

核技术利用建设项目

强流重离子加速器装置

环境影响报告书

中国科学院近代物理研究所

2017 年 11 月

环境保护部监制

核技术利用建设项目

强流重离子加速器装置

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）：肖国青

肖国青

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：苏有武

电子信箱：suyouwu@impcas.ac.cn

联系电话：0931-4969578



建设项目环境影响评价资质证书

机构名称：苏州热工研究院有限公司
住 所：江苏省苏州市金阊区西环路 1788 号
法定代表人：王安
证书等级：甲级
证书编号：国环评证甲字第 1904 号
有效期：至 2019 年 1 月 23 日
评价范围：环境影响报告书类别 — 甲级：输变电及广电通讯；核工业***
 环境影响报告表类别 — 一般项目环境影响报告表；特殊项目环境影响报告表***



二〇一五年三月八日

项目名称： 强流重离子加速器装置环境影响报告书

评价单位（盖公章）： 苏州热工研究院有限公司

法人代表（签章）： 王安

环评项目负责人： 赵锋

编制人员情况

姓名	职称	证书编号	负责章节	签名
赵锋	高级工程师	A19040011300 ZSZYD05-1712	第一章 概述 第八章 结论与建议	赵锋
陈超峰	高级工程师	A190402911	第三章 工程分析与源项 第四章 辐射安全与防护	陈超峰
王紫	高级工程师	A19040141200	第六章 辐射安全管理 第七章 利益-代价简要分析	王紫
杨宗甄	工程师	A190402411	第二章 自然环境与社会 环境状况 第五章 环境影响分析	杨宗甄

环评项目负责人职业资格证书



持证人签名:
Signature of the Bearer

管理号: 05353243505320195
File No.:

姓名:
Full Name 赵锋

性别:
Sex

出生年月:
Date of Birth 330724770326255

专业类别:
Professional Type 环境评价四科

批准日期:
Approval Date 200505

签发单位盖章:
Issued by

签发日期: 2005 年 07 月 22 日
Issued on

环评项目负责人职业资格登记/注册证书

经环境保护部环境影响评价工程师职业资格登记管理办公室审查, 赵锋 具备从事环境影响评价及相关业务的能力, 准予登记。

职业资格证书编号: 0001692


登记证编号: A19040011300

有效期限: 2015 年 12 月 15 日至 2018 年 12 月 14 日

所在单位: 苏州热工研究院有限公司

登记类别: 核工业类环境影响评价

2015 年 11 月 10 日



再 次 登 记 记 录

时间	有效期限	签章
	延至 年 月 日	
	延至 年 月 日	
	延至 年 月 日	
	延至 年 月 日	

目 录

1	概述.....	1
1.1	项目名称、地点	1
1.2	项目概况	2
1.2.1	项目性质和建设单位	2
1.2.2	项目用地	4
1.2.3	项目周边环境条件	4
1.3	编制依据	5
1.3.1	法律、法规	5
1.3.2	标准、技术规范和部门规章	5
1.3.3	项目文件	6
1.4	评价标准	7
1.4.1	剂量约束值	7
1.4.2	非放射性环境影响评价标准	7
1.5	评价范围和保护目标	8
1.5.1	辐射	8
1.5.2	大气环境	8
1.5.3	声环境	8
2	自然环境与社会环境状况.....	9
2.1	自然环境状况	9
2.1.1	地理位置	9
2.1.2	地形地貌	9
2.1.3	地质和地震	10
2.2	社会经济状况	11
2.3	环境质量和辐射现状	11
2.3.1	辐射现状	11
2.3.2	声环境质量现状	14

2.4	场址适宜性评价	15
3	工程分析与源项.....	16
3.1	项目规模与基本参数	16
3.2	工程设备与工艺分析	21
3.2.1	加速器系统	21
3.2.2	实验终端系统	27
3.2.3	辅助系统	32
3.3	污染源项	41
3.3.1	瞬发辐射	41
3.3.2	缓发辐射	46
3.3.3	电磁辐射	53
3.3.4	噪声	53
3.4	废弃物	53
3.4.1	放射性废水	53
3.4.2	固体废物	54
3.4.3	放射性废气	55
4	辐射安全与防护.....	56
4.1	场所布局与屏蔽	56
4.1.1	总体布局	56
4.1.2	竖向设计	58
4.1.3	屏蔽防护	59
4.2	辐射安全与防护措施	69
4.2.1	辐射工作场所分区及辐射安全管理措施	69
4.2.2	加速器辐射安全和联锁设计	69
4.2.3	安全保卫	74
4.2.4	照明和报警系统	75
4.3	三废的治理	75
4.3.1	放射性废气及处理措施	75

4.3.2	含放射性核素的废水及处理措施	76
4.3.3	放射性固体废物及其处理措施	77
4.4	服务期满后的环境保护措施	77
5	环境影响分析	78
5.1	建设阶段对环境的影响	78
5.1.1	振动的影响	78
5.1.2	声环境的影响	78
5.1.3	大气环境的影响	78
5.1.4	生态环境的影响	79
5.1.5	施工固体废弃物对环境的影响	79
5.2	运行阶段对环境的影响	79
5.2.1	场所辐射水平	79
5.2.2	人员受照剂量	80
5.2.3	噪声影响	81
5.3	事故影响分析	83
5.3.1	人员误入事故	83
5.3.2	工作人员超剂量照射事故	83
5.3.3	冷却水泄漏事故	83
5.3.4	空气过滤器失效事故	83
6	辐射安全管理	84
6.1	机构与人员	84
6.2	辐射安全管理制度	84
6.3	辐射监测	84
6.3.1	工作场所剂量监测系统	85
6.3.2	环境监测系统	89
6.3.3	个人剂量监测	90
6.4	辐射事故应急	90
7	利益-代价简要分析	91

7.1	利益分析	91
7.1.1	科学技术效益	91
7.1.2	经济效益	91
7.1.3	社会效益	91
7.2	代价分析	92
7.2.1	经济代价	92
7.2.2	社会和环境代价	92
7.2.3	资源代价	92
7.3	正当性分析	92
8	结论与建议	94
8.1	项目工程概况	94
8.2	辐射安全与防护	94
8.3	环境影响分析	95
8.4	辐射安全管理	96
8.5	建议与承诺	96
附录 A	97
A.1	大气弥散因子	97
A.2	地面沉积	97
A.3	辐射剂量	98

表

表 2-1	γ 辐射剂量率本底调查结果	12
表 2-2	中子剂量率本底调查结果	12
表 2-3	空气中天然放射性核素测量结果	13
表 2-4	土壤中天然放射性核素测量结果	13
表 2-5	水体中天然放射性核素测量结果	14
表 2-6	项目附近区域声环境监测结果	14
表 3-1	强流重离子加速器 HIAF 束流设计指标	18

表 3-2	强流重离子加速器 HIAF 实验终端参数及特点.....	20
表 3-3	强流 SECR 离子源的主要参数指标.....	22
表 3-4	iLinac 典型离子的束流指标.....	23
表 3-5	iLinac 的设计参数.....	23
表 3-6	BRing 同步加速器主要参数	25
表 3-7	BRing 注入线束流参数	26
表 3-8	SRing 储存环主要参数列表.....	30
表 3-9	SRing 储存环束流参数列表.....	31
表 3-10	压缩空气系统主要设计参数一览表.....	36
表 3-11	各能量的 C 束与铜靶作用产生的总中子产额	45
表 3-12	HIAF 束流损失表 ($^{12}\text{C}^{6+}$)	45
表 3-13	各排风口年排放活化核素活度计算结果.....	47
表 3-14	加速器运行一年后冷却水中放射性核素含量.....	49
表 3-15	在加速器周围受辐照的材料中活化产生的放射性核素一览表.....	50
表 3-16	土壤中活化核素活度水平	52
表 3-17	用于解控的大量人工放射性核素活度浓度值 (Bq/g)	52
表 4-1	HIAF 辐射屏蔽计算结果表 ($\mu\text{Sv/h}$)	68
表 4-2	加速器运行 1 年活化的冷却水衰变 1 天后放射性核素含量.....	76
表 5-1	放射性气体排放对坑口村公众个人有效剂量 (mSv/a)	81
表 5-2	单台冷却塔随距离的衰减关系 (dB (A))	82
表 5-3	11 台冷却塔噪声贡献值 (dB (A))	82

