{sat} = N\sigma\phi \qquad (3.3.1.3.1.2\text{-}3)$$

在加速器通风状态下，设加速器运行和冷却时的通风速率分别为R_i和R_c（单位：cm^3/s），V为隧道空气体积（cm^3）。则对隧道空气而言，需要引入类似衰变常数的丢失常数λ_{lossi}和λ_{lossc}（S^{-1}），以确定有效衰变常数λ_{effi}和λ_{effc}（S^{-1}）：

$$\lambda_{effi} = \lambda_{dec} + \lambda_{lossi} = \lambda_{dec} + \frac{R_i}{V} \qquad (3.3.1.3.1.2\text{-}4)$$

$$\lambda_{effc} = \lambda_{dec} + \lambda_{lossc} = \lambda_{dec} + \frac{R_c}{V} \quad (3.3.1.3.1.2\text{-}5)$$

经过推导可得到，对应的饱和放射性活度浓度由静态时的S_{sat}减少为$S_{(reduced)}$：

$$S_{(reduced)} = S_{sat}\frac{\lambda_{dec}}{\lambda_{effi}} \quad (3.3.1.3.1.2\text{-}6)$$

$$S_{t_i} = S_{(reduced)}\left(1 - e^{-\lambda_{effi}t_i}\right) \quad (3.3.1.3.1.2\text{-}7a)$$

$$S_{t_c} = S_{(reduced)}\left(1 - e^{-\lambda_{effi}t_i}\right)e^{-\lambda_{effc}t_c} \quad (3.3.1.3.1.2\text{-}7b)$$

运行时和停机后向周围排放的总活度可以由下列两式计算：

$$Q_i = \int_0^{t_i} S_{t_i} R_i \, dt = S_{sat}\frac{\lambda_{dec}}{\lambda_{effi}} R_i \left(t_i - \frac{1}{\lambda_{effi}}\left(1 - e^{-\lambda_{effi}t_i}\right)\right) \quad (3.3.1.3.1.2\text{-}8a)$$

$$Q_c = \int_0^{t_c} S_{t_c} R_c dt = S_{sat}\frac{\lambda_{dec}}{\lambda_{effi}} R_c\left(1 - e^{-\lambda_{effi}t_i}\right)\frac{\left(1-e^{-\lambda_{effc}t_c}\right)}{\lambda_{effc}} \quad (3.3.1.3.1.2\text{-}8b)$$

根据上一小节计算出的空气活化各核素的静态饱和活度浓度，采用上述公式计算了运行和停机工况下分别排放的核素活度。其中，加速器运行时，加速器各隧道以 0.5 次/h 的频率通风；停机后，加速器各隧道都以 4 次/h 的频率进行快通风。装置年运行时间为 7000h，假设平均每次连续供束时间为 100h，年停机的次数为 70 次/年，则每次停机的平均时间为 25.1h。计算中采用的通风系统参数如表 3-33 所示，计算结果如表 3-34 所示。可以看出，核素的最大动态饱和活度浓度在 10^{-1} Bq/cm^3 量级，年总排放量为 1.87E+12Bq。

表 3-33 光源计算空气活化采用的通风系统参数

隧道区域	体积 V，cm^3	运行时通风频率，次/h	运行时通风速率 Ri，cm^3/s	停机后通风频率，次/h	停机后通风速率 R_c，cm^3/s	年运行时间，h/年	每次连续运行时间 t_i，h	年停机次数，次/年	每次停机时间 t_c，h
直线加速器	3.00E+08	0.5	4.17E+04	4	3.33E+05	7000	100	70	25.1
增强器-储存环	6.70E+09	0.5	9.31E+05	4	7.45E+06	7000	100	70	25.1

表 3-34 光源空气活化饱和浓度及年排放量计算结果

隧道区域	核素	$T_{1/2}$ (s)	动态饱和活度浓度 $S_{(reduced)}$，Bq/cm³	年运行时排放量 Q_{itotal}，Bq	年停机后排放量 Q_{ctotal}，Bq	年总排放量 Q_{total}，Bq	年排放速率，Bq/s
直线加速器	^{11}C	1.22E+03	3.49E-03	3.65E+09	4.22E+07	3.69E+09	2.81E+03
	^{13}N	5.98E+02	1.75E-01	1.84E+11	1.47E+09	1.85E+11	1.41E+05
	^{15}O	1.22E+02	2.01E-02	2.11E+10	5.03E+07	2.11E+10	1.61E+04
	总计	——	——	2.09E+11	1.56E+09	2.10E+11	1.60E+05
增强器-储存环	^{11}C	1.22E+03	1.23E-03	2.88E+10	3.32E+08	2.91E+10	2.22E+04
	^{13}N	5.98E+02	6.21E-02	1.46E+12	1.16E+10	1.47E+12	1.12E+06
	^{15}O	1.22E+02	7.09E-03	1.66E+11	3.97E+08	1.67E+11	1.27E+05
	总计	——	——	1.65E+12	1.24E+10	1.66E+12	1.27E+06
所有隧道	^{11}C	1.22E+03	1.33E-03	3.25E+10	3.75E+08	3.28E+10	2.50E+04
	^{13}N	5.98E+02	6.69E-02	1.64E+12	1.31E+10	1.65E+12	1.26E+06
	^{15}O	1.22E+02	7.65E-03	1.87E+11	4.47E+08	1.88E+11	1.43E+05
	总计	——	——	1.86E+12	1.39E+10	1.87E+12	1.43E+06

3.3.1.3.2 冷却水的感生放射性

通过解析法计算光源的各个区域的冷却水活化浓度，根据公式：

$$N = \frac{A}{\lambda_R + \frac{FR}{V}(1-f)}\left(1 - e^{-(\lambda_R + \frac{FR}{V}(1-f)t)}\right) \quad (3.3.1.3.2\text{-}1)$$

计算得出活度=λRN，其中A为：

$$A = \frac{wf'Y'(1-e^{-\frac{X}{\lambda}})}{3.7\times 10^{7}} \quad (3.3.1.3.2\text{-}2)$$

详细的计算参数见表 3-35。计算结果见表 3-36。由计算结果可知，光源活化冷却水总饱和活度为1.11E+07Bq。在光源装置冷却水系统内，活化冷却水的总量约为150m³，则光源活化冷却水的饱和活度浓度为7.41E+04Bq/ m³。

表 3-35 光源放射性核素在冷却水中的活度计算参数

参数	物理意义	取值/计算结果	单位
A	活度功率转化数	由公式计算得出	mCi
λ_R	放射性核素的衰变常数 λ_R =ln2/$T_{1/2}$	$T_{1/2}$[^{13}N]=9.965 min，λ_R[^{13}N]= 0.069593072 $T_{1/2}$[^{15}O]=2.037 min，λ_R[^{15}O]=0.340891967 $T_{1/2}$[^{11}C]=20.39 min，λ_R[^{11}C]= 0.033977794 $T_{1/2}$[^{3}H]=6.46E+6min，λ_R[^{3}H]= 1.07217E-07 $T_{1/2}$[^{7}Be]=7.6752E+4 min，λ_R[^{7}Be]= 9.031E-06	1/min
X	通过水管的平均路径长度	0.02(假设值)	m
F'	修正因子	0.1	/
Y' 放射性核素产额 Y=1.21×$10^8$$Z^{0.66}$ Y'=FY	放射性核素修正产额	Z= 3.34（H_2O） F[^{13}N]= 1% F [^{15}O]=100% F [^{11}C]= 4.4% F[^{3}H]= 1% F[^{7}Be]= 0.44%	Atoms/Ws
λ	平均衰减长度	0.5	m
FR/V	单位体积内的水流量	（项目提供） FR $_{直线}$=7.5m^3/h，FR $_{增强器和同步环}$ 127.8 m^3/h V $_{直线}$=0.1m^3，V $_{增强器和同步环}$=15 m^3	min^{-1}
f	完整闭合回路下放射性活度留存	$e^{-\lambda R' \cdot T}$	/
t	循环时间	10	min

表 3-36 光源放射性核素在冷却水中的活度计算结果

隧道区域	核素	束流损失(W)	活度（Bq）
直线加速器隧道	H-3	0.68	1.57E+04
	Be-7		3.14E+03
增强器-储存环隧道	H-3	12.526	2.90E+05
	Be-7		5.80E+04
总计			1.11E+07

备注：采用解析计算法对于饱和活度中的取值是相当保守的。

3.3.1.3.3 结构部件的感生放射性

直线隧道 0 度和 45 度角废束桶的加速器运行工况和束流损失参数都是相同的，所以两个废束桶所产生的感生放射性情况相同。

直线隧道废束桶建模图如下图所示。

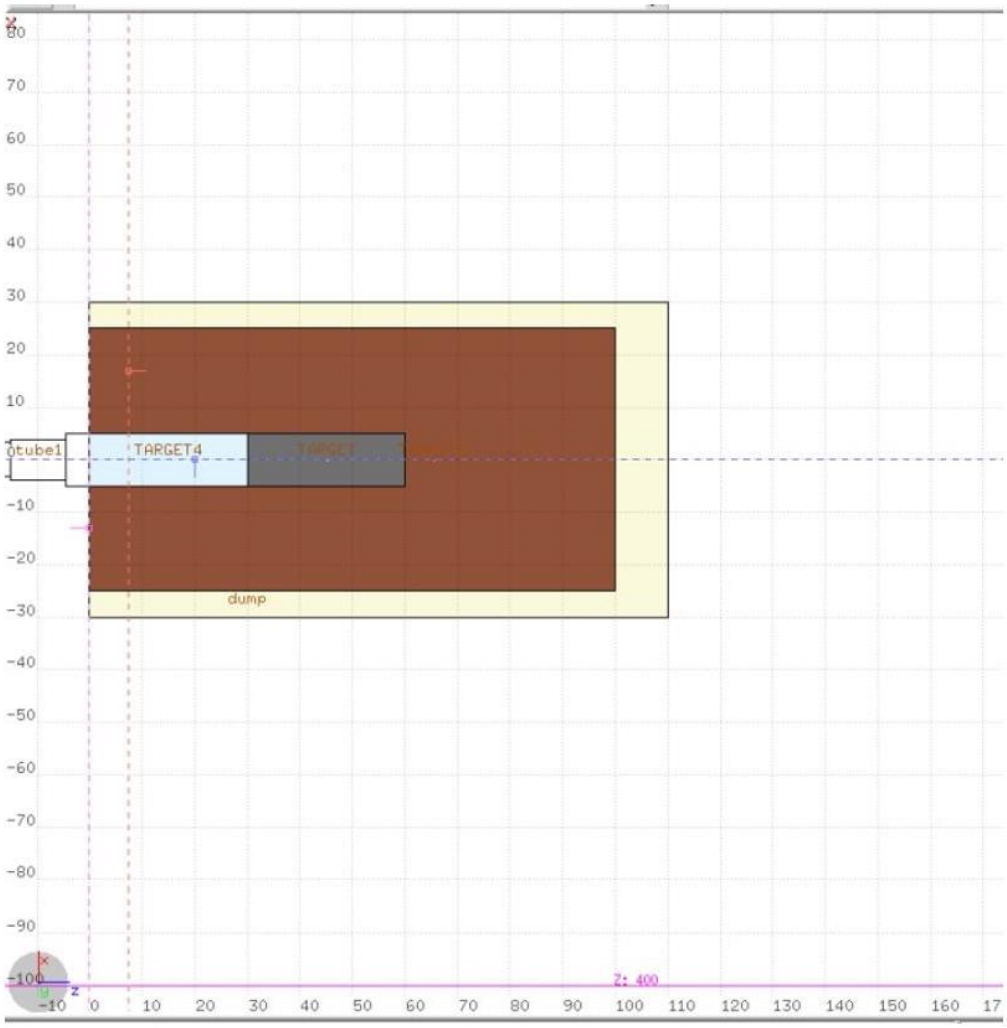


图 3-73 光源直线隧道废束桶建模图

低能线刮束器、高能线刮束器、增强器弯铁建模图如下图所示。计算采用的束损参数、运行时间（30 年）、部件材质等基本参数见下表。

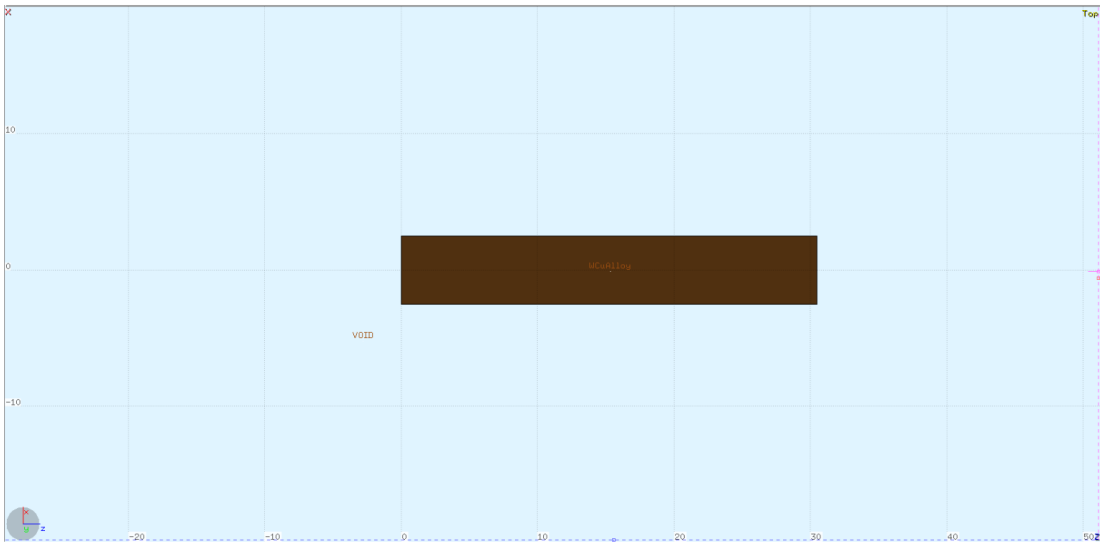


图 3-74 光源低能线刮束器、高能线刮束器建模图

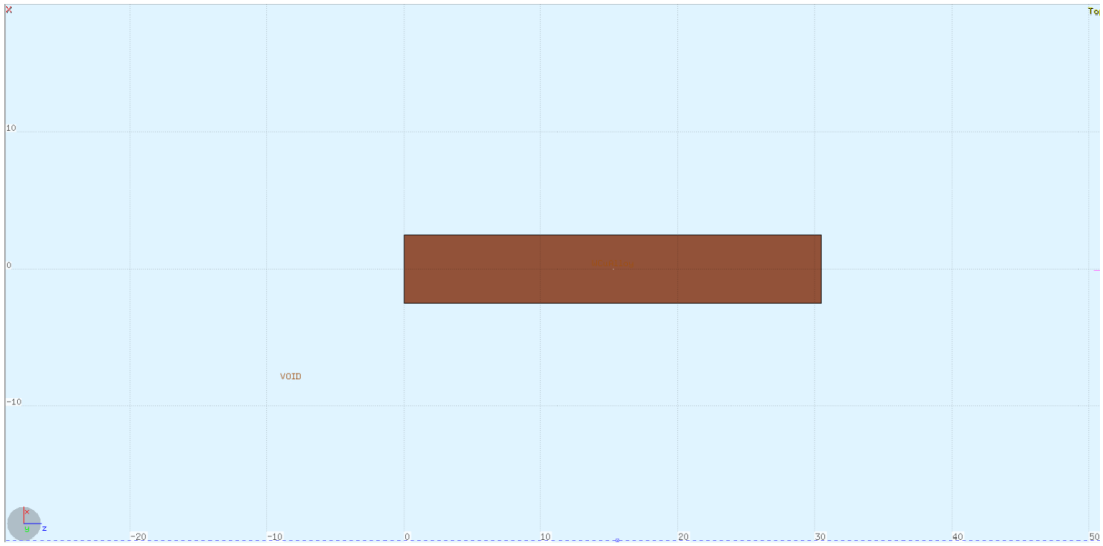


图 3-75 光源增强器弯铁建模图

表 3-37 光源活化部件计算参数一览表

部件	参数	束损（p/s）	运行工况	材质
直线隧道 0 度或 45 度角废束桶	160MeV	6.24E+10	连续运行 20000 小时（30 年，基于表格 5-2 年平均使用时间参数）	废束桶内层为直径 10cm，厚度 30cm 的石墨圆柱体；中间层为厚度 20cm，长度 100cm 的铁长方体；外层为厚度 5cm，长度 110cm 的聚乙烯长方体。
低能线刮束器	160MeV	1.2384E+10	连续运行 30 年，每年 7000 小时	半径 5cm，长度 30.48cm，刮束器主体材质为：钨铜合金（85%钨 ＋15% 铜），密度大约为：17.7g/cm^3
高能线刮束器	3.0GeV	1.496E+9	连续运行 30 年，每年 7000 小时	半径 5cm，长度 30.48cm，刮束器主体材质为：钨铜合金（85%钨 ＋15% 铜），密度大约为：17.7g/cm^3
增强器弯铁	3.0GeV	7.1E+8	连续运行 30 年，每年 7000 小时	标准靶 半径 5cm，长度 30.48cm，材质为：铁（密度：7.8g/cm^3）

表 3-38 光源直线隧道 0 度或 45 度角废束桶停机时刻的活化核素、活度

活化部件	核素	停机时刻的活度浓度（Bq/g）	停机时刻的活度（Bq）
直线隧道 0 度或 45 度角废束桶	Fe-55	1.12E+02	2.16E+08
	Mn-54	1.36E+01	2.64E+07
	Be-7	5.79	1.12E+07
	Cr-51	2.17	4.19E+06
	H-3	1.35	2.62E+06
	Mn-52	7.91E-01	1.53E+06
	V-49	5.15E-01	9.96E+05
	Fe-59	3.95E-01	7.65E+05
	V-48	2.03E-01	3.93E+05
	Cr-49	1.30E-01	2.52E+05
	Sc-46	2.48E-02	4.79E+04
	V-52	1.95E-02	3.77E+04
	Sc-47	1.02E-02	1.97E+04
	Co-56	9.56E-03	1.85E+04
	Ca-45	1.75E-03	3.39E+03
	Ar-37	9.04E-04	1.75E+03
	Co-58	3.87E-04	7.49E+02
	Co-57	3.41E-04	6.59E+02

表 3-39 光源直线隧道 0 度或 45 度角废束桶停机后冷却 30 分钟的活化核素、活度

活化部件	核素	停机后冷却 30 分钟后的活度浓度 (Bq/g)	停机后冷却 30 分钟后的活度 (Bq)
直线隧道 0 度或 45 度角废束桶	Fe-55	1.12E+02	2.16E+08
	Mn-54	1.36E+01	2.64E+07
	Be-7	5.79	1.12E+07
	Cr-51	2.16	4.18E+06
	H-3	1.35	2.62E+06
	Mn-52	7.86E-01	1.52E+06
	V-49	5.15E-01	9.96E+05
	Fe-59	3.97E-01	7.68E+05
	V-48	2.03E-01	3.93E+05
	Cr-49	7.96E-02	1.54E+05
	Sc-46	2.48E-02	4.79E+04
	Sc-47	1.01E-02	1.96E+04
	Co-56	9.56E-03	1.85E+04
	Ca-45	1.75E-03	3.39E+03
	Ar-37	9.04E-04	1.75E+03
	Co-58	3.87E-04	7.48E+02
	Co-57	3.41E-04	6.59E+02
	V-52	7.60E-05	1.47E+02

表 3-40 光源高能刮束器停机时刻的活化核素、活度

活化部件	核素	停机时刻的活度浓度（Bq/g）	停机时刻的活度（Bq）
高能刮束器	W-181	2.60E+04	2.75E+08
	W-185	2.24E+04	2.37E+08
	Ta-181m	1.93E+04	2.04E+08
	W-181m	1.80E+04	1.90E+08
	Cu-62	4.03E+03	4.26E+07
	Cu-64	2.39E+03	2.53E+07
	W-183m	1.60E+03	1.69E+07
	Ta-179	7.66E+02	8.11E+06
	Ta-179m	6.79E+02	7.18E+06
	W-179	6.61E+02	7.00E+06
	W-184m	5.76E+02	6.09E+06
	W-187	4.47E+02	4.73E+06
	W-185m	4.29E+02	4.54E+06
	Ta-178m	3.83E+02	4.06E+06
	W-178	3.59E+02	3.81E+06
	Ta-177	2.92E+02	3.10E+06

活化部件	核素	停机时刻的活度浓度（Bq/g）	停机时刻的活度（Bq）
	Ta-176	2.30E+02	2.44E+06
	W-177	1.98E+02	2.09E+06
	Cu-61	1.97E+02	2.09E+06
	Hf-175	1.91E+02	2.02E+06
	Ta-175	1.69E+02	1.79E+06
	H-3	1.69E+02	1.78E+06
	W-176	1.56E+02	1.65E+06
	Ta-177m	1.51E+02	1.60E+06
	Lu-173	1.35E+02	1.43E+06
	Ta-174	1.34E+02	1.42E+06
	Ta-182	1.33E+02	1.41E+06
	Lu-173m	1.33E+02	1.41E+06
	Hf-173	1.30E+02	1.38E+06
	Lu-172	1.16E+02	1.23E+06
	Ta-183	1.15E+02	1.22E+06
	Lu-172m	1.13E+02	1.20E+06
	W-179m	1.12E+02	1.19E+06
	Hf-172	1.10E+02	1.17E+06
	Ta-173	1.03E+02	1.09E+06
	Lu-171	9.28E+01	9.83E+05
	Yb-171m	8.72E+01	9.24E+05
	W-175	8.69E+01	9.21E+05
	Hf-171	8.41E+01	8.90E+05
	Ta-180	7.92E+01	8.39E+05
	Lu-170	7.84E+01	8.30E+05
	Ta-172	7.59E+01	8.04E+05
	Ta-185	7.54E+01	7.99E+05
	Co-58	7.34E+01	7.78E+05
	W-174	7.15E+01	7.57E+05
	Hf-170	6.92E+01	7.33E+05
	Hf-178m	6.37E+01	6.75E+05
	Yb-169	6.32E+01	6.69E+05
	Ta-178	6.32E+01	6.69E+05
	Lu-169	6.11E+01	6.47E+05
	Ta-171	5.65E+01	5.98E+05
	Ta-184	5.63E+01	5.96E+05
	Hf-169	4.83E+01	5.11E+05
	Lu-168m	4.82E+01	5.10E+05
	Cu-66	4.70E+01	4.97E+05
	Ta-182m	4.57E+01	4.84E+05

活化部件	核素	停机时刻的活度浓度（Bq/g）	停机时刻的活度（Bq）
	Tm-167	4.39E+01	4.64E+05
	Yb-167	4.32E+01	4.58E+05
	Er-167m	4.31E+01	4.57E+05
	Hf-168	3.94E+01	4.18E+05
	W-173	3.93E+01	4.16E+05
	Tm-166	3.83E+01	4.06E+05
	Lu-167	3.81E+01	4.03E+05
	Yb-166	3.75E+01	3.97E+05
	Ta-170	3.60E+01	3.81E+05
	W-172	3.21E+01	3.39E+05
	Co-57	3.14E+01	3.33E+05
	Tm-167m	3.11E+01	3.29E+05
	Er-165	3.10E+01	3.28E+05
	Tm-165	3.08E+01	3.26E+05
	W-180m	3.01E+01	3.19E+05
	Yb-165	2.92E+01	3.09E+05
	Tm-165	2.79E+01	2.95E+05
	Tm-165m	2.78E+01	2.95E+05
	Tm-164	2.67E+01	2.83E+05
	Co-58m	2.53E+01	2.68E+05
	Yb-164	2.49E+01	2.63E+05
	Ta-169	2.48E+01	2.62E+05
	Hf-167	2.45E+01	2.59E+05
	Lu-165	2.31E+01	2.44E+05

表 3-41 光源高能刮束器停机后冷却 30 分钟的活化核素、活度

活化部件	核素	停机后冷却 30 分钟后的活度浓度 (Bq/g)	停机后冷却 30 分钟后的活度 (Bq)
高能刮束器	W-181	2.60E+04	2.75E+08
	W-185	2.23E+04	2.37E+08
	Ta-181m	1.92E+04	2.04E+08
	Cu-64	2.32E+03	2.46E+07
	Ta-179	7.66E+02	8.11E+06
	Cu-62	4.70E+02	4.97E+06
	W-187	4.40E+02	4.66E+06
	W-179	3.93E+02	4.16E+06
	Ta-179m	3.88E+02	4.11E+06
	Ta-178m	3.62E+02	3.83E+06
	W-178	3.59E+02	3.80E+06

活化部件	核素	停机后冷却 30 分钟后的活度浓度 (Bq/g)	停机后冷却 30 分钟后的活度 (Bq)
	Ta-177	2.92E+02	3.09E+06
	Ta-176	2.26E+02	2.40E+06
	Hf-175	1.91E+02	2.02E+06
	Cu-61	1.78E+02	1.88E+06
	W-177	1.69E+02	1.79E+06
	H-3	1.69E+02	1.78E+06
	Ta-175	1.66E+02	1.75E+06
	W-176	1.36E+02	1.44E+06
	Lu-173	1.35E+02	1.43E+06
	Ta-182	1.33E+02	1.41E+06
	Hf-173	1.30E+02	1.38E+06
	Lu-173m	1.30E+02	1.37E+06
	Ta-177m	1.26E+02	1.33E+06
	Lu-172	1.16E+02	1.23E+06
	Ta-183	1.15E+02	1.22E+06
	Ta-174	1.13E+02	1.19E+06
	Hf-172	1.10E+02	1.17E+06
	Lu-172m	1.10E+02	1.17E+06
	Ta-173	9.36E+01	9.91E+05
	Lu-171	9.28E+01	9.83E+05
	Yb-171m	8.68E+01	9.19E+05
	Hf-171	8.28E+01	8.77E+05
	Lu-170	7.83E+01	8.29E+05
	Ta-180	7.59E+01	8.03E+05
	Co-58	7.34E+01	7.78E+05
	Hf-170	6.80E+01	7.20E+05
	Yb-169	6.32E+01	6.69E+05
	Lu-169	6.06E+01	6.41E+05
	Hf-178m	5.46E+01	5.78E+05
	Ta-178	5.45E+01	5.77E+05
	Ta-184	5.41E+01	5.73E+05
	W-184m	5.27E+01	5.57E+05
	Ta-185	4.95E+01	5.24E+05
	W-175	4.85E+01	5.14E+05
	Ta-172	4.69E+01	4.96E+05
	Tm-167	4.39E+01	4.64E+05
	Er-167m	4.31E+01	4.57E+05
	W-174	3.83E+01	4.05E+05
	Tm-166	3.83E+01	4.05E+05

活化部件	核素	停机后冷却 30 分钟后的活度浓度 (Bq/g)	停机后冷却 30 分钟后的活度 (Bq)
	Yb-166	3.73E+01	3.95E+05
	Yb-167	3.48E+01	3.68E+05
	Co-57	3.14E+01	3.33E+05
	Er-165	3.10E+01	3.28E+05
	Tm-165	3.07E+01	3.25E+05

表 3-42 光源低能刮束器停机时刻的活化核素、活度

活化部件	核素	停机时刻的活度浓度（Bq/g）	停机时刻的活度（Bq）
低能刮束器	W-181	1.15E+04	1.22E+08
	W-185	9.86E+03	1.04E+08
	Ta-181m	8.52E+03	9.02E+07
	W-181m	7.98E+03	8.45E+07
	Cu-62	1.77E+03	1.88E+07
	Cu-64	1.04E+03	1.10E+07
	W-183m	6.59E+02	6.97E+06
	Ta-179	2.70E+02	2.86E+06
	Ta-179m	2.51E+02	2.65E+06
	W-184m	2.49E+02	2.64E+06
	W-179	2.48E+02	2.63E+06
	W-185m	1.78E+02	1.88E+06
	W-187	1.61E+02	1.71E+06
	Ta-178m	1.20E+02	1.27E+06
	W-178	1.16E+02	1.23E+06
	Cu-61	8.11E+01	8.59E+05
	Ta-177	6.98E+01	7.39E+05
	W-177	5.67E+01	6.00E+05
	Ta-176	4.67E+01	4.94E+05
	Ta-182	4.53E+01	4.80E+05
	Ta-177m	4.27E+01	4.53E+05
	W-179m	4.23E+01	4.48E+05
	Ta-183	3.96E+01	4.20E+05

表 3-43 光源低能刮束器停机后冷却 30 分钟的活化核素、活度

活化部件	核素	停机后冷却 30 分钟后的活度浓度 (Bq/g)	停机后冷却 30 分钟后的活度 (Bq)
低能刮束器	W-181	1.15E+04	1.22E+08
	W-185	9.86E+03	1.04E+08
	Ta-181m	8.51E+03	9.01E+07
	Cu-64	1.01E+03	1.07E+07
	Ta-179	2.70E+02	2.86E+06
	Cu-62	2.06E+02	2.18E+06
	W-187	1.59E+02	1.68E+06
	W-179	1.46E+02	1.55E+06
	Ta-179m	1.44E+02	1.53E+06
	Ta-178m	1.16E+02	1.23E+06
	W-178	1.16E+02	1.22E+06
	Cu-61	7.31E+01	7.74E+05
	Ta-177	6.97E+01	7.38E+05
	W-177	4.84E+01	5.13E+05
	Ta-176	4.63E+01	4.90E+05
	Ta-182	4.53E+01	4.80E+05
	Ta-183	3.95E+01	4.18E+05
	Ta-177m	3.60E+01	3.81E+05

表 3-44 光源增强器弯铁停机时刻的活化核素、活度

活化部件	核素	停机时刻的活度浓度（Bq/g）	停机时刻的活度（Bq）
增强器弯铁	Fe-55	4.43E+04	2.07E+08
	Mn-54	2.23E+03	1.04E+07
	Fe-53	1.23E+03	5.73E+06
	Cr-51	6.92E+02	3.23E+06
	V-49	4.07E+02	1.90E+06
	Mn-52m	3.30E+02	1.54E+06
	H-3	2.33E+02	1.09E+06
	V-48	2.31E+02	1.08E+06
	Mn-52	2.16E+02	1.01E+06
	Mn-56	1.73E+02	8.08E+05
	Cr-49	9.31E+01	4.35E+05
	Sc-44	8.13E+01	3.79E+05
	Mn-51	8.06E+01	3.76E+05
	Ti-45	5.68E+01	2.65E+05
	Sc-46	5.06E+01	2.36E+05

表 3-45 光源增强器弯铁停机后冷却 30 分钟的活化核素、活度

活化部件	核素	停机后冷却 30 分钟后的活度浓度 (Bq/g)	停机后冷却 30 分钟后的活度 (Bq)
增强器弯铁	Fe-55	4.43E+04	2.07E+08
	Mn-54	2.23E+03	1.04E+07
	Cr-51	6.92E+02	3.23E+06
	V-49	4.07E+02	1.90E+06
	H-3	2.33E+02	1.09E+06
	V-48	2.30E+02	1.07E+06
	Mn-52	2.16E+02	1.01E+06
	Mn-56	1.51E+02	7.06E+05
	Mn-52m	1.35E+02	6.29E+05
	Fe-53	1.09E+02	5.06E+05

3.3.1.3.4 土壤和地下水的感生放射性

直线隧道和增强器-储存环隧道地板厚度为 2m，底板与土壤交界处剂量率计算结果见下表，计算结果均低于剂量率控制水平，可不考虑土壤和地下水的活化。

表 3-46 光源隧道底板与土壤交界处的模拟参数及结果

位置	束损参数	底版材质及厚度	底板与土壤交界处的最大剂量率模拟结果	剂量率控制水平
直线隧道刮束器	160MeV, 1.2384E+10p/s	普通混凝土（密度 2.35g/cm³）厚度 200cm	0.1μSv/h	≤5.5mSv/h
直线隧道废束桶	160MeV，6.24E+10p/s		0.1μSv/h	≤5.5mSv/h
增强器-储存环隧道储存环注入点磁铁	3.0GeV，1.424E10p/s		12.7 μSv/h	≤5.5mSv/h

3.3.1.4 臭氧等有害气体

在加速器隧道区，空气中的氧气、二氧化氮（NO_2）和氮气（N_2）均可吸收 γ 射线的辐射能量，发生辐射分解，形成氧原子（O）和一氧化氮（NO）。反应方程如下：

$$O_2 + h\nu \longrightarrow 2O \qquad (3.3.1.4\text{-}1)$$

$$NO_2 + h\nu \longrightarrow NO + O \qquad (3.3.1.4\text{-}2)$$

$$N_2 + h\nu \longrightarrow 2N \qquad (3.3.1.4\text{-}3)$$

$$N + O_2 + h\nu \longrightarrow NO + O \quad (3.3.1.4\text{-}4)$$

其中产生的氧原子（O）与空气中的氧气（O_2）结合生成臭氧（O_3）；产生的一氧化氮（NO）通过与氧气（O_2）或臭氧（O_3）反应生成二氧化氮（NO_2），二氧化氮（NO_2）与空气中的水分子反应生成硝酸（HNO_3）。反应方程式如下：

$$O + O_2 \longrightarrow O_3 \quad (3.3.1.4\text{-}5)$$

$$2NO + O_2 \longrightarrow 2NO_2 \quad (3.3.1.4\text{-}6)$$

$$NO + O_3 \longrightarrow NO_2 + O_2 \quad (3.3.1.4\text{-}7)$$

$$NO_2 + H_2O \longrightarrow HNO_3 \quad (3.3.1.4\text{-}8)$$

其中，产生出的臭氧对人体健康有害，产生出的硝酸可腐蚀加速器设备。参照 NCRP-144 号报告，照射期间，臭氧的浓度满足下面的平衡方程：

$$\frac{dN}{dt} = gI - \alpha N - \kappa IN - \frac{QN}{V} \quad (3.3.1.4\text{-}9)$$

式中，各物理量含义如下：

dN/dt：单位体积单位时间臭氧形成（或分解）的速率（$m^{-3}.s^{-1}$）；

N：辐照时间 t 后单位体积的臭氧数目；

I：空气中单位体积单位时间的光子能量沉积（$eV.m^{-3}.s^{-1}$）；

g：空气中单位光子能量沉积形成的臭氧分子数目（eV^{-1}）；

α：臭氧分子的化学分解速率（s^{-1}）；

κ：单位光子能量沉积的臭氧分子的辐照离解速率（$eV^{-1}.\ m^3$）；

Q：通风速率（$m^3.s^{-1}$）；

V：被辐照空气的体积（m^3）。

该方程的解为下式：

$$N(t) = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + \frac{Q}{V}}\left[1 - e^{-\left(\alpha + \kappa I + \frac{Q}{V}\right)t}\right] \quad (3.3.1.4\text{-}10)$$

在长时间照射条件下，即上式$t \longrightarrow \infty$，得到臭氧的饱和浓度为：

$$N_{sat} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + \frac{Q}{V}} \quad (3.3.1.4\text{-}11)$$

计算中，各物理量参照 NCRP-144 号报告，取值如下：

（1）g值在高剂量率（$>5\times10^{8}\mathrm{Gy.s^{-1}}$）下取 0.103 eV^{-1}，低剂量率下取值 0.074 eV^{-1}，本装置属低剂量率情形，取后者；

（2）α和κ分别取值2.3×10^{-4} s^{-1}和1.4×10^{-16} $eV^{-1}.m^{3}$；

（3）通风频率Q/V取值为：运行时，直线加速器隧道、增强器-储存环隧道为 0.5 次/h；停机后，直线加速器隧道、增强器-储存环隧道均为 4 次/h；

（4）I经计算得到，见表 3-47、表 3-48。

长时间照射条件下，NO_2 的饱和浓度N'_{sat}可由计算得到的臭氧的饱和浓度N_{sat}、NO_2 和臭氧的 g 值比换算得到：

$$N'_{sat}=\frac{g'}{g}\cdot N_{sat} \tag{3.3.1.4-12}$$

式中，NO_2 的 g′取值参照 NCRP-144 号报告，低剂量率下取值为 0.84 eV^{-1}。

表 3-47 光源 O_3 和 NO_2 的浓度计算参数

参数	物理意义	取值/计算结果	单位
P	空气吸收功率	$P=6.25\times10^{18}\times Wfx/\lambda$	eV/s
I	光子能量沉积	P*V	$eV\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}$
f	电子束的能量转化成韧致辐射并逃逸到空气中的比例	0.5	/
x	光子在空气中走过的路程 $x=a\int_0^{\theta_0}\sec\theta\,d\theta\Big/\int_0^{\theta_0}d\theta$	a 为辐射源到屏蔽墙的垂直距离 θ为韧致辐射与源到屏蔽墙垂线的夹角 θ_0 是韧致辐射不被加速器部件及周围物体吸收而能发射到空气中的最大角度， 取θ_0＝89°≈1.553 rad 最保守距离顶墙最远：a=25m，x=75m	m
λ	韧致辐射在空气中的线性衰减长度	385（保守值，取自文献）	m

表 3-48 光源 O_3 和 NO_2 的空气中单位体积单位时间的光子能量沉积结果

隧道区域	气体	束流损失功率（W）	空气中单位体积单位时间的光子能量沉积 I（$eV\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}$）
直线加速器隧道	O_3	1.6	3.290E+15
	NO_2		3.290E+15
增强器及储存环隧道	O_3	12.628	1.162E+15
	NO_2		1.162E+15

表 3-49 光源各隧道区域的 O_3 和 NO_2 的饱和浓度和排放速率

隧道区域	空气体积 V，m^3	O_3 最大饱和浓度，mg/m^3	运行 O_3 排放速率，kg/h	停机 O_3 排放速率，kg/h	NO_2 最大饱和浓度，mg/m^3	运行 NO_2 排放速率，kg/h	停机 NO_2 排放速率，kg/h
直线加速器隧道	300	4.21E-05	6.32E-09	5.04E-08	4.58E-04	6.87E-08	5.49E-07
增强器及储存环隧道	6703	4.20E-05	1.41E-07	1.12E-06	4.57E-04	1.53E-06	1.22E-05
合计	——	——	1.47E-07	1.17E-06	——	1.60E-06	1.27E-05

表 3-49 给出了按上述公式和参数计算得到的臭氧和二氧化氮的饱和浓度和排放速率，由计算结果可知臭氧及氮氧化物的产生和排放对工作场所和环境的影响是很微小的，其饱和浓度、排放速率皆大大低于控制目标值。

3.3.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

3.3.2.1 瞬发辐射源

粒子加速器运行时产生的辐射场，包括加速器的运行时产生的“瞬发辐射场”和加速器停机后依然存在的“残余放射场”。瞬发辐射决定着加速器的屏蔽厚度，而残余放射性是工作人员所受剂量的主要来源。瞬发辐射是加速器运行时损失束流与加速器部件和屏蔽体等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但会随着加速器的停机而完全消失；残余放射性主要来自与加速器部件、设备冷却水、隧道内空气被主束或次级粒子轰击产生的活化产物，在加速器停机后依然存在。

对于离子加速器，其运行时产生的辐射主要是高能粒子引起的核反应而发射出的瞬发中子，主要包括由核内级联产生的高能中子及复合核退激出射的蒸发中子（各向同性部分）两部分，其他粒子（电子，γ 等）不论是产生的量还是穿透能力皆小于中子。重离子核反应瞬发中子有两个突出的特点：从角分布看，正前方有尖锐的峰值；从能谱看，几乎各个方向都有一部分高能中子，尤其是前方，重离子产生的中子能量可以明显高于入射单核能。

辐照子系统的中高能离子加速器可产生并加速从 He 到 Bi 的所有离子，表 3-50 为该装置的三种典型粒子束流参数，三种典型粒子中，^{12}C 的单核能最高，流强最大。对中高能的重离子而言，其损失时产生次级辐射的强度与束流的功率正相关。脉冲频率相

同的情况下，^{12}C、^{78}Kr、^{209}Bi 三种束流的功率之比为 95.69: 9.02 :1。因此保守考虑，在离子加速器的屏蔽设计中，按照 ^{12}C 的束流损失作为依据。

表 3-50 中高能离子加速器设计束流参数

粒子	最高能量（MeV/u）	最大流强(ppp)
$^{12}C^{6+}$	500	2×10^{9}
$^{78}Kr^{18+}$	145	1×10^{8}
$^{209}Bi^{39+}$	60	1×10^{7}
备注：该装置可产生并加速从 He 到 Bi 的所有离子，此表中为该装置的三种典型粒子束流参数		

空间光伏辐照全流程研发模块的质子/氦离子加速器的质子束流能量为 3MeV，难以突破加速器材料的库伦势垒产生大量非弹性反应，其产生的韧致辐射与 3MeV 电子相比低数个量级、完全可以忽略，因此只需考虑电子束损失的影响。

辐照子系统加速碳离子时的束流损失参数见表 3-51 ，辐照子系统 21#低能离子辐照终端的典型重离子束流损失参数见表 3-52，空间光伏辐照全流程研发模块束流损失参数见表 3-53，束流损失位置示意图见图 3-76。

表 3-51 辐照子系统加速碳离子束流损失点位及相关束损参数

区域	能量	损失形式	集中损失流强（pps）	均匀损失流强（pps/m）
直线注入线	4MeV/u	均匀损失	\	5.31E+07
直线注入口	4MeV/u	集中损失	1.67E+10	\
同步环	500MeV/u	均匀损失	\	6.89E+06
引出口		集中损失	7.92E+08	\
高能传输线		均匀损失	\	8.18E+06
51#单粒子效应研究终端		集中损失	1.43E+10	\

表 3-52 辐照子系统 21#低能离子辐照终端束流损失点位及相关束损参数

区域	束流	能量	损失形式	集中损失流强（pps）
21#低能离子辐照终端（离子加速器束线）	^{12}C	1MeV/u	集中损失	5.00E+14
	^{78}Kr	1MeV/u	集中损失	2.63E+13
21#低能离子辐照终端（空间光伏辐照全流程研发模块）	质子	3MeV	集中损失	3.12E+14
	^{4}He	1.5MeV/u	集中损失	1.87E+14

表 3-53 空间光伏辐照全流程研发模块束流损失点位及相关束损参数

区域	束流	能量	损失形式	集中损失流强（pps）
电子加速器大厅	电子	1MeV	集中损失	6.25E+13
电子加刮束	电子	3MeV	集中损失	1.25E+15
电子靶点	电子	3MeV	集中损失	1.25E+15
质子/氦离子加速器大厅	电子	200keV	集中损失	6.25E+14
质子加刮束	质子	3MeV	集中损失	3.12E+14
质子靶点	质子	3MeV	集中损失	3.12E+14



图 3-76 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块束流损失点位示意图

3.3.2.2 天空反散射

天空反散射来自于大气对辐射的反散射，当加速器所在机房屋顶未加屏蔽或屏蔽体很薄时，穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射，由于空气的散射作用，将有部分又回到地面。根据文献《天空反照》（郑华智），对质子加速器、重离子加速器、甚至是一些能量较高的电子加速器，天空反散射剂量的主要成分都是中子，其能谱分布在热中

子和加速器粒子能量之间。天空散射随装置开机产生，装置停机后便立刻消失，其大小取决于屏蔽体的厚度。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。根据辐射屏蔽计算结果，51#终端顶板外瞬时剂量率为 6.7μSv/h，需要考虑中子反散射的影响。本次评价利用 NCRP NO.144 报告 P331 页 Stapleton 公式对上述区域的中子天空反散射进行计算，各计算参数的取值列于表 3-54，计算结果列于表 3-55。

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

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

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

式中，

κ' 为常数，取值 $2\times10^{-15}Sv\cdot m^2$；

h 为常数，取值 40m；

r 为源到关注点的距离，m；

λ 为与中子能量上限对应的空气的中子有效吸收长度，m；

Q 为穿透屋顶屏蔽达到顶板外表面的中子个数，n/h；

d 为源到顶板外表面的距离，m；

g 为单位中子通量的剂量当量，$Sv\cdot m^2$；

H(d,t)为顶板屏蔽体外表面的剂量率，Sv/h；

Ω 为源从顶屏蔽辐射出的立体角。

表 3-54 中子天空反散射计算参数

参数	取值	来源
λ，m	700	NCRP NO.144 图 6.5，能量按 500MeV/u 考虑
d，m	15	CAD 图纸测量
g，$Sv \cdot m^2$	1.46E-14	文献《ACCELERATOR SKYSHINE:TYGER,TYGER,BURNING BRIGHT》(Particle Accelerator,1994,vol.44(1),pp1-15,GEOFFREY B.STAPLETON)表 4，能量按 500MeV/u 考虑
Ω，sr	6.28	θ 保守取值 90°
H(d,t)，Sv/h	6.70E-06	FLUKA 程序计算

表 3-55 不同距离 r 处天空反散射造成的剂量率

距离 r，m	H(r)，μSv/h
	51#终端运行
97	4.99E-02
150	2.50E-02
200	1.49E-02

由计算结果可知，本装置运行期间周围地面处由于天空反散射造成的剂量率最大值为 4.99E-02μSv/h，该处由于天空反散射造成的公众年照射剂量为 1.25E-02mSv（户外区域居留因子 T=1/16，装置运行时间取为 4000h）。

3.3.2.3 感生放射性

加速器运行时束流损失在部件、靶等部位，在产生瞬发辐射的过程中，初始和次级粒子与周围设备、屏蔽体和空气、水等材料发生的核反应，会使里面原来稳定的核素转变成带有各种放射性的核素，使其产生感生放射性，发生活化。在加速器停机后，由束流损失产生的瞬发辐射立即消失，但感生放射性依然存在。

辐照子系统中包括 51#终端和 21#终端，其中 21#终端的重离子束流的最高能量为 1MeV/u、其粒子能量小于加速器材料原子的库仑势垒，无法诱发核反应产生感生放射性。

空间光伏辐照全流程研发模块加速器的质子最大能量为 3MeV，^4He 最大能量为 1.5MeV/u，均难以突破加速器材料的库伦势垒产生大量非弹性反应，其产生的韧致辐射与 3MeV 电子相比低数个量级、完全可以忽略，因此只需考虑电子束损失的影响。3MeV 电子束流损失时会产生能量低于 3MeV 的宽能谱韧致辐射，而光子诱发加速器材料产生

核反应的能量阈值一般在6~10MeV以上，因此3MeV电子束流也不会产生感生放射性。在已运行的2.5MeV电子加速器上开展的停机后感生放射性测量结果显示，电子加速器大厅所有区域的辐射剂量率水平均为本底水平，未检出感生放射性。

综上，感生放射性主要针对离子加速器同步加速器大厅及51#实验终端两个区域开展评价。

3.3.2.3.1 空气的感生放射性

装置运行期间产生的次级粒子与空气中的H、N、O、Ar等通过热中子俘获、高能中子散裂反应和（γ，n）反应等产生^{3}H、^{7}Be、^{11}C、^{13}N、^{15}O和^{41}Ar等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素^{3}H和^{7}Be，其产生率较低，可不必考虑。主要考虑^{11}C、^{13}N、^{15}O和^{41}Ar四种核素，具体见表3-56。

表3-56 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量份额	产生机制	活化反应截面 σ^2，mb
^{11}C	20.5min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.7
^{13}N	9.96min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		N	7.55×10^{-1}	（γ，n）反应	9
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	9
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.8
^{15}O	2.04min	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	（γ，n）反应	10
^{41}Ar	1.83h	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	660

注：表中数据均取自NCRP NO.144报告和IAEA 283号技术报告。

3.3.2.3.1.1静态空气中感生放射性核素的产生

（1）计算模型和计算参数

利用 FLUKA 程序进行模拟计算，计算时考虑的束流损失参数见表 3-51，模型如图 3-77 所示。

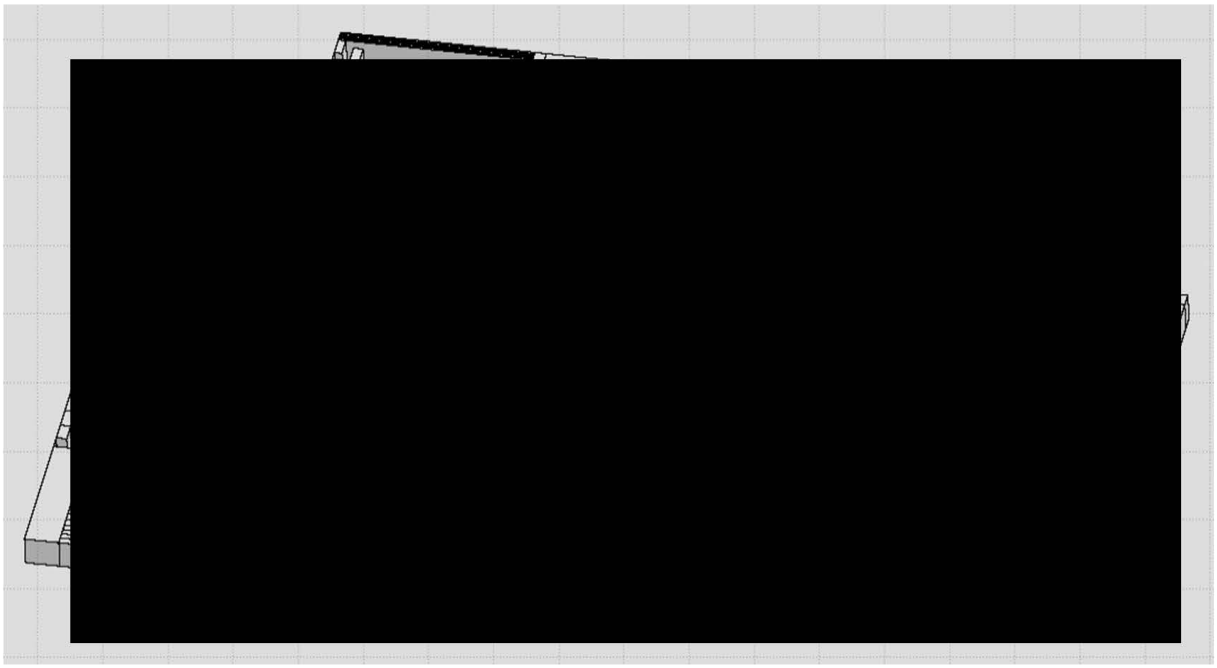


图 3-77 模拟计算模型图

（2）计算结果

考虑同步加速器向 51#终端供束的工况，采用 FLUKA 程序计算得到连续运行 30 年后，同步加速器大厅和 51#终端的空气各关键核素的静态饱和活度如下表所示。

表 3-57 同步加速器大厅中关键感生放射性核素的静态饱和活度

核素	静态饱和活度（Bq）	静态饱和活度浓度（Bq/m³）
C-11	8.64E+06	3.45E+02
N-13	7.93E+06	3.16E+02
O-15	5.64E+06	2.25E+02
Ar-41	3.94E+06	1.57E+02

表 3-58 51#终端中关键感生放射性核素的静态饱和活度

核素	静态饱和活度（Bq）	静态饱和活度浓度（Bq/m³）
C-11	2.01E+07	5.98E+03
N-13	2.05E+07	6.10E+03
O-15	1.43E+07	4.25E+03
Ar-41	2.53E+07	7.53E+03

3.3.2.3.1.2考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度

离子加速器运行期间，机房内保持通风系统开启状态。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 公式（12）和 NCRP NO.144 报告 P345 公式（6.25~6.27），在考虑通风的情况下，装置连续运行 t 时间后，停机时刻各场所内空气感生放射性动态饱和浓度可由下式计算。计算结果列于表 3-60。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} C_{sat} \qquad (3.3.2.3\text{-}1)$$

式中，

C_t 为考虑通风的情况下，装置运行 t 时间后，停机时刻房间内空气中感生放射性动态浓度，Bq/m^3；

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

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

r_1 为正常运行时房间内的换气次数，s^{-1}，见表 3-59。

表 3-59 通风系统设计参数

序号	区域	体积	排风量	换气次数	排风量	换气次数
			正常运行		停机	
		m^3	m^3/h	次/h	m^3/h	次/h
1	同步加速器大厅	26214	13107	0.5	131070	5
2	51#终端	3529	17645	45	17645	5

表 3-60 考虑通风的情况下，空气感生放射性动态饱和浓度计算结果

核素	动态饱和浓度，Bq/m^3	
	同步加速器大厅	51#终端
C-11	2.65E+02	1.65E+03
N-13	2.70E+02	2.65E+03
O-15	2.10E+02	3.26E+03
Ar-41	6.54E+01	5.14E+02

3.3.2.3.1.3排入环境的空气感生放射性核素量

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”，装置运行期间向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由下式计算。

$$Q_t = \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat}\left(1 - e^{-(\lambda+r_1)t}\right) R_t\, dt = \frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t \int_0^t \left(1 - e^{-(\lambda+r_1)t}\right) dt =$$

$$\frac{\lambda}{\lambda+r_1} C_{sat} R_t \left(t - \frac{1}{\lambda+r_1} + \frac{e^{-(\lambda+r_1)t}}{\lambda+r_1}\right) \qquad (3.3.2.3\text{-}2)$$

式中，

Q_t 为装置运行 t 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度，Bq；

R_t 为装置正常运行的通风速率，m^3/s；

t 为装置运行时间，s。

由此可计算得出装置运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量和年均排放速率，列于表 3-61。

表 3-61 运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率

核素	年排放量，Bq	年平均排放速率，Bq/s
^{11}C	1.31E+11	9.07E+03
^{13}N	2.01E+11	1.40E+04
^{15}O	2.41E+11	1.67E+04
^{41}Ar	3.98E+10	2.76E+03
总计	6.13E+11	4.25E+04

3.3.2.3.2 冷却水的感生放射性

加速器冷却水主管道分布在束线下侧（距真空管道约 1.4m 远），当束线上设备需要冷却时，从主管道分出冷却水支路穿过设备来进行散热。在冷却水感生放射性的模拟中，对计算模型进行了简化。为合理简化模型，对比了二极铁冷却水支路（模型见图 3-78）中与距束流管道 80cm 远的冷却水简化管路中关键放射性核素的活度浓度，结果显示两者活度浓度相当。

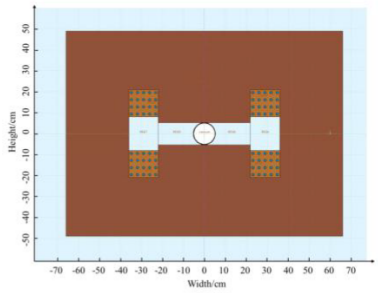


图 3-78 二极铁冷却水支路模型图

因此，在 FLUKA 模拟中，在束流管道正下方的 80cm 远处设置了半径 5cm 的水体，以此来保守估计隧道内冷却水的活度浓度（该活度浓度与二极铁冷缺水支路相当、大于主水路的活度浓度）。考虑同步加速器向 51#终端供束的工况，计算了连续运行一年、停机后冷却水中的感生放射性，模拟图见图 3-79，图中蓝色线条为模拟模型中冷却水的位置，计算结果如表 3-62 所示，^{3}H 和 ^{7}Be 的模拟活度均低于豁免活度。

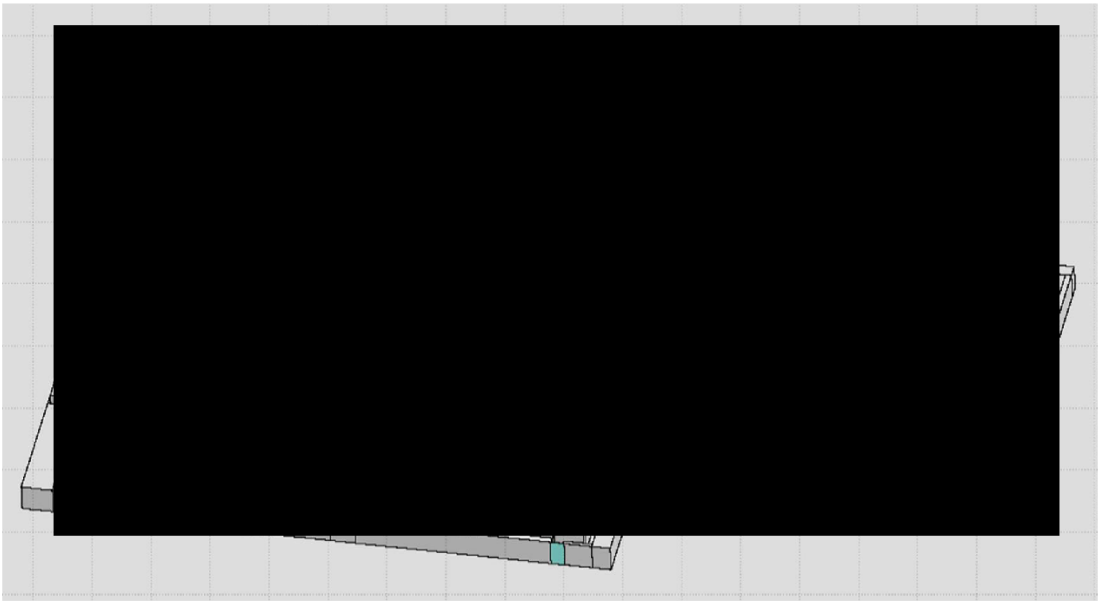


图 3-79 模拟计算模型图

表 3-62 加速器冷却水活化计算结果

元素	$T_{1/2}$ (s)	活度（Bq）	豁免活度（Bq）
^{3}H	3.89×10^{8}	5.10E+05	1.00E+09
^{7}Be	4.60×10^{6}	2.80E+06	1.00 E+07

正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备检修时才需要排放。本项目在室外设置集水池，有效容积为 5m^3，用于暂存更换下来的冷却水。

3.3.2.3.3 结构部件的感生放射性

根据加速器束流损失参数可知，同步加速器引出口和 51#终端是束流损失最集中的区域。因此主要对这两部分的结构部件感生放射性进行分析。

（1）同步加速器

利用 FLUKA 程序计算了同步环加速器引出口参数的束流连续照射厚铜靶 1 年、停机冷却不同时间、距铜靶 30cm 远及 1m 远处的残余剂量率，计算中厚铜靶的材料设定为铜、密度 8.96g/cm3、半径为 5cm、厚度为 7.5cm，建模模型见图 3-80，计算结果如表 3-63 所示，停机两小时后引出口（厚铜靶）的关键放射性核素活度见表 3-64。

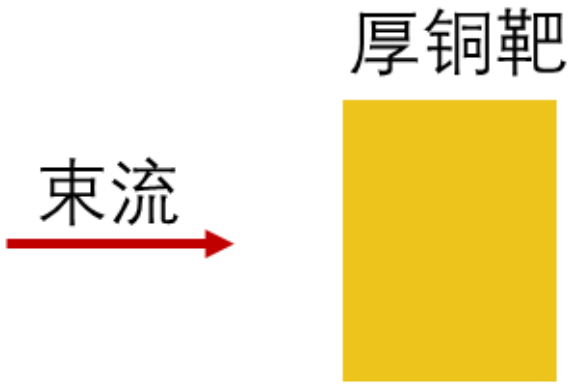


图 3-80 模拟计算模型图

表 3-63 同步环加速器引出口（厚铜靶）残余剂量率分布

冷却时间	距 30cm 远处残余剂量率，μSv/h	距 100cm 远处残余剂量率 μSv/h
0s	5.17E+02	4.04E+01
15min	2.82E+02	2.33E+01
2h	1.85E+02	1.60E+01

表 3-64 连续照射 1 年、停机 2 小时后引出口（厚铜靶）的关键放射性核素活度

核素	活度/Bq	占总活度百分比
Cu-64	1.99E+08	28.34%
Co-58	9.37E+07	13.35%
Co-57	5.35E+07	7.62%
Cr-51	2.74E+07	3.91%
Co-56	2.65E+07	3.77%
Mn-54	2.00E+07	2.85%
H-3	1.52E+07	2.16%
Be-7	1.47E+07	2.10%
Fe-55	1.45E+07	2.07%
V-48	1.29E+07	1.84%
V-49	1.09E+07	1.55%
Mn-52	7.90E+06	1.13%
Co-61	7.39E+06	1.05%

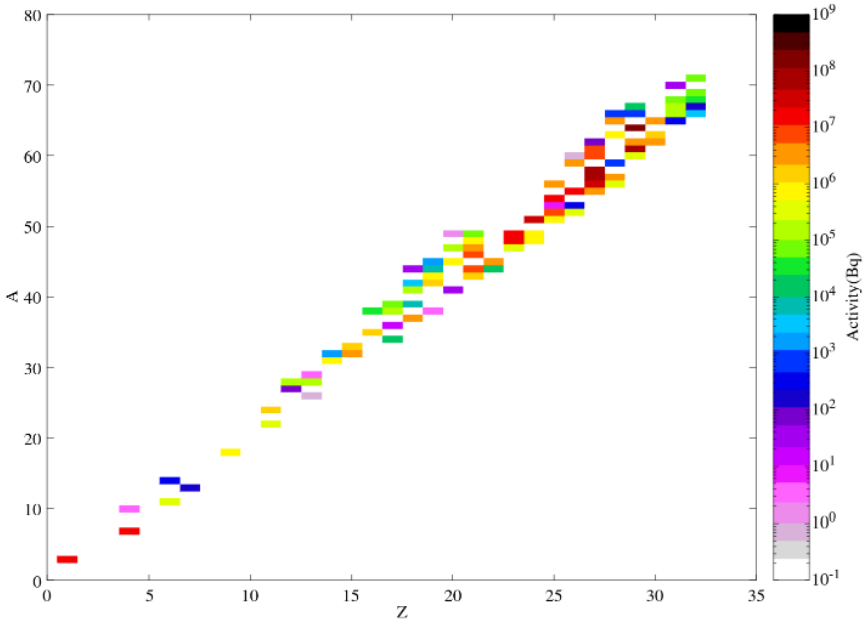


图 3-81 引出口（厚铜靶）所有放射性核素的活度分布

（2）51#终端

利用 FLUKA 程序计算了 51#终端束流连续照射实验靶 30min、停机冷却不同时间、距实验靶 30cm 及 1m 远处的残余剂量率，计算中实验靶的材料设定为硅、密度 2.33g/cm^3、

半径为 5cm、厚度为 22cm。计算结果如表 3-65 所示，停机两小时后实验靶的关键放射性核素活度见表 3-66。



图 3-82 模拟计算模型图

表 3-65 实验靶残余剂量率分布

冷却时间	距 30cm 远处残余剂量率，μSv/h	距 100cm 远处残余剂量率，μSv/h
0s	1.69E+04	1.35E+03
15min	2.27E+02	2.17E+01
2h	6.20E+01	6.80E+00

表 3-66 连续照射 30min、停机 2 小时后实验靶的关键放射性核素活度

核素	活度/Bq	占总活度百分比
F-18	3.48E+07	71.67%
C-11	7.84E+06	16.13%
Na-24	5.46E+06	11.24%

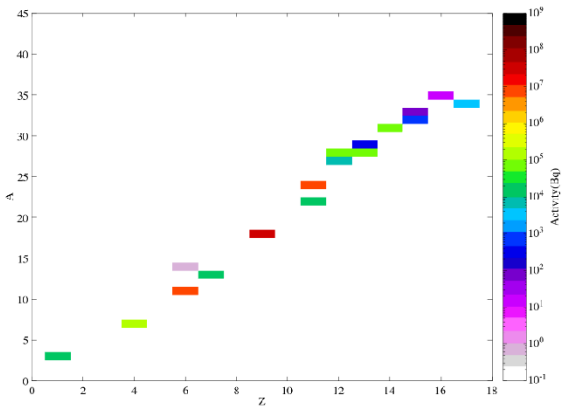


图 3-83 51#终端实验靶所有放射性核素的活度分布图

3.3.2.3.4 土壤和地下水的感生放射性

由计算结果可知，底板与土壤交接处的剂量率小于 5.5mSv/h，本项目产生的活化冷却水暂存在集水池中，排放前必须进行取样测量，满足排放标准并经审管部门认可后方可排放。产生的放射性固体废物暂存在各辐射工作场所内的铅室暂存，暂存一段时间后监测结果满足一定要求可按一般固体废物处理，不满足要求的交由有资质单位进行处理。因此本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

3.3.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）

3.3.3.1 瞬发辐射源

3.3.3.1.1 瞬发辐射场特点

高亮度中子源装置的质子最高能量为 150MeV，其主体是强流脉冲加速器，重复频率为 50Hz，宏脉冲长度 400μs，瞬发辐射具有脉冲特性，是中子、γ 混合辐射场，以中子为主，γ 剂量贡献比中子小几倍到 1~2 个量级。辐射场能谱范围较广，中子能量从热中子甚至冷中子以下到 150MeV。

中高能质子打靶时，与靶芯原子核碰撞将产生大量粒子（主要是核子、π 介子和 K 介子），发生核级联产生瞬发辐射场。高能质子打靶时，入射能量的绝大部分可能只赋予一个核子，并使它成为级联的传播者。能量传递的主要方式是高能核子间的相互作用，仅能量在 150 MeV 以上的粒子才对级联传播有用。能量介于 20~50 MeV 的核子主要借核相互作用传递能量，但在这些入射能量被传递给大量的核子，每个核子平均只接受总能量的很小一部分，具有的动能较低（低于 10 MeV 左右）。这些能量较低的带电粒子因电离作用迅速停止，因此，中子在低能下占优势，而带电 π 介子和 K 介子（产生频率仅为 π 介子的十分之一）衰变成 μ 子和中微子（$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu\mu$，$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu\mu$），μ 子不发生强相互作用，只能通过电离损失而停止，其有效衰减长度取决于母 π 介子和母 K 介子的能谱（入射核的能量）。因而，通常能量在 10 GeV 以下的加速器的辐射屏蔽，不需要考虑 μ 子的屏蔽。π 介子衰变产生的强 γ 射线引发电磁级联，电磁级联的衰减长度通常比强相互作用粒子的吸收长度短很多，对能量输运的贡献很小。综上，在屏蔽体较深

处，中子在级联传播中起主导作用。对于 450 MeV 以下的质子和 π 介子来说，能量损失率较大，蒸发粒子和低能级联粒子的产生受贯穿力最强的粒子（中子）控制。在屏蔽体外任意点，存在的高能中子来自于靶附近已产生的或者未经散射或仅发生小角度准弹性散射的高能中子，其他带电粒子都会快速衰减。

3.3.3.1.2 高能质子与物质作用产生的次级粒子

质子打靶产生的次级粒子中，质子和其它次级带电粒子因电离作用迅速停止，从靶中出来的主要是次级中子和 γ。其中次级中子按能量由低到高可分为热中子、蒸发中子和级联中子三部分。在屏蔽材料的屏蔽作用下，初始的热中子、蒸发中子和 γ 的数量迅速减少，级联中子成为穿透屏蔽的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数目，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过（n,γ）反应等转化成了光子，使得达到一定屏蔽深度，中子能谱中各种能量成分的比重基本保持不变，形成“平衡谱”。最终屏蔽内、外的瞬发辐射场都成为中子和光子的混合场。

3.3.3.1.3 束流损失

根据建设单位提供的资料，高亮度中子源装置的束流损失参数见表 3-67，束流损失点位见图 3-84。

表 3-67 高亮度中子源装置正常运行时束流损失分析

装置布局名名称		实际能量，MeV	计算能量，MeV	束流功率损失	备注
LINAC 隧道	LEBT	0.055	0.055	2.75W	管道均匀束损
	RFQ	3.0	3.0	150W	管道均匀束损
	MEBT-collimation	3.0	3.0	90W	损失 3%
	DTL1	18.96	19	1W/m	管道均匀束损
	DTL2	35.04	35	1W/m	管道均匀束损
	DTL3	50.90	51	1W/m	管道均匀束损
	DTL4	65.80	66	1W/m	管道均匀束损
	Pi 模直线加速器	65-150	65-150	1W/m	管道均匀束损
HEBT		150	150	100W	管道均匀束损
废束站 1		150	150	75W	接受束流能量和功率
废束站 2		150	150	5kW	接受束流能量和功率
靶站		150	150	150kW	/

备注：

① 1W/m: 是参照国外同类装置经验，按感生放射性强度和手工维护给出的要求，强流加速器的束流损失控制在 1W/m 以下，停机后才能快速对加速器进行手工维护。所以，除特定区域外，加速器的束流损失要求控制在 1W/m 以下，超过这个限值，机器保护系统将自动切断束流，停止机器运行。



图 3-84 高亮度中子源装置束损点位图

3.3.3.2 天空反散射

天空反散射来自于大气对辐射的反散射，当加速器所在机房屋顶未加屏蔽或屏蔽体很薄时，穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射，由于空气的散射作用，将有部分又回到地面。根据文献《天空反照》（郑华智），对质子加速器、重离子加速器、甚至是一些能量较高的电子加速器，天空反散射剂量的主要成分都是中子，其能谱分布在热中子和加速器粒子能量之间。天空散射随装置开机产生，装置停机后便立刻消失，其大小取决于屏蔽体的厚度。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。根据辐射屏蔽计算结果，本装置各区域顶板外瞬时剂量率均低于 2.5μSv/h。因此，本装置可不考虑天空反散射的影响。

3.3.3.3 感生放射性

加速器运行时束流损失在部件、靶等部位，在产生瞬发辐射的过程中，初始和次级粒子与周围设备、屏蔽体和空气、水等材料发生的核反应，会使里面原来稳定的核素转变成带有各种放射性的核素，使其产生感生放射性，发生活化。在加速器停机后，由束流损失产生的瞬发辐射立即消失，但感生放射性依然存在。

3.3.3.3.1 空气的感生放射性

装置运行期间产生的次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、高能中子散裂反应和（γ，n）反应等产生 ^{3}H、^{7}Be、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素 ^{3}H 和 ^{7}Be，

其产生率较低，可不必考虑。主要考虑 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素，具体见表 3-68。

表 3-68 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量份额	产生机制	活化反应截面 σ^2，mb
^{11}C	20.5min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.7
^{13}N	9.96min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		N	7.55×10^{-1}	（γ，n）反应	9
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	9
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.8
^{15}O	2.04min	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	（γ，n）反应	10
^{41}Ar	1.83h	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	660

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

3.3.3.3.1.1 加速器的空气感生放射性

（1）计算模型和计算参数

利用 FLUKA 程序进行模拟计算，计算时考虑的束流损失参数见表 3-67，隧道简化模型如图 3-85 所示。计算时采用的通风系统参数如表 3-70 所示。

为模拟冷却水的活化，假设一根平行于束流管、轴线距束流管轴线 22cm 的铜管，内外半径分别为 1cm 和 2cm，内部填充水，模型图见图 3-86，以模拟冷却水的活化情况。

