

加速器驱动嬗变研究装置超导直线加速器部分

# 环境影响报告书

中国科学院近代物理研究所

2021年11月

加速器驱动嬗变研究装置超导直线加速器部分

## 环境影响报告书

建设单位名称：中国科学院近代物理研究所

建设单位法人代表（签名或签章）：徐珊珊

通讯地址：甘肃省兰州市城关区南昌路509号



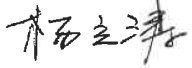

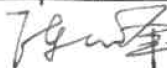
邮政编码：730000

联系人：徐俊奎

电子邮箱：xujunkui@impcas.ac.cn 联系电话：0931-4969362

打印编号: 1634881148000

## 编制单位和编制人员情况表

项目编号	n76t68		
建设项目名称	加速器驱动嬗变研究装置 (CiADS) 超导直线加速器		
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		
<b>一、建设单位情况</b>			
单位名称 (盖章)	中国科学院近代物理研究所		
统一社会信用代码	121000004380021159		
法定代表人 (签章)	徐珊珊		
主要负责人 (签字)	徐珊珊		
直接负责的主管人员 (签字)	何源		
<b>二、编制单位情况</b>			
单位名称 (盖章)	苏州热工研究院有限公司		
统一社会信用代码	913205084669547113		
<b>三、编制人员情况</b>			
<b>1. 编制主持人</b>			
姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
陈超峰	07351143506110465	BH011462	
<b>2. 主要编制人员</b>			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
赵锋	第3章	BH011457	
杨立涛	第4章	BH010110	
殷煜皓	第5、6章	BH010111	
陈超峰	第1、2、7、8章	BH011462	

## 目录

目录.....	I
第一章 概述.....	1
1.1 项目名称、地点.....	1
1.2 项目概况.....	1
1.2.1 项目性质和建设单位.....	1
1.2.2 项目背景与建设意义.....	3
1.2.3 项目用地.....	3
1.2.4 周边环境条件.....	4
1.3 编制依据.....	5
1.3.1 遵循的主要法规、标准和导则.....	5
1.3.2 相关管理和技术文件.....	6
1.4 评价标准.....	7
1.4.1 剂量约束值.....	7
1.4.2 放射性废物免于辐射防护监管标准.....	7
1.4.3 电磁辐射评价标准.....	8
1.4.4 非辐射环境影响评价标准.....	8
1.5 评价范围和保护目标.....	10
1.5.1 电离辐射.....	10
1.5.2 大气环境.....	11
1.5.3 声环境.....	11
1.5.4 电磁环境.....	11
第二章 自然环境与社会环境状况.....	12
2.1 自然环境状况.....	12
2.1.1 地理位置.....	12
2.1.2 地形地貌.....	12
2.1.3 地质.....	13
2.1.4 地震.....	14
2.1.5 水文.....	14
2.1.6 自然资源.....	15
2.1.7 生态保护区.....	15
2.1.8 “三线一单”符合性分析.....	15
2.2 社会经济状况.....	19
2.3 环境质量和辐射现状.....	19
2.3.1 声环境质量现状.....	19
2.3.2 环境空气质量现状.....	20
2.3.3 电磁辐射环境质量现状.....	24
2.3.4 电离辐射环境质量现状.....	24
2.4 场址适宜性评价.....	26
第三章 工程分析与源项.....	27
3.1 项目规模与基本参数.....	27
3.1.1 ECR 质子源（ECRIS）.....	29
3.1.2 低能传输段（LEBT）.....	30

3.1.3 射频四极加速器 (RFQ) .....	30
3.1.4 中能传输段 (MEBT) .....	31
3.1.5 超导加速段 (SC) .....	31
3.1.6 高能传输段 (HEBT) .....	32
3.1.7 束流收集器 (Dumper) .....	33
3.1.8 参数汇总.....	33
3.2 工程设备与工艺分析 .....	35
3.2.1 加速器主系统.....	35
3.2.2 辅助工艺系统.....	51
3.2.3 工艺流程.....	62
3.3 污染源项.....	63
3.3.1 瞬发辐射.....	63
3.3.2 缓发辐射.....	64
3.3.3 电磁辐射.....	78
3.3.4 非放射性源项.....	78
3.4 废弃物.....	79
3.4.1 废气.....	79
3.4.2 废水.....	79
3.4.3 固体废物.....	80
第四章 辐射安全与防护.....	82
4.1 场所布局与屏蔽.....	82
4.1.1 场所布局和分区.....	82
4.1.2 屏蔽防护.....	85
4.2 辐射安全与防护措施.....	107
4.2.1 设计原则.....	107
4.2.2 联锁系统组成.....	107
4.2.3 联锁系统工艺流程.....	109
4.2.4 操作系统组成及结构.....	110
4.3 三废的治理.....	111
4.3.1 放射性废气及处理措施.....	111
4.3.2 含放射性核素的废水及处理措施.....	111
4.3.3 放射性固体废物及其处理措施.....	112
4.3.4 非放射性废气的处理.....	112
4.3.5 非放射性废水的处理.....	112
4.3.6 危险废物的处理.....	113
4.4 服务期满后的环境保护措施.....	113
第五章 环境影响分析.....	114
5.1 建设阶段对环境的影响.....	114
5.1.1 施工期声环境影响及防治措施.....	114
5.1.2 施工期大气环境影响及防治措施.....	115
5.1.3 施工期水环境影响及防治措施.....	116
5.1.4 施工期固体废物的影响及防治措施.....	116
5.1.5 射线装置、化学物质对环境的影响.....	117
5.1.6 施工期间的环境监测.....	117

5.2 运行阶段对环境的影响 .....	118
5.2.1 场所辐射水平 .....	118
5.2.2 工作流程 .....	123
5.2.3 人员受照剂量 .....	124
5.2.4 非辐射环境影响 .....	129
5.3 事故影响分析 .....	130
5.3.1 人员误入（滞留）事故 .....	130
5.3.2 工作人员超剂量照射事故 .....	130
5.3.3 冷却水泄漏事故 .....	131
5.3.4 空气过滤器失效事故 .....	131
第六章 辐射安全管理 .....	133
6.1 机构与人员 .....	133
6.2 辐射安全管理规章制度 .....	134
6.3 辐射监测 .....	135
6.3.1 工作场所剂量监测 .....	135
6.3.2 辐射环境监测 .....	137
6.3.3 流出物监测 .....	138
6.3.4 个人剂量监测 .....	139
6.3.5 监测仪器设备 .....	139
6.4 辐射事故应急 .....	139
(1) 总则 .....	140
(2) 辐射事故分级 .....	140
(3) 应急组织体系与职责分工 .....	140
(4) 辐射事故应急响应措施 .....	141
(5) 应急响应能力的维持 .....	141
(6) 附则 .....	142
6.5 辐射安全管理满足相关要求的分析 .....	142
6.5.1 与《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》相符性分析 .....	142
6.5.2 与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》相符性分析 .....	143
第七章 利益-代价简要分析 .....	145
7.1 利益分析 .....	145
7.1.1 极大提升我国核能技术的自主化程度 .....	145
7.1.2 极大带动应用研究和前沿技术的发展 .....	145
7.1.3 有利于未来人才培养 .....	145
7.1.4 有利于积极推动资源共享 .....	145
7.1.5 有利于促进区域经济发展 .....	146
7.1.6 有利于促进区域科技发展 .....	146
7.2 代价分析 .....	146
7.2.1 经济代价 .....	146
7.2.2 社会和环境代价 .....	146
7.2.3 资源代价 .....	147
7.3 正当性分析 .....	147
第八章 结论与建议 .....	148
8.1 项目工程概况 .....	148

8.2 辐射安全与防护.....	148
8.2.1 辐射防护.....	148
8.2.2 三废治理.....	148
8.3 环境影响分析 .....	149
(1) 辐射环境影响.....	149
(2) 非放射性影响.....	149
(3) 事故影响.....	150
8.4 辐射安全管理 .....	150
8.5 建议和承诺 .....	150
附件 1: .....	151
附件 2: .....	155
附件 3: .....	错误!未定义书签。
附件 4: .....	164
附件 5: .....	166

# 第一章 概述

## 1.1 项目名称、地点

项目名称为：“加速器驱动嬗变研究装置超导直线加速器部分”，建设地点位于广东省惠东县黄埠镇坑口村附近。

## 1.2 项目概况

### 1.2.1 项目性质和建设单位

本项目主管部门为中国科学院，项目建设法人单位为中国科学院近代物理研究所（以下简称“近物所”）。

加速器驱动嬗变研究装置（China Initiative Accelerator Driven System，简称CiADS）是《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012—2030年）》确定的“十二五”建设重点内容之一，属于国家重大科技基础设施建设项目，CiADS超导直线加速器是CiADS的组成部分，为新建建设项目。

CiADS主要建设内容为超导直线加速器、高功率散裂靶及其耦合系统、次临界反应堆芯/包层、总控制系统等，CiADS选址阶段的环境影响报告书已于2018年5月得到生态环境部批复（环审[2018]10号）（详见附件1）。

和本项目相关的配套设施由广东省政府负责建设，已编制《强流重离子加速器（HIAF）及加速器驱动嬗变研究装置（CIADS）配套工程环境影响报告表》，并于2017年11月得到惠东县环境保护局的批复（“关于强流重离子加速器（HIAF）及加速器驱动嬗变研究装置（CIADS）配套工程环境影响报告表的批复”，惠东环建[2017]72号）（详见附件2），现已开工建设。

由于CiADS装置散裂靶的功率水平（耦合束流能量为500MeV、强度为5mA）高于目前国际运行高功率散裂靶装置水平；并且整体靶区需要置于反应堆堆芯中间，在尺寸、辐照损伤、安全屏蔽、维护操作都有非常特殊的要求，相关的建造工艺技术难度很大，目前国际上已有的液态金属散裂靶均不满足CiADS装置的工程需求。为保证核安全，从可行性出发，需要先建造实验靶，进行耦合热实验、测量相关散裂数据、测量和刻度监测探测器；再根据实验结果，建造250kW的耦合靶，开展耦合实验；完



成耦合实验的基础上，建造2.5MW的高功率耦合靶，完成工程任务。

加速器驱动嬗变研究装置系统“器-靶-堆”是一个复杂的体系，从开始调试到最后达到满功率耦合运行是一个较为长期的过程，相互作用的耦合过程存在不可预知的风险。并且高功率束流驱动运行后靶材料和燃料组件将有很强的残余放射性，因此CiADS装置调试过程将遵循两个原则：

1) 从“低放射性”到“高放射性”逐步过渡的原则，将高放射性维护的风险和成本降到最低；

2) 从“单个系统独立调试”到“二系统耦合调试”再到“三系统耦合调试”的渐进原则，将不可预知的风险降到最低。

CiADS装置是国际上第一个加速器驱动的铅铋快堆，在国际上没有相同的实验堆进行燃料元件的入堆考验。根据核安全法规对新燃料入堆监管的原则，CiADS的燃料元件将在完成一系列堆外试验后，根据安全分析的结果，首批3盒燃料组件以实验组件的方式入堆进行考验。

综上，项目主要验收指标分为三个阶段考核：

第一阶段（2025年12月）：超导直线加速器建成后，在束流收集终端测试验收。

验收指标为：束流能量大于250兆电子伏，束流功率大于25千瓦。

第二阶段（2026年10月）：高功率散裂靶建成后，燃料组件入堆前，在器靶堆耦合终端测试验收。

验收指标为：在大于250兆电子伏束流驱动下，散裂靶的单质子中子产额大于1.0中子。

第三阶段（2027年12月）：次临界堆芯建成，且试验燃料组件入堆后，进行系统耦合运行验收。

验收指标为：在大于250千瓦质子束流驱动下加速器驱动系统稳定耦合运行1小时以上，散裂靶承受质子束流功率大于250千瓦，次临界堆芯功率约30千瓦。

在加速器外源中子的驱动下，装置耦合实现小时级的稳定运行，达到核热功率为1MW（含散裂靶和次临界反应堆）。

鉴于以上原因，CiADS项目先期建设超导直线加速器部分，完成相关试验研究后再开展后续建设任务，本次建设内容完成上述第一阶段的建设和试验工作。

### 1.2.2 项目背景与建设意义

CiADS属于国家重大科技基础建设项目，主要科学目标为建成一台用于加速器驱动嬗变研究的ADS装置，能够基于此装置开展超导直线加速器、高功率散裂靶、次临界反应堆等系统稳定、可靠、长期运行的策略研究；研究各系统在耦合运行时对系统影响的特性，渐次进行从低功率到高功率的耦合运行，最终实现三大系统高功率耦合的技术突破；基于CiADS装置开展次锕系元素嬗变原理性实验、嬗变中子学、材料辐照特性等方面的研究；在CiADS装置设计、建设、调试、运行、实验的过程中，发展具有自主知识产权的ADS系统设计软件，积累装置运行数据和基础科学数据，为最终设计建设加速器驱动嬗变工业示范装置奠定基础。

由于受到国际上ADS相关技术合作形势、国内涉核用户对铅铋冷却反应堆应用研究需求以及项目团队对国际上第一个ADS系统的核安全设计边界认识深化等方面因素的影响，在科学目标和验收指标不变的情况下，对原可行性研究报告的设计方案和部分建设内容进行了适当的调整。2020年，中国科学院向国家发展与改革委员会提交了更新后的可行性研究报告（《关于申请重新审评加速器驱动嬗变装置国家重大科技基础设施项目可行性研究报告的函》（科发函字[2020]64号）），并于2020年7月22日得到了批复（《国家发展改革委关于加速器驱动嬗变研究装置项目可行性研究报告的批复》（发改高技[2020]1203号））（详见附件3），原批复文件（发改高技[2015]3187号）同时废止。

超导直线加速器是CiADS的核心系统之一，是提供稳定的高功率的质子束流的关键系统，其关键技术参数为质子能量为500MeV（兆电子伏特）、束流强度为5mA（毫安）。

### 1.2.3 项目用地

CiADS装置区建筑面积约52950m<sup>2</sup>，其中国家投资约42550m<sup>2</sup>，地方配套约10400m<sup>2</sup>。根据“广东省环境保护厅关于对惠州市严格控制区调整方案意见的函”（粤环函[2017]1429号）（详见附件4），项目用地属于有限开发用地，现已调整为科研用地；同时，项目用地已取得《建设用地规划许可证》（地字第惠东县规地证字（2018）000108号）（详见附件5）。

### 1.2.4 周边环境条件

CiADS项目场址行政隶属广东省惠州市惠东县黄埠镇，场址区域内大部分为山丘，山体呈南北走向，南北长约3.0km，东西宽约1.2km，且南面山体临海，山顶较陡峭，北部山体较宽，山顶较为平坦，场址区域最高山顶高程约184m。项目周边现状以山地为主，环境条件相对简单。离场址边界最近的居民点是WSW方位约0.3km的坑口村，其次是SSW方位约0.7km处的东头村。

场址北侧在建另一国家重大科技基础设施——强流重离子加速器装置（HIAF），主要为核物理和核天体物理基础研究、原子物理、重离子束应用研究提供国际领先水平的实验平台；场址SW方位约1.0km为惠州风电，约2.5km为太平岭核电厂，规划建设六台百万千万级压水堆核电机组，目前正在建设1、2号机组。

CiADS超导直线加速器工程周边环境见图1- 1。



图 1- 1 CiADS 超导直线加速器工程周边环境图

## 1.3 编制依据

### 1.3.1 遵循的主要法规、标准和导则

#### (1) 法律、法规

- 中华人民共和国环境保护法（自 2015 年 1 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国放射性污染防治法（自 2003 年 10 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国环境影响评价法（2018 年 12 月 29 日第二次修正）；
- 中华人民共和国水污染防治法（自 2018 年 1 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国大气污染防治法（2018 年 10 月 26 日第二次修正）；
- 中华人民共和国环境噪声污染防治法（2018 年 12 月 29 日修正）；
- 中华人民共和国固体废物污染环境防治法（自 2020 年 9 月 1 日起施行）；
- 建设项目环境保护管理条例（自 2017 年 10 月 1 日起施行）；
- 放射性同位素与射线装置安全和防护条例（2019 年 3 月 2 日第二次修订）；
- 放射性废物安全管理条例（自 2012 年 3 月 1 日起施行）等。

#### (2) 标准、导则和部门规章及文件

- 电离辐射防护与辐射源安全基本标准（GB 18871-2002）；
- 放射性废物管理规定（GB 14500-2002）；
- 环境核辐射监测规定（GB 12379-90）；
- 电磁环境控制限值（GB 8702-2014）；
- 声环境质量标准（GB 3096-2008）；
- 工业企业厂界环境噪声排放标准（GB 12348-2008）；
- 建筑施工场界环境噪声排放标准（GB 12523-2011）；
- 环境空气质量标准（GB 3095-2012 及标准修改单）；
- 《污水排入城市下水道水质标准》（GB/T 31962-2015）；
- 国家危险废物名录（2021 年版）；
- 危险废物贮存污染控制标准（GB 18597-2001 及标准修改单）；
- 放射性废物安全监督规定（HAF401）；
- 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）；
- 放射性同位素与射线装置安全许可管理办法（2019 年 8 月 22 日修改）；

- 放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法(自 2011 年 5 月 1 日起施行);
- 射线装置分类(环境保护部 国家卫生和计划生育委员会 公告 2017 第 66 号);
- 环境影响评价技术导则 大气环境(HJ 2.2-2018);
- 环境影响评价技术导则 地表水环境(HJ 2.3-2018);
- 环境影响评价技术导则 声环境(HJ 2.4-2009);
- 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);
- 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)等。

### (3) 地方法规和标准

- 广东省环境保护条例(根据 2018 年 11 月 29 日广东省第十三届人民代表大会常务委员会第七次会议《关于修改〈广东省环境保护条例〉等十三项地方性法规的决定》修正);
- 广东省固体废物污染环境防治条例(2018 年 11 月 29 日修订, 2019 年 3 月 1 日起施行);
- 广东省大气污染防治条例(2018 年 11 月 29 日公布, 2019 年 3 月 1 日起施行);
- 广东省实施《中华人民共和国环境噪声污染防治法》办法(根据 2018 年 11 月 29 日广东省第十三届人民代表大会常务委员会第七次会议《关于修改〈广东省环境保护条例〉等十三项地方性法规的决定》第三次修正)等。

### 1.3.2 相关管理和技术文件

- 加速器驱动嬗变研究装置项目可行性研究报告, 中国科学院近代物理研究所, 2020 年 6 月;
- 国家发展改革委关于加速器驱动嬗变研究装置项目可行性研究报告的批复(发改高技[2020]1203 号);
- 关于加速器驱动嬗变研究装置环境影响报告书(选址阶段)的批复(环审[2018]10 号)。
- 加速器驱动嬗变研究装置初步设计报告, 中国科学院近代物理研究所, 2020 年 8 月等。

## 1.4 评价标准

根据本项目建设和运行的特点，施工期环境影响评价主要涉及项目主体工程建筑、设施安装等造成的对水、气、声等环境的影响；调试和运行期间对环境的影响主要包括对公众和职业人员的辐射影响、运行噪声的影响等。

### 1.4.1 剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，结合项目管理控制要求，确定本项目调试和运行期间对公众和职业人员的剂量约束值为：

- 公众：0.1mSv/a；
- 职业人员：5mSv/a。

依据《中广核广东太平岭核电厂一期工程环境影响报告书(建造阶段)(报批版)》，太平岭核电厂1、2号机组对本项目所在子区的照射剂量为 $7.78 \times 10^{-5}$ mSv/a，对东头村公众照射剂量为 $1.37 \times 10^{-4}$ mSv/a，按规划6台机组考虑，核电厂全部建成6台机组，对本项目所在子区的照射剂量预计不超过 $3 \times 10^{-4}$ mSv/a，对东头村公众照射剂量不超过 $5 \times 10^{-4}$ mSv/a。依据《强流重离子加速器装置（HIAF）环境影响报告书》，HIAF加速器对东头村公众的照射剂量不超过 $3.94 \times 10^{-3}$ mSv/a。因此，本项目对公众的剂量约束值取0.1mSv/a，叠加核电厂和HIAF加速器的辐射影响，能满足周围公众年剂量约束值不超过0.25mSv/a的要求。

### 1.4.2 放射性废物免于辐射防护监管标准

依据《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》（GB27742-2011），对人工放射性核素混合物，应当要求其中各种人工放射性核素的活度浓度与各自免管浓度值的比值之和小于1，即满足下式要求：

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{oi}} \leq 1$$

- 其中： $C_i$ 为第*i*种人工放射性核素在物料中的放射性活度浓度，Bq/g；  
 $C_{oi}$ 为表B2所列第*i*种人工放射性核素的免管活度浓度，Bq/g；  
 n为物料中人工放射性核素种类。

GB27742-2011中表B2中与本项目的相关的部分放射性核素如表1- 1所示。

表 1-1 人工放射性核素免管浓度值 (Bq/g)

核素	活度浓度	核素	活度浓度
$^3\text{H}$	100	$^{45}\text{Ca}$	100
$^7\text{Be}$	10	$^{54}\text{Mn}$	0.1
$^{22}\text{Na}$	0.1	$^{55}\text{Fe}$	1000

### 1.4.3 电磁辐射评价标准

电磁辐射控制限值依遵循《电磁环境控制限值》(GB8702-2014)的要求,即:

— 30MHz~3000Hz: 电场强度12V/m; 等效平面波功率密度0.4W/m<sup>2</sup>。

### 1.4.4 非辐射环境影响评价标准

根据本项目区域的环境功能区划管理要求,结合建设和运行中可能的环境影响因素,拟采用的各环境要素质量执行标准如下:

#### 1.4.4.1 环境质量评价标准

##### (1) 大气环境

根据《惠州市环境空气质量功能区划》(2021年修订),项目所在区域属于环境空气质量二类功能区,执行《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中的二级标准,详见表1-2。

表 1-2 大气环境评价标准

序号	项目	取值时段	GB3095-2012 二级标准浓度限值, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	SO <sub>2</sub>	24 小时平均	150
		小时平均	500
2	氮氧化物	24 小时平均	100
		小时平均	250
3	氟化物	24 小时平均	7
		小时平均	20
4	TSP	24 小时平均	300
5	PM <sub>10</sub>	24 小时平均	150
6	PM <sub>2.5</sub>	24 小时平均	75

##### (2) 声环境

参照《惠州市声环境功能区划分方案》(2017年),项目所在区域属于声环境2类功能区,厂址边界执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)中

的2类功能区标准，详见表1-3。

表 1-3 声环境评价标准

类别	昼间	夜间
2类	60dB (A)	50dB (A)

### (3) 水环境

根据《广东省地表水环境功能区划》（粤府函[2011]14号）规定，项目附近河流东头河未作明确规定。根据其现状功能（其功能现状为排洪、纳污），执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中III类标准，详见表1-4。

表 1-4 地表水评价标准

序号	项目	《地表水环境质量标准》III类标准
1	pH	6~9
2	COD	20mg/L
3	BOD <sub>5</sub>	4mg/L
4	氨氮	1mg/L
5	总磷	0.2mg/L

### 1.4.4.2 非放射性污染物排放标准

#### (1) 废水

施工期废水经处理后用于场地洒水抑尘、绿化或外运，不排放。运行期间产生的污水排至市政污水管网，排水水质满足《污水排入城市下水道水质标准》（GB/T 31962-2015）中的C级标准，详见表1-5。

表 1-5 废水排放标准

序号	项目	运行期排放标准
1	pH值	6.5~9.5
2	SS	250mg/L
3	BOD <sub>5</sub>	150mg/L
4	COD	300mg/L
5	氨氮	25mg/L
6	总氮	45mg/L
7	总磷	5mg/L
8	阴离子表面活性剂	10mg/L
9	氟化物	20mg/L
10	硫酸盐	600mg/L



## (2) 废气

废气排放执行《广东省大气污染物排放限值》(DB44/27-2001)第二时段排放标准,详见表1-6。

表 1-6 废气排放标准

序号	项目	施工期无组织排放	运行期排气筒排放	运行期无组织排放
1	SO <sub>2</sub>	0.40mg/m <sup>3</sup>	-	-
2	氮氧化物	0.12mg/m <sup>3</sup>	120mg/m <sup>3</sup> , 1.0kg/h	0.12mg/m <sup>3</sup>
3	颗粒物	1.0mg/m <sup>3</sup>	-	-
4	硫酸雾	-	3.5mg/m <sup>3</sup> , 2.2kg/h	1.2mg/m <sup>3</sup>
5	氟化物	-	9.0mg/m <sup>3</sup> , 0.14kg/h	0.02mg/m <sup>3</sup>

## (3) 噪声

施工期施工场地厂界执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011),运行期间的厂界外执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)中的2类声环境功能区限值,详见表1-7。

表 1-7 厂址边界噪声排放标准

	昼间, dB (A)	夜间, dB (A)
施工期	70	55
运行期	60	50

## (4) 固体废物

一般工业固废执行《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB18599-2020);危险废物执行《危险废物贮存污染控制规范》(GB18597-2001)及修改单。

## 1.5 评价范围和保护目标

本报告仅针对CiADS项目中的直线加速器及其配套设施的建设开展环境影响评价。

### 1.5.1 电离辐射

依据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容

和格式》(HJ10.1-2016)的要求,射线装置评价范围一般设为实体屏蔽边界外50m,考虑到本项目为I类射线装置,适当扩大评价范围,确定本次辐射环境影响评价范围为射线装置实体屏蔽边界外100m。

实体屏蔽边界外100m位于厂址内部,保护目标为场内工作人员。

### 1.5.2 大气环境

依据《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ2.2-2018),加速器运行期间排放少量废气,可不设置评价范围,环境保护目标为最近的坑口村居民。

### 1.5.3 声环境

依据GB12348-2008,运行期噪声排放评价范围为厂界外1m处噪声,依据GB12523-2011,施工期噪声排放评价范围为场址边界,依据HJ2.4-2009,声环境评价范围最大为场址边界外200米,距离本项目最近的居民点距场址边界300米,本项目无声环境保护目标。

### 1.5.4 电磁环境

本项目属于科学研究电磁辐射设备,根据《辐射环境保护管理导则 电磁辐射环境影响评价方法与标准》(HJ/T10.3-1996),评价范围是以设备为中心的250m,该评价范围内无公众,本项目无电磁环境保护目标。

综上所述,本项目各评价因子的评价范围和保护目标见表1-8。

表 1-8 评价范围及保护目标

评价因子	环境保护目标				
	目标	方位	距离	人口	保护要求
外照射和大气中子活化气体	场内辐射工作人员	场内	/	暂不确定	年照射剂量不超过 5mSv/a
	场内非辐射工作人员	场内	/	暂不确定	年照射剂量不超过 0.1mSv/a
大气	坑口村居民	SW	300	106	

## 第二章 自然环境与社会环境状况

### 2.1 自然环境状况

#### 2.1.1 地理位置

项目场址位于广东省惠东县黄埠镇坑口村附近，场址NW方位距黄埠镇中心直线距离约6.9km，NW方位距惠东县直线距离约43km，NW方位距惠州市约73km，WSW方位距深圳市约98km，ENE方位距汕尾市区约37km。图2-1给出了CiADS超导直线加速器场址的地理位置示意图。



图2-1 CiADS场址地理位置示意图

#### 2.1.2 地形地貌

CiADS场址位于粤东平海半岛东侧岸内，东南面临红湾水域，平海半岛东侧海岸由大星山岬角起始，呈微弯弧状向东北延伸，经深入内陆的考洲洋海湾口门盐州港，至乌山岬角了哥咀，转向东北直到红海湾湾顶。

场址附近范围陆域主要为沿海山地丘陵，海拔高程多在100~200m之间，场址以

西大陆海岸线与地质构造线大致平行，为纵向海岸，以海岸侵蚀地貌为主，沙滩堆积地貌次之；场址以东海岸呈“S”型延伸，乌山沿岸发育海岸侵蚀地貌，海蚀崖、海蚀洞及海蚀凹槽广布，其北部发育海滩堆积地貌，场址附近范围的西北部则发育山地丘陵地貌。

CiADS场址所在的海岸地带分布由冲蚀切割形成的浅湾，地形坡度平缓，浅湾内由堆积形成的沙滩、砂坝等微地貌；南侧沿岸基岩裸露，岸边分布海蚀洞、海蚀崖，局部形成陡峭的海岬。地貌类型主要为丘陵剥蚀地貌，其次为海岸地貌。

场址区丘陵地势变化较大，场址北、东两侧临山，西、南两侧临海；场址区域内大部分为山丘，山体呈南北走向，南北长约3.0km，东西宽约1.2km，且南面山体临海，山顶较陡峭，北部山体较宽，山顶较为平坦，场址区域最高山顶高程约184m。本区域内最高峰为东侧的乌山，海拔306m；场地地势总体上呈现东高西低、北高南低，山体坡度30°-60°；山体之间的冲沟属浅切割；丘陵呈浑圆状，表面植被发育，基岩裸露较少。

### 2.1.3 地质

场址区分布第四纪地层、晚侏罗世~早白垩世南山村组地层。

据现有地质资料，总平面布置范围内分布2条断裂，北西向、北东向各1条，断裂规模较小，断裂均发育于晚侏罗世~早白垩世南山村组地层中，断裂带主要表现为碎裂、硅化，岩石固结程度一般~较好，胶结物大多以硅质为主；构造岩风化程度一般为中等风化，局部表现为微风化或强风化；断裂两端往往衰减为同向节理，其展布规模具有明显的局限性。

现场调查未见有切割第四纪地层迹象，对场地稳定不构成威胁。

项目主要设施位于剥蚀丘陵区，基岩为硬质岩石，岩体周围无临空面，也无大型连续的结构面及蚀变带，不存在地震液化及软土震陷的潜在危险，无地基滑移和倾覆问题，地基稳定。

根据现有资料，场址区未发现岩溶、滑坡、泥石流、地裂缝、地面塌陷、采空区等影响场地稳定的严重不良地质作用，仅在海岸地带局部见有小规模崩塌及海水侵蚀现象，不影响场地稳定。

#### 2.1.4 地震

场址范围两条发震构造：丰顺—海丰断裂梅陇段和潮州—汕尾断裂红海湾段对厂址具有较大影响。上述两条发震构造均进入到厂址近区域范围内，其中丰顺—海丰断裂梅陇段最大潜在地震震级为6.0级，到厂址最近距离约为41km；潮州—汕尾断裂红海湾段最大潜在地震震级为6.5级，到厂址最近距离约为22km。历史地震对场址最大影响烈度为VI度。场址近区域内以小震活动为主，主要呈北东向散布在沿海一带，场址附近范围内均未记录到2.0级以上地震，厂址所在地震构造区弥散地震震级为5.0级。

场址附近范围内断裂均未发现晚更新世以来活动断裂，场址附近范围内不存在能动断层，场址附近地震活动较弱，场址区域属于地壳较稳定地区。

#### 2.1.5 水文

惠东县辖区内集雨面积在100平方公里以上的支流有十一条，其中，一级支流一条，为西枝江；二级支流八条，分别为杨梅水、宝溪水、小沥河、安墩河、楼下河、上寨水（黄排河）、白花河、梁化河等；三级支流一条，为安墩河流域的黄竹水；沿海小支流一条，为吉隆河，另外有小部分属东江一级支流秋香江。

西枝江（古称西江水）是东江的一级支流，也是第二大支流，发源于惠东县东北侧与紫金县交界的竹凹顶南麓。从发源地向南流，到新庵乡的大河埔村，主干折向西南流，傍莲花山主脉北麓至白盆水库拦河大坝，一般称为上游，属低中山地区；续流至中山寺峡为中游，属丘陵地带；出峡口后西稍北流于惠州市的东新桥汇入东江为下游，属于河谷平原。西枝江流域总面积为4120平方公里，干流全长176公里，平均比降0.6%，河流弯曲系数为2.07，在惠东县境内的集水面积有2669平方公里，占县总面积78.5%，干流长度152.0公里。河床平均比0.69%。

惠东县水资源总体丰富，多年平均径流在1000~1400mm之间，多年平均径流深为1123.5mm，径流模数为0.0356立方米/平方公里秒，年径流总量38.2亿立方米。惠东县已建注册的水库105座，其中大型水库1座，中型水库2座，小（一）型水库30座，小（二）型水库72座。大中型水库有白盆珠水库、花树下水库和黄坑水库，总蓄水量约 $13 \times 10^8 \text{m}^3$ ，有效库容约 $4.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，可满足城市发展和稔平半岛的工业和生活用水。惠东县全县有淡水量 $45 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中地表径流 $38 \times 10^8 \text{m}^3$ ，浅层地下水 $7 \times 10^8 \text{m}^3$ ，人均拥有淡水量约 $6000 \text{m}^3$ 。

### 2.1.6 自然资源

项目所在区域植被由于地形、气候与人为因素等的综合影响，地带性代表植被常绿季雨林或季雨性常绿阔叶林等原始植被已荡然无存，只有少量残存的次生林，其它均以稀树灌丛和草灌丛为主，条件较好的丘陵台地及滩地多已开辟为菜地，主要种植各类豆类、水稻、其它旱田作物及各种果树。植被类型总的来说以荔枝、龙眼为主，还有大量的矮灌丛林等。草被则以芒萁为主，蕨类次之。

惠州是一个生物基因宝库，植物种类丰富，估计有 2500 多种维管束植物，有 55 种国家保护植物、360 个华南特有种、18 个广东特有种，以及博罗红豆、小金青、光果金樱子 3 个特有种。惠州有针叶林、针阔混交林、阔叶林、竹林、草地等 5 个植被类型，有马尾松、杉木、枫香、山乌柏、红花荷、罗浮栲等 24 个群系。惠州植被垂直分布明显，依次为南亚热带常绿季雨林、南亚热带常绿阔叶林、亚热带山地常绿阔叶林、山顶矮林和灌丛。已知的野生动物包括国家一级保护动物蟒蛇、云豹等，二级保护动物有虎纹蛙、三线闭壳龟、雀鹰、白鹇、苏门羚、小灵猫、穿山甲等。

### 2.1.7 生态保护区

该项目 15km 范围内的自然保护区为惠州市惠东红树林市级自然保护区，惠东红树林自然保护区主要集中在考洲洋水域，该区域位于项目选址的 W 方位，项目选址与主要的红树林分布区域盐洲沿岸的红树林保护区距离约 4.8km，与考洲洋西北侧集中分布的红树林保护区距离约 12km。

考洲洋为南海红海湾深入内陆的典型半封闭性浅水海湾，其海底较为平坦。该水域面积 29.7km<sup>2</sup>，滩涂面积 13.7km<sup>2</sup>，湾口通过水深 6~12m 的狭窄水道与红海湾相连，平均水深约 2.2m。目前红树林主要分布在盐洲岛沿岸及河流入海口附近沿岸；数量上来说，红树林保护的比较好的区域主要分布在盐洲岛北部、东北部和西南部，以及考洲洋的西北面，田洋河入海口区域。

### 2.1.8 “三线一单”符合性分析

依据《惠州市“三线一单”生态环境分区管控方案》，项目所在位置属于“惠东沿海一般管控单元”（详见图2-2），其管控要求如下：

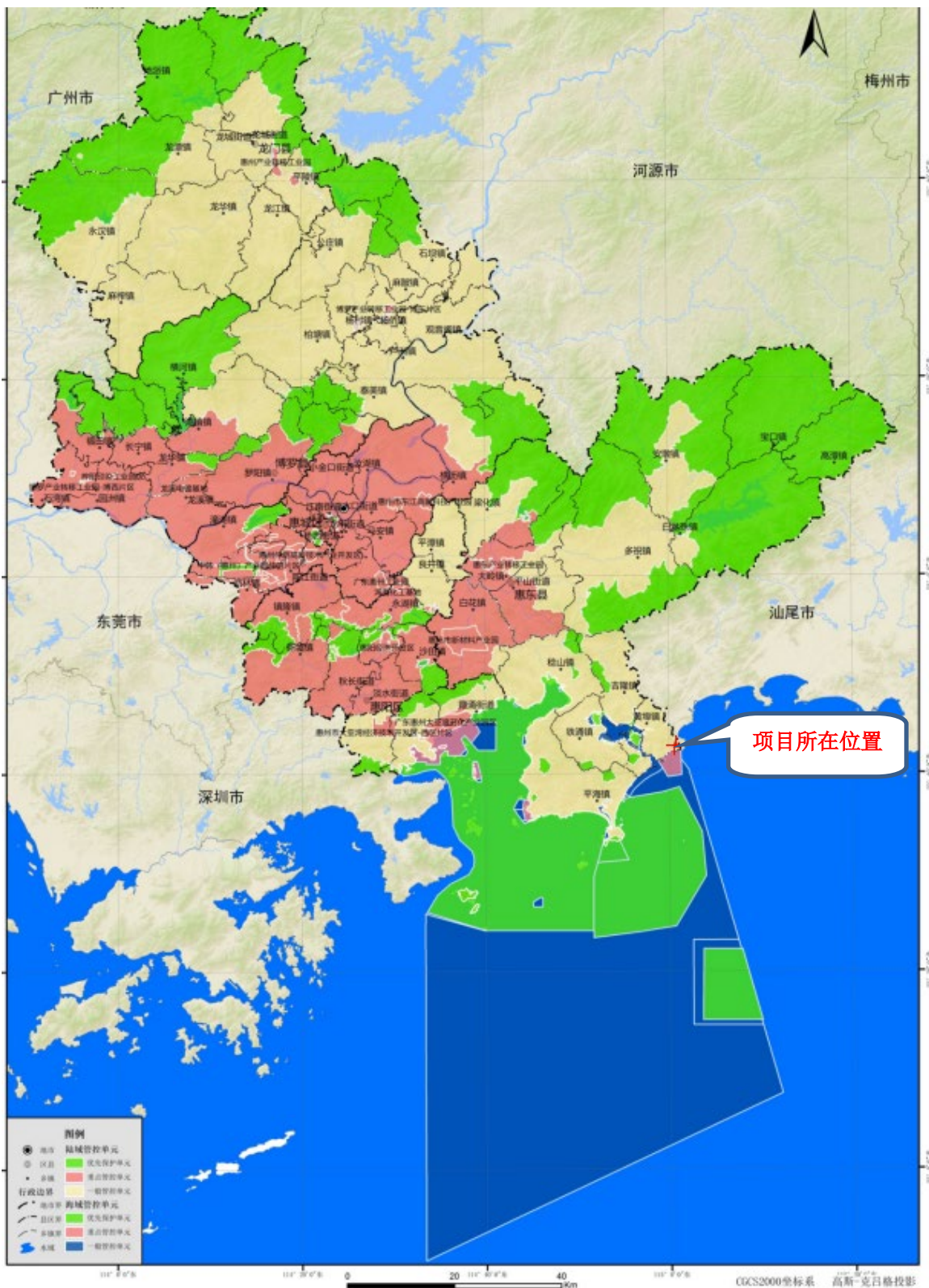


图2- 2项目所属惠州市环境管控单元示意图

(1) 区域布局管控:

【产业/鼓励引导类】生态保护红线及饮用水水源保护区外的区域，重点发展滨海旅游业、装备制造业、清洁能源产业、现代海洋产业。

【生态/禁止类】强化红树林等滨海湿地保护。禁止非法移植、采挖、采伐红树林或者采摘红树林种子。除国家重点项目外，禁止占用红树林湿地；确需占用或者临时占用的，应当开展不可避让性论证，依法办理审批手续。在红树林湿地从事生产经营、生态旅游、科学研究等活动，应当符合保护规划和相关法律法规规定；相关设施应当符合国家和地方的安全和环保标准。

【生态/禁止类】生态保护红线执行《关于在国土空间规划中统筹划定落实三条控制线的指导意见》中的准入要求，红线内自然保护区核心区原则上禁止人为活动，其他区域严格禁止开发性、生产性建设活动，在符合现行法律法规前提下，除国家重大战略项目外，仅允许对生态功能不造成破坏的有限人为活动。

【生态/限制类】一般生态空间内可开展生态保护红线内允许的活动，在不影响主导生态功能的前提下，还可开展国家和省规定不纳入环评管理的项目建设，以及生态旅游、基础设施建设、村庄建设等人为活动。

【土壤/限制类】重金属污染防治非重点区新建、改扩建重金属排放项目，应严格落实重金属总量替代与削减要求，严格控制重点行业发展规模。强化涉重金属污染行业建设项目环评审批管理，严格执行环保“三同时”制度。

【岸线/禁止类】除国家重大项目外，禁止围填海。

【岸线/禁止类】海岸带按照《惠州市海岸带保护与利用管理规定》实施管控，严格保护海滩、沙丘、沙坝、河口、基岩海岸、红树林、防护林等海岸带范围内特殊性地形地貌及自然景观，严格控制自然岸线段海岸带内的房屋、围堤建设。禁止在海岸带保护地带范围内采伐树木、开挖山体、开采矿产、围填海、破坏滩涂和红树林等改变自然地形地貌和海域自然属性的活动。

【岸线/限制类】根据《惠州市海岸带保护与利用规划》自海岸线向陆一侧按照岸线属性分类使用功能等原则划定海岸建设后退线，严格控制在建设后退线向海一侧范围内新建、扩建、改建建筑物。

(2) 能源资源利用：

【水资源/综合类】落实最严格水资源管理制度，执行用水总量、用水效率控制红线。发展低压管道输水灌溉和微灌等先进的灌溉技术提升农业用水效率。推广先进节水工艺、节水技术和节水设备，推进节水技术改造。

【能源/鼓励引导类】建设以风电、核电、LNG等清洁能源为主的高效能源体系。

【能源/鼓励引导类】大力推进绿色港口和公用码头建设，提升岸电使用率；有



序推动船舶、港作机械等“油改气”、“油改电”，降低港口柴油使用比例。

(3) 污染物排放管控：

【其他/禁止类】严禁向海岸带范围内的湿地、河口、泻湖、海湾等生态敏感区排放污水、倾倒废弃物和垃圾。

【水/综合类】统筹规划农村环境基础设施建设，加强农村人居环境综合整治，采用集中与分散相结合的模式建设和完善农村污水、垃圾收集和处理设施，实施农村厕所改造，因地制宜实施雨污分流，将有条件的农村和城镇周边村庄纳入城镇污水、垃圾处理体系，并做好资金保障。

【大气/限制类】环境空气质量一类控制区内不得新建、扩建有大气污染物排放的项目，已有及改建工业企业大气污染物排放执行相关排放标准的一级排放限值，且改建时不得增加污染物排放总量；《惠州市环境空气质量功能区划（2021年修订）》实施前已设采矿权、已核发采矿许可证且不在自然保护区等其它法定保护地的项目，按已有项目处理，执行一级排放限值。

(4) 环境风险防控：

【水/综合类】加强饮用水水源保护区内环境风险排查，开展风险评估及水环境预警监测。

【风险/综合类】强化地表水、地下水和土壤污染风险协同防控，建立完善突发环境事件应急管理体系。

【生态/鼓励引导类】对红树林湿地资源进行监测，并建立红树林湿地资源数据档案。

根据“广东省环境保护厅关于对惠州市严格控制区调整方案意见的函”（粤环函[2017]1429号），项目建设用地区域已从生态严控区调整为有限开发区，满足生态红线的管理要求。

根据《惠州市环境空气质量功能区划》（2021年修订），项目所在区域为环境空气质量二类，不属于【大气/限制类】中禁止新建项目的范围，周围环境空气质量现状满足《环境空气质量标准》（GB3095-2012）中的二级标准（详见2.3.2节）。项目运行过程中产生的废水送城镇污水处理厂处理，满足【水/综合类】的管控要求。项目建设满足该区域“环境质量底线”的要求。

项目生产用水主要是循环冷却水，满足【水资源/综合类】中的节水技术要求，本项目不使用煤和燃气，使用当地大力发展的清洁能源，满足【能源/鼓励引导类】

的要求，符合该区域“资源利用上线”要求。

本项目为国家重大科研平台，不属于该区域【生态/禁止类】、【生态/限制类】、【土壤/限制类】、【岸线/禁止类】和【岸线/限制类】清单内。

综上所述，该项目建设满足该区域“三线一单”要求。

## 2.2 社会经济状况

项目周边现状以山地为主，距离离场址边界最近的居民点为坑口村（WSW方位约0.3km），2018年底有户籍人口有106人。

## 2.3 环境质量和辐射现状

### 2.3.1 声环境质量现状

依据《强流重离子加速器（HIAF）及加速器驱动嬗变研究装置（CIADS）配套工程建设项目环境影响报告表》，厂区内配套设施开工建设前（2017年6月15日）厂区周边声环境现状为昼间55.0~58.2，夜间45.5~48.7，满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）2类区标准。

目前厂区内配套设施正在施工，依据2021年9月28日~9月29日的现场监测结果（详见表2-1），厂区边界昼间噪声为45dB（A）~63dB（A），夜间噪声为40dB（A）~52dB（A），满足《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）要求。

周围的居民点（坑口村和东头村）昼间环境噪声为50dB（A）~53dB（A），夜间环境噪声为39dB（A）~43dB（A），满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）2类标准。

表 2-1 声环境质量现状

序号	检测点位置	7月28日		7月29日	
		昼间噪声值 (dB(A))	夜间噪声值 (dB(A))	昼间噪声 (dB(A))	夜间噪声 (dB(A))
1	建筑施工场界南侧	58	52	51	48
2	建筑施工场界西南侧	57	47	52	50
3	建筑施工场界西侧	53	46	48	47
4	建筑施工场界西北侧	52	42	48	51
5	建筑施工场界北侧	52	40	49	46
6	建筑施工场界东北侧	45	45	48	47
7	建筑施工场界东侧	54	45	63	50

8	建筑施工场界东南侧	52	47	49	48
9	坑口村东北侧	53	39	51	42
10	东头村东北侧	52	43	50	42

### 2.3.2 环境空气质量现状

深圳市清华环科检测技术有限公司于2021年11月1日至2021年11月7日,对项目厂址及其周围敏感点的环境空气质量进行了监测,监测点位见图2-3,取样时气象条件见表2-2,1h平均浓度监测结果见表2-3,24h平均浓度监测结果见表2-4。由监测结果可知,项目周围环境空气质量满足GB3095-2012二类功能区空气质量要求。



图2-3 环境空气监测点位

表 2-2 环境空气采样气象参数

检测点位	气象参数	采样日期						
		11月01日	11月02日	11月03日	11月04日	11月05日	11月06日	11月07日
环境空气检测点1# 02:00~03:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度(%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压(kPa)	101.59	101.51	101.57	101.59	101.69	101.71	101.63
	环境温度(°C)	21.9	22.3	22.7	23.0	21.3	21.3	22.3
	风速(m/s)	1.8	1.7	2.3	2.6	2.1	1.8	2.1
环境空气检测点 1#08:00~09:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度(%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压(kPa)	101.30	101.01	101.20	101.35	101.35	101.39	101.32
	环境温度(°C)	23.7	26.0	24.8	24.1	24.3	24.9	24.1

	风速 (m/s)	2.0	2.0	2.0	2.3	1.9	2.0	2.5
环境空气检测点 1#14:00~15:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压 (kPa)	101.07	100.81	100.90	100.95	100.89	100.73	100.77
	环境温度 (°C)	25.6	27.9	26.5	26.2	26.6	27.1	26.9
	风速 (m/s)	2.3	2.5	1.8	2.2	2.2	1.7	1.9
环境空气检测点 1#20:00~21:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压 (kPa)	101.19	101.33	101.21	101.20	101.20	101.17	101.21
环境空气检测点 1#20:00~21:00	环境温度 (°C)	25.0	25.1	25.8	25.4	25.9	25.9	25.1
	风速 (m/s)	2.3	2.1	2.5	2.5	2.5	2.4	1.7
环境空气检测点 1# 00:00~次日 00:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压 (kPa)	101.23	101.35	101.42	101.15	100.89	101.25	101.53
	环境温度 (°C)	25.1	24.3	24.0	25.7	26.1	24.5	23.3
	风速 (m/s)	1.9	2.3	2.1	1.8	2.5	1.9	2.1
环境空气检测点 2# 02:00~03:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压 (kPa)	101.57	101.51	101.55	101.62	101.67	101.70	101.63
	环境温度 (°C)	22.0	22.3	22.8	22.9	21.4	21.3	22.3
	风速 (m/s)	1.7	1.8	2.4	2.7	2.0	1.9	2.0
环境空气检测点 2# 08:00~09:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压 (kPa)	101.30	101.02	101.19	101.37	101.32	101.40	101.29
	环境温度 (°C)	23.7	26.0	24.8	24.0	24.4	24.9	24.2
	风速 (m/s)	2.1	2.1	2.1	2.4	1.8	2.0	2.6
环境空气检测点 2# 14:00~15:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压 (kPa)	101.04	100.78	100.88	100.93	100.87	100.71	100.77
	环境温度 (°C)	25.7	28.0	26.6	26.3	26.7	27.2	26.9
	风速 (m/s)	2.3	2.4	1.8	2.2	2.3	1.8	2.0
环境空气检测点 2# 20:00~21:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9
	大气压 (kPa)	101.21	101.35	101.24	101.23	101.22	101.15	101.18
	环境温度 (°C)	24.9	25.0	25.7	25.3	25.8	26.0	25.2
	风速 (m/s)	2.2	2.1	2.4	2.6	2.5	2.3	1.8
环境空气检测点 2# 00:00~次日 00:00	天气状况	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
	相对湿度 (%)	62.1	61.7	64.1	63.5	64.2	60.8	61.9