图

图 1-1	本项目地理位置示意图.....	1
图 2-1	项目周边环境特征示意图.....	9
图 2-2	γ 辐射剂量率与中子剂量率本底调查布点图	11
图 3-1	HIAF 总体布局图	16
图 3-2	HIAF 前端系统设计效果图	21

图 3-3	iLinac 的总体结构和布局.....	23
图 3-4	BRing 总体布局示意图	24
图 3-5	BRing 注入线总布局图	26
图 3-6	SRing 注入线布局图	27
图 3-7	HFRS 总布局图	28
图 3-8	外靶终端衰变谱学探测器阵列构型图	28
图 3-9	SRing 总体布局图	29
图 3-10	电子离子复合共振谱仪布局	32
图 3-11	配电系统结构示意图	33
图 3-12	水冷系统工艺原理图	34
图 3-13	HIAF 泵站布局图	35
图 3-14	制冷系统工艺流程图	36
图 3-15	隧道通风空调机房分布图	37
图 3-16	隧道空调系统工艺原理图	38
图 3-17	工艺空调系统工艺原理图	38
图 3-18	隧道通风系统工艺原理图	39
图 3-19	HFRS 低温冷却系统的总流程结构	40
图 3-20	计算模型示意图	42
图 3-21	11.72MeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场	42
图 3-22	33MeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场	43
图 3-23	1.5GeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场	43
图 3-24	2.94GeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场	44
图 3-25	4.15GeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场	44
图 3-26	加速器隧道区域通风口设置	47
图 3-27	2 种类型二极磁体模型	49
图 3-28	二极磁体冷却水活化计算模型（右图为活化核素产生的剂量场）	49
图 3-29	屏蔽墙外土壤中活化核素总活度随距离的变化	51
图 3-30	土壤活化计算模型	51

图 3-31	土壤中活化核素种类.....	51
图 3-32	放射性废物暂存间.....	54
图 4-1	HIAF 装置总平面布置图.....	57
图 4-2	HIAF 屏蔽设计总图.....	60
图 4-3	离子源大厅剖面图.....	60
图 4-4	iLinac 直线加速段隧道屏蔽设计.....	61
图 4-5	BRing 加速段隧道屏蔽设计.....	62
图 4-6	HFRS 放射性束流分离段屏蔽设计.....	62
图 4-7	SRing 环形谱仪段隧道屏蔽设计.....	63
图 4-8	低能核物理实验终端平面布局示意图.....	64
图 4-9	强流离子束辐照实验终端平面布局示意图.....	64
图 4-10	外靶终端平面布局示意图.....	65
图 4-11	BRing 瞬发辐射屏蔽体外剂量计算模型（均匀损失）.....	66
图 4-12	外靶终端瞬发辐射屏蔽体外剂量计算模型（均匀损失）.....	66
图 4-13	BRing 瞬发辐射剂量率空间分布（均匀损失）.....	66
图 4-14	外靶终端集中瞬时剂量率空间分布图.....	67
图 4-15	BRing 瞬发辐射剂量率随垂直方向的变化.....	67
图 4-16	BRing 瞬发辐射剂量随水平方向的变化.....	68
图 4-17	辐射工作场所联锁系统分区示意图.....	70
图 4-18	束流切断设备设置位置示意图.....	71
图 4-19	急停清场盒布局示意图.....	73
图 4-20	人身安全联锁系统工作流程.....	74
图 6-1	辐射剂量监测点布局.....	86
图 6-2	工作场所剂量监测系统结构示意图.....	86
图 6-3	宽能谱中子监测器结构.....	87
图 6-4	宽能谱中子雷姆仪能量相应（Cal.）.....	88
图 6-5	宽能谱中子监测器电路原理.....	88
图 6-6	γ 探测器电路框图.....	89

1 概述

1.1 项目名称、地点

本建设项目名称为强流重离子加速器装置（High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility, 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。

HIAF 由加速器系统、实验终端和配套支撑设施构成。主要包括：强流离子源系统、超导离子直线加速器、磁刚度为 34Tm 的增强器、束线系统、低能核结构谱仪、磁刚度为 13Tm 的高精度环形谱仪、放射性束流线、电子-离子复合共振谱仪、外靶终端以及相关配套设施。

项目拟建于广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村附近，图 1-1 给出了本项目的地理位置示意图。



图 1-1 本项目地理位置示意图

1.2 项目概况

1.2.1 项目性质和建设单位

作为《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，国家重大科技基础设施建设项目——强流重离子加速器（HIAF）项目将建设一台集成超导离子源、超导直线加速器和环形同步加速器等领域最先进的技术，束流指标先进、以核物理和原子物理为主、兼顾多学科用途的重离子科学综合研究装置，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，使我国核物理基础研究在原子核层次上的整体水平进入国际先进行列。

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。

重离子加速器是用人工方法产生高速离子束流的装置，是探索基本相互作用、物质结构和宇宙演化的重要工具，也是研发关乎经济社会发展和国家安全的先进核技术的平台，重离子研究平台是人类理解物质和宇宙的最基本手段之一。近年来，科学家利用各种重离子研究平台取得了诸多具有深远影响的科学突破，同时大量创新性的研究成果也得到重要的实际应用。世界科技强国正在或即将建设新一代重离子加速器，如德国的反质子和离子研究装置（Facility for Antiproton and Ion Research, FAIR），美国的稀有同位素束流装置（Facility for Rare-isotope Beams, FRIB）和法国的在线放射性离子产生系统（Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne-2, SPIRAL2）等。目前我国现有的重离子加速器主要有北京 HI-13 串列静电加速器和兰州重离子研究装置（Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL）。HI-13 是一台低能重离子加速器，已运行 20 多年，其加速器升级项目于 2016 年 3 月竣工验收。HIRFL 能够提供不同能量、种类众多的稳定核束流和放射性核束流，为我国核物理研究走向国际前沿提供了良好的基础条件和机遇。但是，我国的重离子加速器装置数量少、规模小、总体性能不够先进，束流时间远远不能满足用户需求，这与我国的经济水平和发展国际地位不相称。今后 10 年内，随着德国 FAIR 和美国 FRIB 等国际上新一代重离子加速器装置陆续投入运行，HIRFL 的总体性能指标将明显落后，会逐步失去国际竞争力。

面对今天极具挑战的国际环境，我国应当率先在重离子科学研究领域占据重要国际地位。建造先进的重离子加速器装置，提升核科学创新能力，为人类了解物质结构、

探索自然界基本规律作出重大贡献，提升中华民族的国际影响力；为核技术应用提供理论、方法、技术和人才支撑，解决关系国家发展的关键技术。强流重离子加速器装置符合国家重大战略需求，项目建设将为核物理和核天体物理基础研究创造国际领先水平条件；为重离子束应用研究提供先进的实验平台；为核能开发、核安全及核技术应用提供理论、方法、技术和人才支撑。依托 HIAF，将使我国重离子科学研究从“紧跟”走向“并行”、并逐步实现“引领”，形成在国际上具有重大影响的重离子科学研究中心。

本项目的工程建设目标是充分借鉴、吸收国内外已有相关装置的先进技术和建设成果，通过设备的关键技术创新和集成创新，建成总体设计方案和综合技术指标达到世界一流水平的重离子加速器综合研究平台，为我国基础研究、应用研究以及创新驱动发展战略提供最先进的科技基础条件设施，储备和培育关键科学技术及人才。