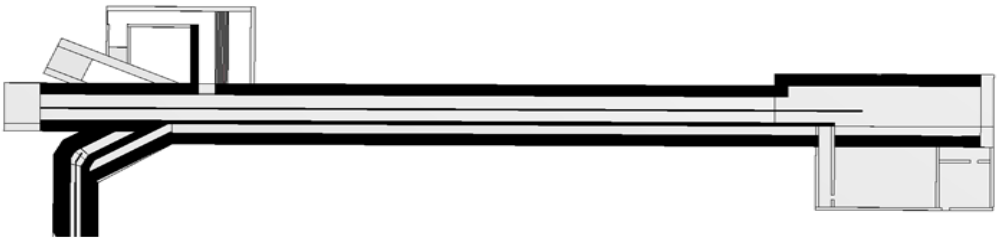


图 3-85 隧道模拟计算模型图

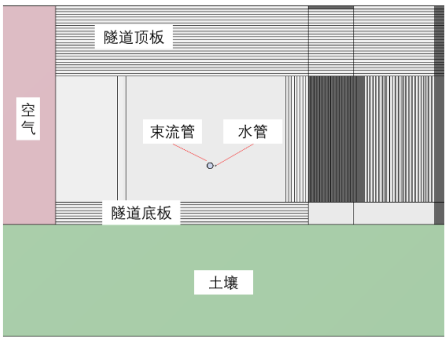


图 3-86 束流管与水管示意图

表 3-69 加速器隧道通风系统设计参数

区域名称	体积，m^3	送风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/小时
加速器隧道	4389.57	正常运行：4389.57	正常运行：4389.57	正常运行：1
		停机强排：13168.71	停机强排：13168.71	停机强排：3

（2）计算结果

采用 FLUKA 程序计算得到加速器隧道运行 30 年的空气感生放射性核素的活度浓度，如表 3-70 所示。

表 3-70 加速器隧道 30 年运行空气感生放射性核素活度浓度表

元素	活度浓度 (Bq/cm^3)	$T_{1/2}$ (s)	动态饱和浓度 (Bq/m^3)	年排放量（Bq）
^{11}C	5.10×10^{-2}	1.22×10^{3}	5.32×10^{3}	7.69×10^{10}
^{13}N	9.41×10^{-2}	5.98×10^{2}	1.18×10^{4}	1.70×10^{11}
^{15}O	4.39×10^{-2}	1.22×10^{2}	6.50×10^{3}	9.40×10^{10}
^{41}Ar	1.27×10^{-1}	6.56×10^{3}	5.43×10^{3}	7.84×10^{10}

3.3.3.3.1.2靶站的空气感生放射性

（1）计算模型和计算参数

利用 FLUKA 程序进行模拟计算，计算时考虑的束流损失参数见表 3-67，靶站简化模型如图 3-85 所示。计算时采用的通风系统参数如表 3-71 所示。

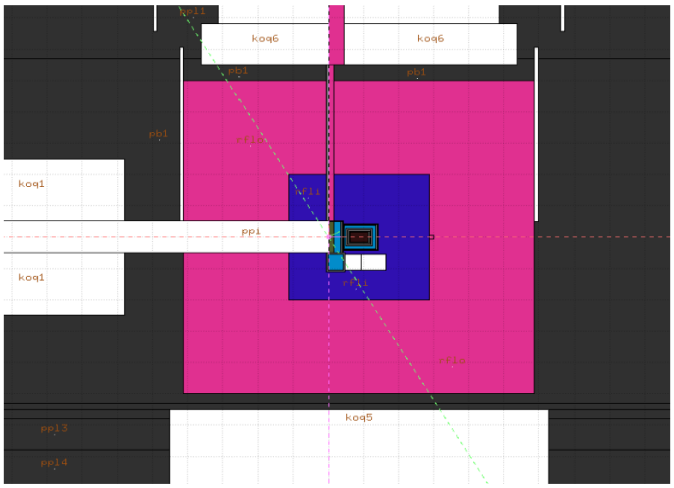


图 3-87 靶站模拟计算模型图

表 3-71 靶站通风系统设计参数

区域名称	体积，m^3	送风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/小时
靶站	76.6	正常运行：840	正常运行：1200	正常运行：5
		停机强排：840	停机强排：1200	停机强排：5

（2）计算结果

采用 FLUKA 程序计算得到靶站运行 30 年的空气感生放射性核素的活度浓度，如表 3-72 所示。

表 3-72 靶站 30 年运行空气感生放射性核素活度浓度表

核素	空气体积，m^3	动态饱和浓度(Bq/m^3)	年排放量（Bq）
^{41}Ar	76.6	1.11E+04	6.68E+10
^{13}N		4.91E+04	2.95E+11
^{11}C		4.18E+04	2.51E+11
^{15}O		1.54E+04	9.25E+10

3.3.3.3.1.3谱仪的空气感生放射性

（1）计算模型和计算参数

利用 FLUKA 程序进行模拟计算，计算时考虑的束流损失参数见表 3-67，谱仪简化模型如图 3-88 和图 3-89 所示。计算时采用的通风系统参数如表 3-73 所示。

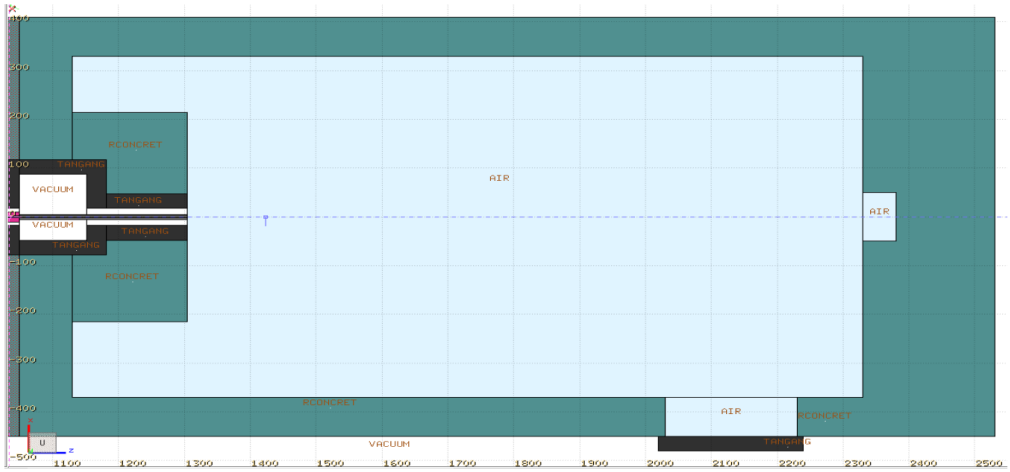


图 3-88 小角谱仪模拟计算模型图

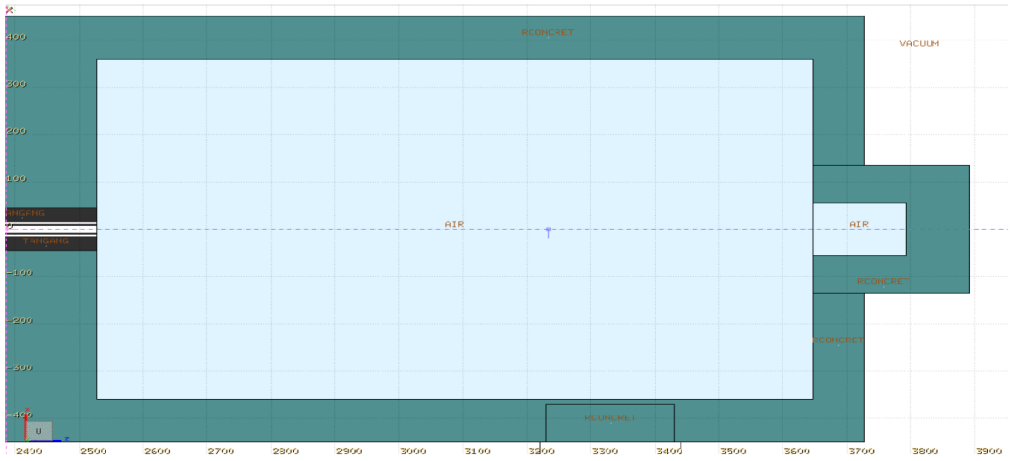


图 3-89 粉末谱仪模拟计算模型图

表 3-73 谱仪通风系统设计参数

区域名称	体积，m^3	送风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/小时
高通量小角中子散射仪	305.9	正常运行：430	正常运行：612	正常运行：2
		停机强排：430	停机强排：612	停机强排：2
通用中子粉末衍射仪	365.9	正常运行：520	正常运行：730	正常运行：2
		停机强排：520	停机强排：730	停机强排：2

（2）计算结果

采用 FLUKA 程序计算得到谱仪运行 30 年的空气中各感生放射性核素的活度浓度，如表 3-74 所示。

表 3-74 谱仪 30 年运行空气感生放射性核素活度浓度表

核素	空气体积，m^3	动态饱和浓度(Bq/m^3)	年排放量（Bq）
高通量小角中子散射仪			
^{41}Ar	305.9	1.22E+01	3.72E+07
^{11}C		2.49E-01	7.63E+05
^{13}N		6.71E-02	2.05E+05
^{15}O		4.01E+00	1.23E+07
通用中子粉末衍射仪			
^{41}Ar	365.9	2.74E+01	1.00E+08
^{11}C		5.61E-01	2.05E+06
^{13}N		1.51E-01	5.52E+05
^{15}O		9.04E+00	3.30E+07

3.3.3.3.1.4排入环境的空气感生放射性核素量

由表 3-70、表 3-72 和表 3-74 可知，高亮度中子源装置每年排入环境的空气感生放射性核素总量，具体数值见表 3-75。

表 3-75 高亮度中子源装置运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率

核素	年排放量，Bq	年平均排放速率，Bq/s
^{11}C	1.44E+11	6.66E+03
^{13}N	4.65E+11	2.15E+04
^{15}O	3.45E+11	1.60E+04
^{41}Ar	1.71E+11	7.92E+03
总计	1.12E+12	5.20E+04

3.3.3.3.2 冷却水的感生放射性

3.3.3.3.2.1直线加速器

对于直线加速器，使用 FLUKA 模拟计算了加速器粒子能量为 150MeV、1W/m 束损时，假设一根平行于束流管、轴线距束流管轴线 22cm 的铜管，内外半径分别为 1cm 和 2cm，内部填充水，建立的模型图见图 3-86，连续运行 30a，得到的活化冷却水感生

放射性结果如表 3-76 所示。

表 3-76 加速器冷却水活化计算结果

元素	$T_{1/2}$ (s)	活度浓度（Bq/cm³）	豁免活度浓度（Bq/g）	活度浓度与豁免活度浓度之比
^{3}H	3.89×10^{8}	5.45×10^{1}	1.00×10^{6}	5.45×10^{-5}
^{7}Be	4.60×10^{6}	1.61×10^{1}	1.00×10^{3}	1.61×10^{-2}

3.3.3.3.2.2HEBT 隧道

对于 HEBT 隧道，使用 FLUKA 模拟计算了束损为 100W（2.5 W/m），能量 150 MeV 的 HEBT 隧道活化冷却水产生情况。建立的模型图见图 3-90，连续运行 30a，得到水中活化核素及其活度浓度如下表所示。

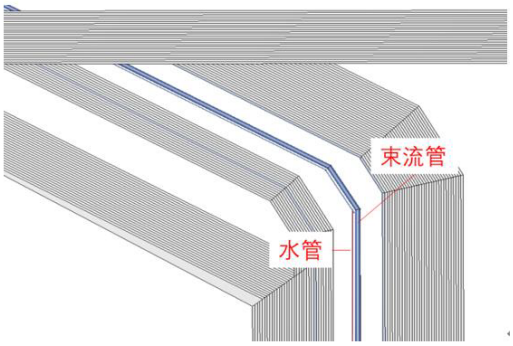


图 3-90 HEBT 隧道活化冷却水计算模型图

表 3-77 HEBT 隧道活化冷却水计算结果

元素	$T_{1/2}$ (s)	活度浓度（Bq/cm³）	豁免活度浓度（Bq/g）	活度浓度与豁免活度浓度之比
^{3}H	3.89×10^{8}	1.36×10^{3}	1.00×10^{6}	1.36×10^{-3}
^{7}Be	4.60×10^{6}	4.03×10^{2}	1.00×10^{3}	4.03×10^{-1}

3.3.3.3.2.3靶站

质子束入射靶站，其能量基本全部沉积于靶站内，在运行时靶站核心区域部件均需要提供冷却，冷却水流经高辐射区域导致其活化。靶站核心部件的冷却回路包括：靶重水冷却回路、水慢化器（水既起慢化工质的作用，又对其容器提供冷却）、水预慢化器（水既起慢化工质的作用，又对其容器提供冷却）、铍反射体重水冷却回路等。冷却回

路均采用去离子水，其中靶冷却回路中产生的放射性核素最多，这是由于入射质子直接辐照到的缘故。

利用 FLUKA 程序进行模拟计算，靶站冷却水活化的计算模型如图 3-91 所示。靶站运行 30 年的活化冷却水模拟计算结果见表 3-78。^{3}H 和 ^{7}Be 的模拟计算活度均高于豁免活度，需要暂存。

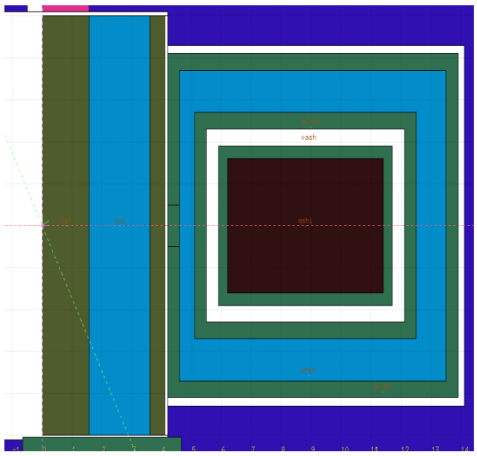


图 3-91 靶冷却水活化计算模型水平截面图

表 3-78 靶站活化冷却水模拟计算结果

元素	$T_{1/2}$ (s)	活度浓度（Bq/cm³）	豁免活度浓度（Bq/g）	静态饱和总活度（Bq）	豁免活度（Bq）
^{3}H	3.89×10^{8}	6.81×10^{-2}	1.00×10^{6}	1.23×10^{11}	1.00×10^{9}
^{7}Be	4.60×10^{6}	9.43×10^{-1}	1.00×10^{3}	1.68×10^{12}	1.00×10^{7}

3.3.3.3.2.4 谱仪

利用 FLUKA 程序进行模拟计算，拟建设的两台谱仪均从液氢慢化器引出中子，它们斩波器安装位置基本相同，因此，源项和活化区域是一致的。计算得出两台谱仪冷却水活化的模拟计算结果见表 3-79。

表 3-79 谱仪活化冷却水模拟计算结果

元素	$T_{1/2}$ (s)	活度浓度（Bq/cm³）	豁免活度浓度（Bq/g）	静态总活度（Bq）	豁免活度（Bq）
^{3}H	3.89×10^{8}	2.6×10^{-2}	1.00×10^{6}	3.2×10^{2}	1.00×10^{9}
^{7}Be	4.60×10^{6}	4.4×10^{-3}	1.00×10^{3}	5.3×10^{1}	1.00×10^{7}

3.3.3.3.3 结构部件的感生放射性

3.3.3.3.3.1直线加速器隧道

采用 FLUKA 程序模拟了直线加速器隧道内的剩余剂量率，图 3-92 给出了直线加速器隧道 150 MeV 的质子以 1 W/m 功率束损时，运行 100d 停机 4h、运行 30a 停机 4h、运行 30a 停机 1 天、运行 30a 停机 1 个月、运行 30a 停机 1a、运行 30a 停机 10a 这 6 个不同记录时刻的剩余剂量率分布。

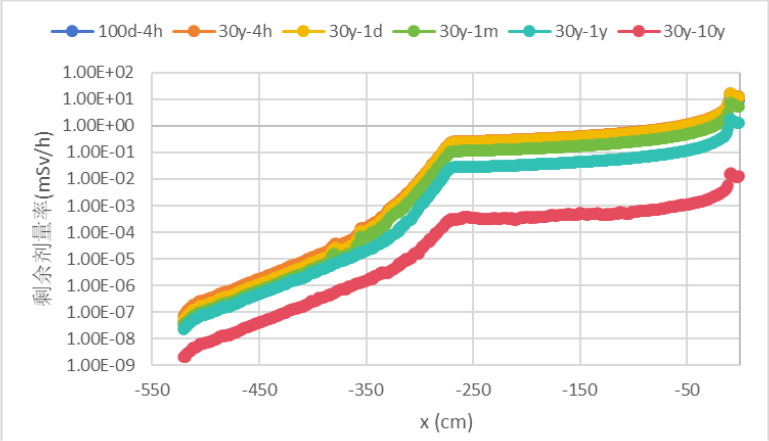


图 3-92 150 MeV-1 W/m 束损时剩余剂量率沿水平方向分布

由以上结果可以看出，隧道内的剩余剂量分布有如下特点：

①隧道内剩余剂量主要由束流管活化产生，在整个隧道内随离开束流管轴线距离成比例衰减；

②150 MeV 束损能量以 1 W/m 束损运行 100 天、停机 4 小时后的剩余剂量率如表 3-80 所示；

表 3-80 加速器隧道剩余剂量率统计表

隧道名称	束损能量（MeV）	束流管线外距离（cm）	运行 100 天、停机 4 小时的剩余剂量率（mSv/h）
直线加速器	150	41	0.79
		100	0.32

③停机 4 小时以后，剩余剂量衰减很慢，再靠时间来使隧道剂量减小后再检修，是不必要的。

④束流下游活化比上游严重，原因是产生的次级粒子下游比上游密集。

3.3.3.3.3.2束流管感生放射性

采用 FLUKA 计算得到束损能量为 150 MeV、束损 1 W/m 时，束流管产生的饱和放射性核素浓度、活度结果如表 3-81 所示。

表 3-81 部件放射性核素参数对比表

元素	T1/2 (s)	活度浓度（Bq/g）	总活度（Bq）	豁免活度浓度（Bq/g）	豁免活度（Bq）	活度浓度与豁免活度浓度之比	活度与豁免活度之比
^{3}H	3.89×10^{8}	544	5.62×10^{8}	1.00×10^{6}	1.00×10^{9}	5.44×10^{-4}	5.62×10^{-1}
^{44}Sc	1.41×10^{4}	242	2.50×10^{8}	/	/	/	/
^{45}Ti	1.11×10^{4}	244	2.52×10^{8}	/	/	/	/
^{46}Sc	7.24×10^{6}	206	2.13×10^{8}	10	1.00×10^{6}	20.6	213
^{47}V	1.96×10^{3}	363	3.75×10^{8}	/	/	/	/
^{48}V	1.38×10^{6}	2.35×10^{3}	2.42×10^{9}	10	1.00×10^{5}	235	2.42×10^{4}
^{48}Cr	7.76×10^{4}	91.3	9.43×10^{7}	/	/	/	/
^{49}V	2.92×10^{7}	4.44×10^{3}	4.59×10^{9}	/	/	/	/
^{49}Cr	2.54×10^{3}	1.23×10^{3}	1.27×10^{9}	/	/	/	/
^{51}Cr	2.39×10^{6}	8.76×10^{3}	9.04×10^{9}	1000	1.00×10^{7}	8.76	904
^{51}Mn	2.77×10^{3}	1.60×10^{3}	1.65×10^{9}	10	1.00×10^{5}	160	1.65×10^{4}
^{52}Mn	4.83×10^{5}	3.80×10^{3}	3.93×10^{9}	10	1.00×10^{5}	380	3.93×10^{4}
^{52}Fe	2.98×10^{4}	202	2.09×10^{8}	10	1.00×10^{6}	20.2	209
^{53}Fe	5.11×10^{2}	3.38×10^{3}	3.48×10^{9}	/	/	/	/
^{54}Mn	2.70×10^{7}	1.03×10^{4}	1.07×10^{10}	10	1.00×10^{6}	1.03×10^{3}	1.07×10^{4}
^{54}Co	1.93×10^{-1}	83.8	8.65×10^{7}	/	/	/	/
^{55}Fe	8.61×10^{7}	2.57×10^{4}	2.65×10^{10}	1.00×10^{4}	1.00×10^{6}	2.57	2.65×10^{4}
^{55}Co	6.31×10^{4}	817	8.44×10^{8}	10	1.00×10^{6}	81.7	844
^{56}Mn	9.28×10^{3}	713	7.36×10^{8}	10	1.00×10^{5}	71.3	7.36×10^{3}
^{56}Co	6.68×10^{6}	2.67×10^{3}	2.76×10^{9}	10	1.00×10^{5}	267	2.76×10^{4}
^{57}Co	2.35×10^{7}	81.9	8.45×10^{7}	100	1.00×10^{6}	8.19×10^{-1}	84.5
^{44m}Sc	2.11×10^{5}	112	1.16×10^{8}	/	/	/	/
^{45m}Sc	31.8	193	1.99×10^{8}	/	/	/	/
^{46}Sc	18.8	103	1.07×10^{8}	/	/	/	/
^{52m}Mn	1.27×10^{3}	3.34×10^{3}	3.45×10^{9}	10	1.00×10^{5}	334	3.45×10^{4}
^{52m}Fe	45.9	202	2.09×10^{8}	/	/	/	/
^{53m}Fe	155	1.69×10^{3}	1.74×10^{9}	/	/	/	/
^{54m}Co	88.8	83.8	8.65×10^{7}	/	/	/	/
Sum	All-T	7.35×10^{4}	7.59×10^{10}	1.01×10^{6}	1.02×10^{9}	2.61×10^{3}	1.89×10^{5}
	T>4h	6.01×10^{4}	6.20×10^{10}	1.01×10^{6}	1.02×10^{9}	2.05×10^{3}	1.31×10^{5}

由表 3-81 可以看出，束流管高度活化，因其饱和活度、饱和活度浓度与对应的豁免值之比的总和达到 10^3～10^5 量级，需要作为放射性废物处理。

3.3.3.3.3.3 靶站感生放射性

使用 FLUKA 对靶站部件活化情况进行模拟计算。图 3-93 是靶站部件活化计算几何模型的垂直中间剖面图，计算模型中铁反射体的尺寸为 H100×Ø100cm，铍反射体尺寸为 H40×Ø40cm，包含靶、冷却、两个慢化器等部件。

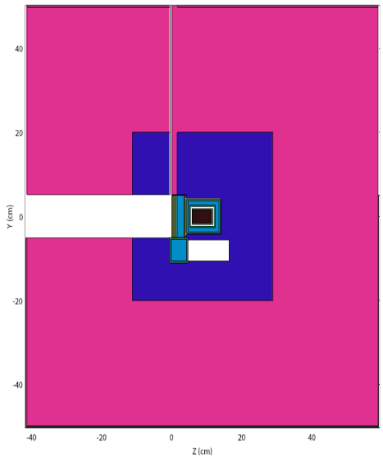


图 3-93 靶站部件活化计算几何模型

图 3-94 给出了钽靶活化产生核素（含稳定核素和放射性核素）的活度分布。

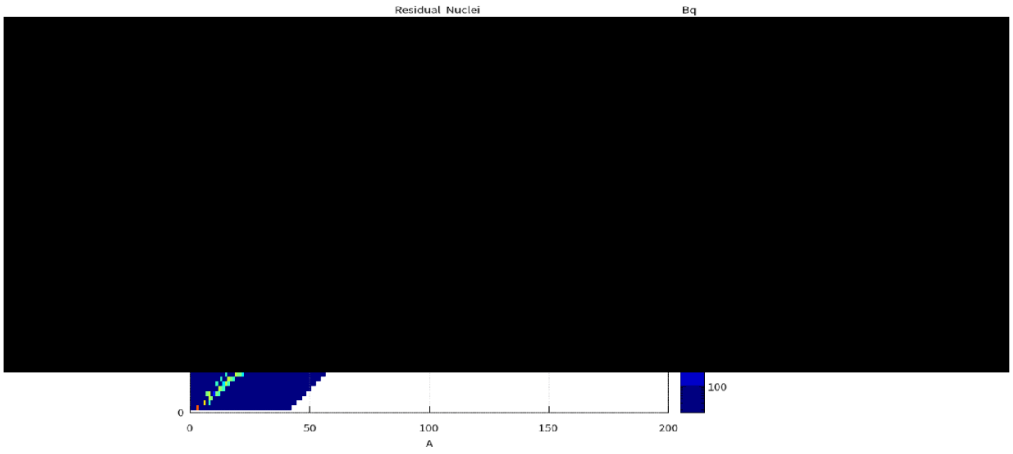


图 3-94 靶站部件活化产生核素的活度分布

部件活化产生的放射性核素众多（>1500 种，主要源自靶的散裂反应），主要的放射性核素是钽发生散裂反应的剩余核（原子量大于 160 部分），它们基本全部存在于钽靶之中。

在持续打靶三年（5000 小时×3）后，放射性总活度随时间的变化关系如图 3-95 所示，可以看出在持续运行停止零时刻，总放射性活度达到 2.58E+15 Bq，随着冷却时间的增加，这些放射性产物活度值逐步降低。

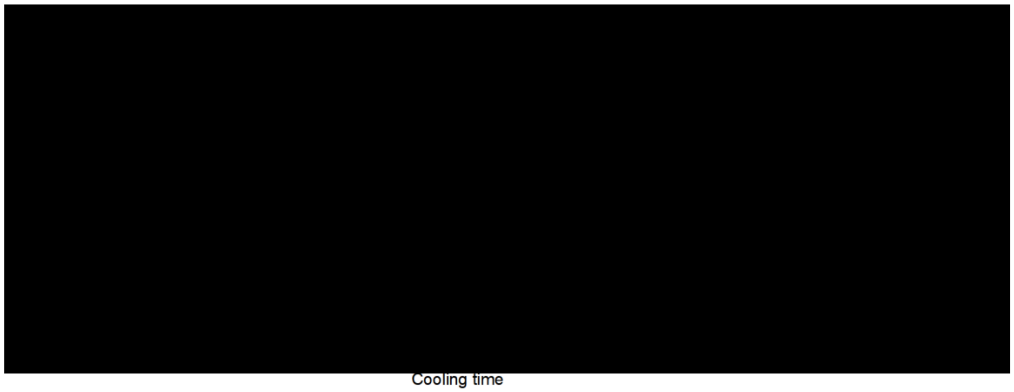


图 3-95 靶体内放射性核素总活度随时间变化关系

在靶站停束后的较短时间内，对活度起主要贡献的是半衰期短的核素；随着时间延长，如几个月到一年，长半衰期核素起主要作用，活化强度逐渐下降；如果时间更长，如十几年甚至百年千年，则靶站部件的放射性活度基本上是由几种较长半衰期的放射性核素贡献。靶体内主要放射性产物核如表 3-82 所示。

表 3-82 不同冷却时间靶体内主要放射性核素、半衰期和活度值

冷却时间: 0s		
核素	半衰期	活度/Bq
182-Ta	114.74d	5.65×10^{14}
182-Ta-m	283ms	4.10×10^{14}
176-Ta	8.09h	2.05×10^{13}
177-Ta	56.36h	1.06×10^{13}
182-Ta-n	15.84m	9.84×10^{13}
176-W	2.5h	9.38×10^{13}
175-Hf	70.65d	9.29×10^{13}
175-Ta	10.5h	8.12×10^{13}
177-W	132.4m	6.21×10^{13}
178-Ta	2.36h	6.19×10^{13}
冷却时间: 1 月		
核素	半衰期	活度/Bq
182-Ta	114.74d	4.71×10^{14}
175-Hf	70.65d	7.38×10^{13}
179-Ta	1.82y	3.03×10^{13}
178-Ta	2.36h	2.64×10^{13}
178-W	21.60d	1.53×10^{13}
173-Lu	1.37y	1.51×10^{12}
172-Lu	6.70d	1.11×10^{12}
172-Hf	1.87y	1.11×10^{12}
181-W	120.96d	5.09×10^{12}
3-H	12.32y	2.53×10^{11}
冷却时间: 1 年		
核素	半衰期	活度/Bq
182-Ta	114.74d	6.23×10^{13}
179-Ta	1.82y	2.12×10^{13}
173-Lu	1.37y	1.65×10^{12}
175-Hf	70.65d	1.08×10^{12}
172-Lu	6.70d	1.07×10^{12}
172-Hf	1.87y	2.69×10^{12}
3-H	12.32y	1.51×10^{11}
181-W	120.96d	3.74×10^{11}
174-Lu	3.31y	7.29×10^{10}
178-Hf-n	31.0y	4.55×10^{10}

图 3-96 展示了持续打靶三年（5000 小时×3）后靶体辐射剂量率随时间的变化关系，这里的计算量代表了将靶体视为点源条件下的辐射剂量率。

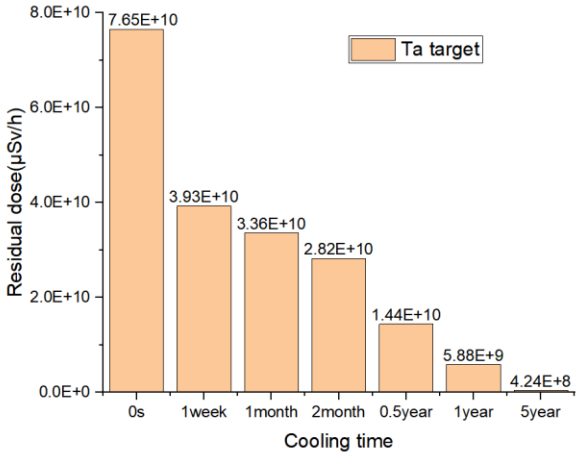


图 3-96 靶体辐射剂量率随时间变化关系

表 3-83 列出了持续打靶三年（5000 小时×3）后铍反射体、不锈钢反射体和靶体冷却水的辐射剂量率和总放射性活度随时间的变化情况。

表 3-83 反射体及靶体冷却水衰变特性

设备	名称	冷却时间						
		0 s	1week	1month	2month	0.5year	1year	5year
铍反射体	辐射剂量率(μSv/h)	2.7×10^{9}	1.3×10^{9}	1.1×10^{9}	9.5×10^{8}	4.7×10^{8}	1.6×10^{8}	3.1×10^{6}
	放射性活度(Bq)	1.6×10^{14}	3.1×10^{12}	2.9×10^{12}	2.8×10^{12}	2.5×10^{12}	2.4×10^{12}	1.8×10^{12}
不锈钢反射体	辐射剂量率(μSv/h)	1.1×10^{8}	2.2×10^{7}	1.9×10^{7}	1.5×10^{7}	7.5×10^{6}	2.9×10^{6}	1.1×10^{5}
	放射性活度(Bq)	5.2×10^{14}	1.6×10^{14}	1.0×10^{14}	7.2×10^{13}	3.8×10^{13}	2.9×10^{13}	8.2×10^{12}
靶体冷却水	辐射剂量率(μSv/h)	7.6×10^{10}	5.0×10^{10}	4.4×10^{10}	3.7×10^{10}	1.8×10^{10}	6.1×10^{9}	7.8×10^{7}
	放射性活度(Bq)	3.0×10^{13}	1.5×10^{12}	1.1×10^{12}	7.7×10^{11}	2.2×10^{11}	8.6×10^{11}	5.8×10^{11}

在靶站设计中，对活化靶站部件的放射性核素设置了多重控制屏障。靶站内放射性核素的绝大部分产生于钨靶，这些放射性核素本身被约束于靶体内部；靶又被密封于不锈钢焊接制成的靶容器内，这是又一层约束屏障。对于靶、靶容器、慢化器、预慢化器、反射体以及其他核心区域部件，他们均密封于不锈钢氦容器系统内，这也是另一层控制

屏障，在氦容器外是大块铁屏蔽体，在大块铁屏蔽体外的密封屏蔽体外部大圆筒再提供了一层控制屏障。

经过一段时间运行后，靶站氦容器内的核心部件高度活化。为了方便和快捷地对他们进行维护、替换，核心部件安装在一个轨道小车上，轨道小车可沿轨道将核心部件带出靶站送入靶站后部的维护区域，或从维护区域送回靶站。对核心部件的维护、替换等工作将在位于靶站后部的靶站维护区域进行。靶维护区域装备有遥控机械手、主从式半自动机械手、遥控摄像机、遥控吊车等。维护人员可以在维护区域屏蔽墙外通过机械手进行遥控维护操作。维护区域的屏蔽墙采用混凝土，厚度 1.5m，计算表明，在活化部件处于维护区域时，屏蔽墙外的辐射剂量率低于 2.5μSv/h。在维护区域下方的地下一层设有废物存储区，废物存储区内有多个靶存放井，用于存放更换下来的高度活化的靶。在维护区域内还可通过遥控操作对于更换下来的慢化器、管线等进行切割、缩减体积、包裹等处理，再传送至地下一层的废物存储区储存。

3.3.3.3.3.4束流垃圾桶感生放射性

使用 FLUKA 对靶站部件活化情况进行模拟计算。图 3-97 是废束站活化计算模型图。

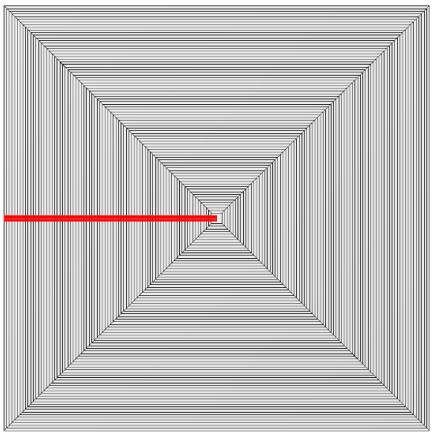


图 3-97 废束站几何模型

加速器停机时，人员方可进入隧道进而靠近废束站。图 3-98 展示了束流垃圾桶运行 100 天、停机 4 小时的感生放射性分布情况，结果表明束流垃圾桶 1 和束流垃圾桶 2 表面外 30cm 处剩余辐射剂量率最大值分别为 0.042mSv/h 与 0.83mSv/h。

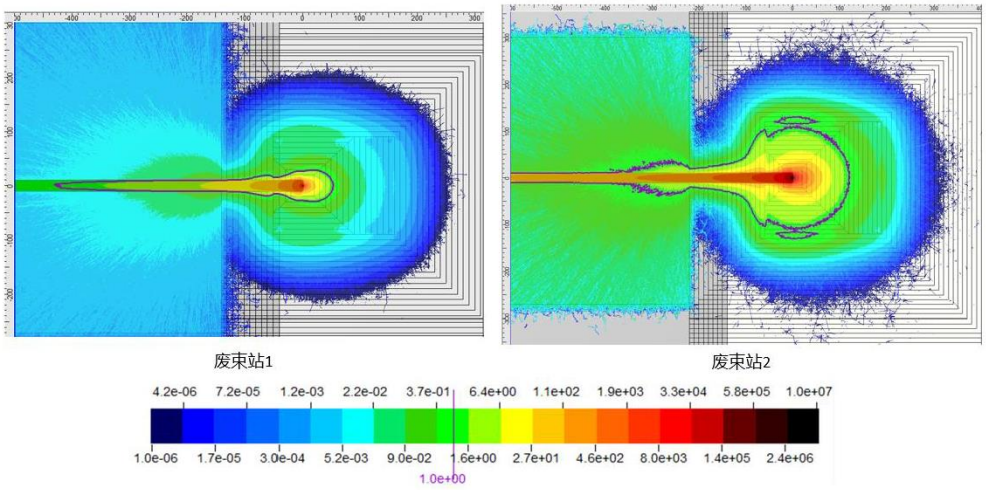


图 3-98 废束站剩余剂量分布俯视图（左：废束站 1，右：废束站 2）

3.3.3.3.4 土壤和地下水的感生放射性

3.3.3.3.4.1直线加速器隧道

对于加速器土壤和地下水的感生放射性评估，需重点考虑 ^{3}H、^{22}Na 的产生。这是由于它们具有较长半衰期，且可溶于或存在于地下水中，可能通过地下水迁移到场址外的公众水源区域。其他核素如 ^{7}Be、^{45}Ca、^{54}Mn 等或由于半衰期短，或难以发生迁移，可不予考虑。

表 3-84 和表 3-85 分别给出了各辐射区与混凝土交界的土壤及地下水的核素饱和浓度及与豁免值的比较、以及整个装置土壤及地下水总饱和活度与豁免活度的比较情况。

表 3-84 束流输运线与混凝土交界土壤的核素饱和浓度及与豁免值比较

核素	$T_{1/2}$ (s)	束流输运线	
		饱和浓度 $S_{30y,max}$（Bq/g）	与豁免浓度之比
^{3}H	3.89×10^{8}	6.40×10^{-2}	6.40×10^{-8}
^{7}Be	4.60×10^{6}	1.53×10^{-2}	1.53×10^{-5}
^{11}C	1.22×10^{3}	4.62×10^{-2}	/
^{12}B	2.02×10^{-2}	1.20×10^{-2}	/
^{15}O	1.22×10^{2}	8.59×10^{-2}	8.59×10^{-4}
^{16}N	7.13×10^{0}	4.46×10^{-2}	/
^{22}Na	8.21×10^{7}	2.88×10^{-2}	2.88×10^{-3}
^{23}Mg	1.13×10^{1}	6.04×10^{-3}	/
^{24}Na	5.39×10^{4}	2.74×10^{-1}	2.74×10^{-2}
^{25}Al	7.18×10^{0}	6.15×10^{-3}	/
^{27}Mg	5.68×10^{2}	4.33×10^{-2}	/
^{27}Si	4.16×10^{0}	5.74×10^{-2}	/
^{28}Al	$1.35E\times10^{2}$	1.76×10^{0}	/
^{29}Al	3.94×10^{2}	1.81×10^{-2}	/
^{31}Si	9.44×10^{3}	1.04×10^{-1}	1.04×10^{-4}
^{37}Ar	3.03×10^{6}	3.84×10^{-2}	3.84×10^{-8}
^{42}K	4.45×10^{4}	1.19×10^{-1}	1.19×10^{-3}
^{45}Ca	1.42×10^{7}	2.15×10^{-2}	2.15×10^{-6}
^{51}Cr	2.39×10^{6}	1.38×10^{-2}	/
^{54}Mn	2.70×10^{7}	5.69×10^{-2}	5.69×10^{-3}
^{55}Fe	8.61×10^{7}	5.68×10^{-1}	5.68×10^{-5}
^{56}Mn	9.28×10^{3}	1.19×10^{0}	1.19×10^{-1}
^{59}Fe	3.85×10^{6}	1.29×10^{-2}	1.29×10^{-3}
^{24m}Na	2.02×10^{-2}	1.37×10^{-1}	/
^{26m}Al	6.35×10^{0}	8.94×10^{-2}	/
合计	所有 $T_{1/2}$	4.81×10^{0}	1.58×10^{-1}
	所有 $T_{1/2}$>1d	8.20×10^{-1}	9.93×10^{-3}

表 3-85 束流输运线与混凝土交界的地下水的核素饱和浓度及与豁免值比较

核素	$T_{1/2}$ (s)	束流输运线	
		饱和浓度 $S_{30y,max}$（Bq/g）	与豁免浓度之比
^{3}H	3.89×10^{8}	1.06×10^{-1}	1.06×10^{-7}
^{6}He	8.07×10^{-1}	4.59×10^{-3}	/
^{7}Be	4.60×10^{6}	2.99×10^{-2}	2.99×10^{-5}
^{8}Li	8.38×10^{-1}	6.64×10^{-3}	/
^{8}Be	6.71×10^{-17}	7.65×10^{-3}	/
^{8}B	7.70×10^{-1}	7.66×10^{-4}	/
^{10}C	1.93×10^{1}	2.30×10^{-3}	/
^{11}Be	1.38×10^{1}	7.77×10^{-4}	/
^{11}C	1.22×10^{3}	9.49×10^{-2}	/
^{12}B	2.02×10^{-2}	2.41×10^{-2}	/
^{13}B	1.74×10^{-2}	1.14×10^{-3}	/
^{13}N	5.98×10^{2}	9.82×10^{-3}	/
^{14}O	7.06×10^{1}	1.11×10^{-3}	/
^{15}C	2.45×10^{0}	2.96×10^{-3}	/
^{15}O	1.22×10^{2}	1.91×10^{-1}	1.91×10^{-3}
^{16}N	7.13×10^{0}	9.79×10^{-2}	/
^{17}N	4.17×10^{0}	8.95×10^{-4}	/
合计	所有 $T_{1/2}$	5.82×10^{-1}	1.94×10^{-3}
	所有 $T_{1/2}$>1d	1.36×10^{-1}	3.00×10^{-5}

由表 3-84 可见，束流输运线土壤与混凝土交界面处，土壤中可迁移核素 ^{3}H 和 ^{22}Na 的 30 年饱和浓度分别比豁免浓度小 7 个量级以上和 2 个量级以上。距离混凝土交界面最近的土壤层总饱和活度浓度为 4.81 Bq/g，其中半衰期大于 1 天的核素总饱和活度浓度为 0.82 Bq/g。比豁免要求分别小约 1 个和 2 个量级。而离开该交界面每 80 cm，活化程度就会进一步减小 1 个量级。因此，相对于豁免浓度，本装置对土壤的活化影响很小。

由表 3-85 可见，感生放射性最严重的土壤与混凝土交界面处，地下水活化产生的长寿命核素 ^{3}H 和 ^{7}Be 的饱和浓度分别比豁免浓度小了 6 个量级以上和 4 个量级以上。且离开该交界面每 80 cm，活化程度就会就会减小 1 个量级。整个装置的地下水总饱和

活度为 0.58 Bq/g，其中半衰期大于 1 天的核素总饱和活度为 0.14 Bq/g，比豁免要求分别小 2 个或 4 个量级以上。因此，从豁免角度考虑，本装置对地下水的活化影响很小。

3.3.3.3.4.2靶站

图 3-99 为靶站中心下部土壤活化计算的 FLUKA 模型。

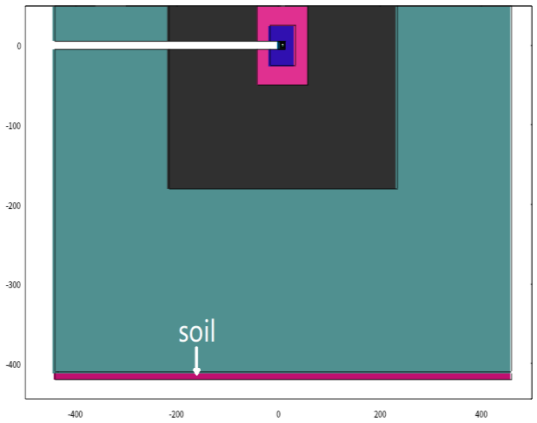


图 3-99 靶站下部土壤活化计算 FLUKA 模型

计算模型中，土壤密度为 1.9 g/cc，含水量 30%vol。在额定功率条件下持续运行 30 年后，土壤活化产生的核素及相关排放标准如表 3-86。从表中可以看出靶站下部土壤主要核素的比活度均低于国家排放标准。

表 3-86 靶站下部土壤活化产生的主要核素的饱和比活度与排放标准

类型	核素	半衰期（s）	运行 30 年比活度（Bq/g）	停束一周比活度（Bq/g）	豁免比活度*（Bq/g）
高能 β-γ 发射体	Na-24 Ar-37	5.27×10^{4} 3.02×10^{6}	/ 2.51×10^{-7}	/ 2.19×10^{-7}	0.1～1.0
其它 β-γ 发射体	Mn-56 Be-7 Fe-55	9.28×10^{3} 4.60×10^{6} 8.61×10^{7}	2.29×10^{-7} / 2.51×10^{-7}	5.58×10^{-24} / 2.50×10^{-5}	1.0～10^{2}
碳	C-14	1.80×10^{11}	5.26×10^{-9}	5.26×10^{-9}	10^{2}～10^{3}
短寿命 β 发射体	Al-28 O-15 C-11 Mg-27 N-13	1.34×10^{2} 1.22×10^{2} 1.22×10^{3} 5.67×10^{2} 5.97×10^{2}	3.60×10^{-5} 1.02×10^{-5} 2.04×10^{-5} 2.83×10^{-6} /	/ / / / /	10^{3}～10^{4}
其它	H-3 Na-22	3.89×10^{8} 8.21×10^{7}	1.57×10^{-6} (0.43pci/cc) / (0.44pci/cc)	1.57×10^{-6} /	20pci/cc(USA EPA) 10pci/cc(USA DOE)

3.3.4 工业 CT

本项目主要辐射污染源项来自于电子束打靶，电子束打靶产生的次级辐射主要为 X 射线，每年还会产生含极少量感生放射性核素的废靶。

具体产污环节示意图如图 3-100 所示。

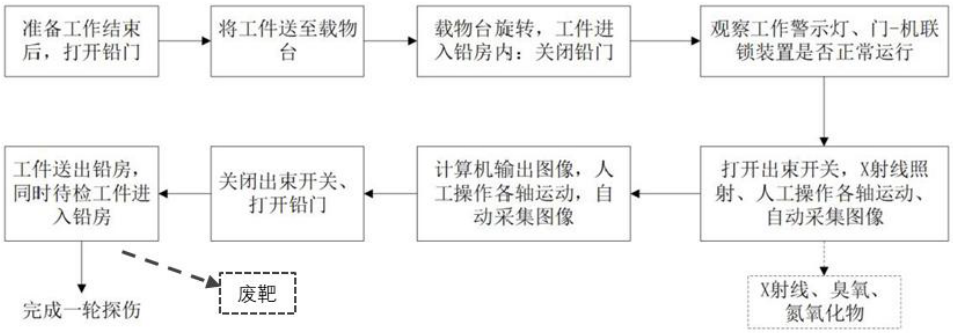


图 3-100 高能高分辨双能工业 CT 操作流程及产污环节示意图

3.3.4.1 瞬发辐射源

根据《电子直线加速器工业 CT 辐射安全技术规范》（HJ 785-2016），只有当电子加速器能量＞10MeV 时，才需要考虑对中子采取防护措施，在能量≤10MeV 时，不考虑中子。由于电子能量低于 10MeV，因此光中子产额很低，可以忽略。

因此，瞬发辐射源主要是 X 射线，仅在出束时产生，每天最多出束 12h，年出束时长不超过 2000h。结合工程实际，X 射线主要影响途径为穿墙直射、迷道散射、天空反散射等。

3.3.4.2 感生放射性

电子束打旋转靶的过程中，旋转靶长期工作后会失效而产生废靶，废靶在电子束辐照下会有极少量的感生放射性核素产生，且多为短寿命核素，根据以往项目经验，辐照后距离旋转靶 20cm 处的感生放射性剂量率约为 15μSv/h，放置约一天后达到环境的正常本底水平（~0.1μSv/h），在实际操作中对人员影响可以忽略。

3.4 废弃物

3.4.1 微观表征子系统（光源）

3.4.1.1 放射性废气

光源运行期间在直线加速器隧道、增强器-储存环隧道区域可能产生感生放射性气体，空气中活化产物主要考虑^{11}C（$T_{1/2}[^{11}C]$=20.39min）、^{13}N（$T_{1/2}[^{13}N]$=9.965min）、^{15}O（$T_{1/2}[^{15}O]$=2.037min）这三种核素。根据第三章的计算结果，核素的最大动态饱和活度浓度在10^{-1} Bq/cm^{3}量级，年总排放量为1.87E+12Bq。

3.4.1.2 放射性废液

光源正常运行期间不产生放射性废液，仅可能在检修或发生冷却水泄漏事故时排出一定量的活化冷却水。由于加速器所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由

于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素除 ^{3}H、^{7}Be 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。根据第三章的计算结果，光源活化冷却水的总饱和活度为1.11E+07Bq。在光源装置冷却水系统内，活化冷却水的总量约为 150m^3，则光源活化冷却水的饱和活度浓度为 7.41E+04Bq/ m^3。

3.4.1.3 放射性固体废物

光源运行期间可能产生的放射性固废主要包括：束测靶体设备，1套/年，体积155mm*240mm*850mm，重量30kg；冷却水系统废树脂，最多约750kg/年；通风系统废滤芯，最多约500kg/年。

3.4.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

3.4.2.1 放射性废气

活化气体主要来源于装置运行期间产生的次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、高能中子散裂反应和（γ，n）反应等引起的空气活化，主要活化产物有 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素，产生量为 6.13E+11Bq/a。

3.4.2.2 放射性废液

装置正常运行期间不产生放射性废液，仅可能在检修或发生冷却水泄漏事故时排出一定量的活化冷却水，该工况下年排放量不超过 0.5m^3，活化冷却水的模拟活度浓度为3.31E+06Bq。

3.4.2.3 放射性固体废物

本项目产生的放射性固体废物主要加速器部件、靶件等含感生放射性的固体废物，各类放射性废物的年产量预计不超过50kg。

3.4.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）

3.4.3.1 放射性废气

放射性废气主要来源于高亮度中子源装置运行期间产生的次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、高能中子散裂反应和（γ，n）反应等引起的空气活化，主要活化产物有 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素，产生量为 1.12E+12 Bq。

3.4.3.2 放射性废液

装置正常运行期间不产生放射性废液，仅可能在检修或发生冷却水泄漏事故时排出一定量的活化冷却水。高亮度中子源装置冷却水回路总水量约为 50m^3，用于冷却直线加速器、靶站和谱仪，其中能够产生活化冷却水的水量约为 3~4m^3。根据模拟计算结果可知靶站活化冷却水中 ^{3}H 和 ^{7}Be 的模拟计算活度均高于豁免活度，需要暂存。

3.4.3.3 放射性固体废物

参照国内散裂中子源的运行经验，本项目产生的放射性固体废物主要包括靶体、慢化器容器、冷却水系统中离子交换树脂、加速器结构件等，具体见下表。

表 3-87 放射性固体废物类型

名称	数量	废弃物大小	更换频率（年）
靶体（靶容器和靶材料，钽）	/	50 cm（长）× 17cm（宽）×10 cm（高）	≥2
慢化器容器（铝合金）	/	5 cm（宽）× 5 cm（厚）× 20 cm（高）	＞10
废束站质子窗	3	<5kg	>10
散裂靶质子窗	1	<10kg	>3
LINAC 斩波吸收器	1	<20kg	>10
冷却水系统中离子交换树脂	/	500L/年	根据实际情况调整
其它	检修时更换下来的已损坏的活化部件		

3.4.4 工业 CT

本项目主要辐射污染源项来自于电子束打靶，电子束打靶产生的次级辐射主要为X射线，每年还会产生含极少量感生放射性核素的废靶。

本项目产生的废弃物主要包括放射性固体废物和臭氧等有害气体。

3.4.4.1 放射性固体废物

高能工业CT系统旋转靶长期工作后会失效而产生废靶，废靶在电子束辐照下会有极少量的感生放射性产生，且多为短寿命核素，根据以往项目经验，辐照后距离旋转靶20cm处的感生放射性剂量率约为15μSv/h，放置约1天后达到环境的正常本底水平（~0.1μSv/h），预计一年产生2个废靶。

3.4.4.2 臭氧等有害气体

高能工业CT系统在运行时会发射X射线，从而产生臭氧、氮氧化物等有害气体。

4 辐射安全与防护

4.1 微观表征子系统（光源）

4.1.1 场所布局与分区

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

本项目光源辐射工作场所分区如图 4-1 所示。具体分区如下：

（1）控制区：直线加速器隧道、储存环-增强器隧道、线站防护棚屋。

（2）监督区：控制室、与控制区相邻的辐射工作场所，包括：实验大厅、用户实验室、空调机房等。

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

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

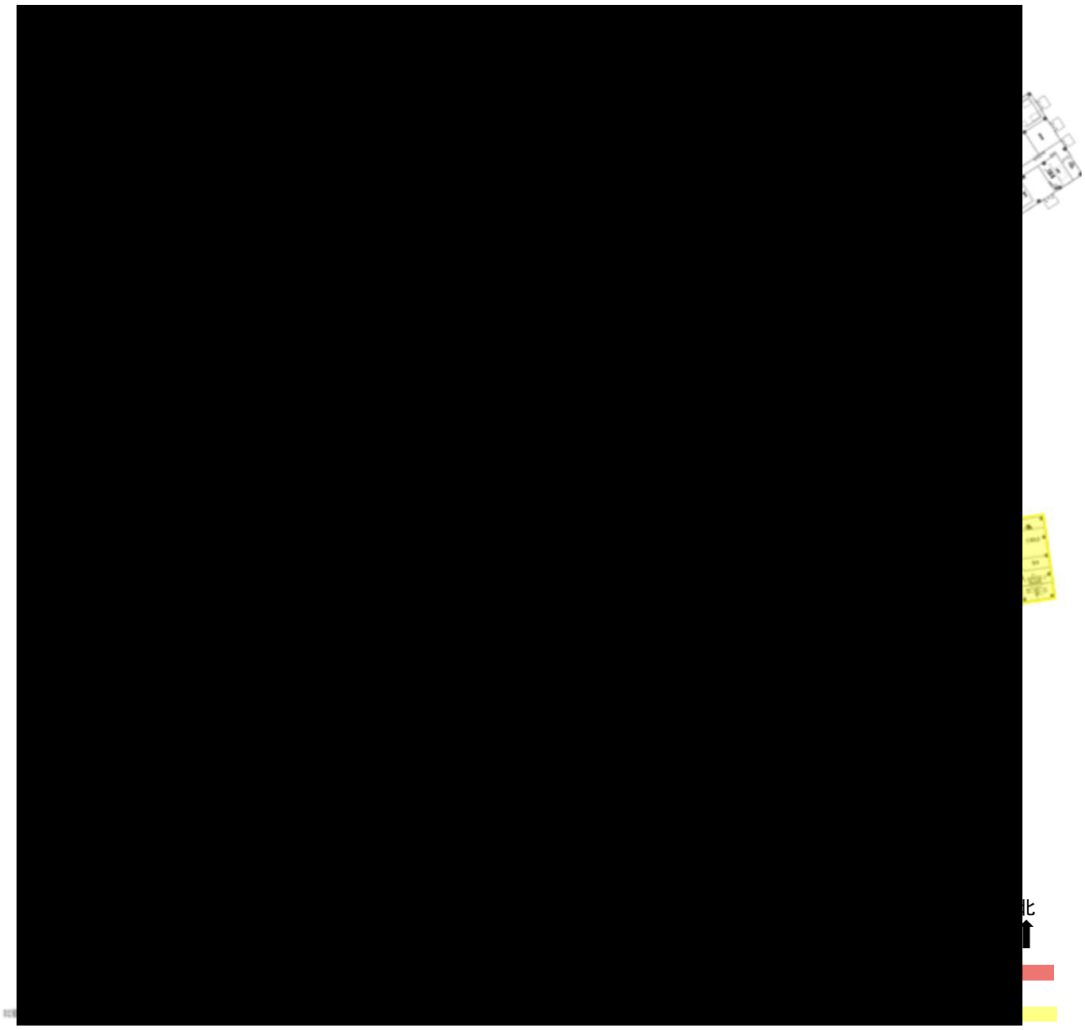


图 **4-1** 光源辐射工作场所分区图

4.1.2 辐射屏蔽

光源辐射屏蔽设计方案如下。

表 4-1 光源加速器系统各区域辐射屏蔽方案

区域	屏蔽墙名称	屏蔽墙编号	设计方案（默认单位：m）
直线隧道	前端墙	LW1	1.0
	加速段侧墙	LW2	1.3
	引出段侧墙	LW3	1.4
	末端墙	LW4	1.5
	加速段顶板	LT1	1.0
	引出段顶板	LT2	1.2
	屏蔽门	SD1	120mm Fe + 300mm BPE + 120mm Fe
	垃圾桶 1	/	内层为直径 10cm，厚度 30cm 的石墨圆柱体；中间层为厚度 20cm，长度 100cm 的铁长方体；外层为厚度 5cm，长度 110cm 的聚乙烯长方体
	垃圾桶 2	/	内层为直径 10cm，厚度 30cm 的石墨圆柱体；中间层为厚度 20cm，长度 100cm 的铁长方体；外层为厚度 5cm，长度 110cm 的聚乙烯长方体
增强器-储存环隧道非注入区	内侧墙	CW1	1.5
	长侧墙	NW1	1.5
	短侧墙	NW2	1.5
	锯齿墙 1	NS1	1.5
	锯齿墙 2	NS2	1.5
	隧道顶板	ST1	1.3
	迷道屏蔽门	SD2~SD4	60mm Fe + 60mm BPE + 60mm Fe
增强器-储存环隧道注入区	注入区内侧墙	CW2	2.5
	注入区外侧墙 1	SW1	2.8
	注入区外侧墙 2	SW2	2.5
	注入区外侧墙 3	SW3	2.5
	注入区外侧墙 4	SW4	2.0
	注入区外侧墙 5	SW5	2.5
	注入区外侧墙 6	SW6	2.0
	注入区锯齿墙 1	SS1	3.0
	注入区锯齿墙 2	SS2	3.0

区域	屏蔽墙名称	屏蔽墙编号	设计方案（默认单位：m）
	注入区锯齿墙 3	SS3	2.5
	注入区锯齿墙 4	SS4	2.0
	注入区锯齿墙 5	SS5	2.5
	注入区锯齿墙 6	SS6	2.0
	注入区隧道顶板	ST2	2.4
屏蔽补偿措施	线缆地沟孔洞封堵：采用 1L 和 2L 的赤铁矿（密度 4.0~4.5g/cm^3）和石英砂（密度约 2.65g/cm^3）辐射屏蔽沙袋等效屏蔽墙厚度交替使用封堵。		

*注：主体屏蔽墙材质要求为普通混凝土，密度不低于 2.35g/cm^3。



图 4-2 光源加速器系统各区域隧道屏蔽墙设计值（*表示顶板厚度，单位：m）

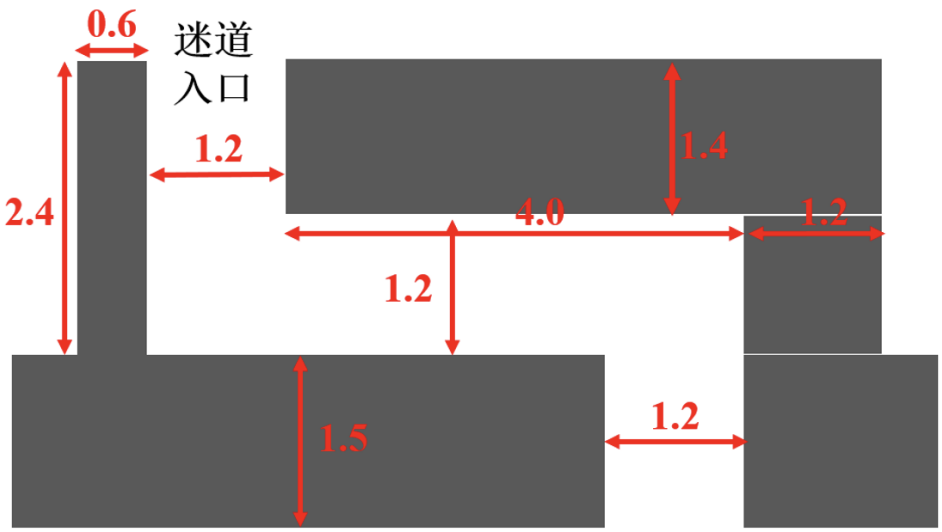


图 4-3 光源增强器-储存环隧道迷道设计示意图（单位：米）

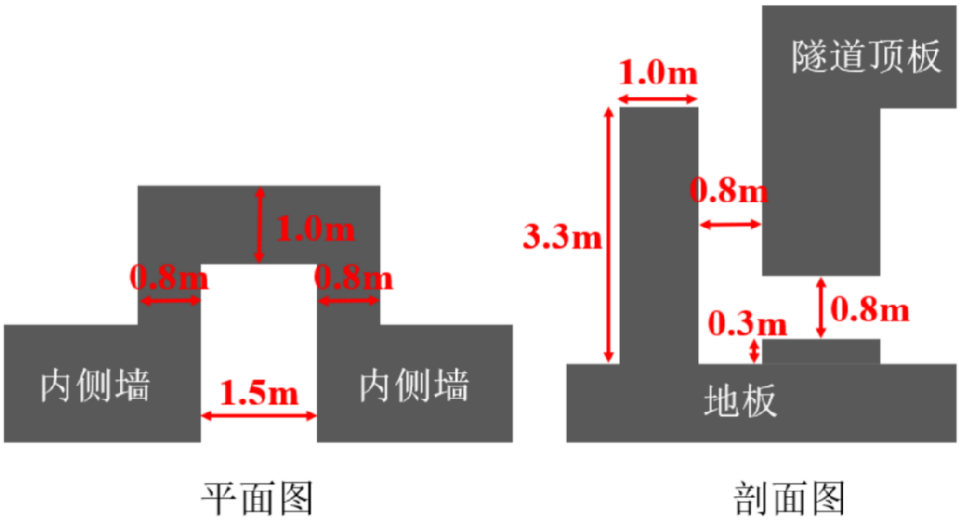


图 4-4 光源增强器-储存环隧道风管孔（编号 FG1~FG5）屏蔽设计

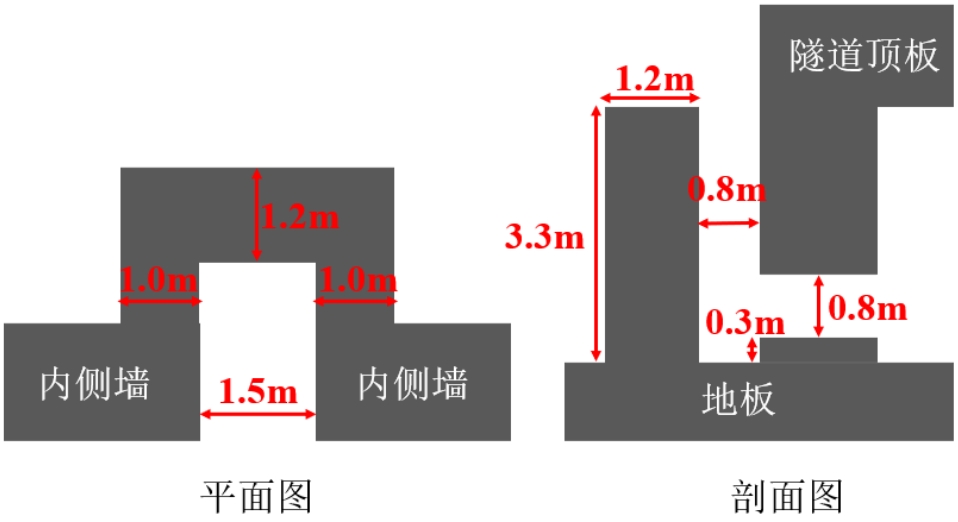


图 4-5 光源增强器-储存环隧道风管孔（编号 FG6）屏蔽设计

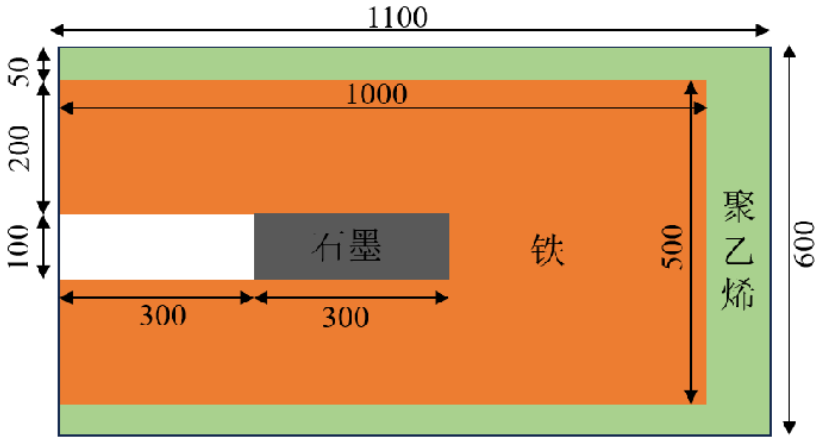


图 4-6 光源直线段区域束流垃圾桶结构设计示意图（侧剖视图，单位：mm）

表 4-2 光源线站棚屋防护设计情况表

序号	名称	光学棚屋		实验棚屋	
		棚屋内部长×宽×高尺寸 m	墙体及门窗等辐射防护设计方案，mm	棚屋内部长×宽×高尺寸，m	墙体及门窗等辐射防护设计方案，mm
1	D1 能源膜材料软共振专用线站（一线两站，240-2500 eV）	5.8×3.0×3.4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	无	无棚屋，2mm 厚 Fe 光束线管道满足屏蔽要求
2	D2 能源膜材料散射专用线站（一线三站，4.5-16 keV）	44.7×2.8×3.4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	16×3.5×3.8 62×15×9	侧墙：5Pb；顶墙：5Pb；末端墙：20Pb 局部加厚（10Pb） 200mm 混凝土
3	D3 固态电池材料专用线站（一线两站，4.5-22 keV）	14.5×2.5×3.4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	6×4.5×3.8 11×4.5×3.8	侧墙：5Pb；顶墙：5Pb；末端墙：20Pb 局部加厚（10Pb）
4	D4 X 射线吸收谱学线站（4.5-30 keV，聚焦；10-50keV，非聚焦）	30×3×3.4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	12×4×3.8	侧墙：5Pb；顶墙：5Pb；末端墙：20Pb 局部加厚（10Pb）
5	D5 软 X 光电子能谱线站（一线两站，50-1500 eV）	4.8×3.0×3.4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	无	无棚屋，2mm 厚 Fe 光束线管道满足屏蔽要求
6	D6 原位表面衍射线站（8-30 keV）	17×2.5×3.4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	11×5×3.8 8×5×4.7	侧墙：5Pb；顶墙：5Pb；末端墙：20Pb 局部加厚（10Pb）

序号	名称	光学棚屋		实验棚屋	
		棚屋内部长×宽×高尺寸 m	墙体及门窗等辐射防护设计方案，mm	棚屋内部长×宽×高尺寸，m	墙体及门窗等辐射防护设计方案，mm
7	D7 高能散射专用线站（一线两站串联，50-100 keV）	6.5×3.2×3.4　14.5×3.2×3.4　2×2.5×3.4　7×3.5×4.5	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	16.5×6×4.5 18×7×5	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）
8	D8 动态成像专用线站（一线三站串联，50-100 keV）	6.1×3.2×3.5　9.9×3.2×4.5　2×1.5×3.0　6×3×4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	10×5×4.5 8×15×5 19×7×5	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）
9	D9 纤维材料专用线站（一线两站，8-15 keV）	42×2.5×3.4　4.8×2.5×3.4	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	50×22×10	200mm 混凝土
10	D10 原位纳米探针线站（5-22 keV）	11.5×2.5×3.4　3×2.5×3.4　2×2.5×3.4　2×2.5×3.4　2×2.5×3.4　6×4×3.8	侧墙：30Pb+10PE；顶墙：18Pb+10PE；末端墙：60Pb 局部加厚（40Pb+20PE）	14×6×4.5	200mm 混凝土

4.1.3 安全联锁系统

光源的安全联锁系统分为加速器部分和光束线站部分。

4.1.3.1 加速器安全联锁系统

4.1.3.1.1 设计原则

辐射安全联锁系统的设计遵循弱电系统设计的基本原则，采用工业控制系统中被证明是可靠的硬件产品，且遵循“失效保护”、“冗余”以及“最优切断”等原则，同时参考 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》、GB5172-1985《粒子加速器辐射防护规定》，详细设计原则如下：

1）设计遵照系统硬件安全可靠、经济合理、技术可行的原则，采用在工业控制系统中被证明是可靠的产品（工业级产品）。

2）系统遵循“失效安全”原则，重要安全部件采用“冗余”技术；

3）系统具有独立性，具有不受其它系统限制等特性，并且直接联锁相关加速器设备，不经由其它系统中转联锁信号；

4）对加速器停机断束具有最高优先级；

5）对电源、关键设备和关键信号采用双路冗余机制；

6）在确保辐射安全的前提下，对其它系统的影响最小化。

4.1.3.1.2 系统架构

辐射安全联锁系统核心部件是可编程逻辑控制器（PLC），其与输入/输出扩展模块通过工业现场总线通讯。输入扩展模块主要负责将搜索清场按钮、急停按钮、安全传感器（或限位开关）和钥匙面板等输入设备的状态发送给 PLC。输出扩展模块主要负责将 PLC 的控制信号发送给加速器相关设备（注入器、功率源、调制器、磁铁电源和安全光闸等）以及警铃警灯、LED 显示屏等输出设备。位于中央控制室的监控服务器通过 TCP/IP 网络与 PLC 通讯，获取辐射安全联锁系统的现场实时状态，其结构图如下图所示。

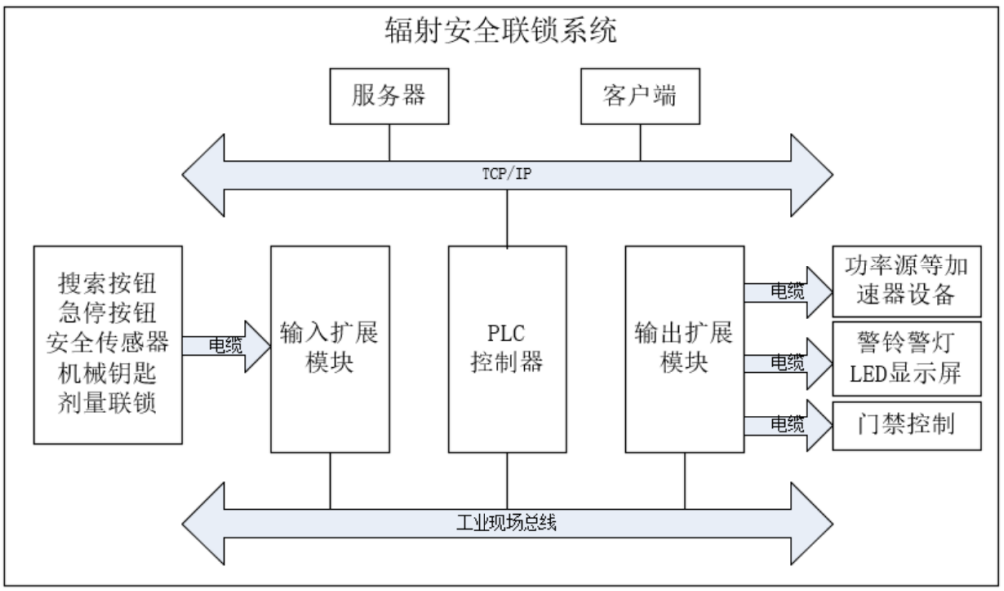


图 4-7 光源加速器系统辐射安全联锁系统结构图

4.1.3.1.3 安全联锁逻辑

加速器开机前，工作人员必须对控制区进行搜索清场，确保无人员滞留。为了保证搜索清场逻辑合理、严谨，在控制区内关键点位设置搜索清场按钮，使搜索清场路线完全覆盖整个控制区无死角。工作人员执行搜索清场时按照既定路径，确认无人员滞留在控制区内并次按下搜索清场按钮，并在固定的时间内关闭屏蔽门后允许开机。开始搜索清场、允许开机都需要专用钥匙确认。开始清场时，授权时间窗开始计时，超过时间窗后未按下全部搜索清场按钮并关闭屏蔽门，系统会自动复位，必须重新授权后启动搜索清场程序。

加速器开机后，系统切换为禁止进入模式，此时加速器隧道内和门外的红色警灯常亮，门外禁止工作人员刷卡进入，如有工作人员滞留在已经开机的加速器隧道内，可以通过按下紧急停机按钮切断加速器的运行，并可以通过门内的开门按钮打开屏蔽门的方式逃离控制区。

当加速器隧道允许人员进入时，加速器必须处于停机状态，即必须切断加速器射频功率源等设备。辐射控制区状态与辐射安全联锁系统、机器状态、门禁控制系统的状态转换如下图所示。