大气压 (kPa)	101.20	101.30	101.39	101.12	100.88	101.22	101.51
环境温度 (°C)	25.2	24.5	24.1	25.8	26.1	24.6	23.4
风速 (m/s)	2.0	2.4	2.2	1.9	2.5	2.0	2.1

表 2-3 环境空气检测结果表

检测点位	检测项目	采样日期							1h平均标准值 (µg/m <sup>3</sup> )
		11月01日	11月02日	11月03日	11月04日	11月05日	11月06日	11月07日	
		1h平均浓度 (µg/m <sup>3</sup> )							
环境空气检测点 1# (115°0'24.74", 22°42'55.07") 02:00~03:00	二氧化硫	7	10	7L	7L	7	7L	12	500
	氮氧化物	11	9	10	13	7	10	11	250
	硫酸雾	9	8	8	9	9	9	7	300
	氟化物	0.5L	0.6	0.5	0.5L	0.5L	0.5L	0.5	20
环境空气检测点 1# (115°0'24.74", 22°42'55.07") 08:00~09:00	二氧化硫	7L	8	7L	7L	9	7L	10	500
	氮氧化物	10	8	11	13	13	10	8	250
	硫酸雾	9	10	7	11	9	9	9	300
	氟化物	0.5L	0.5L	0.7	0.5L	0.5L	0.5	0.5	20
环境空气检测点 1# (115°0'24.74", 22°42'55.07") 14:00~15:00	二氧化硫	7L	7L	8	7L	7L	8	11	500
	氮氧化物	9	13	9	7	12	8	11	250
	硫酸雾	10	10	9	11	9	8	9	300
	氟化物	0.5L	0.5L	0.5	0.5L	0.5	0.5	0.5L	20
环境空气检测点 1# (115°0'24.74", 22°42'55.07") 20:00~21:00	二氧化硫	7L	7L	7L	8	9	7L	13	500
	氮氧化物	11	9	12	8	9	7	12	250
	硫酸雾	9	9	10	9	8	8	9	300
	氟化物	0.5L	0.5L	0.5L	0.5	0.5	0.5L	0.5L	20
环境空气检测点 2# (115°0'4.74", 22°42'43.71") 02:00~03:00	二氧化硫	7	12	7L	7L	7	7L	12	500
	氮氧化物	7	11	7	7	9	7	9	250
	硫酸雾	9	10	7	9	10	9	10	300
	氟化物	0.5	0.5	0.5L	0.5L	0.5	0.5L	0.5	20
环境空气检测点 2# (115°0'4.74", 22°42'43.71") 08:00~09:00	二氧化硫	7L	8	7L	7L	7L	7L	10	500
	氮氧化物	9	10	12	9	11	13	12	250
	硫酸雾	10	10	9	11	9	9	9	300
	氟化物	0.5L	0.5	0.6	0.5	0.5L	0.5L	0.5L	20
环境空气检测点 2#	二氧化硫	8	7L	8	7L	7L	7L	13	500

(115°0'4.74", 22°42'43.71") 14:00~15:00	氮氧化物	7	9	9	11	8	12	10	250
	硫酸雾	9	9	9	10	10	10	9	300
	氟化物	0.5	0.5	0.5L	0.7	0.5L	0.6	0.5L	20
环境空气检测点 2# (115°0'4.74", 22°42'43.71") 20:00~21:00	二氧化硫	7L	7L	7L	8	9	7L	11	500
	氮氧化物	7	11	8	11	8	12	8	250
	硫酸雾	12	9	8	12	9	8	10	300
	氟化物	0.5	0.5L	0.5	0.5L	0.5	0.5L	0.5	20
备注	(1) 二氧化硫、氮氧化物参考《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)及其修改单表 1、表 2 二级浓度限值; 氟化物参考《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)及其修改单附录A表A.1 1 小时平均浓度限值; 硫酸雾参考《环境影响评价技术导则》(HJ 2.2-2018)附录D 表D.1 1h平均标准值; (2) 当检测结果未检出时, 检测结果以检出限加 L 表示。								

表 2-4 环境空气检测结果表

检测点位	检测项目	采样日期							24h平均浓度限值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
		11月 01日	11月 02日	11月 03日	11月 04日	11月 05日	11月 06日	11月 07日	
		24h平均浓度值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )							
环境空气检测点 1# (115°0'24.74", 22°42'55.07") 00:00~次日 00:00	总悬浮颗粒物	108	102	106	103	108	103	104	300
	PM <sub>10</sub>	56	54	51	55	51	52	50	150
	PM <sub>2.5</sub>	33	31	31	31	31	31	32	75
	二氧化硫	4L	4L	4L	9	8	8	13	150
	氮氧化物	7	6	8	9	7	7	6	80
	氟化物	0.06L	0.06	0.06L	0.06L	0.07	0.06	0.07	7
环境空气检测点 2# (115°0'4.74", 22°42'43.71") 00:00~次日 00:00	总悬浮颗粒物	117	118	113	118	118	117	115	300
	PM <sub>10</sub>	59	51	51	58	53	55	54	150
	PM <sub>2.5</sub>	32	31	31	32	32	31	31	75
	二氧化硫	4L	4L	8	9	8	8	11	150
	氮氧化物	7	5	6	8	7	7	8	80
	氟化物	0.06	0.06L	0.06	0.07	0.06L	0.06L	0.06	7
备注	(1) 总悬浮颗粒物、PM <sub>10</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 、二氧化硫、氮氧化物参考《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)及其修改单表 1、表 2 二级浓度限值; 氟化物参考《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)及其修改单附录AA.1 24 小时平均浓度限值; (2) 当检测结果未检出时, 检测结果以检出限加L表示。								

### 2.3.3 电磁辐射环境质量现状

2021年,苏州热工研究院有限公司环境监测中心对厂址周围电磁辐射综合场强开展了监测,监测监测范围为0.26~0.40V/m,监测结果详见表2-5。

表 2-5 电磁辐射环境质量现状

点位号	点位名称	综合场强监测结果, V/m
1	终端测试大厅西南侧	0.32
2	终端测试大厅西北侧	0.34
3	终端测试大厅东北侧	0.35
4	直线加速器隧道西南侧(1)	0.40
5	直线加速器隧道西南侧(2)	0.29
6	直线加速器隧道西南侧(3)	0.29
7	直线加速器隧道东南侧	0.30
8	直线加速器隧道东北侧(1)	0.29
9	直线加速器隧道东北侧(2)	0.27
10	直线加速器隧道东北侧(3)	0.26
11	直线加速器隧道东北侧空地	0.30
12	直线加速器隧道西南侧空地	0.35

### 2.3.4 电离辐射环境质量现状

依据《强流重离子加速器装置环境影响报告书》,广东省环境辐射监测中心2017年11月,对厂址周围电离辐射环境质量现状进行了调查,气溶胶和地下水取样点位为东头村,地表水取样点位为白老屋水库,监测结果表明:

东头村空气样品中Be-7的测量值为7.13mBq/m<sup>3</sup>,空气中氡<17 mBq/m<sup>3</sup>,其余人工放射性γ核素测量值均小于探测限值,测量结果见表2-6;

东头村地下水和白老屋水库水样品测量结果中,水中氡<1.0(Bq/L),Be-7和其他人工放射性γ核素均小于探测限值,测量结果见表2-7;

土壤样品中Be-7的测量结果范围是4.97~9.34Bq/kg,Cs-137的测量结果范围是<0.41~2.14Bq/kg,未监测到其他人工放射性γ核素,测量结果见表2-8。

表 2-6 空气中放射性核素测量结果

核素名	测值(μBq/m <sup>3</sup> )	核素名	测值(μBq/m <sup>3</sup> )
<sup>7</sup> Be	7.13E+03	<sup>60</sup> Co	<1.5
<sup>95</sup> Zr	<2.8	<sup>58</sup> Co	<1.5
<sup>54</sup> Mn	<1.5	<sup>144</sup> Ce	<6.2

$^{131}\text{I}$	<1.8	$^{40}\text{K}$	<39
$^{137}\text{Cs}$	<1.6	空气氡	<17 mBq/m <sup>3</sup>
$^{134}\text{Cs}$	<1.4		

表 2- 7 水体中天然放射性核素测量结果 (mBq/L)

核素名称	东头村地下水	白老屋水库水
$^7\text{Be}$	<15	<16
$^{95}\text{Zr}$	<2.8	<3.1
$^{65}\text{Zn}$	<3.1	<3.8
$^{124}\text{Sb}$	<3.2	<3.5
$^{54}\text{Mn}$	<1.6	<1.7
$^{137}\text{Cs}$	<1.6	<1.8
$^{134}\text{Cs}$	<1.6	<1.7
$^{60}\text{Co}$	<1.5	<1.8
$^{58}\text{Co}$	<1.5	<1.6
$^{144}\text{Ce}$	<9.1	<8.8
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	<1.5	<1.7
$^3\text{H}$	<1.0 (Bq/L)	<1.0 (Bq/L)

表 2- 8 土壤中天然放射性核素测量结果 (Bq/kg.干)

核素名称	厂区边界 东北角土壤	厂区边界 西南角土壤	厂区边界 西北角土壤	厂区边界 东南角土壤	东头村土壤	坑口村土壤
$^7\text{Be}$	9.34	4.97	9.06	5.13	9.38	4.89
$^{95}\text{Zr}$	<0.75	<0.76	<0.79	<0.67	<0.72	<0.74
$^{65}\text{Zn}$	<0.83	<0.78	<0.78	<0.79	<0.76	<0.81
$^{137}\text{Cs}$	1.27	<0.41	0.67	2.14	1.62	1.84
$^{134}\text{Cs}$	<0.37	<0.37	<0.36	<0.32	<0.33	<0.33
$^{60}\text{Co}$	<0.38	<0.35	<0.36	<0.35	<0.33	<0.36
$^{58}\text{Co}$	<0.35	<0.35	<0.36	<0.33	<0.32	<0.34
$^{144}\text{Ce}$	<2.5	<2.5	<2.5	<2.7	<2.9	<2.8
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	<0.39	<0.37	<0.38	<0.32	<0.35	<0.34
$^{40}\text{K}$	543	410	662	894	728	815

2021年, 苏州热工研究院有限公司环境监测中心对厂址周围X-γ辐射水平进行了监测(详见表2- 9), 监测结果为116nSv/h~156nSv/h(已扣除宇宙射线响应), 处于



惠州原野 $\gamma$ 辐射剂量率36.4~193.1nGy/h（数据来源《中国天然放射性水平》，已扣除宇宙射线响应）范围内，场址所在地区的X- $\gamma$ 辐射剂量率水平属于正常本底范围。

表 2-9 厂址周围 X- $\gamma$  辐射剂量率水平

点位号	点位名称	X- $\gamma$ 辐射剂量率, nSv/h
1	终端测试大厅西南侧	132
2	终端测试大厅西北侧	147
3	终端测试大厅东北侧	145
4	直线加速器隧道西南侧（1）	128
5	直线加速器隧道西南侧（2）	133
6	直线加速器隧道西南侧（3）	132
7	直线加速器隧道东南侧	134
8	直线加速器隧道东北侧（1）	136
9	直线加速器隧道东北侧（2）	132
10	直线加速器隧道东北侧（3）	139
11	直线加速器隧道东北侧空地	116
12	直线加速器隧道西南侧空地	156

## 2.4 场址适宜性评价

通过上述调查和分析表明：

本项目所在场址及周边为丘陵地带，地质和地震条件良好，未发现影响项目安全稳定运行的颠覆性因素。

本项目所在场址及周边社会环境特征相对简单，结合项目的环境影响评价范围，现有居民点离项目较远，条件较好。

初步的环境质量调查表明，项目所在厂址区域的环境质量良好，辐射水平处于天然辐射本底正常涨落范围内。

本项目所在场址属于有限开发区（粤环函[2017]1429号，详见附录A），项目用地取得《建设用地规划许可证》（地字第惠东县规地证字（2018）000108号），项目建设符合《惠州市“三线一单”生态环境分区管控方案》，项目选址符合相关土地利用规划。

综上所述，本项目选址是可行的。

### 第三章 工程分析与源项

#### 3.1 项目规模与基本参数

CiADS项目建、构筑物见表3-1，本项目主要包括加速器隧道（B01）、加速器设备厅（B03）、超导综合测试与维护大厅（B06）、低温中心大厅（B08）、加速器测试大厅（B09）及其内部加速器和实验设施，其他项目和设施不在本项目评价范围内。本项目建、构筑物在厂区的分部示意图见图3-1。

表 3-1 CiADS 项目建、构筑物一览表

区域	编号	建、构筑物名称	占地面积 (m <sup>2</sup> )	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	
				地上	地下
国家 投资 建设 部分	<b>B01</b>	<b>加速器隧道</b>	5763	94	5763
	B02	器靶耦合隧道	920	/	920
	<b>B03</b>	<b>加速器设备厅</b>	5400	5724	/
	B04	器靶耦合设备厅	554	573	/
	B05	束流收集终端与散裂靶热态试验 测试厅	4755	1164	4224
	<b>B06</b>	<b>超导综合测试与维护大厅</b>	2800	2800	/
	B07	反应堆靶厂房及配套辅助 厂房	4009	17158	/
	<b>B08</b>	<b>低温中心大厅</b>	2500	2500	/
	<b>B09</b>	<b>加速器测试大厅</b>	1580	1580	/
	B10	保护区主出入口	70	70	/
		小计		28351	31663
地方 配套 建设 部分	D01	冷却设备大厅	2780	2780	/
	D02	场区主出入口	90	90	/
	D03	散裂靶安装调试厅及2#测试大厅	3994	5280	/
	D04	压缩机厅	2049	2049	/
		小计		8913	10199
合计			37264	52769	



图 3-1 本项目在场区的分布示意图

超导直线加速器是CiADS的核心系统之一，提供稳定的高功率的质子束流。主要包括ECR质子源（ECRIS）、低能传输段（LEBT）、射频四极加速器（RFQ）、中能传输段（MEBT）、超导加速段（SC）和高能传输段（HEBT）及束流收集终端，本次不建设束流收集终端，而采用调试用束流收集器（Dumper）。

本项目的强流质子束流由离子源（ECRIS）产生（0.02MeV），经过低能传输段（LEBT）和射频四极加速器（RFQ）完成横纵向束流的成形和预加速（2.1MeV）；中能传输段（MEBT）将束流匹配到超导加速段，然后经过一系列的超导腔体加速到500MeV，随后通过高能传输段（HEBT）输出高能质子束流。图3-2给出了加速器各加速段示意图。

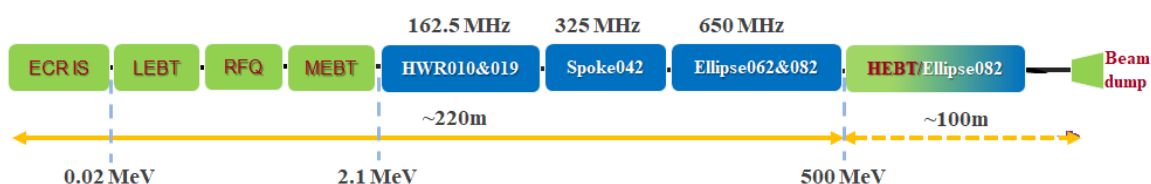


图3-2 直线加速器各加速段示意图

超导直线加速器束流功率设计要求为2.5MW，根据总体参数要求，加速器的动力学设计参数为500MeV，5mA。本次建设束流损失设计不超过1W/m，调试期间Dumper最大损失功率为25kW。

### 3.1.1 ECR 质子源（ECRIS）

离子源是用来产生一定能量离子束的装置，通常包括离子产生和引出两个系统，离子源必须能够使原子或者分子离化，形成等离子体，按需产生特定的离子。本项目采用紧凑型电子回旋共振型离子源（ECR型的质子源，ECRIS），ECR离子源属于无极放电，能够产生高流强和高电荷态的离子束，可在较大范围气压下长期稳定工作、重复性能好、引出束的能散和发射度低、离子种类广，没有寿命限制，也不会带来束流的污染，可以提供较纯净的离子束，共振频率为2.45GHz。该离子源满足连续和脉冲两种工作模式。综合考虑了束流的空间电荷效应和离子源引出电极的运行稳定性，质子的引出能量选择为20keV。归一化均方根（RMS）横向发射度小于 $0.2 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ，其主要参数见表3-2。

表 3-2 ECRIS 的设计参数

设计参数	设计指标	单位
离子种类	H <sup>+</sup>	-
引出束流能量	20	keV
引出束流强度	15	mA
工作频率	2.45	GHz
RMS 横向束流发射度	0.2	$\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$
束流能散	$\leq 0.5$	%

### 3.1.2 低能传输段 (LEBT)

低能传输段 (LEBT) 的主要作用是为了实现 ECRIS 与 RFQ 之间的束流匹配, 同时起到主加速离子筛选、机器保护、束流诊断的作用:

- 1) 将离子源引出的匹配的束流传输至 RFQ 加速器中;
- 2) 分离杂质离子, 获得纯净的质子束;
- 3) 在实现超导加速器调试时, 将 DC 束流进行脉冲切割, 并且实现纳秒量级的束流保护。

整个 LEBT 总长 3.18m, 采用三螺线管设计来进行束流匹配, 采用了“偏转型”LEBT 设计以去除杂质离子, 其中二级磁铁采用了特殊边缘角消除了束流横向不对称效应。LEBT 的另一个主要功能是对束流进行斩波形成短脉冲进行束流的调试测量以及机器保护。

### 3.1.3 射频四极加速器 (RFQ)

RFQ 加速器是束流从直流束流变为脉冲束流的加速结构, 其动力学设计采用了“新四段论”的设计方法, 利用四个周期单元进行横向的匹配, 利用 250 个单元完成了纵向的聚束成形。

RFQ 的注入能量为 20keV, 引出能量 2.1MeV, 设计流强 5mA, 表 3-3 给出了其动力学设计参数。

表 3-3 RFQ 动力学设计参数

设计参数	设计指标	数值
加速粒子	质子	-
运行频率	162.5	MHz
占空比	100	%
平均流强	5	mA
出口能量	2.1	MeV
出口横向 RMS 发射度	0.20	(mm. mrad)
出口纵向 RMS 发射度	0.20	(mm. mrad)
结构总长	4.9	m
出口横向相空间分布	近似对称束	-

### 3.1.4 中能传输段 (MEBT)

中能传输段 (MEBT) 作为常温段 (LEBT和RFQ) 与超导段 (SC) 之间的过渡, 主要功能包括:

- RFQ引出的束流到超导加速段的横纵向束流匹配;
- 束流横纵向相空间分布信息的测量, 束流能量、流强和束流轨道位置等信息的测量;
- 束流全发射度的限制等。

MEBT的设计理念是在保证RFQ加速器与下游超导加速段的束流匹配的前提下, 通过设计完整的周期相移刮束段, 实现相空间全发射度的晕粒子刮束目的, 从而达到较小的传输线接受度。

MEBT的束流能量为2.1MeV, 全长约4.73m, 主要由16个四极磁透镜和4个162.5MHz常温聚束腔QWR以及一系列的束诊元件组成, 分别用于横向和纵向的束流匹配和测量。

### 3.1.5 超导加速段 (SC)

超导加速段 (SC) 利用五种类型的超导体腔体把质子从2.1MeV加速到500MeV。五种超导体腔主要功能是满足不同能量段质子的有效加速及纵向的聚焦。其中162.5MHz的半波长超导体腔体 (HWR010、HWR019) 采用双间隙结构,  $\beta$ 值分别为0.10和0.19, 将束流加速到44MeV; 之后利用325MHz的轮辐型加速腔体 (Spok042) 把束流提高到171MeV; 最后采用650MHz的五间隙的椭球腔体 (Ellip062、Ellip082) 把束流加速

到最终能量500MeV。

**(1) HWR010**

HWR010超导腔体为频率162.5MHz、最优 $\beta$ 为0.10的半波长超导腔，由纯铌材料制作而成，单腔最大加速电压1.01MV，9支半波长超导腔安装在一个低温恒温器中，用于加速2.1-7MeV的低能质子束。

**(2) HWR019**

HWR019超导腔体为频率162.5MHz，最优 $\beta$ 值为0.19的半波长超导腔，用于加速7MeV-45MeV的质子束流。其具有结构对称性好、加速 $\beta$ 范围宽、结构紧凑、每个腔对应独立的功率源（灵活、稳定）等优点。

**(3) SPOKE042**

该能量段长度为66.97m，由10个低温恒温器，共40个双芯棒超导Spoke谐振腔组成。双芯棒超导Spoke谐振腔使用频率为325MHz， $\beta_{opt}=0.42$ ，将质子能量从45MeV提升到175MeV。

**(4) Ellip062**

Ellip062为一组6cell的最优beta为0.62的超导椭球型加速腔，完成H+粒子从175MeV到377MeV段的加速。

**(5) Ellip082**

Ellip082为一组5cell的最优beta为0.82的超导椭球型加速腔，完成H+粒子从377MeV到500MeV段的加速。

表3-4给出了SC各类超导腔体参数。

表3-4 SC各类超导腔体参数

加速段	腔型	调谐器	f (MHz)	孔径 (mm)	Epeak (MV/m)	Bpeak (mT)	功率容量 (kW)	2K 漏热 (W)	cavity/C M	Umax (MV)
2.1-6.8MeV	HWR010	剪切式	162.5	40	26	56.75	12	0.27	9/1	1.01
6.8-44MeV	HWR019	剪切式	162.5	40	28	63.7	32	0.30	24/4	2.61
44-171MeV	Spok042	单边式	325	50	28	65.9	48	0.42	40/10	5.37
171-350MeV	Ellip062	单边式	650	100	29	67.3	128	0.98	40/10	11.84
350-500MeV	Ellip082	单边式	650	100	29	68.3	128	0.98	24/6	16.64

**3.1.6 高能传输段 (HEBT)**

高能传输段（HEBT）传输从超导加速段的出口的束流，主要功能包括：

- 对超导加速段输出的束流进行横纵向发射度、能量、流强等信息的测量；
- 对高功率质子束流进行实时监测以及保护；
- 使束流均匀化，降低束流收集器上的峰值功率密度；
- 满足束流调试的束线和束流收集器的需求；
- 为器靶耦合段进行关键技术预研。

高能传输段由一系列的四极透镜和偏转铁组成，束流管道直径为80mm，是束流平均尺寸的7倍，大大降低了束流损失的几率。

### 3.1.7 束流收集器（Dumper）

束流收集器用于加速器调试期间产生的束流，在第一、第二阶段采用法拉第筒，第三阶段采用专用束流收集器，其中，第三阶段采用的束流收集器在CiADS项目整体建设完成后拆除，拟用于其他研究工作，不作为放射性固体废物处置。

### 3.1.8 参数汇总

加速器各组成部分的高频参数见表3-5。直线加速器动力学设计参数表见表3-6。

表 3-5 加速器各部分高频参数汇总表

加速段	LEBT	RFQ	MEBT	SC	HEBT	单位
长度	3.184	4.900	4.730	202.750	136.6	m
出口能量	0.020	2.1	2.1	500	500	MeV
束流频率	DC	162.5	162.5	162.5	/	MHz
高频频率	/	162.5	162.5	162.5/325/650	/	MHz
$\beta$	0.0086	0.067	0.067	0.76	0.76	/
腔体数	/	1	4	137	/	个
恒温器数	/	/	/	31	/	个
运行温度	300	300	300	2	300	K



表 3-6 加速器动力学设计参数表

位置 (各段出口)	长度	纵向位置	束流能量	流强	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\epsilon_z$	x	y	$\psi$	束流 频率	
	(m)	(m)	(MeV)	(mA)	( $\pi$ .mm.mrad)			(mm)	(mm)	(deg)	(MHz)	
离子源 (ECRIS)	0	0	0.020	15	0.19	0.19	-	-	-	-	直流	
低能传输段 (LEBT)	3.184	3.18	0.020	5	0.18	0.18	-	7	7	-	直流	
射频四极加速器 (RFQ)	4.900	8.08	2.1	5	0.20	0.20	0.23	0.6	0.6	15	162.5	
中能传输段 (MEBT)	4.730	12.81	2.1	5	0.17	0.17	0.18	4	4	13	162.5	
超导 加速段 (SC)	HWR010	6.04	18.85	6.8	5	0.23	0.23	0.31	1.8	1.8	5.5	162.5
	HWR019	24.35	43.20	44	5	0.24	0.25	0.31	2	2	3.4	162.5
	Spoke042	61.00	104.20	171	5	0.24	0.26	0.34	2	2	1.75	162.5
	Ellipse062	71.10	175.30	350	5	0.24	0.27	0.33	3	3	0.85	162.5
	Ellipse082	40.26	215.56	500	5	0.24	0.27	0.33	3	3	0.85	162.5
高能传输段 (HEBT)	136.6	352.16	500	5	0.24	0.27	0.78	3	3	15	162.5	

注： $\epsilon_x$ -水平方向均方根归一化发射度， $\epsilon_y$ -水平方向均方根归一化发射度， $\epsilon_z$ -水平方向均方根归一化发射度；  
 x-水平方向均方根束流尺寸，y-垂直方向均方根束流尺寸， $\psi$ -纵向均方根束流尺寸。

## 3.2 工程设备与工艺分析

本项目的加速器本体由ECR质子源（ECRIS）、低能传输段（LEBT）、射频四极加速器（RFQ）、中能传输段（MEBT）、超导加速段（SC）、高能传输段（HEBT）和束流收集器等组成，为实现相应的功能，需要建设相应的磁铁系统、磁铁电源系统、高频系统、束流诊断系统、真空系统等，以及相应的试验厂房，包括加速器隧道（B01）、加速器设备厅（B03）、超导综合测试与维护大厅（B06）、低温中心大厅（B08）、加速器测试大厅（B09）、排风机房，以及地方配套建设的D01~D04等。

### 3.2.1 加速器主系统

#### 3.2.1.1 ECR 质子源（ECRIS）

ECRIS示意图见图3-3，主要由微波系统、源体系统及引出系统组成。

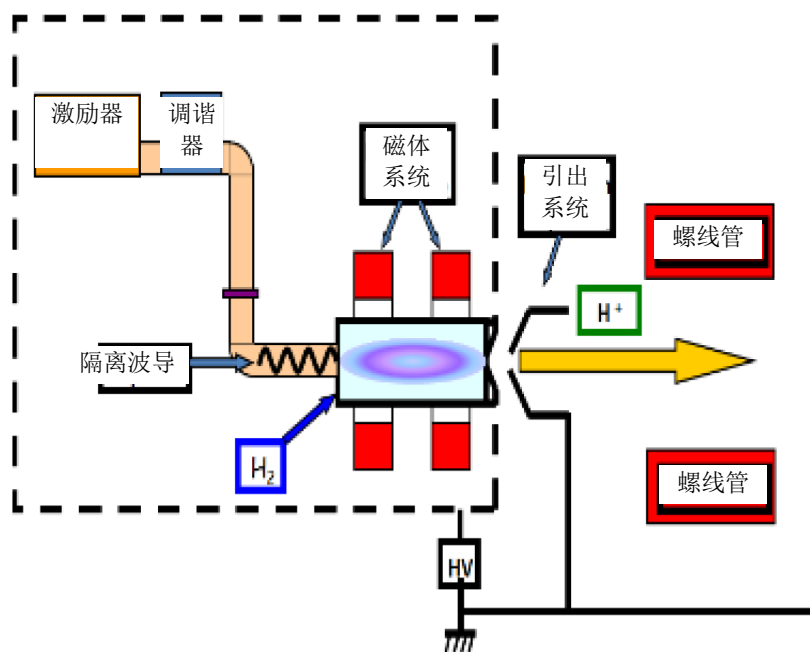


图3-3 ECRIS系统示意图

— 微波系统由微波发生装置、传输装置及耦合系统构成：

- 设计有一台微波机采用全固态功率源，输出频率为2.45GHz，输出功率1.0kW。
- 微波传输系统由激励器、三螺钉调谐器、高压隔离波导组成，采用TE10模微波，采用BJ26波导的三销钉调谐器，在调谐波导上端接口，装有高压隔离波导，填充材质为聚四氟乙烯。

- 微波耦合系统主要由匹配波导及微波窗组成：匹配波导采用双脊型过渡波导，微波窗采用95陶瓷与无氧铜封接。
- 源体系统由磁体、放电室及铁壳组成。离子源磁体采用全永磁。剩磁Br可以达到1.4T，由6个磁环及铁壳组成，外壳采用导磁的DT4材料，每个磁环由12个永磁扇形块组成。源体系统结构示意图见图3-4。

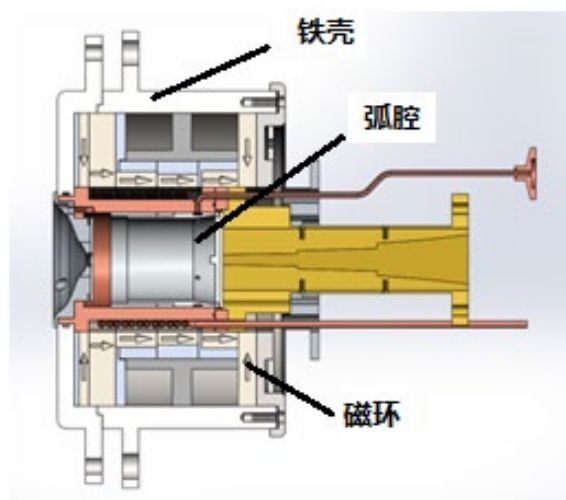


图3-4 源体系统结构示意图

- 引出系统由高压绝缘子、电极底座及三电极组成。
- 高压绝缘子采用纯度95%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷，陶瓷长度100mm，结构采用波纹状；
  - 电极底座采用水冷无氧铜设计，目的是冷却束流损失的电极
  - 三电极分别为等离子体电极、抑制电极及地电极。

### 3.2.1.2 低能传输段（LEBT）

LEBT包括三组螺线管及校正铁，两个诊断室，交流电流测量器（ACCT），静电斩束器及锥。主要用于ECRIS与RFQ之间的束流匹配，同时起到主加速离子筛选、机器保护、束流诊断的作用。图3-5给出了LEBT的布局结构示意图。

距离离子源出口200mm处安装第一个螺线管用于预聚束以减少发射度的增长，螺线管之前安置刮束光阑，以实现横向束流品质的提升。距离二极磁铁570mm放置一个真空室，真空室内有法拉第筒，带有边缘角的20°二极磁铁用于质子束的筛选及束流横向对称性的补偿，在二极铁与第二个螺线管之间放置四极透镜用于横向束流匹配调整，最后两个螺线管用于与RFQ加速器入口参数进行匹配，其间距离540mm用于安装法拉第筒、发射度测量装置及可调节光阑，最后一台螺线管与RFQ之间距离为150mm，

其间放置静电切束器、束流接收锥和ACCT探测器。

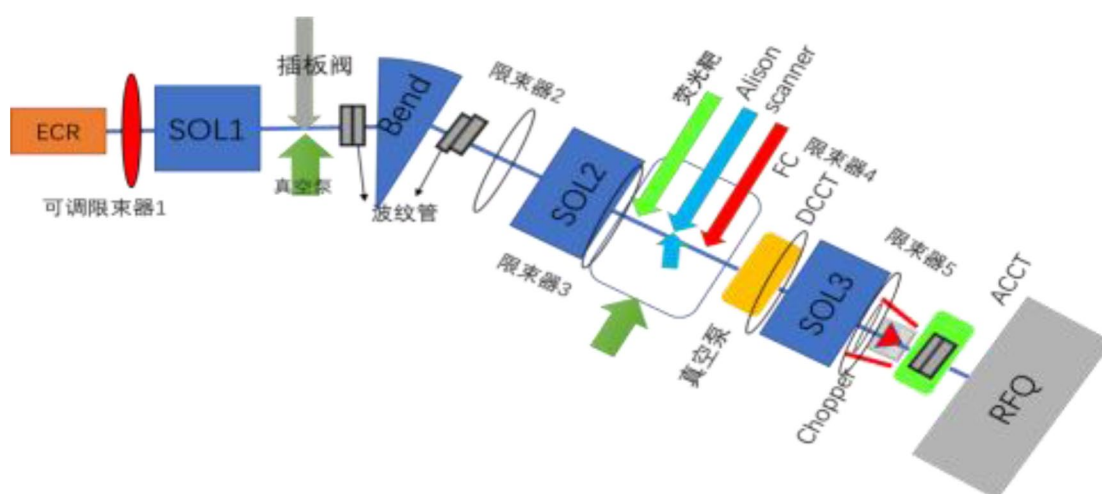


图3-5 LEBT的布局结构示意图

### 3.2.1.3 射频四极加速器（RFQ）

RFQ的运行频率选择为162.5MHz，由四翼型RFQ腔体、射频功率源系统、真空系统、水冷系统、控制系统、准直支架系统组成。

RFQ腔体是由五段结构、长度一致的无氧铜腔体组成，每段之间用外部的不锈钢外壳连接。每段腔体都是由高纯度无氧铜装配钎焊接组成的真空密闭腔体，腔体内部主要为精密加工的四个电极；腔体外壁上布有高频功率馈入，调谐，抽真空所用的法兰接口，Pi模杆，以及用于整个腔体冷却的冷却水路接头。

图3-6给出了RFQ腔体机构示意图；表3-7给出了RFQ腔体的基本几何尺寸及技术指标要求；表3-8给出了RFQ腔体主要设计参数表。

表 3-7 RFQ 腔体的基本几何尺寸及技术指标要求

设计参数	设计指标	数值
腔体频率	162.5±0.2	MHz
腔体内壁尺寸	346.×346.	mm
腔体的总长度	4900	mm
漏气率	<1.0×10 <sup>-8</sup>	Pa. L/s
冷却水（水压试验）	10	kg/cm2

表 3-8 RFQ 腔体主要设计参数表

设计参数	设计指标	单位
------	------	----

设计参数	设计指标	单位
电压	65	kV
传输效率 (0/15mA)	99.6, 99.4	%
平均孔径 (r0)	0.679	mm
极头曲率半径	0.509	mm
最大表面电场	13.59	MV/m
同步相位选择	$(-90) \sim (-23.5)$	
最小间距	3.83	mm
最大调制系数	2.31	-
注入归一化 rms 发射度 (x/y/z)	0.2/0.2/-	$\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$
输出归一化 rms 发射度 (x/y/z)	0.196/0.195/0.21	$\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$
电极长度/总长度	488.38/490.26	cm
单元数	337 包括 1 个 Tcell 和一个 Mcell	-

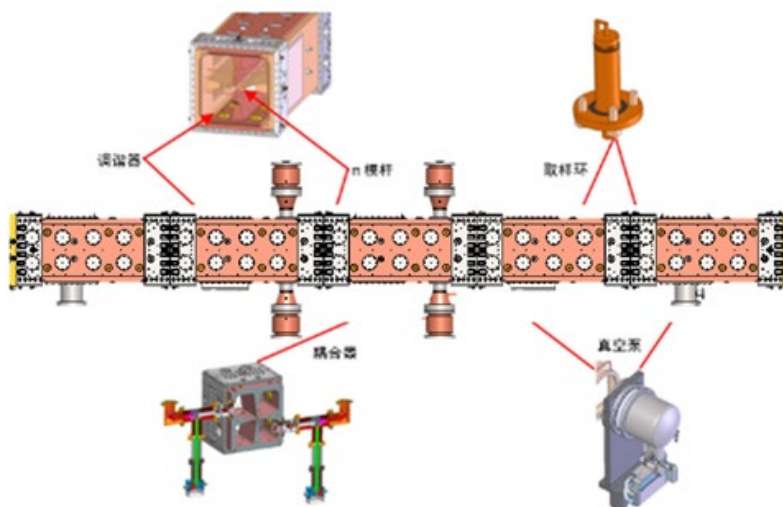


图3-6 RFQ腔体结构

### 3.2.1.4 中能传输段 (MEBT)

MEBT的束流能量为2.1MeV，全长约4.73m，主要由16个四极磁透镜 (Q1~16) 和4个162.5MHz常温聚束腔 (QWR, buncher1~4) 以及一系列的束诊元件组成，分别用于横向和纵向的束流匹配和测量。

MEBT在第二组两组合四极透镜前后分别安置狭缝、及法拉第筒、单丝组成横向发射度测量装置，分别可利用狭缝与单丝完成束流剖面的测量，利用狭缝与单丝系统又可组成直接发射度测量系统。通过Q5~Q13四极磁铁的匹配，实现180deg束流相移要求，通过设计水冷束流管道作为“全周期”刮束段，实现MEBT段束流接受度的限制，同时Buncher2之后安装束流形状探测器（BSM）实现束流相宽的测量，7组束流位置探测器（BPM）用于束流位置及相位探测，最终在MEBT末端，利用单丝验证超导段入口束流剖面，利用刮束器实现MEBT段单独调试的束流阻挡。

图3-7给出了MEBT的布局示意图；表3-9、表3-10和表3-11分别给出了四极透镜与校正线圈、常温聚束器和束诊元件的物理参数表。

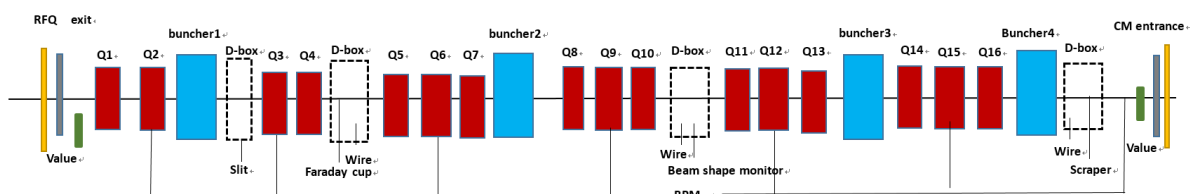


图3-7 MEBT布局图

表3-9 四极透镜与校正线圈物理参数表

参数	类型一	类型二	单位
物理长度	80	100	mm
孔径	28	28	mm
最高极面场	6200	7000	Gs
校正线圈积分场强	63	63	Gs*m
校正量	15	15	mrad
个数	12	4	-

表3-10 常温聚束器物理参数表

腔体类型	QWR	单位
腔体频率	162.5	MHz
有效加速电压	160	KV
安装长度	<280	mm
束流管道半径 R	25	mm
个数	4	-

表3-11 束诊元件物理参数表

元件名称	个数	目标测量值/作用
束流位置探测器（BPM）	7	位置，相位
发射度测量	1	发射度
束团长度测量装置	1	束团长度

刮束器	4	刮除束晕
法拉第筒	1	流强测量及束流阻挡
交流电流测量器 (ACCT)	2	流强测量
直流电流测量器 (DCCT)	1	流强测量

### 3.2.1.5 超导加速段 (SC)

整个超导加速段由HWR010、HWR019、Spok042、Ellip062和Ellip082五种超导腔组成，采用超导螺线管和常温四极透镜两类横向聚焦元件，孔径分别为40mm、50mm的超导螺线管和80mm的常温四极透镜。从低能到高能，超导腔体的同步相位从 $-45^\circ$ 逐渐过渡到 $-20^\circ$ ，可以有效的减少非线性场对束流的影响，降低束流损失的几率。

为维持腔体的正常工作，每一种腔体将配备一台功率耦合器用于功率输入腔体和频率调谐器稳定腔体的谐振频率在工作频率点。超导腔高功率输入耦合器的核心功能是将特定频率的电磁功率有效的馈送给射频超导腔的束流负载，它是射频功率源和超导腔体的连接枢纽，使得电磁波能从功率源传入超导腔，并利用陶瓷窗将大气与腔内的超高真空环境隔离开来，同时还提供从室温到超导低温的热过渡作用。

超导腔高功率输入耦合器根据结构分为HWR010耦合器、HWR019耦合器、DSR042耦合器以及椭球腔耦合器四类。耦合器的基本结构相似，均为双热窗可调耦合器。

#### (1) HWR010加速段

HWR010加速段采用9个超导腔的加速方案，设计中采用的是紧凑结构，周期长度为0.6m，共计1个低温恒温器，低温恒温器长度约为6m，包含9个超导腔和9个超导螺线管。图3-8给出了HWR010段结构示意图。



图3-8 HWR010段结构示意图

#### (2) HWR019加速段

HWR019加速段采用紧凑的准周期结构，周期长度为0.897m，共计4个低温恒温器，低温恒温器长度约为6m，包含6个超导腔和6个超导螺线管，将束流从6.8MeV加速到44MeV。图3-9给出了HWR019段结构示意图。



图3-9 HWR019段结构示意图

(3) Spoke042加速段和Ellip062加速段以及Ellip082加速段

Spoke042加速段和Ellip062加速段以及Ellip082加速段将束流从44MeV加速到500MeV。这两段加速结构均采用全周期结构。Spoke042段将采用超导螺线管作为横向聚焦元件，Ellip062段Ellip082段将采用常温四极透镜作为横向聚焦元件，图3-10和图3-11分别给出了Spoke042和Ellip062、Ellip082加速段的结构示意图。

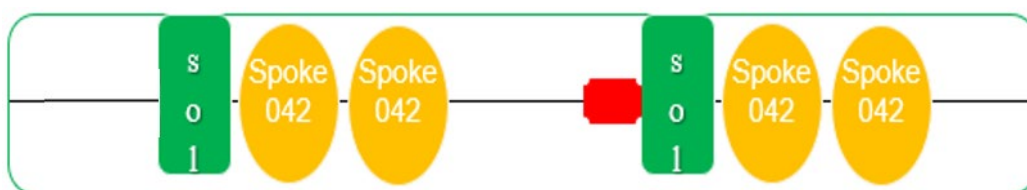


图3-10 Spoke042段结构示意图

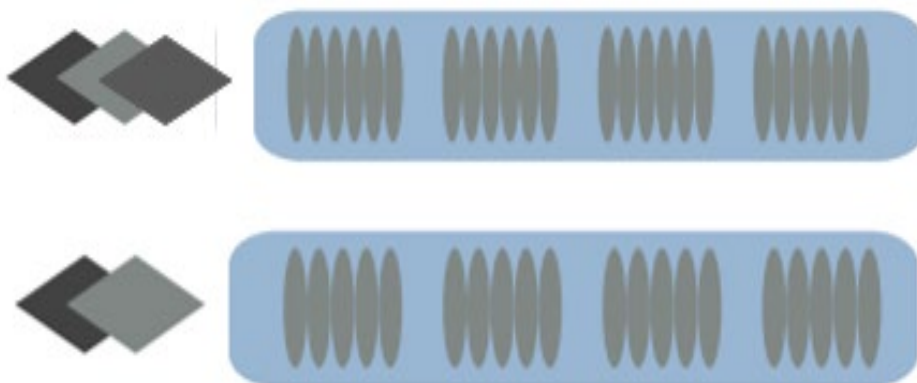


图3-11 Ellip062段和Ellip082段结构示意图

3.2.1.6 高能传输段（HEBT）

高能传输段由一系列的四极透镜组成，束流管道直径为80mm。

3.2.1.7 束流收集器（Dumper）

第三阶段专用束流收集器主要包含三段铜块，每段间距5cm，前两块中间掏空，中空圆锥孔径分别为：第一段10cm和2cm；第二段2cm和0.5cm。其剖面结构示意图见图3-12。



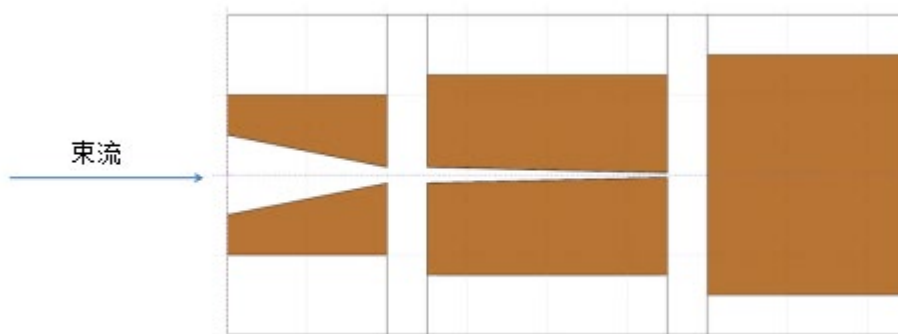


图3-12 束流收集器剖面结构示意图

### 3.2.1.8 磁铁系统

磁铁系统是加速器对束流进行横向约束和调试的静态磁性元件，主要包括超导螺线管、常温四极透镜及常温二极磁铁三种主要类型的磁体。

#### (1) 超导螺线管

超导低能段HWR010、HWR019和Spoke042采用超导螺线管作为聚焦元件，聚焦强度分别为2.3T<sup>2</sup>m、3.4T<sup>2</sup>m和9T<sup>2</sup>m。

超导螺线管组件集成螺线管（SOL）和一对双向二极校正磁体，双向二极校正磁体包含水平二极校正磁体（DCH，产生垂直方向磁场）和垂直二极校正磁体（DCV，产生水平方向磁场），用于对束流的位置矫正。螺线管与二极校正磁体将安装在一个氦槽中，采用线圈屏蔽方案。主要参数见表3-12。

表 3-12 超导螺线管主要设计参数

	规格	单位	SOL-1	SOL-2	SOL-3
总体	孔径	mm	40	40	50
	运行温度	K	4.5	4.5	4.5
	杂散场（距离磁体端部 95mm）	T	0.0142	0.0125	0.0125
螺线管	平方积分磁场	T <sup>2</sup> m	2.3	3.4	9
	中心磁场	T	6.1126	6.6180	7.1830
	工作电流	A	132.18	117.7	116.04
	分流温度	K	5.92	5.87	5.83
	电感	H	0.727	1.184	3.85
	储能	kJ	6.35	8.20	25.92
水平/垂	积分磁场	Tm	0.006	0.006	0.012
	中心磁场	T	0.0747	0.0644	0.0706

	规格	单位	SOL-1	SOL-2	SOL-3
直二极校正	工作电流	A	41.55	40.74	39.24
	安全裕度	%	68.2	71.1	70.2
	分流温度	K	8.19	8.29	8.25
	电感	H	0.046	0.029	0.057
	储能	kJ	0.04	0.02	0.04

### (2) 常温二极磁铁

常温二极磁铁包括低能段20°偏转磁铁（D1）、高能段15°偏转磁铁（D2），束线中最大磁刚度为2.43Tm，高能段磁铁最大表面磁场要求1.2T。LEBT段二极磁铁最高磁场要求为0.15T，高能传输段段二极磁铁最高磁场要求为1.7T。

常温二极磁铁采用H型结构，铁芯采用电工纯铁DT4，通过运用磁铁极面垫补和钝化槽的方法以满足不同场水平下的磁场高均匀度的要求；考虑到磁铁铁芯的磁场特性，设计时使铁芯中的磁场强度在1.5T以下。表3-13给出了常温二极磁铁技术参数表。

表 3-13 常温二极磁铁技术参数表

磁铁类型	D1	D2
总体参数		
数量	1	2
气隙 (mm)	100	H120, V100
偏转半径 (mm)	500	4500
偏转角度 (°)	20	15
最大磁场 (T)	0.15	1.7
电参数		
线规 (mm)	5×5/Φ3	12×12/Φ6
每极匝数 (Turns)	36	96
导线基本电阻 (mΩ)	81	69
最大磁场电流 (A)	180	810
最大磁场电压 (V)	14	56
最大磁场功率 (kW)	2.4	45
机械参数		
铁芯截面 (mm)	460×260	900×620

### (3) 常温四极透镜

磁铁系统包含五种类型的常温四极透镜，其中高能传输段利用长度为180mm与

500mm的两种常温四极透镜实现束流横向匹配。

磁铁铁芯材料采用电工纯铁DT4，由于磁场梯度较大，极头采用三角形极头；线圈切割完成铁芯加工，同时对极头做顶端削斜处理以优化积分场均匀度；线圈采用中空水冷铜导线，绕制成马鞍形。表3-14给出了常温四极磁铁技术参数表。

表 3-14 常温四极磁铁技术参数表

磁铁类型	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
参数	L80	L100	L180	L240	L500
总体参数					
数量	12	4	72	10	4
气隙 (mm)	56	56	90	90	90
计算有效长度 (mm)	85	105	180	240	500
计算梯度磁场 (T/m)	22.0	25	20	20	20
电参数					
线规 (mm)	7×7/Φ4	7×7/Φ4	10×10/Φ5	10×10/Φ5	10×10/Φ5
每极匝数 (Turns)	32	32	40	40	40
导线基本电阻 (mΩ)	37	40	30	58	85
最大磁场电流 (A)	250	250	400	400	400
最大磁场电压 (V)	9.5	10	12	23	34
最大磁场功率 (kW)	2.5	2.5	4.8	10	14

### 3.2.1.9 磁铁电源系统

磁铁电源系统是超导直线加速器的重要组成部分，向各种超导螺线管及磁铁提供高精度高稳定度励磁电流，以实现束流的聚焦和轨道校正。

磁铁电源主要由功率回路和控制器组成，励磁电源全部采用FPGA与ARM组合的数字控制器硬件平台，根据负载是否为超导磁体，可分为常规磁铁电源和超导磁铁电源两种。

#### (1) 超导磁铁电源

超导磁铁电源向超导磁铁提供高精度的励磁电流，要求额定输出电流达到180A，电流稳定度优于±1E-4/8小时。

超导磁铁电源中的失超保护电路的主要作用是实时检测超导磁铁失超状态、故障状态，并进行能量正确泄放以保护超导磁铁，主要由失超保护电路、失超探测器、失超保护控制模块构成。