本项目建设内容包括加速器系统、实验终端系统及其土建公用配套设施。其中加速器系统包括强流超导离子源、超导离子直线加速器、增强器，以及连接各部分之间的束流传输线等；实验终端包括低能核结构谱仪、强流离子束辐照终端、放射性次级束流分离器、外靶实验终端、高精度环形谱仪，以及电子-离子复合共振谱仪。土建公用配套设施包括满足加速器系统和实验终端系统顺利运行的建筑、水、电等基础设施。

本项目的科学目标是认识原子核内有效相互作用、理解宇宙中重元素的来源。依托 HIAF 装置，使科学家有能力进一步认识原子核内有效相互作用，研究原子核壳层结构在非稳定核区的系统演变、奇特原子核的结构、弱束缚核参与的反应机制，确定有效相互作用中三体力、张量力和同位旋相关的成分，探索核内有效相互作用的新形式；通过产生位于快中子俘获路径上的丰中子核素并精确测量其质量、寿命和相关反应率，理论模拟重元素的丰度分布，通过比较模拟和观测结果，探索核合成的路径，时间标度、物理环境和天体场所，理解宇宙中从铁到铀重元素的来源。

本项目建设范围内总投资总计 154566 万元，包括国家重大科技基础设施建设资金 149566 万元，中科院配套资金 5000 万元，分 7 年投入。

项目建成后，预计年度运行经费 21615 万元，全部申请国家财政拨款。

项目建成后将成立基于 HIAF 的科学中心，遵循“开放共享、明确目标、优化计划、高效运行”的原则运行和管理。

按照《国家重大科技基础设施管理办法》（发改高技〔2014〕2545号）及《国务院关于国家重大科研基础设施和大型科研仪器向社会开放的意见》（国发〔2014〕70号）的精神和要求，装置建成投入运行后，按照“开放合作、资源共享”原则，面向多用户、多领域开放。开展科学研究和国内外交流。预期每年能够为重离子物理基础研究和重离子束应用研究提供约 7000 小时的束流时间。在基础研究领域，HIAF 是国际开放的研究装置，通过自由申请和专家评审，选择国内外用户；在应用研究领域，用户主要来自国内研究机构、大学和企业，以满足国家重大需求为主并适当兼顾自由申请的原则分配束流时间。

我国正处在经济转型的关键发展时期，迫切需要大力发展科学基础条件设施来为国家经济与社会可持续发展提供有力的科技支撑。科学技术的进步、先进实验设备的创造和使用对经济和社会发展的巨大推动作用，已被无数重大科学与技术成果的成功经验所证实，强流重离子加速器装置也必将会对我国的科学技术、经济和社会产生重大影响。本装置的建设将会为我国在核物理、原子物理等基础研究领域关键科学问题的破解提供最先进的公共实验装置，为我国科技领域的重大创新研究提供持续的、重要的支撑。本项目发展的新科学、新技术、新材料、新模式，必将转化为巨大的生产力，为我国科学技术与社会及经济发展不断做出重大贡献。

1.2.2 项目用地

本项目场区内规划用地面积约 35.1hm²，主要包括 HIAF 装置和场区配套设施用地面积约 24.1hm²，HIAF 装置配套区用地面积约 4.2hm²，其余为道路、边坡、排洪沟等用地面积约 6.8hm²。场区用地均为林业用地。

根据中国科学院与广东省人民政府签订的《关于共建重大科技基础设施“十二五”建设项目合作协议》，本项目用地将由地方政府作为项目配套设施提供，并完成“七通一平”和其他配套设施。配套设施建设环境影响评价单独报批，不在本项目评价范围内。

1.2.3 项目周边环境条件

项目拟建地点行政隶属广东省惠州市惠东县黄埠镇，项目周边主要以林地为主，项目附近最近的自然村为 WSW 方位约 400m 处的大坑口村，其次为 SSW 方位约 1.1km 处的东头村。

1.3 编制依据

根据《中华人民共和国放射性污染防治法》和《建设项目环境影响评价分类管理名录》等的要求，本项目涉及 I 类射线装置，应编制环境影响报告书，在本报告书编制过程中，遵循了以下法律、法规、标准和技术规范等的要求。

1.3.1 法律、法规

- 中华人民共和国环境保护法（2015 年 1 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国环境影响评价法（2016 年 9 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国放射性污染防治法（2003 年 10 月 1 日）；
- 中华人民共和国大气污染防治法（2016 年 1 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国水污染防治法（2008 年 6 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国环境噪声污染防治法（1997 年 3 月 1 日施行）；
- 中华人民共和国固体废物污染环境防治法（2016 年 11 月 7 日修订）；
- 建设项目环境保护管理条例（2017 年 10 月 1 日起施行）；
- 放射性废物安全管理条例（2012 年 3 月 1 日起施行，国务院令第 612 号）；
- 放射性同位素与射线装置安全和防护条例（2005 年 12 月 1 日起施行，国务院令第 449 号，2014 年 7 月 29 日《国务院关于修改部分行政法规的决定》部分修订）等。

1.3.2 标准、技术规范 and 部门规章

（1）部门规章和文件

- 建设项目环境影响评价分类管理名录（2017 年 9 月 1 日）；
- 放射性同位素与射线装置安全许可管理办法（2006 年 1 月国家环境保护总局令第 31 号公布，2008 年 12 月 6 日环境保护部令第 3 号修正）；
- 放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法（2011 年 4 月，环境保护部令第 18 号）；
- 关于进一步加强环境影响评价管理防范环境风险的通知（环发[2012]77 号）；
- 关于切实加强风险防范严格环境影响评价管理的通知（环发[2012]98 号）。

（2）技术标准

- 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

- 《环境核辐射监测规定》（GB12379-90）；
- 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；
- 《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）；
- 《环境空气质量标准》（GB3095-2012）。
- 《声环境质量标准》（GB3096-2008）；
- 《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）；
- 《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）。
- 《电磁环境控制限值》（GB8702-2014）；
- 《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）等。

（3）地方法规和标准

- 广东省建设项目环境保护管理条例（2012年7月26日修订）；
- 广东省环境保护条例（2015年1月13日修订）；
- 广东省放射性废物管理办法（2001年4月16日通过，2001年6月1日实施）；
- 广东省水污染物排放限值（DB44/26-2001）；
- 广东省大气污染物排放限值（DB44/27-2001）等。

1.3.3 项目文件

《国家重大科技基础设施建设项目——强流重离子加速器项目建议书》，中国科学院，2015年9月；

国家发展改革委关于强流重离子加速器国家重大科技基础设施项目建议书的批复（发改高技[2015]3185号）；

中国科学院、广东省人民政府共建重大科技基础设施“十二五”建设项目“加速器驱动的嬗变研究装置”与“强流重离子加速器”合作协议；

广东省人民政府、中国科学院关于共建创新性广东的合作协议；

广东省环境保护厅关于对《国家重大科技基础设施项目建设有关情况的签报》意见的函（粤环商[2013]354号）；

广东省国土资源厅关于对《国家重大科技基础设施项目建设有关情况的签报》意见的函（粤国土资规划[2013]1372号）；

强流重离子加速器装置环境影响报告书的编制技术服务合同等。

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;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 GB18871-2002 的要求,确定本项目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。

1.4.2 非放射性环境影响评价标准

根据项目区域的环境功能区划管理要求,结合项目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:

- 项目施工期间:
 - a) 生活污水简单处理后考虑与黄埠镇污水处理厂接管或外运处理,不直接排入环境;
 - b) 项目施工期间的大气污染物排放执行《广东省大气污染物排放限值》(DB44/27-2001)第二时段无组织排放监控浓度限值;
 - c) 项目施工期间建筑物施工噪声执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)的相应要求;
 - d) 项目施工期间产生的危险废物处置执行《危险废物贮存污染控制标准》(GB18597-2001 及修订单)的相应要求;
 - e) 项目施工期间产生的一般工业固体废物由施工单位负责处置。
- 项目运行期间:
 - a) 厂界外 1m 处噪声执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)规定的“工业企业厂界环境噪声排放限值”3 类声环境功能区限值;
 - b) 厂外敏感点声环境执行《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 2 类声环境功能区适用的环境噪声限值。