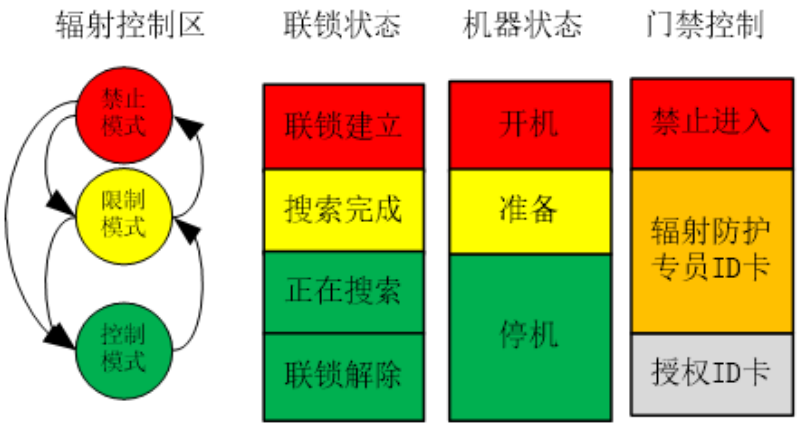


图 4-8 光源加速器状态转换图

当加速器隧道允许人员进入时，加速器必须处于停机状态，即必须切断加速器射频功率源等设备。加速器开机后，隧道内的红色警灯常亮，如有工作人员滞留在已经开机的控制区内，可以通过按下急停按钮切断加速器的运行，并可以通过门内的开门按钮打开屏蔽门逃离控制区。

器联锁逻辑如下：

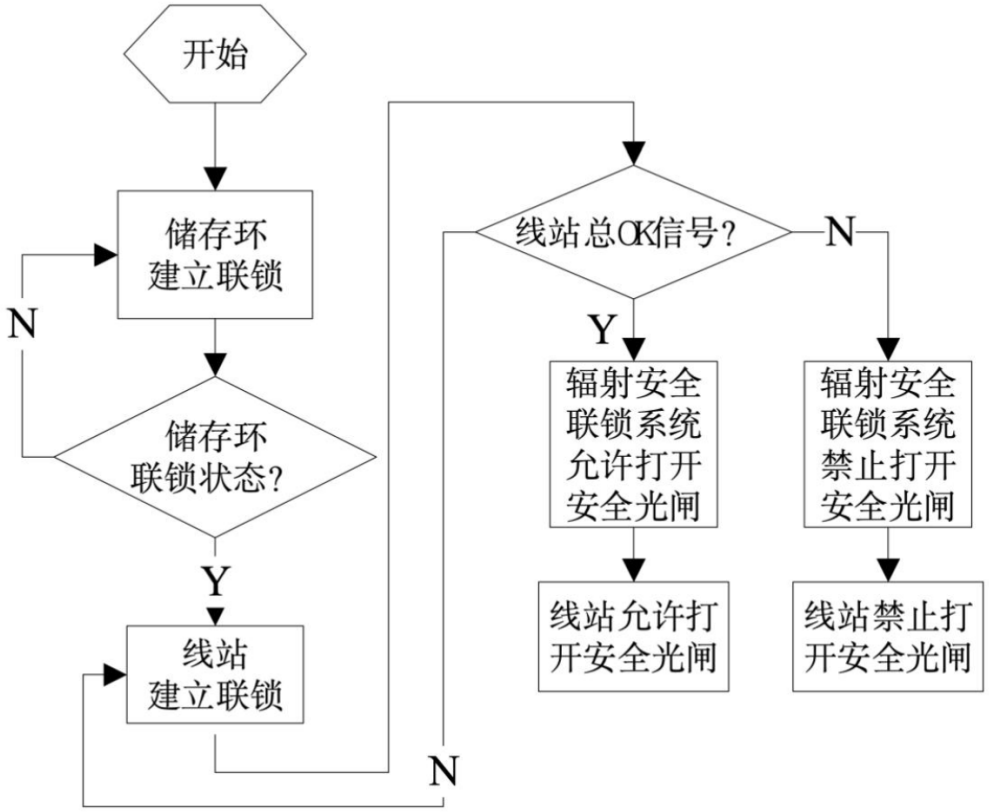


图 4-9 光源光束线站联锁逻辑图

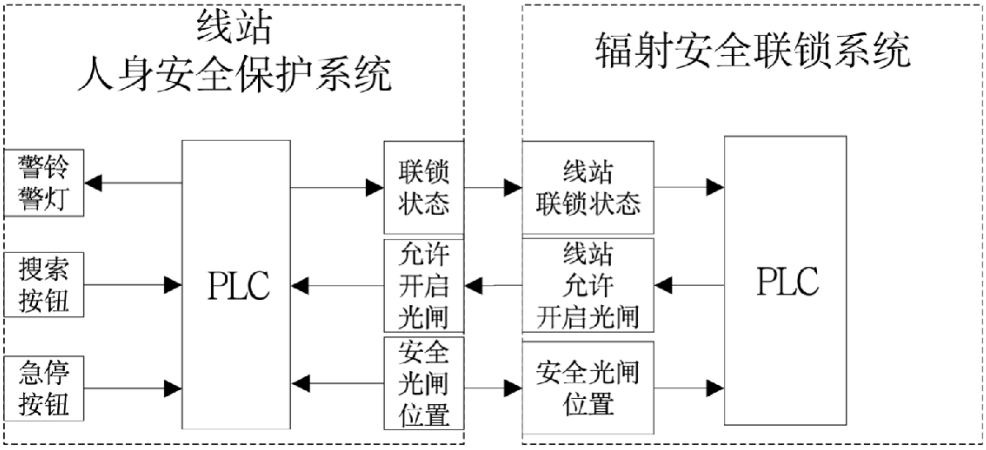


图 4-10 光源加速器和线站之间的联锁逻辑关系图

4.1.3.1.4 系统运行模式

为保证装置调试运行时的安全，根据建筑布局图和加速器设备的布局，辐射

安全联锁系统的主要运行模式有如下几种：

1）直线调试运行模式

电子束流仅在直线段运行，束流最终进入直线末端束流收集桶。此时辐射安全联锁系统必须对直线加速器隧道完成搜索清场并建立联锁模式。

2）储存环调试运行模式

电子束流进入增强器-储存环隧道。此时辐射安全联锁系统必须对增强器-储存环隧道完成搜索清场并建立联锁模式。

3）光束线实验站调试运行模式

电子束流经过增强器-储存环隧道内的弯铁等偏转后产生同步辐射光，进入光束线的光学棚屋和实验站，此时光束线的光学棚屋和实验站辐射安全联锁系统必须完成搜索清场并建立联锁模式。

4.1.3.1.5 搜索清场原则

为了方便工作人员对辐射控制区进行搜索清场，将控制区按照建筑布局分为两个搜索子分区：直线加速器隧道子分区和增强器-储存环隧道子分区，每个搜索子分区相互独立，装置运行在不同模式需要按照要求对相应区域进行搜索清场。对于整个控制区的开始搜索、完成搜索和建立联锁都需要授权，其中开始搜索时，授权时间窗（如 15 分钟）开始计时，超过时间窗后未完成搜索清场区域联锁状态复位，必须重新授权后启动搜索。

直线加速器隧道内搜索清场时，工作人员通过迷道外联锁授权单元进行授权启动搜索清场程序，进入直线加速器隧道末端，确认隧道内无人员滞留后，按下隧道内的搜索清场按钮，离开隧道后关闭迷道门，在联锁授权单元确认搜索清场完成。

增强器-储存环隧道共三个迷道出入口，为方便执行搜索清场程序，将增强器-储存环隧道分为三个独立的搜索子分区，分别为控制区 A、控制区 B 和控制区 C，子分区之间通过栅栏门隔离。增强器-储存环隧道内搜索清场时，工作人员通过门外授权单元进行授权启动搜索清场程序，分别进入控制区 A、控制区 B 和控制区，关闭栅栏门并从子分区的最末端开始搜索清场，确认隧道内无人员滞留后，依次按下隧道内的搜索清场按钮和迷道内搜索清场按钮后并关闭迷道屏蔽门，完成子分区内的搜索清场，详细流程见图 4-12。三个控制区均完成搜索清场后，

最后在联锁授权单元确认搜索清场完成，刷卡取出储存环开机钥匙，携带开机钥匙至中控室并插入联锁面板，开机钥匙锁定后允许增强器和储存环开机。

增强器-储存环隧道共三个迷道出入口，为方便执行搜索清场程序，选定一个迷道出入口为主出入口并在门外安装联锁授权单元，增强器-储存环隧道内搜索清场时，工作人员通过门外授权单元进行授权启动搜索清场程序，进入增强器-储存环隧道，沿逆时针方向搜索清场，确认隧道内无人员滞留后，依次按下储存环侧墙的搜索清场按钮，确认迷道内无人员滞留并关闭迷道门，按下迷道内搜索清场按钮，最后返回主出入口，离开隧道后关闭迷道门，在联锁授权单元确认搜索清场完成。

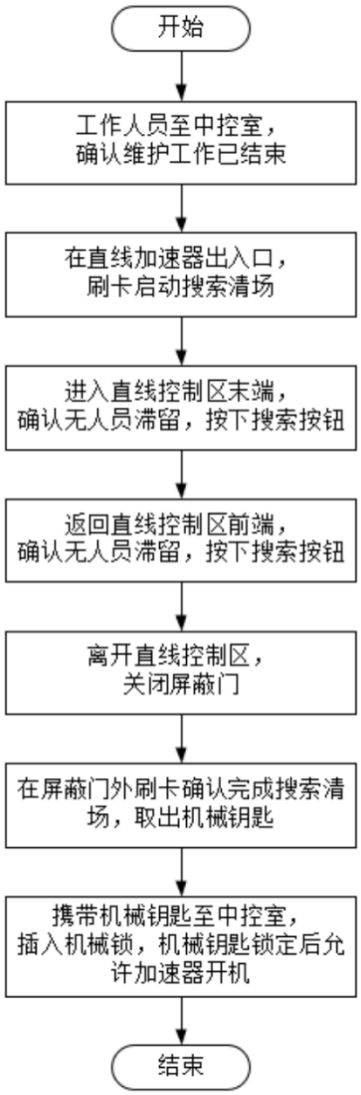


图 4-11 光源直线加速器搜索清场流程图

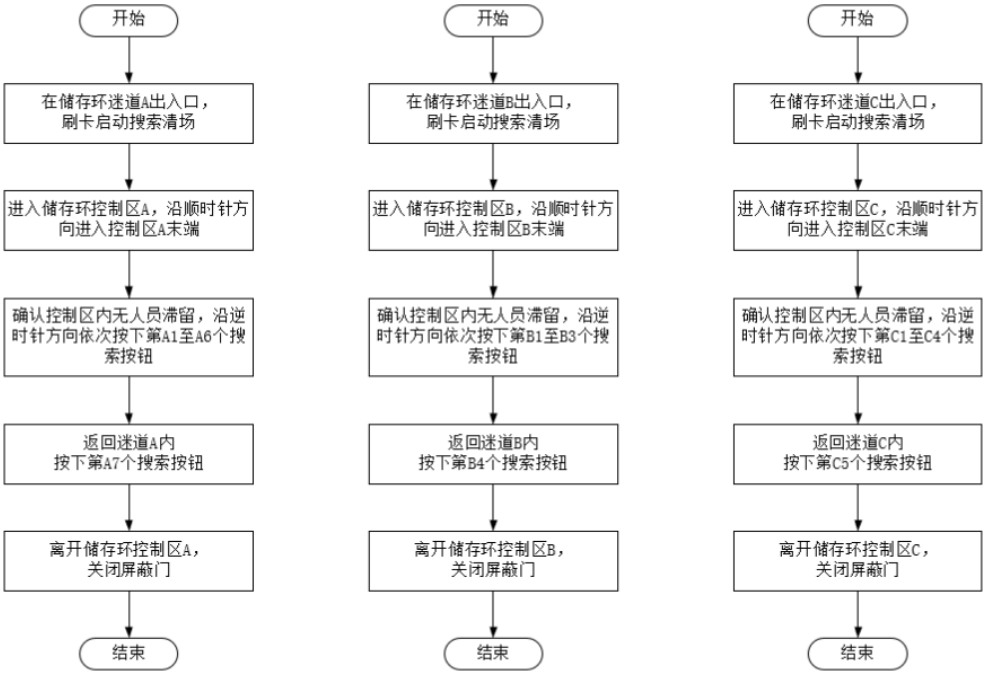


图 4-12 光源储存环搜索清场流程图



图 4-13 光源直线加速器控制区搜索清场路线图

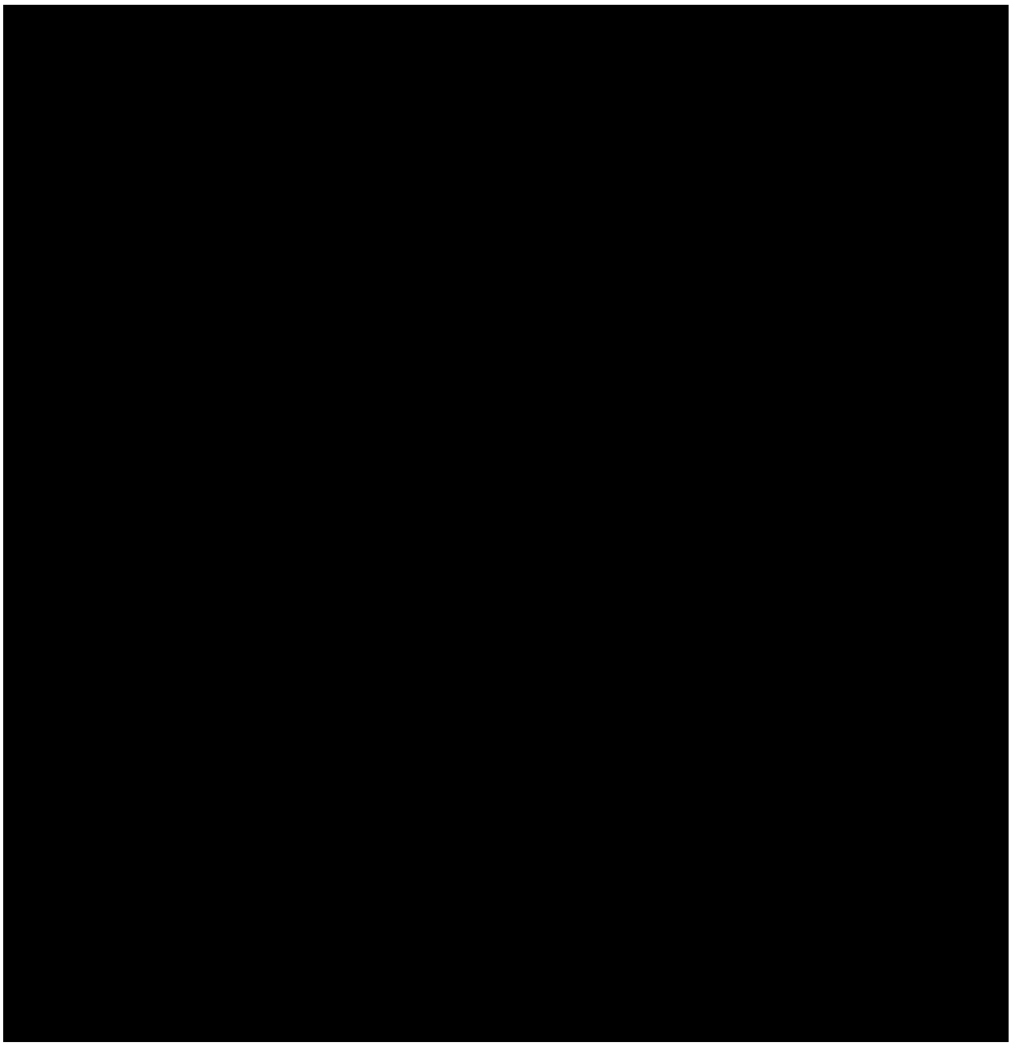


图 4-14　光源储存环控制区搜索清场路线图

4.1.3.1.6　门机联锁

辐射防护屏蔽门和逃生迷道门上均安装有门磁传感器（或限位开关），辐射安全联锁系统必须确保屏蔽门和逃生迷道门全部闭合后，允许加速器开机。加速器开机运行时，门如果被意外开启，加速器立即停机并切断束流。

4.1.3.1.7　剂量联锁

在监督区所设置的对中子和γ射线剂量率水平进行实时监测的区域固定式辐射监测仪（中央控制室监测点位除外）均参与剂量联锁。固定式辐射监测设备的剂量联锁信号接入辐射安全联锁系统，当剂量率联锁或者累积剂量联锁超阈值

后，剂量联锁信号通过硬连线接入辐射安全联锁系统，切断加速器的运行。辐射剂量恢复至正常水平，并经辐射防护工作人员确认后，加速器可重新开机运行。

4.1.3.1.8 机械钥匙系统

机械钥匙系统主要有两级联锁，分别为：中控室开机钥匙箱和屏蔽门外的开机钥匙箱。加速器开机时，开机钥匙必须按插入中控室的开机钥匙箱内，此时钥匙被锁定无法取出。加速器停机后，工作人员通过刷卡认证后取出开机钥匙，插入屏蔽门外的安全钥匙箱后，屏蔽门允许打开。

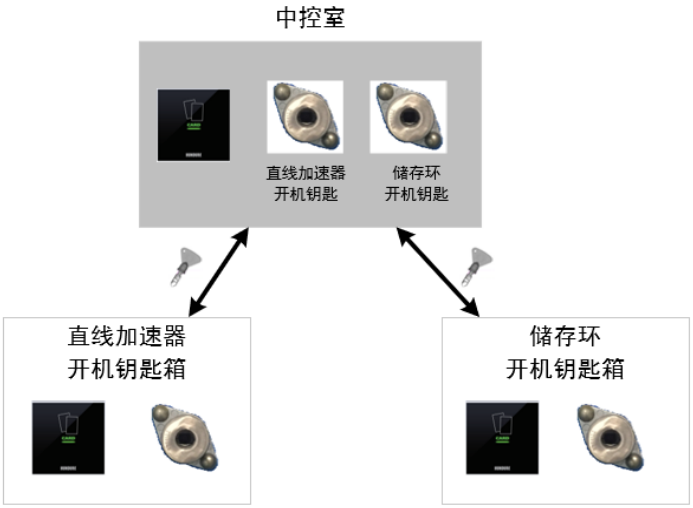


图 4-15 光源加速器系统安全联锁机械钥匙置换方式

1）中控室开机钥匙箱

加速器开机的必要条件是开机钥匙箱的钥匙到位，开机钥匙箱包含一套带位置信号的电磁锁（含钥匙）和门禁读卡器。加速器开机运行时开机钥匙在电磁锁上被锁定无法取出，当加速器停机后，加速器控制系统给到辐射安全联锁系统停机信号，工作人员刷卡取出开机钥匙，PLC 收到刷卡信息后，给电磁锁解锁信号，此时可旋转拔出开机钥匙。钥匙拔出后同时给信号到 PLC，辐射控制区处于安全状态。开机钥匙未插入开机钥匙箱时，辐射控制区内的加速器设备无法开机。

2）屏蔽门外的开机钥匙箱

开机钥匙插入辐射控制区主出入口的开机钥匙箱后，允许加速器工作人员通过身份认证后允许打开屏蔽门，工作人员进入控制区进行维修/维护等工作，待工作结束后离开此控制区时，由工作人员对该区域进行搜索清场，确认无人员滞

留完成搜索清场，并经身份认证后，取出开机钥匙。控制区未完成搜索清场，开机钥匙无法取出。

4.1.3.1.9 门禁控制系统

为防止非放射性工作人员进入辐射控制区和监督区，对放射性工作人员的进出由门禁控制系统进行管理。门禁控制系统包括门禁控制器、读卡器、出门按钮、电控门锁、破碎玻璃按钮和应急电源等设备，门禁控制系统实时获取辐射安全联锁系统的状态，共同完成控制逻辑任务。辐射控制区门禁控制逻辑如下表所示。

表 4-3 光源加速器系统辐射控制区门禁控制逻辑

控制区状态	加速器状态	出入控制
联锁建立	允许出束	门外禁止进入， 门内可通过开门按钮开门逃生
联锁解除	禁止出束	门外允许开门， 门外通过门禁权限控制人员进入； 门内可通过开门按钮开门

4.1.3.1.10 联锁设备

辐射安全联锁系统要满足设计要求、并能长时间稳定运行，因此必须选用可靠性高、使用寿命长的工业级设备。

4.1.3.1.10.1 冗余控制器

为了提高辐射安全联锁系统的高可靠性，系统采用冗余 CPU、冗余供电模块、冗余接口模块和冗余 I/O 模块等，同时根据需要还可以配置冗余服务器和冗余客户端等。系统包含两个 CPU，主备 CPU 可实现无扰动切换，同时保持输出并且无信息或报警/中断丢失。

4.1.3.1.10.2 冗余输入输出模块

系统包含两套输入/输出模块，这些模块以冗余对的形式组态并运行，系统允许单个信号模块发生故障，从而保证系统最高的可靠性。当一个 IO 模块或通道出现故障时，系统会自动处理其冗余模块或通道的值，以保证辐射安全联锁系统的正常运行。

4.1.3.1.10.3 冗余电源

为了确保安全而高效的系统运行，就必须提供可靠的电源。辐射安全联锁系统采用冗余电源方案，冗余模块可有效防止一个模块故障或者一路电源故障影响

整个供电系统安全，对 24 V 电源的故障提供了额外的保护功能，以确保设备电源的正常供应。

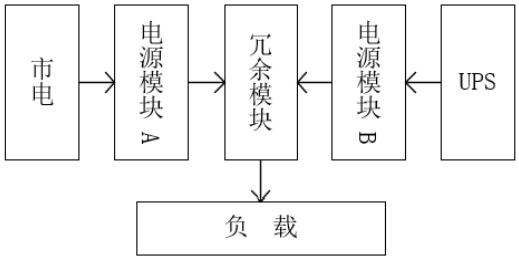


图 4-16 光源加速器系统辐射安全联锁系统冗余电源方案

4.1.3.1.10.4 急停按钮

急停按钮是辐射安全联锁系统的重要信号输入设备，设备均匀分布在直线加速器和储存环等控制区内。每个急停按钮的内部均包含两个独立的触点，按下急停按钮会同时激活两个触点给出两路信号输入到辐射安全联锁系统的冗余 I/O 模块中，确保有两路信号及时切断加速器。

4.1.3.1.10.5 搜索清场按钮

搜索清场按钮分布于各控制区内部。每个搜索清场按钮带有指示灯，启动搜索清场程序后，当前等待按下的搜索清场按钮的指示灯会一直闪烁，当被按下时，指示灯会变成常亮。

4.1.3.1.10.6 警铃警灯

在辐射控制区内和出入口门外安装有警铃警灯，每个警铃警灯含有绿色、橙色、红色指示灯和黑色的蜂鸣器，用于显示辐射工作场所的运行状态，不同状态分别用不同颜色的指示灯进行指示：绿色代表加速器停机中；黄色闪烁代表搜素清场中；黄色常亮代表搜索清场完成；红色代表加速器开机中。在启动搜索清场、搜索清场过程中按下搜索清场按钮、确认搜索完成以及切换到开机中等联锁状态时警铃鸣响。

4.1.3.1.10.7 安全传感器

各控制区的所有屏蔽门和迷道门均装有安全传感器（或限位开关等），辐射安全联锁系统实时监控门的开关状态。加速器开机时，屏蔽门和迷道门被打开，安全传感器（或限位开关等）立即被触发，辐射安全联锁系统立即切断加速器束流。

4.1.3.1.10.8 LED 显示屏

在直线加速器隧道和增强器-储存环隧道迷道门外均安装有 LED 显示屏，能够实时显示辐射安全联锁系统状态，显示的文字内容为中英文循环，每 10 s 动态切换一次，工作人员可通过 LED 显示屏了解联锁运行状态。主要显示内容有：

停机中，允许进入！

搜索清场中，禁止进入！

搜索清场完成，禁止进入！

开机中，禁止进入！当心电离辐射！

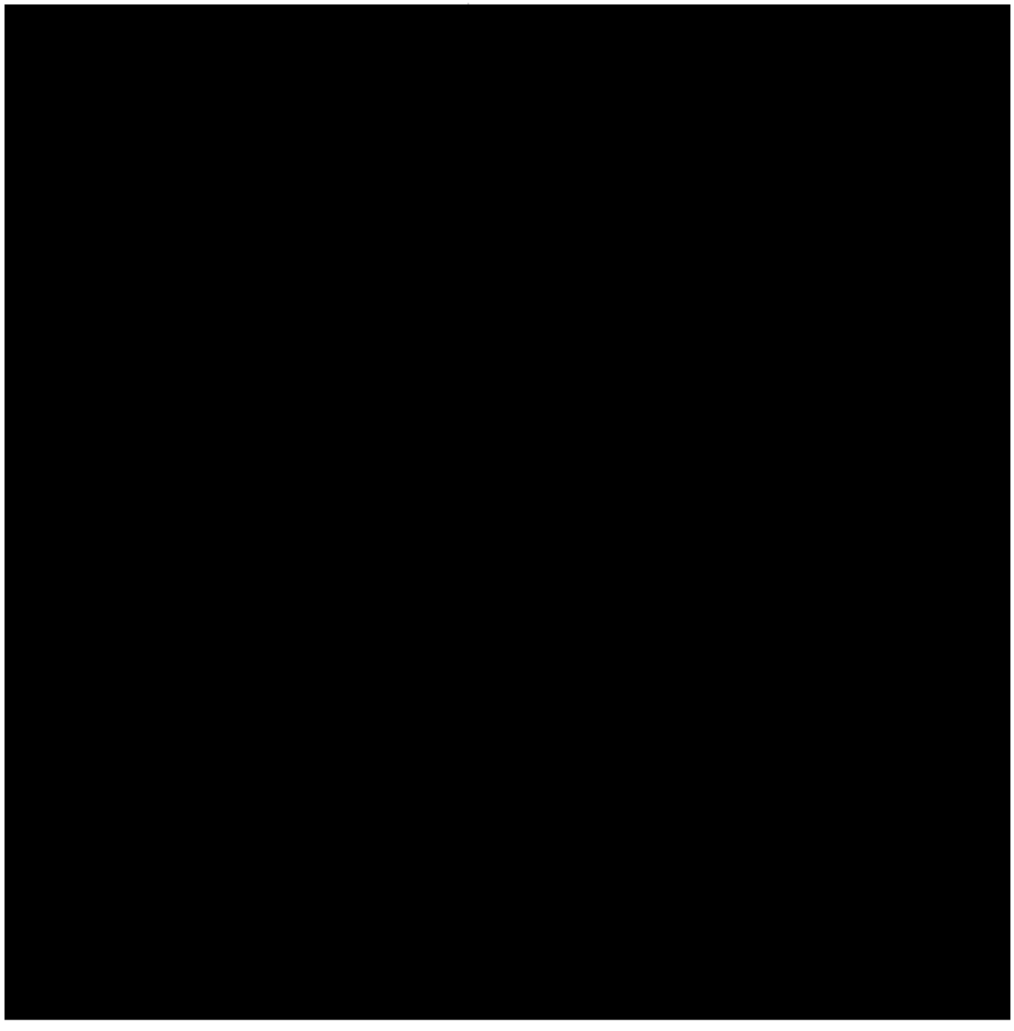


图 4-17 光源加速器系统辐射安全联锁系统设备分布图

加速器安全联锁设备数量统计如下：

表 4-4 光源加速器系统安全联锁设备数量统计表

区域	直线加速器隧道	增强器-储存环隧道	中控室
联锁门	1	6	0
LED 显示屏	1	3	0
机械钥匙箱	1	1	0
联锁面板	0	0	1
急停按钮	4	27	0
搜索按钮	2	18	0
警铃警灯	3	31	0

备注：中控室联锁面板包含一个急停按钮、一个直线加速器机械锁、一个增强器和储存环机械锁和一个门禁读卡器。

4.1.3.2 光束线站安全联锁系统

每条光束线站的安全联锁系统包括前端区安全联锁子系统、人身安全保护子系统、光束线设备保护子系统、真空快联锁子系统。其中，人身安全保护系统还承担着与前端区安全联锁系统和辐射防护系统的信号交互，信号传送方式为硬连接。

良好的人身安全保护系统有助于实验人员的生命保障，有利于加速器储存环系统的正常运行。人身安全保护系统的目的就是为了最大限度地保障光束线站实验运行人员的人身安全，在出现紧急情况时，及时关闭光闸或剔除储存环中的束流，保证实验运行人员的生命安全。因此人身安全保护系统的任务是保证在光束线站调试或运行过程中，人身不会受到因同步光的作用而产生的辐射伤害，实现进出棚屋人员的安全防范，让进入棚屋的人员免受辐射伤害，保证棚屋内无人后才能引入同步光开展实验。

4.1.3.2.1 人身安全保护系统简介

该系统通常主要由光束线站棚屋（含有铅等材料所屏蔽的房间，包括光学棚屋 Optical Hutch 和实验棚屋 Experimental Hutch）、光子光闸（Photon Shutter，可以阻挡高功率 X 射线，保护下游安全光闸等）、安全光闸（Safety Shutter，能够阻挡离散电子、韧致辐射和 X 射线在内的各种辐射）、棚屋门气动控制装置、电控锁、棚屋门位置传感器、（带有声光报警器的）搜索逻辑电

路箱、（带有操作面板及状态显示的）辐射安全联锁逻辑电路控制箱，以及搜索/复位按钮和紧急状态急停按钮等部分所组成，其控制机柜通常安置在光束线站棚屋旁边以方便实验用户操作。

各光束线站采用类似的人身安全联锁控制逻辑，一般有光学棚屋和实验棚屋，同步辐射光从光学棚屋进入实验棚屋。进入光学棚屋的同步光由位于前端区的光闸 PS2、SS1 加以控制，进入实验棚屋的同步光由位于光学棚屋的光闸 SS2 控制。光子光闸 2（PS2）用于阻挡插入件同步辐射光，保护安全光闸 1 及其后续的光束线元件，当压缩空气及其开关控制系统出现故障时，处于关闭状态。安全光闸 1（SS1）用于阻挡同步辐射和气体韧致辐射等进入光学棚屋，保证储存环束流注入或运行期间，光学棚屋内工作人员的人身安全。当其压缩空气故障和控制信号掉电时处于关闭状态。由于不能承受插入件同步光的照射，其开关操作要与光子光闸 PS2 联锁，保证在 PS2 关闭后 SS1 关闭，在打开 PS2 之前打开 SS1。安全光闸 2（SS2）用于阻挡单色光和韧致辐射等进入实验棚屋，多用于光学棚屋供光而实验棚屋不供光的情况。

为了满足安全条件的设计要求，系统在布局上把棚屋搜索按钮和带有声光报警器的逻辑电路箱等安装在其棚屋内的指定位置，而急停按钮则设置在各棚屋内外的逻辑控制箱上，以及控制总机箱上。在棚屋的门上装有门锁和位置传感器，位置传感器传递门的开启或关闭状态信号，电控锁配有钥匙用于棚屋门的联锁状态确认。这些位置传感器、搜索逻辑电路箱和搜索/复位按钮等，为该系统提供了所有的安全条件的状态信号输入。

4.1.3.2.2 人身安全保护系统结构

每条光束线站的人身安全保护系统均采用 PLC 进行设计制造，其系统架构框图如下图所示。IOC（Input Output Control）和 PLC（Programmable Logic Controller）间的通信通过 Ethernet/IP 以太网工业协议实现。整个系统可运行在 EPICS（Experimental Physics and Industrial Control System）软件环境下；控制 OPI（Operator Interface）可负责系统状态监控，实验棚屋门的开关和相应光闸的开关控制；PLC 负责控制逻辑的执行。EPS_OK 信号用于光闸开启的约束条件，只有设备保护系统（EPS，Equipment Protection System）一切正常后，才可以打开安全光闸（SS1、SS2）和光子光闸 2（PS2）。

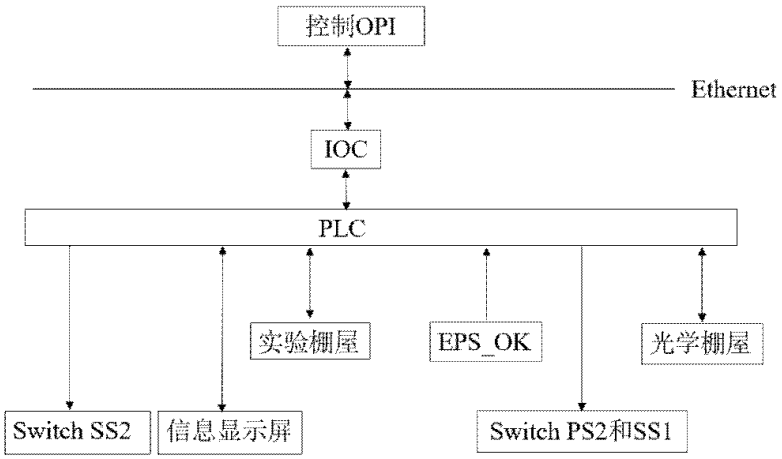


图 4-18 光束线站人身安全保护系统框图

光学棚屋的安全联锁信号直接接入 PLC 的输入隔离模块，根据联锁逻辑要求决定其防护门的开关和前端区光闸（PS2 和 SS1）的开关，以及声光报警信号的输出，信息显示屏安装在防护门附近，用于显示当前门的状态及其相关信息，信息显示屏和 PLC 间由通信模块连接。当实验棚屋要用光时，必须先打开 SS2。

4.1.3.2.3 人身安全保护系统组成

人身安全保护系统主要由搜索按钮、急停按钮、光子光闸、安全光闸、手动门、气动门、开关门按钮、复位按钮以及指示灯、声光报警灯等组成，可分为输入信号和输出信号。具体如下：

（1） 输入信号及其用途

- 搜索按钮（SB，Search Button）：用于在开启同步光之前搜索棚屋内是否有人，搜索按钮一般设置在棚屋的死角处，以保证搜索的彻底性。参考上海光源光束线站棚屋搜索按钮的设置经验和制定的原则，可在每个棚屋的束线管道两侧至少各设置一个搜索按钮，较大的棚屋或有多个死角的区域可适当增设搜索按钮，按钮安装的位置还应保证搜索人员巡视整个棚屋；对于较小的棚屋可以只配置一个搜索按钮。搜索人员只有在规定的时间内（最长应不超过 200 秒，可根据棚屋的大小不同选取合适的时间，最短应不小于 2 秒），从离棚屋门最远处的搜索按钮开始，棚屋内会有声光警示，提醒屋内所有人员马上离开，再依次按第二个搜索按钮和第三个搜索按钮，只有所设“搜索按钮”都按过，且防护门关闭后，才能停止搜索警示输出，否则系统会报警提示搜索无效。
- 急停按钮（EB，Emergency Button）：用于紧急停束报警，在紧急关头保护人身免受同步辐射光的伤害。一般安装在醒目但不容易被误按的地方，根据棚屋的大小决定安装的数目。每个棚屋中所有急停按钮的常闭触点串联起来接入 PLC 的输入端。
- 光子光闸 PS2 的开关状态信号：PS2 为光束线站的关键设备，采用双信号判断设备的工作状态，两个开信号均为“1”（开行程开关为接通状态）时，意味着 PS2 完全打开，允许同步光通过；任一个开信号不为“1”，则表示 PS2 开故障发生，不能允许同步光通过，并报警。同样地，两个关信号均为“1”（关行程开关为接通状态）才表明 PS2 完全关闭，同步光被阻断；任一个关信号不为“1”，则表示 PS2 关故障发生并报警，需排除故障后，方能继续实验。两组行程开关安装在光子光闸 PS2 的结构组件上。
- 安全光闸 SS1 的开关状态信号：和 PS2 一样，SS1 也是光束线站的关键设备，需采用双信号判断设备的工作状态。两个开信号为“1”（开行程开

关为接通状态）时，意味着 SS1 完全打开，允许同步光通过；任一个开信号不为“1”，则表示 SS1 开故障发生，不能允许同步光通过，并报警。两个关信号均为“1”（关行程开关为接通状态）才表明 SS1 完全关闭，同步光被阻断；任一个关信号不为“1”，则表示 SS1 关故障发生并报警，需排除故障后，方能继续实验。两组行程开关安装在安全光闸 SS1 的结构组件上。安全光闸 SS1 和光子光闸 PS2 一起构成光学棚屋的安全屏障。

- 安全光闸 SS2 的开关状态信号：安全光闸 SS2 是实验棚屋的安全保障，也是光束线站的关键设备，要采用双信号判断设备的工作状态。两个开信号为“1”（开行程开关为接通状态），意味着 SS2 完全打开，允许单色光通过；任一个开信号不为“1”，则表示 SS2 开故障发生，不能允许单色光通过，并报警。两个关信号均为“1”（关行程开关为接通状态）才表明 SS2 完全关闭，单色光被阻断。任一个关信号不为“1”，则表示 SS2 关故障发生并报警，需排除故障后，方能继续实验。两组行程开关安装在安全光闸 SS2 的结构组件上。
- 门的开关状态信号：开信号为“1”（开行程开关为接通状态），意味着防护门完全打开，关信号为“1”（关行程开关为接通状态）表明防护门完全关闭，防护门的行程开关安装在门完全打开和关闭的位置上。考虑到有的防护门为向两边打开的结构，可将两扇门的关闭信号串联后接入，两扇门的打开信号并联后接入，意为只有两扇门全部关闭后才视为门关闭，只要一扇门打开即视为门打开。门关闭好以后，才能允许打开光闸引入同步光进入该棚屋。
- 复位：主要用于故障状态后清除故障指示，恢复安全联锁系统的正常工作，当光束线出现故障后，故障提示只有在按过复位按钮后才消失，光闸也才能重新打开。在没出现故障的情况下按动复位按钮是不起作用的。

（2） 输出信号及其控制

人身安全保护系统的输出控制对象主要是光子光闸 PS2、安全光闸 SS1、安全光闸 SS2、指示灯，以及防护门的开关和声光报警输出等。

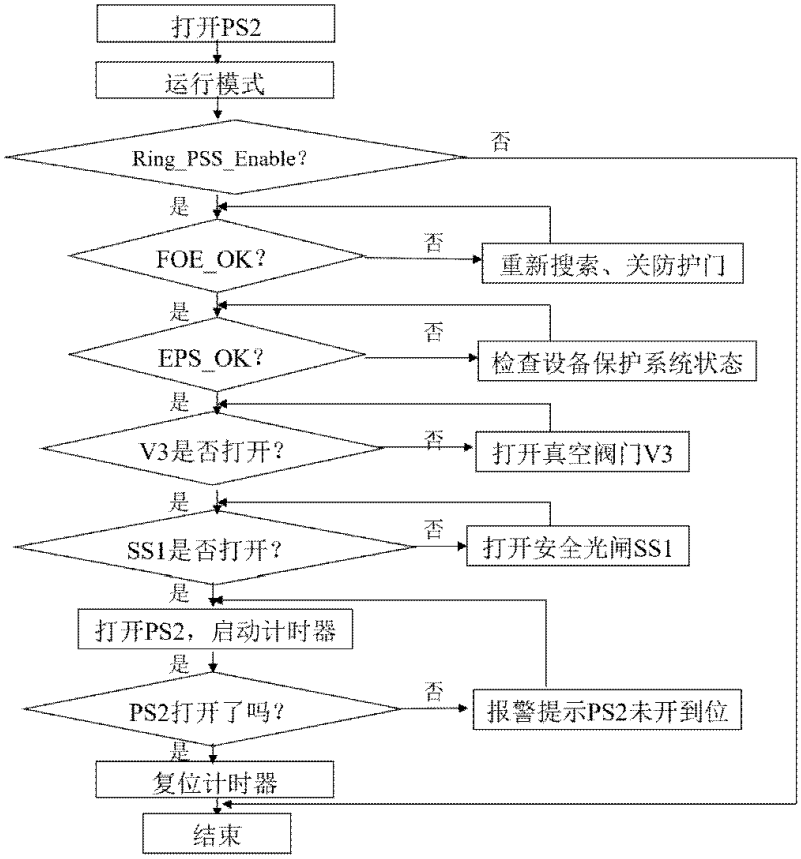


图 4-19 光源光束线站打开光子光闸 2（PS2）的流程图

- 光子光闸 PS2 的开关：光子光闸 PS2 主要是用于阻挡同步光，保护其下游的安全光闸等设备不受同步光的直接照射。因此，必须保证在安全光闸 SS1 打开后再打开 PS2，在 PS2 关闭后再关 SS1。PS2 的开关还与设备保护系统（EPS）的状态有关，开关 PS2 的控制流程如图 4-19 所示，只有在 SS1 打开后且设备保护系统工作正常时，且急停按钮无效（没有被按下）的情况下才能打开 PS2。
- 安全光闸 SS1 的开关：SS1 的开关主要是为光学棚屋的人身安全而动作，保证在光学棚屋开门之前关闭光闸，阻挡同步光及其产生的辐射进入光学棚屋。由于 SS1 不能直接承受同步光的照射，在关闭 SS1 之前，必须先关光子光闸 PS2，其开关控制过程如图 4-20 所示。若 SS1 在规定时间内不能关闭，则给出报警信号。由于 SS1 只有在光学棚屋门关闭后，且光学棚屋内的急停和联锁控制箱上的紧停按钮无效（没有被按下）时才能打开 SS1。

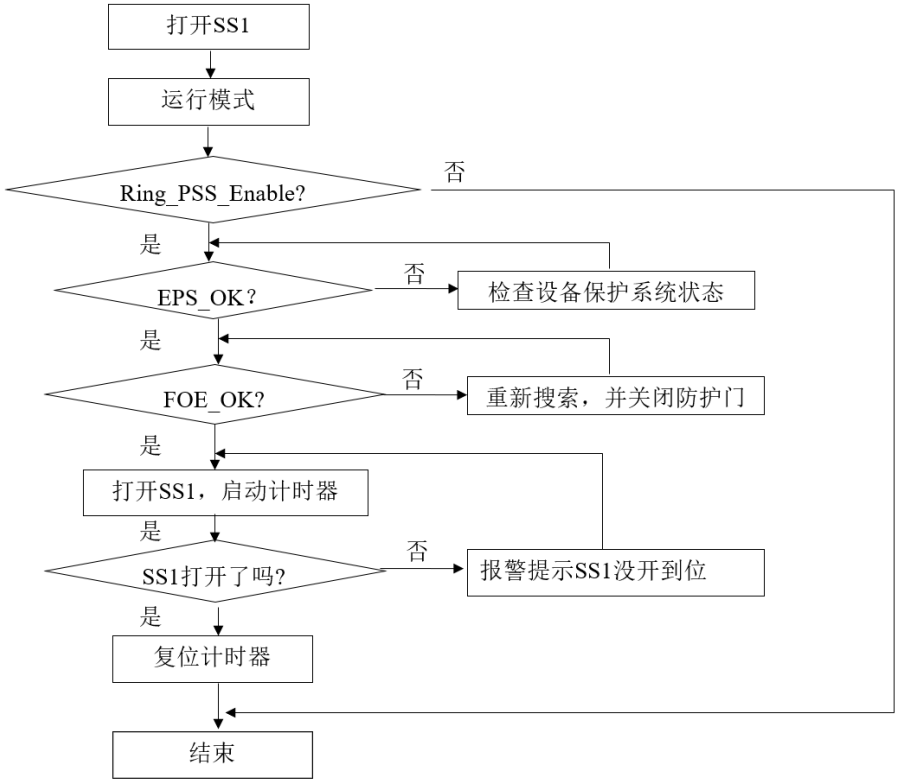


图 4-20 打开安全光闸 1（SS1）的流程图

- 安全光闸 SS2 的开关：安全光闸 SS2 是为控制进入实验棚屋的同步光及其产生的辐射而设。在用光过程中，若 PS2、SS1 已开启，SS2 的开关只需两组信号到位即可。
- 防护门的开关：防护门的开关必须严格遵守操作规程，必须在关闭光闸（SS2 或 SS1 和 PS2）后才能开门。准备引入同步光前关闭防护门的控制流程如图 4-21 所示，只有在关门按钮中的绿灯亮后按下才能关门，门关到位后绿灯灭。
- 声光报警：声光报警是用于棚屋安全搜索时产生提醒信号，让人员离开棚屋，有连续的提示声光、断续的提示音和闪烁光，提示频率不同以示区别。
- 警示灯控制：主要用于提醒该棚屋内是否引入同步光，引入同步光后，红色灯亮；门开后警示灯为绿色，黄色灯意味着准备引入同步光；采用不同频率的闪光灯以提醒实验人员的注意。

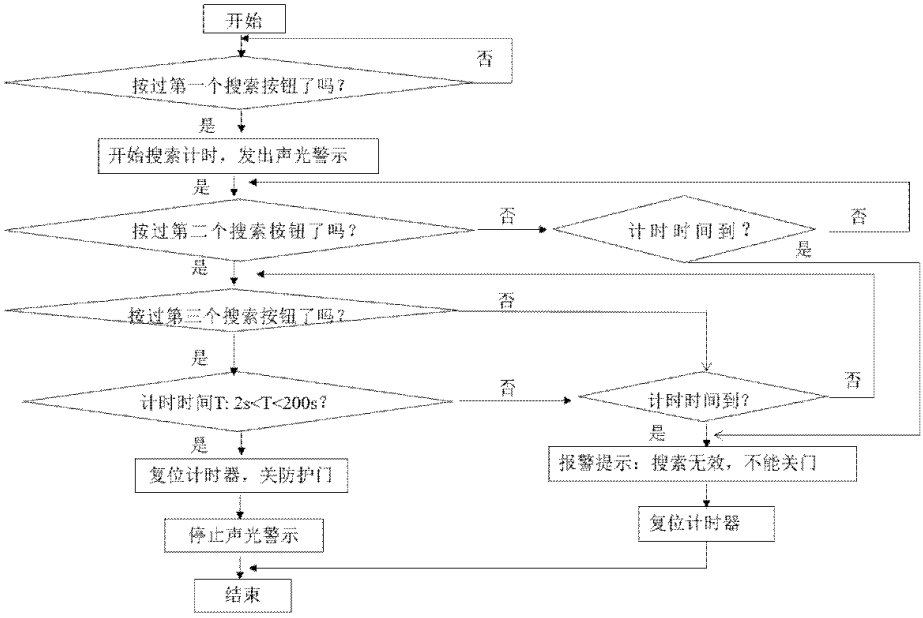


图 4-21 光源光束线搜索、关闭防护门的流程图

4.1.3.2.4 棚屋搜索及清场路线图

为了确保光束线站的人身安全，设置棚屋搜索功能，要求在关闭棚屋门之前进行规定时间内、规定路径的巡视检查并确认的操作程序。同时提供急停按钮，用于紧急情况下的关闭光闸，确保人员不会受到辐射伤害。在防护门和光闸的开关控制上，严格执行不关闭光闸不能开门，不关好防护门不能打开光闸的操作程序。为了更好地实现光束线站的人身安全联锁，系统还将给出状态显示和声光提醒，方便实验人员操作使用。

每个搜索箱配备搜索按钮、取消搜索按钮和急停按钮，若搜索箱附近有气动门，则配备开门按钮。清场路线为顺时针方向，按照清场路线示意图指示方向依次按动搜索按钮（如 S1→S2→S3），将整个棚屋搜索完即为清场完成。

D1 能源膜材料软共振专用线站光束线有 2 个光学棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋 1 和光学棚屋 2，光学棚屋 1 末端配置安全光闸 SS2。

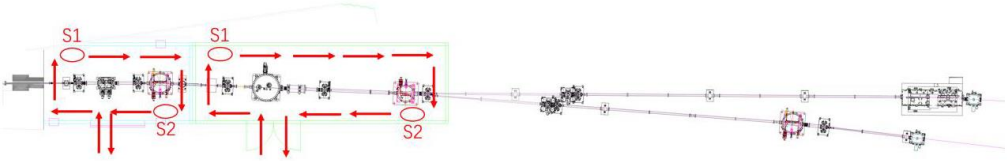


图 4-22 D1 能源膜材料软共振专用线站清场路线图

D2 能源膜材料散射专用线站光束线有 2 个光学棚屋和 1 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋 1，光学棚屋 2，实验棚屋 1。光学棚屋 1 末端配置一个安全光闸 SS2。

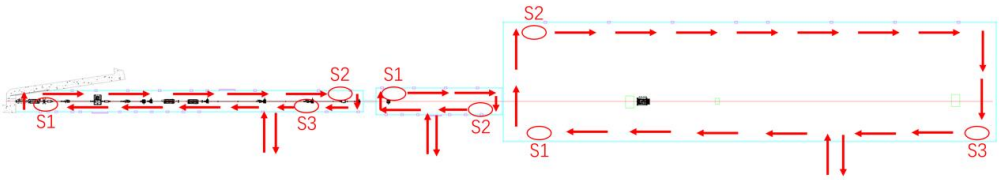


图 4-23 D2 能源膜材料散射专用线站清场路线图

D3 固态电池材料专用线站光束线有 1 个光学棚屋和 2 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋，实验棚屋 1，实验棚屋 2。光学棚屋末端配置一个安全光闸 SS2。

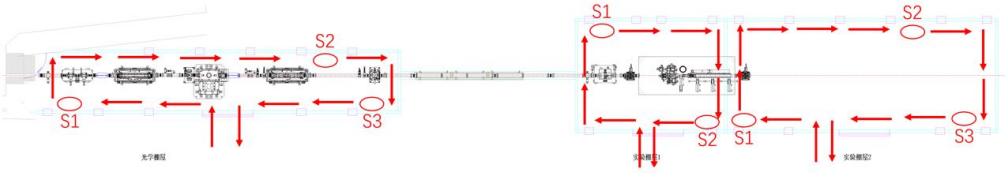


图 4-24　D3 固态电池材料专用线站清场路线图

D4 X 射线吸收谱学线站光束线有 1 个光学棚屋和 1 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋和实验棚屋。光学棚屋末端配置一个安全光闸 SS2。

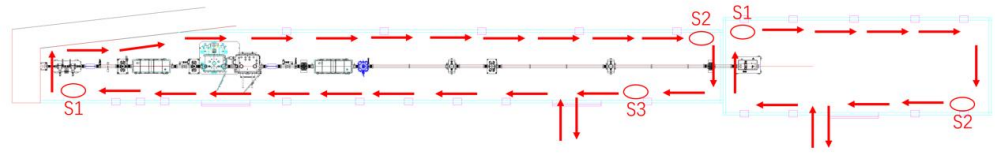


图 4-25　D4 X 射线吸收谱学线站清场路线图

D5 软 X 光电子能谱线站光束线有 2 个光学棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋 1，光学棚屋 2。光学棚屋 1 末端配置安全光闸 SS2。

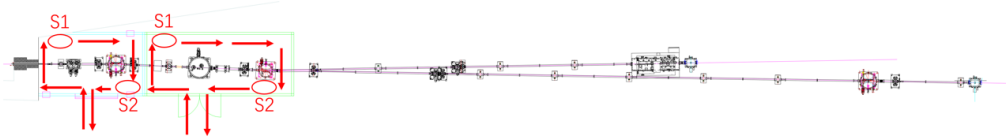


图 4-26 D5 软 X 光电子能谱线站清场路线图

D6 原位表面衍射线站光束线有 1 个光学棚屋和 2 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋，实验棚屋 1，实验棚屋 2。光学棚屋末端配置一个安全光闸 SS2。

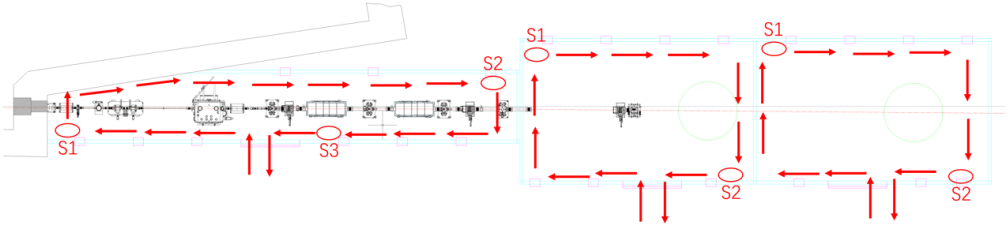


图 4-27 D6 原位表面衍射线站清场路线图

D7 高能散射专用线站光束线有 3 个光学棚屋和 3 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋 1，光学棚屋 2，实验棚屋 1，实验棚屋 2，光学棚屋 3，实验棚屋 3。每个棚屋都配置一个安全光闸，因此整条光束线共设置 6 个安全光闸。

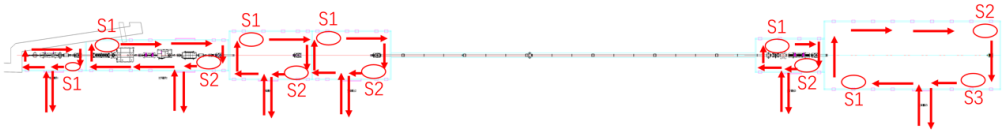


图 4-28　D7 高能散射专用线站清场路线图

D8 动态成像专用线站光束线有 4 个光学棚屋和 4 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋 1，光学棚屋 2，光学棚屋 3，实验棚屋 1，实验棚屋 2，光学棚屋 4，实验棚屋 3，实验棚屋 4。其中光学棚屋 1，光学棚屋 2，实验棚屋 1，实验棚屋

2，光学棚屋 4，实验棚屋 4 都配置一个安全光闸，因此整条光束线共设置 7 个安全光闸。



图 4-29　D8 动态成像专用线站清场路线图

D9 纤维材料专用线站光束线有 2 个光学棚屋和 1 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋 1，光学棚屋 2，实验棚屋 1。光学棚屋 1 末端配置一个安全光闸 SS2。

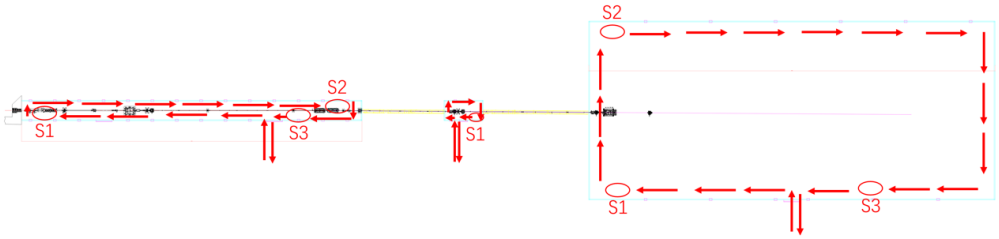


图 4-30　D9 纤维材料专用线站清场路线图

D10 原位纳米探针线站光束线有 3 个光学棚屋和 1 个实验棚屋，其棚屋结构示意图及清场路线图如下图所示。从图中可以看出，沿光束线方向依次为光学棚屋 1，光学棚屋 2，光学棚屋 3，实验棚屋 1。光学棚屋 3 末端配置一个安全光闸 SS2。



图 4-31　D10 原位纳米探针线站清场路线图

4.1.3.2.5　设备数量统计表

人身安全保护系统主要外部设备有急停按钮、搜索按钮、手动门、气动门、红外移动传感器、声光报警灯等，具体的设备数量如下表所示。

表 4-5 光源各线站人身安全保护系统设备数量统计表

区域	D1 能源膜材料软共振专用线站	D2 能源膜材料散射专用线站	D3 固态电池材料专用线站	D4 X 射线吸收谱学线站	D5 软 X 光电子能谱线站	D6 原位表面衍射线站	D7 高能散射专用线站	D8 动态成像专用线站	D9 纤维材料专用线站	D10 原位纳米探针线站
急停按钮	7	12	12	8	7	12	21	25	11	11
搜索按钮	4	8	8	5	4	7	12	15	7	6
手动门	2	5	3	3	2	3	7	8	5	5
气动门	2	5	3	3	2	3	7	8	5	5
红外移动传感器	4	10	6	6	4	6	14	16	10	10
声光报警灯	6	10	10	7	6	9	14	18	9	8

4.1.4 辐射监测系统

辐射监测系统主要介绍系统架构及固定式辐射监测系统。

4.1.4.1 系统架构

辐射监测系统主要由在线的场所监测系统组成，具体构成见下图。在线的场所监测系统主要包括固定式区域辐射监测。区域辐射监测配备固定式探测器，可实时监测γ及中子剂量。

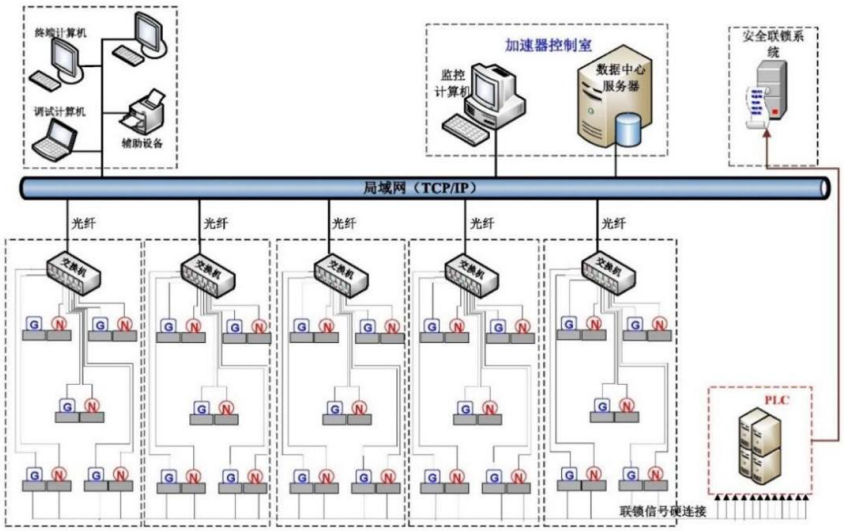


图 4-32 光源辐射监测系统构成示意图

4.1.4.2 固定式辐射监测系统

固定辐射监测系统用于监测工作人员常居留区域的周围剂量当量率。根据电子加速器辐射场的特征要求，必须配置γ射线和中子监测仪。固定辐射监测点位主要布置在直线加速器隧道、增强器-储存环隧道迷道出入口、环外站厅人员常驻区域、中央控制室及相关束损重点关注点区域，包括直线废束桶、低能传输线、高能传输线、储存环注入点重点束损关注点及光束线白光狭缝韧致辐射打靶位置等区域。考虑到直线加速器隧道首先设备安装和出束调试，不影响增强器-储存环隧道设备安装，所以在直线末端墙外及增强器-储存环隧道临时设置两个点位，保证增强器-储存环隧道工作人员辐射安全。光源辐射工作场所监测点位见图 4-33。

表 4-6 光源区域辐射监测设备数量表

序号	监测设备	数量
1	区域γ监测	29 台
2	区域中子监测	29 台

表 4-7 光源区域辐射监测仪参数

探测类型	γ探测器	中子探测器
探测器类型	电离室	He-3 正比计数器
能量范围	50 keV ~7 MeV	0.025 eV~15 MeV
测量范围	0.1 μSv/h ~ 1 mSv/h	0.01 μSv/h ~ 10 mSv/h
灵敏度	--	> 1 cps/(μSv/h)
能量响应	<25%	<20%
相对误差	< 20%	<20%

表 4-8 光源区域辐射监测仪数据采集器功能

功能	详细内容
本地显示	本地实时显示剂量率值、累积剂量，以及日期和时间等；
	显示仪器 IP 地址、端口号等；
	显示仪器本地报警记录；
本地报警	监测仪本地能够实现剂量率超阈值时的声音报警功能、灯光报警和 LCD 画面显示报警；
	自检或运行中设备出现故障时有故障指示；
输出接口	继电器信号输出：剂量率和累积剂量（如 4 个小时累积剂量）超阈值时的报警信号以继电器信号输出；
	仪器异常、断电等情况继电器信号输出；
	支持 NC/NO；
通讯方式	10/100Mb/s 以太网；
参数设置	IP 地址、端口号、日期和时间等信息；
	剂量率：高报警 a 阈值、预报警 b 阈值；
	累积剂量：长累积时间（1~8h）、短累积时间（1~8h）、长累积和短累积报警阈值；
数据存储	剂量率、长累积剂量每 10 秒钟的数据，仪器本地至少能够存储 90 天的历史监测数据，断电后数据不丢失；

注：a：高报警为继电器输出报警，同时本地声音报警、灯光报警和 LCD 画面显示报警；

b：预报警仅有本地声音报警、灯光报警和 LCD 画面显示报警。

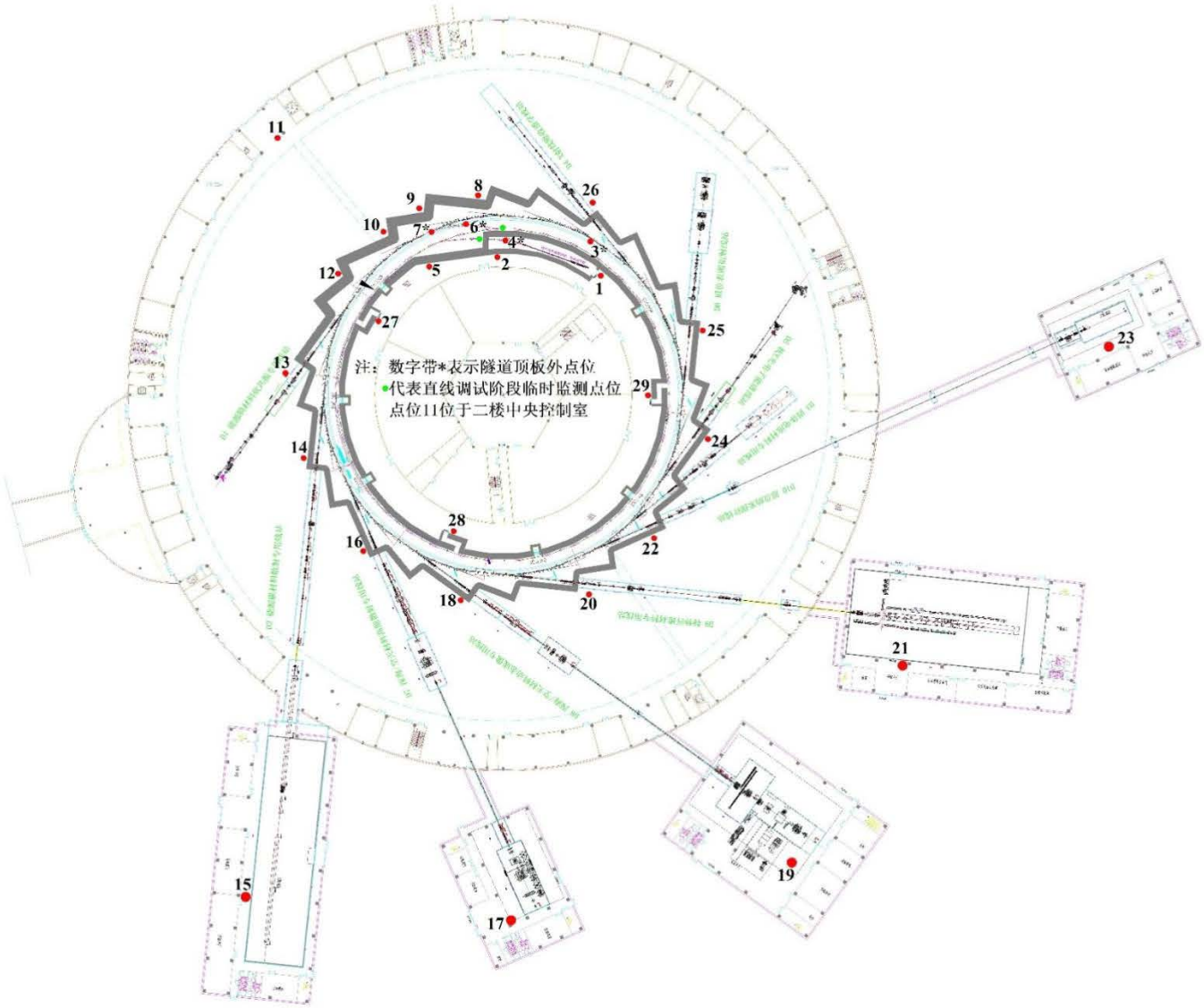


图 4-33 光源辐射工作场所监测点位布局图

4.1.5 通风系统

光源辐射工作场所设置有通风系统，送风和排风参数见表 4-9。排风量大于送风量，可保持隧道内负压，防止活化空气等有害气体泄漏到周围环境。排风管道经隧道屏蔽墙上的风管孔迷宫（见图 4-4、图 4-5），将收集的废气引至微观楼屋面，经过滤后排至外环境，排风口高度距离地面约 15 米。通风管道路由见图 4-34，涉放排风口位置见图 4-35。

表 4-9 光源通风系统参数表

区域	体积，m^3	隧道工况	换气次数，次/小时	排风量，m^3/h	送风量，m^3/h
增强器-储存环隧道	6703	正常运行	0.5	3600	/
		停机/应急事故	4	36600	29000
直线加速器隧道	300	正常运行	0.5	360	/
		停机/应急事故	4	2100	1800

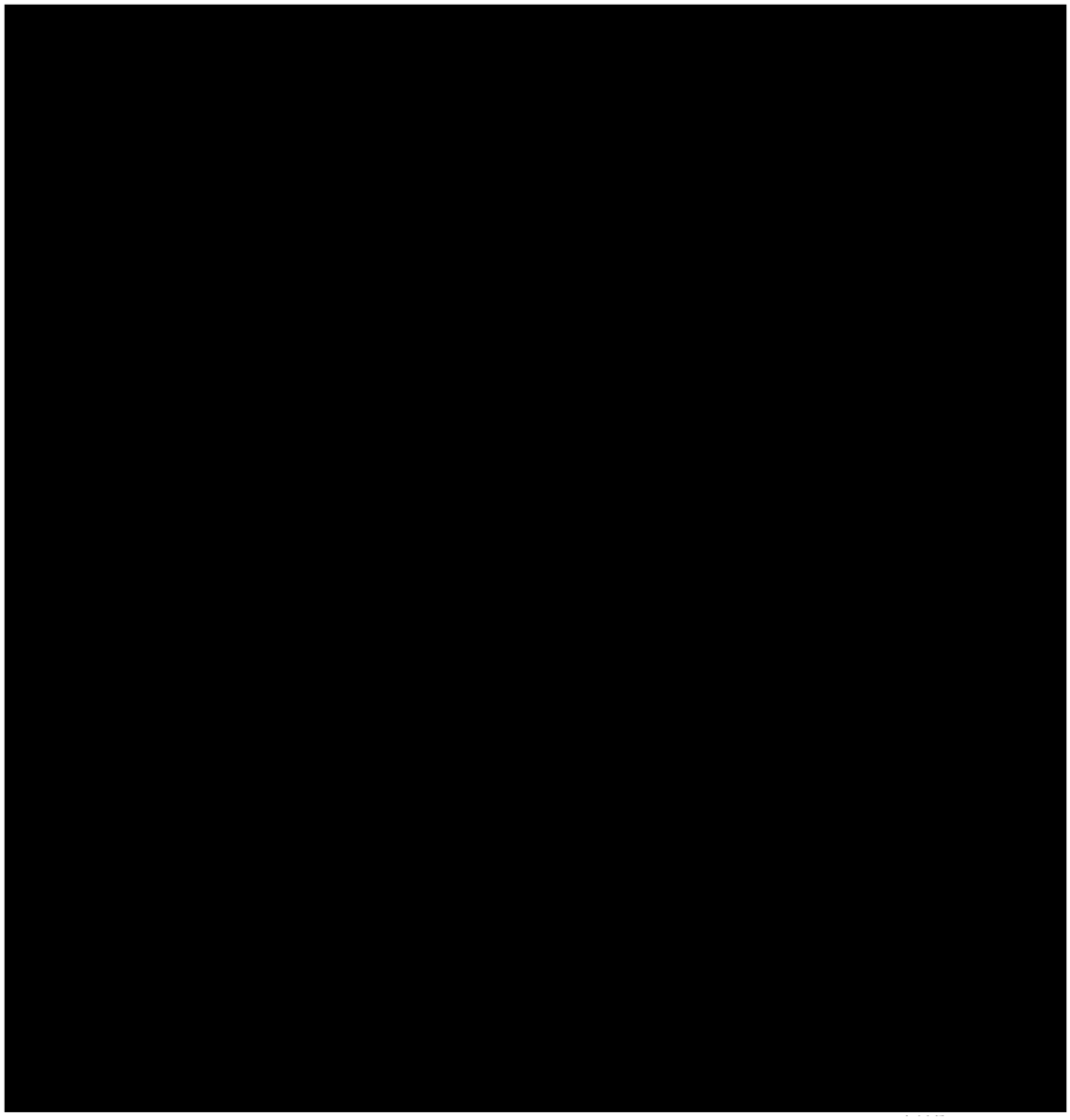


图 4-34 光源加速器隧道排风路由示意图

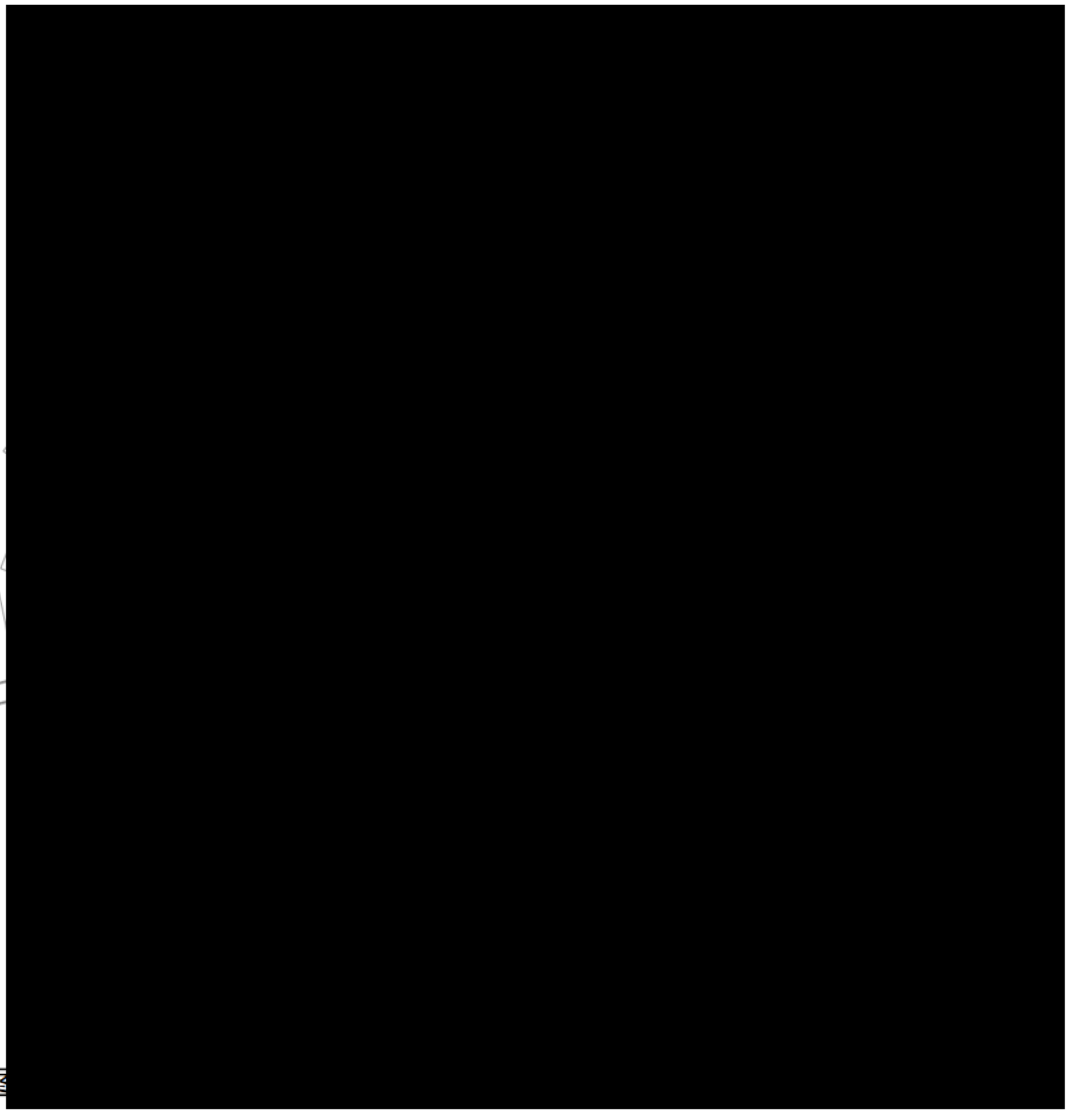


图 4-35 光源加速器隧道屋面排风口位置示意图

4.1.6 三废的治理

4.1.6.1 活化空气及其处理措施

光源运行期间在直线加速器隧道、增强器-储存环隧道区域可能产生感生放射性气体，空气中活化产物主要考虑^{11}C（$T_{1/2}[^{11}C]$=20.39min）、^{13}N