## (2) 常规磁铁电源

常温磁铁电源采用“十二相整流电路+2路斩波电路错相并联”方案、冷却方式为水冷。表3-15给出了直线加速器电源参数表。

表 3-15 超导直线加速器电源参数表

名称	电源规格	数量 (台)	单台输出 功率 (kW)	总配电容 量 (kVA)	位置
常温螺线管 (L180) 电源	±400A/20V	3	8	30	低能传输段
常温螺线管校正电源	±30A/5V	6	0.1	0.75	低能传输段
常温二极铁电源	130A/10V	1	1.3	1.625	低能传输段
常温四极透镜 (L80/L100) 电源	±300A/10V	16	3	60	中能传输段
常温四极透镜校正电 源	±20A/5V	32	0.1	4	中能传输段
超导螺线管 (L60) 电 源	±150A/10V	9	1.5	16.875	HWR010 段
超导螺线管校正电源	±50A/5V	18	0.25	5.625	HWR010 段
超导螺线管 (L60) 电 源	±150A/10V	24	1.5	45	HWR019 段
超导螺线管校正电源	±50A/5V	48	0.25	15	HWR019 段
超导螺线管 (L160) 电源	±150A/10V	20	1.5	37.5	Spoke042 段
超导螺线管校正电源	±50A/5V	40	0.25	12.5	Spoke042 段
常温四极透镜 (L180) 电源	±1000A/20V	32	20	800	Ellip062 &Ellip082 段
常温四极透镜 (L180) 校正电源	±20A/10V	64	0.2	16	Ellip062 &Ellip082
常温四极透镜 (L240) 电源	±1000A/20V	10	20	250	Ellip062 &Ellip082

名称	电源规格	数量 (台)	单台输出 功率 (kW)	总配电容 量 (kVA)	位置
常温四极透镜 (L240) 校正电源	±20A/10V	20	0.2	5	Ellip062 &Ellip082
常温四极透镜 (L180) 电源	±1000A/20V	40	20	1000	高能传输段
常温四极透镜 (L180) 校正电源	±20A/10V	30	0.2	7.5	
常温四极透镜 (L500) 电源	±1000A/20V	4	20	100	
常温四极透镜 (L500) 校正电源	±20A/20V	8	0.5	5	
常温二极铁电源	600A/70V	2	42	105	
常温扫描铁电源	215A/2.5V	4	0.6	6	
合计		407		2513.4	

### 3.2.1.10 高频系统

高频系统的功能是为加速结构 (RFQ、SC等) 提供电磁能量以建立高频加速场; 通过反馈机制精确控制加速场的幅度和相位, 使通过加速结构的质子束获得与物理设计相一致的能量和纵向约束。

依据束流动力学设计要求, 高频系统的设计目标为:

- 加速腔中电磁场的幅度和相位稳定度应达到: 幅度稳定度 (RMS): 0.1%; 相位稳定度 (RMS): 0.1°。
- 低电平系统采取前馈和反馈措施, 抑制束流的瞬态 (脉冲) 和稳态 (连续) 负载效应。
- 在设计流强下, 功率源系统能够提供足够的功率, 以维持加速场强, 实现束流增能, 并具有一定的功率裕度, 保证低电平控制系统具有足够的动态调整范围。

高频系统主要由相位基准系统、低电平控制系统 (LLRF)、固态功率源系统、高功率传输和分配系统组成, 高频系统结构框图见图3-13。

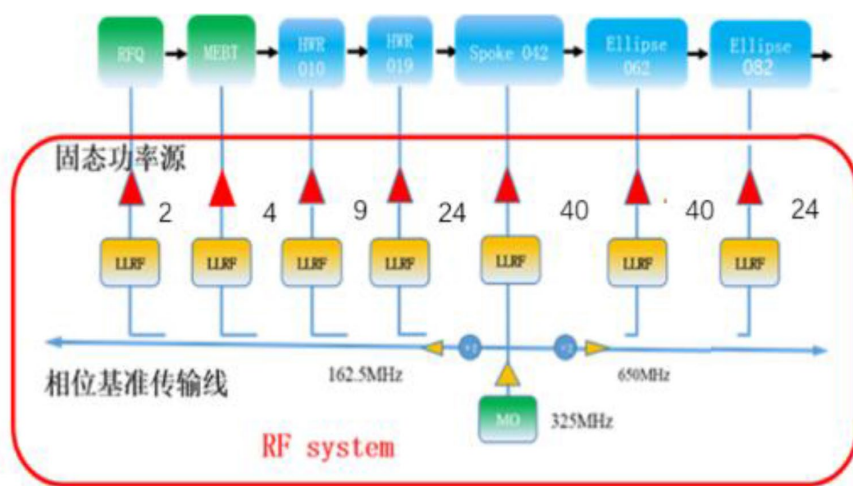


图3-13 高频系统结构框图

- 相位基准系统是高频系统以及整个加速器的同步“时钟”，为各加速单元提供相位精确和稳定同步的频率信号，此外也为加速器测量、控制等系统提供基准或同步触发信号，相位基准系统的信号传输有同轴电缆和光纤两种技术实现手段。相位基准系统布局示意图见图3-14。

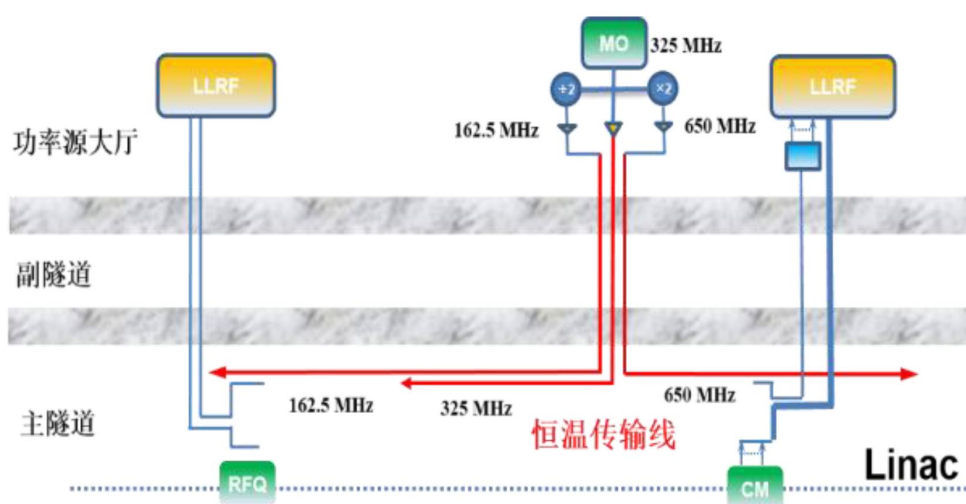


图3-14 相位基准系统布局示意图

- 高频低电平（LLRF）控制系统控制加速腔中电磁场的幅度和相位，主要功能是为射频四极加速腔（RFQ）、聚束腔、超导腔高频功率源提供高品质的高频信号，保证高频腔内的高频加速电场的幅度、相位稳定，同时补偿束流负载效应，最终保证束流稳定性。低电平控制系统的目标是将各个高频功率系统子站的射频功率与相位变化范围控制在预期目标之内，相位参考系统在工作环境温度下的相位变化小于一定范围，保证超导直线加速器所有高频功率系统的稳定，达到稳定束流的目的。低电平控制系统主要包括稳定的相位参考线、射频前端处理器、高速数字化幅度与相位控制系统、腔体频率调谐系

统和高功率射频连锁保护五个部分。

- 固态功率源是加速器的动力系统，射频高功率系统分为功率源和功率传输两部分，功率源为各种常温或超导体提供所需的射频功率，再经功率传输系统送至腔体耦合器用以激励起腔体内电场从而完成加速质子束的任务。
- 高功率传输和分配系统是连接功率源和加速结构的纽带，将功率源输出的高频功率传输至加速器腔体，高功率传输主要有同轴和波导两种方式。

### 3.2.1.11 束流诊断系统

束流诊断系统是超导直线加速器的关键系统之一，其主要包括流强测量、束流位置与相位测量、束流横向剖面测量、束流横向发射度测量、纵向束团形状测量等。束流诊断系统的意义在于准确测量束流横纵向参数，包括流强、能量、位置、相位、横纵向剖面及横纵向发射度，以保障束流能够以稳定的能量与功率进入终端。在中低能段采用拦截式与非拦截式探针相结合方式诊断束流参数；在高中能段以非拦截式探针为主监测束流参数。

- 非拦截式探针主要包括束流位置探测器（BPM）用于束流位置、相位、能量测量；ACCT用于脉冲束平均流强测量，DCCT用于连续束平均流强测量；束流损失探测器（BLM）用于检测束流是否在传输过程中发生损失。
- 拦截式探针主要包括拦截式强流水冷法拉第筒（FC），在MEBT、高能传输段及各个不同能量段超导加速器出口处，除用于流强测量外还兼做束流收集器用，以便于物理调试；单丝（WS）用于束流横向剖面监测；束团纵向测试仪（BSM）用于束团纵向长度测量。横向发射度测量系统（ES）包括拦截式单丝（WS）与拦截式狭缝（SL）；拦截式刮束器（Scrapper）即双狭缝，用于刮去品质不好的束流，且缝宽可调节；在移动束诊平台中还设计一套能散测量系统，采用双狭缝配合法兰第筒探针联合测量中心能量分布，其中双狭缝缝宽可调，用来调节能散测量的分辨率。

表3-16给出了直线加速器束诊元件分布。

表3-16 直线加速器束诊元件分布表

诊断元件参数	低能输运段	中能传输段	HWR 010 段	HWR 019 段	Spoke 042 段	Ellipse 062 段	Ellipse 082 段	高能传输段
ACCT	1	2	/	/	/	/	/	2

DCCT	1	1	/	/	/	/	/	1
束流位置探测器 (BPM)	/	7	9	24	20	10	6	9
狭缝 (Slit)	/	4	/	/	3	3	1	2
刮束器 (Scrapper)	/	6	/	/	/	/	/	/
高功率法拉第筒 (FC)	1	2	/	/	1	1	/	/
纵向束团测量装置 (BSM)	/	1	/	/	1	1	/	1
束晕板 (BH)	/	1	/	/	/	/	/	1
单丝装置 (WS)	/	/	/	/	3	3	/	/
非拦截式剖面探测-剩余气体探测器 (IPM)	/	/	2	4	9	11	3	8
束流损失探测器 (BLM)	/	5	5	20	50	50	30	10
束流收集器 (Dumper)	/	/	/	/	/	/	/	1

### 3.2.1.12 低温恒温器

低温模组 (Cryomodule) 是超导直线加速器的最小加速单元, 加速器超导段由 SC1 段-HWR010、SC2 段-HWR019、SC3 段-Spoke042、SC4 段 Ellip062 及 SC5 段-Ellip082 等共五种结构的 Cryomodule 组成, 主要为各超导腔和超导螺线管等冷质量部件提供超低温 (2K/4K) 环境, 并满足一定的绝热、冷却、压力、震动、磁屏蔽等要求, 使得超导腔能够高效稳定运行。

低温模组由冷质量系统、支撑系统、冷却系统、冷屏等构成, 其中冷质量系统由超导腔、超导螺线管、冷 BPM、束流管道波纹管、端部波纹管、端部方法兰、气动阀门等部件组成。

### 3.2.1.13 加速器真空系统

真空系统是超导直线加速器的重要组成部分, 在真空系统中获得超高真空的主要作用是:

- 减少束流与残余气体碰撞对束流寿命造成的损失;
- 减少束流与残余气体碰撞对束流强度造成的损失;
- 减少超导加速器中低温超导单元漏热。

加速器真空系统按照实际位置可分为五段: (1) 离子源 (ECRIS) 与低能运输



线（LEBT）；（2）射频四极加速器（RFQ）；（3）中能输运线（MEBT）；（4）超导加速单元（SC）；（5）高能传输段。

加速器真空系统按照功能可划分为：真空获得、真空测量、控制及保护、真空室、真空分析和附件。

（1）真空获得，主要通过各种类型真空泵，如涡轮分子泵、无油机械真空泵、低温泵、溅射离子泵。各子系统包括：

- 离子源及低能输运线真空子系统：配置一台2000L/s的涡轮分子泵和一台700L/s的涡轮分子泵作为系统主泵，分子泵泵口安装气动插板阀，前级泵分别选一台10L/s干泵，干泵泵口带电磁阀。
- 射频四极加速器真空子系统：由五个单腔体组成，工作压强小于 $1 \times 10^{-5}$ Pa。采用四台1500L/s的低温泵（泵口带气动插板阀）做为主抽泵，用一台700L/s的涡轮分子泵加10L/s干泵组成的涡轮分子泵机组（分子泵泵口带气动插板阀，干泵泵口带电磁阀）作为粗抽泵。
- 中能传输段真空子系统：真空管用不锈钢加工而成，全长约3900mm，真空室内径基本为40mm，在特殊部位可根据束流的包络和磁铁的内径，采用变口径的真空盒。安装三台100L/s的溅射离子泵作为主抽泵，4#和5#磁体之间及10#和11#磁体之间设计真空泵室，各安装一套700L/s涡轮分子泵加10L/s干泵组成的涡轮分子泵机组（分子泵泵口带气动插板阀，干泵泵口带电磁阀）作预抽泵。
- 超导加速单元真空子系统：加速器超导段由5种类型共31个低温恒温器（HWR0101个、HWR0194个、SPOKE04210个、Ellip06210个、Ellip0826个）组成，每两个低温恒温器中间用一台400L/s的溅射离子泵作为主抽泵，涡轮分子泵（80L/s）加干泵（4L/s）组成的涡轮分子泵机组（分子泵泵口带气动插板阀，干泵泵口带电磁阀）作为预抽泵；同时，恒温器端部法兰安装有一台25L/s的溅射离子泵通过管道与恒温器内部超导腔直接连接，维持超导腔超高真空运行环境。
- 高能传输段真空子系统：高能传输段真空管用不锈钢加工而成，全长约96m，在特殊部位可根据束流的包络和磁铁的内径，采用变口径的真空盒。用溅射离子泵（400L/s）作为主抽泵，涡轮分子泵（700L/s）加干泵（10L/s）组成的涡轮分子泵机组（分子泵泵口带气动插板阀，干泵泵口带电磁阀）作预抽

泵。高能传输段可分为三部分，最后一个恒温器出口为第一部分，全长约8m，主要真空设备有溅射离子泵，涡轮分子泵，干泵，四极质谱计，真空计，束线隔断阀、快阀，4K低温吸附段等；第二部分与第一部分紧密相连，全长约80m，由相同的10个单元组成，主要真空设备有溅射离子泵，涡轮分子泵，干泵，四极质谱计，真空计，束线隔断阀等；第三部分属于加速器末端，与散裂靶入口连接，全长约8m，主要真空设备有溅射离子泵，涡轮分子泵，干泵，四极质谱计，真空计，束线隔断阀，快阀等。

- 低温恒温器夹层真空子系统：采用涡轮分子泵（名义抽速700L/s，泵口带气动插板阀）作为系统主抽泵。两套抽速分别为340L/s的罗茨泵机组作为系统粗抽泵，可同时作为所有低温恒温器夹层真空子系统涡轮分子泵前级泵组，也可单独为其中一台低温恒温器进行粗抽。
- (2) 真空测量：全部使用抗辐射单冷规及单皮拉尼规，且真空规管采用一备一模式，即安装时同一位置安装两个相同型号真空规管；真空计统一放置于真空控制机柜，选用远程测量模式，真空计可实时显示实测真空度，通过数据传输接口可将历史真空度传入控制网络，存至数据库；同时，真空计可输出干接点保护信号，用于加速器切束、切断功率源及关闭真空阀门等。
- (3) 控制及保护系统：真空计真空度数据采集及报警输出，真空阀门开关及位置读取，真空获得设备远程控制，残余气体分析仪（RGA）远程监测，低温冷阱温度测量及设备控制，机器保护系统触发。
- (4) 真空室：束流管线、磁体内部管道、各类真空泵室及恒温器夹层。
- (5) 真空分析：主要包含两个方面：真空检漏及残余气体分析。真空检漏使用氦质谱检漏仪进行；残余气体分析使用四级质谱计（带有电子倍增器），在RFQ段、MEBT段、每个恒温器后各安装一个，高能传输段段每隔10m安装一个。
- (6) 真空附件：是真空系统的重要组成部分，包括有各类真空法兰、波纹管、过渡管等真空耗材，设备及泵室支架，设备用压缩空气、高纯氮气及放气设备。

### 3.2.2 辅助工艺系统

#### 3.2.2.1 配电系统

CiADS场区交流进线为10kV，10kV进线由上级变电站引入厂区各分配电站，按

照用电负荷的分布情况，在场内设置5座分配电站。厂用电供配电系统结构见图3-15。

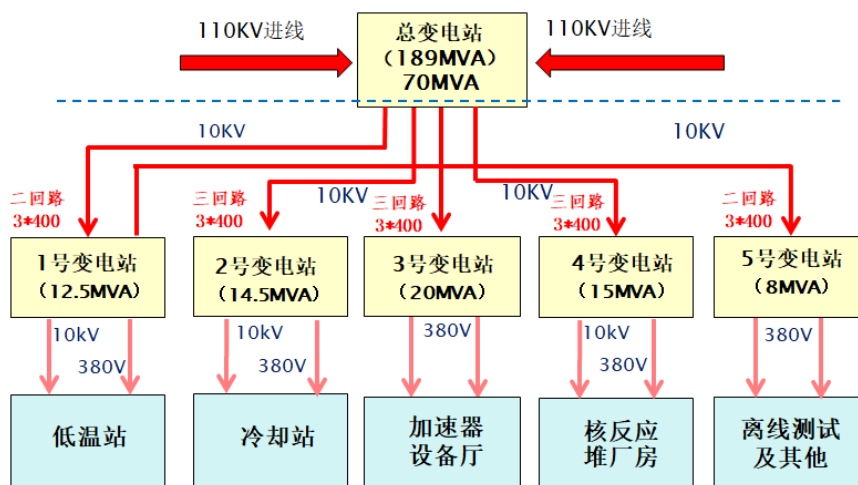


图3-15 全厂用电供配电系统结构图

其中与加速器相关的主要涉及1号、2号和3号变电站，具体如下：

#### (1) 1号变电站

1号变电站设置于低温中心大厅（B08）内，总容量为12500kVA，由两段母线组成，每段母线各提供6250kVA供电容量，主要为低温系统液氦制备装置提供电源供给。液氦制备主设备用电电压等级为10kV，共配置10个出线回路，其中6个回路用于压缩机组，2个变压器回路，用于低温站~220V/380V用电设备的供电，预留2个备用回路。在10kV侧配置无功补偿装置，以保证此段母线的功率因数。

1号变电站内配置2台SCB11-1250kVA/10kV/0.4kV干式变压器，每台变压器低压侧配置低压进线柜、低压馈线柜、低压无功补偿柜及低压谐波补偿柜，用于给低温站内所有~220V/380V用电设备的供电。

#### (2) 2号变电站

2号变电站位于冷却设备大厅（D01）内，总配电容量为14500KVA，由两段母线组成，I段母线为7500kVA，II段母线为7000kVA，母线除了给10kV大功率压缩机组供电外，还提供2路10kV出线做为公用变电站的供电电源，10kV系统共配置10个出线回路，其中6个回路用于10kV用电设备供电，2个变压器回路，用于~220V/380V用电设备的供电，预留2个备用回路。在10kV侧配置无功补偿装置，以保证此段母线的功率因数。

2号变电站配置2台SCB11-1250kVA/10kV/0.4kV干式变压器，每台变压器低压侧配置1台低压进线柜、6台低压开关柜、低压无功补偿及低压谐波补偿柜各1台，同时2

台变压器的低压母线通过1个低压联络柜联络以实现低压系统互为备用的功能。

### (3) 3号变电站

3号变电站位于加速器设备厅（B03）内，总配电容量为20000kVA，由3段母线组成，其中I段母线和III段母线各7500kVA，II段母线为5000kVA，II段母线同时也是I段和III段母线负荷的备供电源，共配置10个出线回路，8个变压器回路，用于380V/220V用电设备的供电，预留2个备用回路。配置8台SCB11-2500kVA/10kV/0.4kV干式变压器。每台变压器低压侧配置低压进线柜、低压馈线柜、低压无功补偿柜和低压谐波补偿柜，同时每2台变压器的低压母线通过1个低压联络柜联络以实现低压系统互为备用的功能。

#### 3.2.2.2 低温系统

超导直线加速器为了获得更多的能量和更高的效率，超导腔体和超导螺线管均采用超流氦进行冷却，为此设计了两套2K超流氦低温系统，一套是加速器低温系统，另一套是测试低温系统。两套低温系统均包括氦制冷机、液氦分配与传输系统、氦气回收净化系统、控制系统、氦气储存系统等分系统。其中氦气存储系统和回收纯化系统共用。

在制冷机中，氦气被冷却和液化，然后通过分配和传输系统将冷量输送到超导直线加速器的低温恒温器中，为低温恒温器中的超导腔和超导磁铁提供运行所需的低温环境。图3-16给出了加速器低温系统示意图。

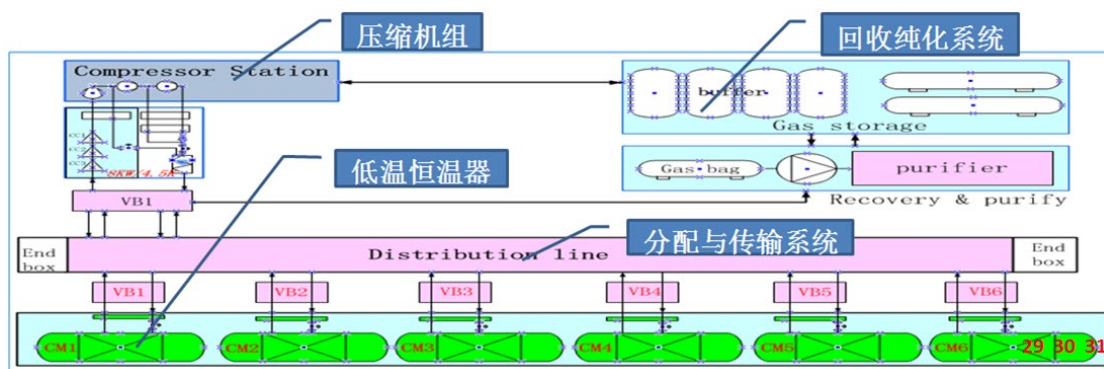


图3-16 加速器低温系统示意图

#### (1) 氦制冷机系统

氦制冷机系统包含两套制冷机系统，一套用于加速器低温系统，包括20kW@4.5K（含4.7kW@2K）氦制冷机、氦气压缩机组、气体管理面板、氦气缓冲罐、液氮储罐、除油器、干燥器、液氮杜瓦、冷压缩机组、控制系统、外置纯化器单元、气体纯度分

析仪、制冷量测试单元等。另一套用于测试低温系统，包括2.5kW@4.5K（含0.5kW@2K）氦制冷机系统，组成部分与加速器制冷机类似。图3-17为氦制冷机系统示意图。

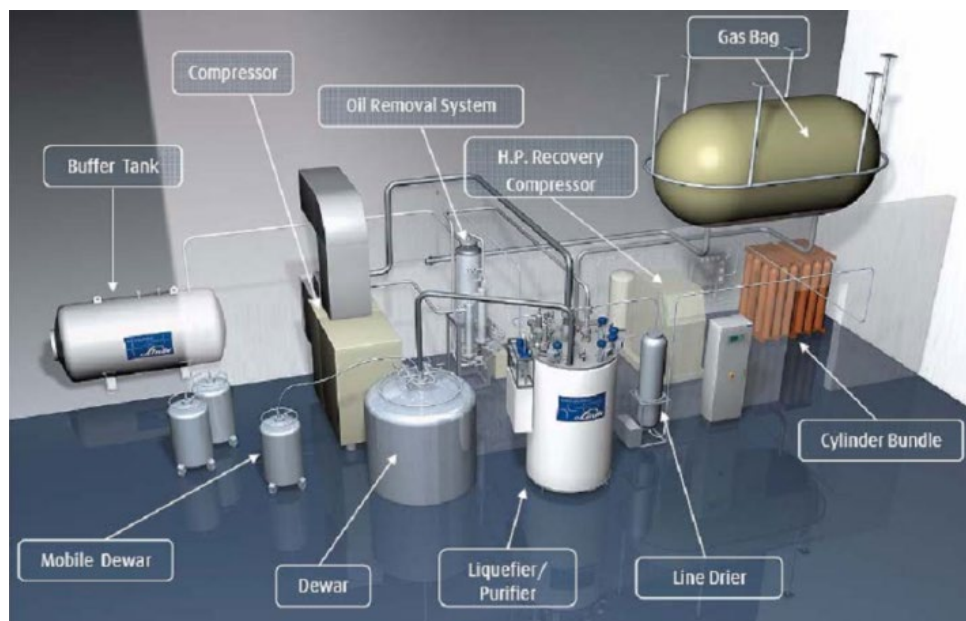


图 3-17 氦制冷机系统示意图

### （2）液氦分配与传输系统

低温传输与分配系统连接制冷机和低温恒温器，将不同温区的低温流体输送到负载端，满足负载端不同温区的工作要求，主要由低温传输管线、低温阀箱、末端箱及常温管线组成。

### （3）氦气回收净化系统

氦气回收纯化系统主要由氦气回收单元和氦气纯化单元两部分组成，包括气囊、气囊保护装置、除尘过滤器、回收压缩机、除油过滤器、高压氦气储存罐、前置油水分离器、吸附式干燥净化装置、5N氦气纯化装置、6N氦气纯化装置、液氮存储装置、自动控制系统和安全保护系统等组成，其工艺流程见图3-18。

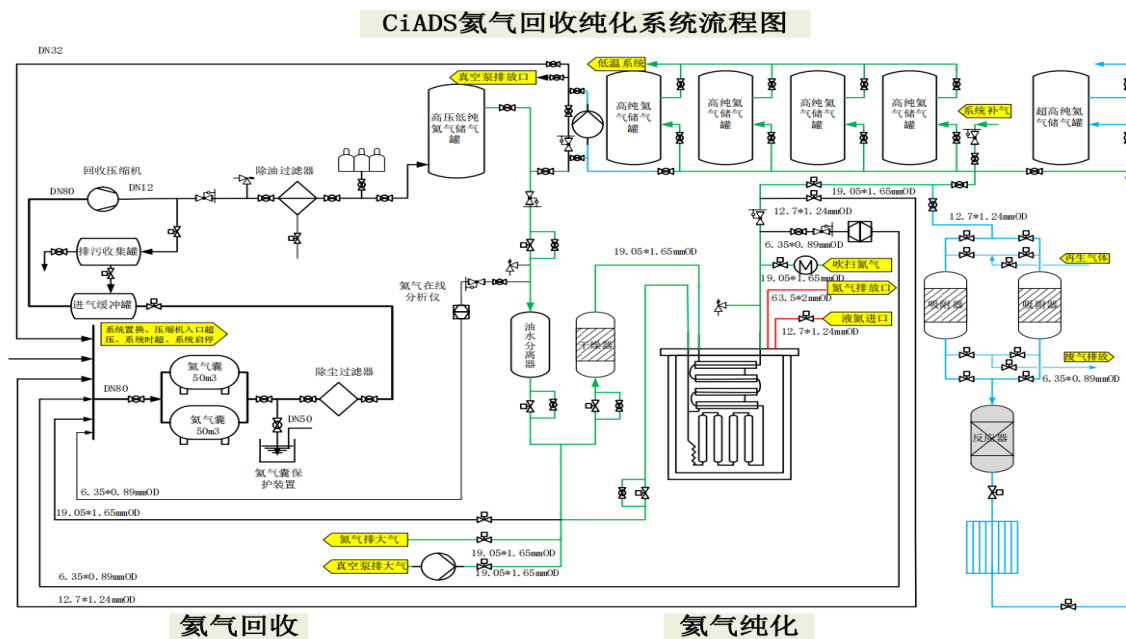


图 3-18 氦气回收、纯化系统流程图

### 3.2.2.3 加速器工艺循环冷却水系统

加速器包含许多电力电子设备，需要消耗大量的电能，这部分能耗最终都将转化为热量。工艺循环冷却水的功能就是吸收和转移这些设备所产生的热量，同时也作为某些温度变化敏感部件的恒温调节手段，以保证设备的长期、可靠、稳定运行。

工艺循环冷却水系统采用双循环冷却方式，即利用低电导率循环水作为传热介质与冷却对象直接接触，组成封闭式内循环回路（简称一次水），带走冷却对象的热功耗，并通过板式换热器将热量传递给外循环冷却水（简称二次水），外循环回路采用冷水机组提供的冷冻水，最终，各冷却对象散发的热量经由冷水机组的冷却水系统的冷却塔，散发于外界大气中。

水冷系统由以下部分组成：一次水（内循环回路）、二次水（外循环冷却水）、补充水系统（自来水、软化水及纯水）、水冷恒温监控系统。

#### (1) 一次水系统

一次水系统为封闭式机械循环回路，由水泵、板式换热器、电加热器及恒温系统、过滤器、旁滤净化装置（离子交换柱）、膨胀水箱、稳压装置、供回水干管和配水管，以及流量、温度、压力、液位、水质等监测仪表、相应的动力设施和控制系统等组成。一次水系统主按照冷却对象的不同工艺要求（温度、压力、材质、水质等）、放射性污染程度及位置分布，设立独立的子系统，采用就近分散与区域集中相结合的方式，

包括加速器隧道一次水泵房、加速器设备厅一次水泵房、低温中心一次水泵房；一次水补水系统在子系统泵房内分别建设，总体布置参见图3-19。

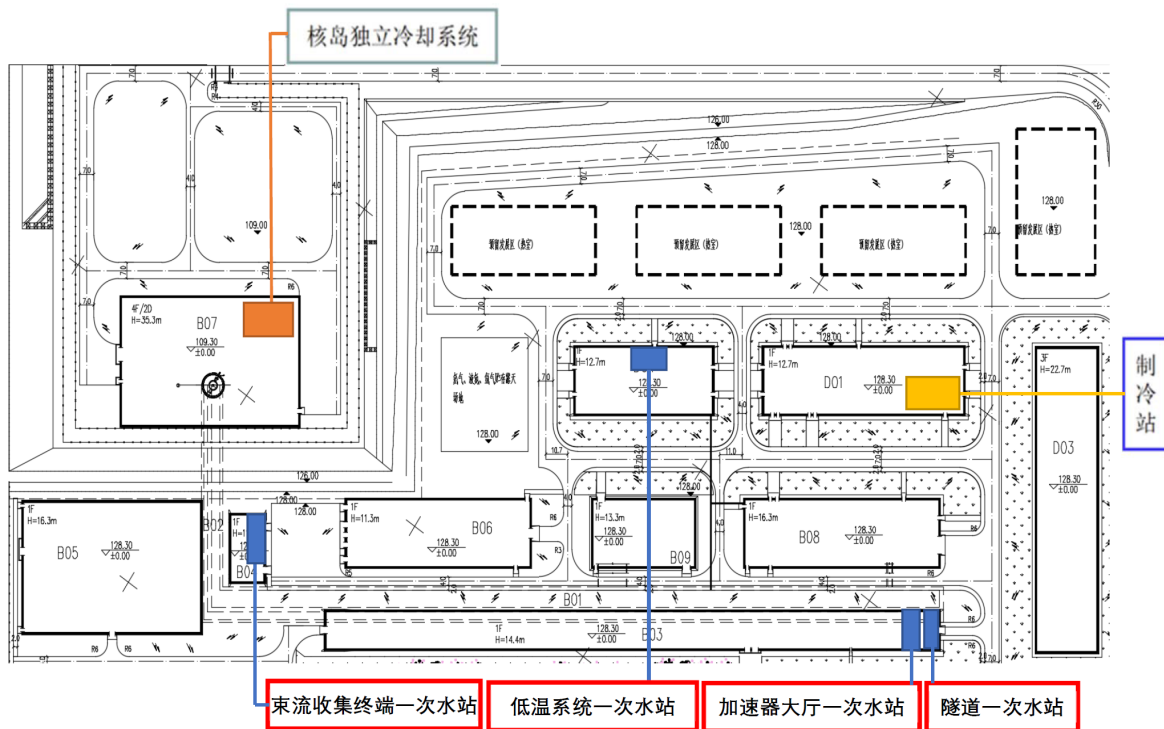


图3-19 一次水冷系统总体布局示意图

### 1) 加速器隧道一次水系统

加速器隧道一次水系统主要功能是为加速器隧道内离子源、LEBT、MEBT磁铁等提供冷却用水。考虑到减小供水半径和压力需求，同时兼顾直线隧道水冷建设总体规划，将整个直线段分为4段独立供水。为了满足工艺对一次水的水质要求，系统在泵后设有旁流离子交换柱、精滤及移动式活性炭吸附等装置；同时设有部分流量脱气单元，脱气单元采用液体脱气膜氮气吹扫、真空抽吸组合模式。系统采用高位氮封膨胀水箱补水。主要设备包括循环水泵、板式热交换器、电加热器、旁流水质处理装置以及膨胀水箱等均布置在直线加速器一次水泵房内（位于加速器设备厅），以利于维护操作。

### 2) 加速器设备厅一次水系统

加速器设备厅一次水系统主要提供用于直线加速器全部功率源及水冷电源等的冷却用水，主要设备包括循环水泵、板式热交换器、电加热器、旁流水质处理装置以及膨胀水箱等均布置在水冷泵房内，以利于维护操作。

工艺流程为：从各冷却设备返回的高温冷却水混合后，经过滤器后由循环水泵加压进入总供水管道，再通过电加热器进行温度补偿调整，供给至各用水设备，以此循

环。为了满足工艺设备对一次水的水质要求，设置水质旁流处理系统，包含离子交换柱、精滤、UV杀菌以及移动式活性炭吸附等装置。系统采用高位膨胀水箱进行补水。每组功率源设置供回水配水器，位于功率源附近。

### 3) 低温中心一次水系统

低温中心一次水系统主要用于冷却氦压缩机及回收压机以及超导实验室调试设备等负载元件，主要设备包括循环水泵、板式热交换器、电加热器、旁流水质处理装置以及膨胀水箱等均布置在水冷泵房内，以利于维护操作。

工艺流程为：根据各氦压缩机用水要求，系统采用独立的冷却系统，从氦压缩机返回返回的高温冷却水混合后，经过滤器后由循环水泵加压进入总供水管道，再通电加热器进行温度补偿调整，供给至氦压缩机及各用水设备，以此循环。为了满足工艺设备对一次水的水质要求，设置水质旁流处理系统，包含离子交换柱、精滤、UV杀菌以及移动式活性炭吸附等装置。系统采用高位膨胀水箱进行补水。

### (2) 二次水系统

二次水系统的功能是为一次冷水系统提供冷源。二次冷水系统的主要设备有：水冷冷水机组、水泵、过滤器、定压补水装置及相应的动力设施和控制系统等。水冷冷水机组采用循环水冷却方式，其主要设备有：冷却塔、循环水泵等。

二次水系统设备集中布置，设于冷却设备大厅（D01）。

### 3.2.2.4 通风空调系统

加速器主副隧道设置了通风空调系统，为隧道提供新鲜空气、过滤净化活化气体，可实现隧道空气净化、除湿、降温、供暖、新风量调节等多种功能。

根据加速器运行模式和辐射人员进入隧道的需求，通风空调系统分为两种运行模式：

#### ■ 循环通风工况

适用于工艺设备正常运行以及加速器停机0.5h内，通风空调系统处于循环状态，并保持隧道处于一定的负压状态，以防止放射活化空气的泄漏，满足隧道内温湿度要求。该工况下，任何人员不得进入主副隧道。

循环通风工况下，主隧道排风换气次数为0.5次/h，排风量8775m<sup>3</sup>/h、不设置送风系统，可维持负压30~50Pa；副隧道排风换气次数为0.5次/h，排风量3981m<sup>3</sup>/h，可维持负压10~20Pa。通风空调系统还能保证隧道内一定的温湿度要求；



■ 过渡通风工况

适用于加速器停机超过0.5h后，放射性气体经适当延时衰减，对各隧道进行大流量通风换气，置换隧道中的空气，使隧道或大厅中有害物浓度达到允许的标准，满足人员进入时的卫生要求。该工况适用于加速器停机检修、换靶等人员进入等情况。

主隧道排风换气次数为3次/h，主隧道排风和送风量均为52650m<sup>3</sup>/h；副隧道排风换气次数为2次/h，副隧道排风和送风量均为15925m<sup>3</sup>/h。通风空调系统使隧道中有害物浓度达到允许的标准，满足人员进入时的卫生要求。

根据上述系统运行工况和相关要求，通风空调系统设置了4套子系统，分别是加速器主隧道循环通风系统、加速器主隧道过渡通风系统和加速器副隧道循环通风系统、加速器副隧道过渡通风系统，系统剖面布置示意图见图3- 20。

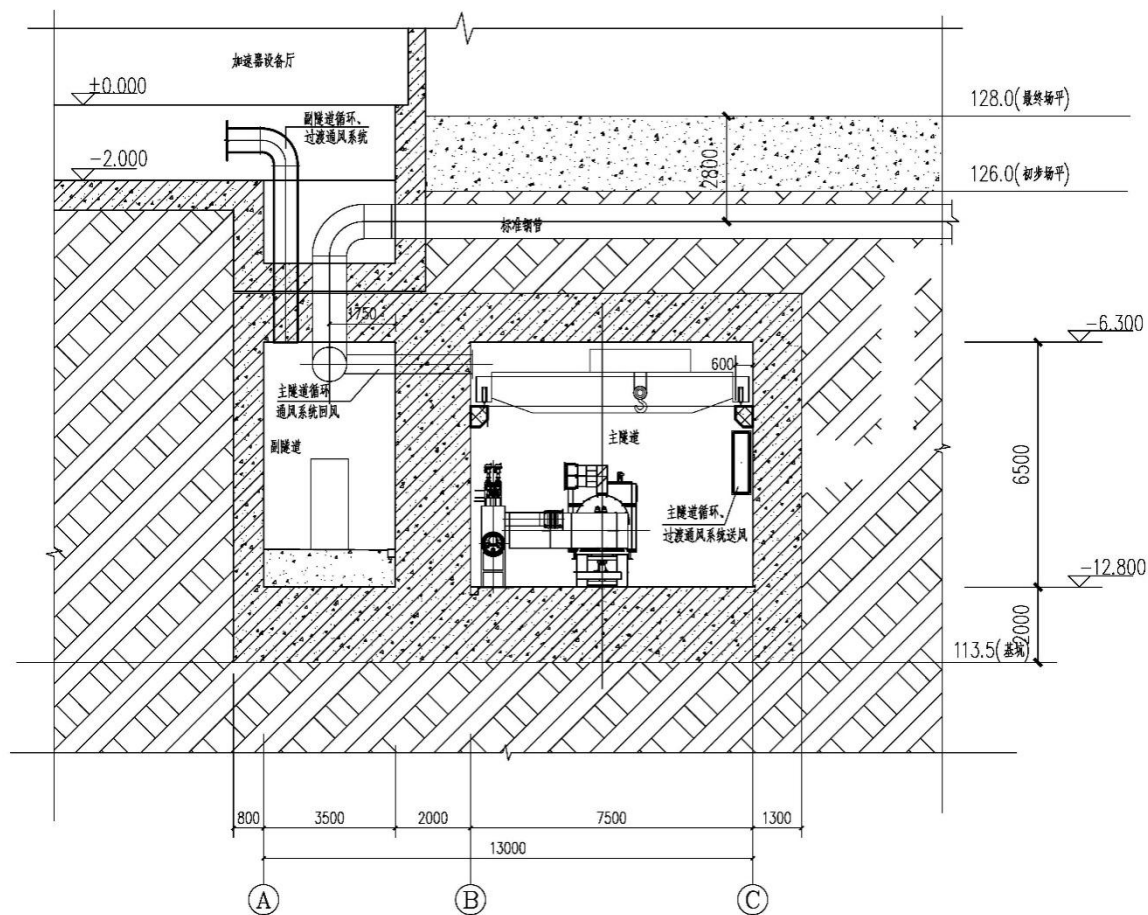


图3- 20 加速器隧道通风系统布置示意图

4套子系统均设有排风系统，副隧道不单独设置排放口，通过混流风机送风至主隧道；主隧道排风净化过滤后汇总至总排放口将废气排入环境中。总排放口位于排风机房内，排放口初步考虑高18m，内径1.3m，高出周围50m范围内最高建筑屋面（B03

建筑高度14.4m) 3m以上。

### (1) 主隧道循环通风系统

主隧道循环通风系统在加速器正常运行模式下运行，包含2台排风机（1用1备）、2台排风净化装置（1用1备）、3台循环通风机组，在循环通风系统运行工况下主要是维持隧道内负压，且排风量较少，补风由副隧道及门、楼梯等对外开口的缝隙通过渗透补入隧道，不单独设置送风系统，系统示意图见图3-21，箭头为气流方向。

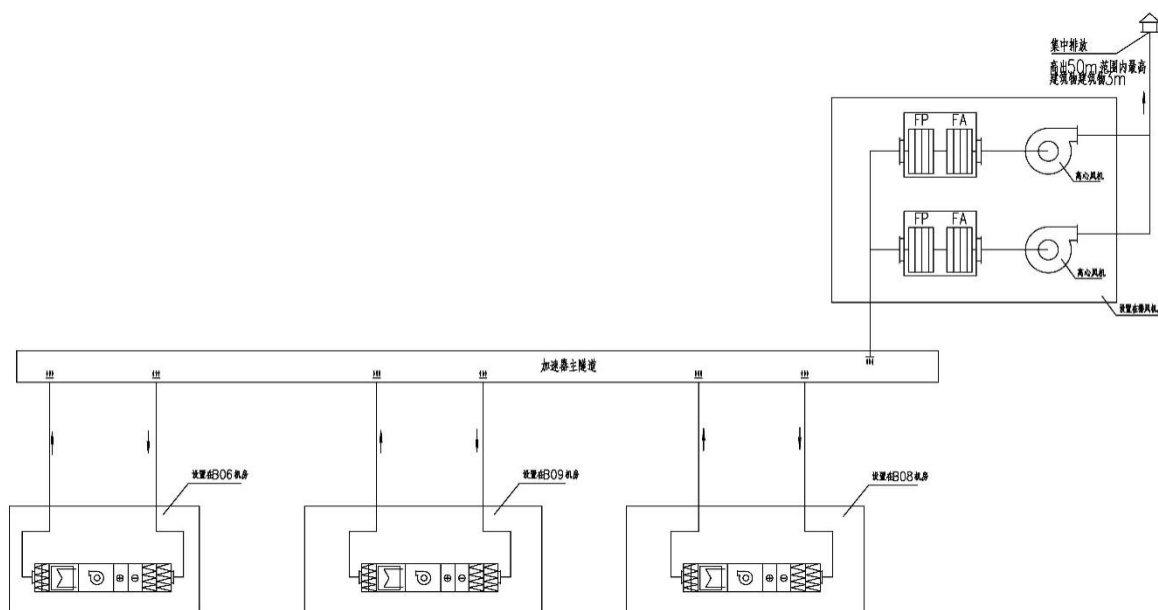


图3-21 加速器主隧道循环通风系统流程图

为保证加速器主隧道在正常运行时隧道内的温湿度要求，分区域设置3台内组合式空调机组进行过滤、降温、除湿处理。

组合式空调机组采用初、中效及高效过滤组合，其过滤效率分别为30%、65%和90%，对应的过滤器为G4级和F7级，其中：初效过滤器，用以过滤粒径 $\geq 5$ 微米的粒子，其过滤效率 $50 > E \geq 20$ ，初阻力 $\leq 50\text{Pa}$ ；中效过滤器，用以过滤粒径 $\geq 1$ 微米的粒子，过滤效率 $70 > E \geq 60$ ，初阻力 $\leq 80\text{Pa}$ ；高效过滤器，用以过滤粒径 $\geq 0.5$ 微米的粒子，过滤效率 $95 > E \geq 70$ ，初阻力 $\leq 100\text{Pa}$ 。

内循环通风处理过程如下：主隧道内空气 $\rightarrow$ 净化过滤 $\rightarrow$ 冷却盘管（冷却除湿） $\rightarrow$ 电加热器 $\rightarrow$ 循环送风机 $\rightarrow$ 送回隧道内。

每台排风机前设置一台排风净化装置，排风净化装置配预过滤器和高效粒子过滤器，预过滤器计重效率为85%，高效空气粒子过滤器效率为99.99%（钠焰法）。

### (2) 主隧道过渡通风系统

主隧道过渡通风系统在加速器过渡模式下运行，包含2台排风机、4台排风净化装置、3台组合式送风空调机组，系统示意图见图3-22，箭头为气流方向；主隧道过渡通风系统主要是在加速器停机时对主隧道进行大风量通风换气，以保证进入隧道人员的安全。

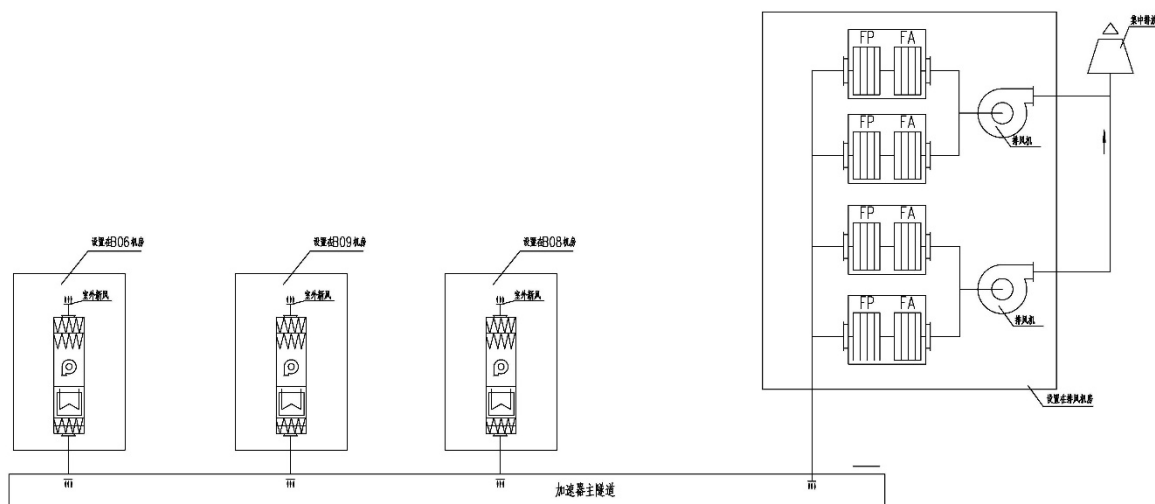


图3-22 加速器主隧道过渡通风系统流程图

由于通风量大，系统运行时上述所有装置设备同时运行。每台排风机前设置两台排风净化装置，排风净化装置的过滤器与主隧道循环通风系统排风净化装置设计相同。

组合式空调机组为主隧道提供新风，新风经过滤后进入隧道内。送风处理过程如下：室外新风→过滤→送风机→送入室内。

### （3）副隧道循环通风系统

为保证加速器副隧道在正常运行时副隧道内的温湿度要求，分区域设置2台内组合式空调机组进行过滤、降温、除湿处理。

组合式空调机组采用初、中效及高效过滤组合，其过滤效率分别为30%、65%和90%，对应的过滤器为G4级和F7级，其中：初效过滤器，用以过滤粒径 $\geq 5$ 微米的粒子，其过滤效率 $50 \geq E \geq 20$ ，初阻力 $\leq 50$ Pa；中效过滤器，用以过滤粒径 $\geq 1$ 微米的粒子，过滤效率 $70 \geq E \geq 60$ ，初阻力 $\leq 80$ Pa；高效过滤器，用以过滤粒径 $\geq 0.5$ 微米的粒子，过滤效率 $95 \geq E \geq 70$ ，初阻力 $\leq 100$ Pa。

内循环通风处理过程如下：副隧道内空气→净化过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热器→循环送风机→送回隧道内。

为维持副隧道负压，在副隧道内设1台混流风机，在循环通风工况下通过混流风

机排风至主隧道，经主隧道排风系统过滤再集中排放。

系统示意图见图3-23，箭头为气流方向：

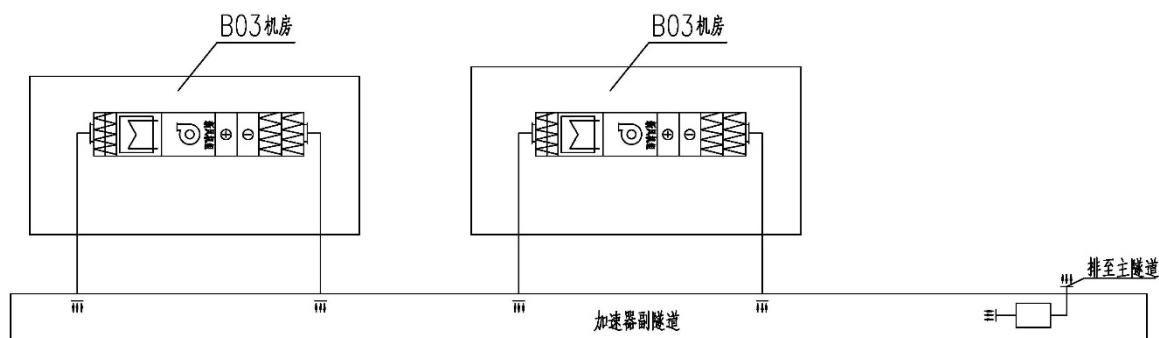


图3-23 加速器副隧道循环通风系统流程图

#### (4) 副隧道过渡通风系统

在副隧道过渡通风工况下，设置2台组合式空调机组为副隧道提供新风，排风经副隧道内设置的混流风机排至主隧道，再由主隧道排风系统过滤集中排放。组合式空调机组为主隧道提供新风，新风经过滤后进入隧道内。送风处理过程如下：室外新风→过滤→送风机→送入室内。