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 辐射

参考 HJ10.1-2016 的要求，本项目辐射环境影响评价范围为射线装置实体屏蔽边界外 100m，该区域内仅涉及本项目自身工作人员（包括职业人员和一般工作人员），不涉及厂区外公众。

1.5.2 大气环境

考虑到活化气体中会有少量放射性核素释放，本次大气环境影响评价范围设为 1000m。

1.5.3 声环境

声环境主要评价厂界外 1m 处噪声及项目附近敏感点的影响。

2 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

本项目拟建于广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村附近，地理位置示意图见本报告书图 1-1，项目周边环境特征示意图见图 2-1。厂址半径 2km 范围内涉及两个自然村，分别为 WSW 方位约 400m 处的大坑口村、SSW 方位约 1.1km 处的东头村。



图 2-1 项目周边环境特征示意图

2.1.2 地形地貌

项目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。

项目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，项目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；项目以东海岸呈“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，项目附近范围的西北部则发育山地丘陵地貌。

项目附近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。

项目所在区域丘陵地势变化较大，场址北、东两侧临山，西、南两侧临海；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，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 地质和地震

2.1.3.1 地质

项目所在区域分布为第四纪地层、晚侏罗世~早白垩世南山村组地层。

据现有地质资料，厂区内分布 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。

厂址区未发现切割第四纪地层的迹象，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，场地稳定。厂区水文地质条件简单；不存在地震液化和震陷的潜在危害。

2.1.3.2 地震

区域范围两条发震构造：丰顺—海丰断裂梅陇段和潮州—汕尾断裂红海湾段。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，到项目最近距离约为 41km；潮州—汕尾断裂红海湾段最大潜在地震震级为 6.5 级，到项目最近距离约为 22km。历史地震对厂址最大影响烈度为 VI 度。项目近区域内以小震活动为主，主要呈北东向散布在沿海一带，项目附近范围内均未记录到 2.0 级以上地震，项目所在地震构造区弥散地震震级为 5.0 级。

项目附近范围内断裂均未发现晚更新世以来活动断裂，项目附近范围内不存在能

动断层，厂址附近地震活动较弱，厂址区域属于地壳较稳定地区。

2.2 社会经济状况

本项目地处广东省东部沿海山区，项目所在地位丘陵山地。

项目半径 2km 范围内涉及惠东县黄埠镇沙埔村的 2 个自然村：

- WSW 方位距离厂区边界约 0.4km 处的坑口村，2013 年底有人口 100 人。
- SSW 方位距离厂区边界约 1.1km 处的东头村，2013 年底有人口 645 人。

2.3 环境质量和辐射现状

2.3.1 辐射现状

2.3.1.1 环境天然贯穿辐射本底

根据广东省环境辐射监测中心对厂址附近地区辐射本底调查结果表明，原野 γ 辐射剂量率范围为 83~121nGy/h，中子辐射剂量率均小于探测限（ $0.1 \mu\text{Sv/h}$ ），厂址所在地区的原野 γ 辐射剂量率、中子辐射剂量率属于正常本底范围。

具体监测点位见图 2-2，监测结果见表 2-1、表 2-2。



图 2-2 γ 辐射剂量率与中子剂量率本底调查布点图

表 2-1 γ 辐射剂量率本底调查结果

测点编号	γ 剂量率 nGy/h				
	范围			均值	标准差
1	111	~	116	113	2
2	82	~	88	85	2
3	105	~	112	108	2
4	98	~	101	99	1
5	104	~	111	107	2
6	90	~	97	94	2
7	107	~	112	109	1
8	93	~	98	95	1
9	95	~	100	97	2
10	117	~	121	118	1
11	98	~	101	99	1
12	112	~	115	114	1
13	116	~	124	121	2
14	81	~	85	83	1
15	81	~	84	83	1
16	86	~	91	89	2
17	111	~	118	114	3

注：表中数据已扣除宇宙射线。

表 2-2 中子剂量率本底调查结果

测点编号	中子剂量当量 ($\mu\text{Sv/h}$)
1~17	<LLD

注：LLD=0.1 $\mu\text{Sv/h}$

2.3.1.2 空气中放射性核素活度浓度水平

根据广东省环境辐射监测中心对厂址附近东头村空气样品调查结果表明， ^7Be 的测量值为 $7.13\text{E}+03\mu\text{Bq/m}^3$ ，其余人工放射性 γ 核素测量值均小于探测限值，测量结果如表 2-3 所示。

表 2-3 空气中天然放射性核素测量结果

核素名	测值 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	核素名	测值 ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
^7Be	$7.13\text{E}+03$	^{60}Co	<1.5
^{95}Zr	<2.8	^{58}Co	<1.5
^{54}Mn	<1.5	^{144}Ce	<6.2
^{131}I	<1.8	^{40}K	<39
^{137}Cs	<1.6	空气氡	$<17 \text{ mBq}/\text{m}^3$
^{134}Cs	<1.4		

2.3.1.3 土壤中放射性核素本底

据广东省环境辐射监测中心对厂址附近地区土壤样品调查结果表明,厂区边界处 ^7Be 的测量结果范围是 $4.97\sim 9.34 \text{ Bq}/\text{kg}$, ^{137}Cs 的测量结果范围是 $<0.41\sim 2.14 \text{ Bq}/\text{kg}$,未监测到其他人工放射性 γ 核素,测量结果如表 2-4 所示。

表 2-4 土壤中天然放射性核素测量结果

样品名称	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
核素名	测值 (Bq/kg .干)	测值 (Bq/kg .干)	测值 (Bq/kg .干)	测值 (Bq/kg .干)	测值 (Bq/kg .干)	测值 (Bq/kg .干)
^7Be	9.34	4.97	9.06	5.13	9.38	4.89
^{95}Zr	<0.75	<0.76	<0.79	<0.67	<0.72	<0.74
^{65}Zn	<0.83	<0.78	<0.78	<0.79	<0.76	<0.81
^{137}Cs	1.27	<0.41	0.67	2.14	1.62	1.84
^{134}Cs	<0.37	<0.37	<0.36	<0.32	<0.33	<0.33
^{60}Co	<0.38	<0.35	<0.36	<0.35	<0.33	<0.36
^{58}Co	<0.35	<0.35	<0.36	<0.33	<0.32	<0.34
^{144}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}K	543	410	662	894	728	815

2.3.1.4 水体中天然放射性核素本底

根据广东省环境辐射监测中心对厂址附近地区水体样品调查结果表明,东头村地下水和白老屋水库水样品测量结果中, ^7Be 和其他人工放射性 γ 核素均小于探测限值,测量结果如表 2-5 所示。

表 2-5 水体中天然放射性核素测量结果

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

2.3.2 声环境质量现状

结合厂址区域实际地形和环境特征，在 2015 年 1 月期间对厂址附近包括东头村和坑口村在内的区域进行了声环境质量监测工作。

噪声监测使用的仪器为 AWA6228 型多功能声级计，所使用的仪器符合相关技术导则要求并经计量部门检定在检定有效期内。噪声环境监测选择昼间（6:00~22:00）和夜间（22:00~6:00）两个时段进行噪声监测，监测两天。表 2-6 给出了项目附近区域声环境敏感点的噪声环境监测结果。从表可以看出，项目附近东头村和坑口村两个项目声环境敏感点的昼间噪声在 44.4~50.7dB(A)之间，夜间噪声在 42.6~43.5dB(A)之间，满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）中的 2 类功能区标准。