（$T_{1/2}[^{13}N]$=9.965min）、^{15}O（$T_{1/2}[^{15}O]$=2.037min）这三种核素。根据第三章的计算结果，核素的最大动态饱和活度浓度在10^{-1} Bq/cm^{3}量级，年总排放量为1.87E+12Bq。

光源装置按其内部不同功能区域，分别为直线加速器隧道及增强器-储存环隧道区域设置送、排风系统。送风口在区域内均匀布设；区域设置负压排风系统，排风系统根据装置的实际运行情况分为正常运行排风、停机/应急事故排风两种，两类型排风共用排风管道，排风管道末端分别设置正常运行及停机/应急事故两套风机，区域排风经过风机抽排后排放。排风口高度距离地面 15 米。

4.1.6.2 放射性废液及其处理措施

光源正常运行期间不产生放射性废液，仅可能在检修或发生冷却水泄漏事故时排出一定量的活化冷却水。由于加速器所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素除 ^{3}H、^{7}Be 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。根据第三章的计算结果，光源活化冷却水的总饱和活度为 1.11E+07Bq。在光源装置冷却水系统内，活化冷却水的总量约为 150m^3，则光源活化冷却水的饱和活度浓度为 7.41E+04Bq/ m^3。

光源装置为排放的活化冷却水设置专用的冷却水暂存池，用于收集、暂存因检修或发生冷却水泄漏事故时排出的活化冷却水。活化冷却水经过工作场所内的废水收集沟排至冷却水暂存池内。冷却水暂存池周围将设置隔离措施和电离辐射警告标志，提醒无关人员远离。冷却水暂存池预留检修口和取样口，排放前必须进行取样测量，满足相关放射性废水排放标准，经审管部门认可后方可排放。工作人员定期记录冷却水暂存池运行状态，包括进水时间、排放时间、排放量等。

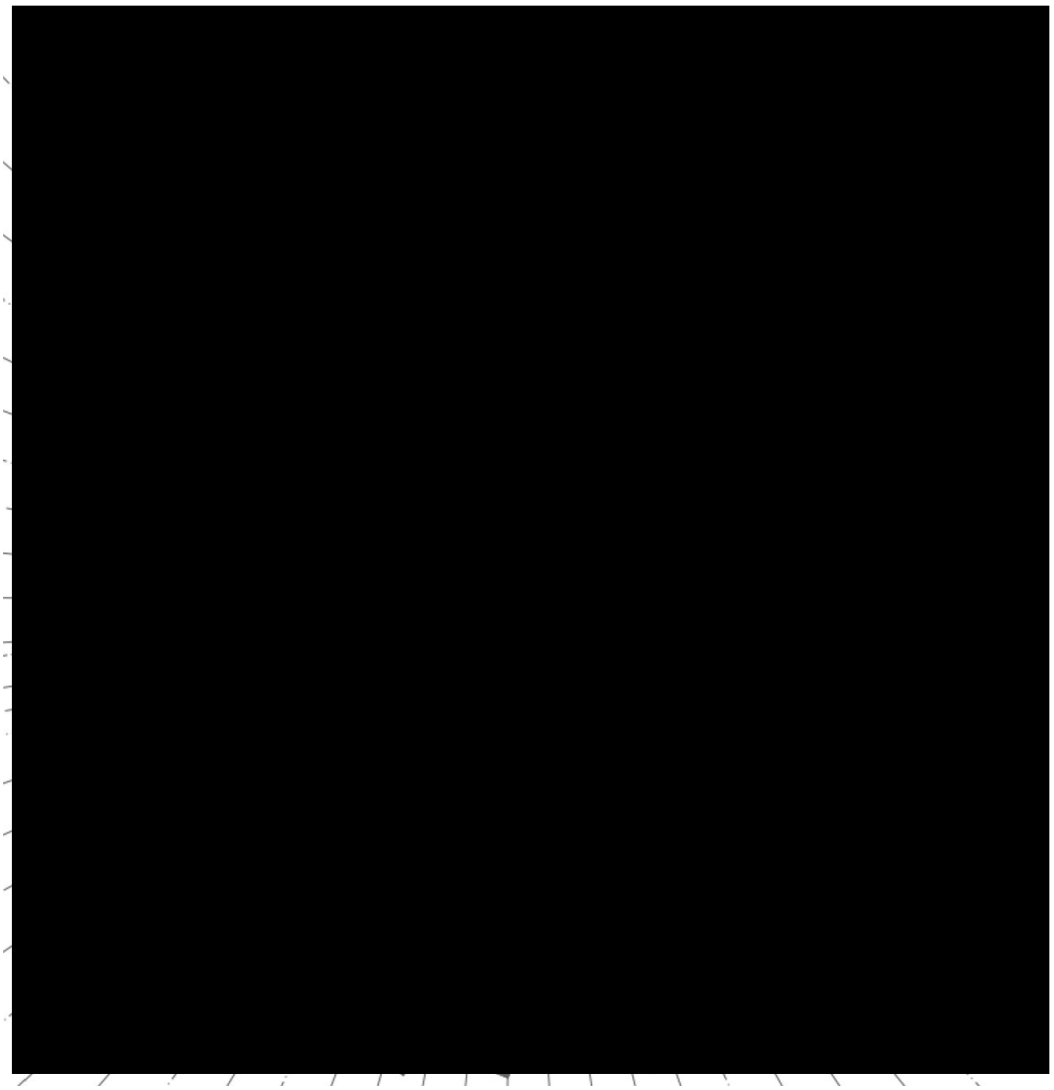


图 4-36 光源涉放废水收集及暂存位置示意图

4.1.6.3 放射性固体废物及其处理措施

光源运行期间可能产生的放射性固废主要包括：束测靶体设备，1 套/年，体积 155mm*240mm*850mm，重量 30kg；冷却水系统废树脂，最多约 750kg/年；通风系统废滤芯，最多约 500kg/年。

光源装置在隧道内划定若干个专门的区域设置为放射性固废暂存区，采取实体屏障进行物理隔离，并设置废物桶，满足不同放射性废物储存要求。放射性固废暂存区、废物桶设置电离辐射警告标识和中文警示说明。废物桶采取双人双锁的管

理模式。建立放射性固体废物台账，记录废物名称、数量、表面和 1m 处γ剂量率、监测日期、去向等相关信息。

建设单位根据放射性固体废物的暂存情况定期委托有资质的单位对其进行测量分析，满足解控要求的放射性固体废物可回收后重复利用或作为非放射性固体废物处理，不能满足解控要求的放射性固体废物最终送交有资质单位收贮。

4.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

4.2.1 场所布局与分区

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的规定，应将辐射工作场所分为控制区和监督区。控制区是指需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域；监督区是指通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。本区域辐射工作场所分区见图 4-37 和图 4-38，具体描述如下：

（1） 控制区：ECR 离子源、同步加速器大厅、21#终端、51#终端、质子/氦离子加速器大厅、电子加速器大厅、质子电子终端和材料辐照终端；

（2） 监督区：上述控制区屏蔽墙体外四周紧邻的场所，包括中央控制室、51#终端运行控制室、实验控制间、21#终端运行控制室、测试间、预留终端、设备间、实验准备室、工艺控制设备间、运维工具间、通道、排风机房、工艺控制设备间等。

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

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。



图 4-37 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块地上一层辐射工作场所分区



图 4-38 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块地上二层辐射工作场所分区

4.2.2 辐射屏蔽

辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块终端区域屏蔽设计如表 4-10、图 4-39 和图 4-40 所示。

表 4-10 4.2辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块屏蔽设计方案

辐射工作场所	方位	屏蔽材料及厚度	周围环境
ECR 离子源	北侧	1.2m 混凝土	质子/氦离子加速器大厅
	南侧	0.8m 混凝土	通道
	迷道内墙	0.8m 混凝土	通道
	迷道外墙	0.8m 混凝土	通道
	防护门	3mm Pb 当量	通道
	西侧	0.8m 混凝土	ECR 设备间
	东侧	1.2m 混凝土	直线加速器隧道
	顶板	0.8m 混凝土	二层过道、上人屋面、高频设备间及工艺控制设备间
	底板	1.0m 混凝土	土层
直线加速器隧道	北侧	1.8m 混凝土	21#低能离子辐照终端
	南侧	1.8m 混凝土	控制设备间 1、控制设备间 2
	迷道内墙	1.2m 混凝土	通道
	迷道外墙	1.2m 混凝土	
	迷道西墙	1.2m 混凝土	
	迷道东墙	0.8m 混凝土	
	防护门	1cm 聚乙烯	
	西侧	1.2m 混凝土	ECR 离子源
	东侧	/	注入线以及同步加速器大厅
	顶板	1.8m 混凝土	二层高频设备间、工艺空调机房、直线电源间、终端电源间（21#、22#、23#）及工艺控制设备间 4
	底板	1.0m 混凝土	土层
同步加速器大厅、高能线加速器隧道	北侧	2.3m 混凝土	预留终端
		3.1m 混凝土	工艺控制设备间 1、束诊洁净间及设备运转大厅等
	迷道 1	2.3m 混凝土	设备运转大厅
	迷道 2	2.3m 混凝土	
	防护门	1cm 聚乙烯	
	南侧	3.3m 混凝土	冷却水站
		5.1m 混凝土	工艺空调机房
		2.4m 混凝土	预留终端
	西侧	4m 混凝土	控制设备间 2、管线夹层、通道

辐射工作场所	方位	屏蔽材料及厚度	周围环境
		4.6m 混凝土	预留终端
	东侧	5.8 m 混凝土	室外
	顶板	3.2m 混凝土	二层直线电源间、终端电源间（21#、22#、23#）、UPS 间 2、工艺控制设备间 5、电源备品间、设备转运吊装平台、工艺高低压配电室、工艺空调机房、KC 电源间、同步环电源间及室外屋面
	底板	1.0m 混凝土	土层
21#低能离子辐照终端	北侧	1.8m 混凝土	通道
	南侧	1.8m 混凝土	直线加速器隧道
	迷道内墙	1.5m 混凝土	通道
		1.2m 混凝土	
	迷道外墙	1.5m 混凝土	
	防护门	1cm 聚乙烯	
	西侧	1.5m 混凝土	质子/氦离子加速器大厅
		1.8m 混凝土	质子电子终端
	东侧	1.8m 混凝土	预留终端
	顶板	1.8m 混凝土	二层开放式实验室、走道、开放讨论区、茶水间、工具间 3MV 工艺气瓶间/串列气瓶间、高频备件间、高频设备间、气瓶间及工艺空调机房
	底板	1m 混凝土	土层
51#单粒子效应研究终端	北侧	5.5m 混凝土	通道
	南侧	2.2m 混凝土	高能线加速器隧道
	迷道内墙	1.6~2.7m 混凝土	通道
	迷道外墙	0.8m 混凝土	通道
	防护门	1cm 聚乙烯	通道
	西侧	6.0m 混凝土	预留终端
	东侧	0.8m~1.8m 混凝土	管线夹层
	顶板	3.5m 混凝土	二层工艺涉放排风机房 2、高能线及终端电源间(51#、52#、53#、54#)
	底板	1.6m 混凝土	土层
质子/氦离子加速器大厅	北侧	1.0m 混凝土	质子电子终端
	南侧	1.2m 混凝土	ECR 离子源
	防护门	3mmPb 当量	通道
	西侧	0.9m~1.5m 混凝土	电子加速器大厅、质子电子终端
	东侧	1.5m 混凝土	21#低能离子辐照终端
	顶板	1.8m 混凝土	二层 3MV 工艺气瓶间/串列气瓶间、走道及高频设备间
	底板	1.0m 混凝土	土层

辐射工作场所	方位	屏蔽材料及厚度	周围环境
电子加速器大厅	北侧	1.0m 混凝土	质子电子终端
	南侧	1.0m 混凝土	通道
	迷道内墙	1.0m 混凝土	
	迷道外墙	1.0m 混凝土	
	防护门	3mmPb 当量	通道
	西侧	1.0m 混凝土	材料辐照终端、质子电子终端
	东侧	0.9m 混凝土	质子/氢离子加速器大厅
	顶板	1.8m 混凝土	二层 3MV 工艺气瓶间/串列气瓶间、工艺空调机房、工艺涉放排风机房 1
	底板	1.0m 混凝土	土层
质子电子终端	北侧	1.8m 混凝土	过道
	南侧	1.0m 混凝土	质子、电子加速器大厅
		1.2 m 混凝土	材料辐照终端
	迷道内墙	1.5 m 混凝土	通道
	迷道外墙	1.2 m 混凝土	通道
	防护门	3mmPb 当量	通道
	西侧	2.0m 混凝土	
	东侧	1.8m 混凝土	21#低能离子辐照终端
	顶板	1.8m 混凝土	二层过厅、开放式实验室、走道、工艺空调机房、质子/电子/串列加速器配电间、3MV 工艺气瓶间/串列气瓶间
	底板	1.0m 混凝土	土层
材料辐照终端	北侧	1.2 m 混凝土	质子电子终端
	南侧	1.8m 混凝土	通道
	迷道内墙	1.5 m 混凝土	
	迷道外墙	1.2 m 混凝土	
	防护门	3mmPb 当量	
	西侧	2.0m 混凝土	通道
	东侧	1.0m 混凝土	电子加速器大厅
	顶板	1.8m 混凝土	二层质子/电子/串列加速器配电间、工艺空调机房、走道、工艺涉放排风机房 1
	底板	1.0m 混凝土	土层
备注：混凝土密度为不小于 2.3g/cm³，Pb 密度为不小于 11.3g/cm³，聚乙烯不小于 0.94g/cm³			



图 4-39 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块屏蔽设计示意图（四周墙体）



图 4-40 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块屏蔽设计示意图（顶板、底板）

4.2.3 人身安全联锁系统

4.2.3.1 设计原则

人身安全联锁系统的设计原则如下：

（1）分区联锁：分区域设计联锁。按工艺要求，在束流上游区域有束流时，可以允许束流下游区域人员进入工作；利用“束流闸”保证束流不会被送到有人区域。

（2）实现控制区内防护门与区域内辐射剂量的双重联锁，即某一区域有束流时，工作人员不能进入该区域；而在某一区域有人时，束流不能被送到相应区域。此外，辐射监测信号也将作为安全联锁信号，当区域辐射剂量超过所设阈值时即便在无束流的状

态也不允许人员进入，保障工作人员安全。

（3）最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是机器的最初始的运行功能，更好的保证在后级区域的辐射安全。

（4）失效保护：关键联锁部件采用失效保护设计，设备故障时联锁系统处于安全状态。

4.2.3.2 组成部分

人身安全联锁系统主要由 PLC 逻辑控制、束流控制设备、人员出入管理设备及其他安全联锁设施等部分组成，图 4-41 给出了结构示意图。图 4-42 给出了联锁分区图。

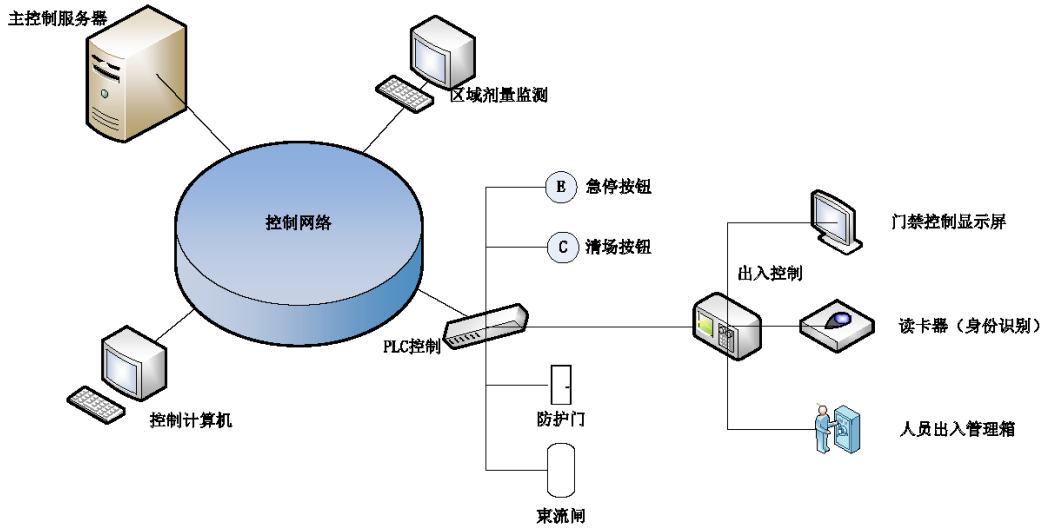


图 4-41 人身安全联锁系统结构示意图



图 4-42 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块联锁分区图

人身安全联锁系统各部分的主要功能如下：

（1）主控制服务器及软件

主控制服务器及其软件是人身安全联锁系统的核心，其将各子系统有机联系起来。它不但是一个管理平台，同时它还构成了系统信息交换平台，通过对各子系统相关信息的采集和分析来完成系统信息管理工作，实现平台的核心功能。

（2）PLC 逻辑控制

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将加速器束流闸、通道门、区域剂量及紧急停机按钮等设施或信号进行联锁，规定了人身安全联锁各子系统的联锁逻辑关系，并在联锁动作发生时执行这些联锁关系，以此来保障加速器的安全运行及工作人员的人身安全。各个子 PLC 逻辑控制系统能够独立运行，对各安全联锁设施进行最底层的操作且具有最高优先权。当一个子系统发生问题时，不影响其他子系统。

（3）人员出入管理系统

ECR 离子源大厅、加速器大厅及各终端防护门入口处设置人员出入管理系统。当有工作人员需要进入辐射区时，须由防护值班人员对人员出入管理系统进行主权限授权后，工作人员才可在人员出入管理系统处进行权限验证（刷卡或人脸识别），验证通过后打开防护门，人员进入后防护门自动关闭。

（4）急停按钮及清场按钮

急停按钮及清场按钮均匀分布于加速器大厅或终端内，同时在控制室设有控制盒。

急停按钮用于紧急情况中断束流，当有人员误留辐射区时，可按下区域内的任一急停按钮来中断该区域的束流。

清场按钮主要用于清场操作。清场操作是指在工作人员在某一区域内按照规定的顺序依次按下清场按钮、确保区域内无人员逗留后，关闭通道门的操作。

（5）束流控制设施

根据“硬件最可靠”这一联锁原则，每个辐射分区前都有一个束流闸，其主要作用是防止误操作导致束流进入下游区域。束流闸只有在下游的联锁逻辑符合条件时才可打开，束流方可进入下游区域。

根据“硬件最可靠”这一联锁原则，每个辐射分区前都有束流控制措施（束流闸或高压联锁），其主要作用是防止误操作导致束流进入下游区域。束流闸或高压联锁只有在下游的联锁逻辑符合条件时才可打开，束流方可进入下游区域。

对 ECR 离子源大厅、电子加速器大厅和质子/氦离子加速器大厅，联锁系统通过与装置高压联锁来实现对束流的控制；对加速器大厅、21#低能离子辐照终端、51#单粒子效应研究终端、质子电子终端、材料辐照终端，联锁系统通过束流闸来实现对束流的控制。束流控制设施的分布见图 4-43。



图 4-43 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块束流控制设施分布及其对应的联锁分区

（6）门机联锁及紧急开门

ECR 离子源大厅、加速器大厅及各终端防护门都设有位置开关，门开关状态在中控室联锁软件中实时显示。防护门处于打开状态时，加速器大厅无法供束。出束期间打开防护门，则会触发人身安全联锁系统，切断联锁子区束流。

各防护门都设有红外防夹功能，并且为预防紧急情况下无法开门，在防护门内侧设置了紧急开门按钮，按下后可无条件开门。

（7）声光警示灯

在按下清场按钮后对应声光报警灯（与清场按钮放置位置相同）发出声光警示，提醒加速器联锁区域内人员离开该区域。

（8）工作状态指示装置

各控制区防护门上均有电离辐射警告标志，加速器大厅入口处及各终端入口处均有运行状态显示屏，可直观、明显地显示加速器的工作状态。

加速器各联锁设备分布如图 4-44 所示。



图 4-44　辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块联锁设备位置示意图

表 4-11辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块联锁系统组件数量及分布

联锁组件	离子源区域	加速器大厅	21#终端	51#终端	质子/氦离子加速器大厅	电子加速器大厅	质子电子终端	材料辐照终端	总计
防护门及门机联锁	1	2	1	1	1	1	1	1	9
清场按钮	3	11	3	2	2	2	3	2	28
急停按钮	3	11	3	2	2	2	3	2	28
声光警示灯	3	11	3	2	2	2	3	2	28
工作状态指示装置	1	2	1	1	1	1	1	1	9
束流闸	1	3	\	\	1	1	2	\	8
出入控制系统	1	2	1	1	1	1	1	1	9
中控室控制盒	\	\	\	\	\	\	\	\	1
终端控制盒	\	\	\	\	\	\	\	\	4
紧急开门	1	2	1	1	1	1	1	1	9
备注：1.中控室控制盒位于中央控制室，包括 1 个急停按钮； 2. 终端控制盒分别位于 51#终端运行控制室、21#运行控制室和实验准备间 2，每个中控室控制盒包括 1 个急停按钮。									

4.2.3.3 联锁逻辑

人身安全联锁系统将各区域的急停按钮、清场按钮、通道门开关状态、出入管理设备状态、中控室区域控制盒等联系在一起，建立了完整的联锁逻辑。在出束过程中，任一联锁条件的改变都会触发联锁切断束流，以保障人员免受束流误照射。

联锁分区及束流控制设施的关系示意见图 4-45，根据束流产生的先后顺序将各联锁分区从左到右排列。

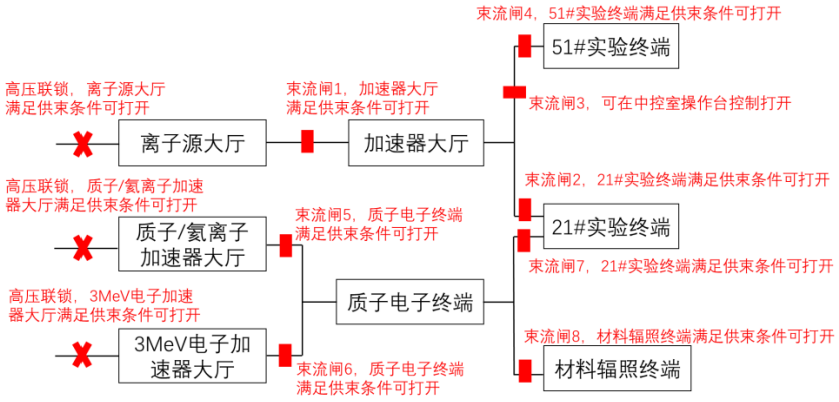


图 4-45 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块联锁分区及束流控制设施关系示意图

（1）加速器区域联锁逻辑

离子源大厅、同步加速器大厅、质子/氦离子加速器大厅和电子加速器大厅的联锁控制逻辑如图 4-46 所示。

1）允许供束控制逻辑

必须同时满足以下条件后，才可在中控室控制盒最终授权，打开联锁分区对应的束流闸或高压联锁，允许相应的联锁分区出束：

① 区域所有急停按钮复位；

② 区域所有清场按钮按下；

③ 辐射区通道门关闭；

④ 出入管理设备复位。

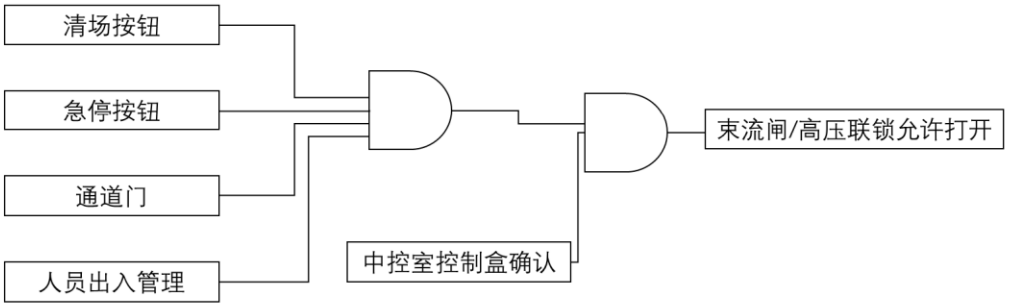


图 4-46 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块人身安全联锁系统控制逻辑

2）中断出束的安全联锁逻辑

在出束过程中，联锁分区内任一联锁条件被破坏，均关闭对应的束流闸或切断高压，从而中断束流。要恢复供束，必须重新进行相应操作，使联锁系统满足允许供束的逻辑。其中“急停按钮被按下”、“通道门打开”，均会破坏区域内的清场信号，恢复供束前必须重新清场，以确保无人员滞留辐射区。

发生以下任一情况，均会立即切断高压或关闭束流闸，从而中断束流：

① 区域任一急停按钮被按下；

② 能够进入该区域的任一通道门打开；

③ 通道门外的人员出入管理系统被启用；

④ 中控室区域控制盒取消区域授权。

（2）终端区域联锁逻辑

21#终端、51#终端、质子电子终端和材料终端的联锁控制逻辑如下图所示。

1）允许供束控制逻辑

必须同时满足以下条件后，才可在终端控制盒最终授权，打开联锁分区对应的束流闸，允许相应的联锁分区出束：

① 区域所有急停按钮复位；

② 区域所有清场按钮按下；

③ 辐射区通道门关闭；

④ 出入管理设备复位；

⑤ 中控室区域确认。

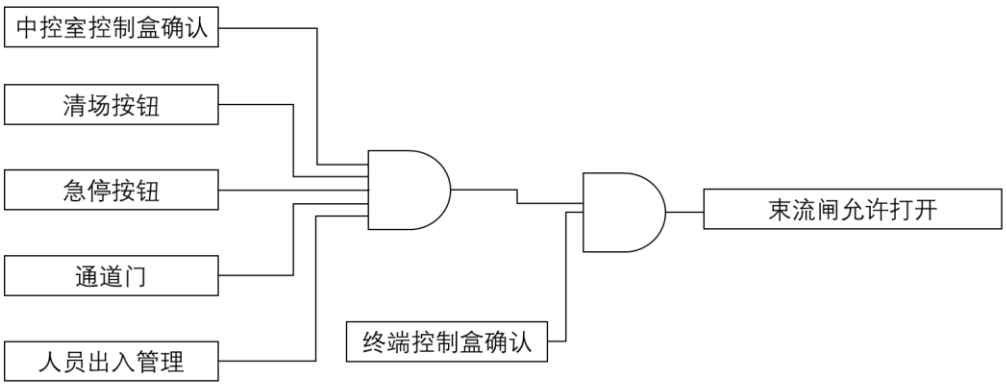


图 4-47 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块人身安全联锁系统控制逻辑

2）中断出束的安全联锁逻辑

在出束过程中，联锁分区内任一联锁条件被破坏，均关闭对应的束流闸，从而中断束流。要恢复供束，必须重新进行相应操作，使联锁系统满足允许供束的逻辑。其中“急停按钮被按下”、“通道门打开”，均会破坏区域内的清场信号，恢复供束前必须重新清场，以确保无人员滞留辐射区。

发生以下任一情况，均会立即切断高压或关闭束流闸，从而中断束流：

① 区域任一急停按钮被按下；

② 能够进入该区域的任一通道门打开；

③ 通道门外的人员出入管理系统被启用；

④ 中控室控制盒取消区域授权；

⑤ 终端控制盒取消区域授权。

4.2.3.4 联锁系统工作流程

（1） 加速器区域供束前恢复联锁及人员进入流程

加速器区域在供束前，需开展以下操作恢复联锁：

1) 首先由防护值班人员检查该区域所有急停按钮是否复位；

2) 所有急停按钮复位后，操作人员出入管理系统进入该区域，按照规定的顺序依次按下区域内的清场按钮、确定无人员逗留后关闭防护门，完成清场操作；

3) 接着复位人员出入管理箱；

4) 最后在中控室控制盒上进行区域授权，打开该区域的束流闸或离子源高压，允许出束流。

人员进入加速器区域时，需开展以下操作：

1) 防护值班人员在中控室控制盒处取消该区域授权；

2) 防护值班人员在该区域的人员出入管理系统进行主权限授权；

3) 工作人员可操作人员出入管理系统打开防护门、进入该区域工作。

（2） 终端区域供束前恢复联锁及人员进入工作流程

终端区域在供束前，需开展以下操作恢复联锁：

1) 中控室值班人员在中控室控制盒对该终端区域授权；

2) 首先由防护值班人员检查该终端所有急停按钮是否复位；

3) 所有急停按钮复位后，操作人员出入管理系统进入该终端，按照规定的顺序依次按下区域内的清场按钮、确定无人员逗留后关闭防护门，完成清场操作；

4) 接着取消人员出入管理系统的主权限授权、复位人员出入管理箱；

5) 最后在终端控制盒上进行区域授权，打开该终端的束流闸，允许出束流。

人员进入终端区域时，需开展以下操作：

1) 防护值班人员在终端控制盒处取消该区域授权；

2) 防护值班人员在该区域的人员出入管理系统进行主权限授权；

3) 工作人员可操作人员出入管理系统打开防护门、进入该区域工作。

4.2.4 辐射监测系统

辐射监测系统的主要功能是测定加速器的工作场所和周围环境中的辐射水平，以便控制人员的活动，使其接受的辐射剂量能实现“合理达到的尽可能低（ALARA）”的原则，保证工作人员和公众的安全，并为安全联锁系统提供辐射水平信号；验证屏蔽措施的可靠性，防治辐射泄露造成环境污染。

辐照子系统的高能重离子加速器在运行过程中，束流损失使粒子与物质相互作用，通过低能、中能核反应以及高能核反应产生中子。由于以上反应机制和带电粒子束流以脉冲形式加速，加速器周围的辐射具有以下特征：

1）是一个脉冲辐射场。由于带电粒子束流以脉冲形式加速的，在其周围形成一个脉冲辐射场。无论是在屏蔽内还是在屏蔽外，其辐射场的时间结构都与初级束流的时间特性密切相关，它的特性决定于束流的占空比；

2）具有能量大于 20MeV 的中子和光子，高能中子（特别是能量大于 20MeV 的中子）贡献占 50%以上；

3）周围环境中的杂散辐射剂量中主要贡献是中子，其次是 γ，中子在辐射场中的贡献比 γ 高一个数量级以上；

4）是一个瞬发中子、光子以及其他粒子构成的混合辐射场。要求中子、γ 射线探测器具有很强的中子、γ 射线分辨能力，即中子监测器对 γ 射线不灵敏，γ 射线监测器对中子不灵敏。

而空间光伏辐照全流程研发模块在运行过程中，主要的辐射是电子与物质相互作用而产生的宽能谱韧致 X 射线，其最大能量不超过电子束能量。

在加速器辐射剂量监测中，对脉冲辐射场性能良好，又能作为实时监测，同时稳定可靠，价格便宜的是包有慢化体的 BF_3 正比计数管（或 He-3 管）和电离室。根据辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块的整体布局及其次级辐射特性，在其辐射区及周

围各方向共布置了 24 个监测点。监测点有两种类型，第一类监测点由一台中子探测器和一台γ探测器组成，第二类监测点只包含一台γ探测器。主要考虑在辐射区及屏蔽墙外周边布置监测点，监测点的布局见图 4-48 和图 4-49。

场所固定式γ探测器应满足的性能指标为：γ射线的能量响应范围覆盖 60keV~3MeV；辐射剂量率量程覆盖 0.1μSv/h~10mSv/h；探测器具备良好的可靠性，包括环境适应性、抗电磁干扰能力等；包括可设置报警阈值的声光报警部件，在超过阈值时发出警报信号；包括可远程监控的主机，通过以太网组网，在监控计算机上可管理和展示所有探测器数据。

场所固定式中子探测器应满足的性能指标：中子的能量响应区间覆盖热中子~20MeV；辐射剂量率量程覆盖 0.1μSv/h~10mSv/h；探测器具备良好的可靠性，包括环境适应性、抗电磁干扰能力等；包括可设置报警阈值的声光报警部件，在超过阈值时发出警报信号；包括可远程监控的主机，通过以太网组网，在监控计算机上可管理和展示所有探测器数据。

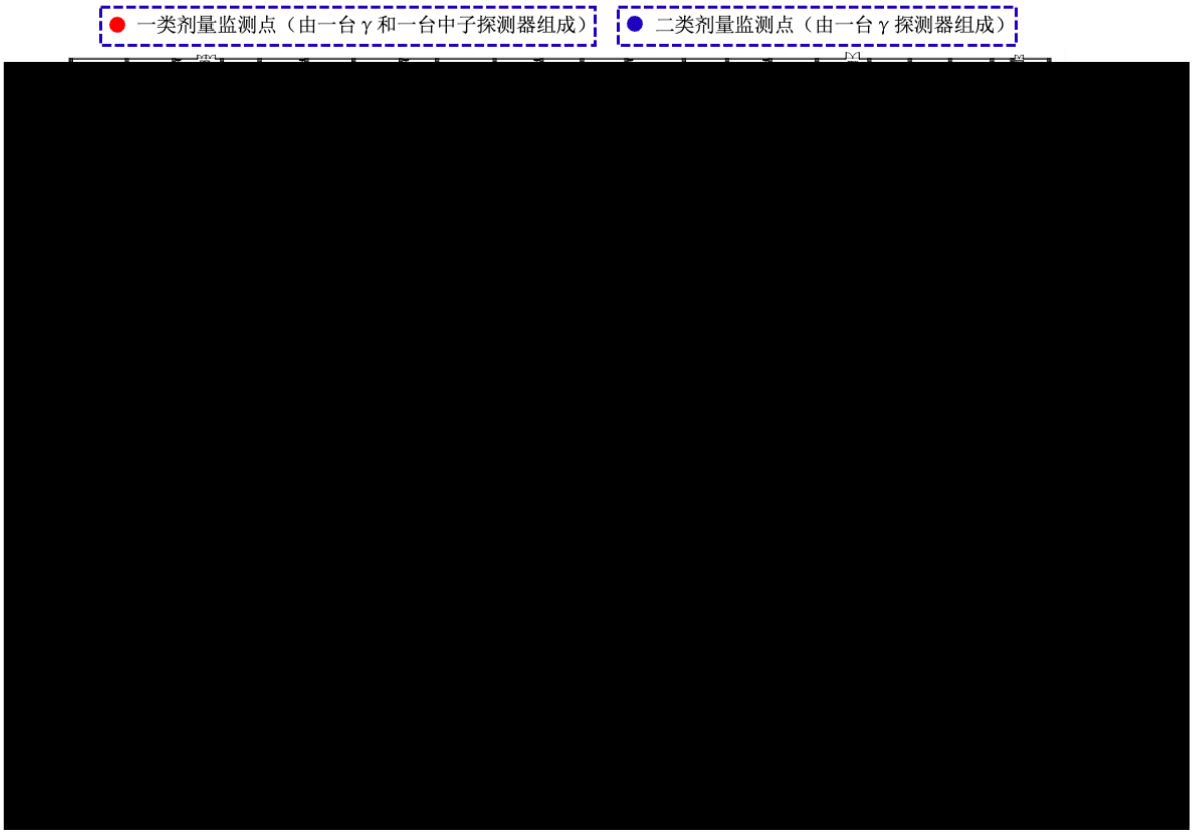


图 4-48 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射监测系统监测点分布图（一层）

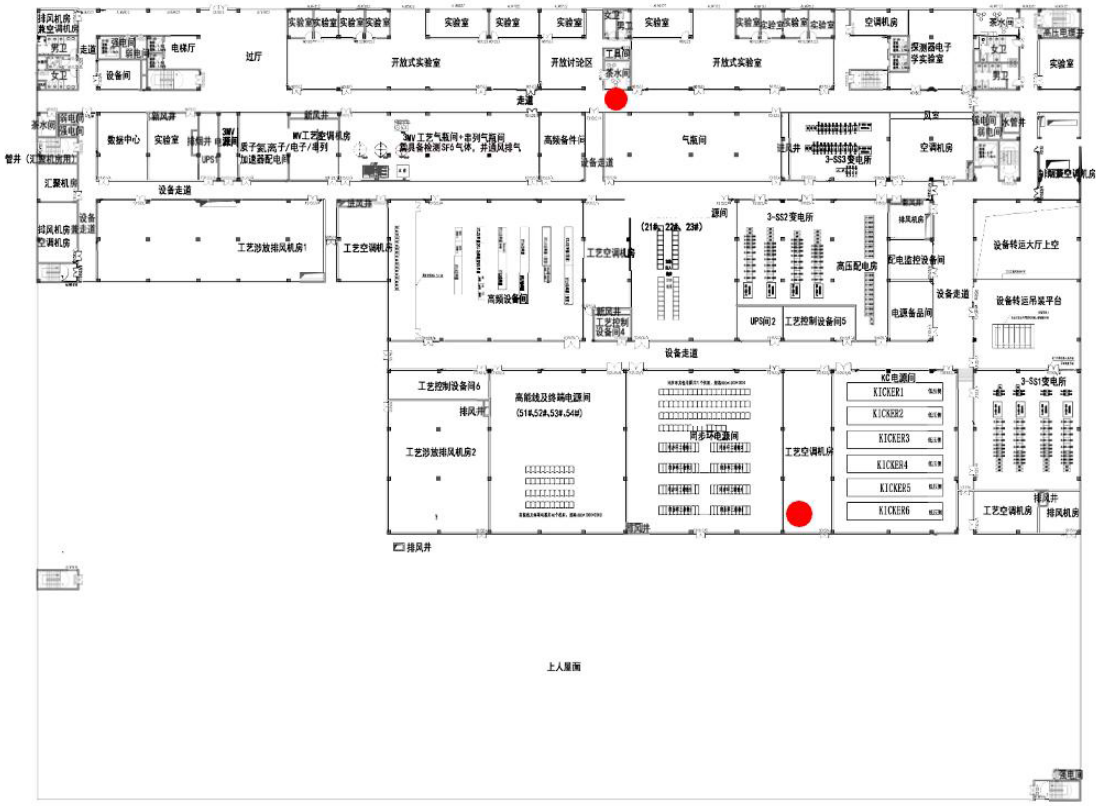


图 4-49 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射监测系统监测点分布图（二层）

4.2.5 通风系统

本系统仅 51#终端和同步加速器大厅涉及活化气体，上述区域采用组合式空调机组送回风、排风机组排风的方式，空调系统处于封闭循环状态，并通过排风机排风使得辐射工作场所区域内保持负压状态，风管采用“L”型等方式穿屏蔽墙体，部分风管穿墙示意见图 4-50。排气口距离地面 0.5 m，回风口离地 0.5m，送风口距离地面 3.7 m，采用上送风、下回风、下排的方式进行布置。上述排风管道将各场所内排风送至地上二层工艺涉放排风机房后，通过排风机组初级+中级过滤后，加压后经排风管送至排气口，总计 5 个排风口，位于屋面，距离地面约 22m，距离屋面 3m。场所内通风设置如表 4-12 所示，具体设置见图 4-51~图 4-54。

表 4-12 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块终端区域通风系统设置参数

序号	区域	体积	换气次数（正常运行）	正常运行排风量	换气次数（停机）	停机排风量	换气次数（事故）	事故排风量，m^3/h	排风口高度
		m^3	次/h	m^3/h	次/h	m^3/h	次/h	m^3/h	m
1	同步加速器大厅	26214	0.5	13107	5	131070	5	131070	高出屋面 3 米
2	51#单粒子效应研究终端	3529	5	17645	5	17645	5	17645	高出屋面 3 米

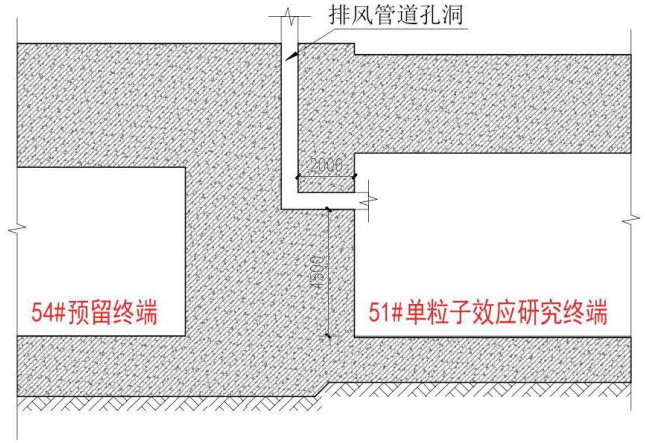


图 4-50 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块通风管道穿墙示意图

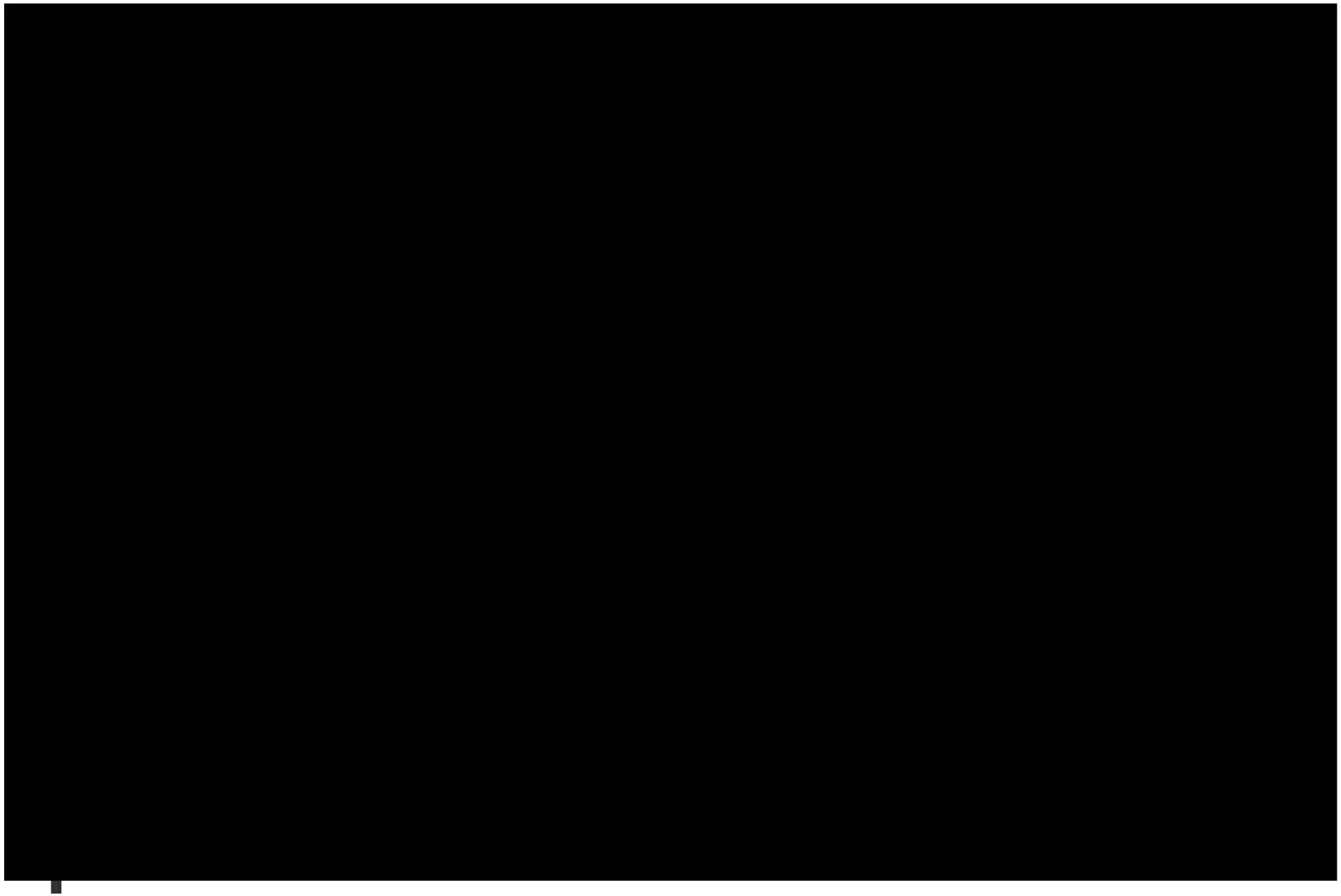


图 4-51 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块首层通风管道布置示意图



图 4-52 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块夹层通风管道布置示意图

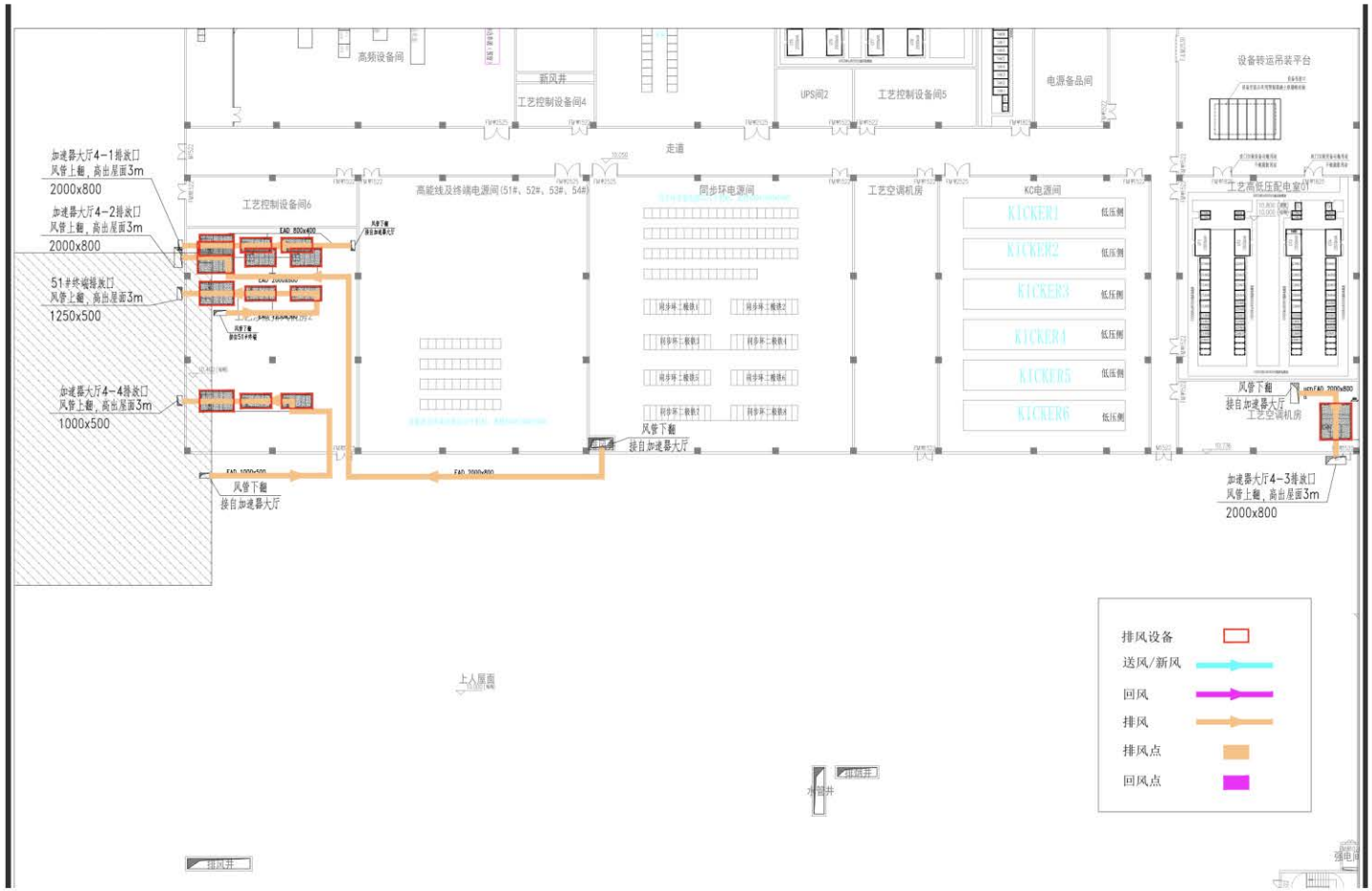


图 4-53 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块二层通风管道布置示意图

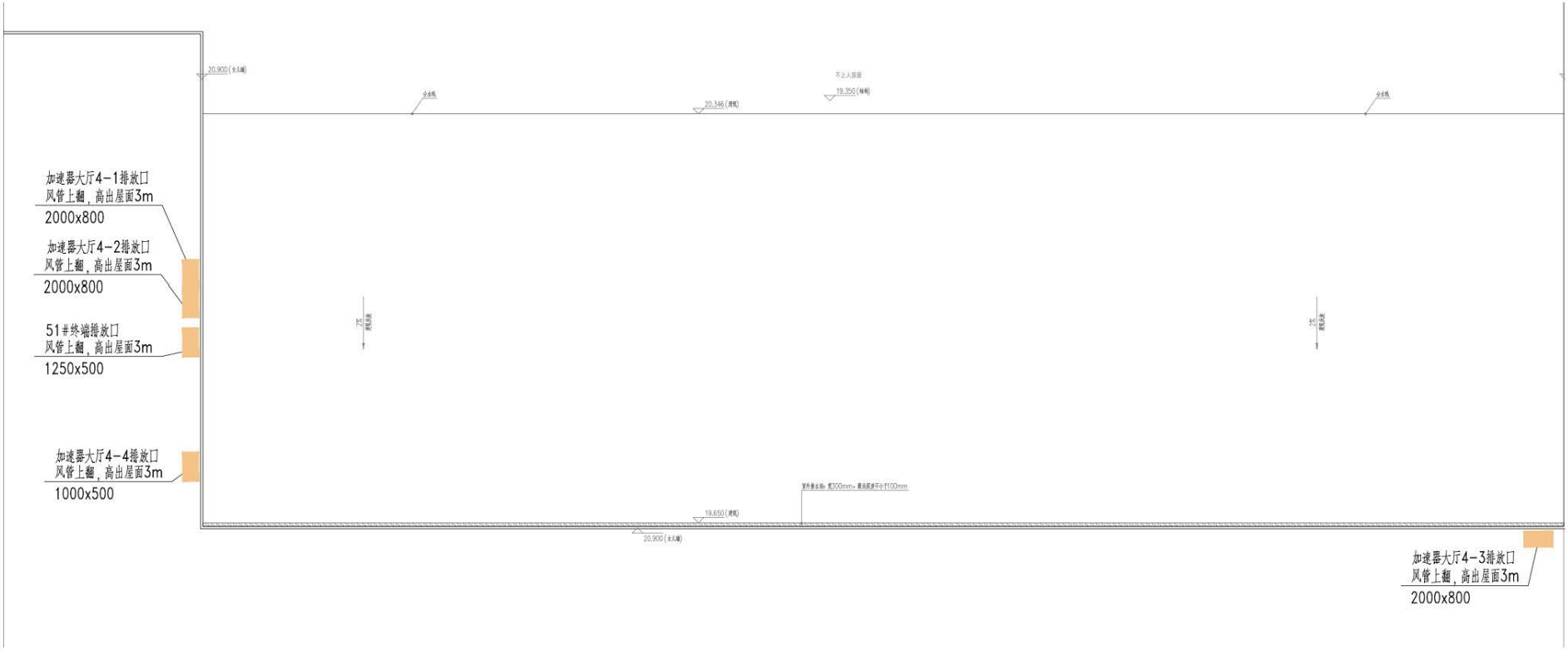


图 4-54 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块排气口布置示意图

4.2.6 三废的治理

4.2.6.1 活化空气及其处理措施

（1）来源

根据第三章的分析，该区域运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核素为 ^{13}N（$T_{1/2}[^{13}N]$=9.965min）、^{15}O（$T_{1/2}[^{15}O]$=2.037min）、^{11}C（$T_{1/2}[^{11}C]$=20.39min）和 ^{41}Ar（$T_{1/2}[^{41}Ar]$=1.8h），产生量为 1.04E+03Bq/m^3。

（2）处理措施

装置运行产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。同步加速器大厅和 51#终端均设有独立的排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体经由屋面排入环境，年排放速率为 4.25E+04Bq/s。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，结合第五章的计算结果，其对环境的影响很小。

4.2.6.2 放射性废液及其处理措施

（1）来源

本项目产生的放射性废水主要是活化的冷却水。装置所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素，主要考虑 ^{7}Be 和 ^{3}H。根据对冷却水感生放射性核素活度浓度的计算结果，活化冷却水的活度浓度低于豁免活度。

（2）处理措施

装置所用冷却水为去离子水，在运行期间，冷却水闭路循环不排放，只在设备相关部位检修时根据需要才需要排放，该工况下年排放量不超过 0.5m^3。本项目仅同步加速器大厅和 51#终端涉及活化冷却水，上述辐射工作场所区域内设置集水井，当集水井中水位达到一定高度时，泵组启动将各集水井中活化冷却水经管道抽至室外暂存池中，暂存池有效容积为 5m^3，为 3 级槽式池设计。

暂存池上设有取样口，活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.3.2 节”所列中放射性废水排放标准，经审管部门认可后方可排放。暂存池设有管道与园区污水管网相连，且配备手动启动的排水泵，需要排放时手动开启排水泵，通过管道将冷却水

排入园区污水管网。每次排放需记录存档，记录废水来源、排放量、活度浓度监测结果、排放去向等信息。

综上所述，本装置正常运行时不会产生放射性废水，检修或发生泄漏的情况下可能排放的冷却水活度接近豁免活度，且采取了有效的废水收集和暂存措施。因此，放射性废液对环境的影响很小。



图 4-55 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块终端区域活化冷却水收集路径示意图

4.2.6.3 放射性固体废物及其处理措施

（1）来源

本区域放射性固体废物主要是中高能离子加速器装置检修环节更换下来的加速器部件、靶件等含感生放射性的固体废物，各类放射性废物的年产量预计不超过 50kg。

（2）处理措施

放射性固体废物暂存于场所内设置的铅室中，位置见图 4-56。放射性固体废物暂存该区、废物桶设置电离辐射警告标识和中文警示说明，建立放射性固体废物台账，记

录废物名称、数量、表面和 1m 处γ剂量率、监测日期、去向等相关信息。



图 4-56 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块放射性固体废物暂存场所

建设单位根据放射性固体废物的暂存情况定期委托有资质的单位对其进行测量分析，满足解控要求的放射性固体废物可回收后重复利用或作为非放射性固体废物处理，不能满足解控要求的放射性固体废物最终送交有资质单位收贮。

4.3 介观表征子系统（高亮度中子源装置）

4.3.1 场所布局与分区

4.3.1.1 场所布局

本项目高亮度中子源装置设置在园区东侧的介观楼内。其中高亮度中子源装置主要功能区位于地上一层。辐射工作场所周围无人员密集区域。

辐射工作场所内均设有迷道，紧邻场所的四侧屏蔽墙体、防护门和屋顶除控制室外

无办公室等人员长居留场所。辐射工作场所的进出口均设置了门禁管理，便于场所的防护管理与安全控制。整个辐射工作场所内房间功能布局紧凑、辐射屏蔽防护满足相关标准要求。从辐射安全防护的角度来看，该区域的布局合理。

4.3.1.2 辐射工作场所分区

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的规定，应将辐射工作场所分为控制区和监督区。控制区是指需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域；监督区是指通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。高亮度中子源装置的辐射工作场所参照《中国散裂中子源项目环境影响报告书》及其批复文件中的要求，按控制区和监督区划分，具体如下：

（1）控制区

1）控制区 I：装置所在场所屏蔽体以内的区域，包括加速器隧道、靶站热室、中子开关驱动室、水冷却系统设备区、谱仪终端屏蔽体以内，以及放射性废物存储区屏蔽体以内的区域等；

2）控制区 II：包括靶站顶部大厅、取样间、维修间、氢设备间等，其剂量率控制水平按 25 μSv/h 执行；

（2）监督区：屏蔽体外相邻场所。

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

控制区 II 管理要求：局部区域剂量率水平有可能大于 2.5μSv/h，但小于 25 μSv/h，在开机时授权人员可能需要进入工作的区域。为加强辐射防护管理，将对该类区域增加相应的辐射防护措施，作为控制区 II 进行管理。

监督区管理要求：监督区入口处设标牌表明监督区，进入监督区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计。

具体的分区情况见图 4-57~图 4-60。



图例：控制区Ⅰ；控制区Ⅱ；监督区

图 4-57 介观楼地下一层辐射工作场所分区示意图



图 4-58 介观楼地上一层辐射工作场所分区示意图

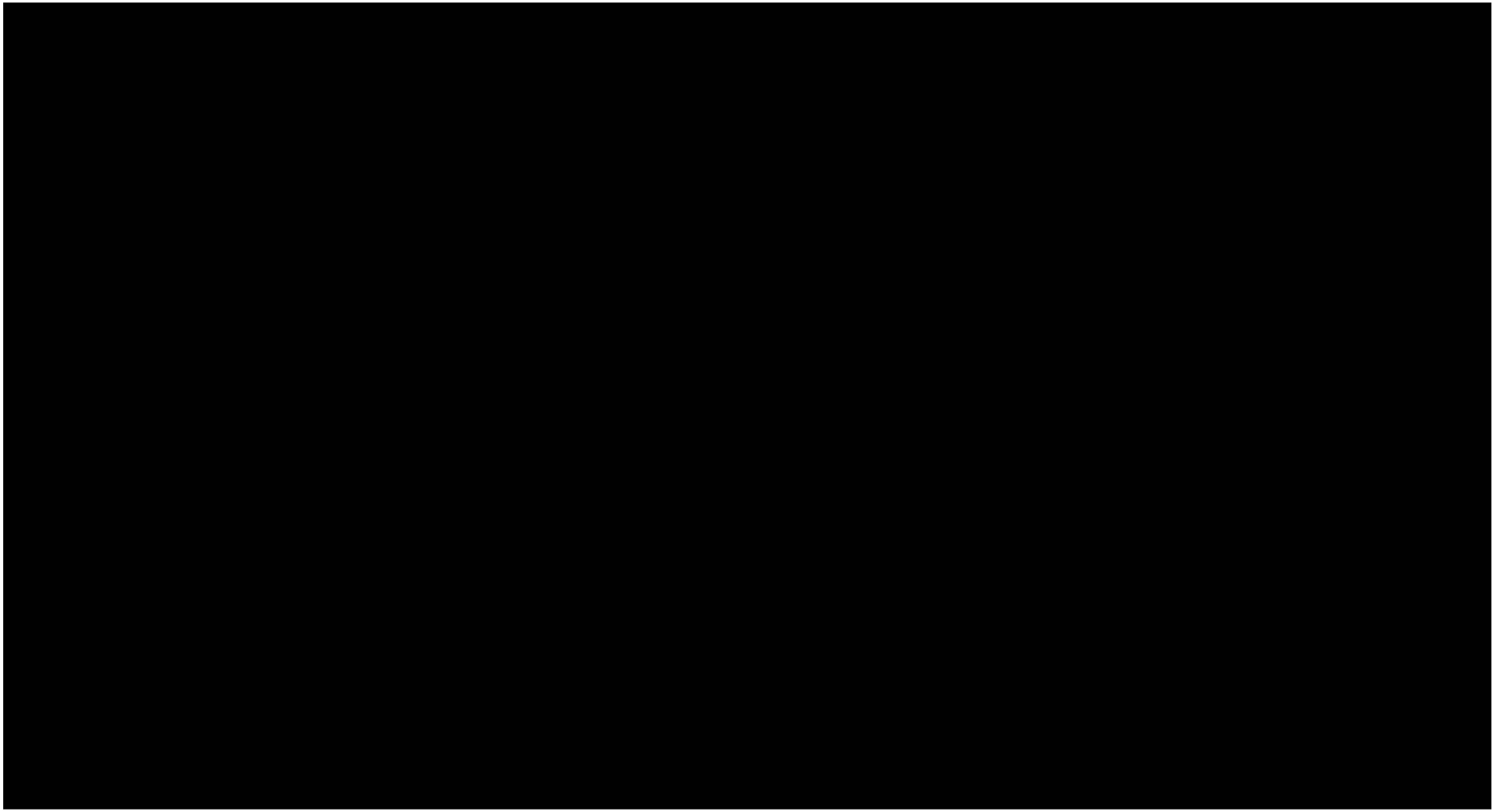


图 4-59 介观楼地上二层辐射工作场所分区示意图

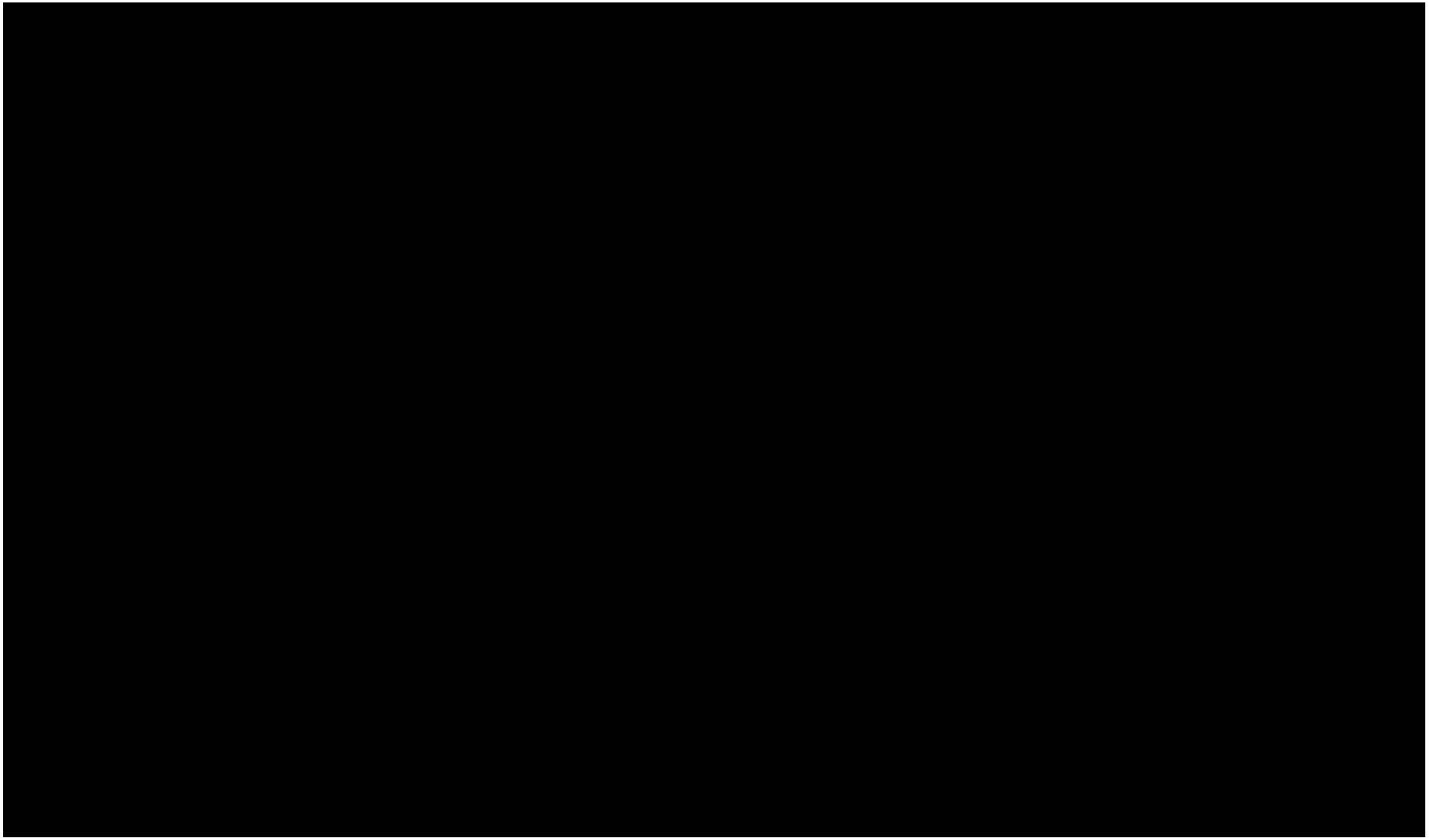


图 4-60 介观楼地上三层辐射工作场所分区图

4.3.2 辐射屏蔽

4.3.2.1 设计标准

辐射工作场所辐射屏蔽设计时，主要依据的设计标准如下：

（1）年剂量约束值

参照《中国散裂中子源项目环境影响报告书》及其批复文件中批准的辐射工作人员剂量约束值，以 10mSv/a 作为本装置职业人员的年剂量约束值。

（2）屏蔽体外剂量率控制水平

屏蔽体外各关注点处的剂量率应不高于表 1-5 中给出的剂量率控制水平。

4.3.2.2 屏蔽设计

高亮度中子源装置辐射工作场所辐射屏蔽设计如表 4-13 和图 4-61 所示，辐射屏蔽主要采用混凝土、铁和低碳钢，混凝土的密度为 2.35 g/cm^3，铁密度 7.874 g/cm^3，低碳钢的密度是 7.85 g/cm^3。

表 4-13 高亮度中子源装置辐射工作场所屏蔽设计方案

辐射工作场所	方位	屏蔽材料及厚度	周围环境
直线加速器主隧道	北侧	2500mm 混凝土	运输吊装大厅、舒适性空调机房、水冷泵房
	南侧	2500mm 混凝土	离子源热备份室
		800mm 混凝土	直线加速器副隧道
	南侧防护门	300mm 混凝土	直线加速器副隧道
	西侧防护门	300mm 混凝土	迷道（隧道末端）
	西侧	2500mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	东侧	2500mm 混凝土	外环境
	东侧防护门	200mm 混凝土	迷道（离子源端）
	顶板	2500mm 混凝土	隧道顶部机柜
	底板	800mm 混凝土	土壤
	北侧	800mm 混凝土	直线加速器主隧道
	南侧	2500mm 混凝土	直线功率源大厅

辐射工作场所	方位	屏蔽材料及厚度	周围环境
直线加速器副隧道	东侧防护门	200mm 混凝土	迷道（离子源热备份室端）
	东侧	800mm 混凝土	直线加速器主隧道
	西侧	无	通向靶站
	顶板	2500mm 混凝土	隧道顶部机柜
	底板	800mm 混凝土	土壤
废液存储间	北侧	1000mm 混凝土	迷道（隧道末端）
	南侧	2500mm 混凝土	直线隧道
	西侧	600mm 混凝土	迷道（隧道末端）
	东侧	1000~2700mm 混凝土	迷道（隧道末端）
	顶板	2500mm 混凝土	靶站、谱仪控制机柜间
	底板	800mm 混凝土	土壤
废束站1	北侧	900mm 铁+ 1850mm 混凝土	排风中心
	南侧	900mm 铁+ 1850mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	西侧	1600mm 铁+ 1550mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	东侧	500mm 铁+ 900mm 混凝土	直线主隧道
	顶板	900mm 铁+ 1850mm 混凝土	隧道顶部机柜
	底板	500mm 铁+ 900mm 混凝土	土壤
废束站2	北侧	1200mm 铁+ 2350mm 混凝土	污物转运厅
	南侧	1200mm 铁+ 2350mm 混凝土	排风中心
	西侧	1900mm 铁+ 2100mm 混凝土	排风中心
	东侧	600mm 铁+ 1600mm 混凝土	直线主隧道
	顶板	1200mm 铁+ 2350mm 混凝土	隧道顶部机柜
	底板	600mm 铁+ 1600mm 混凝土	土壤
直线至靶站区域	束流左侧	500mm 铁+800~2500mm 混凝土	直线副隧道/靶站大厅
	束流右侧	500mm 铁+2500mm 混凝土	/
	顶板	500mm 铁+2500mm 混凝土	隧道顶部
	底板	800mm 混凝土	土壤
靶站	靶站圆周方向	3000mm 低碳钢+1500mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	顶板	3000mm 低碳钢+1500mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	底板	3000mm 低碳钢+1500mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
高通量小角中子散射仪	北侧（高度方向）	束流传输段：300mm 低碳钢+1070mm 混凝土 斩波器空间： 300mm 低碳钢+620mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	南侧（底部）	束流传输段：300mm 低碳钢+880mm 混凝土 斩波器空间： 300mm 低碳钢+680mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）

辐射工作场所	方位	屏蔽材料及厚度	周围环境
	西侧（左侧）	束流传输段：300mm 低碳钢+1025mm 混凝土 斩波器 1 空间： 300mm 低碳钢+738mm 混凝土 斩波器 2 空间： 300mm 低碳钢+728mm 混凝土 斩波器 3 空间： 300mm 低碳钢+325mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	东侧（右侧）	束流传输段：300mm 低碳钢+1025mm 混凝土 斩波器 1 空间： 300mm 低碳钢+738mm 混凝土 斩波器 2 空间： 300mm 低碳钢+728mm 混凝土 斩波器 3 空间： 300mm 低碳钢+725mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	散射室顶部墙体和底部墙体	600mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	散射室侧方墙体	400mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
高通量小角中子散射仪束流垃圾桶	凹陷深度：500mm 凹陷截面积：1000mm×1000mm 总截面积：2000mm×2000mm 总长度：1800mm		靶站大厅（中子源大厅）
通用中子粉末衍射仪	北侧（高度方向）	束流传输段：300mm 低碳钢+1100mm 混凝土 斩波器空间： 300mm 低碳钢+480mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	南侧（底部）	束流传输段：300mm 低碳钢+750mm 混凝土 斩波器空间： 300mm 低碳钢+670mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	西侧（左侧）	束流传输段：300mm 低碳钢+950mm 混凝土 斩波器空间： 300mm 低碳钢+510mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	东侧（右侧）	束流传输段：300mm 低碳钢+950mm 混凝土 斩波器 1 空间： 300mm 低碳钢+510mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）