系统示意图见图3-24，箭头为气流方向：

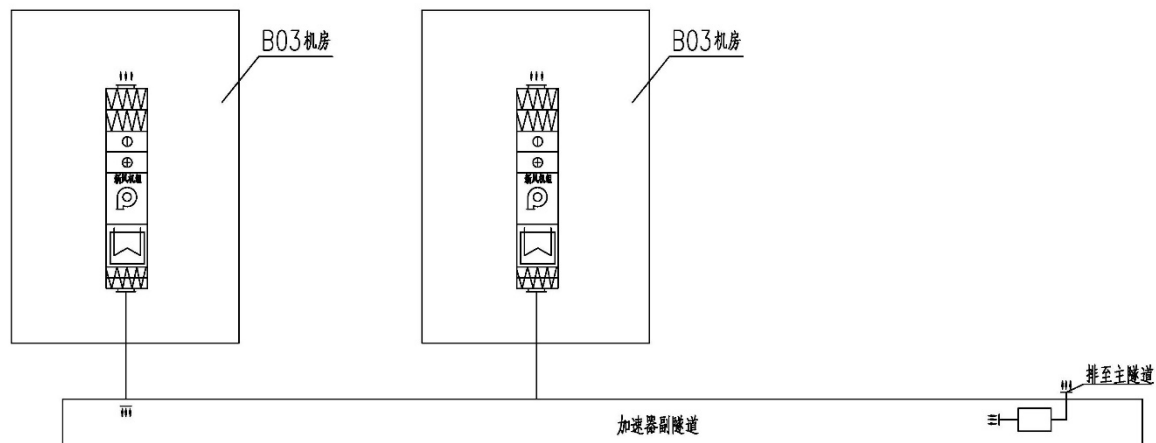


图3-24 加速器副隧道过渡通风系统示意图

### 3.2.2.5 超导腔洁净装配

腔体洁净装配是所有射频超导腔不可或缺的工艺步骤，包括单腔垂直测试装配及恒温器低温质量串装配。为满足加速器超导腔在现场的洁净装配需求，在超导综合测试与维护大厅（B06）设计超导腔洁净装配设施。

超导腔洁净工艺流程包括：超声波清洗、零部件抛光、缓冲化学抛光、电化学抛

光、表面处理、热处理、蒸发镀膜、溅射镀膜等工序。

主要的工艺设施包括：超声波清洗机、超纯水系统、部件清洗机、空气压缩机、废气处理系统、超导腔整腔清洗机、超导腔配酸冷却系统、电化学表面处理系统、卧式真空退火炉、水冷系统、立式扩散炉、腔体内部金属镀膜系统、废液槽、中和池等。

### 3.2.3 工艺流程

结合加速器项目建设和束流调试研究的需求，本项目加速器运行情况主要分为建设调试和正常运行（与CiADS耦合运行）两个大工况。本次评价主要针对调试阶段，对于屏蔽设计等固定设施同时考虑正常运行工况。

#### 3.2.3.1 调试工况

调试工况为本项目实际运行工况，是本项目的重点评价工况，分为三个阶段：

- (1) 第一阶段：主要建设和调试ECRIS、LEBT、RFQ和MEBT。束流能量从20keV加速到2.1MeV。束流调试内容包括硬件标定和束流物理实验，束流参数包络为10Hz，100 $\mu$ s，5mA，束流的最大功率为10W。
- (2) 第二阶段：主要建设和调试超导加速段（SC）的HWR010&019和Spoke042超导加速段。束流能量从2.1MeV加速到171MeV。束流调试内容包括硬件标定和束流物理实验，束流参数包络为10Hz，1ms，5mA，束流的最大功率为250W。
- (3) 第三阶段：主要建设和调试超导加速段（SC）的Ellipse062&082超导加速段和高能传输段（HEBT）。束流能量从171MeV加速到500MeV。束流调试内容包括硬件标定、束流物理实验和加速器的高功率调试验收，束流参数包络为10Hz，1ms，5mA的脉冲束流和平均流强0.05mA和500MeV的连续波束流，束流的最大功率为25kW。

根据上述调试计划，依次进行各阶段的建设和调试，各调试阶段在主隧道相应位置设置束流阻挡装置（法拉第筒、Dumper），本项目将分阶段考虑加速器的辐射影响，同时包含加速器的沿程束流损失以及束流阻挡装置处的集中束流损失。

加速器调试工况下保守考虑每年最大出束时间为90天，辐射工作人员年最大工作时间为2000h。

在加速器出束过程中，工作人员禁止进入控制区，加速器运行产生的次级束会对

经过隧道上方（地面上方）的辐射人员产生直接外照射，释放的含放射性气体会对场内工作人员和场外公众产生照射。加速器停束后，由于隧道内的加速器元器件、设备部件、束流收集器等存在大量的感生放射性核素，可能会超过工作人员工作场所剂量率控制目标（ $2.5\mu\text{Sv/h}$ ），因此需制定辐射防护方案后才能允许人员进入隧道控制区内，保证辐射工作人员年受照剂量不超过 $5\text{mSv/a}$ 。

### 3.2.3.2 正常运行工况

正常运行工况为CiADS项目中后期超导直线加速器与高功率散裂靶以及嬗变堆耦合运行的工况。

根据总体参数要求，在正常运行工况下，超导直线加速器束流功率设计要求为 $2.5\text{MW}$ ，加速器的设计参数为 $500\text{MeV}$ 、 $5\text{mA}$ ，直线段束流损失设计不超过 $1\text{W/m}$ 。正常运行工况下，束流在加速器隧道中加速和传输（沿程损失），最终损失在散裂靶或其它实验终端，不考虑隧道中的集中损失。因此本项目仅考虑在上述最大设计束流的沿程损失下进行辐射屏蔽设计验证，正常运行工况下工作人员、公众的人员受照剂量等将在后续CiADS项目环境影响报告书中进一步展开评价。

## 3.3 污染源项

加速器调试和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“剩余辐射场”。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束流收集器、相关部件、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。

### 3.3.1 瞬发辐射

离子核反应瞬发中子的产额、能谱和角分布与入射粒子种类、能量和流强有密切关系。中子产额与能量都随粒子单核能的提高而单调上升。在单核能相同的情况下，中子产额随入射粒子质量数的增加而上升。在入射粒子相同的情况下，靶材料的原子序数越大，发生核反应的截面越大，中子产额越高。中、高能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，对于重离子而言，其能量可以明显高于入射单核能，这些高能中子是辐射屏蔽的主要对象。

加速器瞬发源项为损失质子打向超导腔等加速器结构材料产生的瞬发次级粒子辐射场，这些次级粒子通过束流管道及恒温器泄漏至加速器隧道。图3-24为500MeV质子束轰击在加速器超导腔后产生的中子、光子能谱。

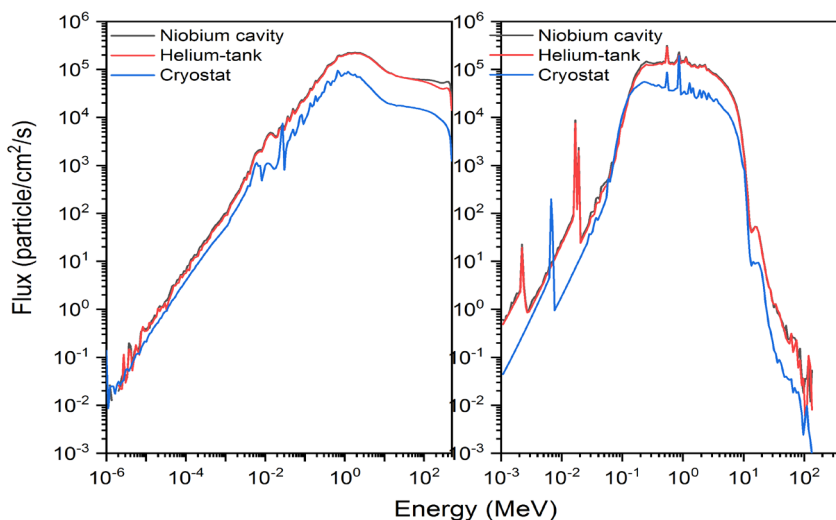


图 3-24 质子与加速器部件作用后的中子（左图）、光子（右图）能谱

从图中可知，瞬发辐射场是以中子和光子为主的辐射场。瞬发辐射决定了加速器隧道的屏蔽参数，在本报告屏蔽防护章节将对不同工况下的瞬发辐射剂量场进行详细的计算和评价。

### 3.3.2 缓发辐射

对于能量较高的加速器，感生放射性常常是工作人员受射线照射的主要原因。对于本项目来说，加速器的缓发源项为在质子加速器运行期间，损失的质子束与结构材料产生的次级辐射（中子及 $\gamma$ 射线）可通过 $(\gamma, n)$ 、 $(p, x\gamma)$ 、 $(n, xp)$ 、 $(p, pn)$ 、热中子俘获、散裂或者碎裂反应，产生大量的放射性核素，使与这些辐射接触的材料变成感生放射性材料。这些放射性核素的活度和半衰期的范围很宽，大多数放射性核素的半衰期非常短，经过一段时间的冷却后，其放射性活度变得很低，但也有个别核素半衰期长达数年，且其毒性较高。因此，计算出这些核素的放射活度水平对防护工作至关重要。

感生放射性的辐射水平主要取决于质子的能量、流强、加速器运行时间、冷却时间以及被照材料的性质等。对于本加速器，容易产生感生放射性核素的材料及物质为加速器结构材料（如铌腔、磁铁、束流管、束流收集器等），周围环境介质（空气、冷却水、混凝土、地下水）等。

### 3.3.2.1 加速器部件感生放射性

本项目加速器调试期间主要由常温段（LEBT、RFQ、MEBT）、超导段（SC）和高能传输段（HEBT）和束流收集器（Dumper）组成，其中常温段最大质子能量为2.1MeV，超导段和高能传输段最大能量为500MeV。超导段主要由多个超导加速腔组成，高能传输段由四极磁铁组成，典型的结构示意图见图3-25。

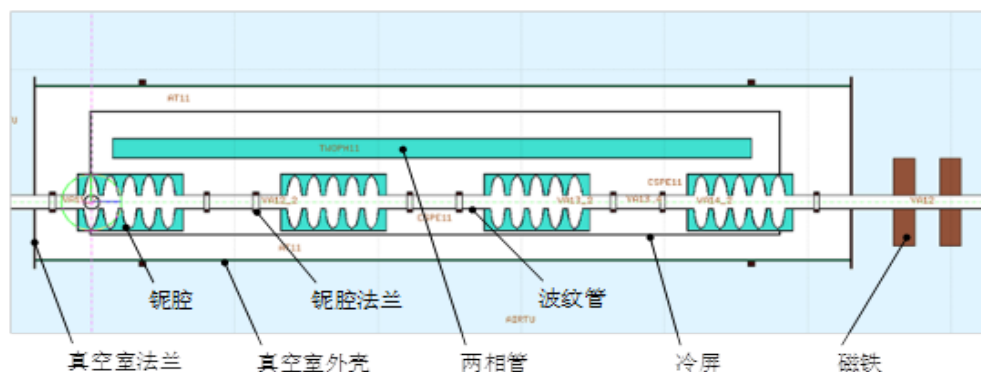


图 3-25 超导加速器主要部件结构示意图

包含的部件主要有真空室法兰、铌腔、真空室外壳、铌腔法兰、两相管、波纹管、冷屏等部件，另外还有用于束流聚焦的四极磁铁、用于固定超导腔的支撑筋、导轨，用于超导电冷的氦槽、液氮等部件。

按照加速器连续运行时间90天（1年的最大运行天数）和运行20年（设计寿期）两种工况对加速器部件活化核素放射性水平进行计算。束流损失工况为能量500MeV、束流损失强度1W/m，即以最大束流损失工况进行保守计算。选择有代表性的波纹管、真空室外壳、真空室法兰、支撑筋、四极磁铁以及液氮等加速器部件进行活化计算。计算结果见表3-17~表3-22。

表 3-17 波纹管活化核素活度浓度（Bq/g）

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Cr-51	27.7025 d	5.19E+04	5.19E+04	5.61E+00



活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
V-48	15.9735 d	2.51E+04	2.51E+04	3.09E-03
V-49	330 d	1.01E+04	1.88E+04	8.74E+03
Mn-54	312.3 d	8.22E+03	1.48E+04	6.58E+03
Co-56	77.27 d	5.57E+03	5.79E+03	2.18E+02
Fe-55	2.73 y	4.87E+03	2.16E+04	1.67E+04
Sc-46	83.79 d	4.44E+03	4.67E+03	2.27E+02
Mn-52	5.591 d	3.66E+03	3.66E+03	0
Co-57	271.79 d	3.32E+03	5.48E+03	2.15E+03
Ar-37	35.04 d	2.75E+03	2.75E+03	2.00E+00
Co-58	70.86 d	2.19E+03	2.26E+03	6.34E+01
P-32	14.262 d	1.16E+03	1.16E+03	2.11E-05
Be-7	53.29 d	1.04E+03	1.05E+03	9.01E+00
Sc-44	3.927 h	8.66E+02	8.66E+02	0
P-33	25.34 d	7.01E+02	7.01E+02	3.18E-02
S-35	87.51 d	6.18E+02	6.55E+02	3.63E+01
Sc-47	3.3492 d	4.60E+02	4.60E+02	0
Ca-45	162.61 d	4.57E+02	5.79E+02	1.21E+02
H-3	12.33 y	3.96E+02	4.88E+03	4.61E+03
Ni-56	5.9 d	2.67E+02	2.67E+02	0
Ni-57	35.6 h	5.71E+01	5.71E+01	0
Na-22	2.6019 y	4.13E+01	1.76E+02	1.35E+02
Fe-59	44.503 d	2.15E+01	2.16E+01	7.33E-02
Sc-48	43.67 h	1.74E+01	1.74E+01	0
Co-60	1925.1 d	1.12E+01	8.46E+01	7.42E+01
Ti-44	63 y	1.09E+01	1.98E+02	1.95E+02
Ca-47	4.536 d	4.93E+00	4.93E+00	0
Ar-39	269 y	2.40E+00	4.69E+01	4.68E+01

表 3-18 真空室外壳活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Fe-55	2.73 y	7.54E+01	3.34E+02	2.59E+02
Cr-51	27.7025 d	2.67E+02	2.67E+02	2.89E-02
Mn-54	312.3 d	1.14E+02	2.05E+02	9.10E+01
V-48	15.9735 d	8.28E+01	8.28E+01	1.02E-05
V-49	330 d	3.85E+01	7.19E+01	3.34E+01

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Mn-52	5.591 d	2.71E+01	2.71E+01	0
Co-56	77.27 d	2.19E+01	2.27E+01	8.57E-01
Sc-46	83.79 d	9.87E+00	1.04E+01	5.05E-01
H-3	12.33 y	7.99E-01	9.85E+00	9.31E+00
Be-7	53.29 d	2.49E+00	2.51E+00	2.16E-02
Ar-37	35.04 d	2.06E+00	2.06E+00	1.50E-03
Sc-44	3.927 h	1.42E+00	1.42E+00	0
Sc-47	3.3492 d	1.04E+00	1.04E+00	0
Ca-45	162.61 d	7.93E-01	1.00E+00	2.11E-01
P-32	14.262 d	6.13E-01	6.13E-01	1.12E-08
S-35	87.51 d	3.98E-01	4.22E-01	2.34E-02
Co-57	271.79 d	2.53E-01	4.17E-01	1.64E-01
P-33	25.34 d	3.79E-01	3.79E-01	1.72E-05
Ti-44	63 y	1.81E-02	3.27E-01	3.23E-01
Fe-59	44.503 d	1.11E-01	1.12E-01	3.80E-04
Co-58	70.86 d	7.28E-02	7.49E-02	2.10E-03
Sc-48	43.67 h	4.46E-02	4.46E-02	0
Ar-39	269 y	2.20E-03	4.29E-02	4.28E-02
Na-22	2.6019 y	5.45E-03	2.32E-02	1.77E-02
Ca-47	4.536 d	7.98E-03	7.98E-03	0
Cr-48	21.56 h	2.22E-03	2.22E-03	0
Co-55	17.53 h	9.91E-04	9.91E-04	0

表 3-19 真空室法兰活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Cr-51	27.7025 d	1.05E+03	1.05E+03	1.14E-01
Fe-55	2.73 y	1.30E+02	5.77E+02	4.47E+02
V-48	15.9735 d	3.88E+02	3.88E+02	4.76E-05
Mn-54	312.3 d	2.01E+02	3.62E+02	1.61E+02
V-49	330 d	1.70E+02	3.17E+02	1.47E+02
Co-58	70.86 d	1.55E+02	1.59E+02	4.47E+00
Co-56	77.27 d	1.29E+02	1.34E+02	5.04E+00
Co-57	271.79 d	7.89E+01	1.30E+02	5.11E+01
Mn-52	5.591 d	7.05E+01	7.05E+01	0

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Sc-46	83.79 d	5.89E+01	6.19E+01	3.01E+00
H-3	12.33 y	3.71E+00	4.58E+01	4.33E+01
Ar-37	35.04 d	1.97E+01	1.97E+01	1.43E-02
Sc-44	3.927 h	9.96E+00	9.96E+00	0
Be-7	53.29 d	7.97E+00	8.04E+00	6.91E-02
P-32	14.262 d	7.12E+00	7.12E+00	1.30E-07
Ca-45	162.61 d	5.37E+00	6.79E+00	1.42E+00
Sc-47	3.3492 d	6.18E+00	6.18E+00	0
Ni-56	5.9 d	4.79E+00	4.79E+00	0
S-35	87.51 d	3.92E+00	4.15E+00	2.31E-01
P-33	25.34 d	4.09E+00	4.09E+00	1.86E-04
Co-60	1925.1 d	4.75E-01	3.58E+00	3.14E+00
Ti-44	63 y	1.25E-01	2.26E+00	2.23E+00
Na-22	2.6019 y	5.25E-01	2.23E+00	1.71E+00
Ni-57	35.6 h	1.02E+00	1.02E+00	0
Fe-59	44.503 d	5.11E-01	5.12E-01	1.74E-03
Ar-39	269 y	1.98E-02	3.86E-01	3.85E-01
Sc-48	43.67 h	2.54E-01	2.54E-01	0
Ca-47	4.536 d	5.42E-02	5.42E-02	0
Cr-48	21.56 h	1.08E-02	1.08E-02	0

表 3-20 支撑筋部件活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Cr-51	27.7025 d	2.25E+02	2.25E+02	2.43E-02
Fe-55	2.73 y	3.80E+01	1.69E+02	1.31E+02
Mn-54	312.3 d	5.90E+01	1.06E+02	4.72E+01
Co-58	70.86 d	7.51E+01	7.73E+01	2.17E+00
V-49	330 d	2.69E+01	5.02E+01	2.33E+01
V-48	15.9735 d	4.92E+01	4.92E+01	6.05E-06
Co-57	271.79 d	2.22E+01	3.66E+01	1.44E+01
Co-56	77.27 d	2.62E+01	2.73E+01	1.03E+00

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Mn-52	5.591 d	1.16E+01	1.16E+01	0
Sc-46	83.79 d	7.88E+00	8.28E+00	4.03E-01
H-3	12.33 y	3.81E-01	4.69E+00	4.44E+00
Co-60	1925.1 d	2.00E-01	1.51E+00	1.32E+00
Ar-37	35.04 d	1.06E+00	1.06E+00	7.69E-04
Sc-47	3.3492 d	9.74E-01	9.74E-01	0
Ca-45	162.61 d	6.86E-01	8.68E-01	1.82E-01
Sc-44	3.927 h	8.24E-01	8.24E-01	0
Ni-56	5.9 d	6.73E-01	6.73E-01	0
P-32	14.262 d	6.68E-01	6.68E-01	0
Be-7	53.29 d	5.60E-01	5.64E-01	4.86E-03
Na-22	2.6019 y	7.19E-02	3.06E-01	2.34E-01
S-35	87.51 d	2.45E-01	2.59E-01	1.44E-02
P-33	25.34 d	2.25E-01	2.25E-01	1.02E-05
Fe-59	44.503 d	2.20E-01	2.21E-01	7.50E-04
Ni-57	35.6 h	1.74E-01	1.74E-01	0
Sc-48	43.67 h	5.02E-02	5.02E-02	0

表 3-21 四极磁铁活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Cr-51	27.7025 d	5.51E+02	5.51E+02	5.95E-02
Mn-54	312.3 d	2.94E+02	5.29E+02	2.35E+02
Fe-55	2.73 y	1.91E+02	8.44E+02	6.55E+02
V-48	15.9735 d	1.49E+02	1.49E+02	1.84E-05
V-49	330 d	7.35E+01	1.37E+02	6.38E+01
Mn-52	5.591 d	5.19E+01	5.19E+01	0
Co-56	77.27 d	2.57E+01	2.67E+01	1.01E+00
Sc-46	83.79 d	2.03E+01	2.13E+01	1.04E+00
Ar-37	35.04 d	4.24E+00	4.25E+00	3.08E-03
Sc-47	3.3492 d	2.30E+00	2.30E+00	0

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Sc-44	3.927 h	2.23E+00	2.23E+00	0
Ca-45	162.61 d	1.83E+00	2.32E+00	4.87E-01
Be-7	53.29 d	1.81E+00	1.82E+00	1.57E-02
H-3	12.33 y	1.52E+00	1.88E+01	1.77E+01
Fe-59	44.503 d	1.30E+00	1.31E+00	4.43E-03
P-32	14.262 d	1.24E+00	1.24E+00	0
S-35	87.51 d	9.81E-01	1.04E+00	5.76E-02
P-33	25.34 d	9.46E-01	9.46E-01	4.30E-05
Co-57	271.79 d	2.64E-01	4.36E-01	1.71E-01
Sc-48	43.67 h	9.87E-02	9.87E-02	0
Co-58	70.86 d	7.72E-02	7.95E-02	2.23E-03
Ti-44	63 y	3.11E-02	5.61E-01	5.55E-01
Ca-47	4.536 d	1.47E-02	1.47E-02	0
Na-22	2.6019 y	8.53E-03	3.63E-02	2.78E-02
Ar-39	269 y	4.40E-03	8.59E-02	8.57E-02
Cr-48	21.56 h	3.66E-03	3.66E-03	0

表 3-22 液氦活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Be-7	53.29 d	4.65E+01	4.69E+01	4.04E-01
H-3	12.33 y	1.12E+02	1.38E+03	1.31E+03

从表中可知：

1) 距离加速器质子束流越近的部件活化越严重（如波纹管），且部分核素活度水平较高，加速器运行 20 年后，其中最高的为波纹管中的 Cr-51，其活化活度为 5.19E+4Bq/g；

2) 加速器部件大部分活化核素半衰期较短，衰变一年后活度浓度降至较低水平，但需关注 Fe-55、Mn-54 等少部分半衰期较长的核素；

3) 用于超导加速器冷却的液氦活化核素为 Be-7 和 H-3，放置衰变 1 年后，Be-7 基本衰变完全，H-3 的活度浓度为 1.31E+03Bq/g。

### 3.3.2.2 冷却水感生放射性

加速器隧道内的冷却水主要用于冷却加速器磁铁，冷却水活化计算时采用与加速

器束流管道平行的水管进行保守计算。按照加速器最大束流损失工况计算（即束流能量 500MeV，束流损失 1W/m），连续照射时间为按照 90 天（每年最大）。

冷却水中感生放射性计算结果见表 3-23，从表中可知，冷却水中的活化核素以 O-15、C-11、N-13、Be-7 等短半衰期核素为主。正常运行期间，冷却水不排放，在检修或其他需要排放冷却水的工况下，冷却水将收集于加速器隧道内的集水坑中，经 1 年的衰减后，活度可降到极低水平，远小于 GB27742-2011 规定的免管浓度值。

表 3-23 冷却水活化核素活度水平（Bq/g）

活化核素	半衰期	运行 1 年后活度 A <sub>1</sub>	衰变 1 年后活度 A <sub>2</sub>	免管活度浓度 A <sub>0</sub>	比值 A <sub>2</sub> /A <sub>0</sub>
O-15	122.24 s	2.25E+03	0	/	/
H-3	12.33 y	1.16E+01	1.10E+01	100	0.11
Be-7	53.29 d	2.94E+02	2.55E+00	10	0.255
C-11	20.39 min	9.91E+02	0	/	/
N-13	9.965 min	1.99E+02	0	/	/

### 3.3.2.3 空气感生放射性

加速器运行期间次级粒子（中子、光子、μ 子等）与加速器隧道内空气分子的直接核反应是空气活化核素的主要来源。空气活化核素一般为短半衰期核素，核素在放射性衰变和空气稀释效应下可快速降低到较低的放射性水平。

空气中活化的放射性核素主要通过热中子俘获、(n, 2n)、(γ, n) 反应和散裂反应而产生。空气活化核素对人体的危害途径主要为空气浸没外照射和吸入内照射。

按照加速器各不同的能量段的最大工况分别计算各段隧道内的空气活化核素活度浓度，计算结果见表 3-24。

加速器运行时采用正常通风系统进行换气，停机后采用过渡通风系统进行换气。考虑到通风换气对活化核素活度的影响后，运行时的排放活度计算见式 3.1，停机通风换气后加速器隧道内的空气活度核素活度浓度计算见式 3.2。

$$A_r = A_{max} \times \lambda_{dec} / \lambda_{eff-r} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$A_s = A_r \times e^{-\lambda_{eff} \cdot t_{col}} \dots \dots \dots (3.2)$$

式中：

$A_r$ —为考虑了通风换气后加速器隧道内的空气活度浓度；

$A_{max}$ —隧道内活化空气的最大活度浓度；

$\lambda_{dec}$ —核素的衰减系数；

$\lambda_{eff-r}$ —运行时核素的有效衰减系数，见式 3.3；

$\lambda_{eff-s}$ —停机后核素的有效衰减系数，见式 3.4；

$t_{col}$ —停机后的通风换气时间。

$$\lambda_{eff-r} = \lambda_{dec} + R_r/V \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\lambda_{eff-s} = \lambda_{dec} + R_s/V \dots\dots\dots (3.4)$$

式中：

$R_r$ —运行时通风率， $m^3/s$ ；

$R_s$ —停机后通风率， $m^3/s$ ；

$V$ —隧道体积， $m^3$ 。

本项目加速器正常运行时隧道内换气频率为 0.5 次/h，加速器停机后换气频率为 3 次/h，换气时间最小为 30min。加速器运行时排放的空气活度浓度和停机换气 30min 后加速器隧道内的活化空气活度浓度见表 3-25。

表 3-24 正常运行工况下主隧道内活化空气放射性水平 (Bq/m<sup>3</sup>)

活化核素	半衰期	不同能量段主隧道活化活度浓度				不同能量段副隧道活化活度浓度				平均活度浓度
		44MeV	171MeV	350MeV	500MeV	44MeV	171MeV	350MeV	500MeV	
		2.61E+03*	3.11E+03*	3.63E+03*	9.02E+03*	1.36E+03*	1.62E+03*	1.89E+03*	4.70E+03*	
Be-7	53.29d	1.55E+02	3.28E+03	6.04E+04	6.52E+04	0	0	0	8.13E+00	4.45E+04
Ar-41	109.3min	3.68E+03	3.79E+02	1.78E+04	1.78E+04	0	0	5.04E+01	7.08E+01	1.29E+04
H-3	12.33y	5.70E+01	5.81E+02	2.27E+03	2.69E+03	0	2.37E-01	6.96E-01	3.57E+00	1.88E+03
Cl-38	37.24min	—	2.13E+02	9.64E+02	9.60E+02	0	0	0	0	6.98E+02
Cl-39	55.6min	1.19E+01	3.17E+02	1.20E+03	1.63E+03	0	0	0	0	1.09E+03
Ar-37	35.04d	1.03E+02	3.79E+02	1.42E+03	1.26E+03	0	0	0	0	9.78E+02
P-32	14.26d	2.351338	2.24E+01	5.59E+02	7.80E+02	0	0	0	0	4.98E+02
P-33	25.34d	2.178061	3.64E+01	4.41E+02	5.19E+02	0	0	0	0	3.48E+02
S-35	87.51d	2.178061	8.13E+01	4.78E+02	4.33E+02	0	0	0	0	3.21E+02
C-14	5730y	5.29E+01	1.77E+02	2.58E+02	2.59E+02	5.85E-02	2.47E-01	7.11E-01	1.06E+00	2.16E+02
Si-31	157.3 min	—	6.73E+00	1.35E+02	2.37E+02	0	0	0	0	1.44E+02

注：\*为对应能量段的隧道体积，单位 m<sup>3</sup>。



表 3-25 正常运行时和停机 30min 后隧道内活化空气活度浓度 (Bq/m<sup>3</sup>)

活化核素	半衰期	正常运行时活度浓度	停机 30min 后活度浓度
Be-7	53.29 d	4.82E+01	1.08E+01
Ar-41	109.34 min	5.56E+03	1.03E+03
H-3	12.33 y	2.41E-02	5.38E-03
C138	37.24min	4.82E+02	6.16E+01
Cl-39	55.6 min	6.55E+02	1.01E+02
Ar-37	35.04 d	1.61E+00	3.59E-01
P-32	14.262 d	2.01E+00	4.48E-01
P-33	25.34 d	7.93E-01	1.77E-01
S-35	87.51 d	2.12E-01	4.73E-02
C-14	5730 y	5.97E-06	1.33E-06
Si-31	157.3 min	4.99E+01	9.75E+00

### 3.3.2.4 屏蔽墙中的感生放射性

按照加速器最大束流损失工况（即束流能量 500MeV、束流损失强度 1W/m）对加速器隧道屏蔽墙的活化进行计算，计算结果见表 3-26。表中给出了加速器连续运行 90 天（1 年的最大运行天数）和运行 20 年后的活化核素活度浓度和衰变 1 年后的活度浓度。

表 3-26 屏蔽墙中活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Na-24	14.959 h	7.95E+00	7.95E+00	0
Si-31	157.3 min	1.01E+00	1.01E+00	0
Ar-37	35.04 d	8.74E-01	8.75E-01	6.40E-04
K-42	12.36 h	6.80E-01	6.80E-01	0
Be-7	53.29 d	4.28E-01	4.32E-01	3.75E-03
F-18	109.77 min	1.67E-01	1.67E-01	0
Ca-45	162.61 d	1.33E-01	1.68E-01	3.55E-02
Na-22	2.6019 y	4.43E-02	1.88E-01	1.44E-01
P-32	14.262 d	3.53E-02	3.53E-02	0
H-3	12.33 y	3.09E-02	3.81E-01	3.60E-01
S-35	87.51 d	1.26E-02	1.34E-02	7.42E-04

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
P-33	25.34 d	1.07E-02	1.07E-02	0
K-43	22.3 h	6.77E-03	6.77E-03	0
Mg-28	20.91 h	3.61E-03	3.61E-03	0
Ca-47	4.536 d	3.49E-03	3.49E-03	0
Ar-41	109.34 min	3.10E-03	3.10E-03	0
Cl-39	55.6 min	4.40E-04	4.40E-04	0
Ar-39	269 y	3.88E-04	7.58E-03	7.56E-03

从表 3-26 可以看出，混凝土屏蔽墙中的活化核素以短半衰期核素为主，半衰期超过 1 年的核素有 Na-22、H-3 和 Ar-39，其中活化活度较大的是 Na-22、H-3，衰变 1 年后的活度浓度分别为 0.144Bq/g 和 0.36Bq/g。

### 3.3.2.5 土壤和岩石中的感生放射性

根据场址地质调查，加速器隧道底部混凝土屏蔽墙下方为岩石，岩石中存在极少量的裂隙水，隧道屏蔽墙外两侧和上位为回填土，加速器隧道周围无地下水。

按照加速器最大束流损失工况（即束流能量 500MeV、束流损失强度 1W/m）对加速器隧道屏蔽墙外的土壤和岩石（计算模型中保守假设裂隙水占 10%）活化进行计算，计算结果见表 3-27 和表 3-28。表中给出了加速器连续运行 90 天（1 年的最大运行天数）和运行 20 年以及衰变一年后土壤和岩石中的活化核素活度浓度。

从表中可以看到，活化核素以短半衰期核素为主，半衰期超过 1 年的核素有 Fe-55、Na-22 和 H-3。衰变一年后，土壤中 Fe-55、Na-22 和 H-3 活度浓度分别为 3.68E-03Bq/g、1.77E-03Bq/g 和 3.47E-03Bq/g，岩石中的活度浓度分别为 4.19E-03Bq/g、4.83E-03Bq/g 和 1.04E-02Bq/g。

由上述分析可知，加速器在整个寿期内对加速器隧道周围的岩石、土壤的活化影响处于可忽略的水平。

表 3-27 隧道周围土壤中活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Mn-56	2.5785 h	1.22E-01	1.22E-01	0
Na-24	14.959 h	9.31E-03	9.31E-03	0
Ar-37	35.04 d	4.76E-03	4.76E-03	3.49E-06
Cr-51	27.7025 d	4.14E-03	4.14E-03	0
Be-7	53.29 d	3.30E-03	3.33E-03	2.89E-05
Mn-54	312.3 d	2.42E-03	4.36E-03	1.94E-03
F-18	109.77 min	2.12E-03	2.12E-03	0
Si-31	157.3 min	1.64E-03	1.64E-03	0
N-13	9.965 min	1.48E-03	1.48E-03	0
K-42	12.36 h	1.29E-03	1.29E-03	0
Fe-55	2.73 y	1.07E-03	4.74E-03	3.68E-03
Mn-52	5.591 d	1.01E-03	1.01E-03	0
V-48	15.9735 d	7.77E-04	7.77E-04	0
Sc-47	3.3492 d	7.76E-04	7.76E-04	0
Na-22	2.6019 y	5.43E-04	2.31E-03	1.77E-03
P-32	14.262 d	5.26E-04	5.26E-04	0
Sc-44	3.927 h	4.96E-04	4.96E-04	0
Sc-46	83.79 d	4.90E-04	5.15E-04	2.52E-05
V-49	330 d	3.48E-04	6.50E-04	3.02E-04
Ti-45	184.8 min	3.07E-04	3.07E-04	0
H-3	12.33 y	2.97E-04	3.67E-03	3.47E-03
Sc-48	43.67 h	2.09E-04	2.09E-04	0
S-35	87.51 d	1.57E-04	1.66E-04	9.20E-06
P-33	25.34 d	1.48E-04	1.48E-04	0
Ca-45	162.61 d	1.44E-04	1.82E-04	3.85E-05
Sc-49	57.2 min	8.10E-05	8.10E-05	0
K-43	22.3 h	8.10E-05	8.10E-05	0
Fe-59	44.503 d	8.03E-05	8.06E-05	0
Mg-28	20.91 h	7.25E-05	7.25E-05	0
Ar-41	109.34 min	6.82E-05	6.82E-05	0

表 3-28 隧道底部屏蔽墙外岩石中活化核素活度浓度 (Bq/g)

活化核素	半衰期	运行 1 年后的活度浓度	运行 20 年后的活度浓度	衰变 1 年后的活度浓度
Na-24	14.959 h	6.53E-02	6.53E-02	0
Ar-37	35.04 d	1.87E-02	1.87E-02	1.37E-05
Mn-56	2.5785 h	1.62E-02	1.62E-02	0
Be-7	53.29 d	1.14E-02	1.15E-02	1.00E-04
K-42	12.36 h	7.45E-03	7.45E-03	0
F-18	109.77 min	5.92E-03	5.92E-03	0
Si-31	157.3 min	5.29E-03	5.29E-03	0
Ca-45	162.61 d	2.09E-03	2.65E-03	5.58E-04
Cr-51	27.7025 d	1.93E-03	1.93E-03	0
Na-22	2.6019 y	1.48E-03	6.30E-03	4.83E-03
P-32	14.262 d	1.33E-03	1.33E-03	0
Fe-55	2.73 y	1.22E-03	5.41E-03	4.19E-03
Mn-54	312.3 d	9.77E-04	1.76E-03	7.83E-04
H-3	12.33 y	8.94E-04	1.10E-02	1.04E-02
Sc-49	57.2 min	7.56E-04	7.56E-04	0
Sc-47	3.3492 d	5.40E-04	5.40E-04	0
S-35	87.51 d	5.40E-04	5.71E-04	3.17E-05
V-48	15.9735 d	4.09E-04	4.09E-04	0
Mn-52	5.591 d	3.98E-04	3.98E-04	0
P-33	25.34 d	3.72E-04	3.72E-04	0
K-43	22.3 h	3.02E-04	3.02E-04	0
Sc-44	3.927 h	2.89E-04	2.89E-04	0
Fe-59	44.503 d	2.85E-04	2.86E-04	0
Sc-46	83.79 d	2.40E-04	2.52E-04	1.23E-05
Ti-45	184.8 min	1.99E-04	1.99E-04	0
V-49	330 d	1.94E-04	3.63E-04	1.69E-04

### 3.3.3 电磁辐射

本项目中电磁辐射主要来自离子源和高频系统，各系统均自带电磁辐射屏蔽设施，可以满足GB8702-2014的电磁环境要求。

### 3.3.4 非放射性源项

#### (1) 噪声

本项目采用的冷却塔为超低噪音冷却塔，冷却塔1m处的等效噪声级≤65dB(A)。

#### (2) 臭氧

加速器输出的直接致电离粒子束流和空气作用会产生臭氧，依据NCRP144号报告，可以采用以下公式估算臭氧的产生量。

$$N(t) = \frac{gI}{\alpha + kI + Q/V} [1 - e^{-(\alpha + kI + Q/V)t}]$$

对长时间照射，t趋于∞，上式变为

$$N = \frac{gI}{\alpha + kI + Q/V}$$

式中，

N为单位体积内产生的臭氧分子数， $m^{-3}$ ；

I为单位体积单位时间在空气中的沉积能量， $eV m^{-3}s^{-1}$ ；

g为单位能量产生的臭氧分子数， $0.074eV^{-1}$ ；

$\alpha$ 为臭氧分子的分解速率， $2.3 \times 10^{-4}s^{-1}$ ；

k为单位能量和单位体积被破坏的臭氧分子数量， $1.4 \times 10^{-16}s^{-1}eV^{-1}$ ；

Q为排气速率， $m^3s^{-1}$ ；

V为室内空气体积， $m^3$ 。

计算结果表明，在最大工况下（即束流能量500MeV，束流损失1W/m），空气中正负电子和光子的能量沉积平均值为 $47.626eV m^{-3}s^{-1}$ ，能量大于2.1MeV的加速器主副隧道体积约为23148 $m^3$ ，加速器运行时排气速率0.5次/h，即 $3.215m^3s^{-1}$ 。则单位体积内产生的臭氧分子数为 $9.55E+3m^{-3}$ ，相当于 $7.62E-16mg/m^3$ ，加速器运行期间产生的臭氧浓度远低于《环境空气质量标准》（GB3095-2012）中的一级标准 $0.16mg/m^3$ ，可以忽

略其对环境的影响。

### (3) 化学试剂

超导腔洁净工艺将使用各类型清洗剂、浓硝酸（65%）、氢氟酸（40%）、磷酸（80%）、浓硫酸（98%）、氢氧化钠等化学品，相应的酸液全部采用市场外购，由生产厂家直接送至厂房配液系统酸液桶内，原则上不储存，特殊情况下少量储存在厂房内危险化学品库。

## 3.4 废弃物

### 3.4.1 废气

放射性废气来源于加速器运行期间粒子与隧道中空气相互作用产生放射性气体。

空气中活化的放射性核素主要通过热中子俘获、 $(n, 2n)$ 、 $(\gamma, n)$ 反应和裂变反应而产生。空气活化核素对人体的危害途径主要为空气浸没外照射和吸入内照射。

加速器运行期间排入大气环境中的放射性核素活度浓度见表3-25。

超导腔洁净处理中，会产生一定量的非放射性废气（主要是 $\text{NO}_x$ 、氟化物和硫酸物），主要来自酸液配置和抛光工艺，经废气收集系统收集、废气处理系统处理后通过排气筒排入大气，参考同类项目的环影响报告表——“中国科学院近代物理研究所超导腔实验室建设项目环境影响报告表”， $\text{NO}_x$ 、氟化物和硫酸物的年排放量为7.40kg/a、1.18kg/a、45.14kg/a，释放速率为0.013kg/h、0.002kg/h、0.080kg/h，排放浓度为5.2mg/m<sup>3</sup>、0.8mg/m<sup>3</sup>、32.2mg/m<sup>3</sup>，无组织废气主要为未有效收集的废气， $\text{NO}_x$ 、HF、硫酸雾的产生量为1.9 kg/a、0.3kg/a、11.9kg/a，无组织废气排放量较小，对周边环境影响较小。

《广东省大气污染物排放限值》（DB44/27-2001）第二时段排放标准规定 $\text{NO}_x$ 、氟化物和硫酸物的排放浓度限值为120mg/m<sup>3</sup>、9.0mg/m<sup>3</sup>、35mg/m<sup>3</sup>，20m排气筒的排放速率限值为1.0kg/h、0.14kg/h、2.2kg/h，无组织排放周界外浓度最高点浓度限值为0.12mg/m<sup>3</sup>、20μg/m<sup>3</sup>、1.2mg/m<sup>3</sup>。

### 3.4.2 废水

加速器调试和运行期间，加速器的磁铁系统、高频系统等诸多设备需进行冷却。设备冷却水在循环过程中会受到照射而活化，加速器设备冷却水采用去离子水，采用

闭式循环，不排放，正常运行情况下泄漏损失量非常少。

超导综合测试与维护大厅在超导腔洁净工作期间会产生部分实验室废水（主要为清洗废水），参考同类项目的环影响报告表——“中国科学院近代物理研究所超导腔实验室建设项目环境影响报告表”，项目运营期生产加工过程中产生的废水主要有：

①超声波清洗废水，用水量为每次约 $1\text{m}^3$ ，每年运行约140次，水量为 $140\text{m}^3/\text{a}$ 。废水产生系数为0.9，废水的产生量为 $126\text{m}^3/\text{a}$ 。

②零部件抛光、缓冲化学抛光、电化学抛光过程产生的清洗废水，该过程水的总用量约为 $0.3\text{m}^3/\text{次}$ ，每年运行约70次，水量为 $21\text{m}^3/\text{a}$ 。废水产生系数为0.8，废水产生量为 $16.8\text{m}^3/\text{a}$ 。

③蒸发镀膜、溅射镀膜、热处理过程产生的冷却水，该过程水的总用量为 $1.2\text{m}^3/\text{d}$ ，循环水量为 $1.0\text{m}^3/\text{d}$ ，该过程无废水产生，系统亏水运行，每次运行前补水，每年运行约70次，水量为 $84\text{m}^3/\text{a}$ 。

④酸性废气处理系统采用碱喷淋法，1个月清洗一次，会产生清洗废水，废水的产生量为 $12.0\text{m}^3/\text{a}$ 。

⑤超纯水系统产生的浓水，用水总量为 $250\text{m}^3/\text{a}$ ，浓水产生量约占总水量的30%，因此，浓水的产生量为 $75\text{m}^3/\text{a}$ 。

产生的废水经处理后满足《污水排入城市下水道水质标准》（GB/T 31962-2015）中的C级标准后排入城市污水管网。其他使用后的废弃化学品通过废液槽收集后纳入废液桶，委托有资质的单位处置。

### 3.4.3 固体废物

#### （1）活化元器件

加速器运行期间产生的放射性固体废物主要包括维修更换的活化部件以及维修所用的面纱、手套等物品。

在辐射区内设置临时的放射性废物暂存间，产生的一部分活化部件具有很高的再利用价值，可经一段冷却时间后可再利用（加速器感生放射性一般半衰期较短），不能再利用的废物申请免于辐射防护管理或纳入整个基地放射性废物统一管理。

#### （2）冷却水过滤滤芯和过滤树脂

内循环水净化系统过滤冷却水时，会产生含放射性核素的水净化树脂（颗粒状滤料）和折叠滤芯等。颗粒状滤料不可重复利用，预计每三年更换一次，体积为 $500\text{L}$ ；

折叠滤芯不重复利用，预计每三年更换一次，体积为50L。因此，所有更换下来的水净化树脂和折叠滤芯，均先存放在临时放射性固体废物间中。经环保监测达到免管标准后按非放射废物处理。

### (3) 空气过滤器

空气过滤器主要对新风进行过滤，减少新风中的微粒，减少加速器对微粒杂质的活化而产生放射性核素。

由于新风经过滤后空气中微粒含量很少，活化后的空气在循环时被过滤器过滤的概率也很小，因此，一般认为空气过滤器不作为放射性废物。

隧道通风系统内循环和排风过滤设施中的过滤滤芯会有一定水平的放射性物质，暂按照放射性固体废物暂存于临时放射性固体废物间。根据系统运行要求和过滤系统的设计，主隧道循环过滤净化装置更换一套滤芯产生的废滤芯约7.2m<sup>3</sup>；主隧道正常运行排风系统更换一次产生废滤芯约1.6m<sup>3</sup>；主隧道过渡运行系统排风系统更换一次产生废滤芯约6.4m<sup>3</sup>；副隧道通风系统更换一次产生废滤芯约1.6m<sup>3</sup>；按照每半年更换一次的频率，每年产生的废滤芯约33.6m<sup>3</sup>。

### (4) 危险废物

参考同类项目的环影响报告表—“中国科学院近代物理研究所超导腔实验室建设项目环境影响报告表”，超导腔洁净工艺中使用的抛光液主要为混合酸类，生产中循环利用数次后，最终废酸液产生量为 12.786t/a，在废酸槽中暂存后，全部装入 25L 化学品储存桶中，集中存放在危废暂存间，委托有资质单位处理；废树脂每 2 年更换一次，其产生量为 25kg/a，全部收集后委托有资质单位处理。

危险固体废物产生及利用情况见表 3- 29。

表 3- 29 固体废物产生及处置情况 （单位： t/a）

序号	固废名称	废物类别	代码	产生量, t	产生工序	形态	主要成分	有害成分	产废周期	污染防治措施
1	桶装废酸液	危险废物	HW34 (900-307-34)	12.786	抛光工序	固态	pH、COD、BOD、氨氮	pH	3 天	委外处置
2	废树脂	危险废物	HW13 (900-015-13)	0.025	超纯水系统	固态	树脂类	树脂类	二年	委外处置



## 第四章 辐射安全与防护

### 4.1 场所布局与屏蔽

#### 4.1.1 场所布局和分区

本次评价的加速器隧道（B01）、加速器设备厅（B03）、超导综合测试与维护大厅（B06）、低温中心大厅（B08）、加速器测试大厅（B09）各构筑物在场内的分布见图3-1。

按照辐射工作场所分区管理要求，对射线装置工作场所进行分区设置和管理，本次建设的加速器及配套设施按辐射水平以及可能受到辐射影响的范围分为控制区和监督区，并采取不同的管理要求：

- 控制区：为需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域，控制边界为构筑物外边界，主要包括：
  - 加速器主隧道、副隧道；
  - 转运通道；
  - 主副隧道四个疏散走廊楼梯间；
  - 两个主隧道室外出入口，西边副隧道室外出入口；
  - 加速器测试大厅B09内转运通道混凝土盖板区域等；
- 监督区：为允许辐射工作人员停留、通常不需要专门的防护手段或安全措施的区域，临近控制区，有实体边界，主要包括：
  - 加速器设备厅B06；
  - 加速器测试大厅B09除转运通道入口外的区域；
  - 加速器设备大厅与B06、B08和B09构筑物之间的区域；
  - 排风机房。