综上所述，厂址所在区域声环境质量良好。

表 2-6 项目附近区域声环境监测结果

序号	检测点位	2015 年 1 月 14 日		2015 年 1 月 15 日	
		昼间	夜间	昼间	夜间
1	东头村	50.5±1.6	43.5±0.2	50.7±1.0	42.6±0.3
2	坑口村	44.4±2.6	43.0±0.2	47.4±0.8	42.7±0.5

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。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

HIAF 设计立足于兰州重离子研究装置 HIRFL 的研制和运行经验，借鉴当前国际上最新的重离子加速器技术和发展趋势，在工艺设计上充分利用现有成熟技术，以保证装置运行的可靠性和造价的合理性；同时，在影响和制约加速器指标的关键系统中，研发并使用全新技术，以保证装置束流指标的先进性，并预留充分的升级改造空间。

HIAF 总体布局见图 3-1。

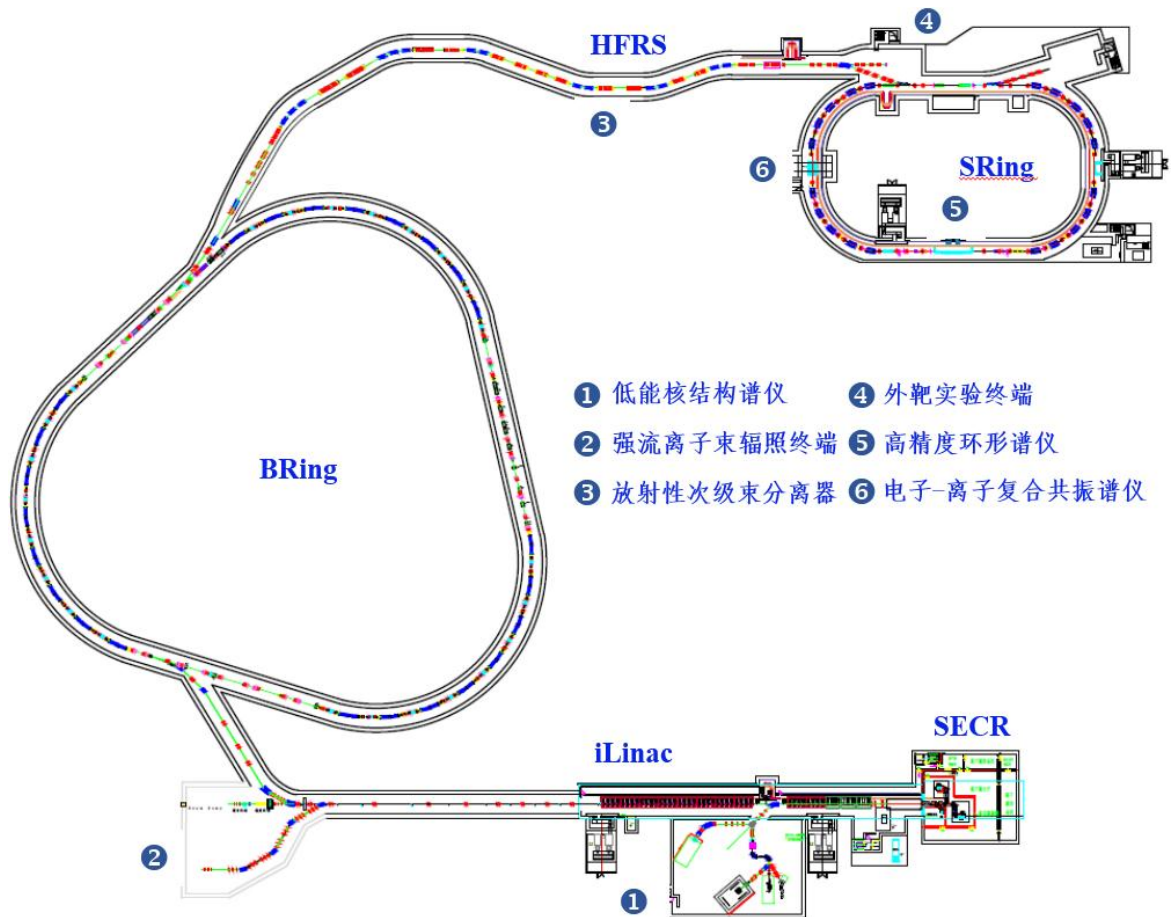


图 3-1 HIAF 总体布局图

HIAF 束流设计指标主要由加速器系统实现。加速器系统包括强流超导离子源（SECR）、超导离子直线加速器（iLinac）、增强器（BRing），以及链接各部分之间的束流传输线等。

超导离子源系统规划设计规划包括 2 台强流高电荷态超导 ECR（电子回旋共振）离子源与 1 台强流 H_2^+ 离子源及其附属系统、高压平台、低能量束流传输与匹配段，目标向后继的强流重离子 RFQ（射频四极）直线加速器注入强流高品质重离子束流。根据装置预算，该系统将一次规划、分步实施。项目 I 期（本期）将建设一台 45 GHz 超导高电荷态 ECR 离子源、高压平台、低能量束流输运线以及其他辅助系统，建设与规划中将充分考虑系统的升级空间与接口。

强流超导直线加速器 iLinac (Super-conducting Ion Linac) 是 HIAF 的注入器，其主要作用是为 BRing 提供多种注入离子。设计方案是以将 $^{238}U^{35+}$ 加速到 17MeV/u 为目标优化完成的。iLinac 主要由射频四极透镜加速器 RFQ、中能传输线 MEBT (Medium Energy Beam Transportaion)、超导直线加速器 SCL1 (Super-conducting Linac)、SCL2 和 SCL3 构成。

增强器 BRing 是 HIAF 加速器系统的核心，是获取高流强、高能量、高品质重离子束流的关键设备。BRing 采用水平和垂直双向相空间涂抹注入方法将超导直线加速器 iLinac 预加速的重离子束流累积到实验所需要的高流强，并采用磁合金高频系统将累积储存的重离子束流加速至所需要的能量。BRing 设计有快引出系统和慢引出系统，从 BRing 引出的束流主要有两种用途，一是直接打靶产生放射性次级束流，并将其注入到高精度环形谱仪 SRing 开展核物理实验；二是采用慢引出系统将 BRing 中的离子在一定时间内均匀的引出并传输到各个外靶实验终端，开展基础物理实验或应用科学研究。BRing 由磁铁系统、电源系统、真空系统、高频系统、束流诊断系统、束流反馈系统等构成。

束线系统主要包括 BRing 注入线、BRing 引出线、SRing 注入线三部分。BRing 注入线约 140m，将离子直线加速器 iLinac 引出的离子输送到增强器 BRing 中，并且预留了直线加速器能量到 100MeV/u 的升级空间。注入线水平段放置一处剥离膜，剥离膜采用碳材料，厚度约为 $50\sim 100\mu g/cm^2$ ，将 H_2^+ 离子（最大能量为 48MeV/u）剥离成质子。BRing 注入线离子的最大磁刚度设计为 4.63Tm，二极磁铁偏转半径为 3.0m。

BRing 注入线采用特殊的光学设计，水平方向二极磁体用于注入参数的色散匹配，垂直方向二极磁体用于双向涂抹注入的位置和角度匹配。BRing 引出束流传输线长约 60 m，将增强器 BRing 加速后的质子（最大能量为 9.3GeV/u）到 $^{238}\text{U}^{35+}$ 离子（最大能量为 800MeV/u）快引出或慢引出到放射性次级束流分离器 HFRS 入口，离子的最大磁刚度为 34Tm。BRing 快/慢两种引出方式共用同一束流引出通道。考虑到物理实验的需求，BRing 引出线可接受的 U 离子的能量范围从 200MeV/u 到 800MeV/u，对应的磁刚度范围为 15Tm 到 34Tm。SRing 注入线长约 50m，离子的磁刚度为 15 Tm，是将 BRing 引出后的主束或者打靶产生的放射性次级束注入到高精度环形谱仪 SRing 中，并与其实现束流光学参数匹配，开展高精度质量测量、原子物理实验等。