辐射工作场所	方位	屏蔽材料及厚度	周围环境
	散射室顶部墙体和底部墙体	400mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
	散射室侧方墙体	250mm 混凝土	靶站大厅（中子源大厅）
通用中子粉末衍射仪束流垃圾桶	凹陷深度：1450mm 凹陷截面积：1120mm×1120mm 总截面积：2720mm×2720mm 总长度：2650mm		靶站大厅（中子源大厅）
热室	北侧	1500mm 混凝土	靶站
	南侧	1500mm 混凝土	过渡间
	西侧	1500mm 混凝土	维护区
	东侧	1500mm 混凝土	操作间
	顶板	1500mm 混凝土	顶部大厅过渡间
	底板	1500mm 混凝土	水冷却系统设备区、废物存储区
	观察窗	含铅玻璃	操作间



图 **4-61** 高亮度中子源装置屏蔽设计情况（图中单位为 **mm**）

4.3.3 人身安全联锁系统

4.3.3.1 系统概述

人身安全联锁系统（Personnel Protection System ，英文简称 PPS）是用以保障工作人员进出辐射工作场所控制区时的人身安全，避免出现辐照事故的安全防护系统。

介观表征子系统的主装置包括加速器、靶站和谱仪，涉及辐射工作场所控制区包括加速器隧道、靶站区域和谱仪散射室。

加速器隧道用于放置加速器装置，在加速器启动时，禁止任何人进入隧道内；加速器停机时，允许维护人员进入隧道内。

靶站区域包含热室和中子开关驱动室等区域，热室用于靶维护，在打靶或者靶车拖出时，禁止任何人进入；不打靶且靶车在就绪位置时，允许维护人员进入。中子开关驱动室，在打靶时，禁止任何人进入；停机时，允许维护人员进入。

谱仪散射室用于样品实验，中子开关打开时，禁止人员进入散射室；中子开关关闭时，允许人员进入散射室。

根据介观表征子系统的工作特点，将联锁区域划分为 4 个控制区：加速器隧道（含主、副隧道）、靶站区域（含热室、中子开关驱动室、水冷却系统设备区）和 2 个谱仪散射室。根据系统架构方案和联锁区域的分布情况，系统可采用一个中央控制站和两个本地控制站（加速器本地站和靶站）实现联锁控制。

4.3.3.2 设计原则

在借鉴国内外安全联锁系统优秀设计和运行经验的基础上，介观表征子系统人身安全联锁系统主要设计原则归纳如下：

1）简单可靠：系统设计要力求在简洁的基础上保证运行可靠性及稳定性；

2）最优切断：人身安全联锁系统在加速器控制系统的联锁逻辑中具有最优先的权力切断束流。

3）失效保护：当人身安全联锁系统关键设备失效时，系统有相应的应急保护措施

来保障工作人员的人身安全。

4）冗余：系统关键设备要采取冗余设计，以保障系统的可靠性、减少系统故障时间并预留有进一步改进的余地。

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

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

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

4.3.3.3 基本结构及控制逻辑

人身安全联锁系统是以联锁系统为基础，以门禁监控系统为辅助，按照安全联锁系统设计原则和相关标准，设计实现的数字化、网络化、集成化和人性化的安全监测保护系统。

介观表征子系统人身安全联锁系统架构如图 4-62 所示。人身安全联锁系统划分为 PLC 联锁系统，门禁监控系统和联锁钥匙系统。

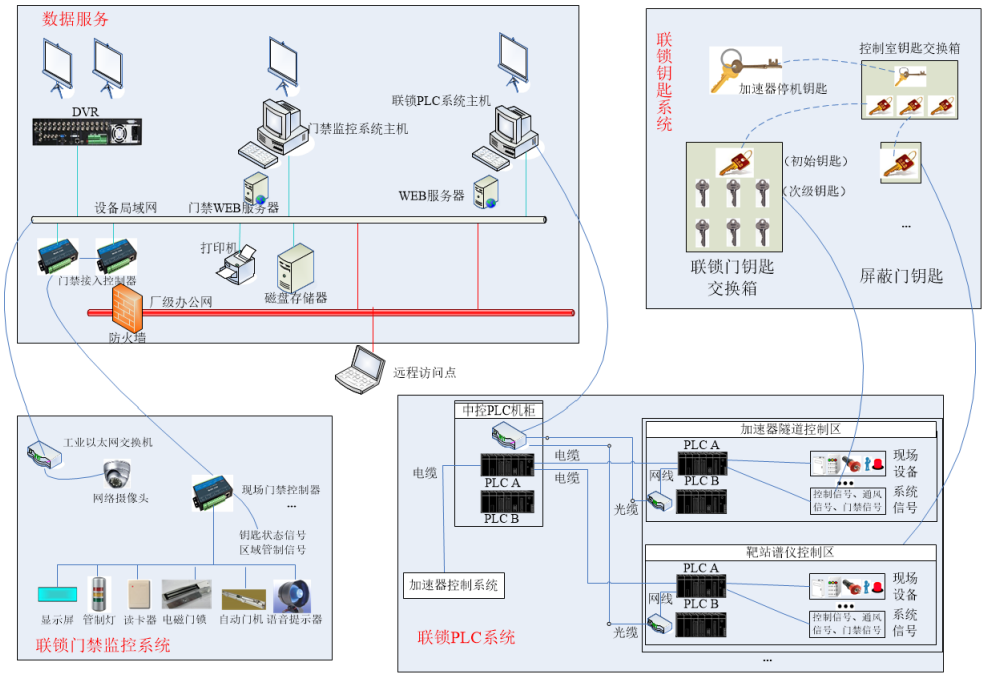


图 4-62 人身安全联锁系统架构图

4.3.3.4 模式、状态及运行流程

介观表征子系统高亮度中子源装置加速器和靶站控制区的管制状态与加速器束流联锁。对于 PPS 来说，该区域的调试、运行模式可分为以下 2 种，如表 4-14 所示。

表 4-14 高亮度中子源装置调试与运行模式统计表

模式编号	模式名称	需就绪区域
1	加速器调试	加速器隧道
2	打靶运行	加速器隧道、靶站区域

处于就绪状态的控制区，要求屏蔽门关闭、搜索清场完成、紧急停机按钮正常、联锁门钥匙就绪、联锁控制器正常。

人身安全联锁系统的基本工作流程如图 4-63 所示，①在其它系统均就绪后，值班人员进入联锁区域启动清场，广播通知检修人员离开联锁区域；同时，按照设定的路线进行巡更清场，清空滞留人员；②巡更清场结束后关闭联锁门，返还联锁钥匙并将开机联锁钥匙就位；③加速器控制系统给出“准备”信号，在 3 分钟的“准备”过程中，联锁区域内进行 2 分钟的声光报警，提醒误留控制区人员操作紧急停机设备阻止加速器开机；④“准备”过程结束后，人身安全联锁系统允许加速器进入运行状态；⑤加速器“运行”后，人身安全联锁系统建立切束联锁，同时，“禁止进入”状态启动；⑥正常情况

下，停机后，如果有进入控制区需求，必须等待剂量衰减后，“禁止进入”联锁状态解除，人员可刷卡进入；紧急停机状态下，可击碎玻璃破碎按钮，打开联锁门进入控制区；⑦工作结束后，离开联锁控制区时必须刷卡，以消除控制区滞留记录。

出现异常情况时，可通过紧急停机按钮等设备触发紧急停机动作，通知辐射防护值班员，待异常情况解除后重新复位开机。

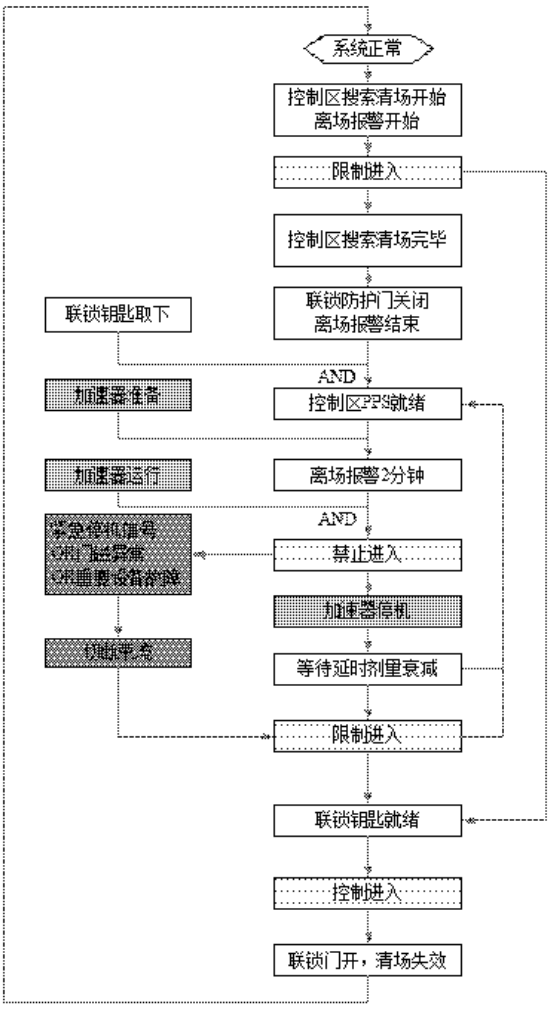


图 4-63 高亮度中子源装置人身安全联锁系统工作流程图

为实现不同加速器模式下的控制区安全管制，介观表征子系统的控制区均有控制进入、限制进入和禁止进入三种管制模式。控制进入发生在加速器停机并且控制区经过剂量衰减，已经可以保障进入人员的人身安全后，此时工作人员凭授权的门禁卡可进出相关区域；限制进入是一种中间待命状态，发生在控制区搜索清场时、搜索清场完成后或加速器准备开机时，在限制进入模式时只有使用巡更卡（高权限卡）才可进入；禁止进

入状态发生在加速器开机运行时或控制区剂量衰减时，此时门禁刷卡无效，不允许任何人员进入控制区。另外，为保证人员安全，在任何运行模式下人员均可刷卡或通过紧急开门按钮打开联锁门离开联锁区域。三种控制区管制模式之间的状态关系如图 4-64 所示。

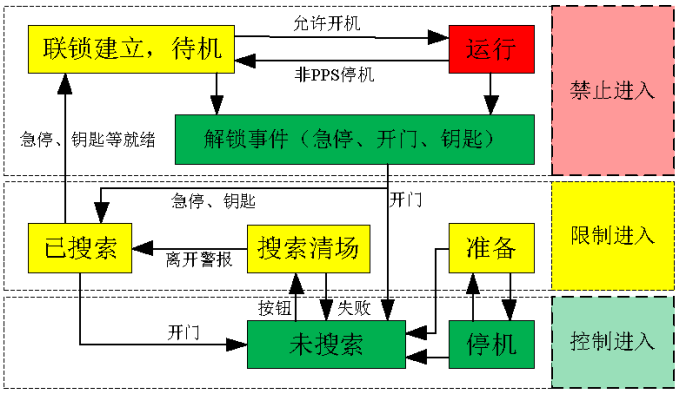


图 4-64 高亮度中子源装置控制区管制模式状态转移图

系统涉及的主要操作过程包括：进门流程、出门流程、搜索清场流程和自救流程。各控制区流程基本一致，此处以加速器控制区为例进行介绍。

1）进门流程

控制区的管制状态有三种：禁止进入时，人员无法通过正常途径进入；限制进入时，只有持巡更卡的操作员才能刷卡进入；控制进入时，持巡更卡和工作卡（身份卡）均可进入。

在进入控制区之前，值班员应当操作加速器停机，等待剂量衰减。剂量衰减完成后，关闭设备高压电源，取下加速器停机钥匙。

拿到加速器停机钥匙之后，需要在控制台换取需要进入的控制区的开门钥匙，带着控制区开门钥匙到控制区门口，将控制区状态切换到控制进入模式，刷授权卡打开屏蔽门。

2）出门和清场流程

控制区的联锁门内设有出门读卡器，人员离开时应该刷卡，以便系统统计人数，完成人数清零，实现零计数功能。

人员完成工作后，出门前在门内刷卡清除自己的信息，出门检查名字已从 LED 显

示屏清除后，归还次级钥匙。

在加速器开机前，要先封闭控制区，即由清场人员对曾开放过的控制区进行搜索清场。操作员携带“巡更卡”和次级钥匙进入控制区，按清场按钮，启动离场警报并清空室内人员，检查显示屏、联锁钥匙箱确认人员清空后，屏蔽门自动关闭，清场结束。

3）自救流程

介观表征子系统人身安全联锁系统设定为当紧急停机按钮按下或者行程开关信号检测到联锁门打开时，系统将切断束流以保障人员安全。因此，当发生人员被困在控制区内而屏蔽门已经关闭时，应该马上按下紧急停机按钮，防止加速器开机，之后通过刷卡或者应急方式离开控制区；也可以快速的击碎玻璃破碎按钮并推开联锁门，利用行程开关信号异常阻止加速器开机。

4）控制区 II 安全管理

控制区 II 包括靶站顶部大厅、取样间、维修间、氢设备间等区域，通过屏蔽设计和分析，可以保证装置运行时，这些区域的瞬发辐射剂量率低于 25μSv/h。同时，由于这些区域涉及活化设备维修、活化水取样等操作，因此须保证人员可达范围内设备感生放射性剂量率低于 25μSv/h，这主要通过临时屏蔽、设置隔离带等管理手段实现。鉴于控制区 II 执行特殊的剂量限值标准，需要控制可进入这些区域的人员范围，配置控制区门禁监控系统，只向部分辐射工作人员开放授权；在此基础上，通过固定式和便携式剂量监测仪表检测这些区域的实际剂量率水平，并由辐射防护人员根据剂量率数据评估人员允许作业时间，以保障进入控制区 II 的人员剂量处于合理可控水平。

4.3.3.5 系统硬件设计

人身安全联锁系统是通过设置在控制站的联锁控制器 PLC 来处理和交换信号，通过分布在控制区内的现场设备来采集信号和执行动作。主要现场设备有：联锁门禁组件、联锁钥匙、紧急停机装置、搜索清场装置、警示装置和控制机柜等。设备的布置情况见表 4-15、图 4-65~图 4-70。

（1）联锁门禁组件

门组状态与辐射工作场所控制区内部安全情况联锁的单元门组称之为联锁门，简单的说，联锁门就是指参与联锁的联锁区域通道门。联锁门的联锁要求是：控制区内部存

在安全威胁时联锁门无法打开；控制区联锁门被打开时危险源无法开启。

介观表征子系统有多组屏蔽门，配置标准联锁设备：门外配置联锁信号控制箱、门禁控制箱、LED 显示屏、管制状态指示灯、联锁钥匙、语音提示器、读卡器、玻璃破碎按钮；门内配置读卡器、玻璃破碎按钮。屏蔽门均纳入联锁。

（2）联锁钥匙

控制室内设有联锁控制钥匙。联锁钥匙是一种联锁交换装置，停机钥匙与区域就绪钥匙为同一把钥匙，区域就绪钥匙又与开门钥匙互锁；人员进入控制区时，开门钥匙会被带走用以将控制区管制状态切换成控制进入模式；联锁钥匙参与束流联锁，只有联锁区域的所有控制区开门钥匙均取下，同时停机钥匙就绪，加速器才被允许运行。

（3）紧急停机按钮

辐射工作场所控制区内部和控制室设置紧急停机按钮，在紧急情况下，工作人员按下紧急停机按钮可立刻切断加速器束流。紧急停机按钮要求有明确的操作指示和位置标识，操作紧急停机按钮导致的停机必须由管理员在本地复位后才能再次开机。

（4）搜索清场按钮

在加速器开机之前，未经搜索清场程序的辐射工作场所控制区必须进行搜索清场。搜索清场过程中，搜索人员按照预定路线依次经过搜索点，检查清空控制区人员，操作搜索清场装置，实现搜索清场。

根据介观表征子系统的工作特点，将联锁区域划分为 4 个控制区：加速器隧道（含主、副隧道）、靶站（含热室、中子开关驱动室、水冷却系统设备区）、小角谱仪散射室、粉末谱仪散射室。具体的清场搜索路线见图 4-65~图 4-70。

（5）警示装置

警示装置包括控制区入口处的管制状态指示灯、语音提示器，控制区内部的警灯、警铃和语音警示器。控制区入口的警示设备是便工作人员了解控制区管制状态，并按照操作系统的提示进行操作。控制区内部的警灯、警铃和语音提示器，是用于控制区搜索清场时和加速器准备开机时的声光报警。

（6）联锁剂量监测器

为了保证屏蔽体外的人员安全，部分屏蔽体外的场所剂量监测器（直废束站末端和高能输运线旁边共计两个剂量监测器纳入联锁，编号是 8 号和 9 号，剂量联锁阈值设置为 25μSv/h）接入人身安全联锁系统，接入人身安全联锁系统的剂量监测器需要从探测器本地扇出一路报警信号，通过硬连线方式接入联锁 PLC 系统。参与联锁的剂量监测器测量值超过设定阈值时，将发送报警信号给联锁 PLC 系统，从而触发联锁，禁止加速器启动或者切断加速器束流。

（7）控制机柜

高亮度中子源装置人身安全联锁系统设置 3 个控制站，每个控制站有 2 套控制机柜，控制机柜内配备有联锁控制器 PLC 和信号接线箱。

表 4-15 高亮度中子源装置人身安全联锁设备统计表

联锁控制组件	加速器主隧道	加速器副隧道	靶站（含热室）	高通量小角中子散射仪	通用中子粉末衍射仪	总计
联锁门	4	2	3	2	2	13
清场按钮	4	3	6	2	2	17
急停按钮	15	10	6	2	2	35
紧急开门按钮	4	2	3	2	2	13
声光报警	15	10	6	2	2	35
工作状态指示灯	4	2	3	2	2	13
束流闸门	-	-	10	-	-	10

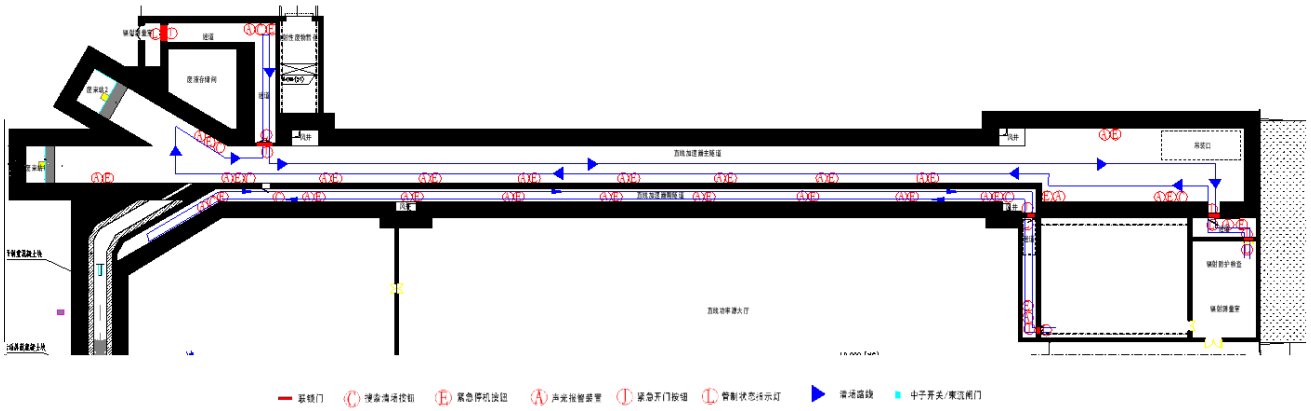


图 4-65 高亮度中子源装置加速器隧道人身安全联锁设备分布情况及清场搜索路线示意图

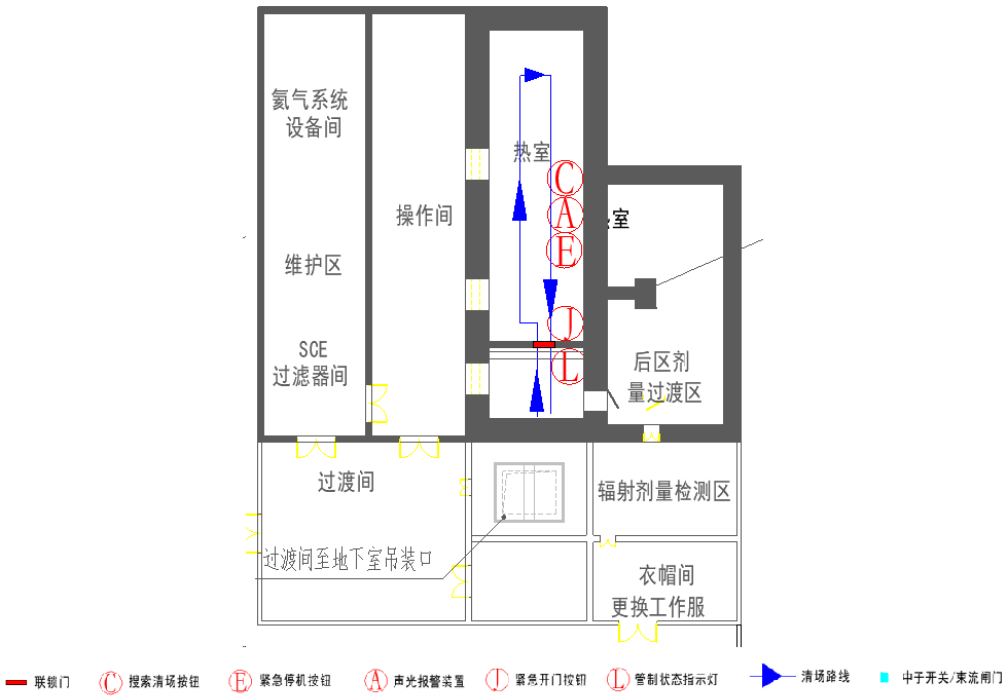


图 4-66 高亮度中子源装置靶站热室人身安全联锁设备分布情况及清场搜索路线示意图

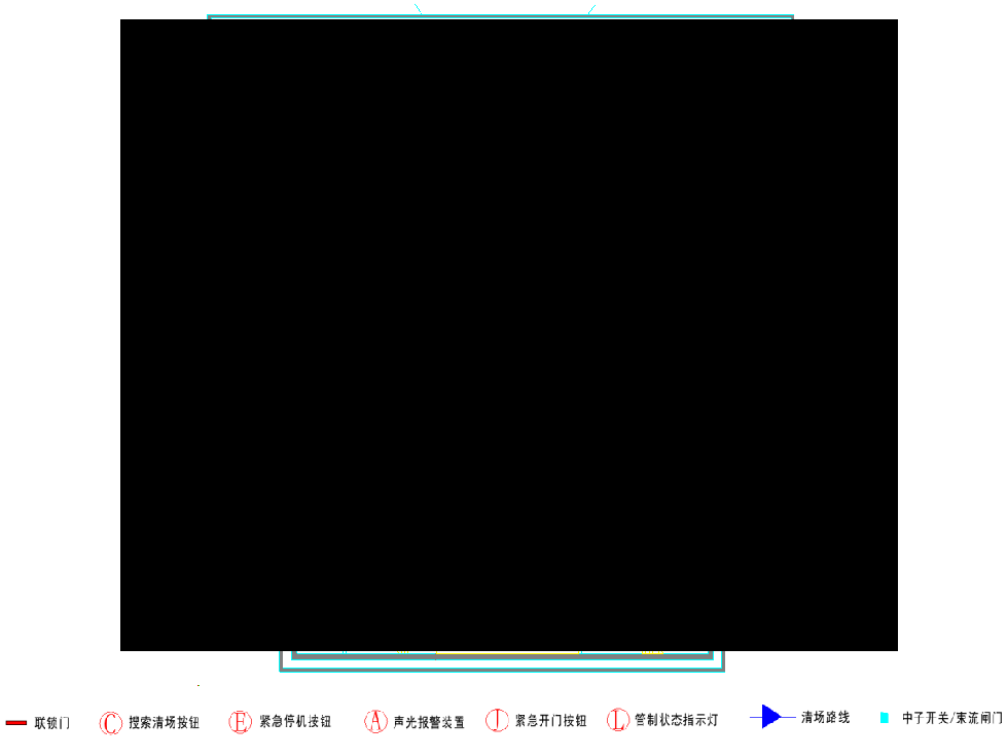


图 4-67 高亮度中子源装置靶站水冷却系统设备区人身安全联锁设备分布情况及清场搜索路线示意图

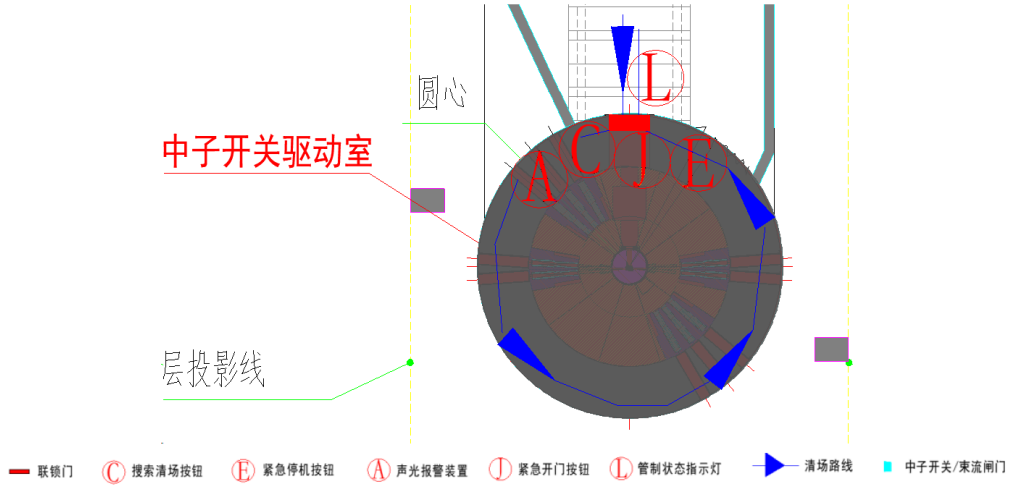


图 4-68 高亮度中子源装置靶站中子开关驱动室人身安全联锁设备分布情况及清场搜索路线示意图

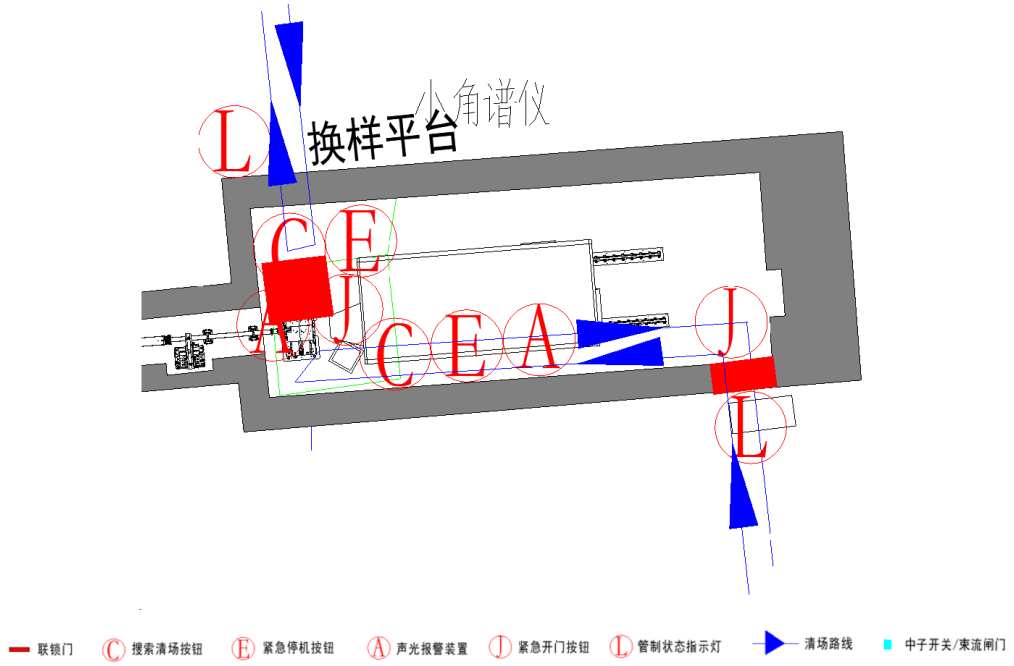


图 4-69 高通量小角中子散射仪人身安全联锁设备分布情况及清场搜索路线示意图

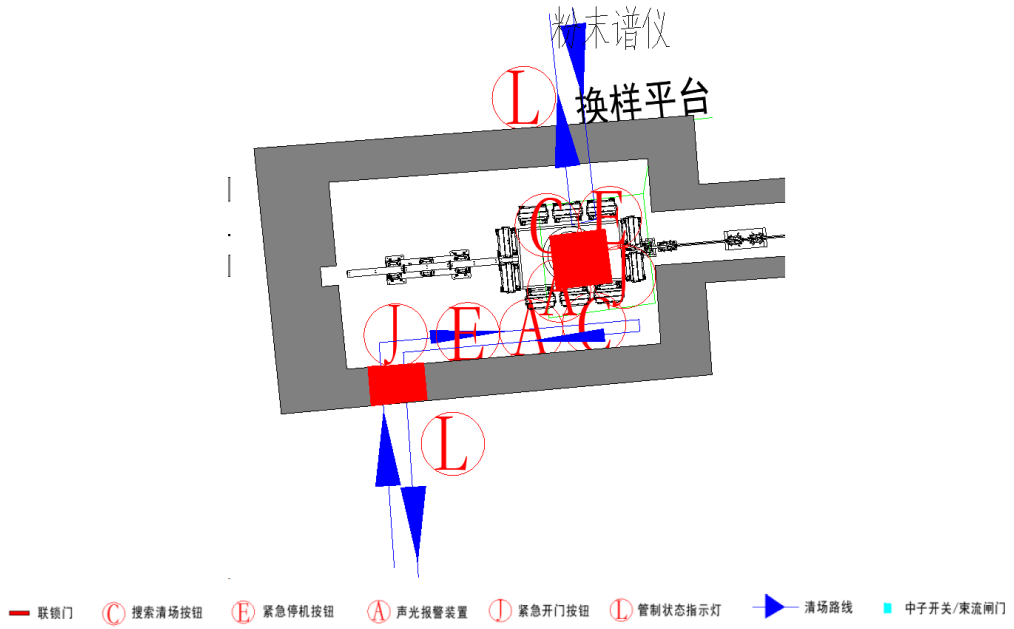


图 4-70 通用中子粉末衍射仪人身安全联锁设备分布情况及清场搜索路线示意图

4.3.4 辐射监测系统

辐射监测系统对高亮度中子源装置工作场所和周边环境的中子、γ辐射剂量进行实时在线监测。该系统由辐射剂量探测器、数据传输系统和数据采集与控制系统组成。当屏蔽体结构缺陷或束流损失异常等因素造成局部辐射剂量超标时，发出报警并提醒工作人员撤离，从而保障人身安全。同时，系统的测量数据还是评估工作人员受照射水平、验证屏蔽效果和监测加速器运行状态的重要依据。

4.3.4.1 监测点位

辐射工作场所固定式辐射监测点位如表 4-16、图 4-71~图 4-75 所示，每个监测点由一台中子探测器和γ探测器组成。

表 4-16 高亮度中子源装置辐射工作场所固定式监测点位情况

序号	主区域	监测点编号	监测点	数量
1	加速器区域	1	直线区域 1	6
		2	直线区域 2	4
2	靶站区域	3	靶站一层和二层区域	8
		4	靶站地下一层区域	4
		5	通用中子粉末衍射仪	3
		6	高通量小角中子散射仪	3

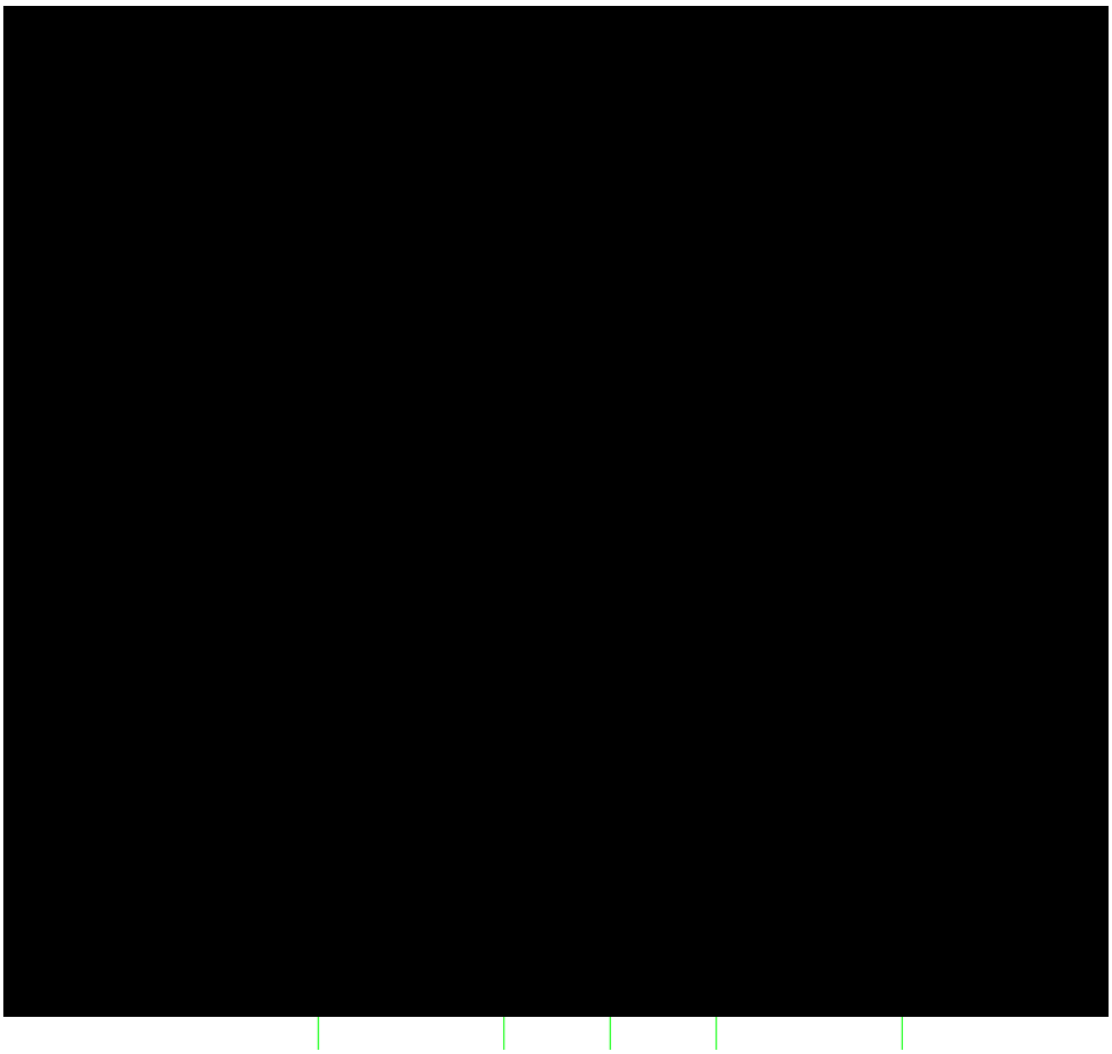


图 4-71 介观楼地下一层辐射监测点位示意图（红点为监测点位）



图 4-72 介观楼地上一层直线区域 1 辐射监测点位示意图（红点为监测点位）



图 4-73 介观楼地上一层直线区域 2 辐射监测点位示意图（红点为监测点位）



图 4-74 介观楼靶站地上一层区域辐射监测点位示意图（红点为监测点位）

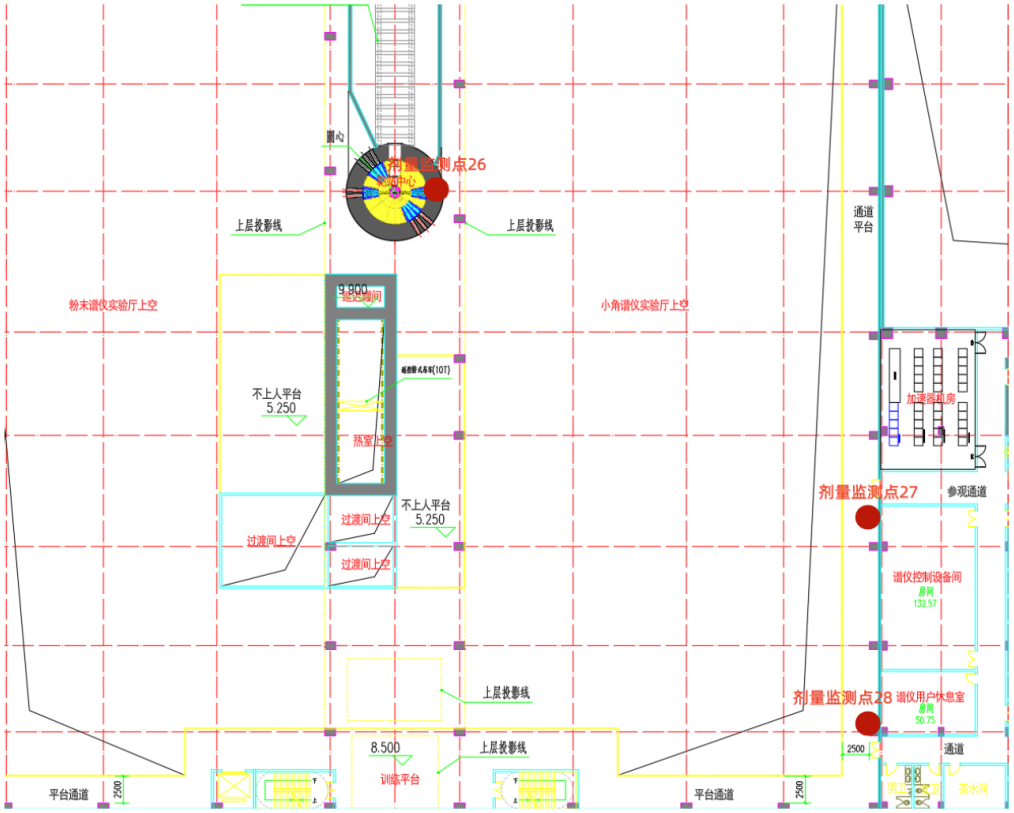


图 4-75 介观楼地上二层辐射监测点位示意图（红点为监测点位）

4.3.4.2 探测器性能

场所固定式 γ 探测器应满足的性能指标为：灵敏度：0.2-0.4nSv/pulse；测量范围：0.1μSv/h-50mSv/h；能量响应：50keV-3MeV；响应时间：6s；温度范围：-20℃-50℃；相对湿度：≤90%(40℃)；总不确定度：<15%；输入电压：220V。

场所固定式中子探测器应满足的性能指标：灵敏度：0.1-0.2nSv/pulse，8-13nSv/pulse；测量范围：0.01uSv/h~100mSv/h；能量响应：0.025eV-1GeV；耐γ场强度：1Sv/h；温度范围（-5~40℃）：<5%；相对湿度 85%（35℃）：<10%；总不确定度：<15%。

4.3.5 通风系统

直线加速器隧道、靶站、2 条谱仪以及热室等控制区均设有通风系统，具体的设计参数见表 4-17，风管走向示意见图 4-77~图 4-82。风管采用“S”型等方式穿屏蔽墙体，部分风管穿墙示意见图 4-76。

直线加速器隧道新风是从地上二层离子源厅空调机房引入到地上一层穿迷道引入隧道内，排风经隧道末端风管引入地上一层的排风中心。热室、靶站及地下一层的新风机房设置在介观楼地上四层的新风机房，风管向下引入到热室和地下一层的控制区房间内，靶站和谱仪的新风通过预埋风管引入，排风通过风管汇总至地上一层的排风中心，经排风中心过滤处理后最终引至介观楼屋顶排放。排放口高于屋面 3m，高度约为 26m。

表 4-17 高亮度中子源装置通风设计参数

区域名称	体积，m^3	送风量，m^3/h	排风量，m^3/h	换气次数，次/小时
直线加速器隧道	4389.57	正常运行：4389.57	正常运行：4389.57	正常运行：1
		停机强排：13,168.71	停机强排：13,168.71	停机强排：3
靶站	76.6	正常运行：840	正常运行：1200	正常运行：5
		停机强排：840	停机强排：1200	停机强排：5
高通量小角中子散射仪	305.9	正常运行：430	正常运行：612	正常运行：2
		停机强排：430	停机强排：612	停机强排：2
通用中子粉末衍射仪	365.9	正常运行：520	正常运行：730	正常运行：2
		停机强排：520	停机强排：730	停机强排：2
热室	595	正常运行：840	正常运行：1200	正常运行：2
	595	停机强排：2100	停机强排：3000	停机强排：5

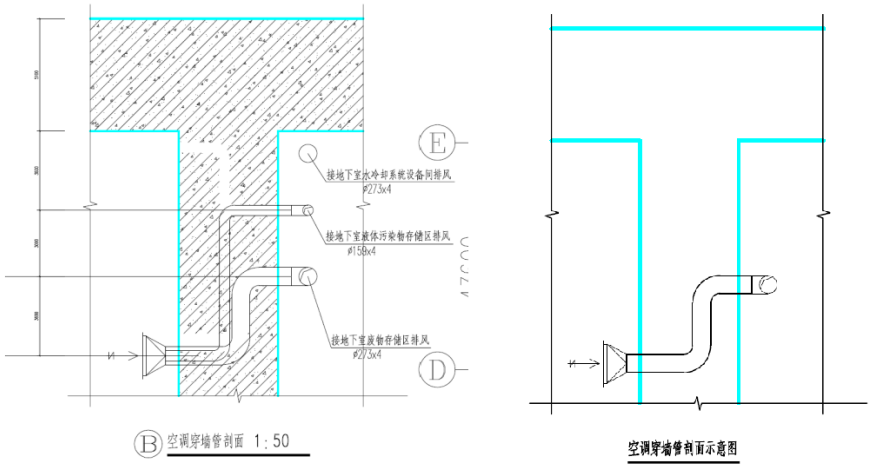


图 4-76 高亮度中子源装置部分风管穿墙示意图



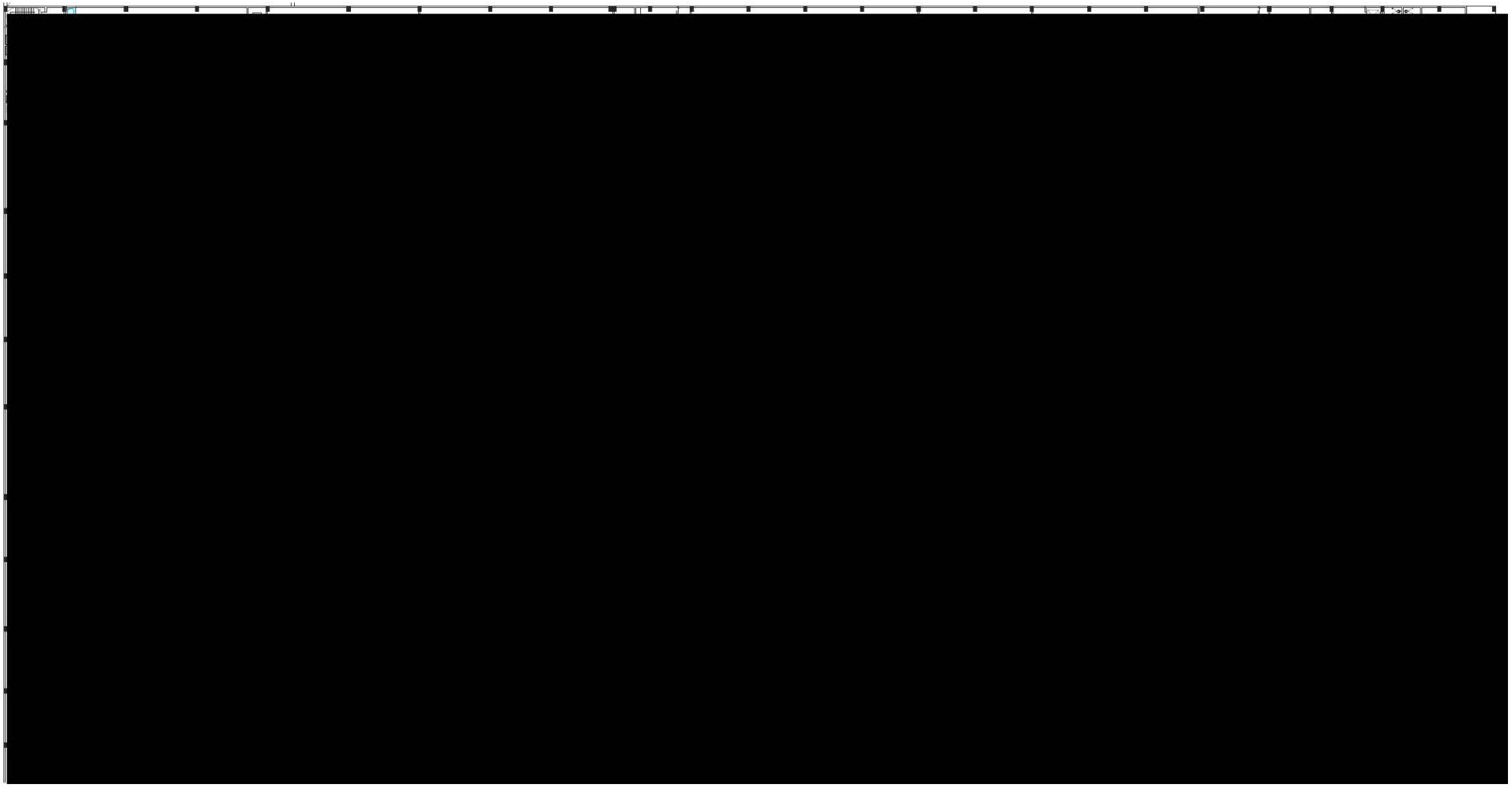
图 4-77 高亮度中子源装置地下一层通风管道走向示意图



图 4-78 高亮度中子源装置地上一层通风管道走向示意图



图 4-79 高亮度中子源装置地上二层通风管道走向示意图



图例：送风管；排风管

图 4-80 高亮度中子源装置地上三层通风管道走向示意图



图例：送风管；排风管

图 4-81 高亮度中子源装置地上四层通风管道走向示意图

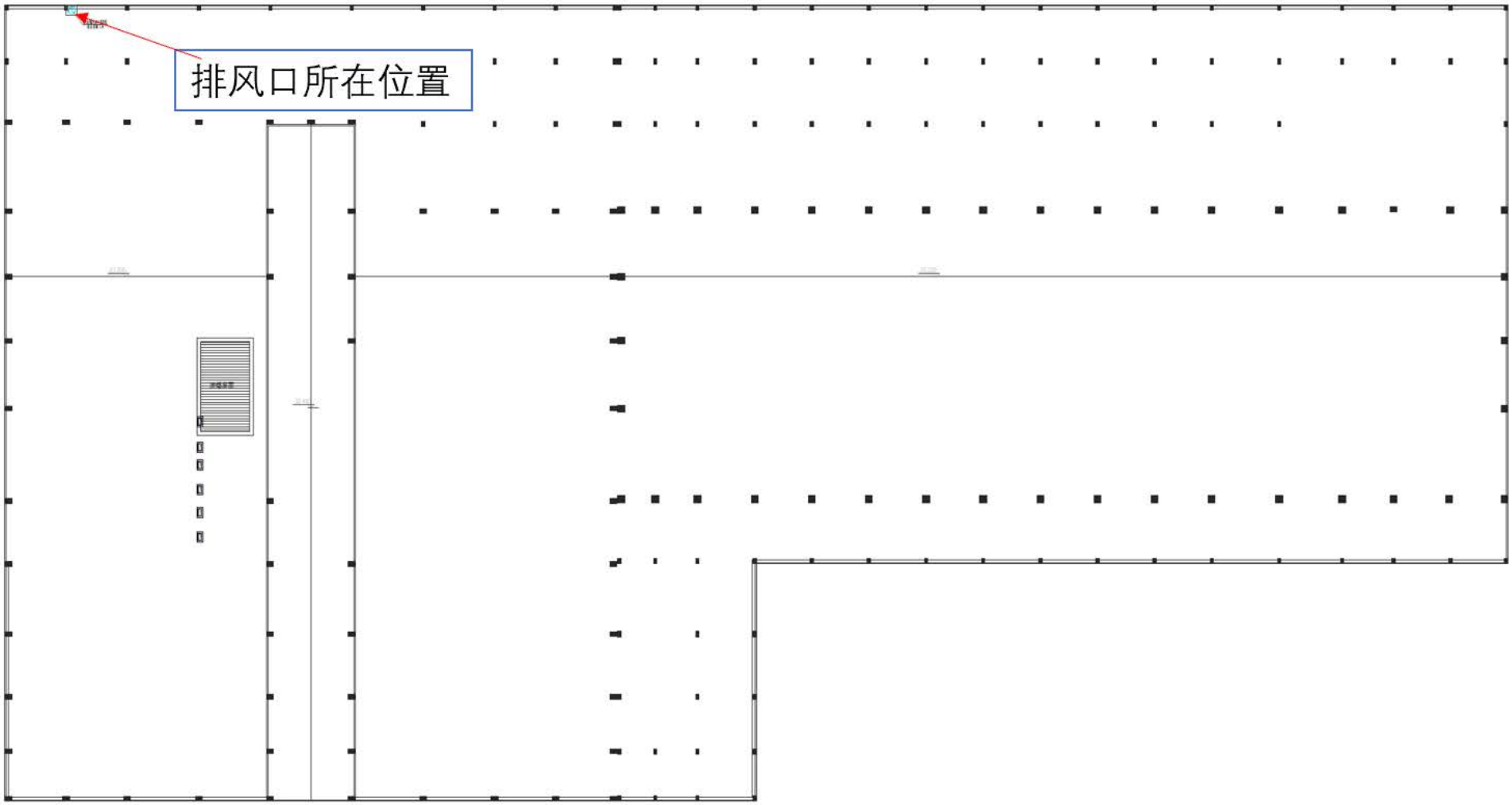


图 4-82 高亮度中子源装置排风口所在位置示意图

4.3.6 三废的治理

4.3.6.1 活化空气及其处理措施

高亮度中子源装置运行产生的气态感生放射性核素均为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。装置所在辐射工作场所均设有排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体经排风中心过滤处理后最终引至介观楼屋顶排入环境，考虑到其排入大气后的扩散和稀释，结合第五章的计算结果，其对环境的影响很小。

4.3.6.2 放射性废液及其处理措施

直线主隧道、副隧道和输运线隧道产生的活化冷却水通过地漏排到集水坑，集水坑通过潜水泵抽到地上一层废液存储间的污水罐内，设计存储容积为 $2\times10m^3$。靶站和谱仪通过地漏排至地下一层低放污水罐间，设计存储容积为 $2\times5m^3$。具体的位置示意见图 4-83 和图 4-84。

活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足“1.4.3.1 节”所列中放射性废水排放标准，经审管部门认可后方可排放。



图 4-83 地上一层集水井和废液存储间位置示意图



图 4-84 地下一层低放污水罐间位置示意图

4.3.6.3 放射性固体废物及其处理措施

地上一层放射性废物暂存厅用于存放废旧磁铁、真空管等加速器活化部件，地下一层的废物存储区放置靶站固废，包括退役靶，慢化器反射体及质子束窗等。

建设单位根据放射性固体废物的暂存情况定期委托有资质的单位对其进行测量分析，满足解控要求的放射性固体废物可回收后重复利用或作为非放射性固体废物处理，不能满足解控要求的放射性固体废物最终送交有资质单位收贮。

建设单位建立放射性固体废物台账，记录废物名称、数量、表面和 1m 处 γ 剂量率、

监测日期、去向等相关信息。

4.4 工业 CT

4.4.1 场所布局与分区

控制区：加速器室内以墙体和门等实体划分为控制区，并在分区边界处的地面相应位置以醒目标线和文字标明，提醒警告无关人员不要靠近和逗留。

监督区：工作人员的控制室、专用工位配套间、专用工位电气机房，只允许工作人员在该区域，并在分区边界处的地面相应位置以醒目标线和文字标明，提醒警告无关人员不要靠近和逗留。

本项目辐射防护分区管理如图 4-85 所示。



图 4-85 工业 CT 工作场所分区管理图

4.4.2 辐射屏蔽

本项目位于检测大厅内，检测大厅内部长 17.40m，宽 13.40m，高 10.25m，设备地坑深 2.60m，检测大厅辐射屏蔽设计如下表所示。

表 4-18 检测大厅辐射屏蔽设计

位置	屏蔽材料及其厚度	周围环境	
		一层	二层
北墙	2.8m 混凝土	专用工位配套件、送风间	刻度观察室、气瓶间、茶水间、新风机房
南墙	2.1m 混凝土	CT 调制水冷间、样品存储间、工装存储间	不上人屋面
东墙	2.1m 混凝土（屏蔽门采用 2.1m 混凝土或同等屏蔽效果的铅门）	专用工位电气机房、排风间、防护门间、控制室	不上人屋面
西墙	2.1m 混凝土	楼外空地	室外空间
迷道门	20mm 铅	控制室	——
顶板	1.8m 混凝土	——	不上人屋面
底板	1.5m 混凝土	泥土层	——

4.4.3 安全联锁系统

本项目的加速器安全联锁系统各联锁设备分布如图 4-86 所示。安全联锁设备位置、数量一览表如表 4-19 所示。其中，定期辐射监测点是巡检点位。

表 4-19 工业 CT 安全联锁设备一览表

区域名称	急停按钮	摄像头	开门按钮*	巡检按钮	固定式剂量监测点	出束状态警示
控制室	1	0	1	0	1	1
检测大厅	9	9	1	4	1	1
迷道	4	4	1	0	0	0
屏蔽体外	0	0	1	0	0	1
合计	14	13	4	4	2	3

*：本项目控制区内开门按钮均为紧急开门按钮，控制区外均为常规开门按钮。

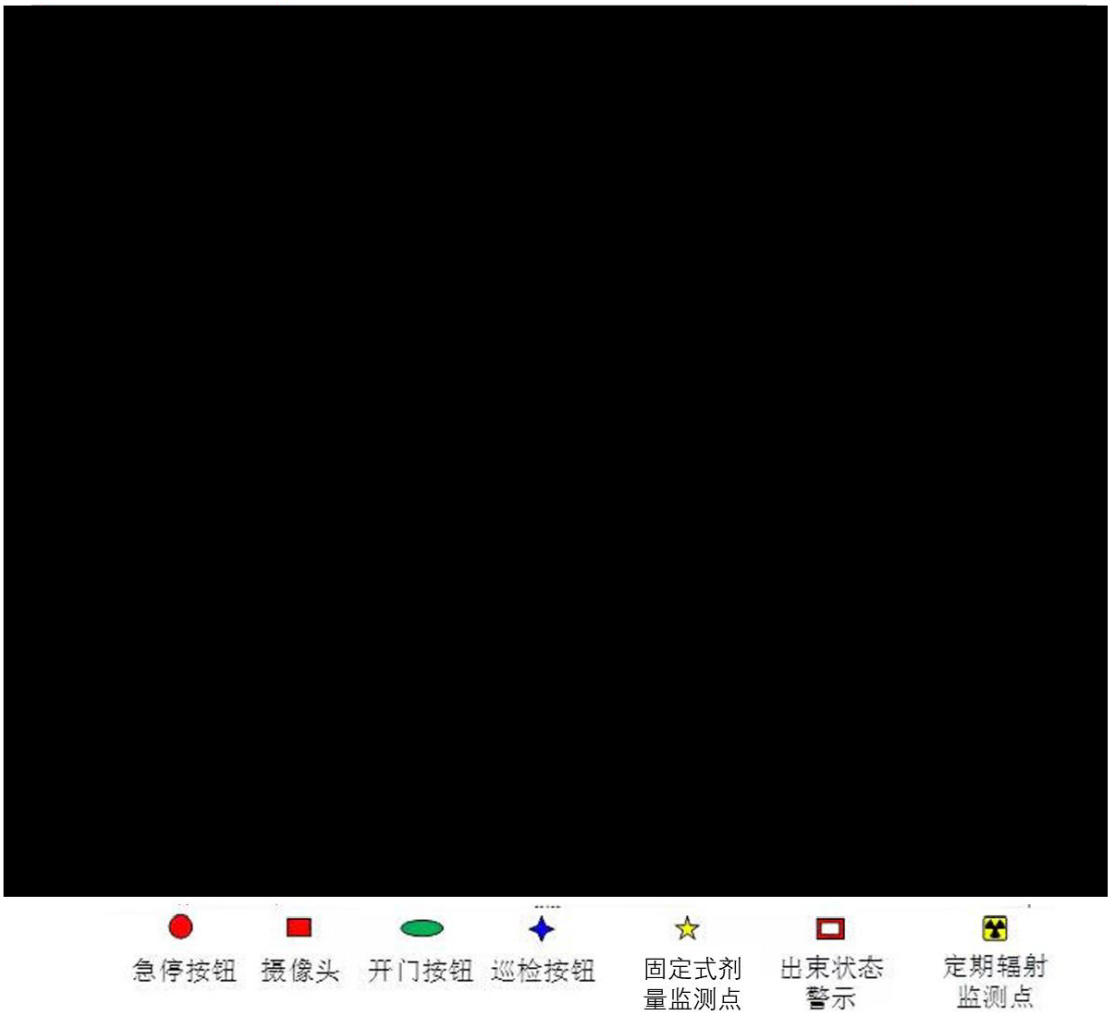


图 4-86 工业 CT 联锁设备位置示意图

4.4.3.1 设置原则

（1）实现控制区内防护门与区域内辐射剂量的双重联锁，即某一区域有束流时，工作人员不能进入该区域；而在某一区域有人时，束流不能被送到相应区域。此外，辐射监测信号也将作为安全联锁信号，当区域辐射剂量超过所设阈值时即便在无束流的状态也不允许人员进入，保障工作人员安全。

（2）最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是机器的最初始的运行功能，更好的保证在后级区域的辐射安全。

（3）失效保护：关键联锁部件采用失效保护设计，设备故障时联锁系统处于安全状态。

4.4.3.2 钥匙控制

加速器控制系统采取授权管理，通过设置密码账户登录，对不同的用户开放不同的权限等级，当操作人员下达没有使用权限的加速器指令时，加速器将不会执行相应的指令。权限等级的防护效果优于开关钥匙控制的防护效能，没有取得授权的人员无法开启加速器。

4.4.3.3 门机联锁

加速器室及靶室均设置了门-机联锁装置，即机房防护门与花瓣电子加速器高压粒子源系统联锁。当防护门处于开启状态时，加速器高压装置、粒子源系统无法开启；运行过程中防护门意外打开时，加速器高压装置、粒子源系统即刻停止工作。

4.4.3.4 紧急停机按钮

在加速器室、靶室内及其控制台人员易接触的位置分别设紧急停机按钮，并用中文进行标识。所有紧急停机按钮串联，当任意紧急停机按钮按下，加速器立即停止出束。当紧急停机按钮被按下后，重新启用时，需进行人工复位。

4.4.3.5 紧急开门按钮

在加速器室及靶室防护门出口内侧墙壁上设紧急开门按钮，并用中文进行标识。当人员误留房间内，可通过紧急开门按钮实现防护门从内部打开，进行紧急逃逸；按下紧急开门按钮的同时，加速器停止运行。

4.4.3.6 巡检开关

在加速器室及靶室内均设置巡检开关，巡检开关与加速器联锁。当机房防护门打开后，巡检开关自动复位，工作人员在关闭防护门前，需先进行巡检，并按下所有巡检开关后，机房防护门方可关闭。若任意巡检开关没有被按下，加速器将无法正常启动，同时防护门也不能正常关闭。

4.4.3.7 剂量联锁

加速器大厅均安装有固定式剂量监测系统（该系统可测量 X-γ辐射剂量率），并与防护门联锁，当剂量超过设定限值时，防护门无法从外部开启。

4.4.3.8 声光报警装置

加速器室及靶室防护门外均安装声光报警装置。在加速器出束前发出警示声音和警灯闪烁，以提醒加速器即将出束，之后警示灯显示为红色表示装置正在出束，提醒无关人员远离加速器机房。

4.4.3.9 安全联锁逻辑

安全联锁系统将各区域的急停按钮、清场按钮、通道门开关状态、出入管理设备状态、中控室区域控制盒等联系在一起，建立了完整的联锁逻辑。在出束过程中，任一联锁条件的改变都会触发联锁切断束流，以保障人员免受束流误照射。图 4-87 给出了其联锁控制逻辑。

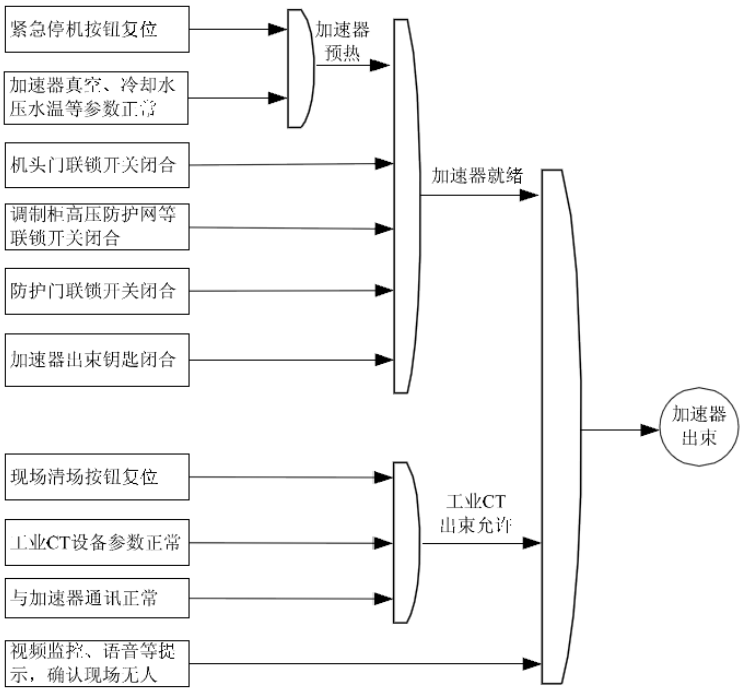


图 4-87 工业 CT 安全联锁系统控制逻辑

4.4.4 辐射监测系统

辐射监测系统的主要功能是测定加速器的工作场所和周围环境中的辐射水平，以便控制人员的活动，使其接受的辐射剂量能实现“合理达到的尽可能低（ALARA）”的原则，保证工作人员和公众的安全，并为安全联锁系统提供辐射水平信号；验证屏蔽措施的可靠性，防治辐射泄露造成环境污染。

本项目的花瓣电子加速器只涉及到 X 射线，只有在开机的时候会产生，停机的时候不再有 X 射线及其他辐射，因此在辐射剂量监测中是针对 X 射线进行实时监测，监测点位分布见图 4-86，主要包括：

加速器机房内的固定式 X/γ 射线剂量实时检测仪：一般采用电离室或者闪烁体探测器，安装于加速器机房迷道的入口处，对加速器运行过程状态进行实时的 X 射线辐射剂量率监测；监测结果接入到安全联锁系统中，若辐射剂量率监测结果高于本底辐射水平，则说明加速器正在运行之中，加速器机房的屏蔽门无法打开进入，从而进一步确保人员不会误进入。

控制室工作人员的个人辐射剂量监测：一般采用气体电离室巡检仪或者闪烁体辐射巡检仪，对加速器运行过程中工作人员点位的环境进行辐射剂量率的实时监测，确保加速器工作在正常范围内，人员的辐射安全。

环境 X、γ 射线辐射剂量仪：用于对加速器工作场所及其周边环境屏蔽体的辐射剂量率进行定期的监测，监测点位包含屏蔽墙体外距离靶点最短路径的屏蔽墙体的外表面处 30cm 处、屏蔽门及门缝四周、控制室内人员操作位等。

X、γ 环境辐射剂量仪有效量程至少为：10nSv/h~250μSv/h，能量响应至少为 50keV~3MeV，在此能量范围内的响应与对 $^{137}Cs\gamma$ 参考辐射源响应不得超过±30%。

根据本项目的辐射场特点，设计了工作场所辐射监测系统，其系统结构如图 4-88 所示。辐射监测系统由剂量监测器、数据采集单元、内部局域网、监控计算机、中心管理计算机与辐射防护数据库组成。探测器用于测量辐射水平；数据采集单元用于采集探测器的输出信号和完成信号的加权处理、剂量率显示、本地报警及通讯；内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；监控计算机用于完成监测数据的日常分析与管理，监管探测器的工作状态，向辐射安全联锁系统提供剂量报警信号；中心管理计算机用于发布剂量监测数据；辐射防护数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据，包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型(X/γ 射线)。本项目由于只涉及

X 射线的实时监测，因此只有固定式 X/γ 射线剂量仪接入到辐射监测系统和安全联锁。

辐射监测系统将与安全联锁系统进行通信，主要包括工作场所辐射监测系统及个人剂量监测系统与安全联锁系统数据通讯。相关的接口主要由软件完成，包括通讯协议。信息的通信在内部控制网上进行。当辐射控制区相关大厅内的探测器超过给定阈值后，向安全联锁系统发出报警信息，由安全联锁系统阻止人员进入相关辐射区。

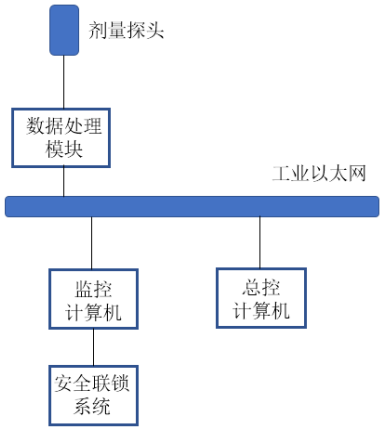


图 4-88 工作场所辐射监测系统结构

4.4.5 通风系统

加速器室及靶室的机房内设置排风系统并与加速器控制系统联锁，机房内废气由排风管道引至厂房楼顶后，经净化后汇入主排气筒排放。排风系统异常时，加速器不能开启；加速器运行过程中，若排风系统出现异常，加速器停止运行。送风系统和排风系统设计如下图所示。

本项目通风系统由送风系统和排风系统组成，其中排风系统经混凝土屏蔽墙内部北侧排风立管输运到楼顶排放，楼顶有三台风机，分别为 EF-RF-1 密闭离心风机、EF-RF-2 密闭离心风机和 EF-RF-3 密闭离心风机。其中，EF-RF-1 密闭离心风机和 EF-RF-2 密闭离心风机一用一备，排风量为 4000m^3/h；EF-RF-3 密闭离心风机排风量为 20000m^3/h。因此，总排风量为 24000m^3/h。三台排风机排出的废气汇入同一排风立管，该排风立管直径 80cm，高出屋面 3m，屋面高 12m，因此，本项目排风口高 15m。



图 4-89 工业 CT 送风系统和排风系统设计

4.4.6 三废的治理

冷却水的活化通常来源于中子，而本项目冷却水服务于高频腔，其中为运动的电子束，因此不会造成冷却水的活化。

故本项目产生的废弃物主要包括少量感生放射性气体、放射性固体废物和臭氧等有害气体。

高能工业 CT 系统旋转靶长期工作后会失效而产生废靶，废靶在电子束辐照下会有极少量的感生放射性产生，且多为短寿命核素，根据以往项目经验，辐照后距离旋转靶 20cm 处的感生放射性剂量率约为 15μSv/h，放置约 1 天后达到环境的正常本底水平（~0.1μSv/h），预计一年产生 2 个废靶。拟在辐照后放置于铅箱中，铅箱厚度 2.5cm，放置于加速器机房的角落，一段时间后剂量率满足解控要求，解控作为非放射性固废处理。

高能工业 CT 系统在运行时会发射 X 射线，从而产生少量感生放射性气体和臭氧、氮氧化物等有害气体，经通风系统排出。

4.5 服务期满后的环境保护措施

光源、离子加速器和高亮度中子源装置这类可能产生放射性污染的射线装置因搬迁等原因不再使用时，建设单位应编制相应的退役方案、制定退役目标，确保放射性废物得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

5 环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

本项目施工期还需要进行辐射防护工程建设、内部装修及设备安装等。

1、声环境影响分析

本项目施工期较短，且施工过程主要在园区内。施工期拟采取以下噪声防治措施：

①合理安排施工时间，中午及夜间停止施工，尽可能避免大量高噪声设备同时施工。

②合理布局施工现场，避免在同一地点安排大量高噪声设备，以避免局部声级过高。

③降低设备声级，选用低噪声设备和工艺，可从根本上降低源强，同时要加强检查、维护和保养机械设备，保持润滑，紧固各部件，减少运行震动噪声。整体设备应安放稳固，并与地面保持良好接触，有条件的应使用减振机座，降低噪声。

④减少施工交通噪声，施工期间运输车辆应尽量减少夜间运输量，限制大型载重车的车速。

通过采取以上措施，对周边环境影响较小。

2、水环境影响分析

施工期废水主要为施工废水和施工人员的生活污水。施工废水上清水重复利用，淤泥集中堆放后期用作回填土，施工人员生活污水主要为洗涤废水和粪便污水，本项目施工期生活污水排入市政污水管网。不直接外排环境。

3、固体废物

本项目固体废物主要为施工期间人员日常生活产生的生活垃圾和施工垃圾，生活垃圾统一放至生活垃圾存放点，由环卫部门定期清运。施工垃圾对弃渣处置必须坚持“先挡后弃”。其次将建筑垃圾分类，尽量回收其中尚可利用的部分建筑材料，对没有利用价值的废弃物运交由环卫部门清运。

4、大气环境影响分析

本项目在建设施工期各种施工将产生地面扬尘，另外机械和运输车辆作业时排放废气和扬尘，但这些方面的影响仅局限在施工场地内，且产生量小，对周边大气环境影响较小。

经采取以上措施，施工期对周围环境影响较小。

5.2 运行阶段对环境的影响

5.2.1 场所辐射水平

5.2.1.1 微观表征子系统（光源）

本次采用 Shield11 软件结合基于蒙特卡罗方法的粒子输运软件 FLUKA 软件进行计算。计算时的输入条件如下：

（1）束流损失参数：束流损失参数见表 3-27 至表 3-30；束损点位编号对应位置见图 3-72，所有束流损失点位的高度均为距离地板 1.3m。

（2）屏蔽体参数：隧道、光束线站的屏蔽体材质、厚度分别见表 4-1、表 4-2；屏蔽示意图见图 4-2~图 4-6。

5.2.1.1.1 加速器系统各区域建模图

本项目光源装置所在隧道包含一个电子直线加速器隧道、一个增强器-储存环隧道，具体划分为直线段区域、增强器-储存环注入区域、增强器-储存环非注入区域，具体如图 5-1 所示，描述如下：

（1）直线段区域：包含电子直线加速段和直线引出低能传输线段；

（2）增强器-储存环注入区域：增强器和储存环隧道区域包含直线引出和增强器注入的低能束流传输线、增强器引出和储存环注入的高能束流传输线以及包含部分增强器和储存环区域；