图4-1给出了辐射分区示意图。

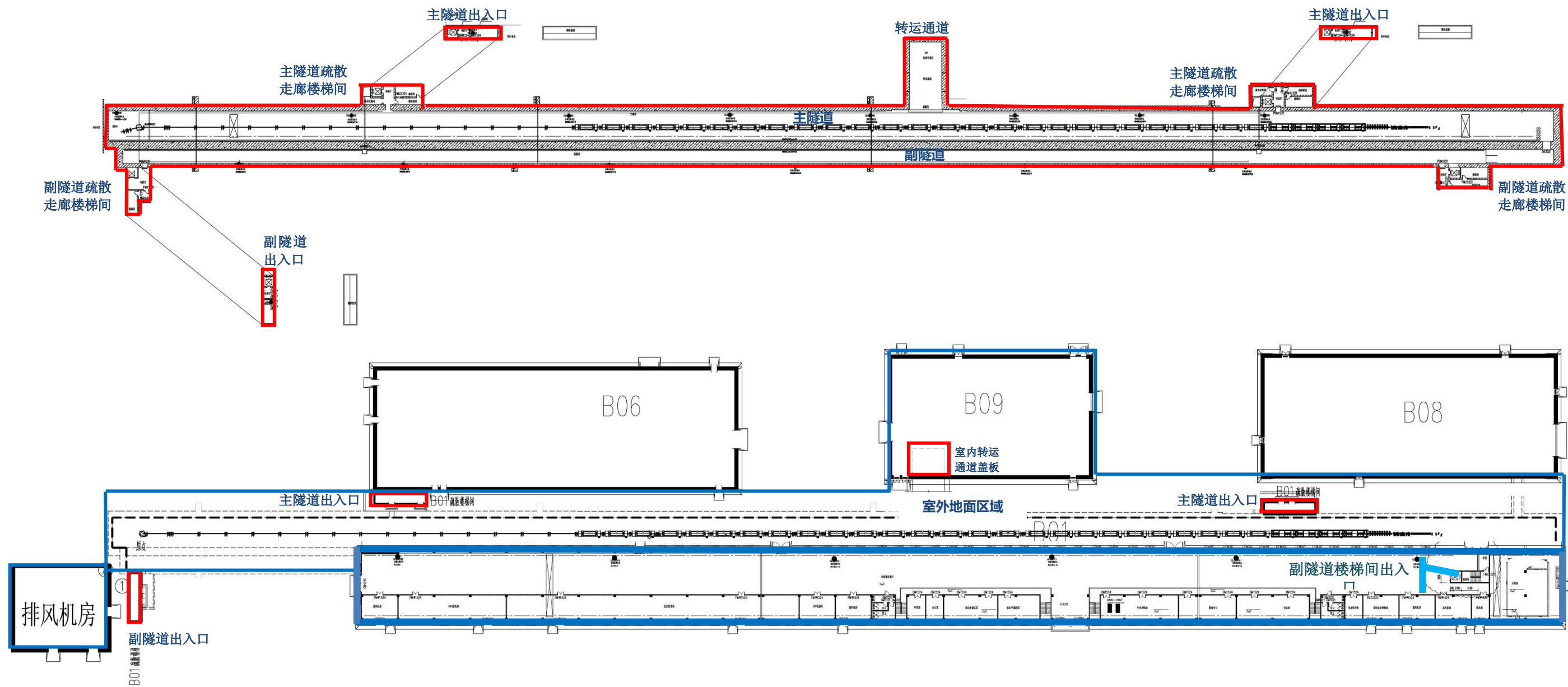


图 4-1 加速器项目辐射分区示意图

(上图为隧道B01，下图主要为加速器隧道上方室外地面区域，左下角为排放机房，其中红色为控制区，蓝色为监督区)

#### 4.1.1.1 加速器隧道 (B01)

加速器隧道分为主、副两个隧道区。主隧道为加速器主装置安装、低温管线布置等通道，副隧道布置电源柜中继站、馈管、电缆等附属装备，要求满足加速器安装、防辐射、运行维护等工艺要求。

加速器隧道为钢筋混凝土抗震墙结构，结构设计使用年限50年。平面轴线尺寸为：长360m、宽13m，地下一层，设20t桥式起重机3台。其中：

- 主隧道截面内尺寸为7.5 m×6.5 m，地下部分深14.5m，隧道地板到地面距离12.8m；
- 副隧道截面内尺寸为3.3 m×5.5 m，地下部分深14.5m，隧道地板到地面距离11.8m；

隧道内所有直通室外的出入口均需按迷宫式设计，共设置4部防烟楼梯间，分别位于隧道两侧，其中两个出入口位于加速器设备厅，两个出入口位于室外。在隧道中部设置设备转运通道，与加速器测试大厅连接，用于加速器相关部件的转运。

#### 4.1.1.2 加速器设备厅 (B03)

加速器设备厅主要用于放置功率源柜、标准电源柜以及电缆、馈管、波导管等。

加速器设备厅为地上1层，框架结构，轴线长298.80m、宽17.00m、建筑高度14.4m（室外地坪至建筑顶），内外墙体均采用200mm厚加气混凝土砌块砌筑。

#### 4.1.1.3 超导综合测试与维护大厅 (B06)

超导综合测试与维护大厅的主要功能是为超导直线加速器提供合格的低温恒温器所需要超导腔、耦合器、调谐器等，并进行所有相关部件的处理、测试和组装，并最终完成超导腔串的组装和测试。

该大厅厂房为地上1层建筑物，框架结构，轴线长度为90.0m、宽度为30.0m，层高10.00m，建筑高度11.3m（室外地坪至女儿墙顶），内外墙体采用200mm和200mm厚加气混凝土砌块砌筑。

超导综合测试与维护大厅主要布置有表面处理间、超纯水化学更衣室、化学处理前装配零部件、化学品储物间、超导晾干区、超净组装区、输助区、超净用

品等储物间、腔体常温测试及射频电子学、腔体等三坐标直间、送风机房、耦合器磁体常温测试、超净间、配电室、男女卫生间等房间。

#### 4.1.1.4 低温中心大厅 (B08)

低温中心大厅主要布置低温系统。

低温中心大厅为地上1层建筑物，框架结构，轴线长度为95.0m、宽度为30.0m，层高15.00m，局部层高6.0m，建筑高度16.3m（室外地坪至女儿墙顶），内外墙体采用250mm和200mm厚加气混凝土砌块砌筑。

低温中心大厅主要布置中心大厅、空压机房、真空低温设备库、控制室、送风机房、办公室、配电室、门厅、男女卫生间等房间。

#### 4.1.1.5 加速器测试大厅 (B09)

加速器测试大厅加主要用于速器设备的装配和测试，为地上1层建筑物，框架结构，轴线长度为50.0m、宽度为30.0m，层高12.00m，建筑高度13.3m（室外地坪至女儿墙顶），内外墙体采用250mm和200mm厚加气混凝土砌块砌筑。

加速器测试大厅主要布置大厅、配电室、设备吊装区等房间。

### 4.1.2 屏蔽防护

加速器屏蔽设计中，设计要求为：地下隧道混凝土屏蔽墙外表面辐射剂量率低于5mSv/h，隧道上方地面辐射剂量率小于2.5 $\mu$ Sv/h。

#### 4.1.2.1 加速器隧道屏蔽墙

##### (1) 屏蔽设计

加速器隧道主体建筑均位于地下，隧道内地面标高-12.8m，场平地面标高0.0m。加速器隧道由平行布置的主、副隧道组成，隧道截面除主隧道右侧屏蔽墙厚度不同外，其余结构相同。主隧道中设置有2个人员出入通道和1个设备转运通道，副隧道中设置有2个人员出入通道。加速器隧道水平剖面图见图4-2，隧道截图见图4-3。

加速器主隧道内宽7.5m、高6.5m，上屏蔽墙厚1.6m，底屏蔽墙厚2.0m，左屏蔽墙（主副隧道隔墙）厚2.0m，右屏蔽墙根据束流能量的不同分别有1.0m、1.3m、1.6m三种厚度。主隧道顶屏蔽墙上方为室外空地，地面距隧道顶屏蔽墙为4.7m厚

的土层。

加速器副隧道内宽3.5m、高6.5m，上屏蔽墙厚1.6m，底屏蔽墙厚2.0m，左屏蔽墙厚0.8m，右屏蔽墙（主副隧道隔墙）厚2.0m。副隧道顶屏蔽墙上方为加速器设备厅（B03）。

加速器主隧道、副隧道详细的屏蔽设计见表4-1～表4-3。

加速器束流管位于加速器主隧道内，与隧道平行布置，距离主隧道地面1.5m，其余位置参数和束流管材质参数见表4-4。

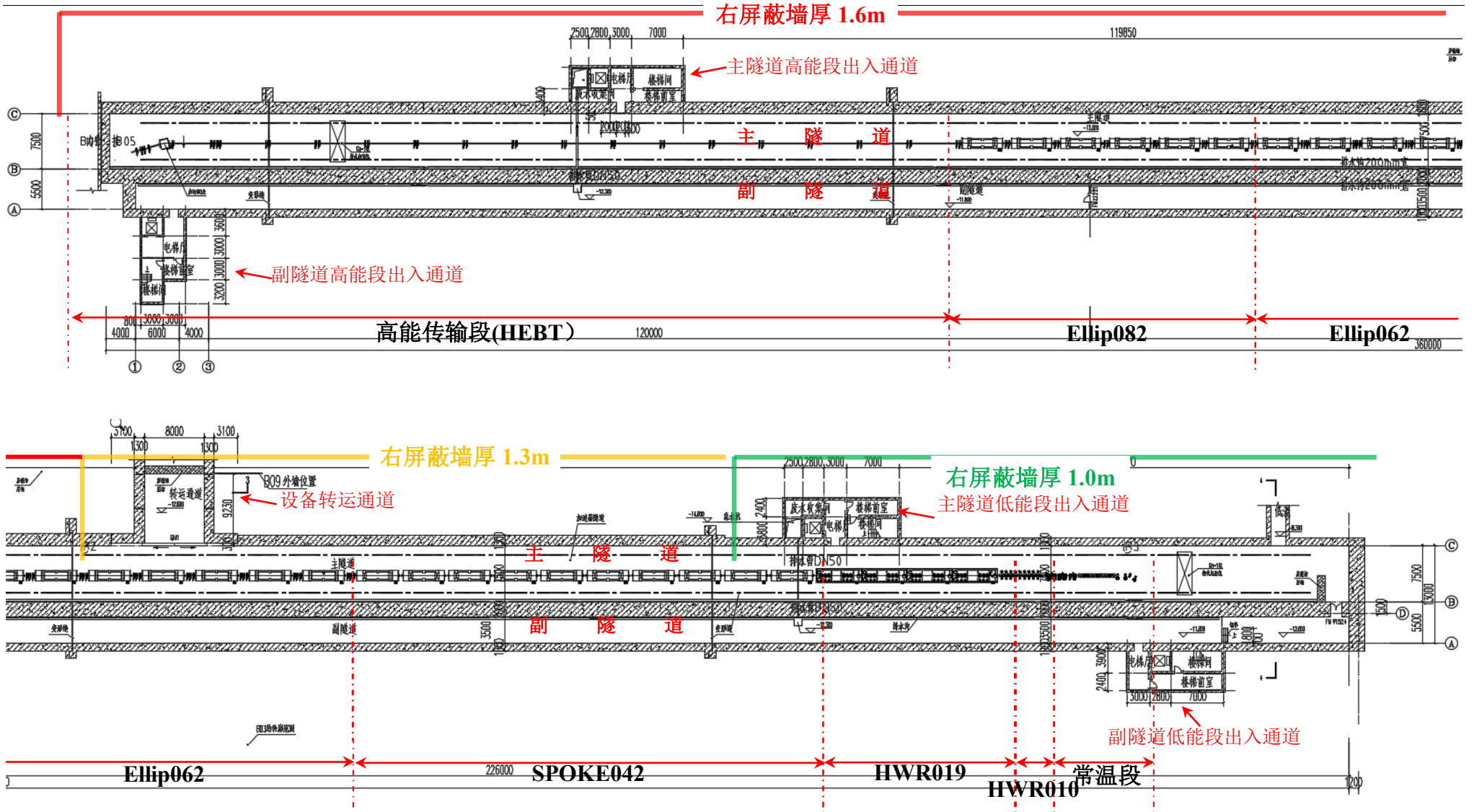


图 4-2 加速器隧道水平剖面示意图

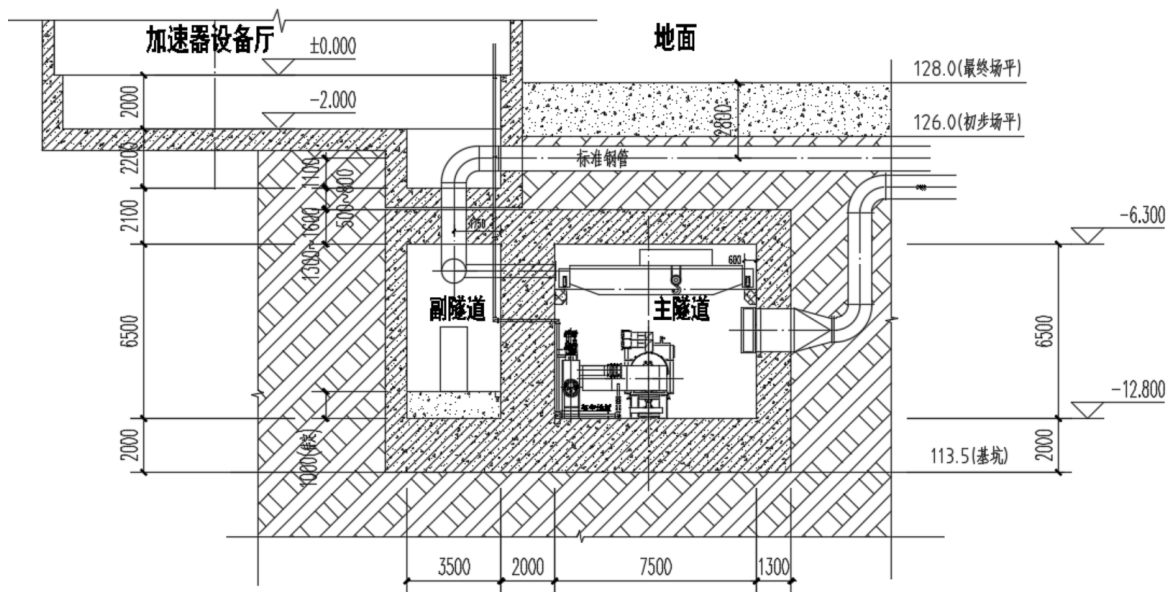


图 4-3 加速器隧道截面图

表 4-1 加速器主隧道屏蔽设计参数

序号	名称	参数	序号	名称	参数
1	左屏蔽墙厚度	200cm	6	隧道内宽度	750cm
2	右屏蔽墙厚度	100~160cm	7	隧道内高度	650cm
3	底屏蔽强度厚度	200cm	8	隧道屏蔽材料	混凝土
4	顶屏蔽墙厚度	160cm	—	—	—
5	顶屏蔽墙距地面高度	470cm	—	—	—

表 4-2 加速器副隧道屏蔽设计参数

序号	名称	参数	序号	名称	参数
1	左屏蔽墙厚度	80cm	5	隧道内宽度	350cm
2	右屏蔽墙厚度	200cm	6	隧道内高度	650cm
3	底屏蔽强度厚度	200cm	7	隧道屏蔽材料	混凝土
4	顶屏蔽墙厚度	160cm	—	—	—

表 4-3 加速器主隧道右侧屏蔽墙设计厚度

序号	加速器段	长度	出口束流最大能量	右侧屏蔽墙厚度
1	常温段	12.8m	2.1MeV	100cm
2	超导加速段 (HWR010)	6.0m	6.8MeV	

序号	加速器段	长度	出口束流最大能量	右侧屏蔽墙厚度
3	超导加速段 (HWR019)	24.4m	44MeV	
4	超导加速段 (Spoke042)	61.0m	171MeV	130cm
5	超导加速段 (Ellip062)	71.0m	350MeV	
6	超导加速段 (Ellip082)	40.3m	500MeV	160cm
7	高能传输段	40.3m	500MeV	

表 4-4 加速器束流管位置和设计参数

序号	名称	数值	序号	名称	数值
1	束流管中心距左墙	350cm	5	束流管壁厚	0.5cm
2	束流管中心距右墙	400cm	6	束流管内径	10cm
3	束流管中心距顶墙	500cm	7	束流管材料	316L 不锈钢
4	束流管中心距底墙	150cm	—	—	—

#### 4.1.2.2 主隧道右侧屏蔽墙厚为 1.0m 的隧道段

隧道右侧屏蔽厚为 1.0m 的隧道段包括低能传输段 (LEBT)、射频四极加速器 (RPQ)、中能传输段 (MEBT)、HWR010 超导加速器段、HWR019 超导加速器段和部分 SPOKER042 超导加速段。其水平剖面图见图 4-9，该隧道段包括两个出入通道，分别布置于主隧道和副隧道。



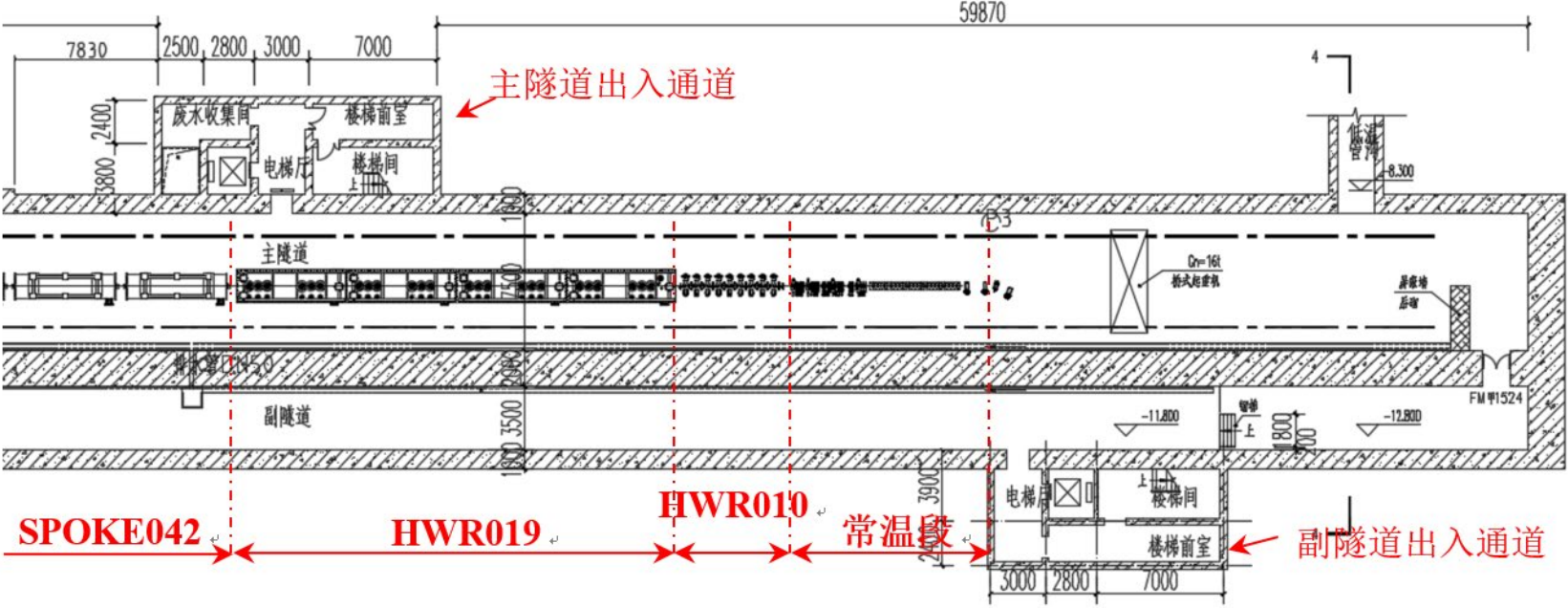


图 4-4 右侧屏蔽墙厚 1.0m 的隧道段水平剖面图

(1) 隧道屏蔽防护和计算结果

在右侧屏蔽墙厚 1.0m 的隧道段，最大束流能量 90MeV，最大束流损失为 1W/m。

在最大工况运行条件下，隧道周围辐射水平见图 4-10，图中左侧计算模型中包含有穿墙馈管、右侧计算模型中包含穿墙通风管道。根据计算结果，在相同工况下，有风管存在时，在 B03 和地面方向的辐射剂量率相对较高。隧道屏蔽墙周围最大辐射剂量率为 140 $\mu$ Sv/h（为主隧道右侧屏蔽墙外）；地面辐射剂量率远低于 0.01 $\mu$ Sv/h；副隧道顶部加速器设备厅（B03）内最高辐射剂量率低于 0.1 $\mu$ Sv/h（位于排风管正上方 B03 内）。均满足地下屏蔽墙外小于 5mSv/h，地面小于 2.5 $\mu$ Sv/h 的屏蔽设计要求。

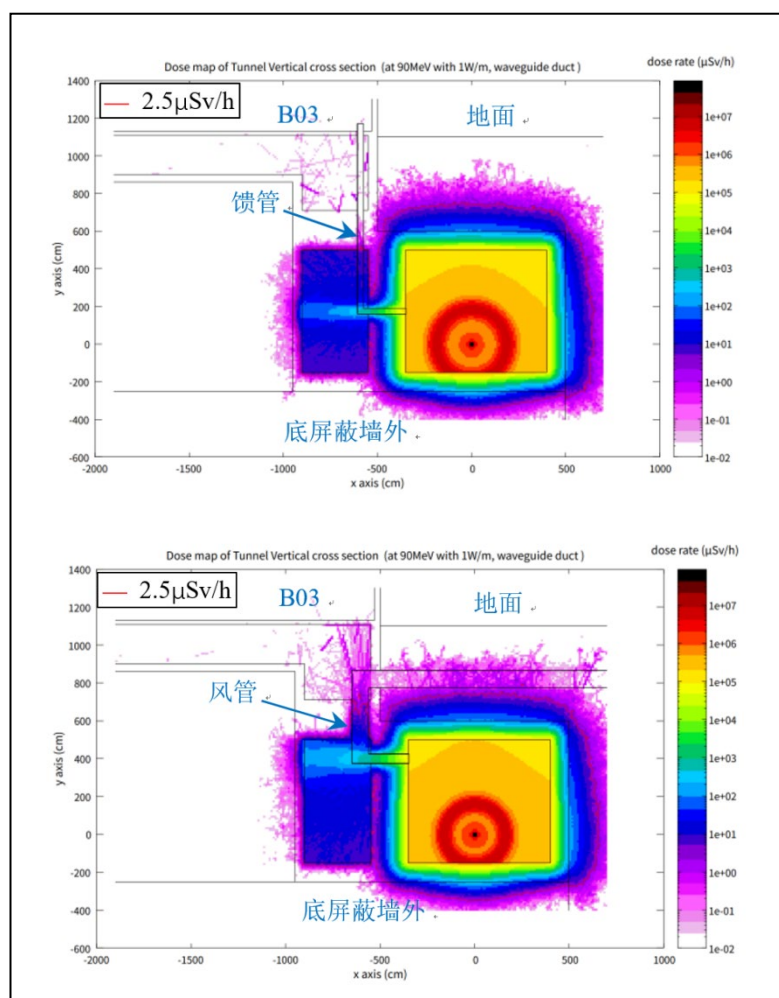


图 4-5 隧道周围辐射水平（上图含馈管管道、下图含风管管道）

(2) 出入通道屏蔽防护和计算结果

加速器主隧道低能段出入通道位于 HWR019 超导段与 SPOKE042 超导段之间，所在隧道段最大束流能量为 72MeV，最大束流损失为 1W/m。

出入通道水平剖面图见图 4- 6。该人员出入通道设计为从主隧道通过宽 1.2m、高 6.5m（与主隧道高度相同）的疏散走廊进入楼梯间和电梯间，电梯间、楼梯间直通地面后通过侧门到达地面，地面出口平面图见图 4- 7。

在最大束流损失工况下，出入通道周围辐射水平见图 4- 6、图 4- 7。根据计算结果，出入通道屏蔽墙外最大辐射剂量率为 40 $\mu$ Sv/h（为地下电梯厅北墙外）；电梯厅地面出口处最大辐射剂量率为 0.03 $\mu$ Sv/h，楼梯间地面出口处最大辐射剂量率为 0.11 $\mu$ Sv/h。满足地下屏蔽墙外小于 5mSv/h，地面小于 2.5 $\mu$ Sv/h 的屏蔽设计要求。

副隧道出入通道位于无束流损失的加速器起始隧道段，副隧道出入通道处的场所辐射水平显然要远小于主隧道出入通道，不再进行单独计算。

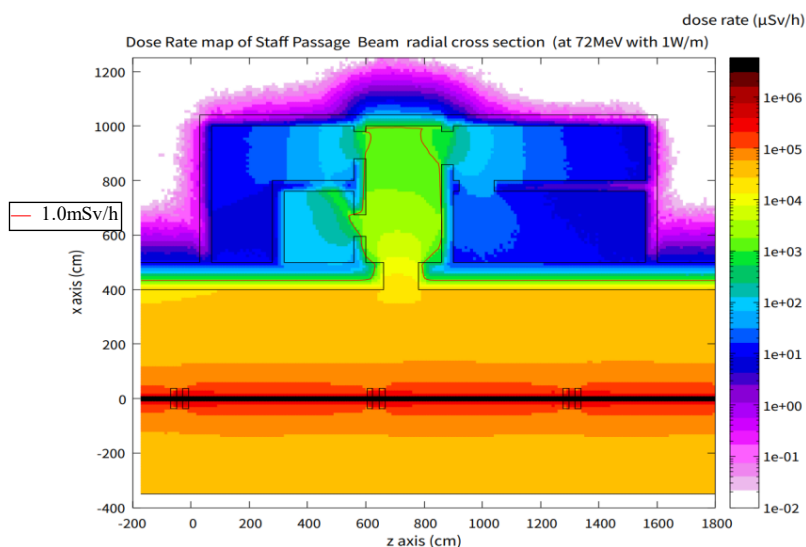
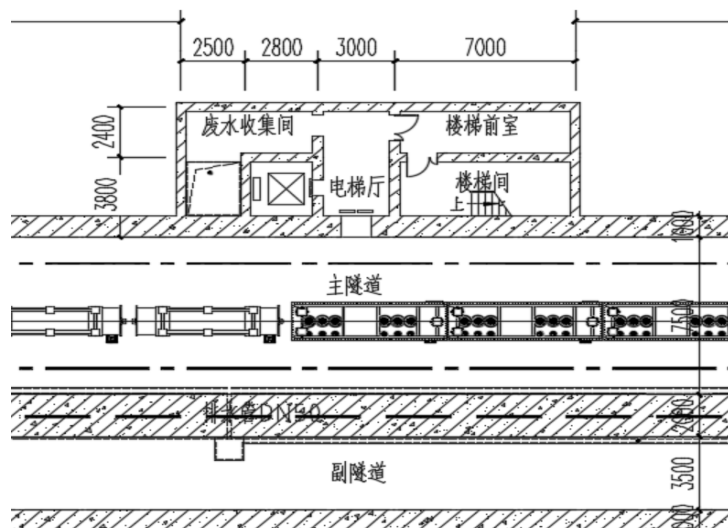


图 4-6 出入通道隧道内周围辐射水平

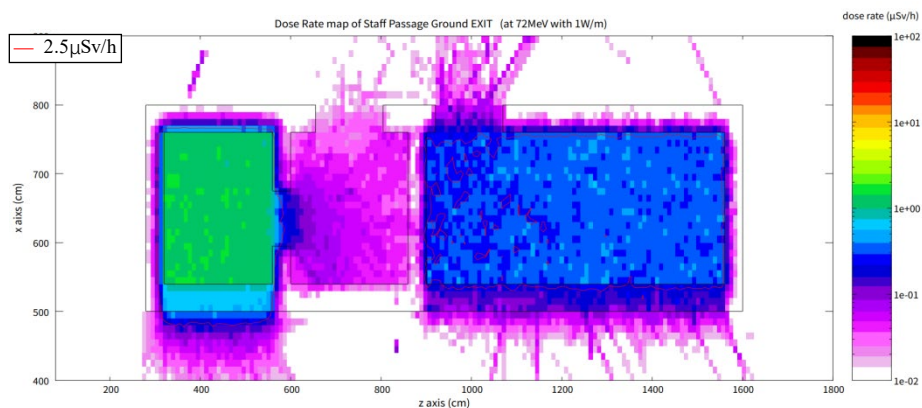
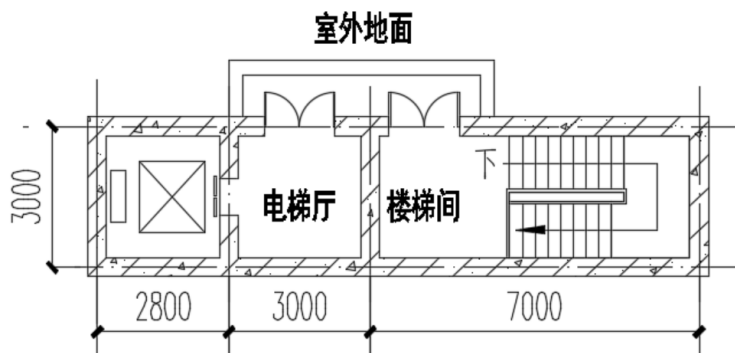


图 4-7 出入通道地面辐射剂量率分布图

#### 4.1.2.3 主隧道右侧屏蔽墙厚为 1.3m 的隧道段

加速器隧道右侧屏蔽墙厚为 1.3m 的隧道段包含 Spoke042 超导段和部分 Ellip062 超导段。该隧道段设置有一个设备转运通道，隧道水平剖面图见图 4-8。

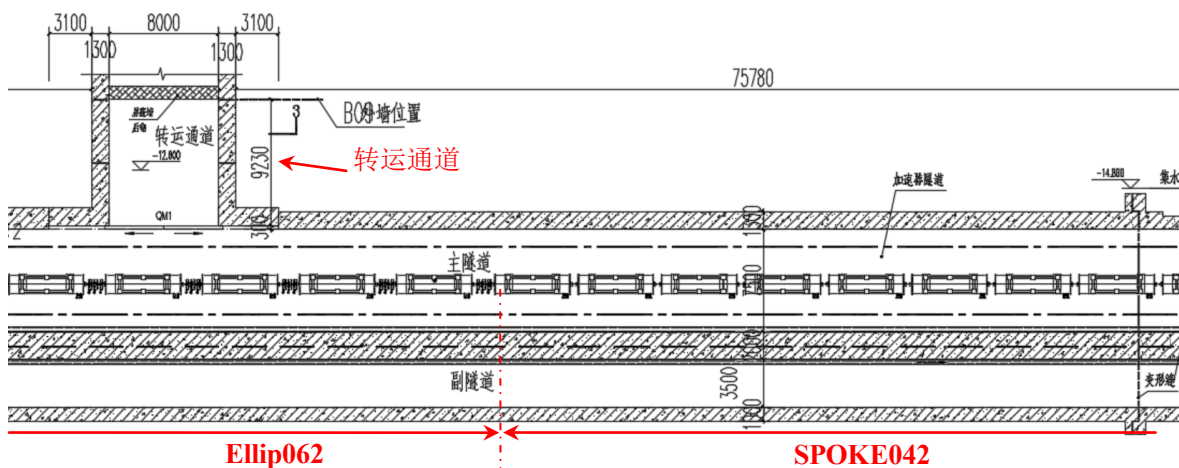


图 4-8 主隧道右侧屏蔽墙厚为 1.3m 的隧道段水平剖面图

(1) 隧道屏蔽防护和计算结果

— 调试阶段最大工况

项目第一阶段最大调式能量为 2.1MeV，最大束流损失为 10W；第二阶段最大调式能量为 171MeV，最大束流损失为 250W。第一、二阶段调试时，束流收集器（束流收集器为法拉第筒）均位于 Spoke042 超导段，其结构示意图见图 4-9。以第二阶段的束流损失最大工况（束流能量 171MeV、束流损失 250W、损失方式为集中损失）对该区域加速器隧道的屏蔽设计进行计算，计算结果见图 4-10。

由计算结果可知，在第一、二调试阶段，主隧道顶部地面最大辐射剂量率为 0.53 $\mu$ Sv/h，加速器设备大厅（副隧道上方）地面最大辐射剂量率为 0.32 $\mu$ Sv/h，主隧道底屏蔽墙外最大辐射剂量率为 77 $\mu$ Sv/h，主隧道右侧屏蔽墙外最大辐射剂量率为 645 $\mu$ Sv/h，副隧道左侧墙外最大辐射剂量率为 9 $\mu$ Sv/h。满足地下隧道外表面低于 5mSv/h，地面小于 2.5 $\mu$ Sv/h 屏蔽设计要求。

— 运行阶段最大工况

加速器隧道右侧屏蔽墙厚为 1.3m 的隧道段，运行条件下束流能量最大可达 350MeV，最大束流损失为 1W/m。在该运行工况下，隧道周围辐射水平见图 4-11。

由计算结果可知，主隧道上方地面最大辐射剂量率为 0.52 $\mu$ Sv/h，副隧道上方加速器设备厅内最大辐射剂量率为 0.77 $\mu$ Sv/h；地下隧道屏蔽墙外最大辐射剂量率为 1303 $\mu$ Sv/h(主隧道底侧屏蔽墙外)。满足地下屏蔽墙外小于 5mSv/h，地面小于 2.5 $\mu$ Sv/h 的屏蔽设计要求。

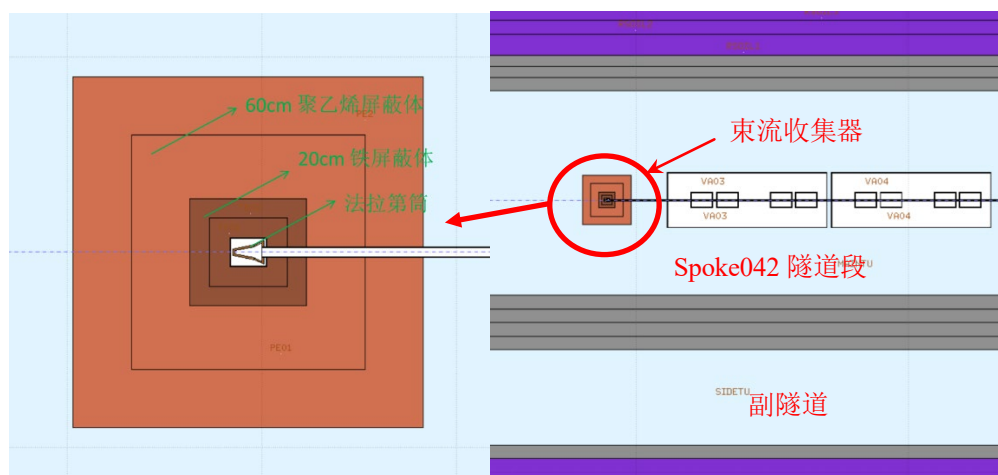


图 4-9 第一、二调试阶段使用的束流收集器（法拉第筒）及局部屏蔽结构示意图

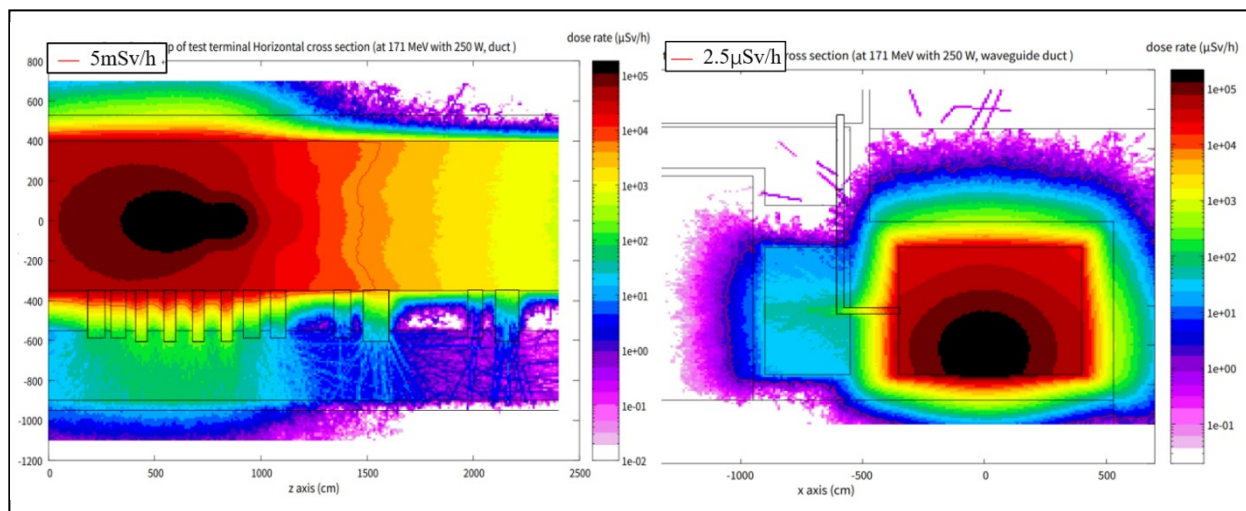


图 4-10 束流收集器周围辐射水平分布图

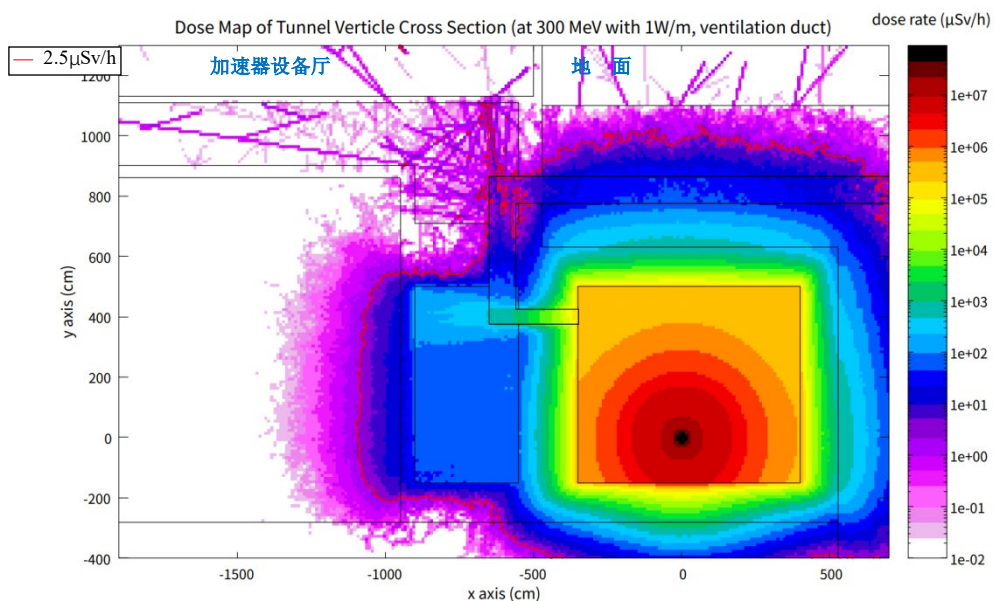
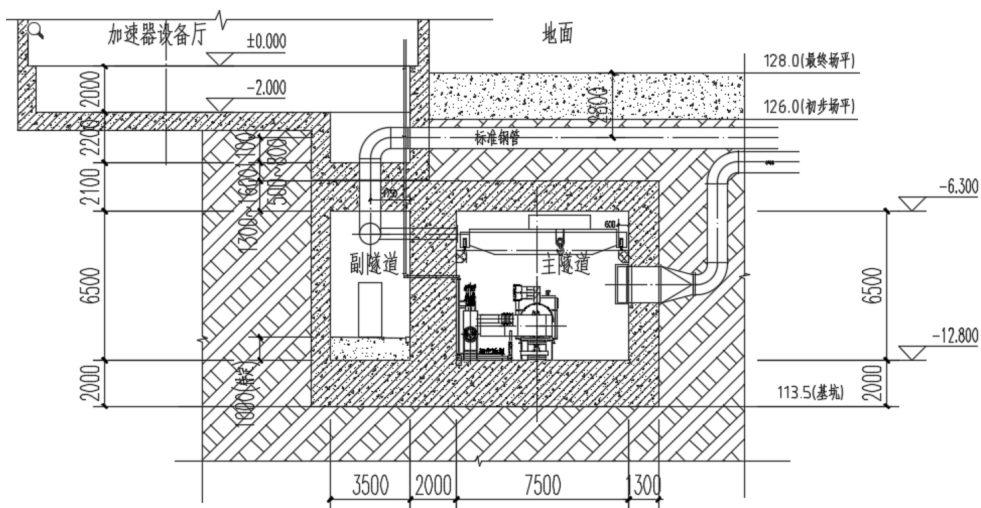


图 4-11 主隧道右侧屏蔽墙厚为 1.3m 的隧道段屏蔽设计和周围辐射水平

(2) 转运通道

主隧道右侧屏蔽墙厚度为 1.3m 的隧道段设置有 1 个设备转运通道, 位于 Ellip062 超导段主隧道, 转运通道水平剖面图 4- 12。该转运通道设计为从主隧道通过宽 8m、长约 10.3m、高 4.0m 的转运廊道进入宽 8.0m、长 7.5m 的设备吊装区, 设备吊装区向上直通加速器测试大厅地面, 垂直吊装高度为 12.3m, 在加速器测试大厅地面入口处设置有厚 40cm 的水泥盖板。

转运通道所在位置束流最大能量为 280MeV, 最大束流损失为 1W/m。在最大工况下, 设备转运通道周围辐射水平计算结果见图 4- 12。由计算结果可知, 设备转运通道屏蔽体外最大辐射剂量率为 813 $\mu$ Sv/h(位于转运通道靠近主隧道处底屏蔽体外), 转运通道地面(加速器测试大厅内)盖板入口处最大辐射剂量率为 1.0 $\mu$ Sv/h。满足地下屏蔽墙外小于 5mSv/h, 地面小于 2.5 $\mu$ Sv/h 的屏蔽设计要求。

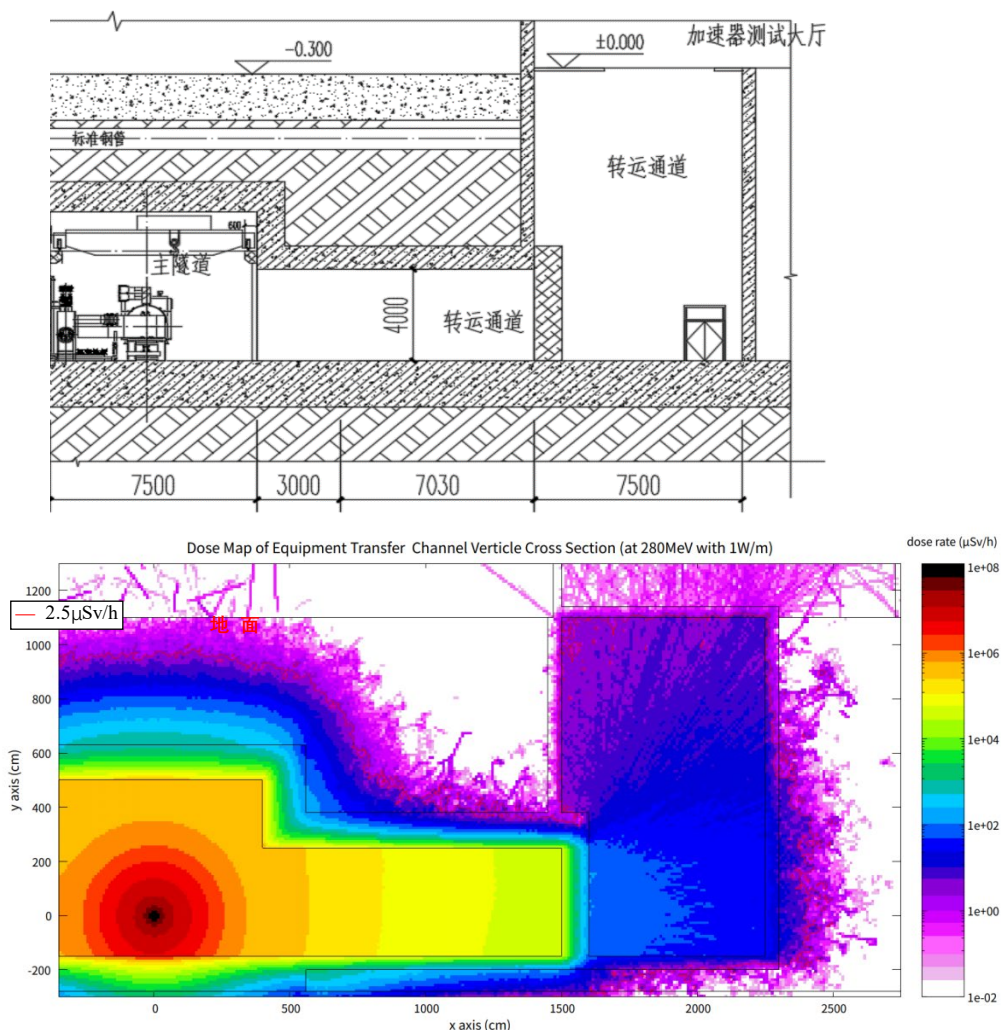


图 4- 12 转运通道屏蔽设计和周围辐射水平

#### 4.1.2.4 主隧道右侧屏蔽墙厚为 1.6m 的隧道段

主隧道右屏蔽墙设计厚度为 1.6m 的隧道段包括了 Ellip082 超导段和高能传输段，该隧道段包括 2 个出入通道，分别位于主隧道高能区和副隧道高能区。隧道水平剖面图见图 4-13。

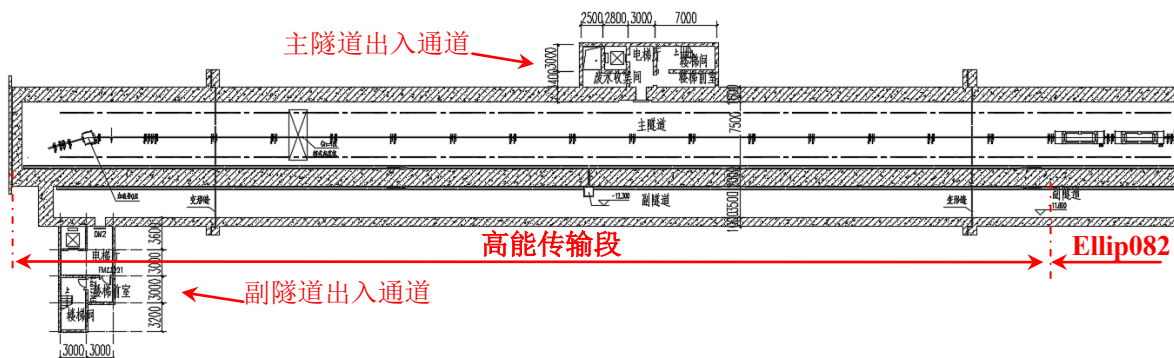


图 4-13 右屏蔽墙 1.6m 隧道段水平剖面图

##### (1) 隧道屏蔽防护与计算结果

该隧道段束流最大能量为 500MeV、最大束流损失为 1W/m。在该运行工况下，隧道周围辐射剂量率分布见图 4-14。

由计算结果可知，地下隧道屏蔽体外最大辐射剂量率为 1155 $\mu\text{Sv/h}$ （位于主隧道右侧屏蔽墙外）；隧道上方地面最大辐射剂量率为 1.73 $\mu\text{Sv/h}$ ，加速器设备厅内最大辐射剂量率为 1.82 $\mu\text{Sv/h}$ 。满足地下屏蔽墙外小于 5mSv/h，地面小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$  的屏蔽设计要求。

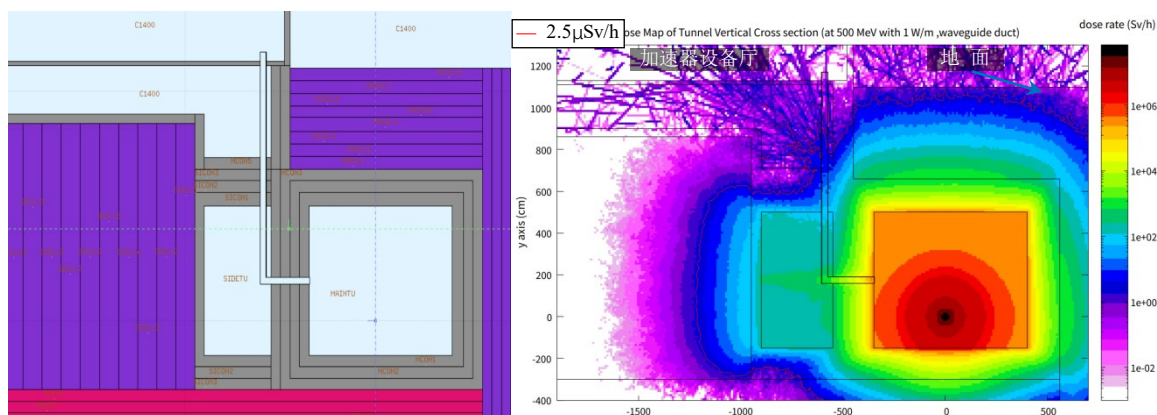


图 4-14 右屏蔽墙 1.6m 隧道段计算模型和辐射水平（含馈管）



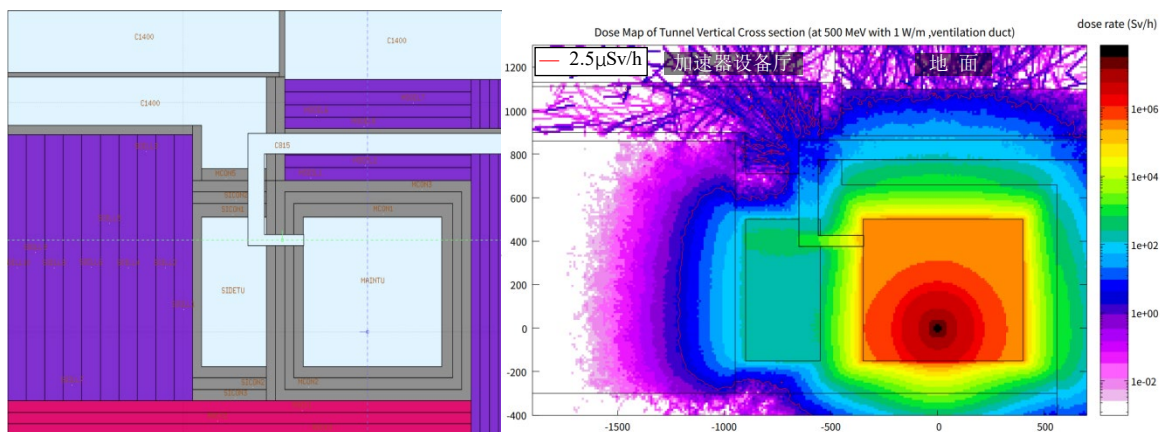


图 4-15 右屏蔽墙 1.6m 隧道段计算模型和辐射水平（含风管）

(2) 主隧道出入通道

主隧道出入通道位于高能传输段，束流最大能量为 500MeV，损失束流强度为 1W/m。出入通道水平剖面图见图 4-16。该人员出入通道设计为从主隧道通过宽 1.2m、高 6.5m（与主隧道高度相同）的疏散走廊进入楼梯间和电梯间，电梯间、楼梯间直通地面后通过侧门到达地面，地面出口平面图见图 4-17。