强流重离子加速器 HIAF 束流设计指标见表 3-1。

表 3-1 强流重离子加速器 HIAF 束流设计指标

离子	最高能量 (GeV/u)	脉冲流强 (ppp)
$^{12}\text{C}^{6+}$	4.15	7.0×10^{11}
$^{18}\text{O}^{6+}$	2.6	1.0×10^{11}
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.7	7.5×10^{10}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.85	3.0×10^{10}
$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8	3.0×10^{10}
备注：引出周期为 2s		

HIAF 的科学目标由实验终端系统实现。包括低能核结构谱仪、强流离子束辐照终端、放射性次级束流分离器、外靶实验终端、高精度环形谱仪，以及电子-离子复合共振谱仪等六大实验终端。

低能核结构终端位于超导直线加速器中间引出段，长度约 43m， U^{35+} 离子引出能量范围为 4~8MeV/u，对应离子最大磁刚度为 2.8Tm，主要开展充气反冲实验研究。该终端由匹配段和终端谱仪两部分组成，匹配段主要是将直线引出束流匹配到靶点参数，并且提供必要的距离满足辐射防护的要求；谱仪段主要用于开展实验研究。

强流离子束辐照终端位于离子直线加速器 iLinac 末端，长度约 15m，引出离子的最大磁刚度为 4.2Tm，引出能量为 17MeV/u ($^{238}\text{U}^{35+}$) 或者 48 MeV/u (H_2^+)。强流离子束辐照终端主要用于开展强流离子束辐照实验研究。。

放射性次级束流分离器 HFRS，利用 Bp- ΔE -Bp 方法产生、分离以及鉴别目标离

子，开展环内实验及外靶实验研究。HFRS 利用 BRing 快引出/慢引出的高能重离子束流轰击固体靶，将碎裂反应及裂变反应产生的短寿命目标离子有效分离及鉴别。HFRS 位于增强器 BRing 和高精度环形谱仪 SRing 之间，由两段磁分离系统组成：预分离器（Pre-Separator）和主分离器（Main-Separator），其中预分离器采用主束轰击初级靶，主要为产生、预分离次级离子，主分离器则进一步纯化目标离子或者采用次级离子轰击次级靶研究次级反应。主分离器有两种光学模式，分别对应两套次级靶和降能器系统，多种组合方案，开展不同实验研究。

外靶终端长约 15m，离子的最大磁刚度为 15Tm，主要鉴别 HFRS 纯化后的次级粒子。外靶终端与 SRing 注入线公用 4 台四极磁铁，然后再经过 4 台四极磁铁强聚焦到 $\pm 2\text{mm}$ （水平方向）和 $\pm 4\text{mm}$ （垂直方向）束斑。

高精度环形谱仪 Spectrometer Ring（SRing）是 HIAF 实验终端系统的核心之一，是获取高品质放射性次级束、高电荷态稳定重离子束并将束流用于原子物理实验及原子核物理实验的关键设备。SRing 接收来自 HFRS 打靶产生的放射性次级束和在 HFRS 剥离产生的高电荷态稳定重离子束，有三种运行模式：等时性模式，正常模式，内靶模式。特殊光学设置的等时性模式是测量短寿命（几十微秒）放射性核素质量的重要途径。正常模式下，SRing 将利用电子冷却和随机冷却装置来快速降低束流的动量分散及发射度来制备高品质的放射性次级束，并将这些高品质放射性次级束用于较长寿命（几秒）核素的质量测量。除此以外，还可以将这些放射性次级束引出用于轰击外靶。内靶模式下，电子冷却装置冷却后的高电荷态稳定重离子束将用于电子靶实验，气体内靶实验，激光冷却实验等。SRing 运行磁刚度 1.5-15Tm，可以接收能量为 800MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{92+}$ 束，并可以将其减速到 30MeV/u。SRing 是获取高品质放射性次级束、高电荷态稳定重离子束并将束流用于原子物理实验及原子核物理实验的关键设备，是国际上最先进的短寿命核质量测量谱仪。

电子-离子复合共振谱仪将利用电子冷却器冷却之后的离子束流，与超低温电子内靶提供的低温电子束反应，开展高电荷态离子甚至放射性束离子的双电子复合谱测量。电子-离子复合共振谱仪主要由低温电子靶和复合离子探测器组成，离子束穿越电子束靶区发生电子离子复合共振反应的离子的电荷态将会减少一个单位，在下游二极磁铁处会与主束分离而被位置灵敏离子探测器接收。电子-离子复合共振谱仪主要研究对象

是辐射复合 RR (Radiative Recombination) 和双电子复合 DR (Dielectronic Recombination) 过程, 同时可以开展类氢、类氦和类锂高电荷态离子在强库仑场中的 QED 效应研究, 天体物理相关的中高电荷态离子 DR 反应速率精确测量, 以及放射性核素电荷分布的精确测量。

HIAF 项目实验终端特点及主要参数见表 3-2。

表 3-2 强流重离子加速器 HIAF 实验终端参数及特点

终端	长度(m)	组成	流强/能量	科学目标与特点
低能核结构谱仪	5.27 m	充气反冲核分离器和丰中子核分离器	最大磁刚度 2.8Tm U^{35+} 离子引出能量范围为 4~8MeV/u	连接于 iLinac 的 6-7 MeV/u 能量段, 能够提供国际上最强的中低能重离子束流; 合成超重新元素(核素)、质子滴线核素, 超重元素化学性质研究, 探索产生超重核的反应机制以及建立远离稳定线原子核在束和衰变纲图最先进的装置; 利用低能重离子和靶作用, 发生多核子转移, 产生和制备低能、高品质、脉冲化丰中子重核和超重核束流, 探索丰中子稳定岛;
强流重离子束辐照终端	15m		17MeV/u ($^{238}U^{35+}$) 48 MeV/u (H_2^+)	离子直线加速器 iLinac 末端, 引出能量为 17MeV/u ($^{238}U^{35+}$) 或者 48 MeV/u (H_2^+), 离子的最大磁刚度为 4.2Tm; 主要用于开展低能辐照实验研究;
外靶实验终端	14.5 m		最大磁刚度 15Tm	最大磁刚度为 15Tm; 主要鉴别 HFRS 纯化后的次级粒子;
电子离子复合共振谱仪	4.5	电子枪、收集器、磁场系统以及真空、高压、水冷等	最大磁刚度 15Tm $10^{9\sim 10} \text{ppp}$ (高电荷态稳定重离子束)	专用低温电子内靶装置, 电子束品质大幅度提高; 将得到远离稳定线核素离子的(超)精细谱, 提取短寿命核素基态核性质参数, 探索强库仑场中 QED 效应
HFRS	188	预分离器与主分离器	最大磁刚度 25Tm $3.0 \times 10^{10} (^{238}U^{35+})$ $1.0 \times 10^{7-8} \text{ppp}$ (放射性次级束流)	高磁刚度; 大接受度, 大孔径超导磁铁的应用; 同时兼顾碎裂与裂变反应; 主分离器与预分离器有机结合, 提高分辨本领和分离效率
SRing	270.5	加速器硬件: 磁铁, 电源, 真空, 束诊等及实验探测器等	最大磁刚度 15Tm $1.0 \times 10^7 \text{ppp}$ (放射性次级束流) $10^{9\sim 10} \text{ppp}$ (高电荷态稳定重离子束)	多种运行模式, 可以开展多种原子物理, 原子核物理实验; 多种实验探测器与实验平台的整合; 大孔径二极铁磁铁; 用电子冷却与随机冷却手段制备高流强、高品质的放射性束; 高质量测量分辨率; 采用双 TOF 测量方法, 高阶项校正方法; 构建未知核区质量面, 直接确定质子、中子滴线位置; 系统提取单核子分离能、双核子分离能, 研究传统幻数的演化、发现新幻数; 测量丰中子核素的寿命、寻找高电荷态离子奇异衰变模式; 模拟快质子俘获、快中子俘获等核合成过程, 理解宇宙中化学元素的来源。