（3）增强器-储存环非注入区域：增强器和储存环隧道区域包含仅包含增强器和储存环部分以及隧道迷道出入口区域。

各区域建模图见图 5-2 至图 5-10。



图 5-1 光源各区域划分图

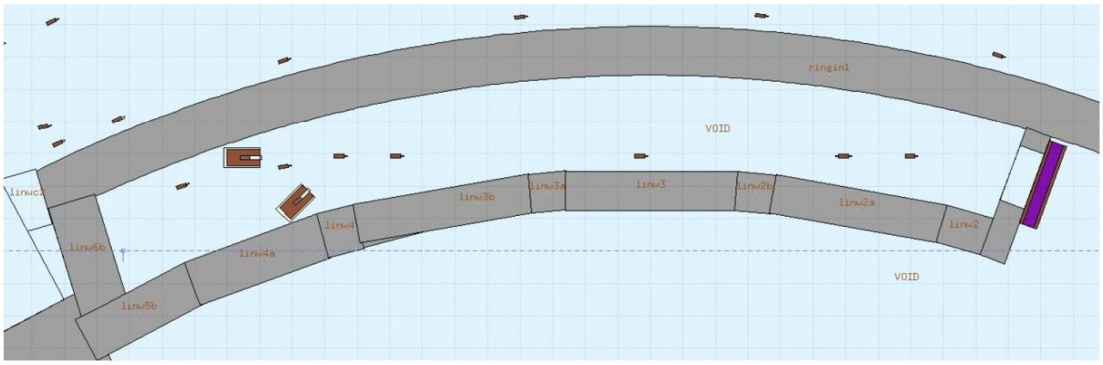


图 5-2 光源直线隧道建模俯视图



图 5-3 光源直线隧道建模侧视图

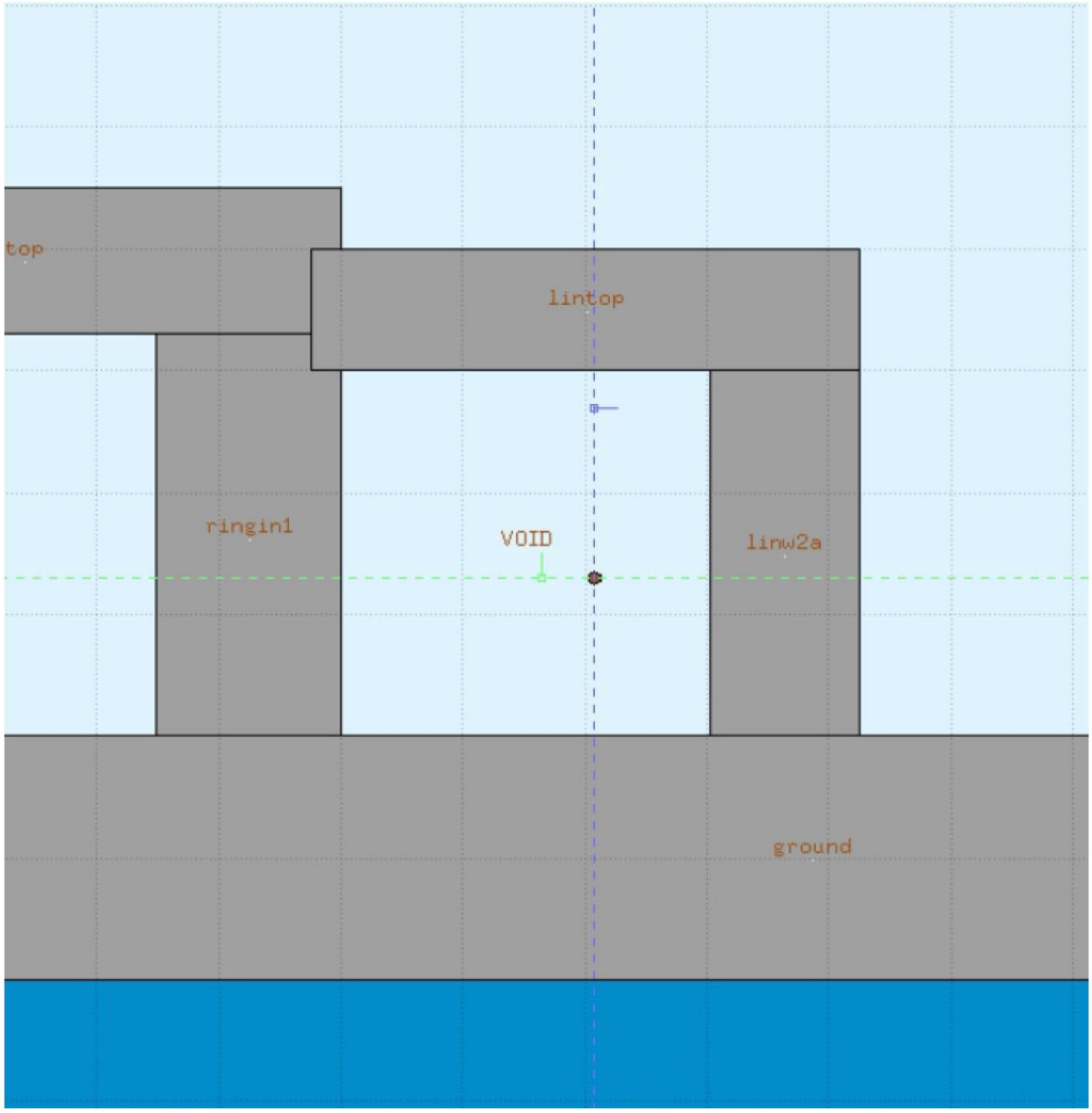


图 5-4 光源直线隧道建模剖面图

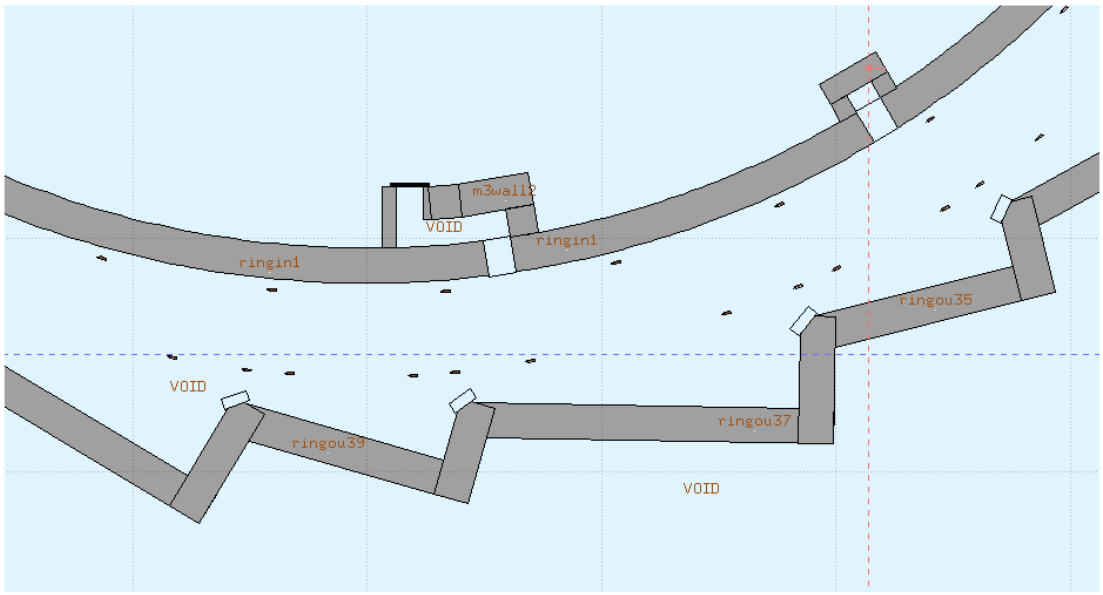


图 5-5 光源增强器-储存环隧道非注入区建模俯视图

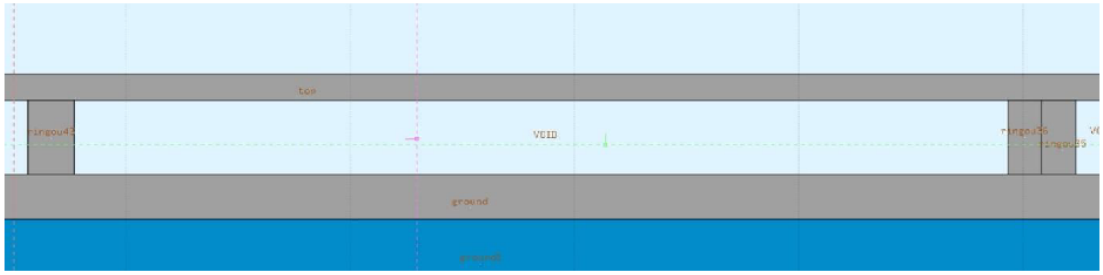


图 5-6 光源增强器-储存环隧道非注入区建模侧视图

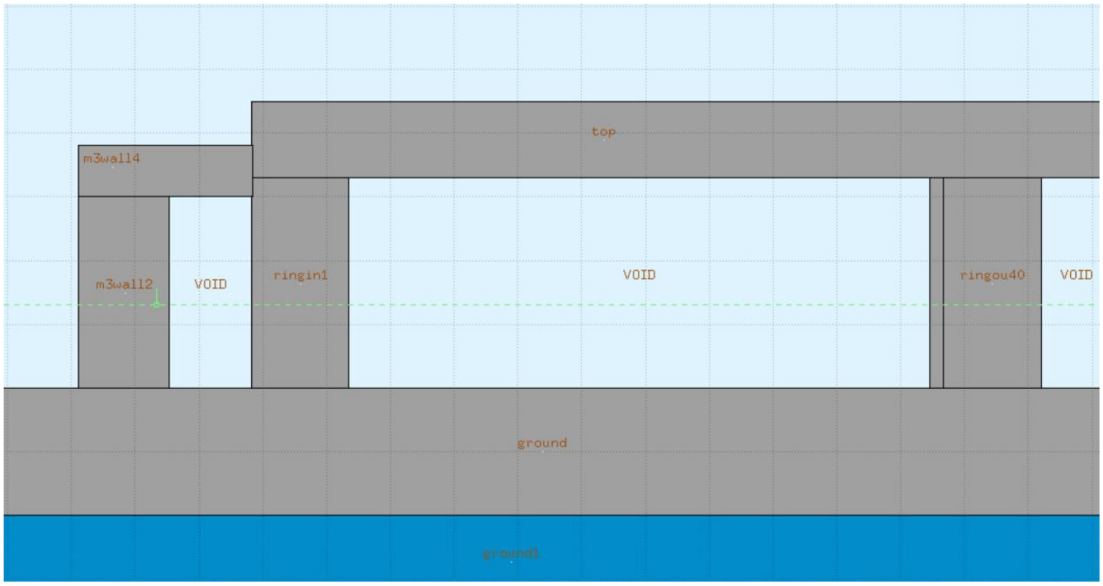


图 5-7 光源增强器-储存环隧道非注入区建模剖面图

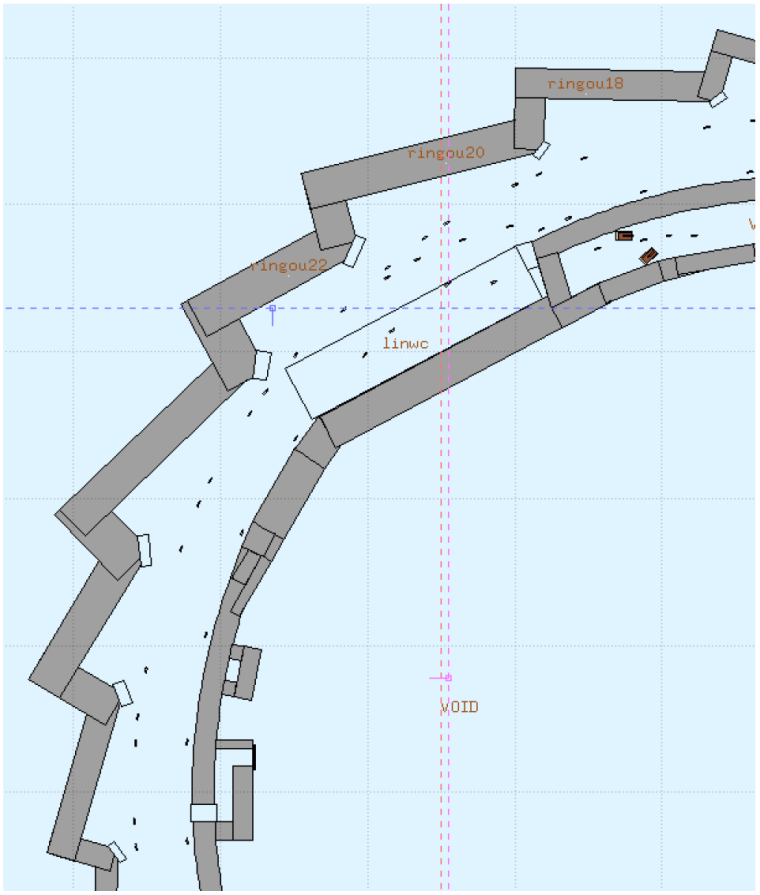


图 5-8 光源增强器-储存环隧道注入区建模俯视图

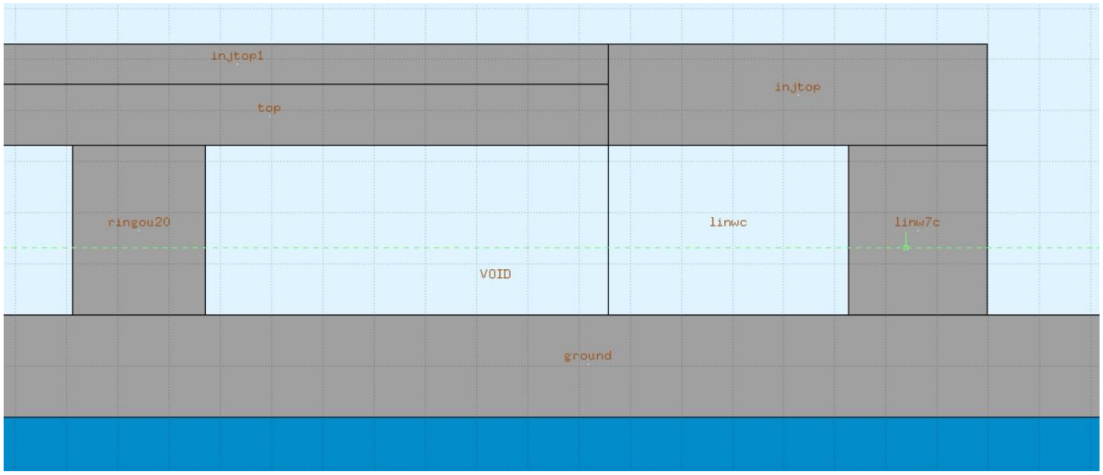


图 5-9 光源增强器-储存环隧道注入区建模侧视图

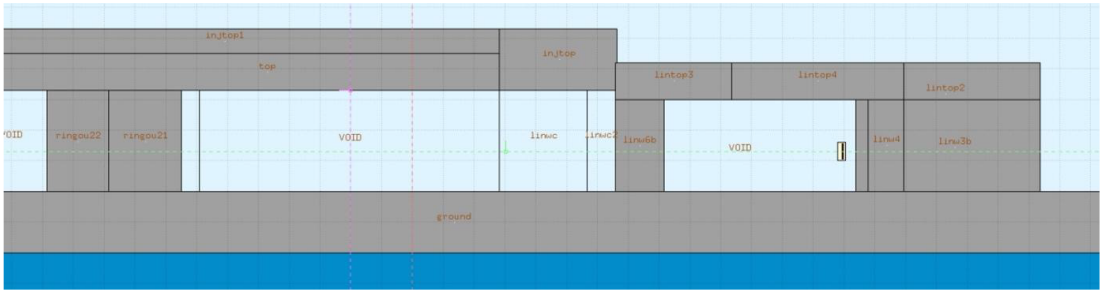


图 5-10 光源增强器-储存环隧道注入区建模剖面图

5.2.1.1.2 加速器系统屏蔽墙体和门外瞬发剂量率分布图和计算结果

（1） 直线隧道

表 5-1 光源直线段区域屏蔽体外剂量率计算结果

屏蔽体名称	屏蔽体编号	周围环境	剂量率控制水平，μSv/h	剂量率计算结果，μSv/h
前端墙	LW1	技术走廊	≤10	0.90
加速段侧墙	LW2	技术走廊	≤10	0.70
引出段侧墙	LW3	技术走廊	≤10	0.15
末端墙	LW4	增强器-储存环隧道	≤10	0.62
加速段顶板	LT1	屋面	≤10	0.78
引出段顶板	LT2	屋面	≤10	1.31
屏蔽门外	SD1	技术走廊	≤10	0.35

1) 直线隧道工况 1：直线段加速束流并偏向 0 度角废束桶工况

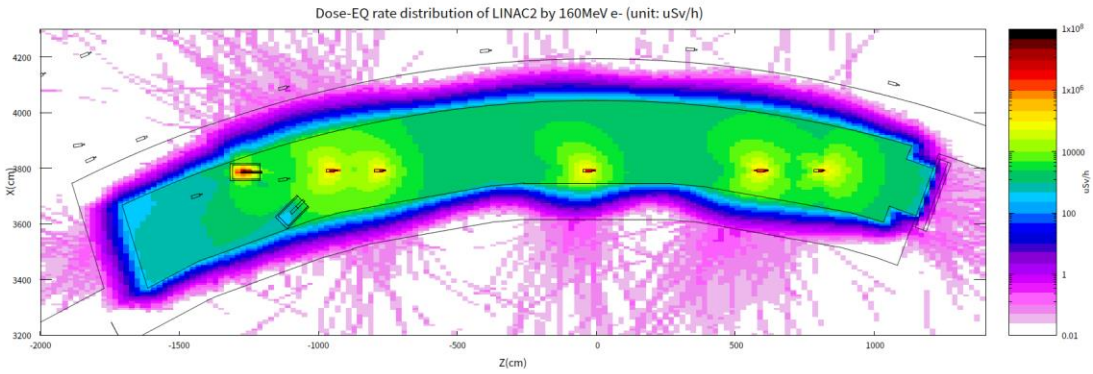


图 5-11 光源直线隧道工况 1 隧道辐射剂量率分布图

2) 直线隧道工况 2：直线段加速束流并偏向 45 度角废束桶工况

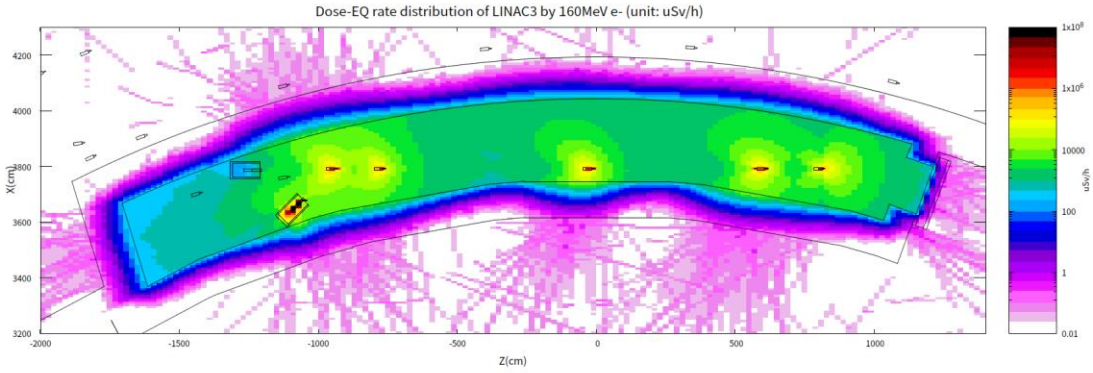


图 5-12 光源直线隧道工况 2 隧道辐射剂量率分布图

3) 直线隧道工况 3：直线段加速束流并引出工况

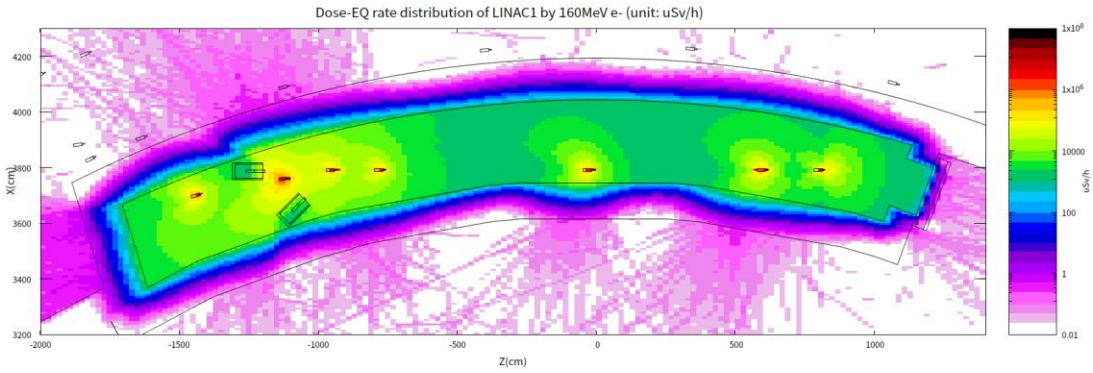


图 5-13 光源直线隧道工况 3 隧道辐射剂量率分布图

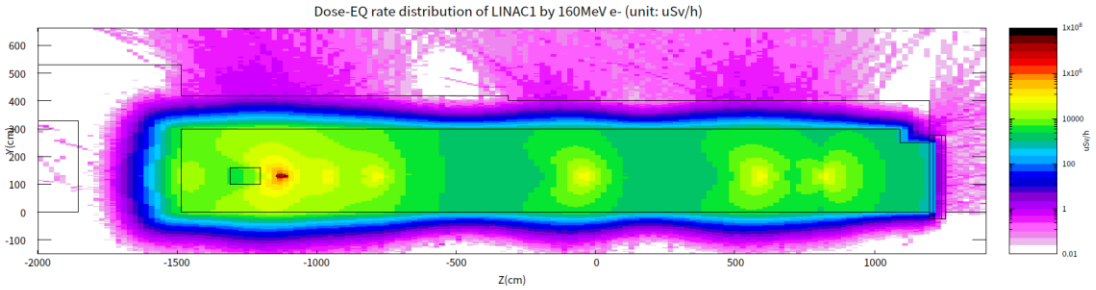


图 5-14 光源直线隧道工况 3 隧道辐射剂量率分布剖面图

（2） 增强器-储存环隧道非注入区

表 5-2 光源增强器—储存环非注入区域屏蔽体外剂量率计算结果

屏蔽体名称	屏蔽体编号	周围环境	剂量率控制水平，μSv/h	剂量率计算结果，μSv/h
内侧墙	CW1	技术走廊	≤10	0.38
长侧墙	NW1	实验大厅	≤10	0.14
短侧墙	NW2	实验大厅	≤10	0.16
锯齿墙 1	NS1	实验大厅	≤10	0.23
锯齿墙 2	NS2	实验大厅	≤10	0.35
顶板	ST1	屋面	≤10	0.33
迷道墙	—	技术走廊	≤10	0.26
迷道屏蔽门外	—	技术走廊	≤10	0.06

表 5-3 光源储存环—增强器非注入区单次事故束流损失屏蔽体外剂量率计算结果

屏蔽体名称	屏蔽体编号	周围环境	单次事故假设类型	剂量率控制水平，μSv/h	剂量率计算结果，μSv/h
内侧墙	CW1	技术走廊	储存环全部丢束	≤10	0.35
外侧墙	NW1/2	实验大厅	储存环全部丢束	≤10	1.42
迷道侧墙	—	技术走廊	储存环全部丢束	≤10	0.19
顶板	ST1	屋面	储存环全部丢束	≤10	1.53
内侧墙	CW1	技术走廊	增强器丢束	≤10	0.021
迷道侧墙	—	技术走廊	增强器丢束	≤10	0.0035
顶板	ST1	屋面	增强器丢束	≤10	0.013

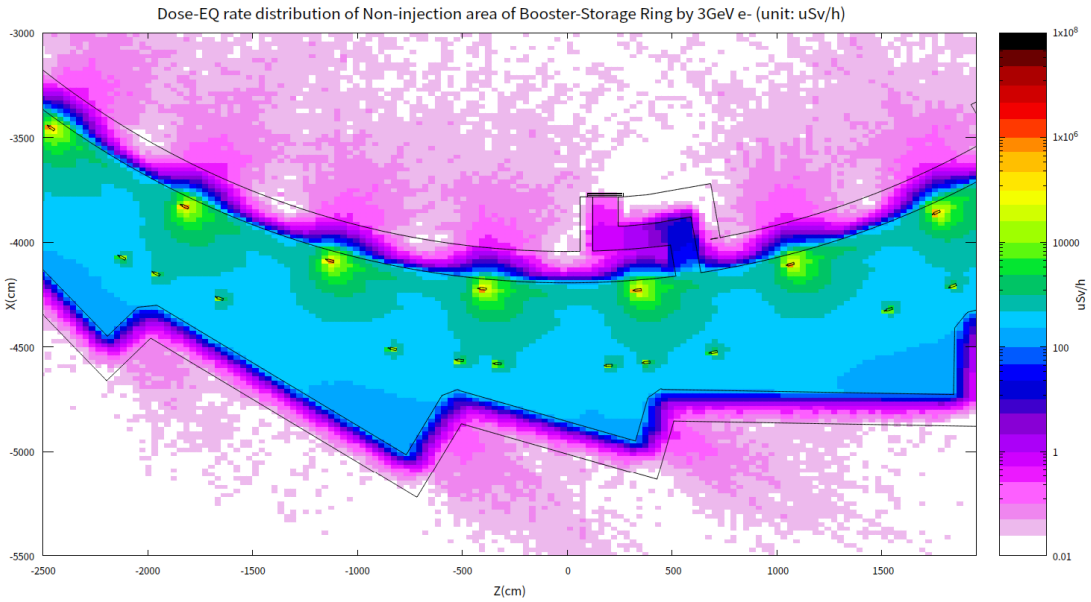


图 5-15 光源增强器-储存环隧道非注入区隧道辐射剂量率分布图

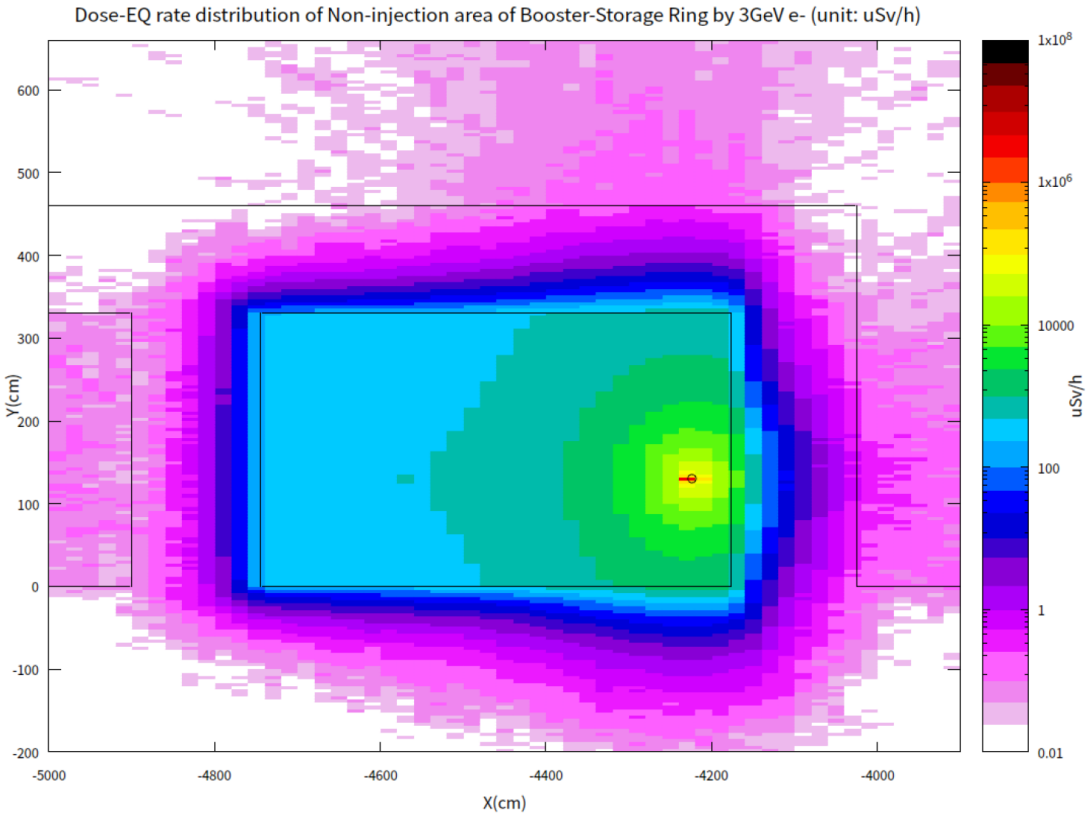


图 5-16 光源增强器-储存环隧道非注入区隧道辐射剂量率剖面分布图

（3） 增强器-储存环隧道注入区

表 5-4 光源增强器—储存环注入区域主体屏蔽设计结果

屏蔽体名称	屏蔽体编号	周围环境	剂量率控制水平，μSv/h	剂量率计算结果，μSv/h
注入区内侧墙	CW1	技术走廊	≤10	0.86
注入区外侧墙 1	SW1	实验大厅	≤10	0.62
注入区外侧墙 2	SW2	实验大厅	≤10	0.57
注入区外侧墙 3	SW3	实验大厅	≤10	0.12
注入区外侧墙 4	SW4	实验大厅	≤10	0.26
注入区外侧墙 5	SW5	实验大厅	≤10	0.25
注入区外侧墙 6	SW6	实验大厅	≤10	0.28
注入区锯齿墙 1	SS1	实验大厅	≤10	0.62
注入区锯齿墙 2	SS2	实验大厅	≤10	0.12
注入区锯齿墙 3	SS3	实验大厅	≤10	0.20
注入区锯齿墙 4	SS4	实验大厅	≤10	0.25
注入区锯齿墙 5	SS5	实验大厅	≤10	0.75
注入区锯齿墙 6	SS6	实验大厅	≤10	0.25
注入区隧道顶板	ST2	屋面	≤10	2.20

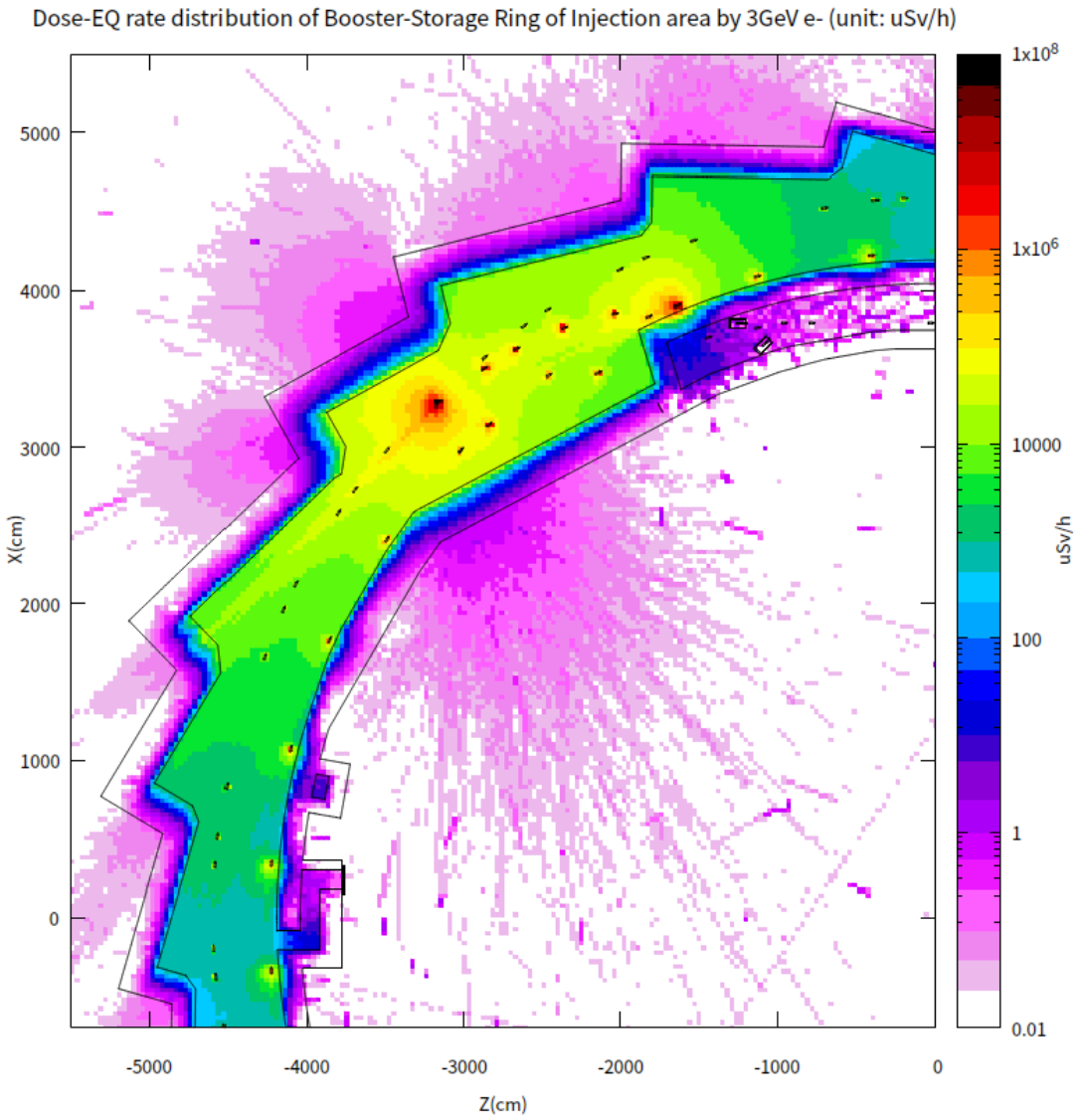


图 5-17 光源增强器-储存环隧道注入区隧道辐射剂量率分布图

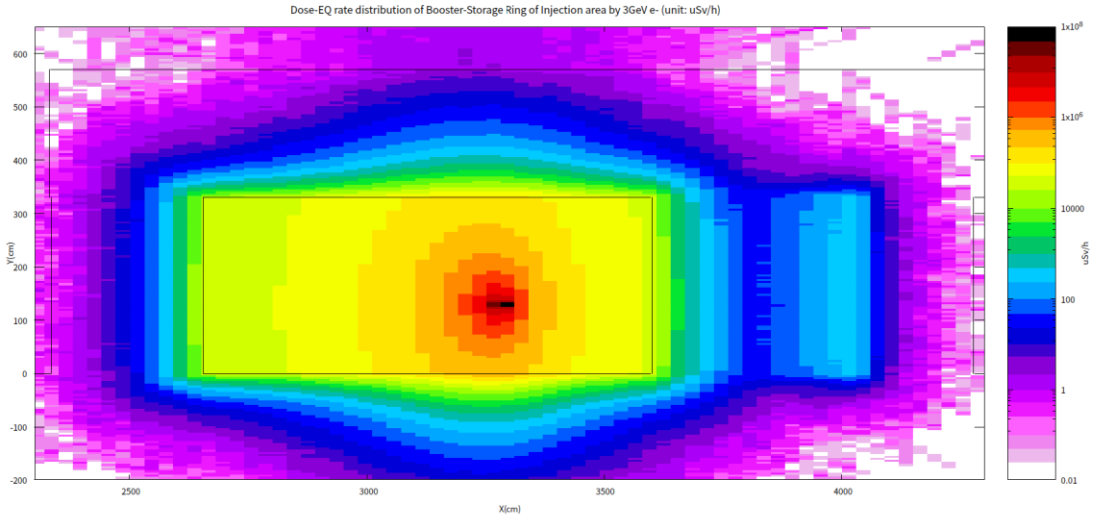


图 5-18 光源增强器-储存环隧道注入区隧道辐射剂量率分布剖面图

（4） 小结

根据计算结果，光源加速器隧道各区域屏蔽体外剂量率均满足剂量率控制水平。屏蔽墙外剂量率最大值为 0.86μSv/h（位于注入区内侧墙 CW2 外），隧道顶板外剂量率最大值为 2.20μSv/h（位于注入区隧道顶板 ST2 外）。

表 5-5 光源加速器隧道各区域屏蔽体外剂量率计算结果汇总

区域	屏蔽墙名称	屏蔽体编号	周围环境	剂量率控制水平，μSv/h	剂量率计算结果，μSv/h
直线隧道	前端墙	LW1	技术走廊	≤10	0.90
	加速段侧墙	LW2	技术走廊	≤10	0.70
	引出段侧墙	LW3	技术走廊	≤10	0.15
	末端墙	LW4	增强器-储存环隧道	≤10	0.62
	加速段顶板	LT1	屋面	≤10	0.78
	引出段顶板	LT2	屋面	≤10	1.31
	屏蔽门	SD1	技术走廊	≤10	0.35
增强器—储存环隧道非注入区	内侧墙	CW1	技术走廊	≤10	0.38
	长侧墙	NW1	实验大厅	≤10	0.14
	短侧墙	NW2	实验大厅	≤10	0.16
	锯齿墙 1	NS1	实验大厅	≤10	0.23
	锯齿墙 2	NS2	实验大厅	≤10	0.35
	隧道顶板	ST1	屋面	≤10	0.33
	迷道墙	—	技术走廊	≤10	0.26
	迷道屏蔽门	SD2~SD4	技术走廊	≤10	0.06

区域	屏蔽墙名称	屏蔽体编号	周围环境	剂量率控制水平，μSv/h	剂量率计算结果，μSv/h
增强器—储存环隧道注入区	注入区内侧墙	CW2	技术走廊	≤10	0.86
	注入区外侧墙 1	SW1	实验大厅	≤10	0.62
	注入区外侧墙 2	SW2	实验大厅	≤10	0.57
	注入区外侧墙 3	SW3	实验大厅	≤10	0.12
	注入区外侧墙 4	SW4	实验大厅	≤10	0.26
	注入区外侧墙 5	SW5	实验大厅	≤10	0.25
	注入区外侧墙 6	SW6	实验大厅	≤10	0.28
	注入区锯齿墙 1	SS1	实验大厅	≤10	0.62
	注入区锯齿墙 2	SS2	实验大厅	≤10	0.12
	注入区锯齿墙 3	SS3	实验大厅	≤10	0.20
	注入区锯齿墙 4	SS4	实验大厅	≤10	0.25
	注入区锯齿墙 5	SS5	实验大厅	≤10	0.75
	注入区锯齿墙 6	SS6	实验大厅	≤10	0.25
	注入区隧道顶板	ST2	屋面	≤10	2.20

5.2.1.1.3 加速器系统主要穿墙孔洞外的瞬发剂量率分布图和计算结果

根据计算结果，光源加速器隧道主要穿墙孔洞外剂量率均满足剂量率控制水平。穿墙孔洞外剂量率最大值为 1.40μSv/h（位于增强器-储存环隧道非注入区风管孔的孔洞屏蔽体顶部）。

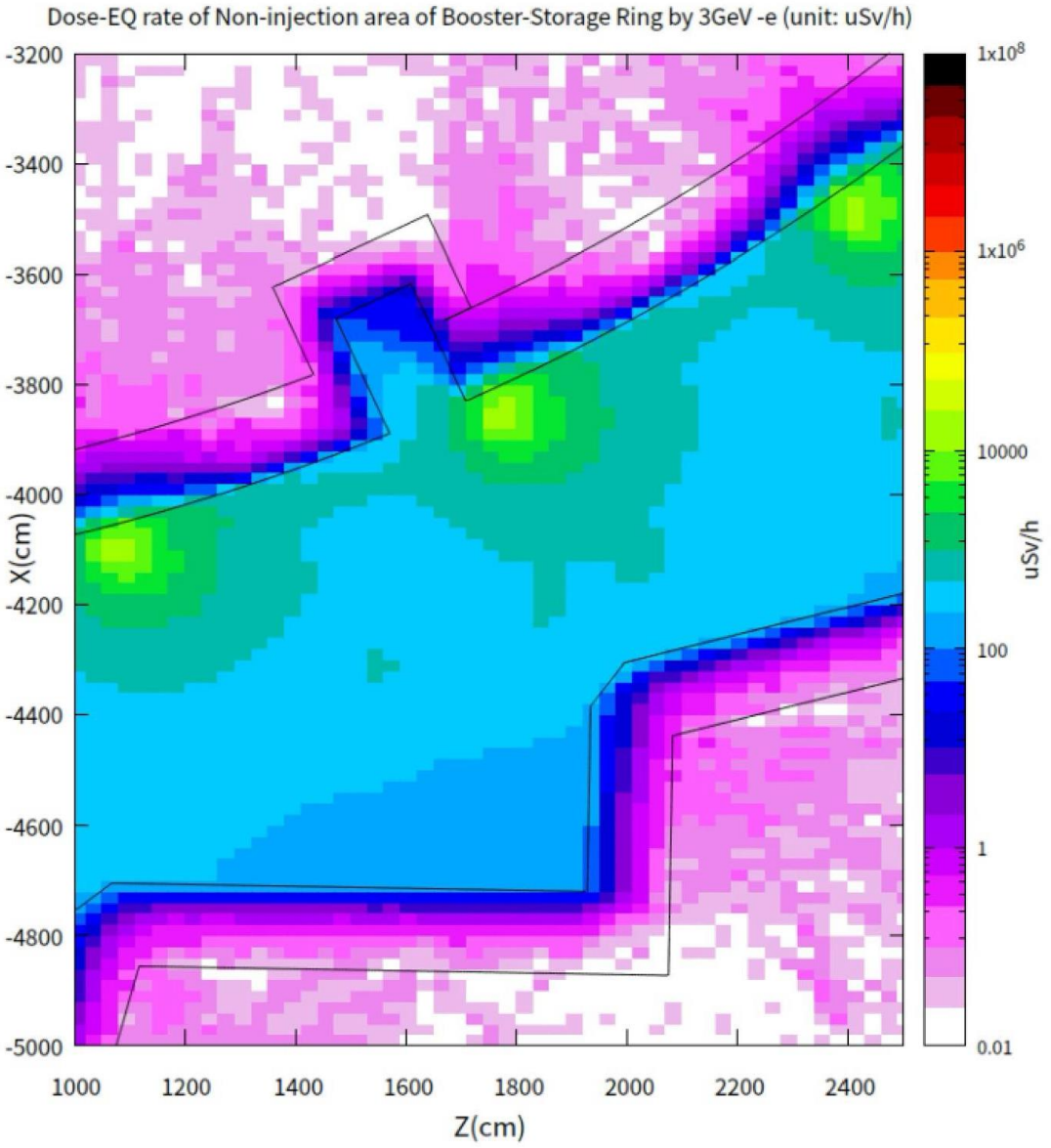


图 5-19 增强器-储存环隧道非注入区风管孔辐射剂量率分布平面图

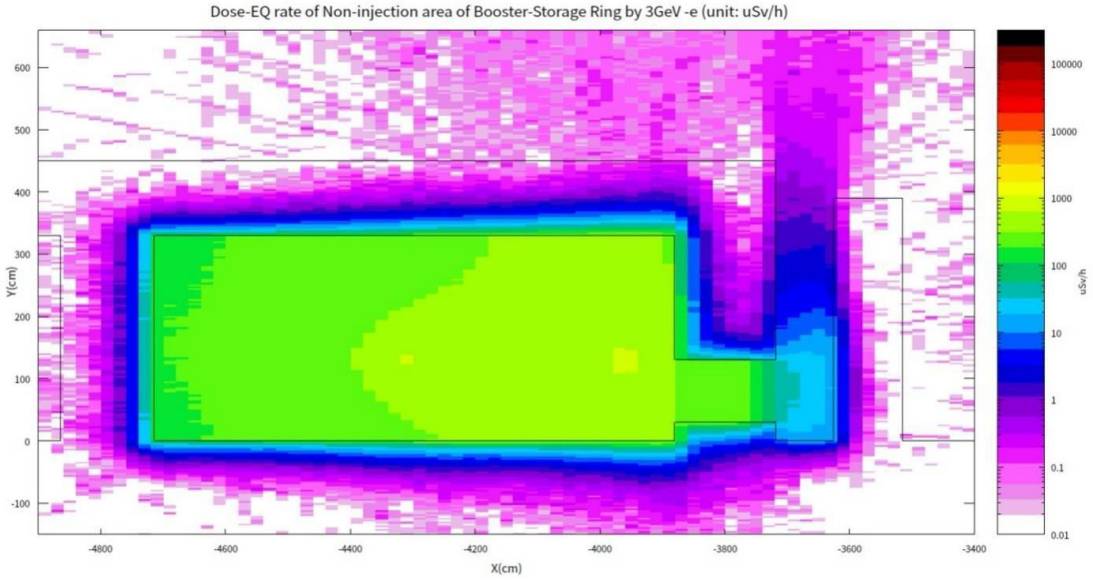


图 5-20 增强器-储存环隧道非注入区风管孔辐射剂量率分布剖面图

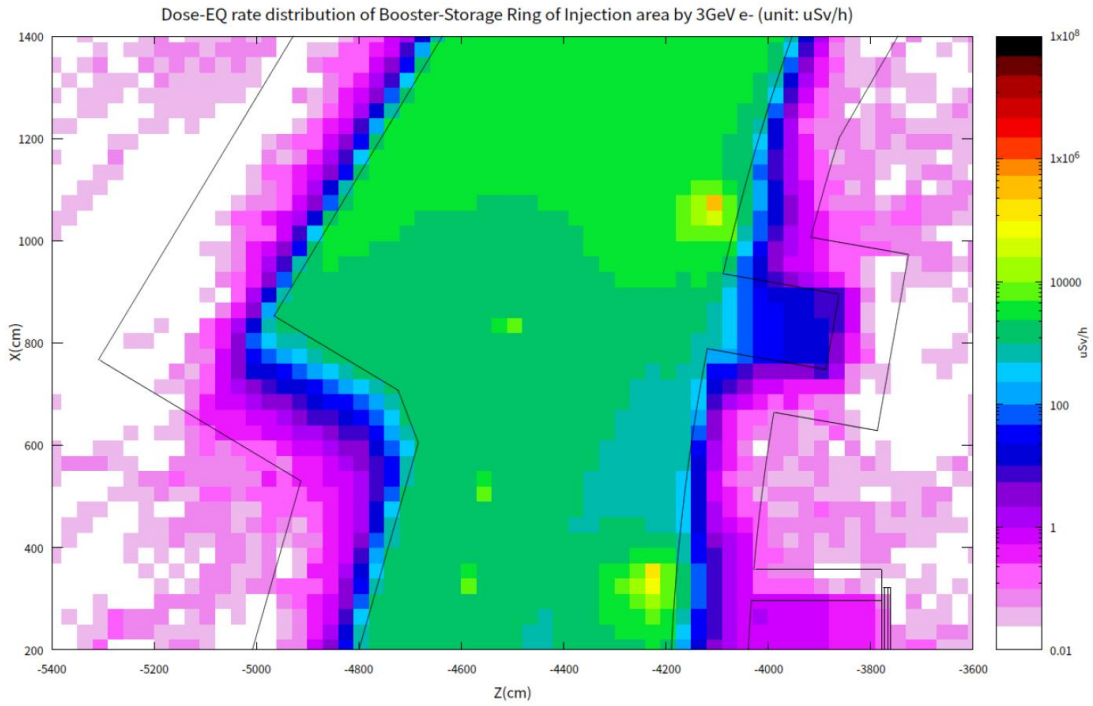


图 5-21 增强器-储存环隧道注入区风管孔辐射剂量率分布平面图

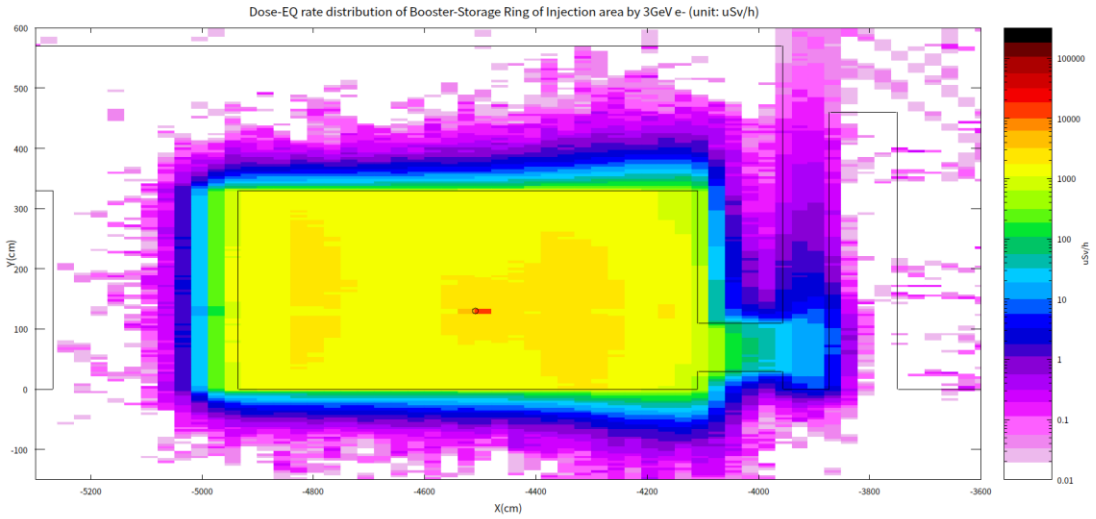


图 5-22 增强器-储存环隧道注入区风管孔辐射剂量率分布剖面图

表 5-6 增强器-储存环区域风管孔屏蔽体外剂量率计算结果

孔洞名称	孔洞编号	关注点位	剂量率控制水平，μSv/h	剂量率计算结果，μSv/h
增强器-储存环隧道非注入区风管孔	FG1~5	孔洞屏蔽体周边	≤10	0.33
		孔洞屏蔽体顶部	≤10	1.40
增强器-储存环隧道注入区风管孔	FG6	孔洞屏蔽体周边	≤10	0.35
		孔洞屏蔽体顶部	≤10	0.80

5.2.1.1.4 加速器系统控制区内活化部件周围剩余剂量率分布图和计算结果

直线隧道废束桶：直线隧道内 0 度和 45 度角废束桶的加速器运行工况和束流损失参数都是相同的，所以两个废束桶所的周围剩余剂量率分布情况相同。

表 5-7 活化部件周围剂量率计算参数表

部件	能量	束损（p/s）	运行工况	材质
直线隧道 0 度或 45 度角废束桶	160MeV	6.24E+10	连续运行 4000 小时（1 年，基于年平均使用时间参数）	废束桶内层为直径 10cm，厚度 30cm 的石墨圆柱体；中间层为厚度 20cm，长度 100cm 的铁长方体；外层为厚度 5cm，长度 110cm 的聚乙烯长方体。
低能线刮束器	160MeV	1.2384E+10	连续运行 1 年，每年 7000 小时	半径 5cm，长度 30.48cm，刮束器主体材质为：钨铜合金（85%钨 +15%铜），密度大约为： 17.7g/cm^3
高能线刮束器	3.0GeV	1.496E+9	连续运行 1 年，每年 7000 小时	半径 5cm，长度 30.48cm，刮束器主体材质为：钨铜合金（85%钨 +15%铜），密度大约为： 17.7g/cm^3
增强器弯铁	3.0GeV	7.1E+8	连续运行 1 年，每年 7000 小时	标准靶 半径 5cm，长度 30.48cm，材质为：铁（密度：7.8g/cm^3）

废束桶具体结构如下图所示。

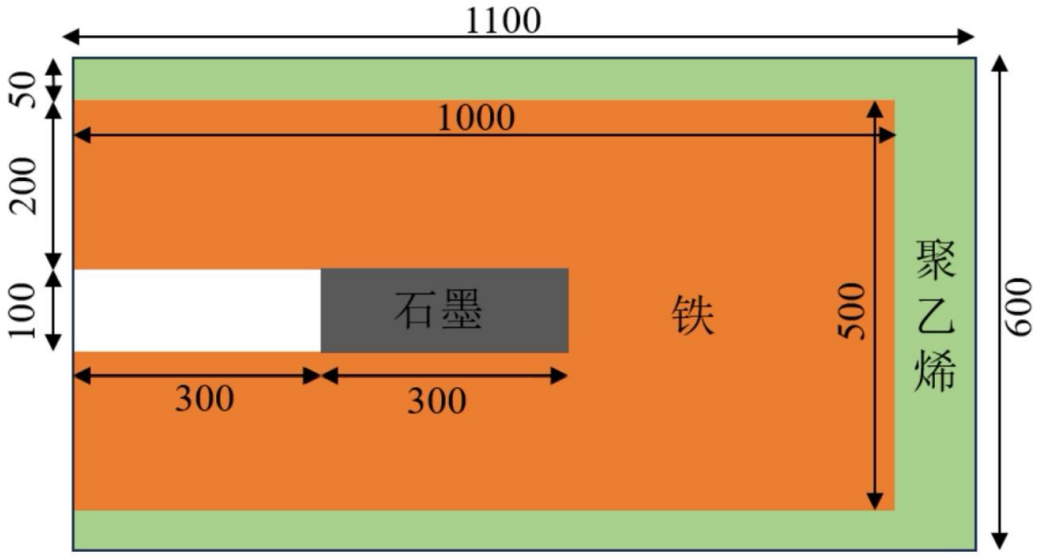
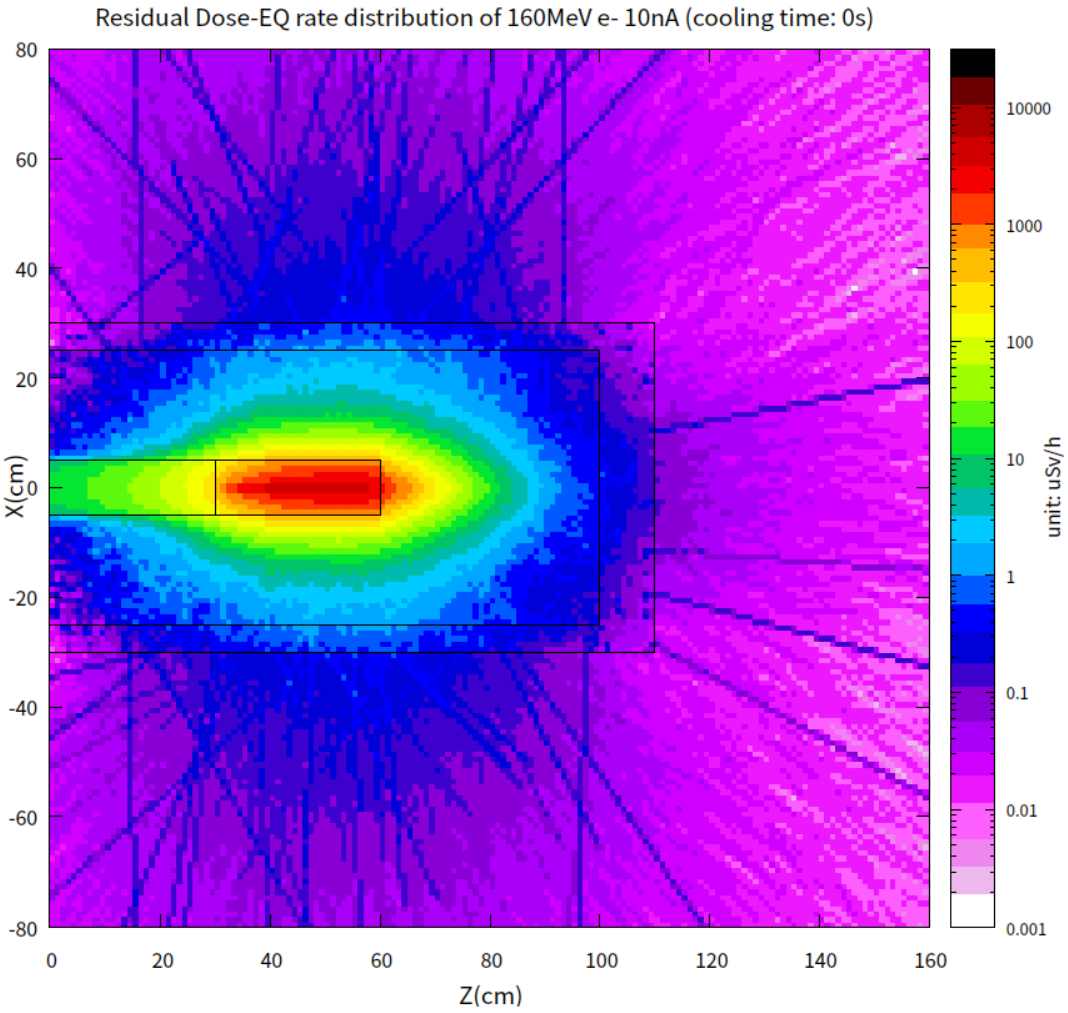
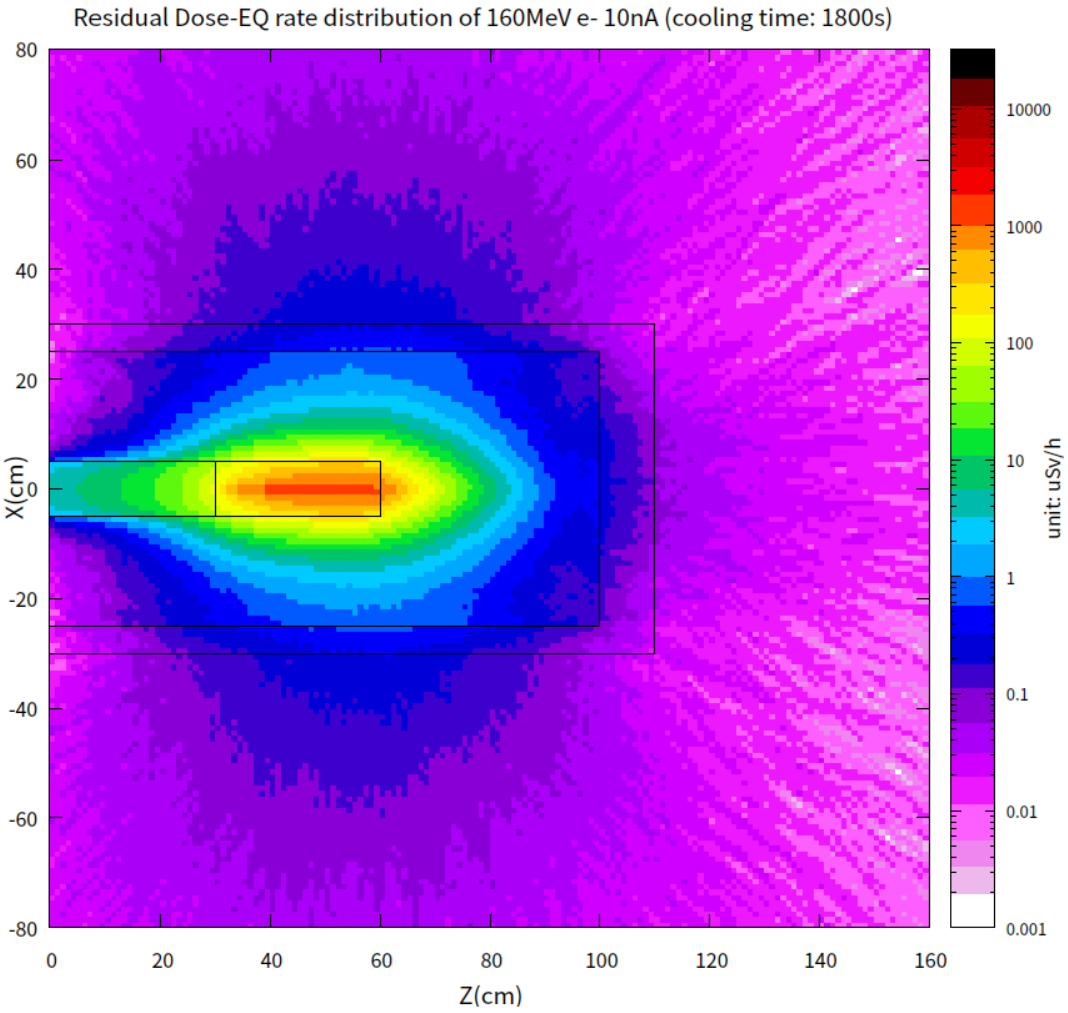


图 5-23 直线段区域束流垃圾桶结构设计示意图（侧剖视图，尺寸单位：mm）

直线隧道内 0 度或 45 度角废束桶周边 30cm 的剂量率分布如下图所示。


Residual Dose-EQ rate distribution of 160MeV e- 10nA (cooling time: 0s)
X(cm)
Z(cm)
unit: uSv/h
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
0
20
40
60
80
100
120
140
160
10000
1000
100
10
1
0.1
0.01
0.001

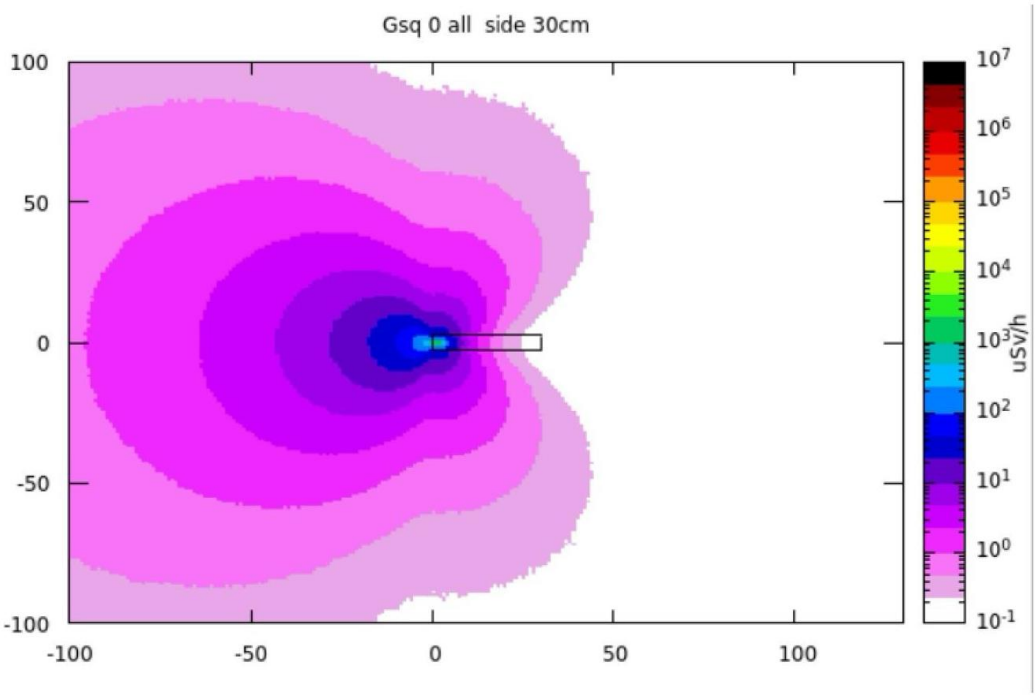
冷却 0s



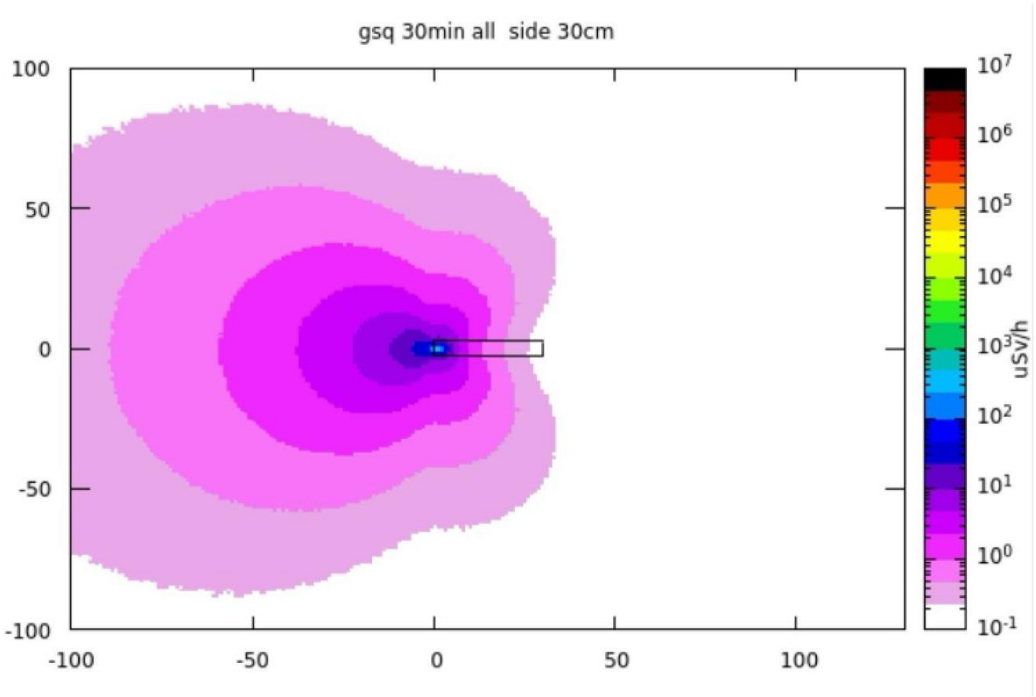
冷却 30min

图 5-24 直线隧道内 0 度或 45 度角废束桶周边 30cm 的剂量率分布图

低能传输线刮束器部件周边 30cm 的剂量率分布见下图。



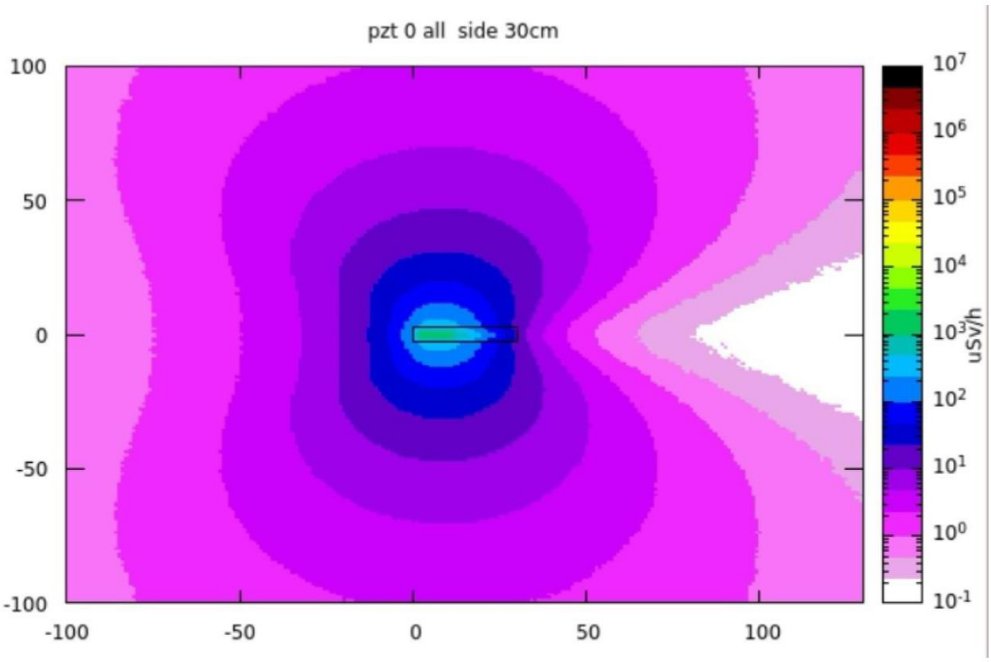
冷却 0s



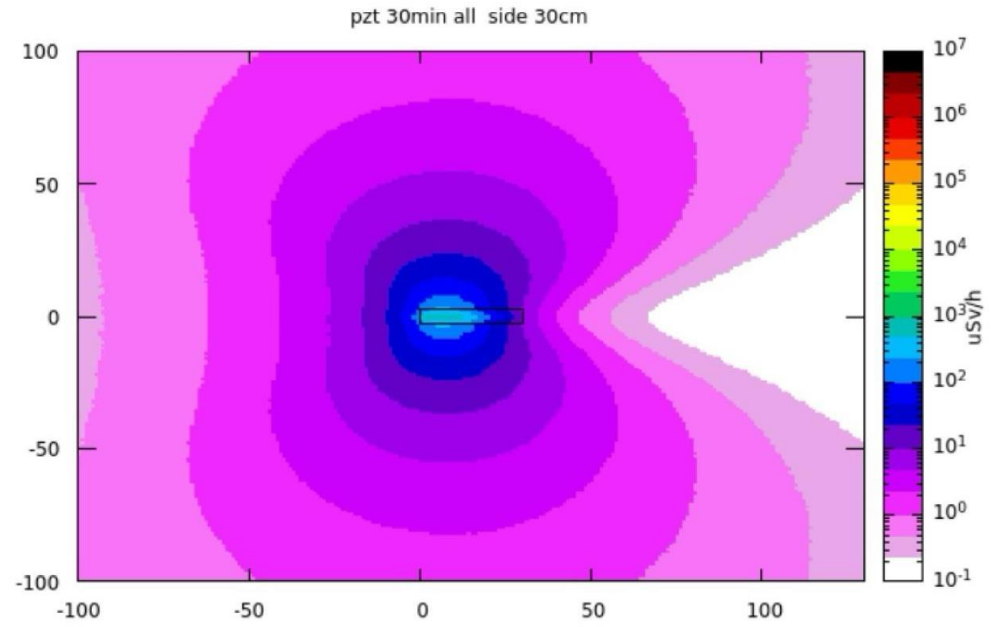
冷却 30min

图 5-25 低能传输线刮束器冷却不同时间的活化剂量率分布图

增强器弯铁部件周边 30cm 的剂量率分布及曲线见下图。



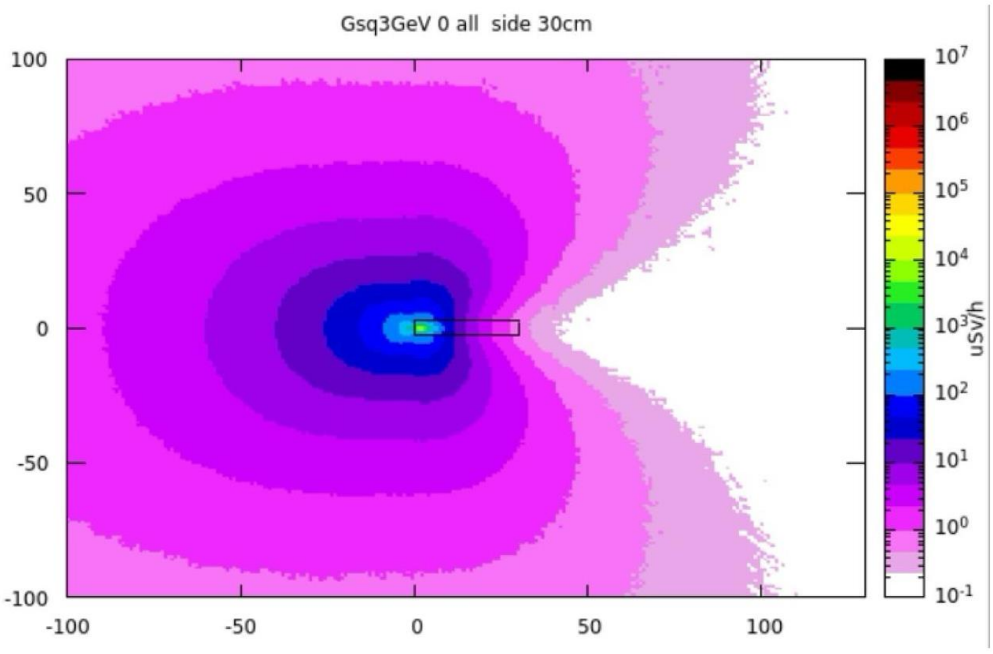
冷却 0s



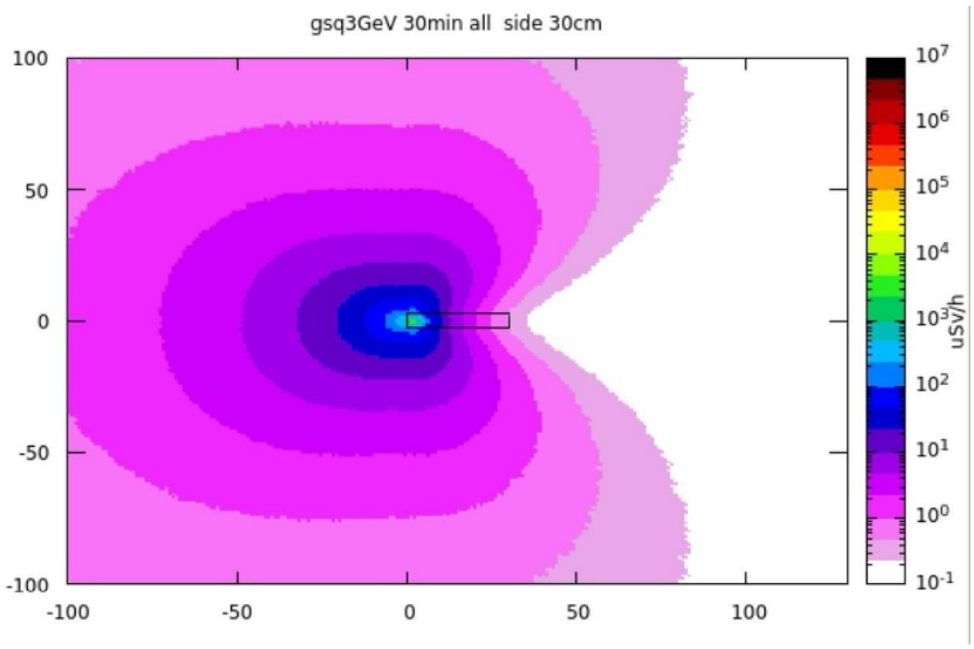
冷却 30min

图 5-26 增强器弯铁冷却不同时间的活化剂量率分布图

高能传输线刮束器部件周边 30cm 的剂量率分布及剂量率曲线见下图。



冷却 0s



冷却 30min

图 5-27 高能传输线刮束器冷却不同时间的活化剂量率分布图

表 5-8 各活化部件停机时刻及停机后 30 分钟的周边辐射剂量率汇总

部件名称	停机时刻辐射剂量率，μSv/h	停机 30 分钟辐射剂量率，μSv/h
直线废束桶侧边 30cm 处	0.24	0.11
直线废束桶末端 30cm 处	0.19	0.04
低能传输线刮束器侧边 30cm 处	3.52	1.69
增强器弯铁侧边 30cm 处	22.61	14.25
高能传输线刮束器侧边 30cm 处	9.42	6.87