在最大束流损失工况下，出入通道周围辐射水平见图 4-16、图 4-17。根据计算结果，出入通道屏蔽墙外最大辐射剂量率为 1387 $\mu$ Sv/h（为地下电梯厅北墙外）；电梯厅地面出口处最大辐射剂量率为 0.69 $\mu$ Sv/h，楼梯间地面出口处最大辐射剂量率为 1.46 $\mu$ Sv/h。满足地下屏蔽墙外小于 5mSv/h，地面小于 2.5 $\mu$ Sv/h 的屏蔽设计要求。

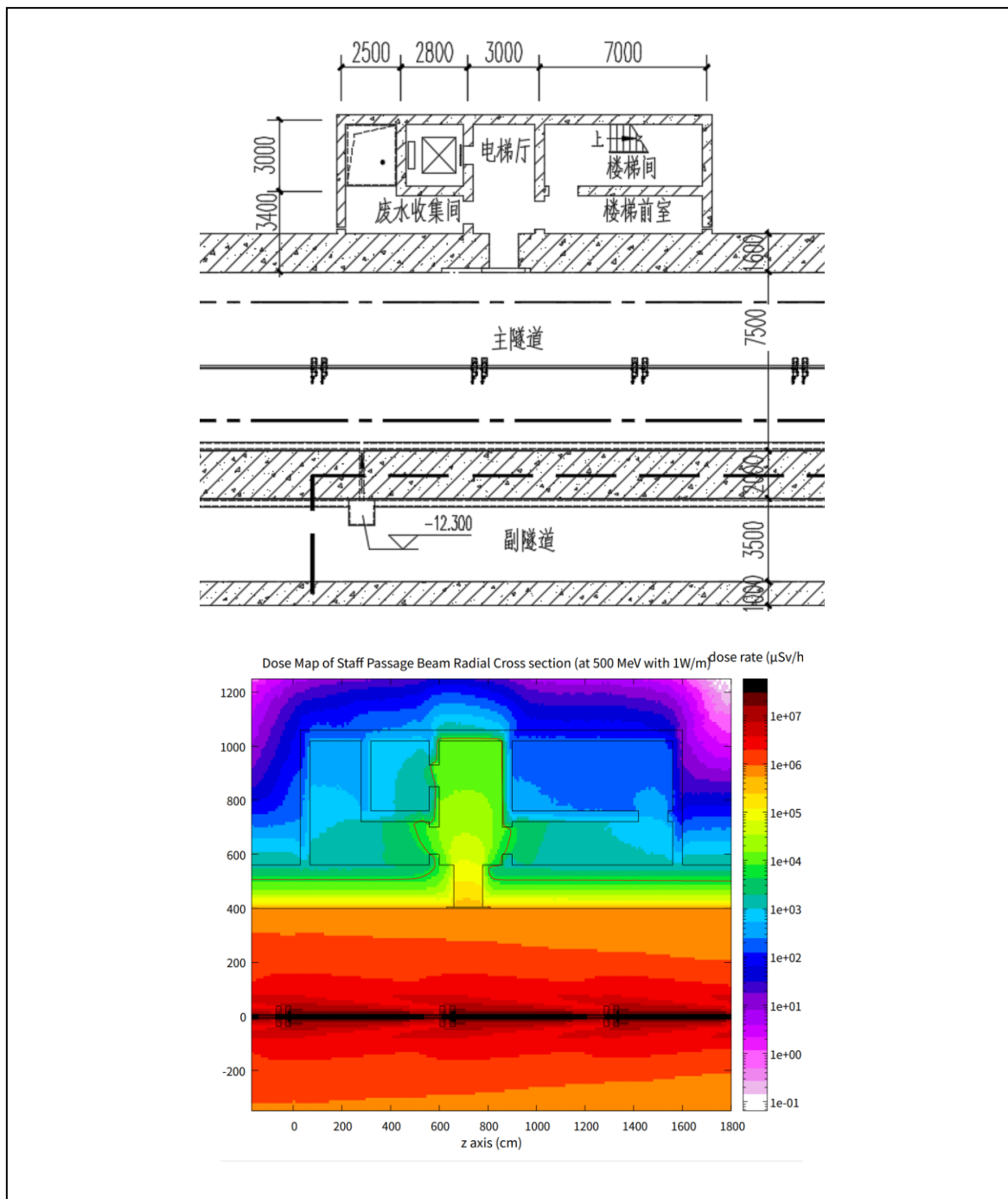


图 4-16 高能传输段出入通道隧道屏蔽设计和计算结果

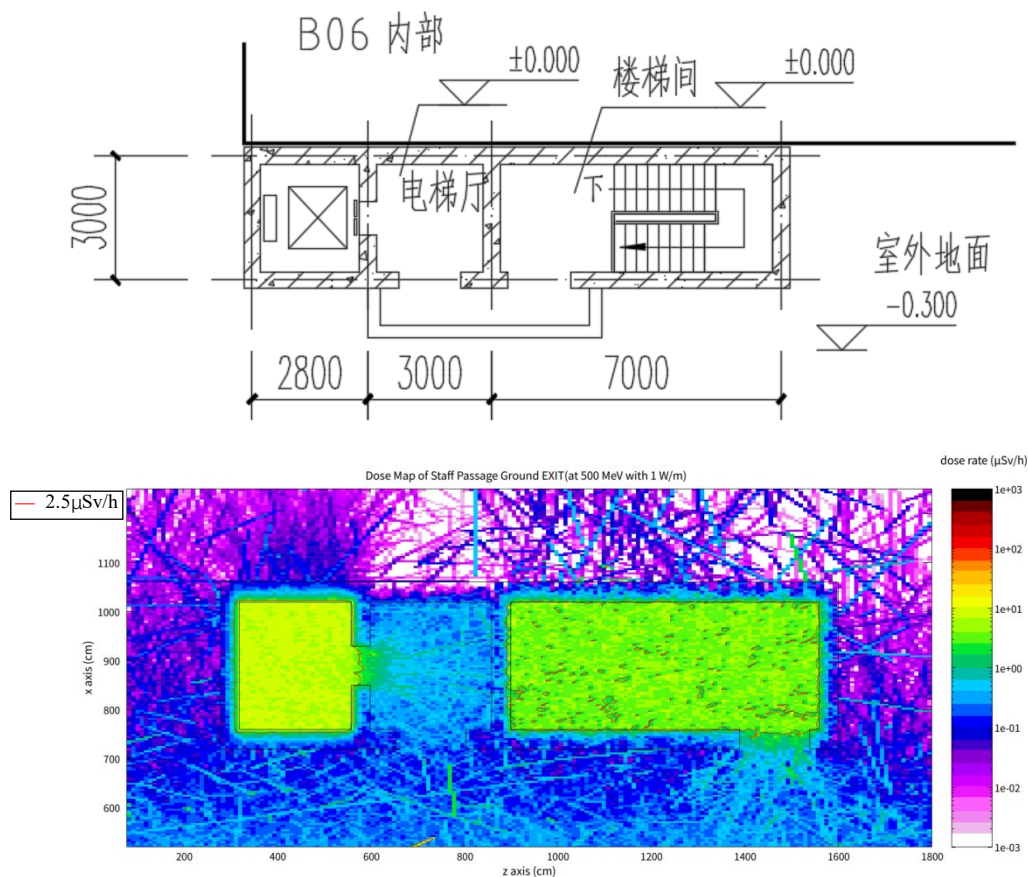


图 4-17 高能传输段出入通道地面屏蔽设计和计算结果

### (3) 副隧道出入通道屏蔽防护与计算结果

副隧道高能段出入通道位于隧道终端，该区域在运行阶段该区域最大束流能量为 500MeV、强度 1W/m。但项目第三阶段调式时束流收集器安装于该区域，调式的最大工况为束流能量为 500MeV，最大束流损失为 25kW，该工况要远大于正常运行时的工况，因此以最大调试工况对该区域的辐射水平进行计算。

束流收集器由铜块组成，结构示意图见图 4-18。阻挡器周围设置有局部屏蔽体，局部屏蔽体由铁、重混、普通混凝土构成，其中周铜阻挡器周围铁的厚度为 40cm，束流前向、左右两侧及顶部重混凝土厚度为 200cm，背向重混凝土厚度为 160cm，底部重混凝土厚度约为 88cm 和厚度 360 cm 的普通混凝土，束流背向混凝土挡板厚 100cm，前向普通混凝土阻挡墙厚度 500cm，结构示意图见图 4-18。

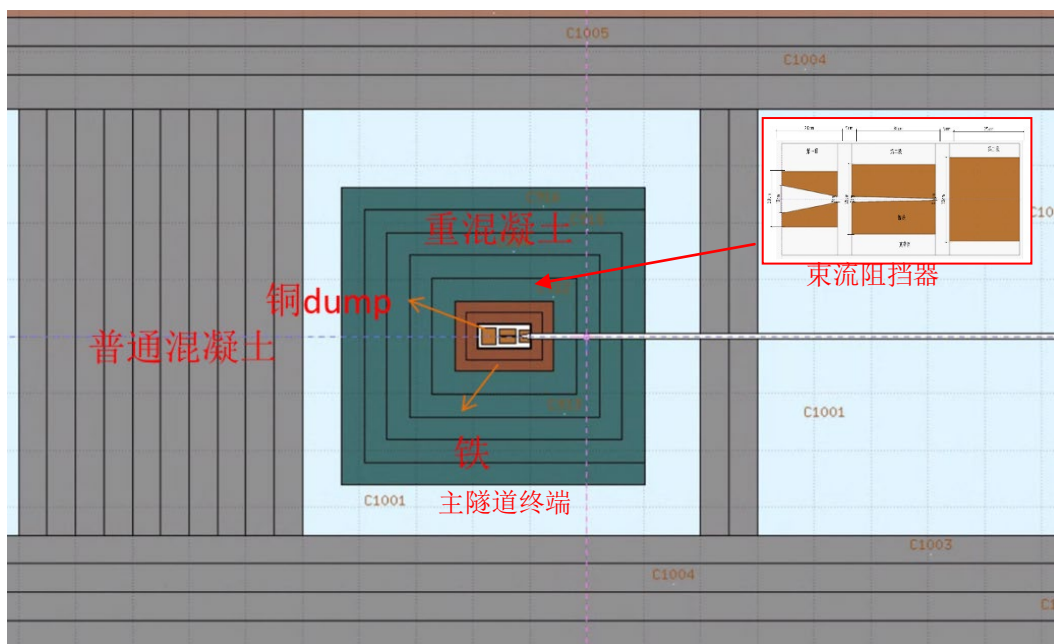


图 4-18 第三阶段调试用束流收集器及局部屏蔽结构示意图

在最大工况下，副隧道出入通道所在区域靶中心水平剖面辐射水平计算结果见图 4-19。从计算结果可知，主隧道前向屏蔽墙外最大辐射剂量率为  $4.62\mu\text{Sv/h}$ ，隧道底屏蔽墙外最大辐射剂量率为  $1276\mu\text{Sv/h}$ ，主隧道右侧屏蔽墙外最大辐射剂量率为  $4090\mu\text{Sv/h}$ ，满足地下隧道外表面低于  $5\text{mSv/h}$  的屏蔽设计要求。

图 4-20 为靶中心垂直剖面辐射水平分布图，从计算结果可知，主隧道顶部地面最大辐射剂量率为  $0.89\mu\text{Sv/h}$ ，而通道地面出入口处辐射剂量率远低于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

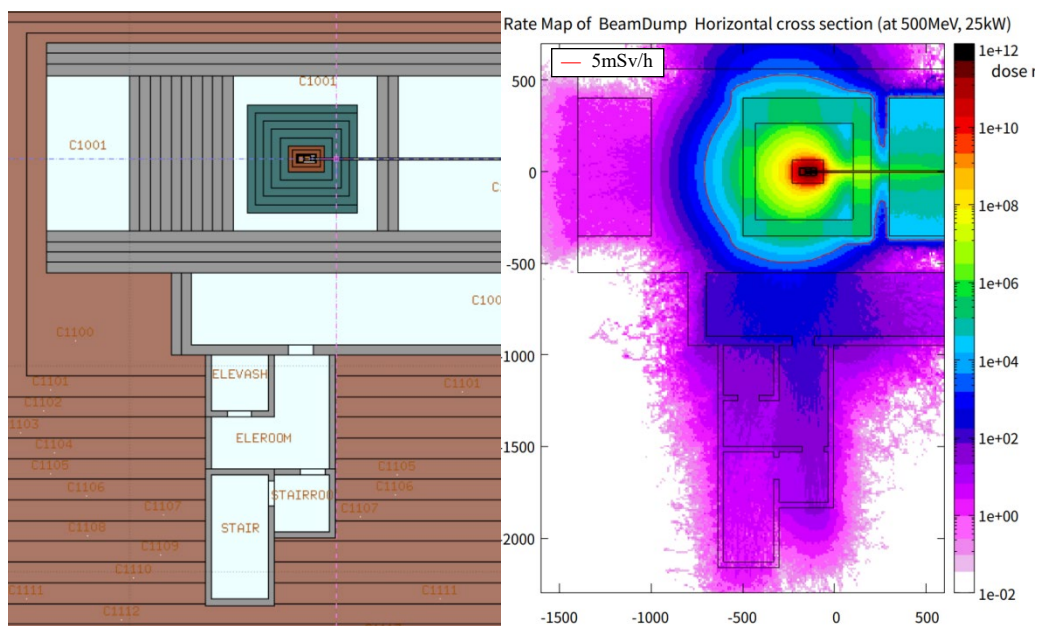


图 4-19 束流收集终端束流中心水平剖面辐射剂量

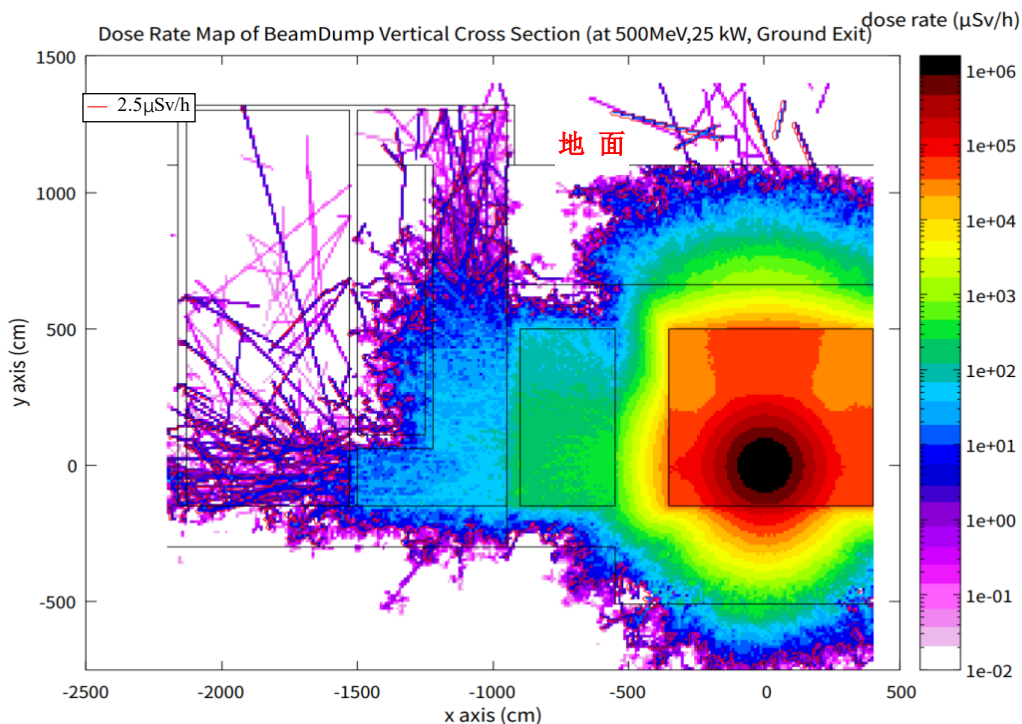


图 4-20 束流收集终端束流中心垂直剖面辐射水平

#### 4.1.2.5 防变形缝

##### (1) 防变形缝屏蔽设计

加速器隧道共布置有 4 个相同设计的防变形缝，分别位于 Spoke042 超导段、Ellip062 超导段和高能传输段。防变形缝剖面图见图 4-21，缝宽均为 10cm，并通过“Z”型设计贯穿隧道屏蔽墙体。

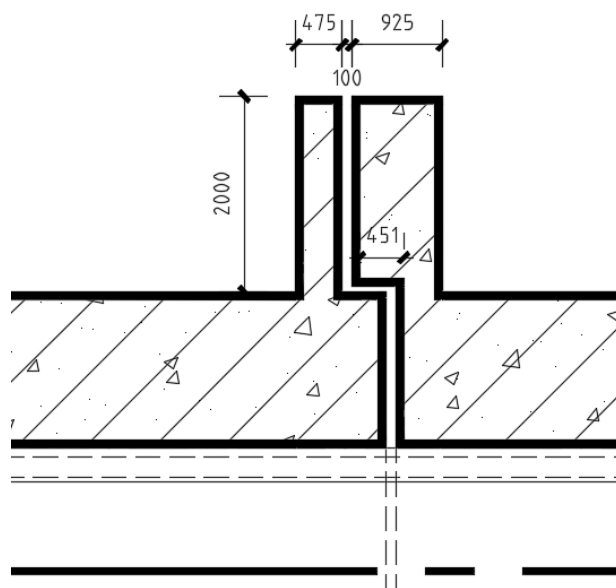


图 4-21 加速器隧道防变形缝剖面图

## (2) 屏蔽计算

以束流损失工况最大的高能传输段对防变形缝处辐射剂量率进行计算。计算结果见图 4-22。从图中可见，由于防变形缝较窄且采用了“Z”型设计，防变形缝未破坏加速器隧道屏蔽墙的屏蔽效果。防变形缝“Z”型迷道外口处辐射剂量率约为  $0.8\mu\text{Sv/h}$ ，且由于防变形峰在屏蔽墙外增加有局部屏蔽，辐射剂量明显低于未设置防变形缝的区域。

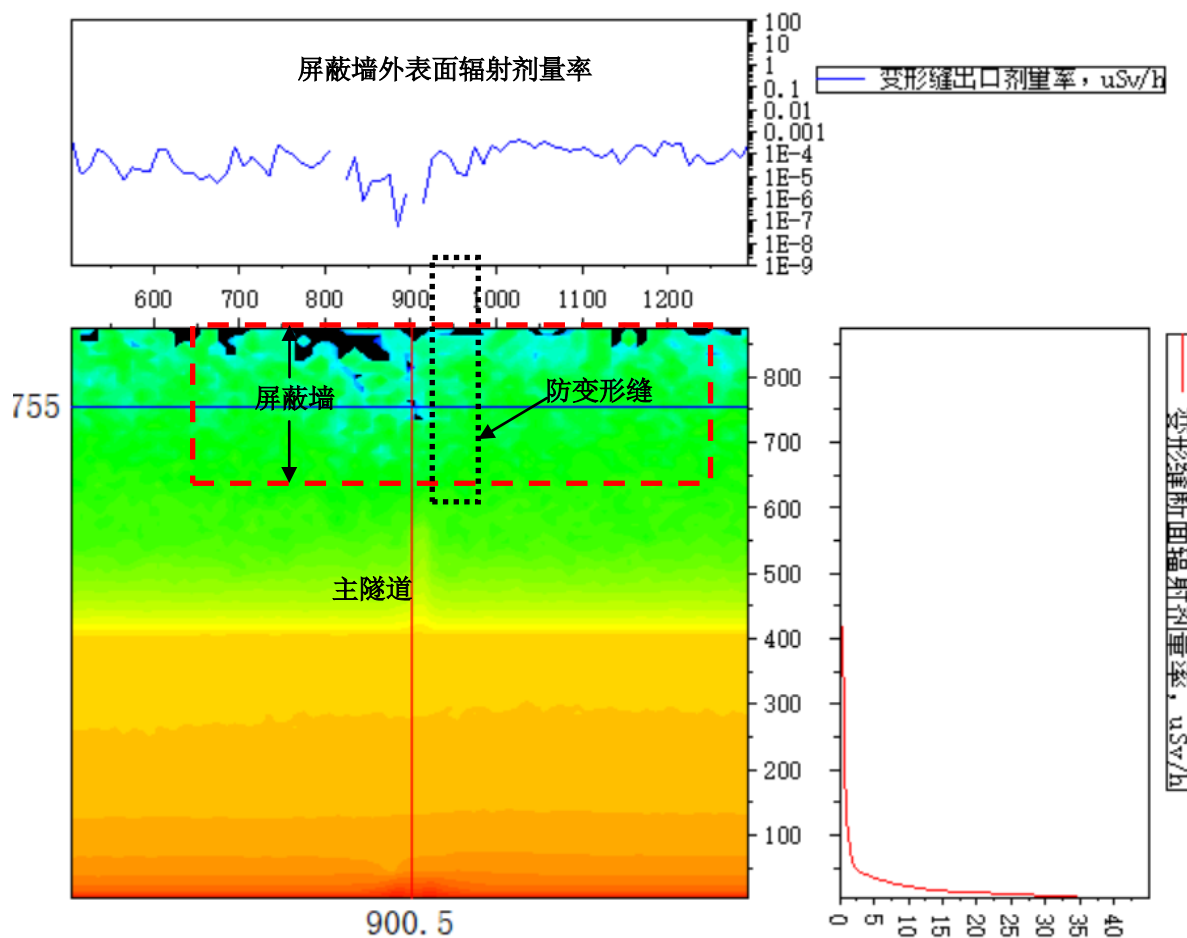


图 4-22 防变形缝周围最大辐射剂量率分布

### 4.1.2.6 管线孔洞

#### (1) 风管屏蔽防护与计算结果

加速器速到共设置有 3 组进、排风管道。分布位于 SPOKE042 超导加速段、ELLIP062 超导加速段和高能传输段，管道穿过主隧道右侧屏蔽墙依次通过地下连接至低能中心大厅、加速器测试大厅和超导综合测试与维护大厅内的通风机房。各组管道采用相同的设计，其中位于高能传输段的进、排风管道平面布置图见图 4- 23，截面图见图 4- 24。

在进、排风管道所在区域可达最大工况条件下（束流能量 500MeV、损失束流强度 1W/m），进、排风管道周围辐射水平计算结果见图 4- 24。从图中可知，辐射剂量率在地下管道内经过一段距离后，已降低至 2.5 $\mu$ Sv/h 以下，不会对约 10m 处的通风机房造成辐射影响；同时从图中通风管道所在区域地面辐射剂量率低于 0.1 $\mu$ Sv/h，满足地面辐射剂量率低于 2.5 $\mu$ Sv/h 的设计要求。

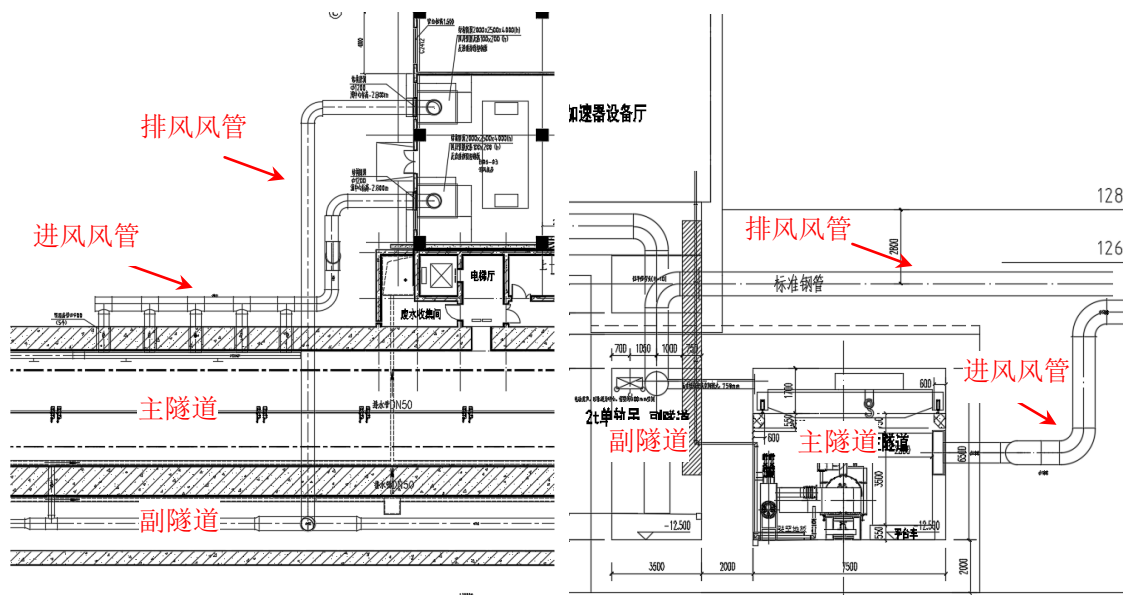


图 4- 23 高能传输段进、排风管布置图（左为水平剖面、右为垂直剖面）

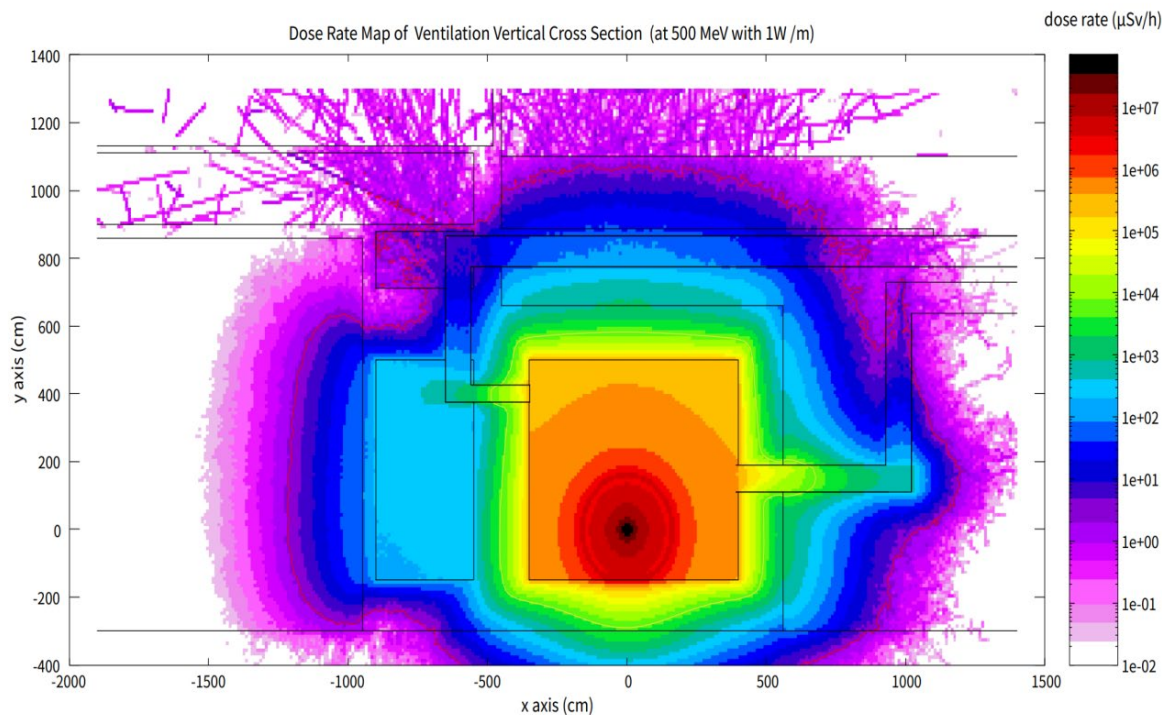


图 4- 24 进、排风管区域辐射水平计算结果

## (2) 馈管、波导管

本项目加速器穿墙管线孔洞主要有馈管、波导管，管道分布情况见图 4-25。馈管、波导管和桥架均由加速器大厅底部隔层垂直向下穿入副隧道，从副隧道水平穿透隔墙进入主隧道，沿主隧道墙面向下进入加速器。上述对加速器隧道屏蔽计算时，模型中均包含了该类管道的影响。



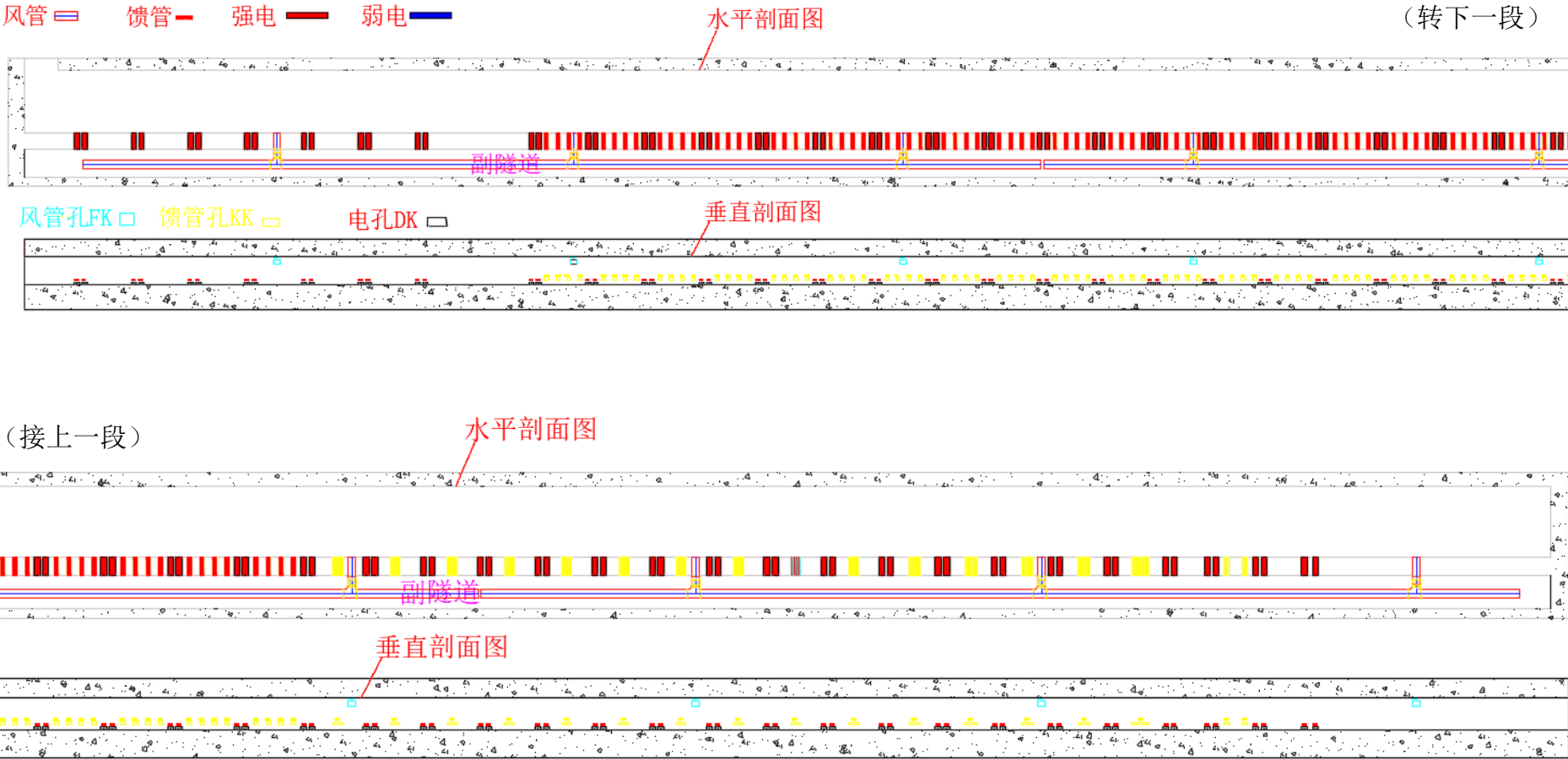


图 4-25 主副隧道隔墙穿墙孔洞布置图

## 4.2 辐射安全与防护措施

为保障辐射工作人员和公众的人身安全，加速器系统设计了辐射安全联锁系统，避免加速器开机出束时人员受到意外照射，确保任何情况下不会发生人身伤害事故。

### 4.2.1 设计原则

辐射安全联锁系统设计严格按“最优切断”、“失效保护”及“冗余设计”等原则，达到简单、操作方便。辐射安全连锁系统的设计原则如下：

- (1) 最优切断：当加速器处于“准备”或“运行”状态时，安全联锁系统在加速器中央控制系统联锁逻辑中具有最优先的权力切断加速器束流。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（如离子源的高压等），更好的保证区域内的辐射安全。
- (2) 失效保护：所有的线路、气动装置、电动装置均采用失效保护设计。急停开关被按下后即处于断开状态，需安全人员到当地进行复位后才能重新开机。
- (3) 冗余设计：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。
- (4) 实现辐射区门与区域内辐射剂量的双重联锁，即控制区内有束流时，工作人员不能进入该区域；而在控制区有人时，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，当控制区内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；
- (5) 独立性：控制区的门有三重联锁：一为限位开关；二为身份识别卡，可对进入控制区和监督区的人员确认其身份，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中；三为钥匙箱，确保在钥匙箱上的钥匙没有全部归还的情况下束流闸不会被打开。

### 4.2.2 联锁系统组成

辐射安全联锁系统由逻辑控制系统、门机联锁、急停开关、巡检开关、紧急开门开关、钥匙开关、警示系统、剂量联锁系统和出入控制系统等设备和加速器状态等信号构成。逻辑控制系统实现对这些系统信号和设备的联锁控制，保障人员在控制区时

加速器无法开机。

#### (1) 门机联锁

加速器主副隧道共4个出入口均设计防护门，防护门位于1楼地面入口处。所有防护门均设置限位开关，防护门与加速器供束联锁，当防护门处于打开状态，设备无法供束；在设备开机状态由于紧急情况突然打开防护门，加速器立即停止供束。

#### (2) 急停开关

加速器主副隧道内墙壁上、加速器中央控制室内均设有按钮式急停开关。中央控制室设置一个急停开关；主隧道每隔约30m设置一个急停开关，共12个；副隧道每隔约60m设置一个急停开关，共6个。

急停开关与加速器供束联锁，用于隧道内人员紧急自救或设备故障情况下紧急停机，任何一处急停开关触发后，加速器都无法供束或立即停止供束。急停开关一旦按下不会自动复位，需安全人员到当地进行复位后才能重新开机。

#### (3) 巡检开关

加速器主副隧道内每个急停开关旁均设置一个巡检开关，共18个。辐射安全员（携带报警仪）在开机前需按照规定的清场巡检路线，依次触发所有巡检开关，加速器才能开启。该开关的功能是确保辐射安全员在加速器开机前巡视确认控制区内所有人员均已离开，防止人员滞留误照。

#### (4) 紧急开门开关

加速器隧道每扇防护门出口内侧均设置紧急开门开关，若人员在隧道内误滞留，按下任一开门开关后，加速器都无法供束或立即停止供束，同时防护门自动打开。

#### (5) 钥匙开关

设备控制台设钥匙开关，钥匙（或操作员身份卡）由专人保管，只有插入钥匙打开开关后（或刷卡后）加速器系统才能正常开机使用。

#### (6) 出入控制系统

出入控制系统对进入控制区的人员进行出入控制。出入控制的主要功能有：人员授权；对出入人员进行监控，并形成记录日志，若记录表明控制区内有人员滞留则无法出束。

#### (7) 警示系统

加速器隧道防护门入口处安装电离辐射警告标志，防护门入口和隧道内均设置工作状态指示灯，并与加速器供束联动，绿灯表示可以进入，黄灯表示停机待进入或准

备开机，红灯表示装置正在运行，以提醒人员勿靠近。在加速器开启出束前，工作人员巡检时，黄灯亮起并伴随警报声（预备信号）提醒控制区内的人员撤离，预备信号应持续足够长的时间，以确保控制区内人员安全离开。

#### （8）剂量联锁系统

在控制区共布置了18个监测点位、监督区7个监测点位、中央控制室1个监测点位，拟布置的监测点位见图4-26（M代表监测点位）。每个监测点由一台中子探测器和一台 $\gamma$ 探测器组成，剂量率值将实时显示在控制台上。

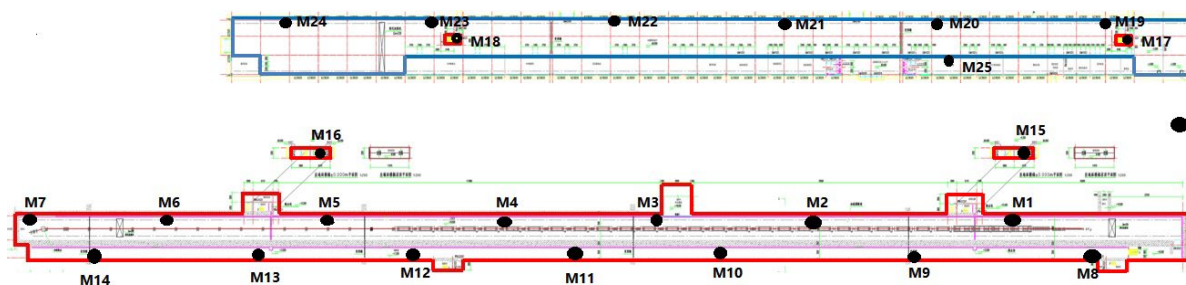


图4-26 剂量联锁系统监测点位布局示意图

控制区的监测点用于监测开机时加速器隧道内的剂量情况，以便及时发现设备运行异常，并通过停机后剩余辐射场的测量判断辐射工作人员的准入条件，当剂量率高于预设值时，无论无加速器是否处于运行状态，加速器机房门均不能从外面打开。中央控制室监测点位用于监控加速器开机时对长期居留的职业人员造成的剂量影响，异常时及时停止设备运行。

#### 4.2.3 联锁系统工艺流程

在加速器开机运行前，需要对加速器隧道、出入口等控制区进行“清场”，按照程序要求“清场”完成后，由控制室根据调试要求启动配套辅助系统并开机运行。在加速器运行期间，控制区内没有工作人员，监督区内工作人员原则上可以根据授权和各自岗位的工作特点开展日常工作。根据加速器总体布局以及加速器调试和运行的工作需要，工作人员主要在各自厂房进行加速器调试、研究、系统设备监护等工作，加速器主隧道上方的地面为室外，除辐射环境监测外，无其他固定业务开展。

在加速器各设施设备正常的情况下，加速器开机前首先开始清场巡检，巡检安全员获得授权进入控制区进行清场工作，此时控制区防护门全部关闭，其他人员无法获得授权进入控制区，黄灯亮起并播放离场广播。巡检安全员根据规定路线，按照EC1

到EC12、EC13到EC18清场的顺序完成巡检工作后，退出控制区并在出入控制系统中登记，经值班长确认后，完成整套清场工作，安全联锁系统进入待机状态，等待控制系统命令。

接收到“开机”信号时，加速器出束，按预定要求管制相关区域。接收到“停机”信号后，加速器关机，允许授权人员按规定方式进入控制区。

出现异常情况时，可通过急停开关、紧急开门开关触发紧急停机动作，待异常情况解除后才可重新复位开机。加速器辐射安全联锁系统的工作流程图见图4-27。

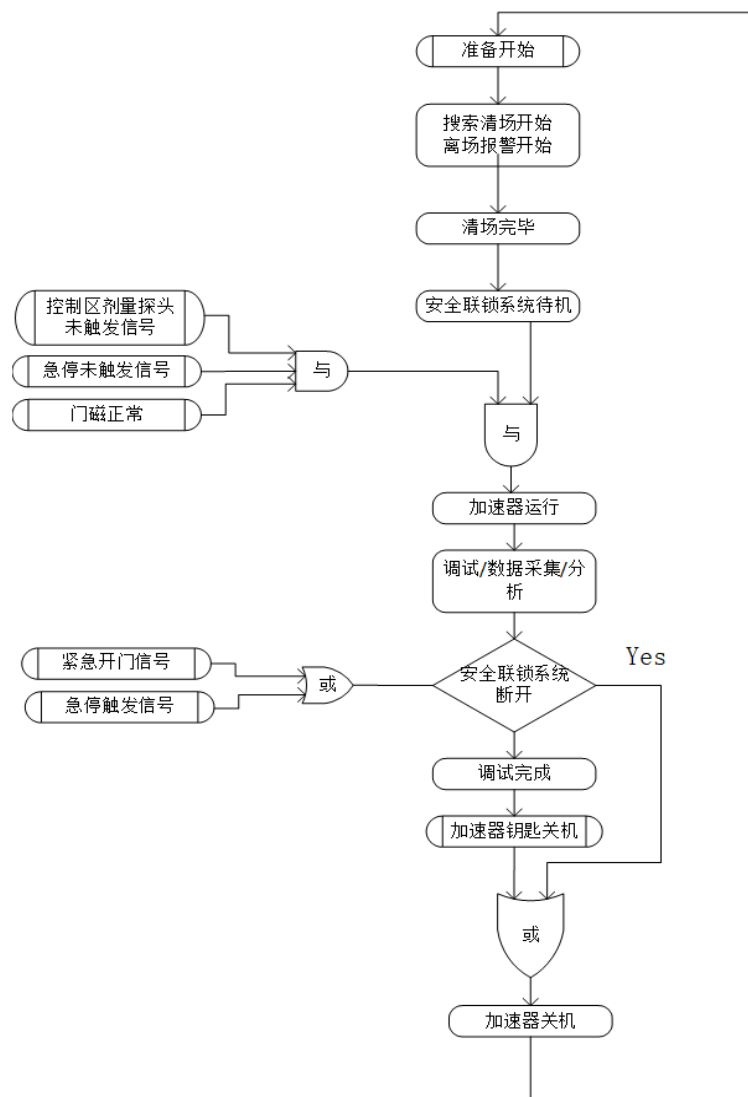


图4-27 辐射安全联锁系统工作流程

#### 4.2.4 操作系统组成及结构

辐射安全联锁系统的操作系统主要包括用户界面、控制主站及子站。

其中，查询显示PC机是用专用软件来显示所有联锁部件的状态，控制主站及子站

则主要用来控制系统不同区域的联锁部件。辐射安全联锁系统通过硬线或总线将各辐射区域的联锁组件、传感器、执行部件及应用软件连接在一起，且其总线网络、传感器及执行部件都采用失效保护及冗余设计。

为了能够实现现场辐射监测的需要，同时保证最大程度地工作人员人身安全，辐射监测和安全联锁系统，集中由运行在一台服务器上的软件平台进行监测、操控和管理，同时支持局域网中的工作站进行访问，以及在联互联网状态下手机APP的访问（接入外网的情况下），可多途径实时掌控现场动态，方便快捷。将人脸识别、门禁控制和显示屏集成在一个一体机内，部署在防护门入口处。

所有的清场/急停按钮，由串口服务器进行集中连接，串口服务器通过局域网将状态信息与监控平台进行交互。辐射监测主机、串口服务器、摄像头、一体机和服务器通过以太网进行连接，在连接互联网的条件下，还能与云服务器进行连接，进而实现与手机APP的联通。

### 4.3 三废的治理

#### 4.3.1 放射性废气及处理措施

加速器运行期间的放射性废气主要来自加速器隧道的空气活化，根据加速器运行模式的不同，采用不同的处理措施：

##### （1）循环衰变

加速器运行时，为保证加速器隧道为负压，并减少活化气体的排放量，采取正常通风模式，大部分空气在主隧道空调通风系统中进行循环衰变，减少排放量（通风运行模式详见3.2.2.4 通风空调系统）。

加速器停止后，进入过渡运行工况，对隧道进行大风量通风换气，快速置换隧道中的空气，通风换气30min后，人员方可进入。

##### （2）排气筒排放

在加速器调试期间，结合通风系统设计，建设临时排风机房和排风筒，排气筒高度18米，高于临近建筑物3米以上。在整个CiADS项目建成后，加速器正常运行的排风纳入基地统一考虑。

#### 4.3.2 含放射性核素的废水及处理措施

加速器调试和运行期间，加速器的磁铁系统、高频系统等诸多设备需进行冷却。设备冷却水在循环过程中会受到照射而活化，加速器设备冷却水采用去离子水，采用闭式循环，不排放；在异常工况或检修产生的冷却水收集在加速器隧道的集水池中，经衰变后取样监测，在满足解控要求后，经审管部门批准后排放。

#### 4.3.3 放射性固体废物及其处理措施

##### (1) 收集暂存

加速器产生的放射性固体废物主要为加速器检修环节更换下来的加速器部件和其他隧道内污染物件等含感生放射性的固体废物，以及加速器隧道冷却水过滤树脂和过滤滤芯。产生的废物暂存于临时放射性废物暂存间中。

临时放射性暂存间在基地放射性废物库未建成前临时存放加速器调试期间放射性固体废物的临时暂存，利用加速器主隧道远端疏散走廊楼梯间，封闭外部入口作为密闭空间。

##### (2) 固体废物处理

对于损坏不再使用的部件收集在隧道的临时放射性废物暂存间中暂存衰变。如果经衰变达到GB27742-2011规定的免管浓度后，向生态环境部门申请，经监测合格后，作为非放射性废物处理。如果不能满足GB27742-2011规定的免管浓度，则分类收集、包装后，纳入基地统一处置。

对于冷却水过滤树脂和过滤滤芯，一般经短暂储存后就能达到豁免水平，达到GB27742-2011规定的免管浓度后，向生态环境部门申请，经监测合格后，作为非放射性废物处理。

#### 4.3.4 非放射性废气的处理

运行期间产生的非放射性废气主要是超导腔洁净室在酸洗清洁过程中产生的废气，废气经负压收集后通过酸性废气处理系统进行处理，酸性废气处理系统采用碱喷淋法，处理效率为80%，处理后经20米高排气筒排放。

#### 4.3.5 非放射性废水的处理

项目产生的生产废水主要是超导腔洁净室产生的清洗废水，经污水处理系统处理达到《污水排入城市下水道水质标准》（GB/T 31962-2015）中的C级标准后排入城市

污水管网。

#### 4.3.6 危险废物的处理

项目产生的装桶废酸液、废树脂全部在危废暂存间存放，项目设置危废暂存间，按危废库标准建设，进行防风、防雨、防晒、防渗处理，防渗采用2mm厚的高密度聚乙烯材料，渗透系数 $\leq 10^{-10}$ cm/s。因此，根据项目所产生的危险废物的类别和性质，不同的危险废物分类存放。由于本项目产生的各类危险废物总量较少，危废暂存间能够完全容纳。平时加强实验室危废暂存间的运行及管理、安全防护与监测、避免危险废物泄露等突发情况。

危险废物定期委托有资质单位处理，因此，危险废物全部合理处理处置，措施可行。

#### 4.4 服务期满后的环境保护措施

本加速器是CiADS项目的重要组成部分之一，其退役将纳入CiADS项目统筹考虑。退役前，建设单位将根据项目的实际情况制定详细的退役计划，包括退役实施方案、资金方案、辐射防护方案、环境保护措施、废物处置等内容，经充分论证后按照国家相关法规标准实施。



## 第五章 环境影响分析

### 5.1 建设阶段对环境的影响

本项目涉及的施工过程主要是在已完成的场地上开展构筑物土建、建筑装饰和设备的安装等。本项目工程施工活动对环境的影响主要为构筑物土建、装修、汽车运输以及设备安装等造成的噪声和粉尘等方面的影响，其次也会产生部分施工废水、生活污水、固定废物等。

#### 5.1.1 施工期声环境影响及防治措施

本工程施工过程中可能产生噪声的活动主要包括土建和装修等，另外设备安装和汽车运输也会产生一定噪声。施工期噪声影响是暂时性的，其影响程度与施工方法、施工机械的噪声强度以及施工现场距居民点的距离有关。施工阶段的主要噪声污染源及其噪声级见表5-1。

表 5-1 施工阶段的主要噪声污染源及其噪声级

施工期	主要声源	噪声级 dB (A)
构筑物基础	挖掘机、推土机、平地机、装载机、压路机、打桩机和摊铺机	76~105
底板和结构	混凝土输送泵、振捣机、电锯、电焊机	90~100
内部装修	电钻、电锤、手工钻、无齿锯	100~110
外部装修	升降机、吊车	65~75
交通运输	轻型载重卡车、混凝土罐车、大型载重车	75~95