3.2 工程设备与工艺分析

本项目建设内容包括加速器系统、实验终端及辅助系统三部分，其中加速器系统是本项目的核心组成部分，辐射源项主要产生于加速器系统及实验终端。

3.2.1 加速器系统

加速器系统主要包括强流超导离子源、强流直线加速器、增强器以及链接各部分之间的束流传输线。

3.2.1.1 强流超导离子源

离子源系统为整个加速器装置的源头（如图 3-2 所示），为加速器制备提供满足加速器加速、传输要求的束流品质和种类的离子。

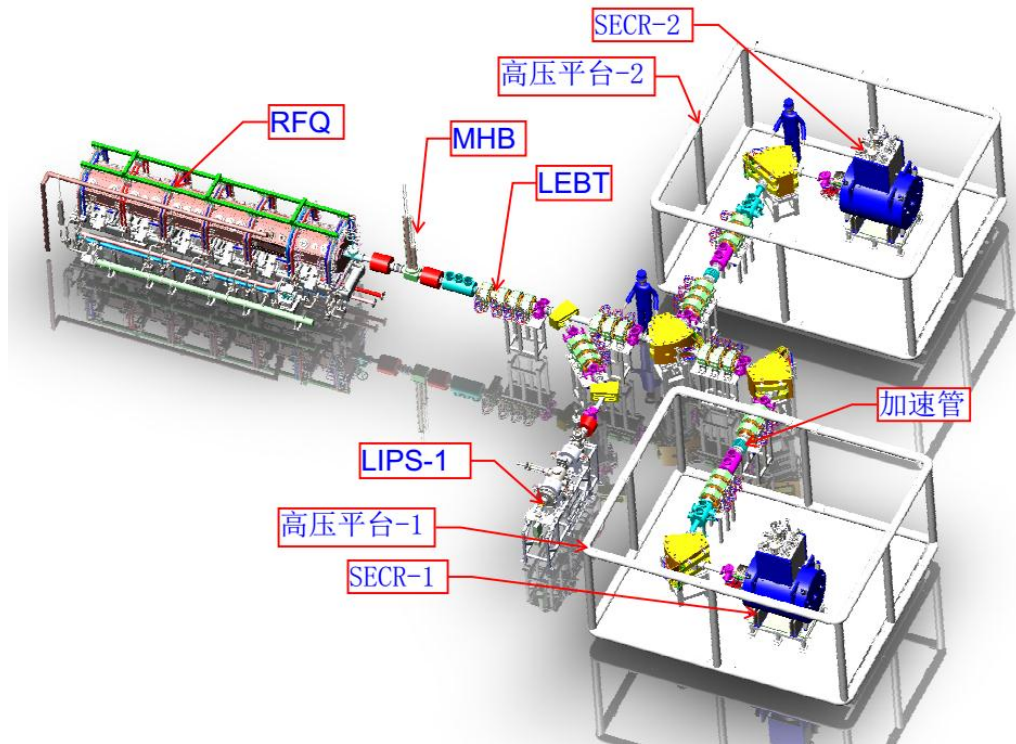


图 3-2 HIAF 前端系统设计效果图

HIAF 系统需要离子源提供 $H^{2+} \sim U^{35+}$ 的离子束流，主要离子质荷比为 $M/Q=2 \sim 7$ ，为此系统设置采用两种高性能离子源满足需求，即能产生强流 H^{2+} 离子束流的强流质子源，与能产生强流高电荷态重离子束流的超导 ECR 离子源。离子源引出束流将先进入直线加速器 iLinac 加速，再注入增强器 Bring。iLinac 中的 RFQ 需要的离子注入能量为 14 keV/u，而离子源引出高压一般为 30 kV 左右，为此高电荷态重离子离子源

需要悬浮于高压平台上进行预加速至所需能量。鉴于高电荷态 ECR 离子源在切换束流时需要做较长时间的切换准备，参照国际惯例，采用双注入离子源互为备份的设计方案（SECR-1 与 SECR-2）。由于 iLinac 为超导直线加速器，对注入束流品质有很高的需求，为此在离子源系统中设置了一定长度的低能束流输运线（LEBT），对束流品质进行筛选与控制。为包括离子源与 RFQ 的前端系统整体的工程效果设计。强流 SECR 离子源的主要参数指标见表 3-3。

表 3-3 强流 SECR 离子源的主要参数指标

离子种类	束流能量 (keV/u)	工作模式	束流流强(euA)		脉冲频率 (Hz)	束流脉宽 (ms)
			设计指标#	验收指标		
$^{16}\text{O}^{6+}$	14.0	脉冲	1000	500	5~10	0.2~2.0
		CW	1000	500		
$^{40}\text{Ar}^{12+}$	14.0	脉冲	800	500	5~10	0.2~2.0
		CW	800	500		
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	14.0	脉冲	900	300	5~10	0.2~2.0
		CW	360	300		
$^{129}\text{Xe}^{26+}$	14.0	脉冲	1300	500	5~10	0.2~2.0
		CW	520	300		
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	14.0	脉冲	1550	600	5~10	0.2~2.0
		CW	620	300		
$^{238}\text{U}^{35+}$	14.0	脉冲	1700	400	5~10	0.2~2.0
		CW	700	200		

3.2.1.2 强流超导直线加速器

强流超导直线加速器 iLinac (Super-conducting Ion Linac) 是 HIAF 的注入器，其主要作用是为 BRing 提供多种注入离子。设计方案是以将 $^{238}\text{U}^{35+}$ 加速到 17MeV/u 为目标优化完成的。

iLinac 主要由射频四极透镜加速器 RFQ、中能传输线 MEBT (Medium Energy Beam Transportaion)、超导直线加速器 SCL1 (Super-conducting Linac)、SCL2 和 SCL3 构成。iLinac 的常温加速及匹配段布局如图 3-3 所示。iLinac 的设计参数见表 3-4，典型离子的束流指标见表 3-5。

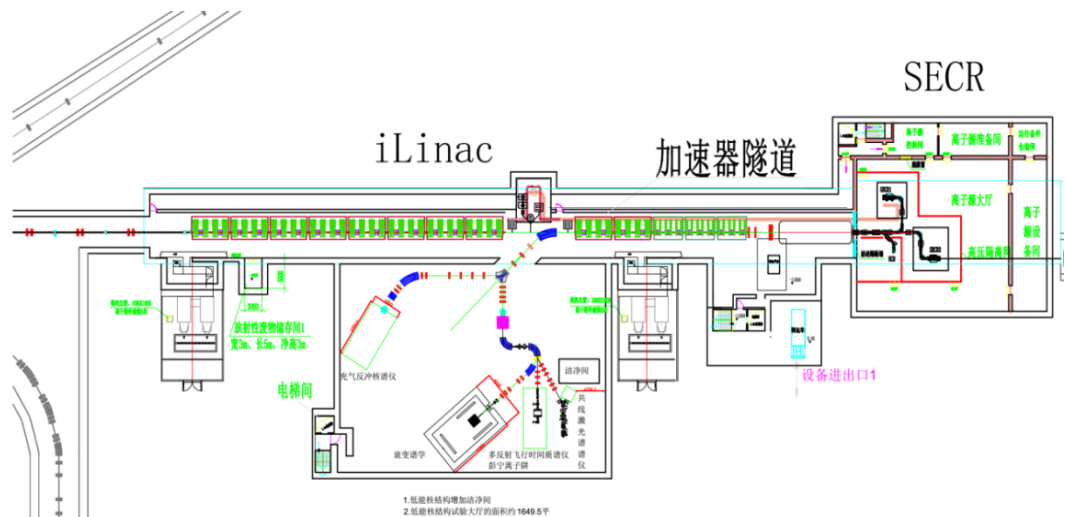


图 3-3 iLinac 的总体结构和布局

表 3-4 iLinac 典型离子的束流指标

离子	荷质比	能量(MeV/u)	流强(emA)
$^{238}\text{U}^{35+}$	1/7	17	1.0
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	19/78	30	0.8
$^{18}\text{O}^{6+}$	1/3	33	0.9
H^{2+}	1/2	48	1.0