5.2.1.1.5 光束线站区域建模图

本项目光束线均为直线节引出，保守考虑，所有光束线使用长直线节，建模图如下所示。

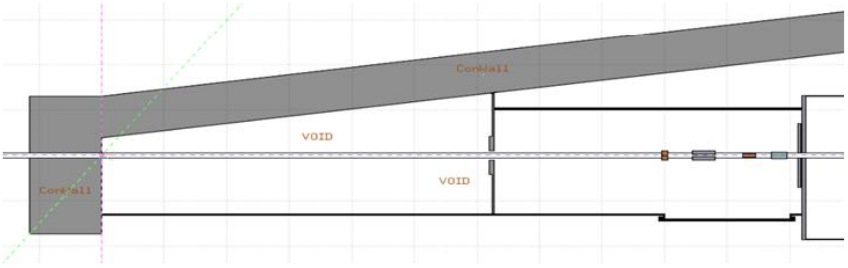


图 5-28 光束线建模俯视图

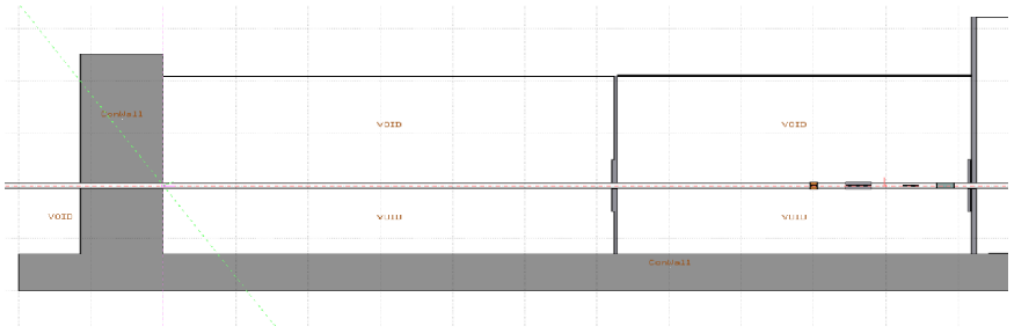


图 5-29 光束线建模侧视图

5.2.1.1.6 光束线站屏蔽墙体外瞬发辐射剂量率分布图和计算结果

（1）光束线白光狭缝关闭

表 5-9 光束线白光狭缝关闭屏蔽体外剂量率计算结果

屏蔽体名称	屏蔽体外剂量率计算结果，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
内侧墙	0.25	≤10
外侧墙	0.14	≤10
顶板	0.11	≤10
末端墙	0.25	≤10

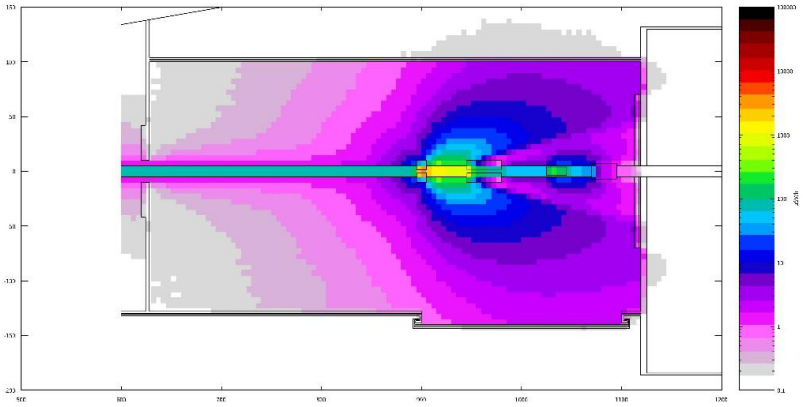


图 5-30　光束线白光狭缝关闭时辐射剂量率分布图

（2）光束线白光狭缝打开、安全光闸关闭

表 5-10 光束线白光狭缝打开、安全光闸关闭屏蔽体外剂量率计算结果

屏蔽体名称	屏蔽体外剂量率计算结果，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
内侧墙	0.80	≤10
外侧墙	0.50	≤10
顶板	0.25	≤10
末端墙	0.90	≤10

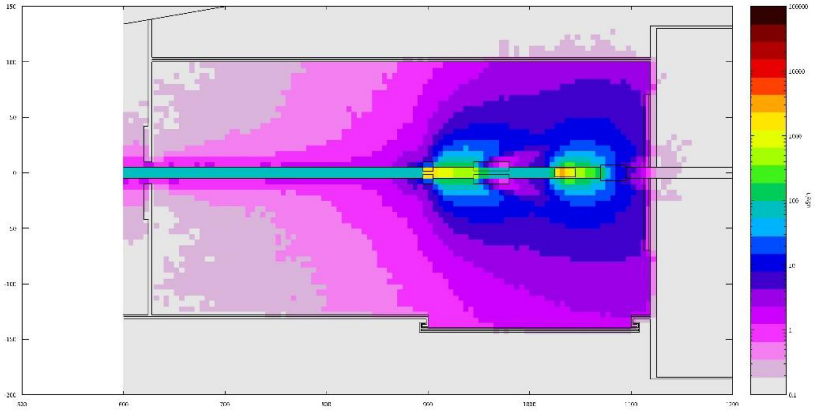


图 5-31 光束线白光狭缝关闭、安全光闸打开时辐射剂量率分布图

（3）小结

根据计算结果，光源光束线站棚屋屏蔽体外剂量率均满足剂量率控制水平，屏蔽墙外剂量率最大值为 0.90μSv/h（位于末端墙外），顶板外剂量率最大值为 0.25μSv/h。

表 5-11 光束线棚屋屏蔽体外剂量率计算结果汇总

屏蔽体名称	屏蔽体厚度	剂量率计算结果，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
内侧墙	30mm 铅+10mm 聚乙烯	0.80	≤10
外侧墙	30mm 铅+10mm 聚乙烯	0.50	≤10
顶板	18mm 铅+10mm 聚乙烯	0.25	≤10
末端墙	末端墙屏蔽厚度为 60mm 铅，末端墙在光束线中心周围 70cm 范围内，增加屏蔽厚度为 40mm 铅+20mm 聚乙烯	0.90	≤10

5.2.1.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

5.2.1.2.1 计算方法

本次评价采用目前国内外通用的 FLUKA 程序计算装置机房屏蔽体外剂量率水平。FLUKA 的计算模型如图 5-32 所示，基于此计算模型，分区域开展了辐射屏蔽计算。模型中，屏蔽主体结构为普通混凝土，密度为 2.3g/cm^3。

21#终端的重离子束流单核能仅为 1MeV/u，该能量无法突破加速器材料的库伦势垒发生核反应，其对辐射屏蔽的影响可以忽略。空间光伏辐照全流程研发模块加速器的质

子最大能量为 3MeV、^{4}He 最大能量为 1.5MeV/u，均难以突破加速器材料的库伦势垒产生大量非弹性反应，其产生的韧致辐射与 3MeV 电子相比完全可以忽略，因此只需考虑电子束损失的影响。21#终端设计了 1.5m~1.8m 厚的混凝土屏蔽墙，其屏蔽外剂量率远小于 0.01 μSv/h，可以忽略。

对离子源大厅，根据已建成的同类加速器装置离子源大厅的剂量率实测结果，离子源运行时大厅内的辐射剂量率最大值为 10.2 μSv/h，主要来自于离子源运行时产生的低能 X 射线。离子源大厅设置了 0.8~1.2m 厚的混凝土屏蔽，屏蔽外的预期剂量率远小于 0.01 μSv/h，可以忽略。

因此，采用 FLUKA 程序开展辐射屏蔽计算时，主要考虑了加速器大厅、51#单粒子效应研究终端、电子加速器大厅、质子/氦离子加速器大厅、质子电子终端和材料辐照终端。



图 5-32FLUKA 辐射屏蔽计算模型

5.2.1.2.2 辐照子系统加速器区域同步加速器大厅模拟结果

辐照子系统加速器区域的屏蔽计算同时考虑了以下束流损失工况：

1) 直线注入线的均匀损失（^{12}C：4MeV/u、5.31E+07pps/m、束流损失在不锈钢真空管道上）；

2) 注入口的集中损失（^{12}C：4MeV/u、1.67E+10pps、保守考虑束流损失在 2cm 厚铜靶上）；

3) 同步环的均匀损失（^{12}C：500MeV/u、6.89E+06pps/m、束流损失在不锈钢真空管道上）；

4) 引出口的集中损失（^{12}C：500MeV/u、7.92E+08pps、保守考虑束流损失在 10cm 厚铜靶上）；

5) 高能传输线的均匀损失（^{12}C：500MeV/u、8.18E+06pps/m、束流损失在不锈钢真空管道上）。

计算得到的辐射剂量率平面及剖面图如图 5-33 和图 5-34 所示。

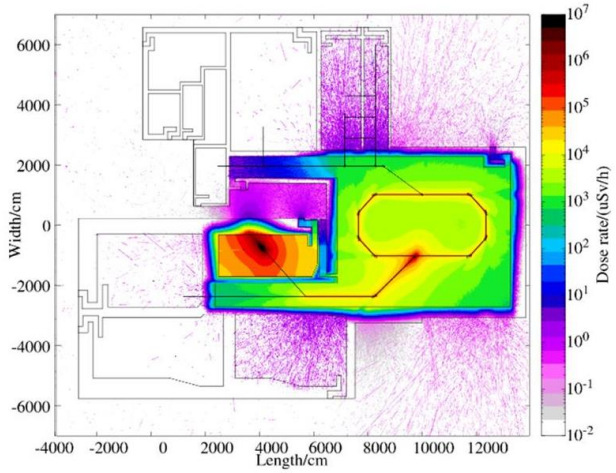


图 5-33 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块加速器大厅同步加速器大厅辐射剂量率平面图

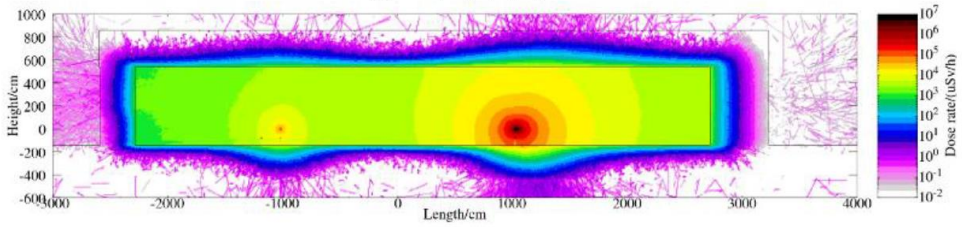


图 5-34 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块同步加速器大厅辐射剂量率剖面图

5.2.1.2.3 辐照子系统 51#单粒子效应研究终端模拟结果

51#单粒子效应研究终端考虑了两个实验靶点的束流集中损失，计算采用的束流为 ^{12}C、能量 500MeV/u、流强 1.43E+10pps，束流损失在 10cm 厚铜靶上。

计算得到的辐射剂量率平面及剖面图如图和图 5-35~图 5-38 所示。

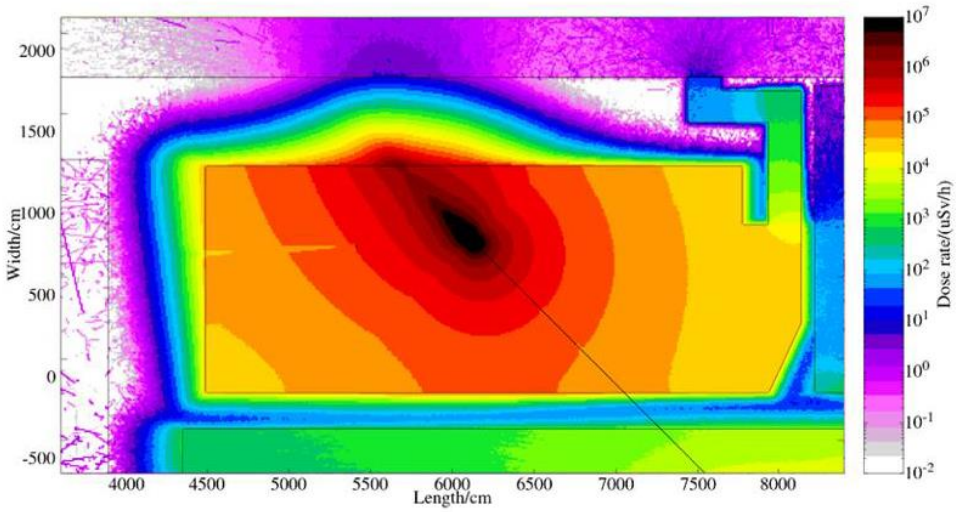


图 5-35 51#终端辐射剂量率平面图（靶点 1）

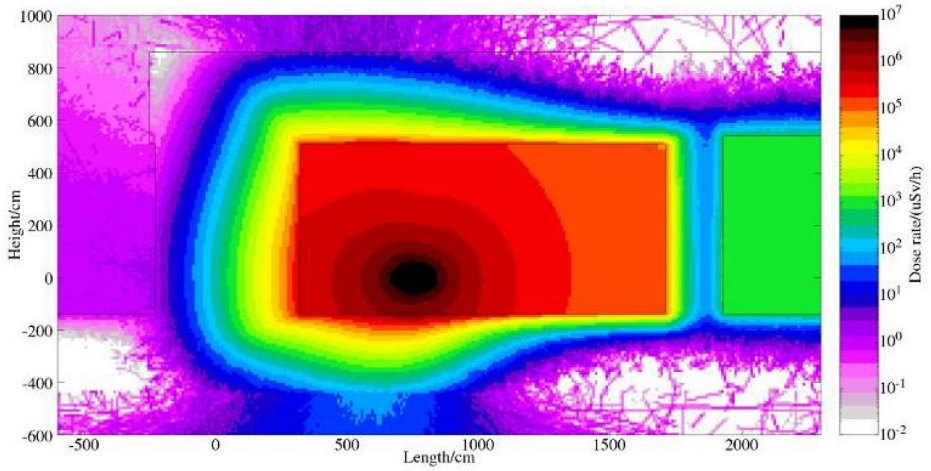


图 5-36 51#终端辐射剂量率剖面图（靶点 1）

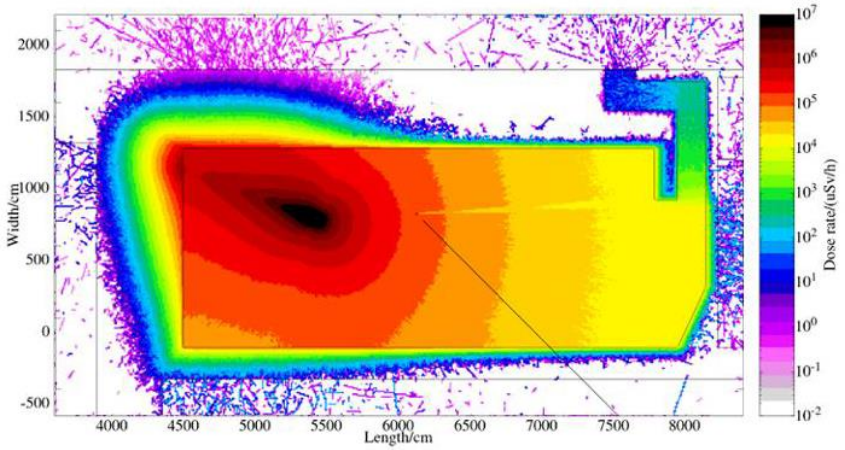


图 5-37 51#终端辐射剂量率平面图（靶点 2）

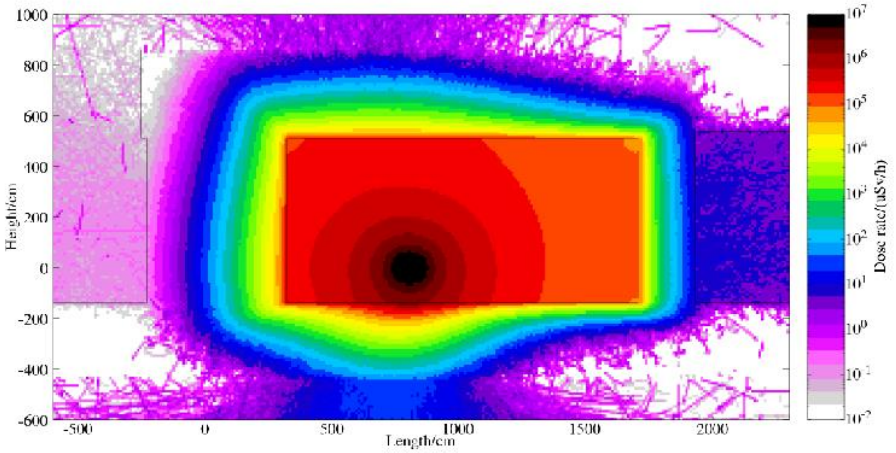


图 5-38 51#终端辐射剂量率剖面图（靶点 2）

5.2.1.2.4 空间光伏辐照全流程研发模块质子/氦离子加速器大厅模拟结果

空间光伏辐照全流程研发模块质子/氦离子加速器大厅考虑了反冲电子的集中损失，计算采用的束流为电子，能量 200keV，流强 6.25E+14pps，束流损失在 1.4cm 厚不锈钢上。

计算得到的辐射剂量率平面及剖面图如图 5-39 和图 5-40 所示。

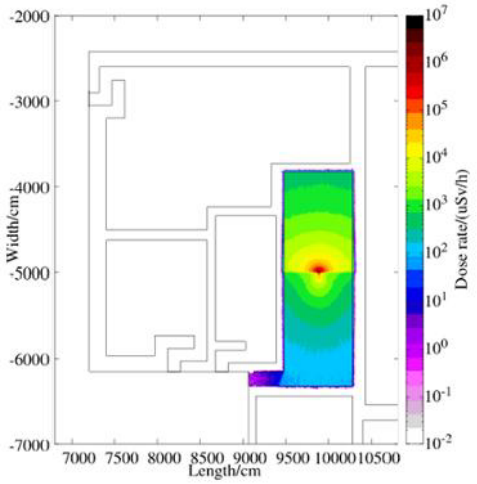


图 5-39 质子/氦离子加速器大厅辐射剂量率平面图

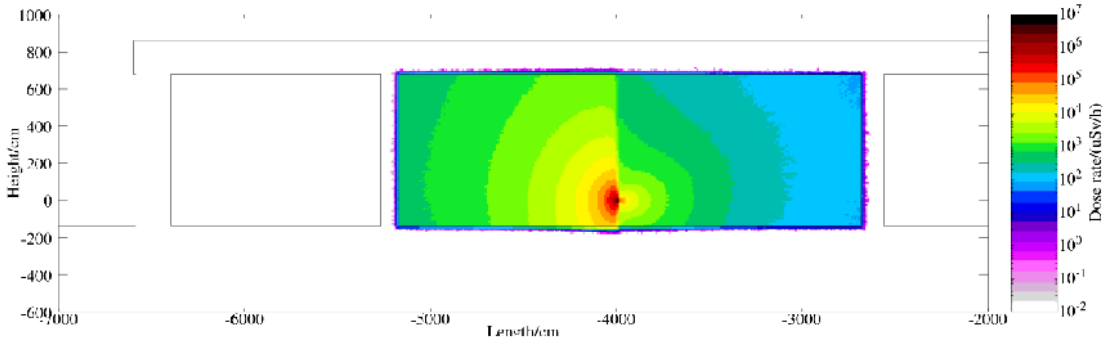


图 5-40 质子/氦离子加速器大厅辐射剂量率剖面图

5.2.1.2.5 空间光伏辐照全流程研发模块电子加速器大厅模拟结果

3MeV 电子加速器大厅考虑了电子的集中损失，计算采用的束流为电子、能量 1MeV、流强 6.25E+13pps，束流损失在 1.4cm 厚不锈钢上。

计算得到的辐射剂量率平面及剖面图如图 5-41 和图 5-42 所示。

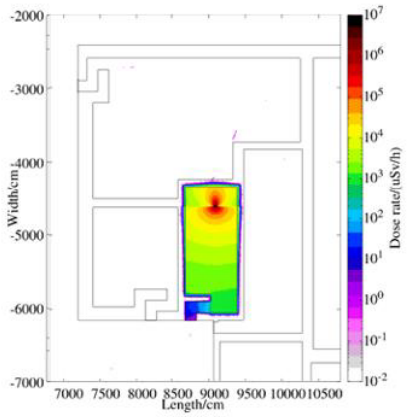


图 5-413MeV 电子加速器大厅辐射剂量率平面图

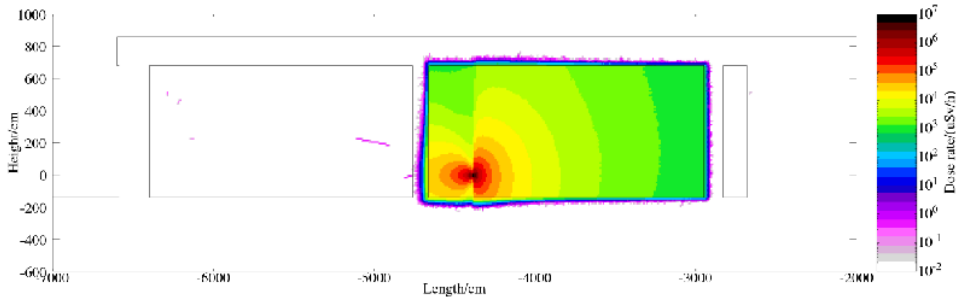


图 5-42 3MeV 电子加速器大厅辐射剂量率剖面图

5.2.1.2.6 空间光伏辐照全流程研发模块质子电子终端模拟结果

质子电子终端的屏蔽计算同时考虑了以下束流损失工况：

（1）电子刮束器的集中损失（电子、3MeV、1.25E+15pps，束流损失 3mm 厚钨靶上）；

（2）实验靶点的集中损失（电子、3MeV、1.25E+15pps，束流损失在 5mm 厚铜托盘上）。

计算得到的辐射剂量率平面及剖面图如图 5-43 和图 5-44 所示。

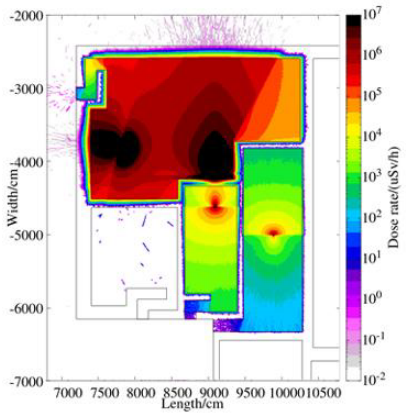


图 5-43 质子电子终端辐射剂量率平面图

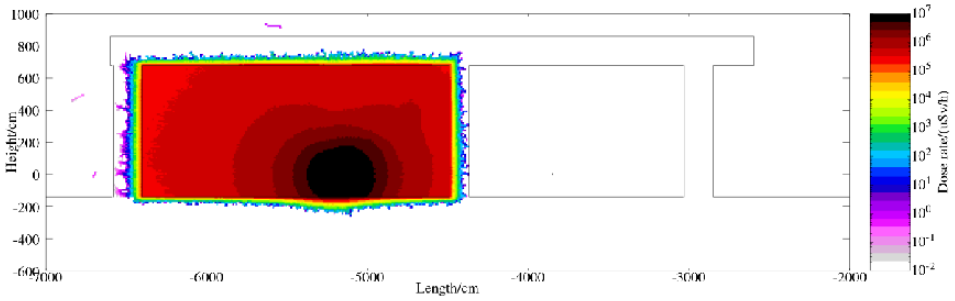


图 5-44 质子电子终端辐射剂量率剖面图

5.2.1.2.7 空间光伏辐照全流程研发模块材料辐照终端模拟结果

材料辐照终端考虑了电子的集中损失，计算采用的束流为电子、能量 3MeV、流强 1.25E+15pps，束流损失在 5mm 厚铜托盘上。

计算得到的辐射剂量率平面及剖面图如图 5-45 和图 5-46 所示。

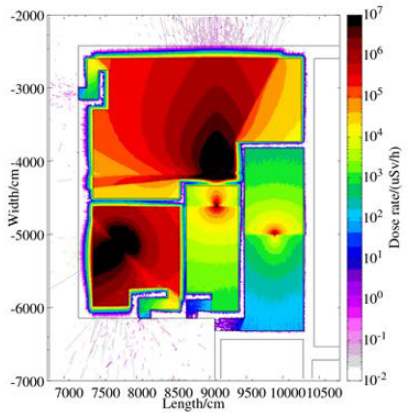


图 5-45 材料辐照终端辐射剂量率平面图

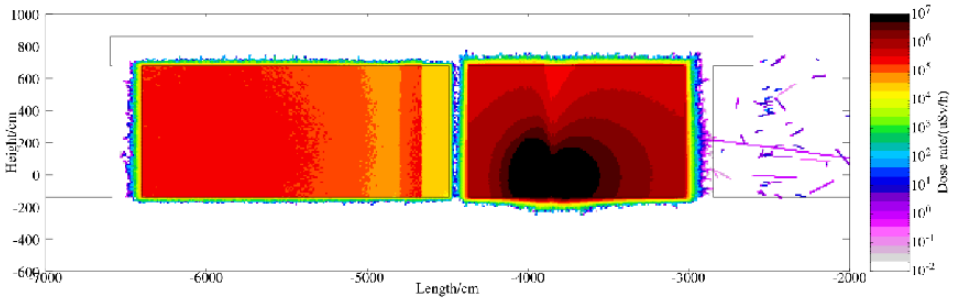


图 5-46 材料辐照终端辐射剂量率剖面图

5.2.1.2.8 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射工作场所关注点处剂量率水平

辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射工作场所关注点布置见图 5-47，关注点处剂量率见表 5-12，从表中可以看出，屏蔽体外剂量率水平均满足要求。



图 5-47 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射工作场所关注点布置示意图

表 5-12 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射工作场所关注点处剂量率水平

关注点	方位描述	周围环境	辐射工作场所分区情况	剂量率最大值，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h	工况
1-1	离子源西侧屏蔽体外30cm处	ECR设备间	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-2	离子源北侧屏蔽体外30cm处	质子/氦离子加速器大厅	控制区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端
1-3	离子源南侧屏蔽体外30cm处	通道	监督区	0.03	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-4	离子源南侧防护门外30cm处	通道	监督区	0.01	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-5	直线加速器隧道防护外30cm处	通道	监督区	0.4	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-6	直线加速器隧道南侧屏蔽体外30cm处	控制设备间1	监督区	0.6	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-7	直线加速器隧道南侧屏蔽体外30cm处	控制设备间2	监督区	0.4	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-8	直线加速器隧道北侧屏蔽体外30cm处	21#终端	控制区	0.3	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端
1-9	直线加速器隧道北侧屏蔽体外30cm处	22#预留终端	监督区	3.5	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-10	直线加速器隧道北侧屏蔽体外30cm处	23#预留终端	监督区	3.8	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-11	同步加速器大厅北侧屏蔽体外30cm处	工艺控制设备间1	监督区	0.5	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-12	同步加速器大厅北侧屏蔽体外30cm处	束诊断洁净间	监督区	0.07	≤10	辐照子系统同时运行51#单粒子效应研究终端和21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端

关注点	方位描述	周围环境	辐射工作场所分区情况	剂量率最大值，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h	工况
1-13	同步加速器大厅北侧屏蔽体外 30cm 处	设备转运大厅	监督区	1.1	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-14	同步加速器大厅东侧屏蔽体外 30cm 处	园区道路	非辐射工作区	0.02	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-15	同步加速器大厅东侧屏蔽体外 30cm 处	园区道路	非辐射工作区	0.01	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-16	同步加速器大厅东侧屏蔽体外 30cm 处	园区道路	非辐射工作区	＜0.01	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-17	同步加速器大厅南侧屏蔽体外 30cm 处	冷却水站	监督区	0.4	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-18	同步加速器大厅南侧屏蔽体外 30cm 处	工艺空调机房	监督区	0.13	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-19	同步加速器大厅南侧屏蔽体外 30cm 处	52#预留终端	监督区	2	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-20	同步加速器大厅东南屏蔽体外 30cm 处	53#预留终端	监督区	0.18	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-21	同步加速器大厅东屏蔽体外 30cm 处	54#预留终端	监督区	3.5	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-22	51#终端北侧屏蔽体外 30cm 处	过道	监督区	5.2	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-23	51#终端北侧隧道防护门外 30cm 处	过道	监督区	5.7	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-24	21#终端西侧屏蔽体外 30cm 处	质子/氦离子加速器大厅	控制区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束）
1-25	21#终端北侧屏蔽体外 30cm 处	通道	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端

关注点	方位描述	周围环境	辐射工作场所分区情况	剂量率最大值，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h	工况
1-26	21#终端北侧防护门外 30cm 处	通道	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-27	21#终端西侧屏蔽体外 30cm 处	22#预留终端	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-28	质子电子终端北侧屏蔽体外 30cm 处	通道	监督区	0.16	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束），辐照模块运行质子电子终端
1-29	质子/氦离子加速器大厅西侧防护门外 30cm 处	通道	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束），辐照模块运行质子电子终端
1-30	质子电子终端北侧屏蔽体外 30cm 处	通道	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束），辐照模块运行质子电子终端
1-31	质子电子终端西侧防护门外 30cm 处	通道	监督区	0.46	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束），辐照模块运行质子电子终端
1-32	质子电子终端南侧屏蔽体外 30cm 处	材料终端	控制区	0.31	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束），辐照模块运行质子电子终端
1-33	质子/氦离子加速器大厅东屏蔽体外 30cm 处	21#终端	控制区	＜0.01	≤10	辐照模块运行质子电子终端
1-34	材料终端西侧屏蔽体外 30cm 处	通道	监督区	0.2	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-35	材料终端南侧防护门外 30cm 处	通道	监督区	0.19	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-36	中央控制室		监督区	0.01	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
1-37	51#终端运行控制室		监督区	＜0.01	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端

关注点	方位描述	周围环境	辐射工作场所分区情况	剂量率最大值，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h	工况
1-38	实验准备间 2		监督区	＜0.01	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-1	离子源顶部屏蔽体外 30cm 处	设备间	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-2	直线加速器注入线顶部屏蔽体外 30cm 处	设备间	监督区	0.2	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-3	同步加速器大厅顶部屏蔽体外 30cm 处	电源设备间等	监督区	0.8	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-4	51#终端顶部屏蔽体外 30cm 处	排风机房	监督区	6.7	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-5	21#终端顶部屏蔽体外 30cm 处	非辐射工作区	监督区	＜0.01	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-6	质子/氦离子加速器大厅顶部屏蔽体外 30cm 处	气瓶间等	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-7	电子加速器大厅顶部屏蔽体外 30cm 处	排风机房等	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-8	质子电子终端顶部屏蔽体外 30cm 处	非辐射工作区	监督区	＜0.01	≤2.5	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束），辐照模块运行质子电子终端
2-9	材料终端顶部屏蔽体外 30cm 处	排风机房等	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
2-11	夹层处	工艺空调机房等	监督区	＜0.01	≤10	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
B-1	离子源底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	＜0.01	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端

关注点	方位描述	周围环境	辐射工作场所分区情况	剂量率最大值，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h	工况
B-2	直线加速器注入线底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	53	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
B-3	同步加速器大厅底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	930	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
B-4	51#终端底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	3700	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
B-5	21#终端底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	＜0.01	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
B-6	电子加速器大厅底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	＜0.01	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
B-7	电子加速器注入线底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	＜0.01	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端
B-8	质子电子终端底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	＜0.01	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端（离子束），辐照模块运行质子电子终端
B-9	材料终端底部屏蔽体外 30cm 处	土层	人员不可达	180	≤5500	辐照子系统同时运行 51#单粒子效应研究终端和 21#低能离子辐照终端，辐照模块运行材料终端

5.2.1.3 高亮度中子源装置

5.2.1.3.1 计算方法

本次评价采用目前国内外通用的 FLUKA 程序计算高亮度中子源装置屏蔽体外剂量率水平。屏蔽计算依据的束流损失参数见表 3-67，屏蔽墙体厚度见表 4-13，建立的计算模型见图 5-48~图 5-52。

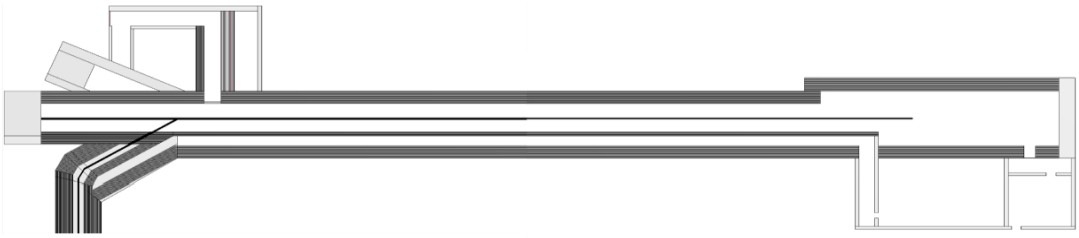


图 5-48 直线加速器隧道屏蔽模拟计算模型平面图

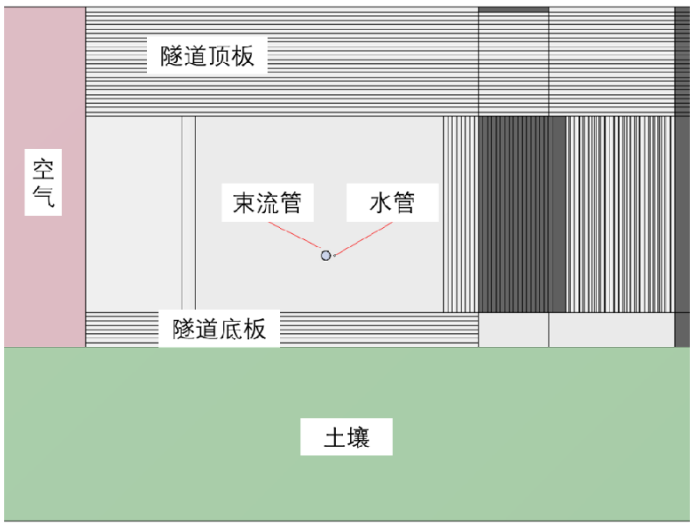


图 5-49 直线加速器隧道屏蔽模拟计算模型剖面图

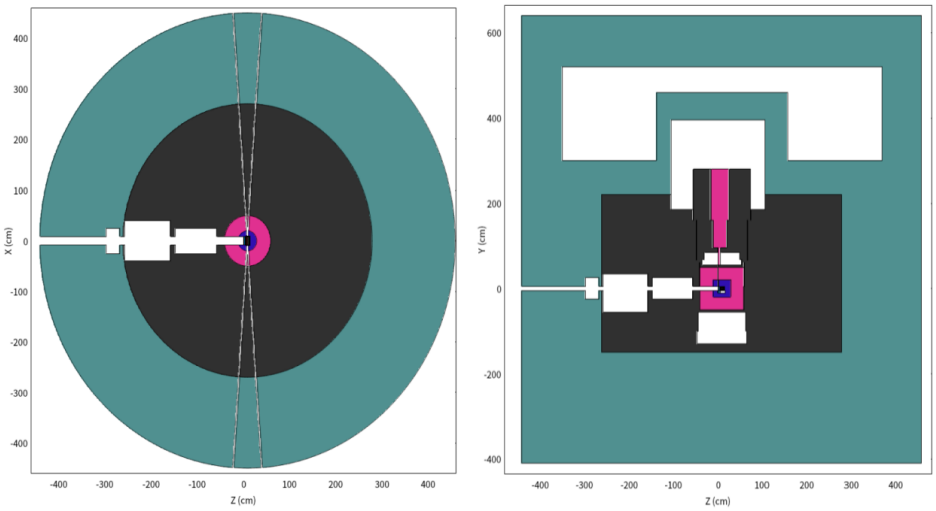
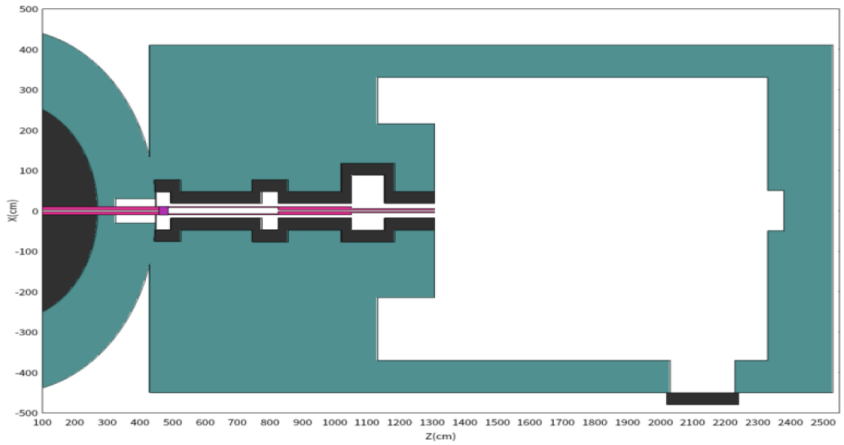
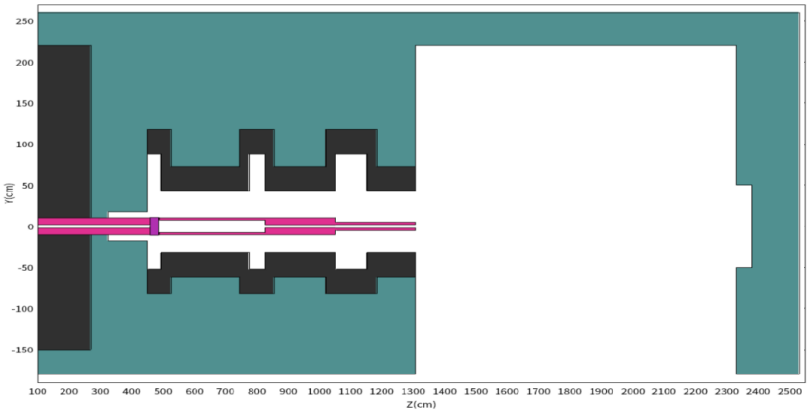


图 5-50 靶站屏蔽模拟计算模型平面图（左）和剖面图（右）

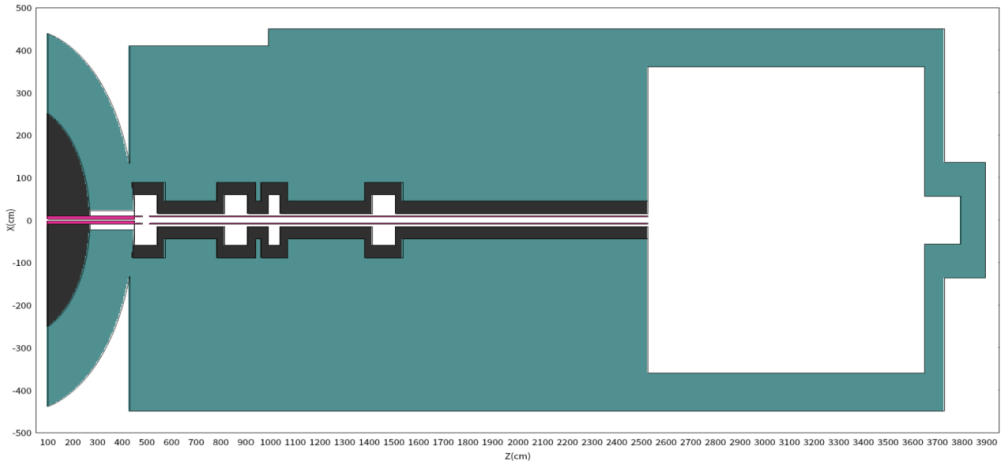


（1）平面图

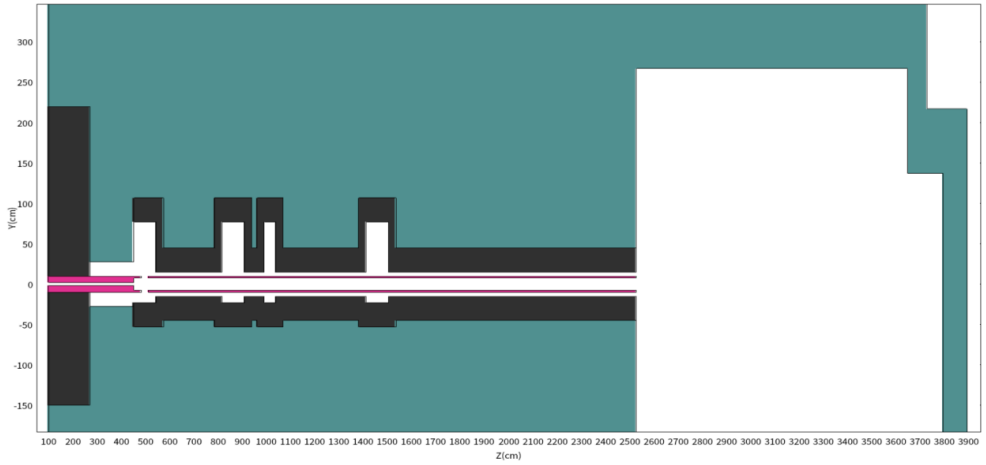


（2）剖面图

图 5-51 高通量小角散射谱仪屏蔽模拟计算模型平面图和剖面图



（1）平面图



（2）剖面图

图 5-52 通用中子粉末衍射仪屏蔽模拟计算模型平面图和剖面图

5.2.1.3.2 关注点设置

根据高亮度中子源装置的平面布局及周围环境情况设置了关注点，各关注点的位置示意图见图 5-53~图 5-55。



图 5-53 地上一层关注点分布位置平面示意图



图 5-54 关注点分布位置剖面示意图



图 5-55 关注点分布位置剖面示意图

5.2.1.3.3 计算结果

根据 FLUKA 程序的计算结果，将高亮度中子源装置屏蔽体外各关注点处的剂量率计算结果汇总如表 5-13，模拟得到的剂量率分布图见图 5-56~图 5-61。由计算结果可知，屏蔽体外剂量率水平均满足要求。

表 5-13 剂量率计算结果

区域	关注点	周围环境	剂量率水平，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
直线加速器隧道区域	A1	中控室	1.00E-03	2.5
	A2	防护门外辐射防护检查室	1.99E-03	2.5
	A3	离子源热备份室	2.98E-03	2.5
	A4	离子源热备份室	5.96E-03	2.5
	A5	离子源热备份室	1.85E-03	2.5
	A6	直线功率源大厅	8.58E-03	2.5
	A7	直线功率源大厅	6.66E-03	2.5
	A8	直线功率源大厅	4.40E-02	2.5
	A9	直线功率源大厅	7.02E-02	2.5
	A10	直线功率源大厅	7.12E-02	2.5
	A11	靶站大厅	7.27E-02	2.5
	A12	靶站大厅	6.26E-02	2.5
	A13	靶站大厅	1.60E-02	2.5
	A14	靶站大厅	5.48E-02	2.5
	A15	靶站大厅	6.49E-01	2.5
	A16	靶站大厅	1.18E+00	2.5
	A17	靶站大厅	1.20E+00	2.5
	A18	排风中心	1.52E+00	10
	A19	排风中心	1.29E+00	10
	A20	排风中心	2.32E+00	10
	A21	污物转运厅	1.27E+00	10
	A22	污物转运厅	8.61E-01	10
	A23	室外环境	1.05E+00	2.5
	A24	放射性废物暂存厅 1)	2.08E-01	/
	A25	放射性废物暂存厅 1)	5.86E-01	/
	A26	水冷泵房	1.29E+00	10
	A27	水冷泵房	1.35E+00	10
	A28	水冷泵房	1.34E+00	10
	A29	水冷泵房	6.42E-01	10
	A30	水冷泵房	3.80E-03	10

区域	关注点	周围环境	剂量率水平，μSv/h	剂量率控制水平，μSv/h
	A31	水冷泵房	2.78E-03	10
	A32	空调机房	3.00E-03	10
	A33	设备运输吊装大厅	3.00E-03	2.5
	A34	室外环境	3.00E-03	2.5
	A35	隧道顶部 2)	1.66E+00	25
	A36	隧道顶部 2)	1.03E+00	25
	A37	走道	1.17E+00	2.5
	A38	工艺预留机房	1.20E+00	10
	A39	隧道顶机柜	1.21E+00	10
	A40	隧道顶机柜	6.10E-01	10
	A41	走道	3.00E-03	2.5
	A42	土壤 3)	1.11E+02	5500
	A43	土壤 3)	7.04E+01	5500
	A44	土壤 3)	7.45E+01	5500
	A45	土壤 3)	5.95E+01	5500
靶站区域	B1	靶站大厅	3.60E-01	2.5
	B2	靶站大厅	2.20E-01	2.5
	B3	顶部大厅 2)	7.00E-02	25
	B4	土壤 3)	1.10E-01	5500
高通量小角散射谱仪	C1	靶站大厅	8.60E-01	2.5
	C2	靶站大厅	7.50E-01	2.5
	C3	靶站大厅	4.20E-01	2.5
	C4	靶站大厅	3.10E-01	2.5
	C5	靶站大厅	7.20E-01	2.5
	C6	顶部上空	8.30E-01	2.5
	C7	土壤 3)	3.00E-02	5500
通用中子粉末衍射仪	D1	靶站大厅	6.10E-01	2.5
	D2	靶站大厅	6.30E-01	2.5
	D3	靶站大厅	1.20E-01	2.5
	D4	靶站大厅	9.00E-02	2.5
	D5	靶站大厅	3.20E-01	2.5
	D6	靶站大厅	3.30E-01	2.5
	D7	靶站大厅	8.60E-01	2.5
	D8	顶部上空	7.90E-01	2.5
	D9	土壤 3)	1.00E-02	5500

注：1）由“4.3.1”可知放射性废物暂存厅作为控制区 I 管理，因此没有设置剂量率控制水平；

2）由“4.3.1”可知中直线隧道至靶站区域顶部作为控制区 II 管理，剂量率控制水平为 25μSv/h；

3）根据表 1-5 可知，土壤处的剂量率控制水平为 5.5mSv/h。

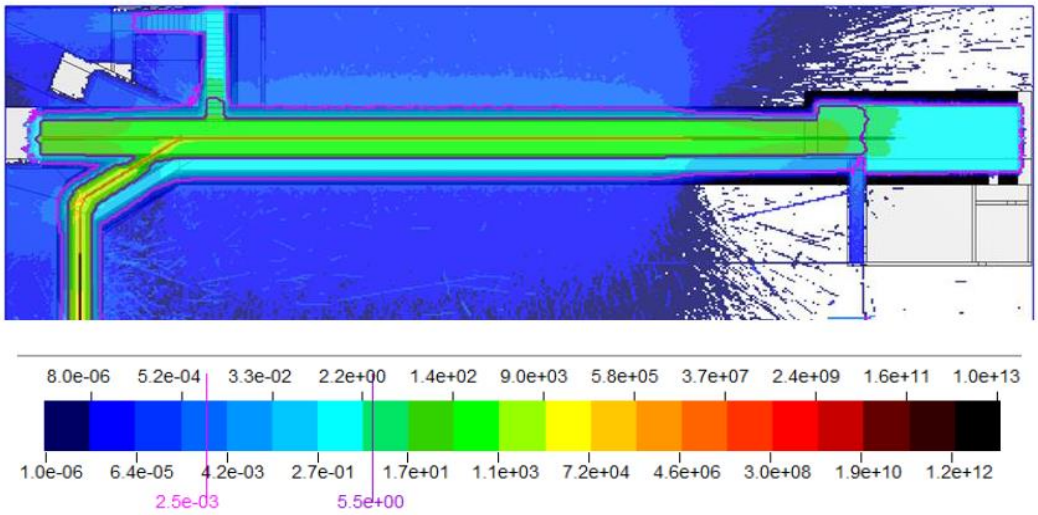


图 5-56 直线加速器隧道剂量率分布平面图

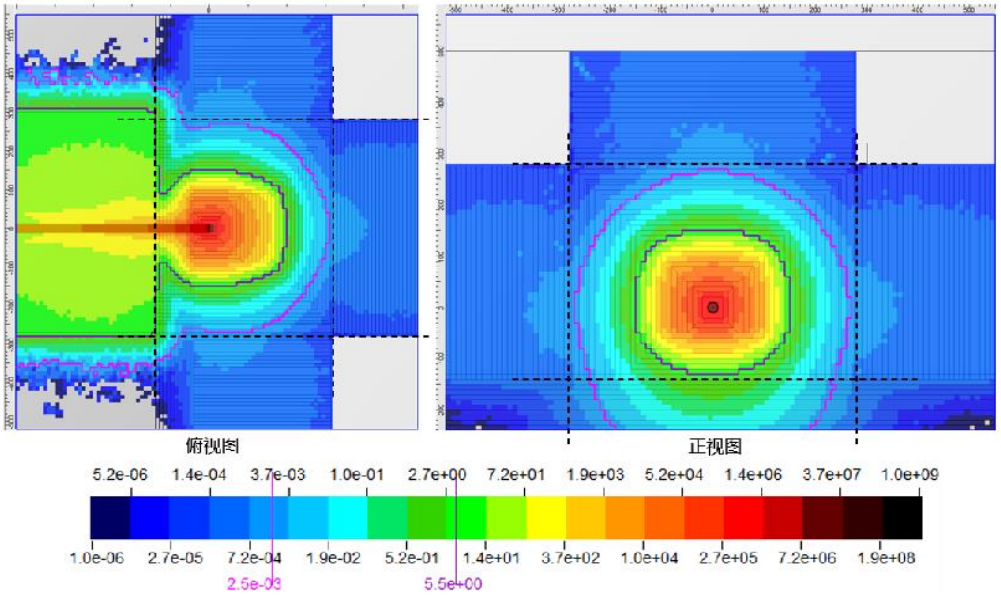


图 5-57 废束站 1 剂量率分布俯视图（左）与侧视图（右）

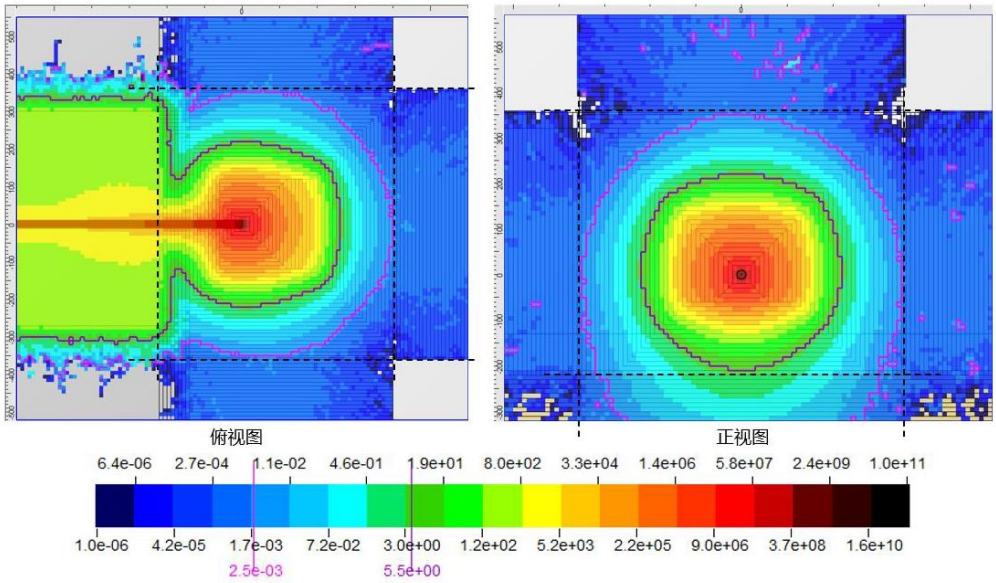


图 5-58 废束站 2 剂量率分布俯视图（左）与侧视图（右）

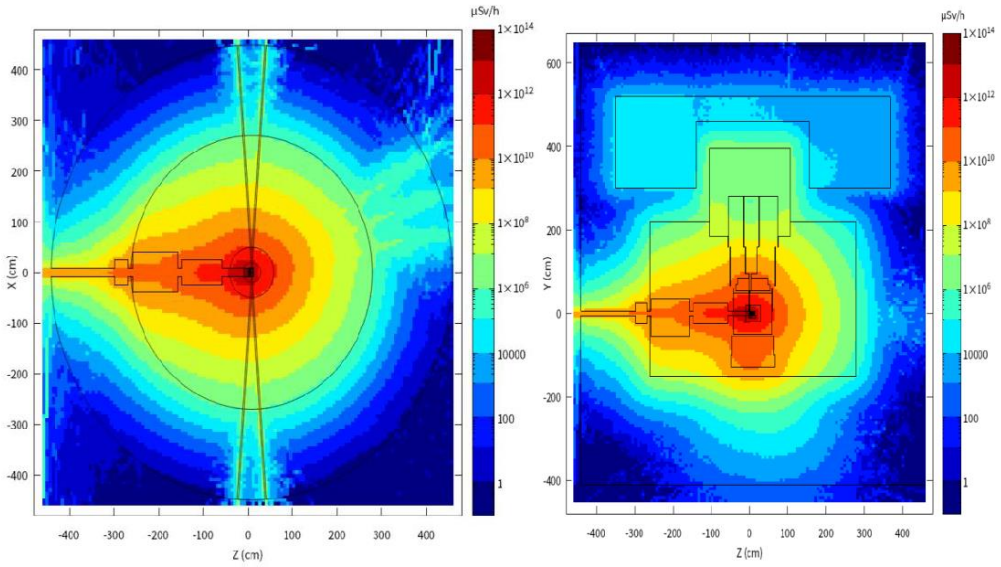
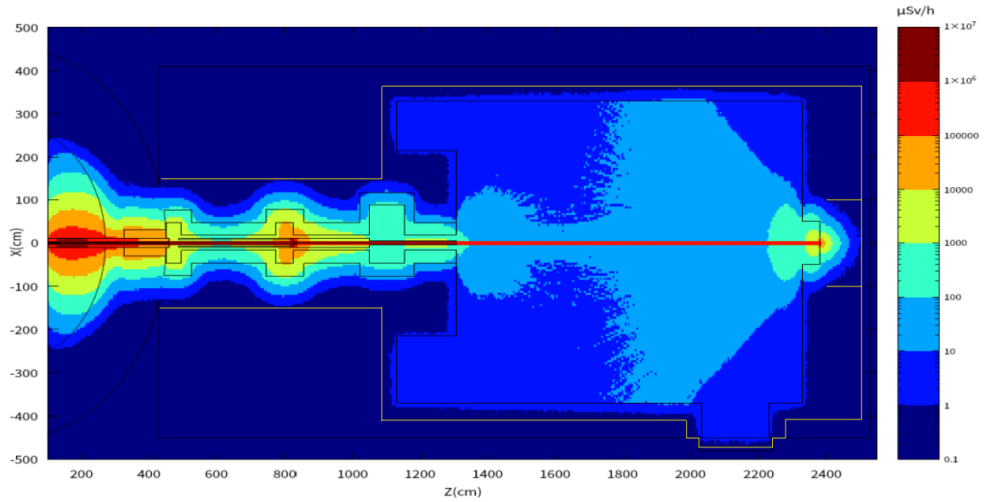
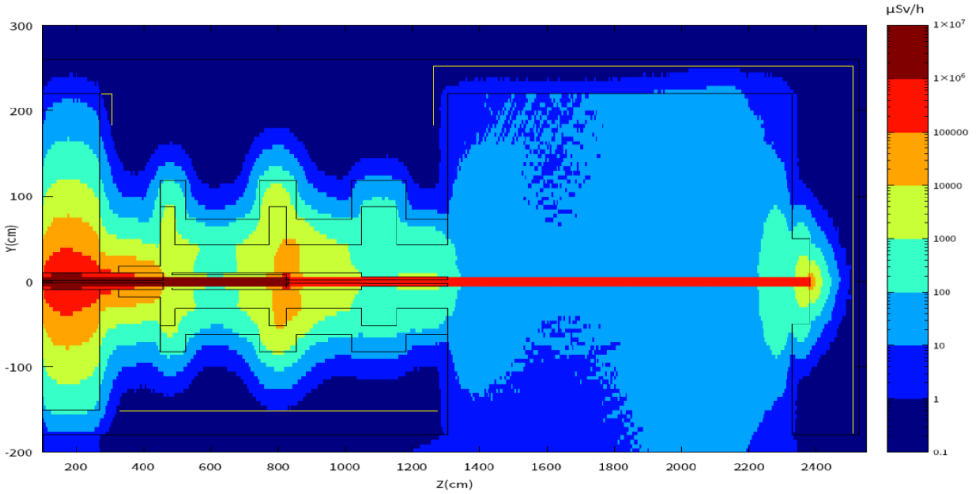


图 5-59 靶站剂量率水平剖面图（左）与竖直剖面图（右）

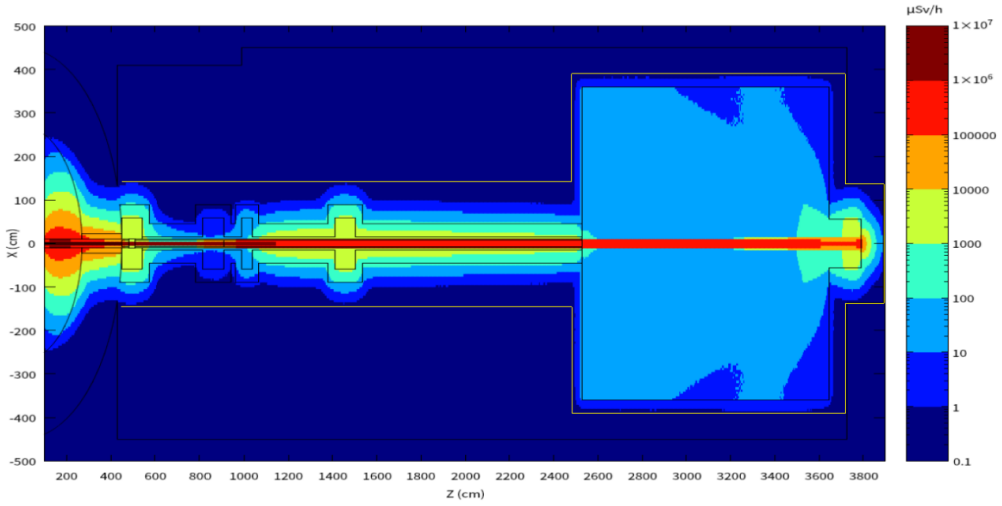


（横切面）

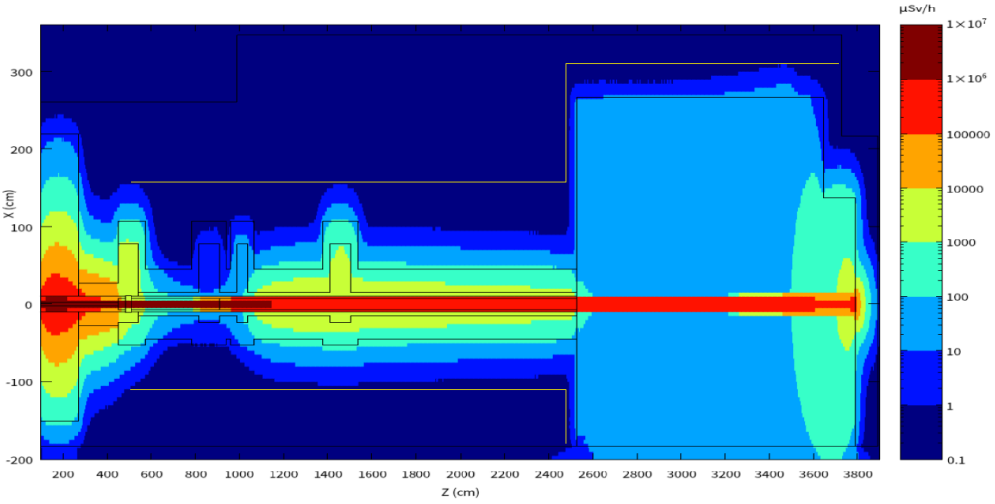


（纵切面）

图 5-60 高通量小角散射谱仪剂量率分布图



（横切面）



（纵切面）

图 5-61 通用中子粉末衍射仪剂量率分布俯视图（上）与侧视图（下）

5.2.1.4 工业 CT

出于保守计算考虑，本报告按照最大能量 9.3MeV、平均流强 1mA、距靶 1m 处正向剂量率 8500 cGy/min（折合 5100Gy/h）的工况，参考 NCRP-51 和 NCRP-151 报告中的公式进行理论计算。

本项目并列放置两台一样的打靶设备，两台设备不能同时出束，因此分别计算其辐射水平，取其较大值。

（1）直射 X 射线的影响

1）计算公式

电子束辐照靶件会产生韧致辐射（X 射线），X 射线是高能工业 CT 辐射防护设计中的主要辐射源。根据 HJ979-2018 的附录 A，计算距离 X 射线辐射源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率公式为：

$$H_M = \frac{B_x}{d^2} \cdot D_{10}T \cdot 10^6 \quad \text{式（5-1）}$$

$$B_x = 10^{-n} \quad \text{式（5-2）}$$

$$n = \sum n_i \quad \text{式（5-3）}$$

$$S_i = T_{1i} + (n_i - 1)T_{ei} \quad \text{式（5-4）}$$

式中，H_M为参考点周围剂量当量率，μSv/h；

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

d为 X 射线源与参考点之间的距离，m；

D_{10}为距离 X 射线源 1m 处的标准参考点的吸收剂量率，Gy/h；

T为居留因子；

n为十分之一值层的个数；

n_i为第 i 种屏蔽体的十分之一值层的个数；

S_i为第 i 种屏蔽体的厚度，cm；

T_{1i}为在第 i 种屏蔽的厚度中，朝向辐射源的第一个十分之一值层，cm；

T_{ei}为第 i 种屏蔽的平衡十分之一值层，该值近似于常数，cm。

2）参数选择

根据设计单位资料，高能电子打靶有很强的前向性，泄露辐射远低于主束方向的 1‰。

本项目主束方向为正北，其他方向均为泄露辐射。因此本项目最高能量时正前向对应的1m 处吸收剂量率为 8500cGy/min，折合 5100Gy/h；其他方向剂量率远小于正前向的千分之一，保守按 5.1Gy/h 计算；该计算方法忽略了打靶时靶头设置的局部屏蔽，因此足够保守；

居留因子保守取 1；

本项目使用混凝土、铁和铅作为屏蔽体，十分之一值层保守按 10MeV 估计，根据NCRP-151，入射电子能量为 10MeV 时，混凝土屏蔽的第一个十分之一值层T_{11}为 41cm，混凝土屏蔽的平衡十分之一值层T_{e1}为 38.6cm；铁屏蔽的第一个十分之一值层T_{11}为10.5cm，铁屏蔽的平衡十分之一值层T_{e1}为 10.5cm；而铅屏蔽的第一个十分之一值层T_{12}为 5.7cm，铅屏蔽的平衡十分之一值层T_{e2}为 5.6cm；

屏蔽体厚度及关注点距离基于 CAD 测量得到。

3）估算结果

屏蔽体外 30cm 处剂量率估算结果见表 5-14，点位图见图 5-62。

表 5-14 屏蔽体外 30cm 处剂量率计算结果

序号	打靶位置	关注点位名称	射线束	d，m	$S_{混凝土}$，cm	$S_{铅}$，cm	H_M，μSv/h
1	西侧	迷道口	泄露辐射	14.89	469.10	2.00	8.55E-09
2		室外空间	泄露辐射	6.35	210.00	0	5.29E-01
3		CT 调制水冷间	泄露辐射	8.91	212.60	0	2.31E-01
4		强弱电间（配电间）	泄露辐射	13.85	210.00	0	1.11E-01
5		报警阀门间	泄露辐射	13.86	210.10	0	1.10E-01
6		专用工位电气机房	泄露辐射	14.13	251.40	0	9.05E-03
7		排风间	泄露辐射	12.73	226.00	0	5.07E-02
8		防护门间	泄露辐射	11.85	210.00	0	1.52E-01
9		专用工位配套间	主束直射	14.10	280.00	0	1.65E+00
10		送风间	泄露辐射	17.25	344.00	0	2.42E-05
11		样品存储间	泄露辐射	14.37	316.40	0	1.81E-04
12		工装存储间	泄露辐射	16.20	609.90	0	3.55E-12
13		地板处	泄露辐射	8.40	150.00	0	1.08E+01
14		不上人屋面	泄露辐射	8.35	180.00	0	1.83E+00
15		刻度观察室	泄露辐射	14.98	297.81	0	5.05E-04
16		气瓶间	泄露辐射	14.98	297.90	0	5.02E-04
17		茶水间	泄露辐射	16.87	336.30	0	4.01E-05
18		新风机房	泄露辐射	17.78	354.75	0	1.20E-05
19		工件防护门外	泄露辐射	14.42	206.88	0	1.24E-01
1	东侧	迷道口	泄露辐射	12.52	505.75	2.00	1.36E-09
2		室外空间	泄露辐射	11.85	210.00	0	1.52E-01
3		CT 调制水冷间	泄露辐射	9.68	221.20	0	1.17E-01
4		强弱电间（配电间）	泄露辐射	15.17	223.90	0	4.05E-02
5		报警阀门间	泄露辐射	14.56	730.80	0	3.24E-15
6		专用工位电气机房	泄露辐射	9.70	326.40	0	2.19E-04
7		排风间	泄露辐射	7.67	255.60	0	2.39E-02
8		防护门间	泄露辐射	6.35	210.00	0	5.29E-01
9		专用工位配套间	主束直射	13.70	280.00	0	1.75E+00
10		送风间	泄露辐射	14.39	344.01	0	3.48E-05
11		样品存储间	泄露辐射	14.50	360.00	0	1.32E-05
12		工装存储间	泄露辐射	14.70	344.82	0	3.18E-05
13		地板处	泄露辐射	8.40	150.00	0	1.08E+01
14		不上人屋面	泄露辐射	8.35	180.00	0	1.83E+00
15		刻度观察室	泄露辐射	15.57	319.08	0	1.31E-04
16		气瓶间	泄露辐射	14.60	298.86	0	4.99E-04
17		茶水间	泄露辐射	14.83	303.57	0	3.66E-04
18		新风机房	泄露辐射	15.25	312.37	0	2.04E-04
19		工件防护门外	泄露辐射	10.41	248.11	0	2.03E-02