施工期各种噪声源多为点源，按点声源衰减模式计算施工机械噪声的距离。施工过程中使用的施工机械所产生的噪声主要属于中低频噪声，因此在预测其影响时可只考虑其扩散衰减，计算公式为：

$$L_{A(r_2)} = L_{A(r_1)} - 20\lg(r_2/r_1)$$

式中：

$L_{A(r_1)}$  及  $L_{A(r_2)}$  分别为距离声源  $r_1$  及  $r_2$  处的等效 A 声级强度 (dB (A))；

$r_1$  和  $r_2$  分别为受声点距声源的距离 (m)。

对某一受声点受多个声源影响时，该点的噪声由下式计算：

$$L_p = 10 \lg \left[ \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi} / 10} \right]$$

式中：L<sub>p</sub>—为几个声源在受声点的噪声迭加，（dB（A））。

L<sub>pi</sub>—为第 i 噪声源在上述受声点的声级，（dB（A））。

可见，施工机械作业时可视为点声源，距离加倍时噪声降低 6dB，如果考虑空气吸收，则附加衰减 0.5~1dB/100m，因此，昼间一般 100m 内所有机械设备施工均可达到《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）中 70dB 的限值标准要求；夜间除电钻噪声外，在 350m 处可达到 55dB 的限值标准要求。因此，施工单位需合理安排高噪设备的施工时间，夜间要严禁高噪声设备使用。表 5-2 给出了各噪声源随距离的衰减关系。

表 5-2 各噪声源随距离的衰减关系

单位：（dB（A））

距离 施工阶段	噪声级 dB（A）	1m	10m	50m	100 m	200m	300m （坑口村）	350m
构筑物基础	76~105	76~105	56~85	42~71	36~65	30~59	26.5~55.5	25.1~54.1
底板和结构	90~100	90~100	70~80	56~66	50~60	44~54	40.5~50.5	39.1~49.1
内部装修	100~110	100~110	80~90	66~76	60~70	54~64	50.5~60.5	49.1~59.1
外部装修	65~75	65~75	45~55	31~41	25~35	19~29	15.5~25.5	14.1~24.1
交通运输	75~95	75~95	55~75	41~61	35~55	29~49	25.5~45.5	24.1~44.1

为了控制项目施工期间的声环境影响，建议建设单位采取以下防治措施：

- 尽量使用低噪声施工设备，对动力机械设备进行定期的维修、养护，维持设备处于良好的运转状态。
- 运输车辆进入现场减速，并减少鸣笛。
- 合理安排施工进度，避免在施工期间同步使用高噪声设备；
- 严格控制夜间施工过程，禁止可能影响居民点设备的夜间施工，避免出现扰民现象。

### 5.1.2 施工期大气环境影响及防治措施

工程施工期间的主要大气污染物包括扬尘、粉尘和汽车尾气，其中，扬尘和粉尘对大气环境质量影响较为明显。施工产生的地面扬尘和粉尘主要来自于施工机械和运

输车辆的行驶、物料堆放和运输以及施工建筑材料的搅拌等环节，TSP 产生量与施工方式、车辆数量、道路路面状况以及天气情况相关。

在施工运输过程中会产生一定量汽车尾气，主要成分为 CO、NO<sub>x</sub> 和碳氢化合物。

施工中可采用覆盖、定期洒水等措施减少扬尘的产生。有资料表明，在施工期内对车辆行驶的路面实施洒水抑尘，每天洒水 4~5 次，可使扬尘减少 70%左右；对施工场地实施每天洒水 4~5 次进行抑尘，可有效地控制施工扬尘，并可将 TSP 污染距离缩小到 20~50m 范围。因此，在施工活动中，在采取覆盖、定期洒水等减少扬尘的措施后，施工粉尘及扬尘的影响将局限于施工场地周围，对大气环境影响范围有限。施工结束后这部分大气污染源将不再存在，影响时段有限。

### 5.1.3 施工期水环境影响及防治措施

本项目施工期废水主要为建筑施工废水和施工人员的生活污水等，各类废污水处理后回用或外运处理，不直接排入地表水体。

施工期间的建筑施工废水拟由施工单位在各施工项目区设置沉淀池，废水经沉淀后回用于场地洒水抑尘、绿化等。

施工期间工程人员集中居住于施工区以外的各个村庄，所产生的生活污水由所居住村庄处理，不会对施工人员居住区域的地表水环境造成影响。

施工区设置化粪池、移动厕所等生活污水处理装置。生活污水经处理后回用于施工场地降尘、道路喷洒或外运处理。

因此，本项目在实施相应的控制措施后，施工期废水将得到有效处置，不会对地表水环境造成不良影响。

### 5.1.4 施工期固体废物的影响及防治措施

本项目建设过程中会产生一定量的生活垃圾、渣土和建筑垃圾、工业废弃物等固体废弃物。部分工业废弃物属于危险固废，如油漆桶、废油布、废油漆等，如处理不当，不但会占用土地，造成景观污染，也可能被雨水冲刷可能污染周围环境等。为此，建设单位需制定严格的施工环境管理规定，对固体废弃物制定相应的管理措施，做到文明施工，尽量减少固废产生量；施工期产生的渣土和建筑垃圾应及时清运至规定的地点进行堆放或填埋，其中具有利用价值应予以回收；无毒无害固废尽量回收再利用，危险固废按照《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2001，2013 年修订）

设置暂存仓库，定期交由有资质的单位处理或由有处置资质的供货商回收处置。施工期产生的生活垃圾集中收集，并将由当地环卫部门定期外运处置。

通过采取上述措施，本项目施工产生的固体废弃物将尽可能实现回收利用和分类处理，以减轻对环境的影响。

### 5.1.5 射线装置、化学物质对环境的影响

本项目建设施工阶段，可能使用  $\gamma$  射线或 X 射线进行无损探伤检验时对周围人员产生辐射影响。同时，放射源在储存时也会产生辐射。建设单位将聘请有相应辐射安全许可的专业检测公司开展相关工作，并根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等规章制度进行安全管理。

本项目建设施工阶段，各种设备和连接管道需要运输、贮存和现场安装，为避免盐雾锈蚀和表面氧化，将采用一些化学物质和缓蚀剂进行表面处理，其中可能含有部分危险化学物品并产生部分危险固废，这部分危化品将由施工单位按照国家标准和相应使用管理规定的要求严格执行。

### 5.1.6 施工期间的环境监测

CiADS 项目主要是陆域工程的建设，项目建设会造成场址附近局部陆域大气和声环境质量受到影响。为了解工程建设期间对环境造成影响的范围和程度，检验施工期间采取的减缓环境影响措施的实施效果，促使施工单位采用更合理的工艺以最大限度降低工程建设对周边环境的不利影响，建设单位已委托开展了施工期间的相关环境监测，定期厂区及附近环境敏感点的环境质量监测，跟踪环境质量变化，及时反馈环境信息。

环境监测内容包括环境空气和厂界及敏感点噪声监测：

a、环境空气监测：分为无组织排放监测和敏感点监测。无组织排放监测时在监控点（场界四周）。敏感点布设于场区主要办公场所附近以及坑口村、东头村。无组织排放监测总悬浮颗粒物（TSP）；敏感点监测项目包括总悬浮颗粒物（TSP）和可吸入颗粒物（PM10）；监测频次为每季度一次。

b、声监测：点位布设于场界和场外敏感点处，测试项目为等效连续 A 声级（LeqA）。监测频次为每季度一次，每次分昼间和夜间监测。

## 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 加速器运行时的场所辐射水平

根据 4.1.2 节“屏蔽防护”对加速器运输时瞬发辐射场的计算。加速器调试阶段和运行阶段人员可达区域辐射剂量率计算结果见表 5-3。

表 5-3 加速器调试时隧道周围辐射剂量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

序号	位置区域	最大剂量率
1	高能段副隧道出入口	<0.01
2	高能段顶层 B03 室内	1.82
3	高能段顶层地面	1.73
4	主隧道高能段出入口	1.46
5	中能段顶层 B03 室内	0.77
6	中能段顶层地面	0.53
7	转运通道顶部 (B09 室内地面)	1.0
8	低能段顶层 B03 室内	<0.01
9	低能段顶层地面	<0.01
10	主隧道低能段出入口	0.11
11	B06 室内	<0.1
12	B08 室内	<0.01
13	B09 室内	0.52

#### 5.2.1.2 加速器停机后场所辐射水平

##### (1) 调试阶段加速器停机后的场所辐射水平

###### — 第一阶段调试

加速器第一阶调试束流最大能量为 2.1MeV，束流强度为 10W。按照保守计算的原则，假设束流集中损失在束流收集器（法拉第筒）上，同时按照连续运行 90 天（1 年的最大运行天数）计算。则停机后不同时间、距离束流收集器不同距离处的辐射剂量率见图 5-1。其中停机 1h 后，距离束流收集器 1m 处的辐射剂量率为 4.30 $\mu\text{Sv/h}$ 。

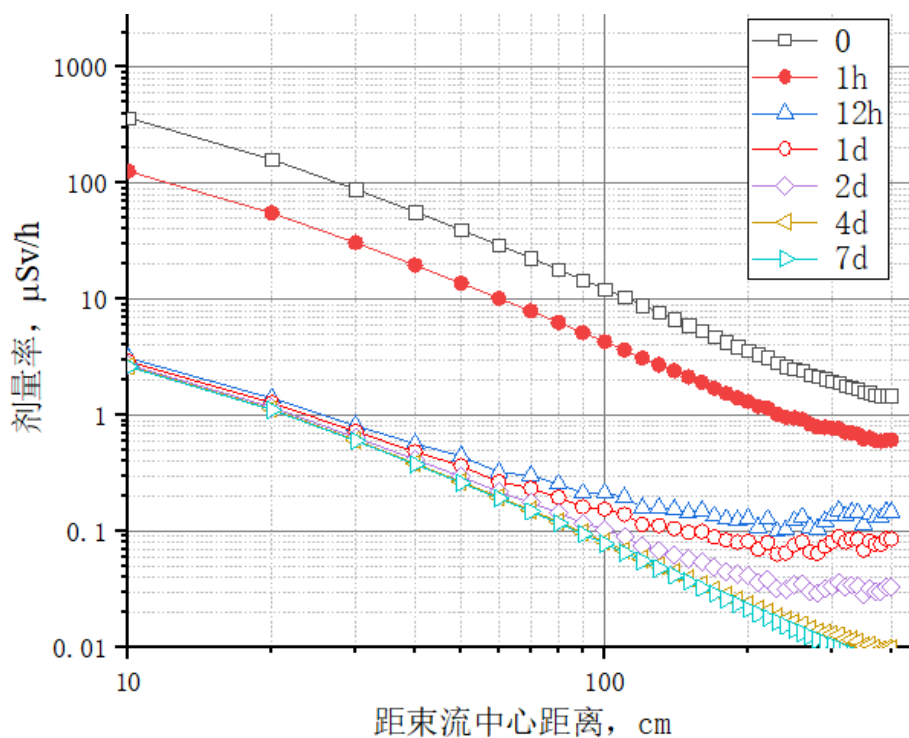


图 5-1 第一调试阶段停机后辐射剂量率随时间和距离的变化

— 第二阶段调试

加速器第二阶调试束流最大能量为 170MeV，束流强度为 250W。按照保守计算的原则，假设束流集中损失在束流收集器（法拉第筒）上，同时按照连续运行 90 天（1 年的最大运行天数）计算。则停机后不同时间、距离束流收集器不同距离处的辐射剂量率见图 5-2。其中停机 1 天后，距离束流收集器 1m 处的辐射剂量率为 913.1 $\mu$ Sv/h。

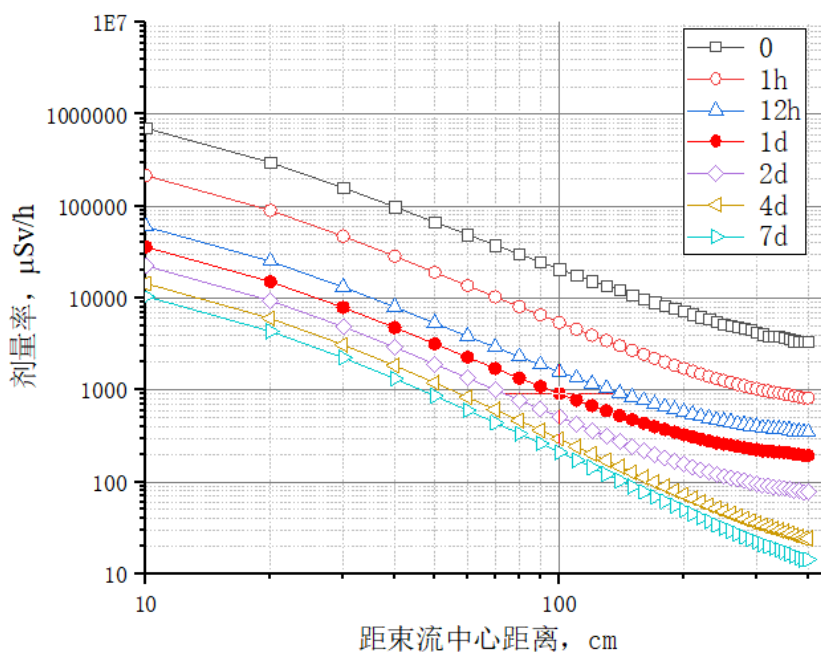


图 5-2 第二调试阶段停机后剂量率随时间和距离的变化

— 第三阶段调试

加速器第三阶段调试束流最大能量为 500MeV，束流强度为 25kW。按照保守计算的原则，假设束流均损失在束流收集器上，且按照连续运行 90 天（1 年的最大运行天数）计算。则停机后不同时间、距离束流收集器不同距离处的辐射剂量率见图 5-3。其中停机 3 个月后，距离束流收集器 1m 处的辐射剂量率为 3.873mSv/h。

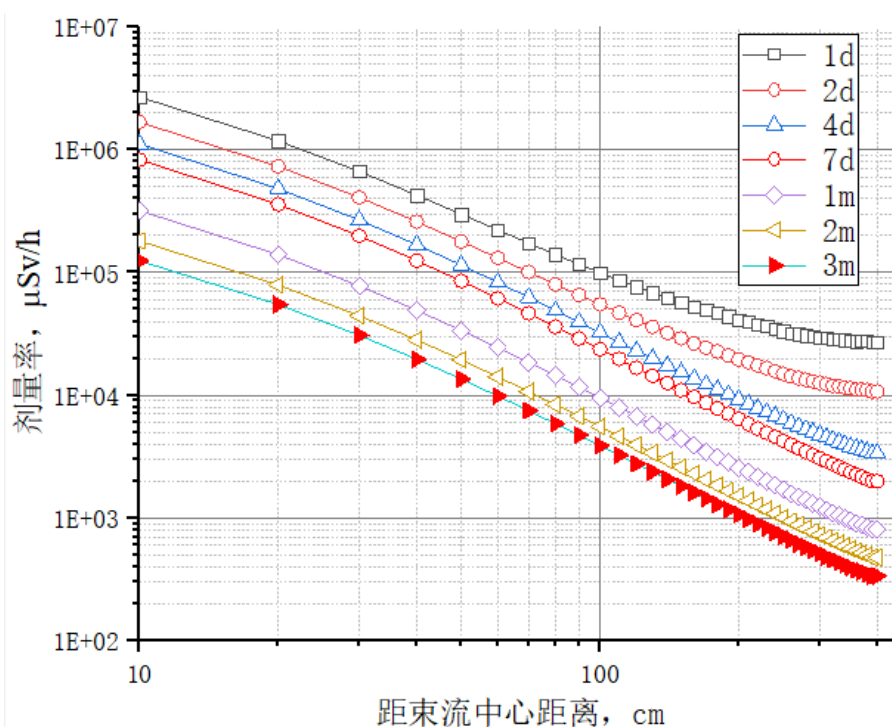


图 5-3 第三调试阶段停机后不同时间束流线两侧不同距离处辐射剂量率

(2) 运行阶段加速器停机后的场所辐射水平

加速器停机后的辐射场强度与束流能量关系密切，因此根据各加速器段不同能量对加速器停机后的场所辐射水平进行计算，计算结果见图 5-4~图 5-7。

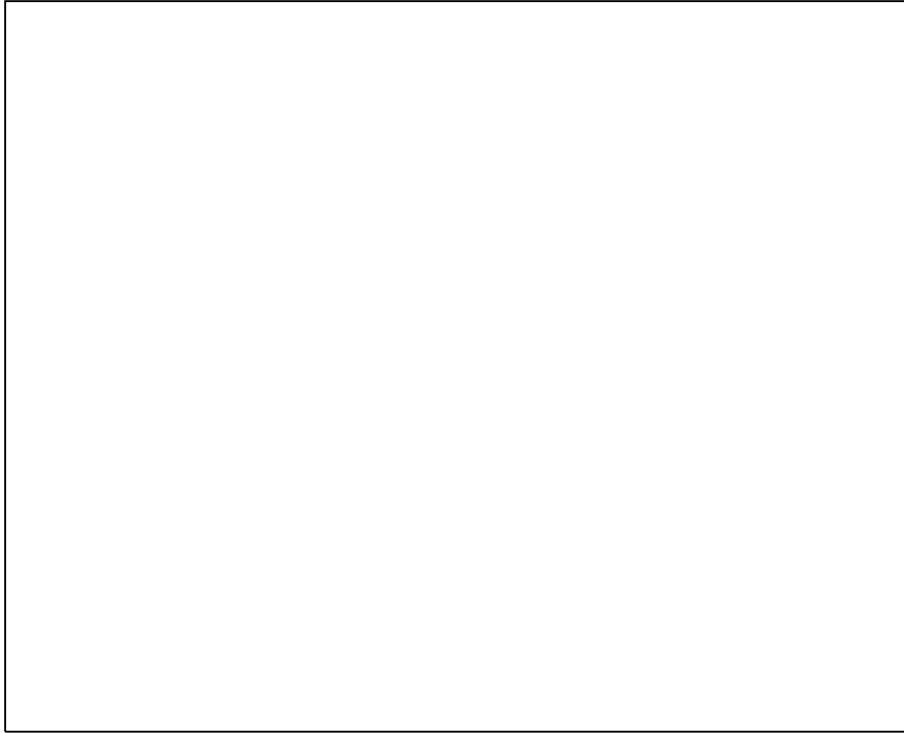


图 5-4 停机后 HWR019 超导段剩余辐射剂量率变化情况

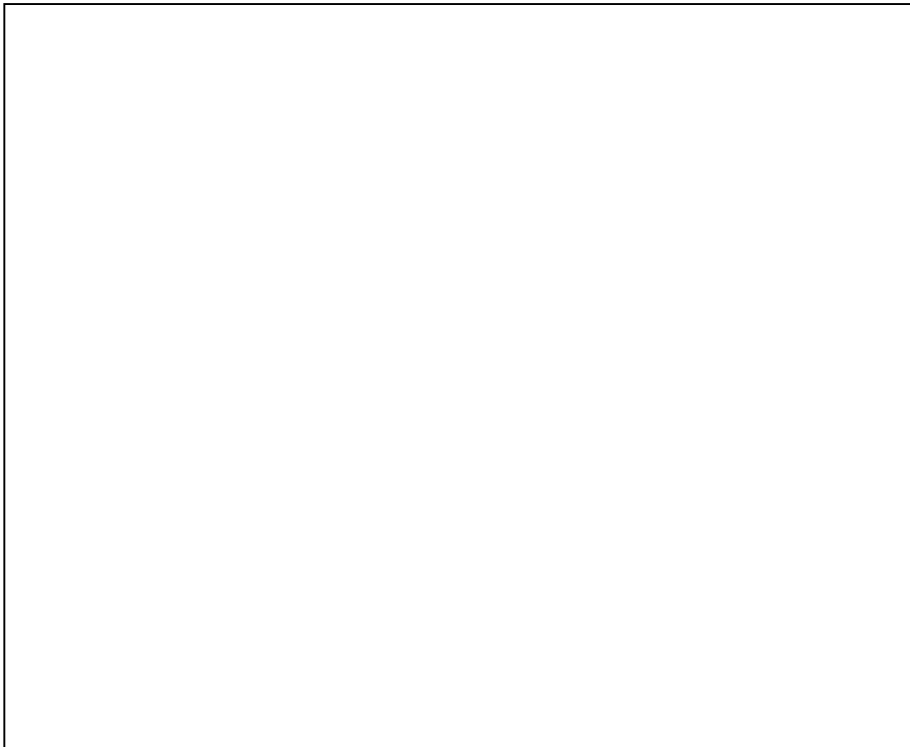


图 5-5 停机后 Spoke042 超导段剩余辐射剂量率变化情况



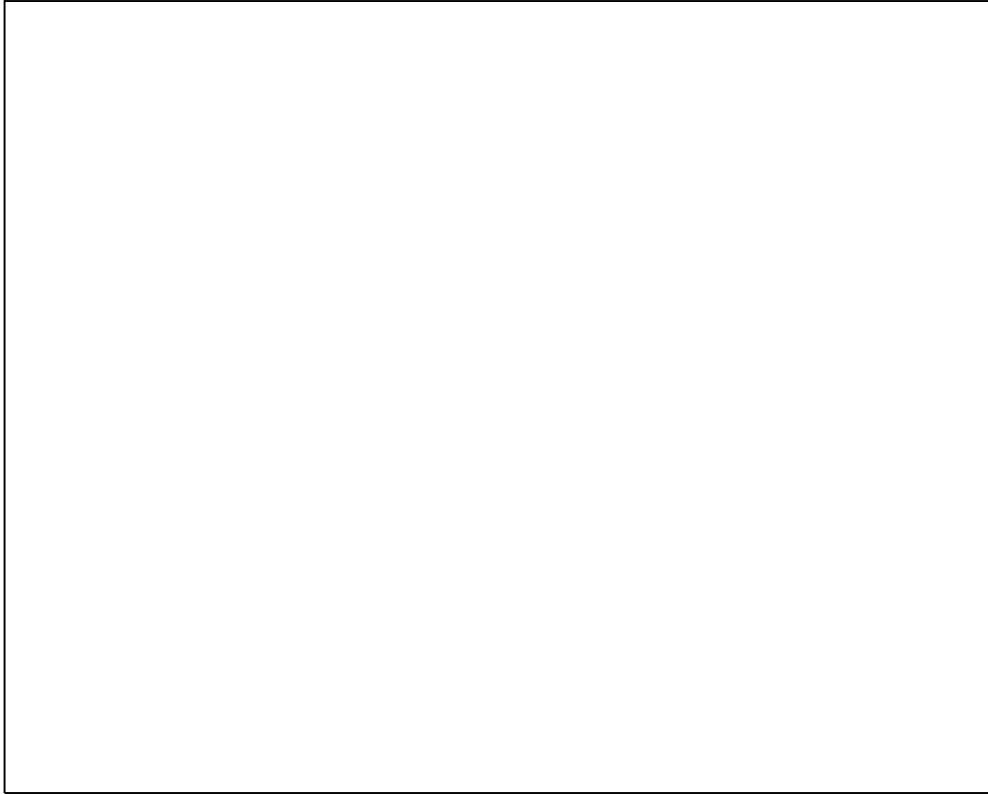


图 5-6 停机后 Ellip062 超导段剩余辐射剂量率变化情况

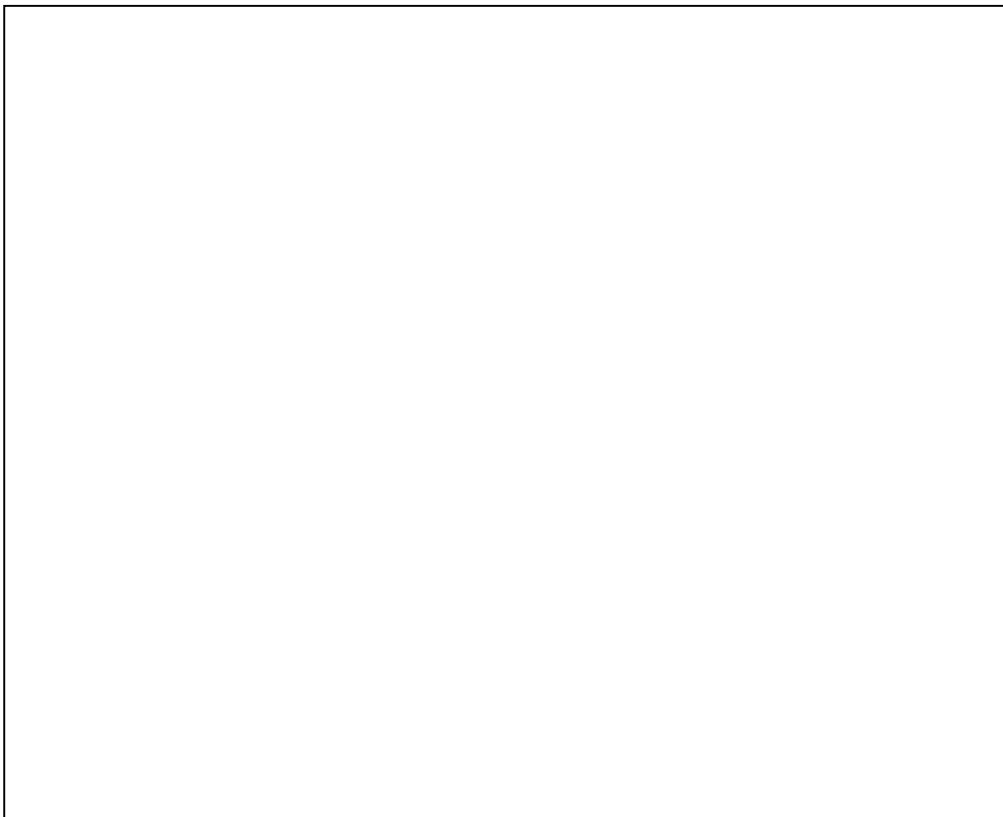


图 5-7 停机后 Ellip082 超导段剩余辐射剂量率变化情况

- 图 5-5 为 HWR019 超导段（最大束流能量 44MeV，束流损失 1W/m）停机后，不同时间，距离束流中心线不同距离处的辐射剂量率。其中停机 30min，距离束流中心 1m 处的辐射剂量率为 105 $\mu$ Sv/h。
- 图 5-6 为 Spoke042 超导段（最大束流能量 171MeV，束流损失 1W/m）停机后，不同时间，距离束流中心线不同距离处的辐射剂量率。其中停机 1 天后，距离束流中心 1m 处的辐射剂量率为 110 $\mu$ Sv/h。
- 图 5-7 为 Ellip062 超导段（最大束流能量 350MeV，束流损失 1W/m）停机后，不同时间，距离束流中心线不同距离处的辐射剂量率。其中停机 1 天后，距离束流中心 1m 处的辐射剂量率为 420 $\mu$ Sv/h。
- 图 5-8 为 Spoke082 超导段（最大束流能量 500MeV，束流损失 1W/m）停机后，不同时间，距离束流中心线不同距离处的辐射剂量率。其中停机 1 天后，距离束流中心 1m 处的辐射剂量率为 411 $\mu$ Sv/h。

综上，加速器停止运行后，由于感生放射性较强，人员进入隧道和终端工作或维修都必须事先制定辐射防护方案，严格控制工作或维修时间，才能保证工作人员安全。

## 5.2.2 工作流程

### (1) 调试工作流程

本阶段加速器装置主要用于束流调试实验，其典型的工作流程见图 5-8。

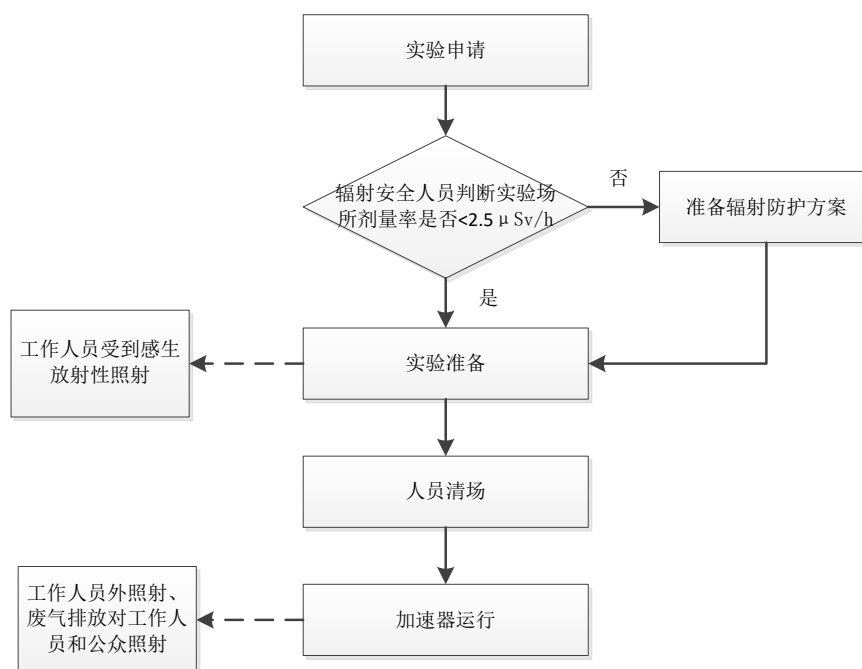


图 5-8 调试工作流程

从调试的工作流程可以看出，实验人员进入隧道进行实验准备时，可能会受到元器件、设备部件、空气等中的感生放射性核素照射，当场所感生放射性可能会超过工作人员工作场所剂量率控制目标（ $2.5\mu\text{Sv/h}$ ），需制定辐射防护方案，佩戴个人剂量计，设置个人剂量报警值，达到报警值则立即停止工作离开，确保实验工作人员年受照剂量不超过  $5\text{mSv/a}$ 。

加速器运行期间，其产生的次级束会对经过隧道上方（加速器设备厅）的人员产生直接外照射，释放的含放射性气体会对场内工作人员和场外公众产生照射。

## （2）维修/维护工作流程

维修/维护期间的典型工作流程见图 5-9。

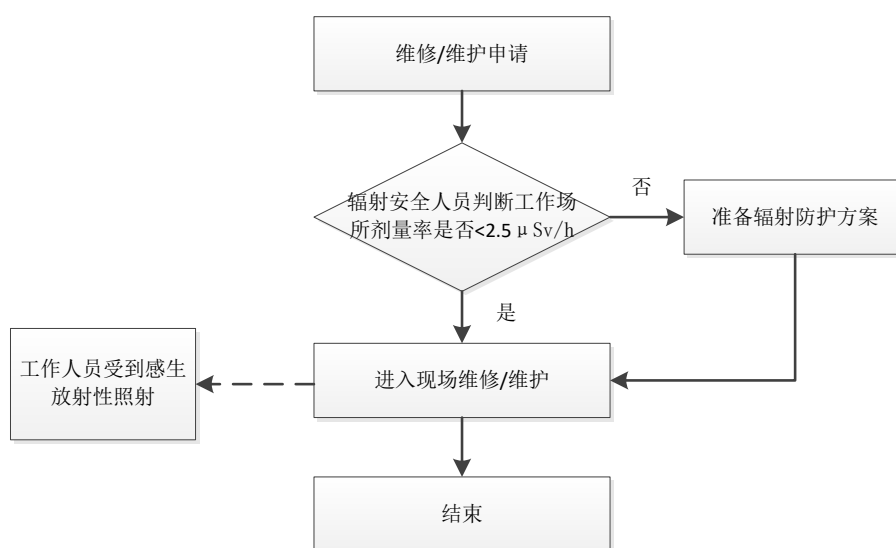


图 5-9 维修/维护工作流程

维修/维护人员进入现场进行维修/维护时会受到元器件、设备部件、空气等中的感生放射性核素照射，当场所感生放射性可能会超过工作人员工作场所剂量率控制目标（ $2.5\mu\text{Sv/h}$ ），需制定辐射防护方案，佩戴个人剂量计，设置个人剂量报警值，达到报警值则立即停止工作离开，确保实验工作人员年受照剂量不超过  $5\text{mSv/a}$ 。

### 5.2.3 人员受照剂量

根据 3.2 节工艺流程分析，本节将计算和评价加速器调试工况下工作人员和公众受照剂量。加速器运行产生的辐射源项包括瞬发辐射、缓发辐射（感生放射性），辐射源通过贯穿辐射途径对地面工作人员产生辐射影响，工作场所空气中的感生放射核素还将以气载流出物的形式进入大气环境，主要通过空气浸没外照射和吸入内照射途

径对工作人员和公众产生辐射影响。

### 5.2.3.1 辐射工作人员

和加速器相关的工作人员均按辐射工作人员管理，主要包括隧道内的调试维修人员和地面操作工作人员，隧道内的调试维修人员由于受到剩余辐射的照射，其工作区域剂量率较高，且没有固定的工作区域和工作内容，工作时间也不固定，无法估算正常的照射剂量，将按照特殊批准的方式开展工作，每次工作前制定辐射防护方案，根据隧道内布置的剂量率监测设备监测结果估算工作区域剂量率，按照年受照剂量 4mSv/a 的剂量管理目标值，制定个人工作时间，工作时佩戴个人剂量计，设置累计剂量报警值，达到工作时间或剂量计报警，则停止工作，离开工作区域，通过辐射防护管理确保工作人员年受照剂量不超过 5mSv/a。

地面操作工作人员主要包括加速器测试大厅以及控制室（B09）操作员、超导综合测试（B06）人员、低温中心（B08）人员、加速器设备大厅（B03）人员和室外其他工作人员。

工作人员受照剂量途径：

- 加速器运行时直接照射；
- 活化空气浸没外照射；
- 活化空气吸入内照射。

#### （1）直接外照射影响

加速器测试大厅以及控制室（B09）操作员、超导综合测试（B06）人员和低温中心（B08）人员的居留因子按 1 取值，加速器设备大厅（B03）主要为设备，人员进入调试和维修，居留因子取 1/4，室外为场内道路，居留因子取 1/16。室内保守的人员位于最大剂量率处，则各类工作人员剂量计算见表 5-4。

表 5-4 辐射工作人员外照射剂量估算表

人员类型	工作区域	最大剂量率， μSv/h	年工作时间， h	居留因子	年受照剂量， mSv
B03 工作人员	B03 室内	1.82	2000	1/4	0.91
B06 工作人员	B06 室内	0.1	2000	1	0.2
B08 工作人员	B08 室内	0.01	2000	1	0.02
B09 工作人员	B09 室内	0.52	2000	3/4	1.28
	转运通道上方	1	2000	1/4	
室外工作人员	室外道路	1.73	2000	1/8	0.43

## (2) 活化空气辐射影响

加速器调试运行期间，主、副隧道将产生活化空气，活化空气经过滤后从位于排风机房的排气筒排放，对场内工作人员会产生一定的浸没外照射和吸入内照射。采用《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ2.2-2018）附录 A 推荐的估算模式（AERSCREEN 程序）对厂内放射性核素浓度进行保守估算。

基于本项目通风空调系统设计，保守选用主隧道正常运行通风工况进行计算。参考厂址附近太平岭核电厂气象塔观测数据，确定平均风速取 3.8m/s、稳定度取 D 类。具体计算所用的参数见表 5-5。

表 5-5 大气估算模式计算参数

计算参数	值	计算参数	值
排气筒高度	18.0m	排放气体温度	20℃
排气筒内径	1.3m	环境气温	20℃
排放速率	1.84m/s	平均风速	3.8m/s
排气量	8775m <sup>3</sup> /h	稳定度	D 类

根据以上参数和工况输入后的计算结果：本项目放射性气体排放最大落地浓度点为 170m，最大污染物活度为排放口处的 0.0274%，因此人员受照射剂量也为排放口处的 0.0274%。

活化空气排放造成的辐射影响主要途径包括了空气浸没外照射和吸入内照射两种，计算模型如下。

## — 空气浸没外照射剂量

空气浸没外照射剂量计算公式来自国际原子能机构 IAEA 第 19 号报告：

$$D_{EA} = t \times \left( \sum_i x_i \cdot DF_{EAi} \cdot F \right)$$

式中：

$D_{EA}$ —计算点处人员浸没于污染的半无限烟云中受到的有效剂量，Sv/a；

$x_i$ —计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m<sup>3</sup>；

$DF_{EAi}$ —浸没于半无限烟云中放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，(Sv) / (s·Bq/m<sup>3</sup>)，取自美国环保署资料 EPA-402-R-93-081；

$F$ —建筑物的屏蔽因子，无量纲，保守取 1；

t—不同能量工况条件下加速器出束时间，s/a。

一 吸入内照射剂量

空气吸入内照射剂量计算公式来自国际原子能机构 IAEA 第 19 号报告：

$$D_{EI} = t \times \left( \sum_i x_i \cdot DF_{EII} \cdot B_r \right)$$

式中：

$D_{EI}$ —计算点处人员吸入污染空气造成的有效剂量，Sv/a；

$x_i$ —计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m<sup>3</sup>；

$DF_{EII}$ —吸入放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

$B_r$ —人的呼吸率 m<sup>3</sup>/h，；

t—不同能量工况条件下加速器出束时间，h/a。

对于上述计算的参数选取如下：

- 1) 保守假设工作人员在加速器运行期间（年累计 90 天）一直待在最大落地点，且不考虑排放口活化空气在输运过程中的衰变；
- 2) 呼吸率取自标准 GBZ/T200.3-2014 中推荐的成年男性呼吸率 1.5m<sup>3</sup>/h；
- 3) 惰性气体空气浸没外照射剂量转换因子以及其它各类放射性核素的吸入和食入内照射剂量转换因子取自《电离辐射防护和辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- 4) 除惰性气体外其它核素的空气浸没外照射剂量转换因子取自联邦导则报告 FGR No.12（EPA-402-R-93-081）。

由此计算工作人员空气活化所致年受照剂量结果见表 5-6，空气浸没外照射产生的年剂量为 0.91 μSv/a，空气吸入内照射产生的年剂量为 0.06 μSv/a，活化气体对场内工作人员的最大照射剂量为 0.97 μSv/a。

表 5-6 工作人员空气活化所致年受照剂量

核素	排放口活度浓度 Bq/m <sup>3</sup>	呼吸率 m <sup>3</sup> /h	吸入转换因子 Sv/Bq	外照射转换因子 Sv/ (s. Bq/m <sup>3</sup> )	吸入内照射 μ Sv/a	浸没外照射 μ Sv/a
Be-7	4.82E+01	1.5	5.00E-11	2.36E-15	6.19E+00	7.01E-01
Ar-41	5.56E+03	1.5	0.00E+00	6.13E-14	0.00E+00	2.10E+03
H-3	2.41E-02	1.5	4.50E-11	3.31E-19	2.78E-03	4.92E-08

核素	排放口活度浓度 Bq/m <sup>3</sup>	呼吸率 m <sup>3</sup> /h	吸入转换因子 Sv/Bq	外照射转换因子 Sv/ (s. Bq/m <sup>3</sup> )	吸入内照射 μSv/a	浸没外照射 μSv/a
Cl-38	4.82E+02	1.5	4.50E-11	7.99E-14	3.81E+01	1.62E+02
Cl-39	6.55E+02	1.5	4.60E-11	7.35E-14	4.84E+01	1.86E+02
Ar-37	1.61E+00	1.5	0.00E+00	4.75E-20	0.00E+00	4.73E-07
P-32	2.01E+00	1.5	3.40E-09	5.47E-16	1.75E+01	6.76E-03
P-33	7.93E-01	1.5	1.50E-09	1.46E-17	3.06E+00	7.15E-05
S-35	2.12E-01	1.5	1.40E-09	3.16E-18	7.62E-01	4.13E-06
C-14	5.97E-06	1.5	2.00E-09	2.65E-18	3.07E-05	9.75E-11
Si-31	4.99E+01	1.5	7.40E-11	4.94E-16	4.80E+00	7.68E-02
排风口浓度受照剂量					1.19E+02	2.45E+03
最大落地点浓度受照剂量					5.88E-02	9.11E-01

### (3) 受照剂量总和

由表 5-4 和表 5-6 可以看出, 同等时间内, 工作人员待在建筑物内比待在室外受到照射剂量大, 居留因子为 1 的场所不再考虑活化气体对工作人员的影响, 则综合表 5-4 和表 5-6, 辐射工作人员的年受照剂量见表 5-7。

表 5-7 辐射工作人员的年受照剂量

人员类型	工作区域	居留因子	年受照剂量, mSv	合计, mSv
B03 工作人员	B03 室内	1/4	0.91	0.91
	最大浓度落地点	3/4	0.00097	
B06 工作人员	B06 室内	1	0.2	0.2
B08 工作人员	B08 室内	1	0.02	0.02
B09 工作人员	B09 室内	3/4	1.28	1.28
	转运通道上方	1/4		
室外工作人员	室外道路	1/8	0.43	0.43
	最大浓度落地点	7/8	0.00097	

由表 5-7 可以看出, 加速器测试大厅以及控制室 (B09) 操作员受到的照射最大, 年受照剂量为 1.28mSv/a。

## 5.2.3.2 公众

### (1) 场内公众

对于场内从事非加速器相关工作的人员, 例如保洁员、保安等按场内公众考虑, 其活动区域在辐射工作区 (控制区和监督区) 外, 其受照射居留因子取 1/16, 其能达

到的剂量率最大的地方是 B06 室内，剂量率取  $0.1\mu\text{Sv/h}$ ，年工作时间 2000h，则每年受到的外照射剂量为  $0.012\text{mSv/a}$ 。

其他时间在室外受到活化气体的照射剂量最大不超过  $0.97\mu\text{Sv/a}$ ，合计场内公众年最大受照剂量不超过  $0.013\text{mSv/a}$ 。

## (2) 场外公众

场外公众考虑最近的坑口村居民，受照途径包括：

- 活化空气浸没外照射；
- 活化空气吸入内照射。

坑口村距离厂址300m，采取与工作人员空气剂量计算相同的模型，其污染物活度浓度为排放口处的0.0245%，同样保守考虑加速器最大运行90天对公众的影响，则坑口村公众年受照射剂量为 $0.87\mu\text{Sv/a}$ 。

综上所述，隧道内工作人员年受照剂量最大为 $4\text{mSv/a}$ ，其他辐射工作人员年受照剂量最大为 $1.28\text{mSv/a}$ ，小于辐射工作人员年受照剂量约束值 $5\text{mSv/a}$ 。场内公众年受照剂量最大为 $1.3\mu\text{Sv/a}$ ，场外公众年受照剂量最大为 $0.87\mu\text{Sv/a}$ ，小于公众受照剂量约束值 $0.1\text{mSv/a}$ 。

## 5.2.4 非辐射环境影响

### (1) 声环境

加速器运行期间的主要噪声源主要是来自冷却水泵、空调机组、冷却塔等动力机械，除冷却塔外，其他设施均位于室内，有构筑物实体屏障，且离场址边界距离均超过 100m，经过实体屏障和距离衰减，可以满足《工业企业厂界噪声排放标准》（GB 12348-2008）的要求。

### (2) 水环境

加速器运行期间会产生一定量的生活废水，达标后排入城市污水管网，不直接排入环境。

加速器设备安装和调试期间会产生一定量的实验室废水（主要为清洗废水），全部进入实验室中和池预处理达标后排入城市污水管网，不直接排入环境。

### (3) 大气环境

超导腔洁净工艺中会产生一定量的酸性废气，参考同样工艺的“中国科学院近代物理研究所超导腔实验室建设项目环境影响报告表”的评价，经废气处理系统处理后



达标排放，年排放量很小，可满足环境保护的要求。

#### (4) 固体废物

针对生活垃圾，建设单位将通过设立一定数量的垃圾点，对各种垃圾及时收集，分类处理，尽早清运，并委托处置等手段，不会对场址周围环境造成不利影响。

项目调试期间会产生一定数量的工业废物和危险废物，产生的固体废物根据特性分别收集和暂存，委托有资质的单位外运处理，不会对环境造成不利影响。

#### (5) 化学品

本项目中设备的安装、单体调试、清洗等需要使用部分清洗剂、浓硝酸、氢氟酸、磷酸、氢氧化钠、浓硫酸等化学品，全部采用市场外购，由生产厂家直接送至实验室配液系统酸液桶内，原则上不储存，特殊情况下少量储存在厂房内的危险化学品库中。化学品使用相关系统内部设置围堰，可用于收集可能泄漏的化学品，危险化学品库进行防渗处理。化学品的暂存和使用按照国家相关要求和项目实际制定严格的使用规程，不会对环境造成不利影响。

### 5.3 事故影响分析

#### 5.3.1 人员误入（滞留）事故

加速器运行，人员误入（滞留）控制区时的事故是有可能造成人员伤亡的重大事故，加速器的安全联锁和安全控制系统能够满足独立性、多重性和冗余性的要求，可防止该类事故的发生，运行单位应严格执行安全联锁管理要求和定期开展安全联锁系统检查，确保安全联锁系统正常运行，防止该类事故的发生。

#### 5.3.2 工作人员超剂量照射事故

在加速器隧道中由于元器件的活化，会产生较高辐射剂量的区域，而工作人员在必要的情况下需进入这些高剂量辐射区域进行维修维护活动，如果对这些活动的安全管理失效，可能会发生工作人员超剂量照射事故。

运营单位需严格监测辐射场所的剂量水平并控制工作人员的活动，避免发生超剂量照射事故，该类事故不会对加速器外的人员和环境造成影响。

一旦发生超剂量事故，需采取必要的应急措施，可最大限度的保护辐射工作人员的人生安全：

- (1) 一旦发生工作人员超剂量照射事故，立即对受照人员进行医学检查；
- (2) 立即停止加速器运行，查找发生事故原因，制定防止再次发生该类事故的措施；
- (3) 经辐射安全管理组织评估，并对相关人员进行培训宣贯后，批准加速器运行。

### 5.3.3 冷却水泄漏事故

加速器隧道等区域内设置单独的排水系统，用以收集这些区域的事故排水和检修排水，并通过重力自流到收集水池，共两个，位于加速器主隧道的两端，设计容量为 $6\text{m}^3$ /个；此外，本项目还设计有漏水检测系统，及时发现漏水情况。

超导直线加速器装置漏水检测与报警系统基于近代物理研究所自主研发的漏水检测与报警控制器，该控制器具有漏水点精确定位的特点，具有重复利用、多点同时检测报警的功能，对于现场各处的滴水、小漏水及渗水可以起到预警作用，提醒维护人员及时处理报警点的各种问题，防止由跑冒滴漏形成的大漏水，避免大事故。超导直线加速器漏水报警点的布点原则按照电源间每台电源至少2个传感器（检测进出水阀门），束线每一米一个传感器（以阀门量为准）的密度铺设，保证整个装置区域全覆盖，无检测盲区。

应急措施主要包括：

- (1) 一旦发生漏水报警，立即关闭加速器；
- (2) 查找漏水点，采取补救措施，防止形成大的漏水事故；
- (3) 报告生态环境部门，对集水池中的冷却水进行监测；
- (4) 达到豁免标准后进行排放。

针对冷却水泄漏的应急措施是可行的，可确保冷却水泄漏事故不会对环境造成污染并能有效控制事故扩大。

### 5.3.4 空气过滤器失效事故

加速器隧道内空气过滤设计为运行过程中的连续、循环过滤，而不是排放前一次过滤，有效保证了隧道空气中活化气体处于较低的浓度水平，空气过滤器设计了失效监测系统，一旦过滤器失效，将停止加速器运行。

由于活化气体排放量很少，根据计算结果，即使所有气体不过滤，对环境的影响

也是可以接受的，因此，空气过滤器失效事故不会对环境造成污染。

应急措施：

- (1) 发现空气过滤器失效，立即停止加速器运行；
- (2) 更换空气过滤器。

综上所述，超导直线加速器装置可能发生的各类事故都不会对环境造成污染，对于可能发生的事故采取的应急措施合理可行，可以有效控制事故扩大，满足应急响应要求的要求。

## 第六章 辐射安全管理

### 6.1 机构与人员

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令 第 449 号）等相关法规和文件的要求，使用 I 类射线装置的单位申请辐射安全许可证，应有专门的辐射安全和防护管理机构或者专职/兼职辐射安全管理人员，并配备必要的防护用品和监测仪器。

为保障项目工作人员与公众的健康和安全，保护项目所在区域周围环境，结合加速器辐射安全与防护工作的实际情况，拟设置辐射安全与环境保护管理机构，制定并实施相应的辐射安全规章制度。

拟设置涵盖 CiADS 项目的辐射安全与环境保护管理委员会（以下简称“委员会”），全面负责辐射安全和环境保护工作，对辐射安全和环境保护相关管理制度的执行进行监督检查。

本阶段主要考虑加速器的辐射安全和环境保护工作，委员会主要成员包括建设单位法人代表、加速器项目分管领导和各相关部门负责人等。

委员会的主要职责是对以下事宜进行调查、协调、审议、建议和决策：

- 辐射安全管理工作基本方针的制定；
- 辐射安全规章制度的审定；
- 辐射相关装置或设施的安全审查；
- 向上级审管部门申请、汇报或提交相关资料；
- 在异常或事故情况下，采取紧急措施和进行事故调查；
- 其它辐射安全相关重大事项。

也拟设置专门的部门负责加速器运行期间的辐射安全和防护工作的统一监督管理，其主要职责是：

- 贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，建立辐射安全规章制度；
- 辐射安全系统的运行和维护，辐射安全措施的实施；
- 辐射监测与评价；
- 放射性废物的监测处理；
- 放射性废物库的辐射安全管理；

- 辐射工作人员的健康管理；
- 辐射安全教育和培训；
- 参与辐射事故应急处置，以及其他与辐射安全相关的工作。

其他各相关部门设专职或兼职辐射安全员，在部门负责人的领导下，根据规定开展相关工作：

- 认真学习辐射安全相关知识，积极参加主管部门组织的培训；
- 对本部门工作人员进行放射性防护知识和法规的宣传教育；
- 协助制订和督促执行本部门的安全操作规程和防护措施；
- 负责收发本部门人员防护用品和个人剂量计；
- 规定的其他工作。