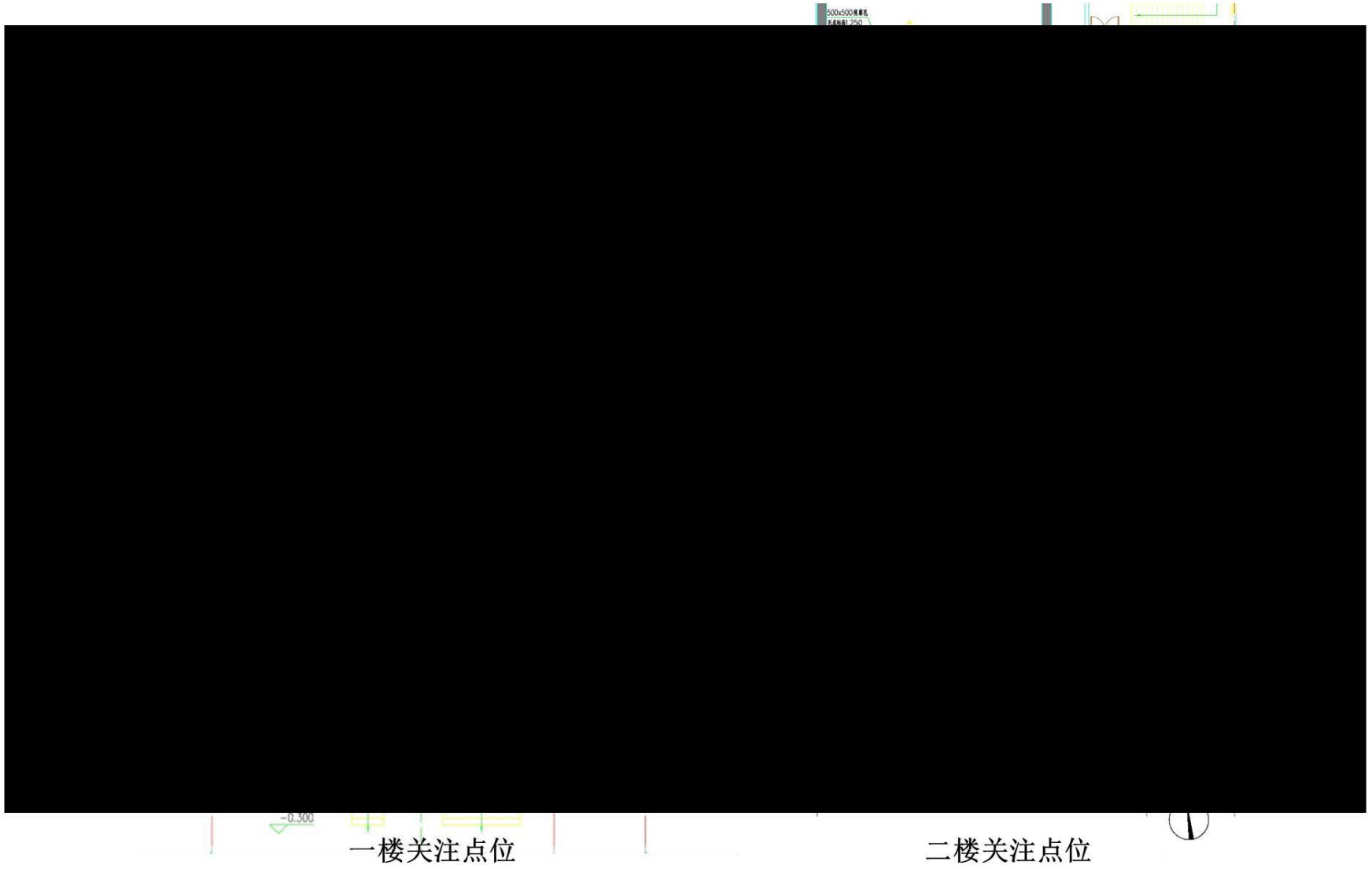


图 5-62 屏蔽体外剂量率关注点位图

取两种出束方式中屏蔽体外剂量率较大值，如下表所示。

表 5-15 屏蔽体外 30cm 处剂量率较大值

序号	关注点位名称	H_M，μSv/h
1	迷道口	8.55E-09
2	室外空间	5.29E-01
3	CT 调制水冷间	2.31E-01
4	强弱电间（配电间）	1.11E-01
5	报警阀门间	1.10E-01
6	专用工位电气机房	9.05E-03
7	排风间	5.07E-02
8	防护门间	5.29E-01
9	专用工位配套间	1.75E+00
10	送风间	3.48E-05
11	样品存储间	1.81E-04
12	工装存储间	3.18E-05
13	地板处	1.08E+01
14	不上人屋面	1.83E+00
15	刻度观察室	5.05E-04
16	气瓶间	5.02E-04
17	茶水间	3.66E-04
18	新风机房	2.04E-04
19	工件防护门外	1.24E-01

（2）迷道和防护门的影响

1）计算公式

防护 X 射线的迷道，下面的计算方法可保守地估算迷道外入口处的剂量率：

$$H_{rj}=\frac{D_{10}\alpha_1 A_1(\alpha_2 A_2)^{j-1}}{\left(d_1\cdot d_{r1}\cdot d_{r2}\cdots d_{rj}\right)^2} \qquad \text{式（5-5）}$$

式中：

α_1为入射到第一个散射体的 X 射线的散射系数；

α_2为从以后的物质散射出来的 0.5MeV 的 X 射线的散射系数（假设对以后所有散射过程是相同的）；

A_1为 X 射线入射到第一散射物质的散射面积（m^2）；

A_2为迷道的截面积（m^2，假设整个迷道的截面积近似常数，高宽比在 1~2 之间）；

d_1为 X 射线源与第一散射物质的距离（m）；

d_{r1}，$d_{r2}\cdots d_{rj}$是沿着迷道长轴的中心线距离，$d_{r1}/{A_2}^{1/2}$的比值应在 1~6 之间；

j是第 j 个散射过程。

2）参数选择

本项目后向 1m 处剂量率为 5.1Gy/h；

根据 HJ979-2018，对于初级 X 射线，散射系数取 5.0E-03，对于一次散射后的 X 射线，散射系数取 2.0E-02；

对西侧打靶情况，采用 CAD 测量可知，A_1为 1.47 m^2，A_2为 0.667 m^2，A_3为 3.14 m^2，d_1为 10.56m，d_2为 4.55m，d_3为 3.60m，d_4为 1.84m；

对东侧打靶情况，采用 CAD 测量可知，A_1为 6.58m^2，A_2为 3.42 m^2，A_3为 1.07 m^2，d_1为 9.92m，d_2为 2.66m，d_3为 3.30m，d_4为 3.40m。

3）估算结果

经计算可知，西侧打靶时，防护门处剂量率为 3.10E-10Sv/h，采用直射 X 射线的计算方法，考虑防护门的屏蔽效果（2cm 铅+30cm 空气），则防护门外 30cm 处剂量率为 1.38E-10Sv/h；东侧打靶时，防护门处剂量率为 2.80E-09μSv/h，采用直射 X 射线的计算方法，考虑防护门的屏蔽效果（2cm 铅+30cm 空气），则防护门外 30cm 处剂量率为 1.25E-09Sv/h。因此较大值为 1.25E-03μSv/h。迷道散射路径图见图 5-2。



西侧出束情况　　东侧出束情况

图 5-63 迷道散射路径图

（3）天空反散射的影响

1）计算公式

根据 NCRP151 号报告，计算公式为：

$$H = \frac{2.5E-02\left(B_{xs}D_{10}\Omega^{1.3}\right)}{(d_i \cdot d_s)^2} \qquad \text{式（5-6）}$$

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

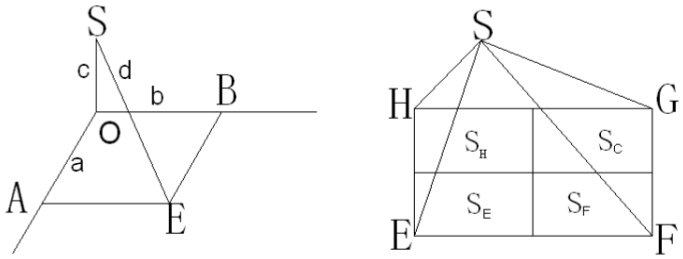
B_{xs}为 X 射线屋顶的屏蔽透射比；

Ω为由 X 射线源与屏蔽墙对向的立体角（Sr）；

d_i为在屋顶上方 2m 处离靶的垂直距离（m）；

d_s为 X 射线源至 P 点的距离（m）。

源项对屏蔽墙所张立体角示意图见下图。



（a）　　（b）

图 5-64 辐射源对屏蔽墙所张立体角示意图

对于图（a）的情况，平面 OAEB 对 S 点所张的立体角为

$$\Omega' = arctg\frac{ab}{cd} \qquad (5\text{-}7)$$

实际上，辐射源对屏蔽墙所张立体角经常是如图（b）所示的情况，这可把平面 EFGH 对 S 点所张立体角视为平面 SE、SF、SG 和 SH 对 S 点所张立体角Ω_E、Ω_F、Ω_G和Ω_H之和，即

$$\Omega = \Omega_E + \Omega_F + \Omega_G + \Omega_H \qquad (5\text{-}8)$$

2）参数选择

屋顶上方 2m 处离靶的垂直距离为 10.05m；

根据直射 X 射线的计算结果，X 射线屋顶的屏蔽透射比为 2.51E-05；

侧向 1m 处吸收剂量率为 5.1Gy/h；

根据式 5-7 和式 5-8，计算本项目对屏蔽墙所张立体角，西侧 CT 计算结果见下表。

表 5-16 西侧打靶立体角计算结果

序号	a（m）	b（m）	c（m）	d（m）	ab/cd	立体角Ω
1	3.95	6.40	10.05	12.55	0.20	0.197
2	3.95	11.00	10.05	15.41	0.28	0.273
3	11.00	9.45	10.05	17.64	0.59	0.530
4	9.45	3.95	10.05	14.35	0.26	0.253
合计						1.25

由表可知∑Ω=1.25。

同理，东侧 CT 计算结果见下表。

表 5-17 东侧 CT 打靶立体角计算结果

序号	a（m）	b（m）	c（m）	d（m）	ab/cd	立体角Ω
1	3.95	6.80	10.05	12.76	0.21	0.206
2	3.95	10.60	10.05	15.13	0.27	0.269
3	10.60	9.45	10.05	17.40	0.57	0.520
4	9.45	3.95	10.05	14.35	0.26	0.253
合计						1.25

由表可知∑Ω=1.25。

因此，无论是西侧出束还是东侧出束，X 射线源与屏蔽墙对向的立体角均为 1.25。

3）估算结果

表 5-18 不同距离 r 处天空反散射造成的剂量率

序号	距离 r，m	H(r)，μSv/h
1	5	1.69E-03
2	10	4.23E-04
3	20	1.06E-04
4	50	1.69E-05
5	100	4.23E-06

由计算结果可知，在距离源项 5m 处，由于天空反散射造成的剂量率 1.69E-03μSv/h，远小于 2.5μSv/h 的剂量率限值。

根据上述分析，给出屏蔽体外 30cm 处各关注点的剂量率如下表。

表 5-19 不同打靶位置屏蔽体外 30cm 处关注点剂量率（μSv/h）

序号	关注点位描述	直射	迷道散射	天空反散射	合计
1	迷道口	8.55E-09	1.25E-03	1.69E-03	2.94E-03
2	室外空间	5.29E-01	0	1.69E-03	5.31E-01
3	CT 调制水冷间	2.31E-01	0	1.69E-03	2.33E-01
4	强弱电间（配电间）	1.11E-01	0	1.69E-03	1.13E-01
5	报警阀门间	1.10E-01	0	1.69E-03	1.12E-01
6	专用工位电气机房	9.05E-03	0	1.69E-03	1.07E-02
7	排风间	5.07E-02	0	1.69E-03	5.24E-02
8	防护门间	5.29E-01	0	1.69E-03	5.31E-01
9	专用工位配套间	1.75E+00	0	1.69E-03	1.75E+00
10	送风间	3.48E-05	0	1.69E-03	1.72E-03
11	样品存储间	1.81E-04	0	1.69E-03	1.87E-03
12	工装存储间	3.18E-05	0	1.69E-03	1.72E-03
13	地板处	1.08E+01	0	1.69E-03	1.08E+01
14	不上人屋面	1.83E+00	0	1.69E-03	1.83E+00
15	刻度观察室	5.05E-04	0	1.69E-03	2.20E-03
16	气瓶间	5.02E-04	0	1.69E-03	2.19E-03
17	茶水间	3.66E-04	0	1.69E-03	2.06E-03
18	新风机房	2.04E-04	0	1.69E-03	1.89E-03
19	工件防护门外	1.24E-01	0	1.69E-03	1.25E-01

由表可知，不上人屋面剂量率为 1.83μSv/h，低于 10μSv/h；地板处剂量率为 10.8μSv/h，低于 5.5mSv/h，其他各处剂量率最大值出现在北侧混凝土墙外专用工位配套间，仅本项目辐射工作人员可进入，为 1.75μSv/h，低于 2.5μSv/h。

5.2.2 人员受照剂量

5.2.2.1 工作人员受照剂量估算

对于辐射工作人员的受照剂量由下式计算：

$$H = D \times t \times T \times 1 \qquad (5.2.2\text{-}1)$$

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。

T 为居留因子。

5.2.2.1.1 微观表征子系统（光源）

光源相关辐射工作人员的具体工作内容及工作模式见表 3-10。对于仅从事光源相关工作的辐射工作人员，其受照剂量计算结果见表 5-20。由计算结果可知，仅从事光源相关工作的辐射工作人员年受照剂量最大值为 4.47mSv，低于剂量约束值。

根据表 3-10，对于同时轮班负责其他射线装置的辐射防护工作的辐射防护工程师以及同时轮班负责公用设施、通用系统运维的通用技术工程师，其在光源每年的工作内容及最长工作时间均与光源加速器工程师、光束线工程师一致，因此其年最大受照剂量可参考表 5-20 中光源加速器工程师、光束线工程师的年受照剂量计算结果，最大值为 4.47mSv，低于剂量约束值。

表 5-20 光源装置辐射工作人员受照剂量计算结果

光源辐射工作人员	工作地点	辐射来源		剂量率水平，μSv/h	受照时间，h	受照剂量，mSv	总计，mSv
光源加速器工程师	光源大厅、电子加速器隧道	瞬发辐射	加速器隧道	0.86	1800	1.55	4.40
		感生放射性	隧道内部	14.25	200	2.85	
光束线工程师	光源大厅、电子加速器隧道束线前端区	瞬发辐射	加速器隧道、光束线站	0.9	1800	1.62	4.47
		感生放射性	隧道内部	14.25	200	2.85	
同步辐射实验人员	光源大厅与实验站	瞬发辐射	光束线站	0.9	2000	1.80	1.80
备注：（1）加速器隧道屏蔽体外的瞬发辐射剂量率，保守取表 5-5 中人员可达处的最大值 0.86μSv/h（位于注入区内侧墙 CW2 外）； （2）隧道内的感生放射性水平，保守取表 5-8 停机 30 分钟计算结果最大值，即增强器弯铁侧边 30cm 处，约为 14.25μSv/h； （3）光束线站屏蔽体外的瞬发辐射剂量率，保守取表 5-11 中人员可达处的最大值 0.90μSv/h（位于末端墙外）。							

5.2.2.1.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

工作人员主要包括离子源加速器工程师、离子辐照终端实验人员、辐照子系统辐射防护人员、加速器工程师和辐照终端实验人员，如表 3-19 所示。装置正常运行期间，

对辐射工作人员的辐射影响主要来自装置开机出束时产生的瞬发辐射照射以及维护维修期间接触活化部件时的辐射影响。

计算结果见表 5-21，由结果可知，个人年最大有效剂量为 3.24mSv/a，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 5mSv/a。

表 5-21 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块辐射工作人员年受照剂量

辐射工作人员	工作区域	辐射来源	剂量率水平，μSv/h	年受照时间，h	受照剂量，mSv/a	
离子加速器工程师	中央控制室	瞬发辐射[1]	1.00E-02	2000	2.00E-02	3.24E+00
	同步环大厅	维护维修接触活化部件[2]	1.61E+01	200	3.22E+00	
离子辐照终端实验人员	51#终端实验控制室	瞬发辐射[3]	1.00E-02	1500	1.50E-02	1.56E+00
	51#终端	维护维修接触活化部件[4]	6.20E+01	20	1.24E+00	
			1.69E+00	180	3.04E-01	
辐照子系统辐射防护人员	中央控制室	瞬发辐射[1]	1.00E-02	2000	2.00E-02	1.77E+00
	同步环大厅	恢复联锁接触活化部件[2]	1.61E+01	100	1.61E+00	
	51#终端	恢复联锁接触[5]活化部件	6.80E+00	20	1.36E-01	
			2.17E-03	80	1.74E-04	
加速器工程师	实验控制室 2	瞬发辐射	1.00E-02	2000	2.00E-02	4.00E-02
辐照终端实验人员	实验控制室 2、终端	瞬发辐射	1.00E-02	2000	2.00E-02	
备注：1.剂量率取自表 5-12 中关注点 1-36 处的剂量率；2.剂量率取自表 3-63 中停机 2h 后 1m 处的剂量率；3. 剂量率取自表 5-12 中关注点 1-37 处的剂量率；4. 根据建设单位的工作规划，51#终端常规情况下主要开展低流强实验，偶尔开展高流强实验，高流强工况下剂量率取自表 3-65 处停机 2h 后 30cm 处的剂量率，低流强工况下剂量率约为高流强工况下剂量率的 1/10000，参考表 3-65 停机 15min 后 30cm 处剂量率得到；5. 根据建设单位的工作规划，51#终端常规情况下主要开展低流强实验，偶尔开展高流强实验，高流强工况下剂量率取自表 3-65 处停机 2h 后 1m 处的剂量率，低流强工况下剂量率约为高流强工况下剂量率的 1/10000，参考表 3-65 停机 15min 后 1m 处剂量率得到；6. 剂量率取自表 5-12 中关注点 1-38 处的剂量率。						

5.2.2.1.3 高亮度中子源装置

高亮度中子源装置的工作人员主要包括运行值班、维修维护、辐射防护和谱仪运行

维护四类，如表 3-26 所示。装置正常运行期间，对辐射工作人员的辐射影响主要来自装置开机出束时产生的瞬发辐射照射以及维护维修期间接触活化部件时的辐射影响。工作人员受照剂量可按式 5-1 计算。计算结果见表 5-22，计算结果见由结果可知，个人年最大有效剂量为 6.24mSv/a，低于本项目辐射工作人员的剂量约束值 10mSv/a。

表 5-22 高亮度中子源装置辐射工作人员年受照剂量

辐射工作人员	工作区域	辐射来源	剂量率水平[1)]，μSv/h	年受照时间[2)]，h	受照剂量，mSv/a	
运行值班	中控室	瞬发辐射	1.00E-03	2000	2.00E-03	
维修维护	隧道、靶站、谱仪等控制区，设备厅等监督区	瞬发辐射	2.32E+00	2000	4.64	6.24
		活化部件	320	5	1.60	
辐射防护	控制室及控制区	瞬发辐射	1.00E-03	2000	2.00E-03	1.60
		活化部件	320	5	1.60	
谱仪运行维护	谱仪和谱仪大厅	瞬发辐射	1.20	2000	2.40	

注：1）中控室的剂量率取表 5-13 中 A1 的值，由于维修维护人员的工作地点包含监督区，因此保守取表 5-13 中屏蔽体外监督区剂量率水平的最大值，即 2.32μSv/h，接触活化部件受到的影响保守取表 3-80 中 1m 处的剂量率水平，谱仪人员的工作地点为谱仪大厅，取表 5-13 中谱仪大厅剂量率水平的最大值，即 1.2μSv/h。

2）根据建设单位的工作规划，目前配备的工作人员可以三班倒模式工作，因此工作人员的年工作时间保守取为 2000h，同时参考国内运行的同类型设备，维修维护人员近距离接触活化部件的时间取为 5h，辐射防护人员近距离接触活化部件的时间取为 5h，这些人员在控制区内工作时须正确佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

5.2.2.1.4 工业 CT

本项目产生的少量感生放射性气体由通风系统排出，因此运行期间，人员受照剂量仅由透射出自屏蔽体的 X 射线造成。每名工作人员每年在控制室出束时受照 2000h。

此外，本项目工作人员可进入的偶然居留场所中剂量率最大的为专用工位配套间，保守假设本项目工作人员偶然居留时均处于专用工位配套间。

停机时，工作人员会进入检测大厅进行工作，主要受感生放射性影响。每名工作人员每年在检测大厅工作 130h。根据以往项目经验，工作人员与旋转靶最近距离 20cm，

该处感生放射性物质产生的剂量率不超过 15μSv/h。

表 5-23 工业 CT 辐射工作人员受照剂量估算结果

工作区域	辐射来源	剂量率水平，μSv/h	受照时间，h	居留因子	受照剂量，mSv/a
控制室	瞬发辐射	2.94E-03	2000	1	5.85E-03
专用工位配套间	瞬发辐射	1.75	2000	1/16	2.19E-01
检测大厅	活化部件	15	130	1	1.95
合计					2.17

由上表可知，工作人员年最大受照剂量为 2.17mSv/a，小于 5 mSv/a 的剂量约束值。

5.2.2.2 公众的受照剂量估算

本项目 I 类射线装置正常运行期间，对公众的辐射影响主要来自装置开机出束期间产生的瞬发辐射直接外照射以及感生放射性气体的排放。II 类射线装置正常运行期间，对公众的辐射影响主要来自装置开机出束期间产生的瞬发辐射直接外照射。

（1）瞬发辐射外照射

瞬发辐射主要影响对象为装置屏蔽体外周围近距离范围内的公众，其所受瞬发辐射照射剂量由下式计算。

$$H = D \times t \times T \times 1 \qquad (5.2.2\text{-}2)$$

H 为公众的年受照剂量，mSv/a；

D 为公众所在区域剂量率，mSv/h；

t 为公众年受照时间，h/a；

T 为居留因子。

（2）放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用 IAEA NO.19 报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》中推荐的简单稀释模式，估算加速器正常运行工况下放射性气态流出物的影响，放射性气体对公众的照射途径主要考虑

空气浸没外照射和吸入内照射。

5.2.2.2.1 微观表征子系统（光源）

5.2.2.2.1.1瞬发辐射照射

本项目主要考虑的公众关注点位于 1#微观楼建筑外部的公众可达区。根据表 5-5、表 5-11，光源正常运行期间，四周屏蔽体外剂量率最大为 0.90μSv/h（光束线站末端墙外）。由 CAD 图纸测量可知，该处距离建筑外部公众可达区的最近距离约 10 米，考虑到剂量率与距离平方成反比，则该公众处的剂量率约为 9.00E-03μSv/h。按照各光束线站每年最多运行 5000h 计算，居留因子取 1/16，计算得到该处公众因瞬发辐射外照射造成的年受照剂量约为 2.81E-03mSv。

5.2.2.2.1.2放射性气体排放造成的辐射剂量

本装置放射性排风口的参数见下表。

表 5-24 加速器装置放射性排风口参数

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
15	361（D2 线站）	12.9（D2 线站）

（a）空气浸没外照射

（1）与排风口近距离范围内的公众， $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$（x≤47.5m）

根据 IAEA NO.19 号报告，当 $x \leq 2.5\sqrt{A_b}$ 时，关注点处地面空气浓度可由下式计算：

$$c_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \qquad (5.2.2\text{-}3)$$

式中，

$C_{a,i}$ 为距离排风口 x 米处核素 i 的地面空气浓度，Bq/m^3；

Q_i 为放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s，光源相关数据见表 3-34；

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

u_a为释放高度上年平均风速，m/s，取值 2m/s；

K为经验常数，m，取值 K=1m；

（2）与排风口距离 x＞2.5$\sqrt{A_b}$（x＞47.5m）

根据 IAEA NO.19 号报告，当 x＞2.5$\sqrt{A_b}$时，关注点处地面空气浓度可由式 5-4 计算。光源共设置 4 个涉放排风口，根据 CAD 图纸测量得到公众可达处与各个排风口最近的水平距离约 67m。本项目光源的公众均属于此情形。

$$c_{a,i}=\frac{P_p B Q_i}{u_a} \qquad (5.2.2\text{-}4)$$

式中：

B为在下风距离 x 处的高斯扩散因子，1/m^2；由下式计算。

σ_z为垂直扩散参数，m，

$$B=\frac{16}{\sqrt{2\pi^3}}\frac{1}{x\sum z},\quad \sum z=(\sigma_z{}^2+A_b/\pi)^{0.5},\quad \sigma_z=\frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \qquad (5.2.2\text{-}5)$$

不同距离公众处的地面空气浓度计算结果列于表 5-25。

表 5-25 各关注点处地面空气浓度计算结果，Bq/m^3

公众与排风口的距离/m	^{11}C	^{13}N	^{15}O
67	1.06E+00	5.32E+01	6.04E+00
100	6.66E-01	3.35E+01	3.81E+00

空气浸没外照射剂量可由下式计算：

$$H_A=t\cdot S_f\cdot C_{a,i}\cdot G_A\cdot T \qquad (5.2.2\text{-}6)$$

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；取值 3.15E+07s；

S_F为建筑物屏蔽因子，本次评价取 1；

G为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见下表，取值来自IAEA NO.19；

T为居留因子。

表 5-26 剂量转换因子

核素	剂量转换因子	
	空气浸没，(Sv/s)/(Bq/m³)	吸入，Sv/ Bq
^{11}C	4.89E-14	1.80E-11
^{13}N	4.90E-14	/
^{15}O	4.91E-14	/

空气浸没外照射剂量计算结果见下表。

表 5-27 空气浸没外照射剂量计算结果，Sv/a

公众距离/m	^{11}C	^{13}N	^{15}O	总计
67	3.25E-08	1.64E-06	1.87E-07	1.86E-06
100	2.05E-08	1.04E-06	1.18E-07	1.17E-06

（b）吸入内照射

吸入内照射剂量可由下式计算：

$$H_{h\cdot i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \qquad (5.2.2\text{-}7)$$

式中：

$H_{h\cdot i}$ 为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a；

u 为公众个人正常情况下的呼吸率，m^3/h，成人：$1.2m^3/h$ ；

$g_{h\cdot i}$ 为吸入放射性核素 i 产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq；

吸入内照射剂量计算结果见表 5-28。

表 5-28 吸入内照射剂量计算结果，Sv/a

公众距离/m	^{11}C	^{13}N	^{15}O	总计
67	3.99E-09	/	/	3.99E-09
100	2.52E-09	/	/	2.52E-09

（c）总受照剂量

放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果列于表 5-29。

表 5-29 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果，Sv/a

公众距离/m	^{11}C	^{13}N	^{15}O	总计
67	3.65E-08	1.64E-06	1.87E-07	1.87E-06
100	2.30E-08	1.04E-06	1.18E-07	1.18E-06

5.2.2.2.1.3公众受照剂量汇总

光源公众受照剂量计算结果汇总见表 5-30。由表 5-30 可看出光源运行期间对公众所致的最大个人剂量为 2.99E-03mSv/a，低于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-30 光源运行所致公众受照剂量汇总，mSv/a

序号	公众距离/m	受照途径		总计，mSv/a
		瞬发辐射	放射性气体	
1	67	2.81E-03	1.87E-03	4.68E-03
2	100	2.81E-03	1.18E-03	3.99E-03

5.2.2.2.2 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块

5.2.2.2.2.1瞬发辐射外照射

瞬发辐射主要影响对象为周围近距离范围内的公众主要为：

（1）建筑外的公众主要考虑近距离范围内的公众。

（2）建筑体内。

上述公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果列于表 5-31。

表 5-31 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

公众所在位置	来源	瞬时剂量率，μSv/h	居留因子	装置年运行时间，h	年受照剂量，mSv/a
园区道路	运行所致瞬发辐射（1-14 号点位）	0.02	1/16	4000	5.00E-03
实验室	运行所致瞬发辐射（2-5 号点位）	0.01	1	4000	4.00E-02

5.2.2.2.2.2感生放射性气体的排放

（1）空气浸没外照射

装置活化空气排放口位于楼顶，排风高度约 22m，排风口临近最高建筑物（动力中心）高度 Hb 为 23.25m。最靠近关注点的建筑物的最大截面积 Ab 为 2511m^2。则可知该区域排风口的高度 H＜2.5Hb。对于评价范围的公众，根据 IAEANO.19 号报告，当关注点与排风口的距离 x≤2.5$\sqrt{Ab}$=125m 时，关注点地面空气浓度可由公式（5.2.2-3）计算。可以得出关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-32。

表 5-32 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块关注点处地面空气浓度计算结果

核素	近距离范围内浓度，Bq/m^3
^{11}C	1.57E+01
^{13}N	2.42E+01
^{15}O	1.10E+00
^{41}Ar	4.78E+00

注：放射性核素的年均排放率来源于表 3-61。^{41}Ar 空气浸没剂量转换因子为 6.50E-14 (Sv/s) /(Bq/m^3)。

空气浸没外照射剂量可由公式（5.2.2-6）计算，建筑外道路上公众的空气浸没外照射剂量计算结果见下表。

表 5-33 空气浸没外照射剂量计算结果

核素	公众空气浸没外照射剂量，mSv/a
^{11}C	1.06E-03
^{13}N	1.64E-03
^{15}O	7.45E-05
^{41}Ar	4.04E-04
总计	3.17E-03

（2） 吸入内照射

吸入内照射剂量可由公式（5.2.2-7）计算，由此得出建筑外道路上的公众吸入内照射剂量计算结果见下表。

表 5-34 空气吸入内照射剂量计算结果

核素	公众空气吸入内照射剂量，mSv/a
^{11}C	1.86E-04
^{13}N	——
^{15}O	——
^{41}Ar	——
总计	1.86E-04

（3）公众受照剂量汇总

公众受照剂量计算结果汇总见下表，装置正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 4.00E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-35 辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块公众受照剂量汇总

公众所在位置	瞬发辐射所致年受照剂量，mSv/a	活化空气排放所致年受照剂量，mSv/a	天空反散射所致年受照剂量，mSv/a	年受照剂量总计，mSv/a
园区道路	5.00E-03	3.36E-03	1.25E-02	2.08E-02
实验室	4.00E-02	——	——	4.00E-02

5.2.2.2.3 高亮度中子源装置

5.2.2.2.3.1瞬发辐射外照射

瞬发辐射主要影响对象为装置周围近距离范围内的公众，主要为通道的人员以及建筑外的公众。其中：

（1）建筑外的公众主要考虑近距离范围内的公众，主要考虑建筑外围绿化空地的停留人员。

（2）建筑内的人员。

上述公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果列于表 5-36。

表 5-36 公众所受瞬发辐射外照射剂量计算结果

公众所在位置	来源	瞬时剂量率[1)]，mSv/h	居留因子	装置年运行时间，h	年受照剂量，mSv/a
园区道路	运行所致瞬发辐射	9.45E-05	1/16	6000	3.55E-02
通道	运行所致瞬发辐射	1.37E-06	1	6000	8.23E-03

注：1）考虑与关注点 A23 的距离为 1m，此时剂量率水平为 0.0945μSv/h；通道距离谱仪的距离约为 27m，考虑距离的衰减，参观通道的剂量率水平为 1.37×10^{-3}μSv/h。

5.2.2.2.3.2 感生放射性气体的排放

（1）空气浸没外照射

装置活化空气排放口位于楼顶，排风高度约 26m，排风口临近最高建筑物（动力中心）高度 H_b 为 23.25m。最靠近关注点的建筑物的最大截面积 A_b 为 2511m^2。则可知该区域排风口的高度 $H<2.5H_b$。对于评价范围的公众，根据 IAEA NO.19 号报告，当关注点与排风口的距离 $x\leq2.5\sqrt{A_b}$（x≤125m）时，关注点地面空气浓度可由公式（5.2.2-3）计算，则关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-37。

表 5-37 关注点处地面空气浓度计算结果

核素	近距离范围内浓度，Bq/m^3
^{11}C	1.14E+01
^{13}N	3.69E+01
^{15}O	2.73E+01
^{41}Ar	1.36E+01

注：放射性核素的年均排放率来源于表 3-75。

空气浸没外照射剂量可由公式（5.2.2-6）计算，建筑外道路上公众的空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-38。

表 5-38 空气浸没外照射剂量计算结果

核素	公众空气浸没外照射剂量，mSv/a
^{11}C	7.52E-04
^{13}N	2.44E-03
^{15}O	1.81E-03
^{41}Ar	1.19E-03
总计	6.19E-03

（2） 吸入内照射

吸入内照射剂量可由公式（5.2.2-7）计算，建筑外道路上的公众吸入内照射剂量计算结果见表 5-39。

表 5-39 空气吸入内照射剂量计算结果

核素	公众空气吸入内照射剂量，mSv/a
^{11}C	9.23E-05
^{13}N	——
^{15}O	——
^{41}Ar	——
总计	9.23E-05

（3）汇总

建筑外道路上的公众受到感生放射性气体排放所致剂量计算结果见下表。

表 5-40 感生放射性气体排放所致公众剂量计算结果

核素	公众受照剂量，mSv/a
^{11}C	8.45E-04
^{13}N	2.44E-03
^{15}O	1.81E-03
^{41}Ar	1.19E-03
总计	6.19E-03

5.2.2.2.3.3 小结

公众受照剂量计算结果汇总见表 5-41，装置正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 4.17E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-41 高亮度中子源装置公众受照剂量汇总

公众所在位置	瞬发辐射所致年受照剂量，mSv/a	活化空气排放所致年受照剂量，mSv/a	年受照剂量总计，mSv/a
园区道路	3.55E-02	6.19E-03	4.17E-02
通道	8.23E-03	——	8.23E-03

5.2.2.2.4 工业 CT

瞬时照射影响对象主要考虑评价范围内非辐射工作人员或公众成员，除了混凝土屏蔽墙外，不考虑其他屏蔽，因此计算结果足够保守。

本项目机房屏蔽体外四周环境中，刻度观察室有非辐射工作人员长居留，居留因子取 1；茶水间为部分居留，取 1/4；其他区域为偶然居留，取 1/16。

机房屏蔽体外北侧约 30m 处有样本准备室，西侧约 30m 处有测试楼，属于人员长居留场所，因此有必要分析其受照剂量。采用距离平方反比进行估算，忽略了除机房屏蔽墙外其他屏蔽的存在，因此足够保守。

各参数的取值和计算结果见下表。由表可知，公众受照剂量最大出现在室外空间或防护门间，年受照剂量为 6.61E-02mSv，低于 0.1mSv 的剂量限值。

表 5-42 工作 CT 周围公众受照剂量的计算参数和计算结果

序号	关注点位描述	剂量率，μSv/h	年出束时间，h	居留因子	受照剂量，mSv/a
1	室外空间	5.29E-01	2000	1/16	6.61E-02
2	CT 调制水冷间	2.31E-01	2000	1/16	2.89E-02
3	强弱电间（配电间）	1.11E-01	2000	1/16	1.39E-02
4	报警阀门间	1.10E-01	2000	1/16	1.38E-02
5	排风间	5.07E-02	2000	1/16	6.34E-03
6	防护门间	5.29E-01	2000	1/16	6.61E-02
7	送风间	3.48E-05	2000	1/16	4.35E-06
8	样品存储间	1.81E-04	2000	1/16	2.26E-05
9	工装存储间	3.18E-05	2000	1/16	3.98E-06
10	刻度观察室	5.05E-04	2000	1	1.01E-03
11	气瓶间	5.02E-04	2000	1/16	6.28E-05
12	茶水间	3.66E-04	2000	1/4	1.83E-04
13	新风机房	2.04E-04	2000	1/16	2.55E-05
14	样本准备室	1.18E-04	2000	1	2.37E-04
15	测试楼	2.37E-02	2000	1	4.47E-02

5.2.2.2.5 小结

由于本项目所在园区内三台Ⅰ类射线装置会同时运行，因此在公众受照剂量计算时，考虑了瞬发辐射影响和 3 台Ⅰ类射线装置活化气体排放共同所致的辐射影响，计算结果

见下表，由计算结果可知叠加后公众受照剂量低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-43 公众受照剂量叠加

受照来源		受照剂量，mSv/a	年总受照剂量，mSv/a
光源[1]	瞬发辐射	7.81E-05	2.40E-02
	放射性气体排放	1.87E-03	
离子加速器[2]	瞬发辐射	9.38E-07	
	天空反散射	1.25E-02	
	放射性气体排放	3.36E-03	
高亮度中子源装置[3]	瞬发辐射	3.54E-06	
	放射性气体排放	6.19E-03	

注：1、根据表 5-5、表 5-11，光源正常运行期间，屏蔽体外剂量率最大为 0.90μSv/h（光束线站末端墙外），保守考虑距离 60m，可以得出剂量率水平为 2.5E-04μSv/h，由此可以得出瞬发辐射所致年受照剂量为 7.81E-05 mSv/a；放射性气体排放所致公众受照剂量来自表 5-30；

2、保守取表 5-31 中的 1 号点位，考虑 100m 的距离衰减，可以得出剂量率水平为 2.0E-06μSv/h，由此可以得出瞬发辐射所致年受照剂量为 9.38E-07mSv/a；放射性气体排放和天空反散射所致公众受照剂量来自表 5-35；

3、保守取表 5-36 中的园区道路，考虑 100m 的距离衰减，可以得出剂量率水平为 9.45E-06μSv/h，由此可以得出瞬发辐射所致年受照剂量为 3.54E-06mSv/a，放射性气体排放所致公众受照剂量来自表 5-41。

5.3 事故影响分析

本项目产生的辐射场均是瞬发性的，一旦停机，能造成环境影响的辐射源立即消失，且不会再引起周边介质的活化。可能发生的事故主要有人员误入高辐射区造成的人身伤害事故、人员违规操作或辐射安全系统故障失效造成的人员受照剂量超出年剂量限值以及冷却水泄漏事故三类。

5.3.1 人员误入高辐射区

该类事故是装置运行期间可能发生的最严重事故，人员在运行出束期间误入加速器和输运线隧道、靶站热室等控制区内，短时间的照射可使受到照射的人员产生严重放射损失，甚至导致人员伤亡。

由于各辐射工作场所屏蔽结构保持完好，因为该类事故对周围环境不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

射线装置运行控制区设计有功能齐全，具有安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，采用清场搜索、紧急停机、分区控制、警报装置等安全设备和措施，确保当某一区域有束流时，该区域的门无法打开，工作人员不能进入该区域；当某一区域有人时，束流也不能被传输到该区域，能够有效防止误入事故的发生。

为防止各项安全联锁硬件设施失效，建设单位在每次开机出束前，都需确认安全联锁设施的有效性，并随身佩戴有效的剂量报警仪。

可以采取的事故应急措施如下：

（1）一旦发生人员误入事故，就近按下控制区内急停开关或操作台上的急停开关，立即停止装置出束，误入人员迅速撤离；

（2）评估误入人员是否受到超剂量照射；

（3）查找事故原因，确认安全联锁系统是否发生故障并及时排除故障。

5.3.2 人员受照剂量超出年剂量限值

本项目运行期间，由于辐射安全系统故障或工作人员操作不当等原因，造成人员误入控制区内部，导致人员受照剂量超过国家规定的年剂量限值。

发生该类事故时，由应急工作小组组织相关人员对年剂量限值的辐射工作人员的工作情况以及周围环境可能超出剂量率控制水平的区域进行调查，查找人员受到超年剂量限值照射的原因，尽快提出解决方案。

可以采取的事故应急措施如下：

（1）定期测试和维护辐射安全系统，确保其正常运行。同时加强对工作人员的辐射安全宣传教育，确保各项操作规程得到有效的贯彻和落实；

（2）开机出束前，撤离控制区时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和程序对各区域进行清场。出束期间一旦发现有人员滞留在控制区内，就近按下急停按钮。工作人员进入控制区内部工作时应随身佩戴有效的剂量报警仪，以便随时了解控制区内的辐射水平并在辐射水平超出阈值时发出报警信号；

（3）辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查；

（4）做好设备稳定性和状态检测，使装置始终保持在最佳状态下工作。

5.3.3 冷却水泄漏事故

本项目可能活化的冷却水主要为射线装置一次冷却水各回路的冷却水，该系统为闭式循环系统，在系统运行或检修拆装过程中由于设备故障或操作失误可能发生活化冷却水泄漏事故。

一旦检测发现冷却水泄漏，则立刻停机并关闭相应阀门，防止形成大规模漏水，用专用桶收集后按照不同区域产生的冷却水分类存放，冷却水中放射性核素的活度浓度较低，不会对工作人员和环境造成辐射影响。

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

综上所述，建设针对项目期间可能发生的事故采取了一系列辐射安全防护措施，这些措施具有可行性和安全冗余性，本项目事故工况下的影响较小。

6 辐射安全管理

6.1 机构与人员

6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构

苏州国家实验室拟设置专门的辐射安全与环境保护管理小组，组长由分管安全的领导担任，全面负责辐射防护和安全管理的领导工作；小组成员由涉及核技术利用工作的实验室领导和工作人员组成，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。本项目建成后，由该领导小组负责本项目相关的辐射安全和管理工作。

辐射安全与环境保护管理小组的主要职责如下：

（1）负责全员辐射工作人员的健康查体、个人剂量监测以及各装置的防护、设计、报批、检测、检查等工作；

（2）制定辐射安全防护与管理规章制度，并定期检查各项规章制度的贯彻落实情况；

（3）负责辐射工作人员的培训和管理；

（4）管理、监督、协调射线装置使用过程中的辐射安全工作；

（5）负责放射性三废的监督管理和环境保护。

辐射防护负责人的主要职责如下：

（1）负责辐射、安全及环境相关法律法规的追踪；

（2）提出对相关法规在苏州国家实验室内部实施的方案；

（3）就辐射、安全及环境相关报批事项的对外联络，包括许可证申请与更新；

（4）负责个人剂量及场所监控记录的收集与管理；

（5）负责射线装置台账统一管理；

（6）组织年度安全演练及事故应急处理；

（7）组织编写并提交年度评估报告；

（8）组织发放和回收个人剂量计。

6.1.2 辐射工作人员管理

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40 号）的规定，“销售（含建造）、使用 I 类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。”本项目拟配备至少 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，同时作为辐射安全专职管理人员。

建设单位目前已聘任 2 名注册核安全工程师，同时拟制定辐射工作人员培训计划，新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，必须通过生态环境部培训平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

6.2 辐射安全管理规章制度

为加强辐射安全管理，按照《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》等法规的要求，实验室目前正在建立一系列辐射安全管理制度，主要内容涵盖《辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全保卫制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》《操作规程》《设备检查与维修制度》等，建成后可满足辐射安全管理要求。

6.3 辐射监测

本项目辐射监测总体包括工作场所监测、个人剂量监测和环境监测。工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测主要以巡测的方式进行；个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。

6.3.1 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。建设单位拟为光源装置、离子加速器装置和高亮度中子源装置的辐射工作人员发放光子和中子剂量片，定期（每三个月）监测放射性工作人员受到的光子和中子外照射剂量，分析数据，判断人员的受照情况，对于累积剂量超过管理目标值的人员，限制其参加本年度此后的放射性工作，以保证工作人员的年剂量满足管理目标值。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

对于辐射剂量较大的作业工况，为作业人员佩戴个人剂量报警仪。个人剂量报警仪具有实时显示剂量率、累积剂量和报警功能。根据剂量管理目标值设置剂量率和累积剂量阈值，当仪器数值超过阈值时，仪器发出报警，提醒工作人员远离高辐射区，以此可实现实时监测和评估人员的单次和短期受照剂量，防止短时剂量超过管理限值。

在高亮度中子源装置控制区出入口布置手脚表面污染监测仪，对来自控制区内的工作人员的手部、脚底部、衣物表面进行表面污染监测，通过分析数据及时发现事故隐患，以便及时发现污染和防止污染转移。

苏州国家实验室拟安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。个人剂量档案终身保存。

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

6.3.2 工作场所监测

本项目工作场所监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，采用安装固定式监测仪表和便携式监测仪表相结合的方式。每年至少进行一次，监测数据记录存档。具体辐射工作场所监测计划列于表 6-3。

6.3.3 环境监测

本项目环境监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，每年至少进行一次，监测数据记录存档，具体环境监测计划列于表 6-4。

其中，在园区内环境设置 4 个环境监测站。每个监测点设固定式中子、γ 探测器各 1 个，用于对环境中子、γ 辐射水平进行实时监测。监测数据通过有线或无线通讯设备实时传输至终端数据处理中心。具体的设备参数见表 6-1，分布位置示意见图 6-1。

表 6-1 环境监测设备参数

设备	性能参数
环境中子剂量监测器	测量范围：0.01μSv/h～10mSv/h，能量响应：0.025 eV～15 MeV
环境伽马剂量监测器	测量范围 0.01 μSv/h～1mSv/h；能量响应：50 keV～7 MeV
环境站	环境剂量监测器的放置场所，环境要求恒温恒湿

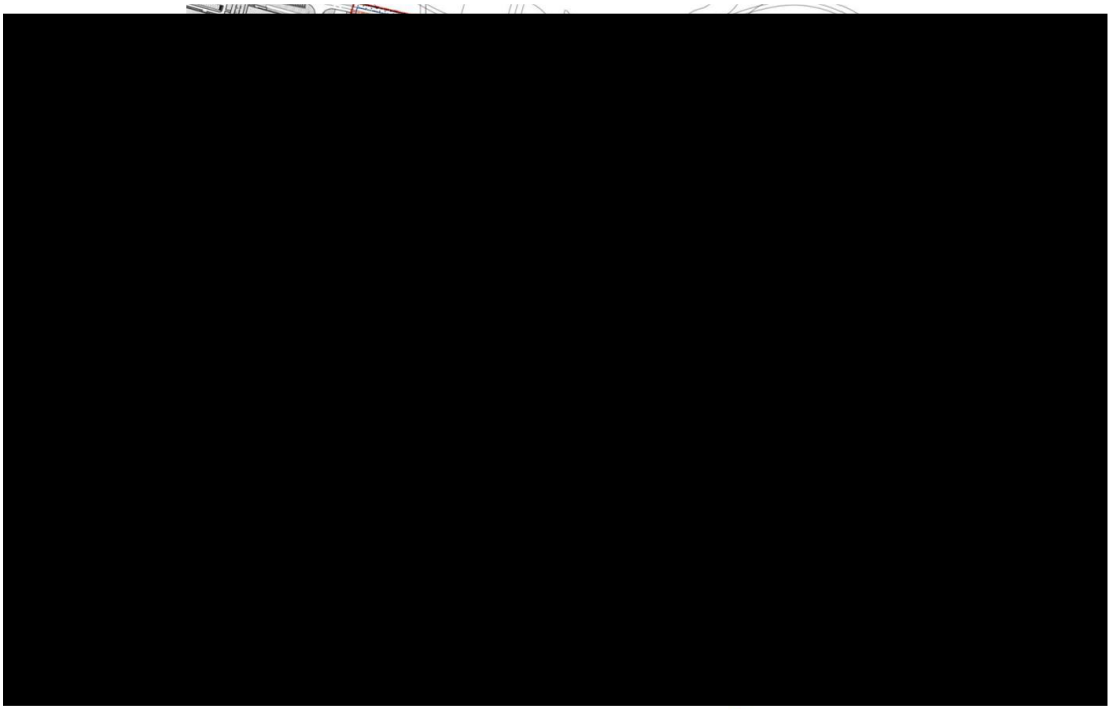


图 6-1 环境监测点位分布示意图

6.3.4 监测设备

本项目拟配备监测设备见表 6-2。

表 6-2 本项目拟配备防护用品及监测仪器

序号	仪器设备名称	数量，个
1	便携式 X/γ 监测设备	4
2	便携式中子辐射监测设备	4
3	手脚沾污仪	3
4	表面污染监测仪	3
5	个人剂量报警仪	26
6	个人剂量计	每人一个
7	固定式中子探测器	77 个
8	固定式 X/γ 辐射监测系统	87 个

表 6-3 本项目辐射工作场所监测计划表

监测类别	监测对象	监测方式	监测内容	监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	光源装置	固定式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	见图 4-33	实时
		便携式仪表监测			辐射工作场所四周屏蔽体外、监督区、控制室等人员长居留场所	1 次/年
	辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块	固定式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	见图 4-48 和图 4-49	实时
		便携式仪表监测			机房四周和屋顶屏蔽墙体外、门外、监督区边界、控制室等人员长居留场所	1 次/年
	高亮度中子源装置	固定式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	见图 4-71~图 4-75	实时
		便携式仪表监测			机房四周和屋顶屏蔽墙体外、门外、监督区边界、控制室等人员长居留场所	1 次/年
		空气活化在线监测系统	活化空气	感生放射性核素	排风口	实时
	工业 CT	固定式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率	见图 4-86	实时
		便携式仪表监测			机房四周和屋顶屏蔽墙体外、门外、监督区边界、控制室等人员长居留场所	1 次/年
委托监测	光源装置	便携式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	同自行监测点位	1 次/年
	辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块	便携式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	同自行监测点位	1 次/年
	高亮度中子源装置	便携式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率、中子剂量当量率	同自行监测点位	1 次/年
	工业 CT	便携式仪表监测	外照射剂量率	γ辐射剂量率	同自行监测点位	1 次/年

表 6-4 本项目环境监测计划表

监测方式	监测对象	监测方式	监测内容	监测项目	监测点位	监测频次
自行监测	光源装置	便携式仪表监测	外照射	γ辐射剂量率和中子剂量率	光源所在建筑周边敏感点及道路	1次/年
		固定式仪表监测			采用园区内的固定式监测点位	实时
	辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块	便携式仪表监测	外照射	γ辐射剂量率和中子剂量率	建筑周边敏感点及道路	1次/年
		固定式仪表监测			采用园区内的固定式监测点位	实时
	高亮度中子源装置	便携式仪表监测	外照射	γ辐射剂量率和中子剂量率	高亮度中子源装置所在建筑周边敏感点及道路	1次/年
		固定式仪表监测			采用园区内的固定式监测点位	实时
	工业CT	便携式仪表监测	外照射	γ辐射剂量率	所在建筑周边敏感点及道路	1次/年
委托监测	外照射	便携式仪表监测	γ辐射剂量率和中子剂量率		射线装置所在建筑周边敏感点及道路	1次/年
	土壤	取样监测	总β、感生放射性核素、γ能谱		场址内主导风向的下风向最近的土壤样	1次/年
	循环冷却水	取样监测	H-3、Be-7、总α、总β		在冷却水收集的暂存池取样	发生冷却水泄露或排放前
	固体废物外表面	便携式仪表巡测	γ剂量率		固体废物外表面	收集及送贮时

6.4 辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》要求，使用II类以上（含II类）射线装置的辐射工作单位应建立完善的辐射事故应急方案或具有针对性与操作性的应急措施。

实验室应在本项目建成运行前，成立辐射事故应急处理小组，由项目辐射安全相关负责人担任组长。按照上述要求制定可行的《辐射事故应急预案》，具体内容包括应急处理原则、辐射事故分级、应急响应程序、应急报告电话等。且根据辐射源项的更新不断完善应急预案，定期进行辐射事故应急演练，并做好演练记录。

重点应做好以下几个方面的工作：

（1）成立辐射事故应急小组，并由项目辐射安全相关负责人担任组长，负责辐射事故应急处置工作的组织、指挥和协调。

（2）信息上报

一旦发生辐射事故，现场工作人员应立即停止装置出束或工作同时报告实验室辐射事故应急小组，并在2小时内填写《辐射事故初始报告表》，且向苏州工业园区、苏州市生态环境局报告。对于造成或可能造成人员超剂量照射的，还应向苏州工业园区、苏州市公安局和卫生行政主管部门报告。

（3）辐射事故应急处置措施

发生辐射事故后，应采取以下应急处置措施：

1）针对射线装置使用期间的辐射事故，事故发生时刻应立即按下急停开关或直接断电停机，撤出机房内人员；

2）尽快将可能受到辐射伤害的人员送到指定医院进行救治；

3）对于需要进入机房内部进行应急操作的情况，工作人员应穿戴防护用品，并佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪；

4）应尽可能记录现场有关情况，对工作人员可能受到的事故照射剂量，可针对事故实际情况进行评估，并对工作人员进行健康检查和跟踪，按照国家有关放射卫生防护标准和规范以及相关程序，评估事故对工作人员健康的影响；

5）对可能受到污染的辐射事故现场实施连续监测，并保护好现场；

6）事故处理后必须组织有关人员进行讨论，分析事故发生的原因，从中吸取经验和教训，必须采取措施防止类似事故再次发生。

（4）应急培训和演练

定期进行应急培训，熟悉各类辐射事故应急响应程序、辐射防护的基本知识、应急救援的操作技能、人员和场所去污的基本知识和操作技能、辐射监测仪表的性能和操作。

定期进行辐射事故应急演练，对每一次演练应认真进行评价和总结。应以模拟辐射事故应急响应的形式进行应急演练，并设计不同情景的假想辐射事故进行演练，还应对应急响应中各项具体操作技能进行练习。

（5）应急装备保障

应配备一定的应急设施设备，主要包括通讯设备、交通工具、辐射监测设备、辐射防护用品、救援器材和工具等。

通过采取上述措施，加强实验室辐射事故应急能力建设，确保一旦发生辐射事故，能立即启动辐射事故应急预案，并采取相应的应急措施。

6.5 申请者从事辐射工作能力评价

6.5.1 辐射安全与环境保护管理

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应当设置专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少安排 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

同时，根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人

员管理的通知》（国核安发[2015]40 号）的规定，销售（含建造）、使用 I 类射线装置的单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，新申领辐射安全许可证单位的辐射安全关键岗位在取证前由注册核安全工程师担任。

建设单位拟成立辐射安全与环境保护管理小组，拟设置专门的辐射安全与环境保护管理小组，组长由分管安全的领导担任，全面负责辐射防护和安全管理的领导工作；小组成员由涉及核技术利用工作的科室领导和工作人员组成，具体承担辐射防护和安全管理的日常工作。

一名注册核安全工程师尚未落实到位。目前，建设单位已制定相关工作计划，确保在取证前配备齐全具有相应资质的专业人员。

建设单位按此要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。

6.5.2 辐射工作人员培训

根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。

建设单位拟制定辐射工作人员培训计划，新从事辐射活动人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，必须通过生态环境部培训平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

在严格落实人员培训计划后，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

6.5.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者射线装置使用场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用 3 台Ⅰ类射线装置和 3 台Ⅱ类射线装置用于实验研究，经预测分析评价，各区域的辐射屏蔽设计均能确保屏蔽体外剂量率水平满足相关标准的要求。各机房设计了完备的安全联锁系统，通过门-机联锁、门-灯联锁、紧急停机、声光报警、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止工作人员和公众意外照射。本项目的辐射防护设计方案满足辐射防护与安全的要求。

建设单位应按照辐射防护设计方案进行施工建设，并确保经验收合格后投入使用。在此基础上，射线装置机房能满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

6.5.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目拟为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 3 个月。并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。并为射线装置所在区域配备一定数量的个人剂量报警仪，用于工作人员在控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目拟在射线装置所在机房内设置固定式监测仪表，能够对工作场所内的辐射水平进行实时在线监测，并设定了报警阈值。此外，拟配备便携式中子辐射巡测仪、便携式 X-γ 辐射巡测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

建设单位按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

6.5.5 规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

建设单位根据本项目使用的射线装置情况，正在建立相应的辐射安全管理规章制度，

包括《辐射安全管理组织机构及岗位职责》《辐射安全保卫制度》《辐射监测计划》《个人剂量监测及健康档案管理制度》《工作人员培训制度》《放射性废物管理规定》《操作规程》《设备检查与维修制度》等制度。

在以上制度按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

6.5.6 辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有辐射事故应急措施。

建设单位拟在本项目建成运行前，按要求制定可行的《辐射事故应急预案》。应急预案内容包括总则、辐射事故应急组织机构和职责分工、辐射事故分级、应急响应、应急终止、应急保障等内容。成立辐射事故应急处理小组，由项目辐射安全相关负责人担任组长。配备充足的辐射事故应急监测、救援等方面的专用装备、器材和工具等，并定期组织开展辐射事故应急演练，增加应急工作人员的实战经验。确保一旦发生辐射事故，能立即启动辐射事故应急预案，并采取相应的应急措施。

建设单位按上述要求制定完成《辐射事故应急预案》并建立相应的辐射应急能力后，可满足相关要求。

6.5.7 放射性三废治理

本项目运行期间产生的放射性三废主要来自 3 套Ⅰ类射线装置的运行。

Ⅰ类射线装置所在机房内均设有排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体经机房排风管排入环境。

放射性废液主要是Ⅰ类射线装置产生的活化冷却水。对于活化冷却水，均设置了暂存容器和暂存场所，可确保冷却水在排放前安全暂存。放射性废液暂存一定时间，满足解控标准后排入污水管网。

放射性固废主要来自活化结构部件，建设单位拟对产生的放射性固体废物分类收集和包装，其放射性活度浓度一般高于豁免水平，需要对拆卸下来的部件加强管理，进行辐射水平监测、登记，暂存在固废暂存场所。暂存一定时间，满足解控标准后按照一般废物处理。

6.5.8 辐射工作能力综合评价

对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》最新修订要求，对建设单位从事申请活动种类（使用I类射线装置）的能力进行综合分析与评价，结果见表 6-5。

表 6-5 建设单位从事辐射活动能力的评价

序号	应具备条件	评价结果
1	使用Ⅰ类射线装置的，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。	建设单位按要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求
2	依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	至少应有1名注册核安全工程师
3	新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。	建设单位拟从事辐射工作的人员上岗前需参加并通过辐射安全与防护考核，考核合格后，方可满足要求。
4	放射性同位素与射线装置使用场所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施	设计满足要求
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。	设计满足要求
6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	规章制度建立完成后方满足要求
7	有完善的辐射事故应急措施。	建设单位按要求建立后满足要求

6.6 环保投资一览表

本项目拟采取的环境保护（辐射防护）措施及环保投资一览表见表 6-6。

表 6-6 本项目拟采取的环境保护措施及环保投资一览表

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资（万元）
1	辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全管理领导小组	0
		辐射安全管理制度：制定操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案，辐射事故应急预案等	
2	人员培训与考核	辐射工作人员参加辐射安全与防护培训与考核	20
3	监测仪器与防护用品	固定式区域γ监测仪、固定式中子区域监测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式 X-γ 辐射巡测仪、个人剂量计和个人剂量报警仪等	3468.51
		工作服、口罩、手套等	
4	辐射防护设施工程		26500
5	环境影响评价、验收监测和环境监理		500
总计			30488.51

6.7 竣工环保验收一览表

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

表 6-7 本项目竣工环保验收一览表

序号	验收内容	验收要求	
1	环保资料	本项目审批后的环境影响报告书、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。	
2	辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。	
3	人员要求	1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 1 名； 2. 辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
4	电离辐射	屏蔽体外剂量率	辐射工作场所四周实体屏蔽墙、入口门外、机房顶：剂量率水平不高于“1.4.2”小节中的数值。
5	辐射防护与安全措施	光源装置	1.辐射工作场所分区：控制区包括直线加速器隧道、储存环-增强器隧道、线站防护棚屋；监督区包括控制室、与控制区相邻的辐射工作场所，含实验大厅、用户实验室、空调机房等。 2.人身安全联锁系统：由 PLC、联锁门、LED 显示屏、机械钥匙箱、联锁面板、急停按钮、搜索按钮、警铃警灯、红外移动传感器组成，且所有安全设备均能正常投入使用。 3.通风系统：光源辐射工作场所设置通风系统，排风管道经隧道屏蔽墙上的风管孔迷宫，将收集的废气引至微观楼屋面，经过滤后排至外环境，排风口高度距离地面约 15 米。 4.场所辐射监测系统：设置 29 个固定辐射监测点位，主要布置在直线加速器隧道、增强器-储存环隧道迷道出入口、环外站厅人员常驻区域及相关束损重点关注点区域等。
		辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块	1.辐射工作场所分区： 控制区：ECR 离子源、同步加速器大厅、21#终端、51#终端、质子/氦离子加速器大厅、电子加速器大厅、质子电子终端和材料辐照终端。 监督区：上述各控制区屏蔽墙体外四周紧邻的场所。 2.人身安全联锁系统：由 PLC、人员出入管理系统、束流控制设施、急停按钮、清场按钮、门机联锁及紧急开门、声光报警灯等组成，且所有安全设备均能正常投入使用。 3.通风系统：涉及活化空气的辐射工作场所辐射工作场所共设置 5 套排风系统，采用空调送风、排风机排风的方式。 4.场所辐射监测系统：根据辐照子系统和空间光伏辐照全流程研发模块的整体布局及其次级辐射特性，在其辐射区及周围各方向共布置了 24 个监测点。

序号	验收内容	验收要求		
		高亮度中子源装置		1.辐射工作场所分区： 1）控制区 I：装置所在场所屏蔽体以内的区域，包括加速器隧道、靶站热室、中子开关驱动室、水冷却系统设备区、谱仪终端屏蔽体以内，以及放射性废物存储区屏蔽体以内的区域等； 2）控制区 II：包括靶站顶部大厅、取样间、维修间、氢设备间等； 3）监督区：屏蔽体外相邻场所。 2.人身安全联锁系统：由 PLC、出入管理设备、紧急开出门按钮、急停开关、清场按钮、声光报警器等组成，且所有安全设备均能正常投入使用。 3.通风系统：辐射工作场所设置排风系统，排风通过风管汇总至地上一层的排风中心，经排风中心过滤处理后最终引至介观楼屋顶排放。排放口高于屋面 3m，高度约为 26m。 4.场所辐射监测系统：辐射工作场所固定式辐射监测点位共设置 28 处，每个监测点由一台中子探测器和γ探测器组成。
		工业 CT		1.辐射工作场所分区：控制区：加速器室内以墙体和门等实体划分为控制区； 监督区：工作人员的控制室、专用工位配套间、专用工位电气机房。 2.安全设备及系统：由 PLC、出入管理设备、紧急开出门按钮、急停开关、清场按钮、声光报警器等组成，且所有安全设备均能正常投入使用。 3.通风系统：本项目通风系统由送风系统和排风系统组成，其中排风系统经混凝土屏蔽墙内部北侧排风立管输运到楼顶排放，排风口高 15m。
6	放射性三废	光源装置	废气	光源辐射工作场所设置通风系统，排风管道经隧道屏蔽墙上的风管孔迷宫，将收集的废气引至微观楼屋面，经过滤后排至外环境，排风口高度距离地面约 15 米。
			废水	光源正常运行期间不产生放射性废液，仅可能在检修或发生冷却水泄漏事故时排出一定量的活化冷却水。光源装置为排放的活化冷却水设置专用的冷却水暂存池，用于收集、暂存因检修或发生冷却水泄漏事故时排出的活化冷却水。活化冷却水经过工作场所内的废水收集沟排至冷却水暂存池内。冷却水暂存池周围将设置隔离措施和电离辐射警告标志，提醒无关人员远离。冷却水暂存池预留检修口和取样口，排放前必须进行取样测量，满足相关放射性废水排放标准，经审管部门认可后方可排放。工作人员定期记录冷却水暂存池运行状态，包括进水时间、排放时间、排放量等。

序号	验收内容	验收要求		
			固体废物	光源装置在隧道内划定若干个专门的区域设置为放射性固废暂存区，采取实体屏障进行物理隔离，并设置废物桶，满足不同放射性废物储存要求。放射性固废暂存区、废物桶设置电离辐射警告标识和中文警示说明。废物桶采取双人双锁的管理模式。建立放射性固体废物台账，记录废物名称、数量、表面和 1m 处γ剂量率、监测日期、去向等相关信息。 建设单位根据放射性固体废物的暂存情况定期委托有资质的单位对其进行测量分析，满足解控要求的放射性固体废物可回收后重复利用或作为非放射性固体废物处理，不能满足解控要求的放射性固体废物最终送交有资质单位收贮。
		和空间光伏辐照全流程研发模块	废气	辐射工作场所设有通风系统，各区域排风管最终引至屋面后排放，排风高度约 22m。
			废水	活化冷却水通过地漏排至集水井，当集水井中水位达到一定高度时，泵组启动将各集水井中活化冷却水经管道抽至室外暂存池中，暂存池有效容积为 5m³，为 3 级槽式池设计。
			固体废物	暂存在场所内铅室中，该区域张贴电离辐射警告标志，标明废物名称、数量、来源、剂量率水平和存放日期等信息，并配备专门的管理人员，负责放射性固体废物的安全管理。
		高亮度中子源装置	废气	高亮度中子源装置所在辐射工作场所均设有排风管道，装置运行过程中产生的感生放射性气体经排风中心过滤处理后最终引至介观楼屋顶排入环境。
			废水	直线主隧道、副隧道和输运线隧道产生的活化冷却水通过地漏排到集水坑，集水坑通过潜水泵抽到地上一层废液存储间的污水罐内，设计存储容积为 2×10m³。靶站和谱仪通过地漏排至地下一层低放污水罐间，设计存储容积为 2×5m³。
			固体废物	地上一层放射性废物暂存厅用于存放废旧磁铁、真空管等加速器活化部件，地下一层的废物存储区放置靶站固废，包括退役靶，慢化器反射体及质子束窗等。
7	辐射监测	环境监测		制定环境辐射监测计划，包括自行监测和委托监测，至少每年开展 1 次。
		个人剂量监测		每位辐射工作人员配置累积式个人剂量监测计监测，委托有资质的单位监测，监测周期不超过 3 个月，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。
		监测设备		1、便携式 X/γ 监测设备：4 台 2、便携式中子辐射监测设备：4 台 3、手脚沾污仪：3 台 4、表面污染监测仪：3 台

序号	验收内容	验收要求	
			5、个人剂量报警仪：26 个 6、个人剂量计：每人一个 7、固定式中子探测器：77 个 8、固定式 X/γ 辐射监测系统：87 个

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

目前我国材料产业和科技水平依然处于“大而不强，大而不优”阶段，[redacted]。项目建设内容为材料全流程研发平台和多源表征系统，包含 3 个 I 类射线装置，分别为同步辐射光源装置、高亮度中子源装置和中高能离子加速器装置，以及 3 个 II 类射线装置，分别为 1 台高能工业 CT、1 台质子/氦离子加速器和 1 台电子加速器。设施建成后，对材料领域研发和实验室发展意义重大，为我国材料整体研究水平的提升提供战略性基础支撑平台。

本项目的建设将具有较好的社会效益和经济效益，具体如下：

（1）本项目的建设是苏州市社会发展的需要，能够解决我国材料研发的关键问题，提高我国材料领域发展水平。

（2）本项目建成后，可解决国内科研单位对能源环境材料研究平台需求、对原子级构筑研究平台需求、对材料辐照科学与技术平台需求等，造福于民。

（3）本项目的建设，对促进社会基础设施建设有重要而深远的意义，对苏州市的科研事业的发展也将起到极大的推动作用，从而提高社会效益。

（4）本项目的经济效益主要来自项目运行后的财政收入。收入来源主要为财政差额拨款等。财务分析计算结果表明，本项目具有较好的经济效益。

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面：本项目总用地面积约为35.4万平方米，总建筑面积约为21.7万平方米。项目建设内容为材料全流程研发平台和多源表征系统，包含3个I类射线装置，分别为同步辐射光源装置、高亮度中子源装置和中高能离子加速器装置，以及3个II类射线装置，分别为1台高能工业CT、1台质子/氦离子加速器和1台电子加速器。

能源方面：项目运行期间需用水、电等能源。

（2）经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性物质和有害气体进入大气环境和水环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，给环境带来的这些影响均低于国家标准中规定的限值。

7.3 正当性分析

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将大大提升我国材料领域的科研能力。因此，本项目的实施是利大于弊的。

8 公众参与

在本次环境影响评价工作中，建设单位依据 2020 年 1 月 1 日起施行的《环境影响评价公众参与办法》（以下简称“办法”）（生态环境部令 第 4 号）中的有关规定进行公众参与，具体实施过程列于表 8-1。详细的公众参与内容见《环境影响评价公众参与情况说明》。

表 8-1 本项目公众参与实施过程

公参阶段	公开途径	公示时间及渠道
首次信息公开	网络平台	2025 年 8 月 12 日，苏州工业园区管理委员会官网
征求意见稿公示	网络平台	2025 年 11 月 24 日，苏州国家实验室官网
	报纸	2025 年 11 月 25 日刊登于《扬子晚报》 2025 年 12 月 2 日刊登于《扬子晚报》
	张贴公告	2025 年 11 月 24 日，建设地点张贴公告
报批前公示	网络平台	2025 年 12 月 9 日，苏州国家实验室官网公示

苏州国家实验室已按照《环境影响评价公众参与办法》要求，在《苏州国家实验室材料综合研究设施新建项目（核技术利用）环境影响报告书》编制阶段开展了公众参与工作，在环境影响报告书公示期间未收到公众提出的与环境影响相关的意见。目前开展的公众参与工作满足要求。

9 结论与建议

9.1 项目工程概况

苏州国家实验室拟在苏州工业园区桑田科学岛北岛，金鸡湖大道以北，吴淞江以南，常春藤路东侧建设材料综合研究设施项目，其中涉及核技术利用的活动包括拟在微观楼使用 1 套同步辐射光源装置（Ⅰ类射线装置），拟在介观楼使用 1 套高亮度中子源装置（Ⅰ类射线装置），拟在辐照楼使用 1 套中高能离子加速器装置（Ⅰ类射线装置）、1 台质子/氦离子加速器（Ⅱ类射线装置）和 1 台电子加速器（Ⅱ类射线装置），拟在技术安全楼使用 1 台高能工业 CT 装置（Ⅱ类射线装置）。

本项目总建筑面积约为 21.7 万平方米。项目总投资 67.23 亿元，其中环保投资约 3.05 亿元，约占总投资的 4.54%。

9.2 辐射安全与防护措施

9.2.1 选址、布局合理性分析

本项目[redacted]与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的辐射工作场所，并设置物理隔离，有利于辐射安全防护；项目布局满足科研场所功能需要，便于辐射工作场所的防护管理和安全控制，以及放射性污染的防治。从辐射防护与环境保护的角度，项目的选址可行，平面布局合理。

9.2.2 辐射防护措施

（1）辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。

（2）辐射安全联锁系统：射线装置均设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括门禁控制、门机联锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器，以及工作状态指示灯、视频监控以及电离辐射警告标志和中文警示说明等，可有效防止工作人员和公众受到意外照

射。

（3）辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算各辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平满足要求。

（4）通风系统：各辐射工作场所设有通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计均能满足相关标准要求，确保工作场所内部和排放到环境中的污染物浓度能够满足相关标准要求。

（5）工作场所辐射监测系统：射线装置辐射工作场所内和监督区设有固定式场所辐射监测仪表，对工作场所和监督区内剂量率水平进行实时监测和显示，确保工作人员和公众的安全。

9.2.3 运行期放射性三废的治理和控制

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自 3 台 I 类射线装置，分别为同步辐射光源装置、高亮度中子源装置和中高能离子加速器装置。

可能产生活化空气的辐射工作场所内均设置了独立的排风系统，其运行期间产生的活化空气经场所内排风管道引至楼顶排放。

I 类射线装置均设有冷却水暂存场所，有效贮存容积能保证暂存冷却水的要求。经暂存衰变，满足排放要求后排入污水管网。

I 类射线装置均设有放射性固体废物暂存场所，确保放射性固体废物在得到处置前能够安全暂存。暂存一定时间满足相关要求后处理，不满足要求的委托有资质单位收贮。

9.3 环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，辐射工作人员的年最大有效剂量低于职业照射剂量约束值（高亮度中子源装置：10mSv/a，其他射线装置：5mSv/a），公众年最大有效剂量低于 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

9.4 辐射安全管理

建设单位拟成立专门的放射防护与辐射安全领导小组，拟建立一系列辐射安全管理制度，内容涵盖人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等；制定辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在上岗前参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗；按要求制定辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

9.5 建议和承诺

9.5.1 建议

（1）建设单位在本项目施工过程中必须加强监督，保证建筑材料和施工质量，混凝土施工时要确认成型密度、均匀、表观密度符合设计要求。对于嵌入式安装造成的局部屏蔽减弱部位，应进行屏蔽补偿。

（2）应加强对检修维护人员的防护和管理。建议通过增加运行结束后停机等待时间、增加与活化结构部件的接触距离，以降低人员受照剂量。

（3）根据环境影响评价结果，维修维护人员的年受照剂量较大，建议运行后根据个人剂量监测情况酌情增加人员数量，分摊剂量，以满足剂量约束值的要求。

（4）落实环评中提出的管理措施和辐射防护措施要求，在实践中建立和不断完善各项辐射管理规章制度和事故应急预案，并采取切实措施保证各种规章制度的有效执行。

9.5.2 承诺

苏州国家实验室拟开展的“苏州国家实验室材料综合研究设施新建项目（核技术利用）”在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和周围环境的辐射影响符合环境保护的要求，该项目对环境的辐射影响是可以接受的。建设单位将严格落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施，具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，方开展核技术利用相关活动。