为保证辐射安全工作的开展，根据《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）的相关要求，建设单位将配备必要的辐射安全工作人员，其中辐射防护负责人为辐射安全关键岗位，需为注册核安全工程师，最少在岗人数1名。

## 6.2 辐射安全管理规章制度

为保障加速器运行的辐射安全，保护工作人员、公众和环境，根据项目特点，建设单位拟针对加速器建立的相关规章制度将主要包括：

- 《辐射安全管理规定》，给出辐射防护原则、辐射安全组织体系及职责、剂量管理体系、辐射控制原则和措施、辐射监测要求和计划、放射性废物的收集和贮存、放射工作人员健康管理、教育和培训等内容。
- 《加速器运行辐射安全规定》，规定加速器开机、运行、维修和维护等阶段的辐射安全管理要求和实施措施，包括安全联锁、安全保卫、事故操作等。
- 《放射性废物暂存库安全管理规定》，明确放射性废物暂存库的安全管理要求，包括收储、暂存、出库等方面。
- 《加速器操作管理规程》，规定加速器的操作规定。
- 《加速器检修维护管理规定及操作规程》，规定加速器检修和维护的流程，包含了检修前准备、检修实施、检修后的工作流程和防护要求。
- 《加速器运行及放射性物品台账管理规定》，规定对加速器的使用和放射性物品建立台账，对放射性废物产生量、处理方法、排放量进行统计、记录。

- 《辐射工作人员培训和授权管理规定》，规定辐射工作人员的岗位要求、培训要求和授权规定等。
- 《辐射环境监测大纲》，明确加速器日常辐射环境监测的目的、项目、布点、频次、设备要求、质量保证和结果报送等内容，以及含放射性废水和固体废物解控和外运时的监测要求。
- 《个人剂量监测管理规定》，明确工作人员个人剂量监测和管理方面的要求。

此外，建设单位也将制定《加速器调试期间的辐射安全管理规定》，针对加速器建造和调试阶段的工作特点，分阶段给出调试期间的辐射安全管理要求和管控措施。

总体而言，建设单位拟建立的相关辐射安全管理规定可较全面地覆盖辐射防护制度、操作规程、岗位职责、安全保卫、设备维护和检修、人员培训、三废处理等方面，在结合项目特点建立和健全上述辐射安全相关的规章制度后，可以满足法律法规要求，确保加速器调试和运行后的辐射安全管理，建设单位承诺在申请辐射安全许可证前建立和完善相应的管理制度并发布生效。

## 6.3 辐射监测

辐射监测主要包括工作场所剂量监测、辐射环境监测、个人剂量监测和流出物监测。

### 6.3.1 工作场所剂量监测

区域辐射监测子系统实时监测和显示装置区内各重要区域的辐射水平和空气放射性水平，提供相关的辐射水平信息供有关人员分析、查找和判断可能发生的设备故障，以便及时处理，保证装置的安全运行和科研人员免受不必要的辐射照射。

区域辐射监测子系统主要由探测器、数据采集单元、内部局域网、监控计算机、中央管理计算机与辐射防护数据库组成。系统结构示意图见图 6-1。

- 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，向辐射安全连锁系统提供剂量报警信号；

- 中央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（ $\gamma$ /中子）。
- 在人员出入的监督区和控制区，且布置的辐射监控仪表不能准确的探测区域，采用便携式辐射监测仪表进行测量。

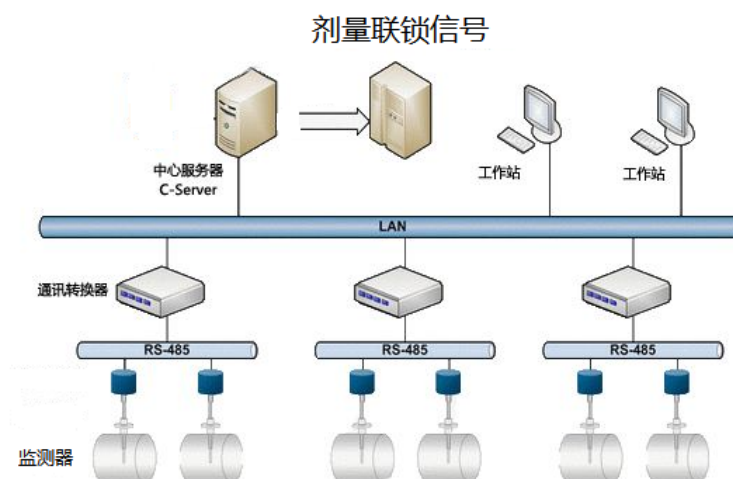


图 6-1 区域辐射监测子系统结构示意图

本项目设计布置探测点共 24 个，其中主隧道布置 7 个监测点位（M1~M7），副隧道布置 7 个监测点位（M8~M14），主隧道地面两个地面入口内布置 M15 和 M16 监测点，加速器设备厅内副隧道两个入口内布置 M17 和 M18 监测点，加速器设备厅中布置 6 个监测点位（M19~M24），加速器中央控制室内布置 1 个监测点位（M25），加速器测试大厅内的转运盖板上方布置 1 个监测点位（M26），每个监测点实时监测中子和  $\gamma$  剂量率。

探测器主要包括固定式中子探测器、固定式  $\gamma$  探测器和便携式辐射仪表。

- 固定式中子探测器：加速器区域的中子辐射监测仪表具有宽能区和高量程特点，宽能区中子辐射监测仪的基本参数为：
  - 测量的中子能量范围为热中子~5GeV；
  - 中子剂量率范围为 0.01 $\mu$ Sv/h~100mSv/h；
  - 中子灵敏度为 0.84cps/（ $\mu$ Sv/h）；角度响应为 $\pm$ 20%。
- 固定式  $\gamma$  探测器：采用高压电离室进行测量，具体参数为：
  - 测量的当量剂量范围为 100nSv/h~1Sv/h；
  - 能量范围为 30keV~7MeV；

- 灵敏度为 250fA/ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ;
- 接收角度为 $-45^\circ \sim +90^\circ$ ;
- 能量相对响应为 $\pm 30\%$ 。

— 装置区便携式辐射仪表：包括便携式中子剂量仪、便携式 $\gamma$ 剂量仪、便携式 $\gamma$ 能谱仪和便携式 $\gamma$ 成像仪。

- 便携式中子剂量仪主要由聚乙烯慢化体和  $^3\text{He}$  管组成，具体参数：剂量率测量范围为 30nSv/h~100mSv/h；能量测量范围为热中子~20MeV；中子灵敏度为 0.79cps/ ( $\mu\text{Sv/h}$ )。
- 便携式  $\gamma$  剂量仪主要由两个高低量程的 GM 管组成，通过计数方式得到 $\gamma$ 射线的剂量率，主要参数：剂量率测量范围为 10nSv/h~10Sv/h；能量测量范围为 30keV~5.0MeV；灵敏度为 960cpm/ ( $\mu\text{Sv/h}$ )（低量程 GM 管）和 1.56cpm/ ( $\mu\text{Sv/h}$ )（高量程 GM 管）。
- 便携式  $\gamma$  能谱仪通过半导体锗材料对 $\gamma$ 射线进行探测，可分析放射核素的种类和强度，具体参数：相对探测效率为 40%；能量分辨率为 $\leq 760\text{eV}$ （5.9keV Fe-55）和 $\leq 2.0\text{keV}$ （1.33MeV Co-60）；峰康比为 $\geq 59: 1$ ；能量响应范围为 3keV~10MeV。
- 便携式 $\gamma$ 成像仪通过碲锌镉晶体探头对 $\gamma$ 射线进行成像测量，可用于寻找辐射热点和测量辐射剂量，具体参数：能量测量范围为 20keV~1400keV；角分辨率为编码掩膜成像模式下 3.5 度；剂量率测量范围为 1nSv/h-100mSv/h。

### 6.3.2 辐射环境监测

CiADS 项目将统筹考虑整个项目的辐射环境监测方案，针对加速器调试阶段的辐射环境监测，主要采用巡测和取样监测开展，初步方案如下。

#### 6.3.2.1 瞬时剂量率

采用便携式仪器对加速器周边进行中子、 $\gamma$  剂量率进行巡测，调试开始后每季度



1 次，并在调试工况期间增加测量。

### 6.3.2.2 地下水监测

为保证加速器运行对地下水的活化不会造成环境污染，计划在场址边界附近设置监测水井，每年对地下水监测 1 次，监测项目为氡和 Be-7。

水井的设置要求要满足以下要求，并结合整个场区的规划统筹考虑：

- 按地下水的流向，水井应位于加速器下游；
- 水井的深度应不小于隧道的底部深度；
- 水井应有措施防止雨水或地表水直接进入。

### 6.3.2.3 土壤监测

在加速器边界四周设置 4 个土壤监测点位，监测项目为 Be-7，监测频次为 1 次/年。

### 6.3.2.4 辐射环境监测大纲

依据相关标准的要求和本项目特点，制定加速器调试期间的辐射环境监测大纲见表 6-1，其中土壤和地下水样品委托有资质的单位监测。

表 6-1 加速器项目辐射环境监测方案

监测对象	监测项目	监测点位	监测频次	监测方式
贯穿辐射	中子剂量率、 $\gamma$ 剂量率	加速器设备厅周围	1 次/季度	便携式剂量率仪 巡测
土壤	Be-7	加速器设备厅周围 4 个方位	1 次/年	取样分析
地下水	氡、Be-7	场区/场区附近	1 次/年	取样分析

### 6.3.2.5 环保竣工验收监测

为有效落实环境保护“三同时”要求，确保环境保护设施效能的有效性，依据《建设项目环境保护管理条例》的要求，建设单位在建设完成后，将自主开展竣工环境保护验收工作，加速器的环保竣工验收工作将与 CiADS 项目同步开展。

### 6.3.3 流出物监测

加速器调试期间主要放射性流出物监测采用取样监测方式，在排气筒安装取样设备，测量总  $\alpha$  和总  $\beta$ ，计划每季度取样监测一次；冷却水在正常情况下为闭式循环，计划每半年取样监测一次，测量 H-3 和总  $\beta$ ，对于泄漏或检修排水时，进入收集池，取样监测，在满足解控要求，经审管部门批准后排放。

### 6.3.4 个人剂量监测

个人剂量监测同时监测 X /  $\gamma$  剂量和中子剂量，检测周期不超过 3 个月。

### 6.3.5 监测仪器设备

为开展上述环境监测和流出物监测，本项目拟配备相应的监测仪器设备，见表 6-2。

表 6-2 本项目拟配备的监测设备

设备名称	主要特性参数	设备名称	主要特性参数
中子巡测仪	灵敏度 $\geq$ 0.84cps/uSv/h 能量范围： 热中子-20MeV	便携式表面污染测量仪	AM-241(探测效率 >24%)； Sr-90(探测效率 >42%)
$\gamma$ 巡测仪	测量范围 10nSv/h-1Sv/h，能量范围： 20keV-3MeV	低本底高纯锗谱仪	放射性样品（包括环境、冷却剂、辐照样品、气溶胶等）的实验室细致测量与分析，相对探测效率： $\geq$ 40%（1332keV），能量分辨率： $\leq$ 925eV（122keV）， $\leq$ 1.8keV（1332keV）；能量响应范围： 40keV~10MeV；
电子个人剂量报警仪	能量范围 15keV-7MeV，读取并记录个人剂量，中子个人剂量仪：能量范围 25meV-15MeV，剂量范围 100 $\mu$ Sv/h-10Sv/h	低本底液闪谱仪系统	放射性液体样品的测量与分析
冷却水活度监测仪	$1.8 \times 10^3 - 5 \times 10^8$ Bq/m <sup>3</sup> ，80keV-80MeV	OSL 个人剂量累计监测与管理系统	用于监测 $\gamma$ 、中子、电子，配套有个人剂量计，及数据管理系统。

## 6.4 辐射事故应急

本加速器为I类射线装置，按照国家相关要求，建设单位应设置辐射应急响应组

织，并制定《辐射事故应急预案》，做好相应的应急准备工作。

考虑到加速器是 CiADS 项目的重要组成部分之一，且本次评价对象主要为加速器的建造和调试，且加速器的建设周期较长和分阶段调试的特点，因此，建设单位制定初步的《加速器调试期间的辐射事故应急预案》，主要包括：

### （1）总则

为了加强加速器调试期间的安全防护和监督管理，促进装置的安全应用，有效预防并及时控制和消除潜在的辐射事故，规范突发辐射事故的应急处置工作，提高应对辐射事故的能力，保障人员健康，维护环境安全，按照《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关法律法规的要求，结合本单位设施的特点，制定本预案。

本预案适用于加速器调试期间发生的辐射事故。

### （2）辐射事故分级

根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级，结合本单位装置的特点，各个等级分别为：

- 特别重大辐射事故，是指射线装置失控导致 3 人以上（含 3 人）急性死亡。
- 重大辐射事故，是指射线装置失控导致 2 人以下（含 2 人）急性死亡或者 10 人以上（含 10 人）急性重度放射病、局部器官残疾。
- 较大辐射事故，是指射线装置失控导致 9 人以下（含 9 人）急性重度放射病、局部器官残疾。
- 一般辐射事故，是指射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射。

### （3）应急组织体系与职责分工

单位成立辐射事故应急响应指挥部，以单位法人代表为总指挥，加速器分管领导为副总指挥，安全与防护负责部门负责人及其他相关部门负责人为指挥部成员，其主要职责为：负责针对放射性事故的危害程度，发布预警等级，组织实施辐射事故应急预案，并将事故情况上报相关部门。

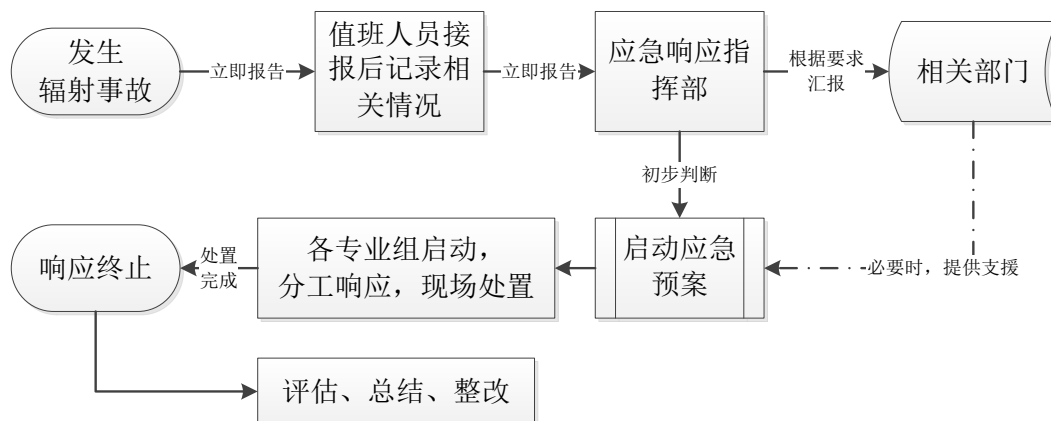
指挥部下设技术处置组、安全保卫组、后勤保障组和医疗救助及善后处置组等四个专业响应组，分别由相应部门人员组成：

- 技术处置组：负责辐射监测、确定污染范围、划定控制区域，装备防治次伤害物资；相应防护装备（服装、器具等）预备。

- 安全保卫组：负责维护现场秩序、人员出入控制等。
- 后勤保障组：负责应急响应物资的准备，应急期间的通讯、交通、水电等的保障。
- 医疗救助与善后处置组：负责事故人员的初步救治、安抚；设施的恢复等善后工作；对事故的基本情况定性定量描述，对整个事故进行评估，进行工作总结。

#### (4) 辐射事故应急响应措施

辐射事故应急响应流程如下图所示：



- 当发生辐射事故时，有关单位和现场人员应立即通过电话等各种方式报告安全与防护部门值班人员，值班人员记录相关情况（事故发生地点、时间、事故影响等）后，立即报告应急响应指挥部值班领导；
- 应急指挥部值班领导初步判断后立即启动辐射应急预案，通知应急响应指挥部其他成员和专业组启动，并根据要求向地方环保、公安等部门汇报，同时汇报上级主管部门，必要时请求外部支援；
- 各专业组到现场后根据事故现场实际情况提出事故处置方案，并按照制定的应急响应程序实施现场处置工作，并随时向应急响应指挥部汇报，发生较大及以上辐射事故时，应急响应指挥部相关成员到现场指挥；
- 事故处置期间的事故汇报工作按照地方生态环境部门辐射应急预案的要求严格实施，事故处置完成后响应终止；
- 善后处置组人员负责收集、整理所有应急日志、记录和相关书面信息，在应急响应指挥部的指导下编制应急总结报告，按规定提交相关部门；并提出相应的整改措施，并根据应急响应的实践修订应急预案。

#### (5) 应急响应能力的维持

### — 培训

本预案中规定的应急响应指挥部和各专业组人员均需要接受全面的初始培训，了解国家和地方对辐射应急准备和响应的要求和相关基本知识、了解各应急岗位的基本职责，掌握本岗位的技能要求，培训方式包括参加国家和地方组织的辐射事故应急培训和本单位组织的相关培训。

### — 演习

辐射事故应急演习分为专项演练和综合演习，专项演练可由应急指挥部和各专业小组分别开展，一般一年 1 次；综合演习为应急指挥部和各专业组人员共同参加，一般二年 1 次。

培训和演习应有计划、方案和程序，以及总结和报告。

### (6) 附则

应急预案应根据国家和地方法律、法规、标准和规章的要求，以及培训、演习和实际应急响应的实践及时进行修订。

从以上内容可以初步判断，预案结合自身特点给出了辐射事故应急响应组织、事故分级和响应措施、培训和演习等内容，总体符合相关法律和法规的要求，考虑到本项目的实际，该预案在后续工作应进一步按照加速器建设进展和调试方案进一步完善和优化，明确应急人员的具体安排、细化应急物资的准备、及时开展应急人员的培训和演习，并与省市辐射应急预案做好衔接，建设单位承诺在申请辐射安全许可证前修订完成《加速器调试期间的辐射事故应急预案》和相应的应急响应执行程序，并根据 CiADS 项目的建设完成整个项目的《辐射事故应急预案》。

## 6.5 辐射安全管理满足相关要求的分析

### 6.5.1 与《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》相符性分析

本项目与《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（HAF 801-2019）的符合性分析见表 6-2。

表 6-3 与《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》相符性分析

《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求	本项目落实情况	是否符合
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	拟设立辐射安全与环境保护管理委员会，并承诺根	符合

《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求	本项目落实情况	是否符合
辐射安全与环境保护管理工作；其他辐射工作单位应当有1名具有大专以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作；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。	据要求设立辐射安全岗位，并由注册核安全工程师担任。	
从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。	承诺在管理制度中提出从业资格要求，并按要求参加培训 and 考核，合格后上岗。	符合
放射性同位素与射线装置使用场所所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	分区管理，并设计有辐射安全防护系统。	符合
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。使用非密封放射性物质的单位还应当有表面污染监测仪。	设计了辐射监测系统并配备了相应的仪器；设计中考虑了个人剂量监测报警设备。	符合
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。	根据项目特点拟编制相应管理程序。	符合
有完善的辐射事故应急措施。	提出了初步的应急辐射事故应急预案，并承诺配备相应的设备。	符合
产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	加速器调试期间产生的三废都得到了合理的处置。	符合

建设单位在后续工作中应根据承诺完成相应的工作。

### 6.5.2 与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》相符性分析

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（HAF 802-2011）对使用射线装置的单位提出了具体要求，本项目与要求的对照分析见表 6-3。

表 6-4 与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》相符性分析

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求	本项目落实情况	是否符合
<p>第五条 生产、销售、使用、贮存放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定设置明显的放射性标志，其入口处应当按照国家有关安全和防护标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全联锁、报警装置或者工作信号。</p> <p>射线装置的生产调试和使用场所，应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措</p>	设计有辐射安全防护系统。	符合

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求	本项目落实情况	是否符合
施。		
<p>第六条 生产、使用放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定采取有效措施，防止运行故障，并避免故障导致次生危害。</p>	<p>通过设计优化和管理措施保障加速器安全运行。</p>	<p>符合</p>
<p>第九条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。</p>	<p>制定了初步的环境监测大纲，采用自主监测和委托监测的方式开展。</p>	<p>符合</p>
<p>第十一条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当加强对本单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况的日常检查。发现安全隐患的，应当立即整改；安全隐患有可能威胁到人员安全或者有可能造成环境污染的，应当立即停止辐射作业并报告发放辐射安全许可证的环境保护主管部门（以下简称“发证机关”），经发证机关检查核实安全隐患消除后，方可恢复正常作业。</p>	<p>拟制定相应的管理制度进行控制。</p>	<p>符合</p>
<p>第十七条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲，对直接从事生产、销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗。</p>	<p>承诺在管理制度中提出从业资格要求，并按要求参加培训和考核，合格后上岗。</p>	<p>符合</p>
<p>第二十三条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测；发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当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。</p>	<p>拟制定符合要求的个人剂量管理程序，并严格实施。</p>	<p>符合</p>

建设单位在后续工作中应根据承诺完成相应的工作。

## 第七章 利益-代价简要分析

### 7.1 利益分析

#### 7.1.1 极大提升我国核能技术的自主化程度

加速器驱动次临界系统是上世纪核科学技术发展中两大工程—离子加速器和反应堆的“结合体”，目前还没有建成的先例。CiADS将是世界首台MW级加速器驱动次临界系统原理验证装置。利用CiADS开展加速器-散裂靶-反应堆耦合系统的集成技术和性能研究，优化技术路线，为加速器驱动嬗变试验装置和工业示范装置的建设奠定坚实的基础。相关研究将极大的促进和发展我国核能领域的设计和建造技术，提升我国核能技术的自主化程度，推动和帮助我国众多民用和国防科技的自主化发展。

#### 7.1.2 极大带动应用研究和前沿技术的发展

CiADS计划的实施，将强力推进我国高能强流超导直线加速器技术的发展与应用及第四代反应堆的研发：创新设计的高功率散裂靶与高能强流超导直线加速器结合，将催生新一代高功率中子源，有力促进中子科学、材料科学等基础科学研究和中子应用技术开发；铅铋冷却次临界反应堆的建设，将为新型模块化先进反应堆的研发奠定重要的基础。

#### 7.1.3 有利于未来人才培养

作为国家重大的科技基础设施，CiADS建成后将吸引海内外人才，成为我国核能科学与技术领域研究及应用人才培养的基地之一。

#### 7.1.4 有利于积极推动资源共享

以CiADS项目为基础，中国科学院与中广核集团及原子能研究院共同签署科技合作框架协议，根据“协议”，今后双方将建立长期战略合作关系。按照国家建立“以企业为主体、市场为导向、产学研结合”的自主创新体系要求，中国科学院将在核能先进技术的核心能力建设、燃料后处理技术路线、研究课题组织体系、技术创新体系、核电发展前景等方面提供技术咨询、人才培养和技术支持，积极推动资源共享，共同



推进我国核能先进技术和核物理等领域科技创新事业的发展。

CiADS作为加速器驱动次临界系统专用研究装置，将首先为国家战略需求服务，开展核废料安全处理处置的关键技术研究；同时将会吸引全世界开展ADS技术的研究人员来开展先进核能技术合作研究。

### 7.1.5 有利于促进区域经济发展

CiADS 项目作为一个大型科学工程，采取立足国内，自主创新的指导思想，通过科研单位与企业合作攻关的方式，将最大限度地在国内开发出项目建设所需高新技术产品，从而达到既节省项目经费、又提升国内相关产业技术水平的双赢局面。通过CiADS的建设，还可以在装备制造业、新材料、加速器相关技术等多个领域起到带动作用。CiADS在建设中需要研制大量非标部件和设备，而非标加工是提升厂家装备制造能力的一个主要途径。大量非标加工在落户地就近进行，将给地方企业带来良好的发展机遇，并可借此提升本土企业制造能力和竞争力。

### 7.1.6 有利于促进区域科技发展

CiADS 将建在广东省惠州市，对于落实全国科技大会精神和贯彻国家中长期科技发展规划、改变经济增长模式、实施科教兴国的战略目标起到很好的示范作用。有利于促进广东省经济、科技同步发展，增强我国南方地区的科技创新能力，同时也能提高与东南沿海国家与地区科技交流的水平与能力。

## 7.2 代价分析

### 7.2.1 经济代价

本项目建设总投资约137000万元，其中建筑投资约12200万元，设备投资107000万元，其他约17800万元。

### 7.2.2 社会和环境代价

场址用地不涉及居民搬迁，对社会的影响较小。

经本报告分析评价，本项目对环境的影响满足国家标准要求，对环境的影响是可接受的。

### 7.2.3 资源代价

项目用地为有限开发用地，主要包括场区内用地和场外用地。场区内用地主要为各构筑物及堆场，场外用地主要包括进场道路、施工准备区、回填区等，其中施工准备区、回填区属于租赁用地。

## 7.3 正当性分析

综上所述，加速器驱动嬗变研究装置（CiADS）超导直线加速器是国家重大科技基础设施建设项目，建成后，作为CiADS的核心系统之一，将为我国发展具有自主知识产权的ADS系统设计软件，积累装置运行数据和基础科学数据，为最终设计建设加速器驱动嬗变工业示范装置奠定基础，对于我国基础科学研究具有重要意义，项目是必要的、正当的。

## 第八章 结论与建议

### 8.1 项目工程概况

本项目建设加速器驱动嬗变研究装置（CiADS）超导直线加速器（以下简称“加速器”），是CiADS的核心系统之一，提供稳定的高功率的质子束流，功率设计要求的为2.5MW，加速器的动力学设计参数为500MeV，5mA，束流损失设计不超过1W/m。

加速器本体主要包括ECR质子源（ECRIS）、低能传输段（LEBT）、射频四极加速器（RFQ）、中能传输段（MEBT）、超导加速段（SC）和高能传输段及束流收集终端，本次建设不建设束流收集终端，而采用调试用束流收集器。

本项目的强流质子束流由离子源（ECRIS）产生（0.02MeV），经过低能传输段（LEBT）和射频四极加速器（RFQ）完成横纵向束流的成形和预加速（2.1MeV）；中能传输段（MEBT）将束流匹配到超导加速段，然后经过一系列的超导腔体加速到500MeV。

加速器涉及的构筑物主要加速器隧道（B01）、加速器设备厅（B03）、超导综合测试与维护大厅（B06）、低温中心大厅（B08）和加速器测试大厅（B09），配套建设的供电、水循环、通风空调、辐射防护、辐射监测、消防保卫等辅助设施，也将使用地方配套建设的压缩机厅、冷却设备大厅和场区主出入口等设施。

加速器的建设调试阶段分为三个不同的调试工况。

### 8.2 辐射安全与防护

#### 8.2.1 辐射防护

加速器采用了全地下隧道建设模式，隧道主体屏蔽和出入口局部屏蔽可以满足辐射工作场所剂量率不超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的设计要求；同时，对辐射工作场所进行了分区设置和管理，设计的安全联锁系统能够满足“分区控制”、“多重性”和“失效保护”的设计要求，可以达到保护辐射工作人员人身安全的目的。

#### 8.2.2 三废治理

加速器运行期间空气活化产生放射性核素经过滤后通过排气筒排入大气，保守估算废气对工作人员和公众的年照射剂量分别是 $0.97\mu\text{Sv/a}$ 和 $0.87\mu\text{Sv/a}$ 。

加速器调试运行期间，设备冷却水在循环过程中会受到照射而活化，加速器设备冷却水采用去离子水，采用闭式循环，不排放。

加速器调试运行期间产生的含放射性固体主要是活化的元器件，以及少量的水过滤树脂，收集于临时的放射性废物暂存间暂存，衰变后经生态环境部门监测达到免管浓度后，按普通废物处理，无法达到免管浓度的固体废物后期纳入基地统筹处置。

非放射性废气收集处理后经排气筒达标排放。

非放射性废水经废水处理设施处理达标后和生活污水一起排入城市污水管网。

非放射性固体废物建设固体废物收集暂存设施，最终委托有资质单位进行处理。

### 8.3 环境影响分析

#### (1) 辐射环境影响

##### 1) 职业照射

隧道内工作人员年最大受照剂量为 $4\text{mSv/a}$ ，其他工作人员年最大受照剂量为 $1.28\text{mSv/a}$ ，满足小于其剂量约束值 $5\text{mSv/a}$ 的要求。

##### 2) 公众剂量

场内公众年最大受照剂量为 $0.013\text{mSv/a}$ ，场外坑口村的公众的受照剂量 $0.87\mu\text{Sv/a}$ ，小于对公众的 $0.1\text{mSv/a}$ 的剂量约束值要求。

#### (2) 非放射性影响

##### 1) 声

本项目调试运行期间场址边界1米处噪声满足GB12348-2008的排放标准要求，也不会造成扰民现象。

##### 2) 水

本项目产生的生活污水和实验室废水纳入场区统一处理。

##### 3) 固体废物

针对生活垃圾，建设单位将通过设立一定数量的垃圾点，对各种垃圾及时收集，分类处理，尽早清运，并委托处置等手段，不会对场址周围环境造成不利影响。

项目调试期间会产生一定数量的工业废物和危险废物，产生的固体废物根据特性分别收集和暂存，委托有资质的单位外运处理，不会对环境造成不利影响。

#### 4) 电磁辐射

所有电磁辐射源自身采取了良好的屏蔽，可满足GB8702-2014的要求。

#### (3) 事故影响

本项目可能发生的辐射事故不会对环境造成污染。

总体而言，本项目的建设对环境的影响是可以接受的。

### 8.4 辐射安全管理

加速器为新建项目，建设单位将根据加速器的最终设计和运行方案，同时结合加速器调试的特点，成立辐射安全与环境保护管理机构、制定辐射安全管理规章制度、开展辐射环境监测和个人剂量监测等工作，并制定调试期间的辐射事故应急预案。建设单位在设施调试前完成以上切实可行的管理制度和应急预案，配备相应的装备和人员，可满足辐射安全管理要求。

### 8.5 建议和承诺

- (1) 在建设过程中，关注屏蔽设施的施工质量，确保屏蔽效果；
- (2) 结合分阶段调试的特点，有针对性地制定相应的辐射安全管理方案，增加必要的临时监测和防护措施，保障工作人员和环境安全；
- (3) 完善化学品暂存和使用、以及危险废物的安全管理，加强工艺废水和废气的排放管理。
- (4) 建设单位承诺在加速器调试前按国家法律法规和本报告的要求建立相应的辐射安全管理机构和辐射安全管理制度，以保证加速器安全运行。
- (5) 建设单位承诺在加速器调试前按本报告要求完善相应的辐射事故应急预案。

附件1:

# 中华人民共和国生态环境部

环审〔2018〕10号

## 关于加速器驱动嬗变研究装置环境影响报告书 (选址阶段)的批复

中国科学院近代物理研究所:

你所《关于上报装置项目环境影响报告书(选址阶段)中国科学院加速器驱动嬗变研究的函》(科近物核安函字〔2017〕2号)及相关文件收悉。经研究,批复如下:

一、加速器驱动嬗变研究装置位于广东省惠东县黄埠镇,是国家批准建设的“十二五”重大科技基础设施项目。项目的主要建设内容包括强流质子直线加速器系统、高功率散裂靶及与加速器和反应堆耦合系统、次临界快中子反应堆系统(热功率10MW)及配套设施。《加速器驱动嬗变研究装置环境影响报告

— 1 —

书（选址阶段）》（以下简称《报告书》）的格式和内容满足相关标准导则的要求，编制依据充分，使用的评价标准恰当。《报告书》对厂址环境及工程项目描述清楚，采用的评价模型成熟，选取的参数能够反映厂址的实际情况。《报告书》对施工及运行期间的环境影响分析合理，流出物监测和环境监测方案合理可行。

环境影响分析评价结果表明，加速器驱动嬗变研究装置运行和事故工况下对公众和环境的影响满足国家标准要求。我部同意你所按照《报告书》所列建设项目的性质、规模、地点以及采取的环境保护措施开展下一阶段工作。

## 二、项目下一阶段应重点做好的环境保护工作

（一）按照法律法规要求，对项目中包含的射线装置开展环境影响评价工作。

（二）进一步优化设计方案，研究确定更加合理的公众剂量约束值和流出物年排放量控制值。

（三）进一步论证运行工况下一回路冷却剂中腐蚀产物的产生量、气体易挥发性核素含量和液态流出物排放量。

（四）进一步明确放射性废物的来源、特性及活度浓度，优化处理工艺，确定产生量，实现放射性废物最小化。

(五) 补充完善运行期间化学物质的使用及非放射性污染物的排放情况，明确放射性物质厂内运输方案。

三、项目应严格执行配套建设的环境保护设施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的环境保护“三同时”制度。

四、《报告书》经批准后，项目的性质、规模、地点或者采取的环境保护措施发生重大变动的，应当重新报批项目环境影响报告书。

五、我部委托广东省环境保护厅配合环境保护部华南核与辐射安全监督站，负责该项目的环境保护监督检查工作。

六、你所应在收到本批复后 20 个工作日内，按要求将修订后的《报告书》报送环境保护部华南核与辐射安全监督站、广东省环境保护厅。





---

抄 送：环境保护部华南核与辐射安全监督站、核与辐射安全中心，  
广东省环境保护厅。

---

生态环境部办公厅

2018年5月8日印发

---

附件2:

# 惠东县环境保护局

惠东环建(2017)72号

## 关于强流重离子加速器(HIAF)及加速器驱动 嬗变研究装置(CIADS)配套工程 项目环境影响报告表的批复

惠州离子科学研究中心:

你中心报来由珠江水资源保护科学研究所编制的《强流重离子加速器(HIAF)及加速器驱动嬗变研究装置(CIADS)配套工程项目环境影响报告表》和惠东县环境技术中心对报告表的评估意见(惠东环技[2017]27号)等材料收悉。经我局建设项目环境保护审批领导小组审查,符合《中华人民共和国环境影响评价法》的规定,现批复如下:

一、强流重离子加速器(HIAF)及加速器驱动嬗变研究装置(CIADS)配套工程项目位于惠东县黄埠镇东头村(坐标E114°59'40"~115°00'55",N22°42'17"~22°43'22")。项目投资213705万元,占地面积为1101163平方米,本项目主要包括项目装置区、进场道路、回填区,并且配套建设整个装置区变电站、输变线路、供水管网、土石方和道路广场等。其中项目装置区占地593363m<sup>2</sup>(约890亩),总建筑面积4.8万m<sup>2</sup>,主要包括HIAF装置区15160m<sup>2</sup>,CIADS装置区15140m<sup>2</sup>,装置后勤服务区13300m<sup>2</sup>,装置对外服务区4400m<sup>2</sup>;进场道路为

203800 m<sup>2</sup> (约 305.7 亩); 挖方回填区 304000 m<sup>2</sup> (约 456 亩)。项目员工 850 人。其中本项目装置区只包括装置配套设施, 项目主装置、实验室所涉及的辐射装置及内容部分、建筑以及 110 千伏中科变电站等均不在此次环评审批范围内。

根据报告表的评价结论, 在严格落实环评报告表提出的各项污染防治和环境风险防范措施, 做到污染物稳定达标排放, 确保环境安全的前提下, 从环保角度, 我局同意你单位按照报告表所列除项目主装置、实验室所涉及的辐射装置及内容部分、建筑以及 110 千伏中科变电站等外的项目性质、规模、工艺及污染防治措施进行建设。

二、项目必须遵守环保法律法规, 认真落实环评报告所提出的各项环保措施, 并重点做好如下环保工作:

(一) 加强施工期的环境管理, 落实污染治理和生态保护措施:

1、施工期必须按水行政主管部门批复的水土保持方案要求落实水土保持和生态保护措施, 并及时做好植被恢复工作, 防止造成水土流失。

2、施工期应合理选择生活区, 并落实好施工废水和生活污水的处理措施。施工废水经收集沉淀后回用于施工场地除尘洒水和山林浇灌等环节, 生活污水经自建污水处理设施出水达到水广东省《水污染物排放限值》(DB44/26-2001) 第三时段一级标准及相关回用水标准回用于场地洒水和山林浇灌, 不外排。

3、施工期合理安排好施工时间和产噪设备使用频率, 严禁使用蒸汽桩机、锤击桩机施工, 最大限度减轻施工噪声的影响

程度及范围，避免噪声扰民，施工噪声应符合《建筑施工场界噪声限值》（GB12523-2011）的要求。

4、施工期必须采取有效的防扬尘措施，施工物料应尽可能封闭运输，施工扬尘等大气污染物排放应符合《大气污染物排放限值》（DB44/27-2001）第二时段相关标准要求。

5、建筑节能必须达到设计标准，建筑材料必须符合国家环保标准。

（二）项目必须实施雨污分流排水制度和落实运营期生活污水的治理措施。项目污水统一收集进入自建埋地式污水处理站（采用 MBR 工艺）进行集中处理，处理达到《广东省水污染物排放限值》（DB44/26-2001）一级标准（第二时段）后排放至东头河。

（三）项目必须采取隔音、减振等防噪降噪处理措施，厂界噪声排放执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2类标准。

（四）项目必须使用液化气、电等清洁能源，配套安装油烟净化设施和设置公共排烟管道，油烟排放应符合《饮食业油烟排放标准》（GB18483—2001）规定要求；项目备用柴油发电机尾气经处理后执行《广东省大气污染物排放限值》（DB-4427-2001）第二时段二级标准，黑度应低于林格曼黑度 1 级。

（五）项目配套的垃圾房和垃圾收集点应合理选址，并落实恶臭污染物控制措施和及时清运垃圾，垃圾房边界执行《恶臭污染物排放标准》（GB14554-93）中的二级标准。

(六) 固体废物应分类收集和处理。危险、严控废物必须交由符合资质的单位进行妥善处理处置，生活垃圾收集后交当地环卫部门统一处理，防止产生二次污染。

(七) 做好各项环境风险预警、防范及事故应急措施，建立应急机制。

三、项目建设必须严格执行配套建设的环境保护设施与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用的“三同时”制度，工程建成后，须按规定程序实施竣工环境保护验收。

四、项目动工建设前，必须依法向我局进行排放建筑施工噪声等污染物申报登记。

五、改变项目性质、规模、地点或生产工艺的必须重新报批环保手续。



---

惠东县环境保护局办公室

2017年11月29日印发

公开方式：主动公开

(共印6份)

附件3:

# 国家发展和改革委员会文件

发改高技〔2020〕1203号

## 国家发展改革委关于加速器驱动嬗变研究装置 项目可行性研究报告的批复

中国科学院:

报来《关于申请重新审批加速器驱动嬗变研究装置国家重大科技基础设施项目可行性研究报告的函》(科发函字〔2020〕64号)收悉。经研究,现批复如下:

一、建设加速器驱动嬗变研究装置,旨在建成全球首个兆瓦级加速器驱动次临界系统研究装置,通过关键技术实验验证与性能评估,探索安全妥善处理、处置核废料的技术路线和工艺,为我国率先掌握加速器驱动次临界系统集成和核废料嬗变技术提供条件支撑。根据《国家重大科技基础设施建设中长期

— 1 —

规划（2012—2030年）》，原则同意所报调整后的加速器驱动嬗变研究装置可行性研究报告。

二、项目的科学目标是：开展加速器驱动系统中超导直线加速器、高功率散裂靶、次临界反应堆芯/包层各单项系统稳定、可靠、长期运行的科学研究，逐渐实现加速器驱动系统从低功率到高功率的耦合运行，开展次锕系元素嬗变原理性实验探索，开发具有自主知识产权的加速器驱动嬗变系统设计、控制软件系统，为未来建设加速器驱动嬗变工业示范装置奠定基础。

三、项目的工程目标是：建设全球首个实现高功率耦合运行的兆瓦级加速器驱动嬗变研究装置。全超导加速器驱动系统热功率10兆瓦，包含束流功率约2.5兆瓦，次临界反应堆芯/包层热功率约7.5兆瓦，可以实现单次大于24小时满功率耦合运行。

四、项目的建设内容主要包括超导直线加速器、高功率散裂靶、次临界反应堆芯/包层、总控制系统，以及配套设施等，具体包括：

（一）超导直线加速器主要建设质子源、低能段传输线、射频四极加速器、中能段传输线、超导加速段、低功率束流阻挡器、高能传输线、高功率束流收集终端等，并预留基于加速器与小型实验堆耦合的稀有同位素与燃料研究终端接口；

（二）高功率散裂靶主要建设液态铅铋靶体、靶回路系统、铅铋驱动系统、换热系统、测量保护系统、器靶耦合系统、靶维护系统、靶热试与先进高功率靶技术研究终端、颗粒提升装置、

颗粒纯化装置以及辅助配套系统等；

（三）次临界反应堆芯/包层主要建设池式次临界反应堆系统、反应堆冷却剂系统、堆靶耦合界面、核岛辅助系统、一回路超压保护系统、应急余热排出系统、应急气体处理系统、冷却回路系统等；

（四）总控制系统主要建设支撑人机交互、过程控制、状态监测、安全保护和信息储存等软硬件系统；

（五）配套设施主要建设加速器隧道、设备厅、实验终端功能区、厂房以及电气系统、给排水系统、通风与空调系统、低温系统、压缩空气系统以及辐射防护体系及三废系统等。

#### 五、项目主要验收指标分为三个阶段考核

第一阶段：超导直线加速器建成后，在束流收集终端测试验收。验收指标为：束流能量大于 250 兆电子伏，束流功率大于 25 千瓦。

第二阶段：高功率散裂靶建成后，燃料组件入堆前，在器靶堆耦合终端测试验收。验收指标为：在大于 250 兆电子伏束流驱动下，散裂靶的单质子中子产额大于 1.0 中子。

第三阶段：次临界堆芯建成，且试验燃料组件入堆后，进行系统耦合运行验收。验收指标为：在大于 250 千瓦质子束流驱动下加速器驱动系统稳定耦合运行 1 小时以上，散裂靶承受质子束流功率大于 250 千瓦，次临界堆芯功率约 30 千瓦。

#### 六、项目的建设地点、规模、资金来源及周期



(一) 项目建设地点为广东省惠州市。

(二) 项目总投资暂定为 281700 万元 (含外汇约 1694.3 万美元), 其中安排国家投资 176700 万元, 中国科学院建设资金 5000 万元, 中国核工业集团有限公司建设资金 100000 万元。

(三) 项目新建建筑面积 42550 平方米。

(四) 项目建设期为 6 年。

七、该项目法人单位为中国科学院近代物理研究所, 参建单位为中国原子能科学研究院。项目负责人徐珊珊, 项目联系人胡正国。

八、请你院按照《国家重大科技基础设施管理办法》的有关要求, 组织和指导项目法人单位成立项目建设管理机构并明确项目建设总负责人和首席科学家等, 指导、协调和推进项目建设工作; 建立健全符合设施建设特点的人力资源管理制度, 制定相应的考核和激励办法, 组建工程建设、科技创新和运行管理团队。项目建设达到验收条件后, 请及时提出验收申请, 通过验收后方可按程序转入运行。项目建成后, 按照“开放共享、资源共享”的原则, 面向多用户、多领域开放, 开展科学研究和国内外交流。

九、根据《产业结构调整指导目录(2019 年本)》, 项目所需进口设备可享受免征进口关税和进口环节增值税的优惠政策。

十、请要求项目法人单位做好统筹协调, 进一步加强风险分析, 并做好规避风险的预案。

十一、请据此抓紧组织开展项目初步设计工作，进一步落实具体建设方案，具备条件后由你们审批项目初步设计方案，同时将项目工程概算报我委核定。

十二、请严格控制项目概算，如有超支，其超支部分由你们和项目法人单位协商解决。

十三、自批复之日起，原发改高技〔2018〕138号文件废止。



附件4:

# 广东省环境保护厅

---

粤环函(2017)1429号

## 广东省环境保护厅关于对惠州市严格控制区 调整方案意见的函

惠州市人民政府:

省政府办公厅转来的《惠州市人民政府关于审定〈惠州市生态严格控制区调整与穿越可行性研究报告—中国科学院 CIADS 与 HIAF 项目装置区及进场公路、输电工程〉的请示》(惠府(2017)47号)收悉。根据专家意见、技术评估意见、省有关部门意见和你市补充资料,经省人民政府同意,现将有关意见函复如下:

一、在严格落实《惠州市生态严格控制区调整与穿越可行性研究报告(中国科学院 CIADS 与 HIAF 项目装置区及进场公路、输电工程)》(以下简称《可研报告》)提出的各项生态环境保护和恢复措施的基础上,惠州市严格控制区调整方案对惠州市区域生态安全格局和区域生态系统功能的影响总体上可接受,原则同意该调整方案。具体调整范围是:将中国科学院 CIADS 与 HIAF 项目主厂区 0.904 km<sup>2</sup> 的区域由严格控制区调整为有限开发区,将白盆珠自然保护区核心区 0.939 km<sup>2</sup> 的区域由有限开发区调整为严格控制区。

---

二、中国科学院 CIADS 与 HIAF 项目应做好工程设计和规划，严格落实各项水土保持、污染防治和生态保护与恢复措施，尽最大限度减少该项目对周边环境及地下水水质的影响，确保环境安全；尽量避免或减少开挖山体和占用林地，需占用、征用林地或采伐林木，应依法依规办理相关手续；做好施工过程中的环境监理工作。

三、请你市加强白盆珠省级自然保护区生态环境保护工作，严格落实自然保护区和严格控制区的各项管控要求，进一步提高该区域生态环境质量和生态系统功能。

四、请你市根据严格控制区调整方案及时组织对土地利用、城乡建设等相关规划进行修改，确保相关规划在空间管控和功能定位等方面的衔接。

五、请你市切实加强对中国科学院 CIADS 与 HIAF 项目施工、运营中涉及环境保护问题的监督管理，确保《可研报告》提出的各项生态环境保护和恢复措施落实到位。

附件：《领导批示办理表》（建设 0476）



（联系人及电话：谢昕 020-87537836）

附件5:

中华人民共和国

## 建设用地规划许可证


惠东县规地证字(2018)000108  
地字第 号

业务编号: YD2018000124

项目编号: 2018000113

根据《中华人民共和国城乡规划法》第三十七、第三十八条规定, 经审核, 本用地项目符合城乡规划要求, 颁发此证。

发证机关 惠东县住房和城乡建设局  
日期 2018年07月06日



用地单位	中国科学院近代物理研究所
用地项目名称	加速器驱动嬗变研究装置(CIADS)
用地位置	黄埠镇沙浦村大坑口、东头经济合作社地段
用地性质	科研用地(A35)
用地面积	300218.92 平方米
建设规模	≤300218 平方米
附图及附件名称 《建设用地规划界限图》HIB/Y-2018013	

**遵守事项**

- 一、本证是经城乡规划主管部门依法审核, 建设用地符合城乡规划要求的法律凭证。
- 二、未取得本证, 而取得建设用地批准文件、占用土地的, 均属违法行为。
- 三、未经发证机关审核同意, 本证的各项规定不得随意变更。
- 四、本证所需附图与附件由发证机关依法确定, 与本证具有同等法律效力。

建设用地规划许可证（附件）

业务编号：YD2018000124 项目编号：2018000113 证号：惠东县规地证字(2018)000108

用地单位	中国科学院近代物理研究所
用地位置	黄埠镇沙浦村大坑口、东头经济合作社地段
项目名称	加速器驱动嬗变研究装置(CIADS)
用地性质	科研用地(A35)
选址意见： /	
相邻单位（个人）用地界线情况：  四邻关系清楚。	



建设用地项目规划设计满足下列要求	
一 指 标 (按建设 用地面积 计算)	1、建筑容积率 ≤1.0 2、建筑覆盖率 ≤28% 绿地率 ≥30% 3、建筑间距 / 米 4、建筑限高 / 米 层数 / 层 5、建设规模 ≤300218 平方米 6、用地面积 300218.92 平方米 其中：严格按《规划设计条件告知书》HB[2018]2号执行。
	(地下车库、设备用房、民房设施、公众通道，不计容积率)
二 总 及 红 体 建 线 布 筑 要 局 退 求	/
三 市 政 设 施 要 求	1、机动车停车位 / (自用 / 公用 / ) 自行车停车位 / 2、车辆出入口 /
	3、人行出入口 / 公众通道出入口 /
	4、室外地坪标高 / 5、给水接口 /
	6、雨水接口 / 7、污水接口 /
	8、中水接口 / 9、燃气接口 /
	10、电源 / 11、通讯 /
备注	该宗建设用地以划拨方式供地。
遵 守 事 项	1、该附件和标有相同文号的用地红线附图是《建设用地规划许可证》的配套文件，三者联用是惠东行政主管部门审核许可用地的法律凭证。建设者在取得建设用地规划许可证后，必须在一年内申请用地，逾期未申请的，该证自行失效。 2、凡未取得上述法律凭证，而取得建设用地批准文件、占用土地的，批准文件无效；只有在取得上述法律凭证和国土证件后，方可申请办理项目规划报建手续。 3、建（构）筑物基础、地下室、专用道路及各种管线（除与市政道路、管线连接段外）必须在建设用地使用土地红线内布置，不得超出。 4、未经发证机关审核同意，该附件的有关规定不得变更。防火安全、环境保护、绿化管理、卫生防疫、民房工程等按有关管理部门的设计，规划报建时一并附送审批意见。