表 3-5 iLinac 的设计参数

参数	数值	说明
离子种类	$\text{H}^{2+} \sim ^{238}\text{U}^{34+}$	
设计离子荷质比	1/7	
设计离子流强(emA)	1.0	
工作频率(MHz)	81.25, 162.5	
注入归一化水平全发射度($\pi\text{mm mrad}$)	1.5	
注入归一化垂直全发射度($\pi\text{mm mrad}$)	1.5	
RFQ 注入能量(MeV/u)	0.014	81.25MHz
RFQ 输出能量(MeV/u)	0.5	81.25MHz
SCL1 输出能量(MeV/u)	2.4	18 个, 81.25MHzQWR
SCL2 输出能量(MeV/u)	5.84	30 个, 162.5MHzHWR
SCL3 输出能量(MeV/u)	17	48 个, 162.5MHzHWR
重复频率(Hz)	0.5~5.0	
脉冲束团长度(ms)	0.2~2.0	
引出归一化水平全发射度($\pi\text{mm mrad}$)	1.0	
引出归一化垂直全发射度($\pi\text{mm mrad}$)	1.0	
引出动量分散($\Delta p/p$)	$< \pm 2.0 \times 10^{-3}$	
最终能量(MeV/u)	17	对于 A/Z=1/7

14 keV/u 的离子束经过 LEPT 匹配到 RFQ 加速器。RFQ 加速器采用四翼型射频结构，出口能量 0.5 MeV/u，腔体长度 5.96 m，高频功率 56.8 kW。束流经过 MEPT 的横纵向匹配进入超导段进行加速。超导加速段主要由不同类型、频率的超导腔组成，包括 81.25 MHz 的 QWR 腔体及 162.5 MHz 的 HWR 腔体。经过超导段， $^{238}\text{U}^{35+}$ 束流被加速到 17 MeV/u 后经过匹配进入 BRing。iLinac 运行模式兼顾脉冲和连续波，设计占空比为 100%。超导段的束流功率损失必须控制在 1W/m 以内，使损失的束流功率不至于引起超导系统失超，这将有利于辐射防护措施的实施。

3.2.1.3 增强器 BRING

增强器 BRing 是 HIAF 加速器系统的核心，是获取高流强、高能量、高品质重离子束流的关键设备。BRing 采用水平和垂直双向相空间涂抹注入方法将超导直线加速器 iLinac 预加速的重离子束流累积到实验所需要的高流强，并采用磁合金高频系统将累积储存的重离子束流加速至所需要的能量，同时，BRing 还将采用全电容储能的电源结构，实现 12T/s 的 ramping 速度，循环频率可以达到 2~5Hz。BRing 设计有快引出系统和慢引出系统，从 BRing 引出的束流主要有两种用途，一是直接打靶产生放射性次级束流，并将其注入到高精度环形谱仪 SRing 开展核物理实验；二是采用慢引出系统将 BRing 中的离子在一定时间内均匀的引出并传输到各个外靶实验终端，开展基础物理实验或应用科学研究。BRing 总体布局如图 3-4 所示。表 3-6 给出了同步加速器 BRing 的主要参数。

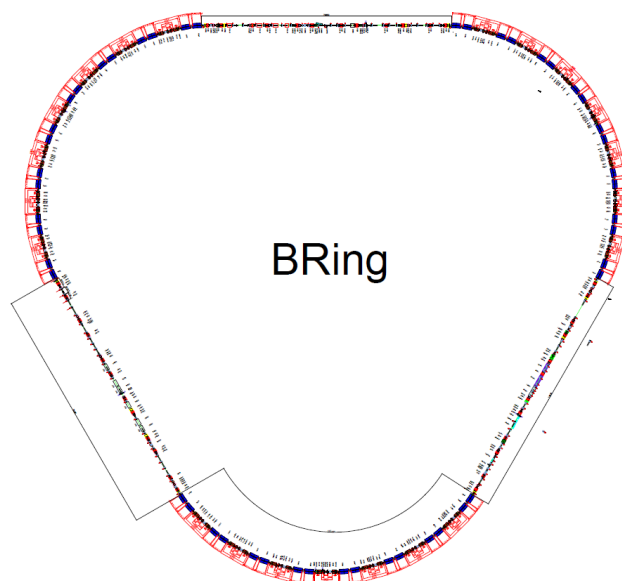


图 3-4 BRing 总体布局示意图

表 3-6 BRing 同步加速器主要参数

主参数	周长 (m): 569.0985
	磁刚度 (Tm): 1.0 ~34.0
	加速速率 (T/s): 12
	加速时间 (s): 0.23(p)
	运行周期 (s): 0.45~10000 (正常模式 0.45s, 慢引出模式最长 10000s)
Lattice	超周期: 3
	工作点: $Q_x / Q_y = 9.47 / 9.43$ (正常模式) $Q_x / Q_y = 9.348 / 9.43$ (慢引出模式) $Q_x / Q_y = 14.47 / 10.43$ (质子模式)
	接受度: $A_h / A_v (\pi \text{mm mrad})$: 200/100 ($\Delta P/P = \pm 0.5\%$)
注入束流参数	离子种类: p~238U35+
	能量(MeV/u): 48(p), 17(238U35+)
	注入流强(emA): 2.0(p), 1.0(238U35+)
	发射度($\pi \text{mm mrad}$): 5
	动量分散($\Delta p/p$): $\pm 2 \times 10^{-3}$
引出束流参数	离子种类: p~238U35+
	最高能量 (GeV/u): 9.3 (p), 0.83 (238U35+)
	离子数(ppp) : 2.0×10^{12} (p), 3.0×10^{10} (U35+)
磁铁	二极磁铁: 48
	最大磁场 (T): 1.58
	弯转半径(m): 21.5
	有效长度(m): 2.814
	好场区(mm ²): 180×95
	四极磁铁: 78
	有效长度(m): 0.8/1.0
	梯度场范围(T/m): 0.3~9.2
	好场区(mm ²): 120×108 (散焦), 207×66 (聚焦)
高频	频率范围 (MHz): 0.297~0.898(p), 0.325-0.974(238U35+)
	谐波数: $h=1, 2$ (p), $h=1, 3$ (238U35+)
	最高电压 (kV): 240
	跟踪精度: $< 100 \text{Hz}$ ($\Delta E/E = 0.5\%$)
	频率稳定性: $< 1.0 \times 10^{-6}$
	电压稳定性: $< 1.0 \times 10^{-2}$
	相位稳定性: $< \pm 3^\circ$
真空	真空度 (mbar): $\leq 1.0 \times 10^{-11}$
	真空壁 (mm): 0.3(二极铁) (加筋烘烤)
	0.3(四极铁) (加筋烘烤)

3.2.1.4 束线系统

3.2.1.4.1 BRing 注入束流传输线

BRing 注入线长约 140m，将离子直线加速器 iLinac 引出的离子输送到增强器 BRing 中，并且预留了直线加速器能量到 100MeV/u 的升级空间。注入线水平段放置一处剥离膜，剥离膜采用碳材料，厚度约为 50~100 注入线水平，将 H^{2+} 离子（最大能量为 48MeV/u）剥离成质子。BRing 注入线离子的最大磁刚度设计为 4.63Tm，二极磁铁偏转半径为 3.0m。BRing 注入线采用特殊的光学设计，水平方向二极磁体用于注入参数的色散匹配，垂直方向二极磁体用于双向涂抹注入的位置和角度匹配。给出 BRing 注入线的总布局，表 3-7 给出 BRing 注入线的束流参数。

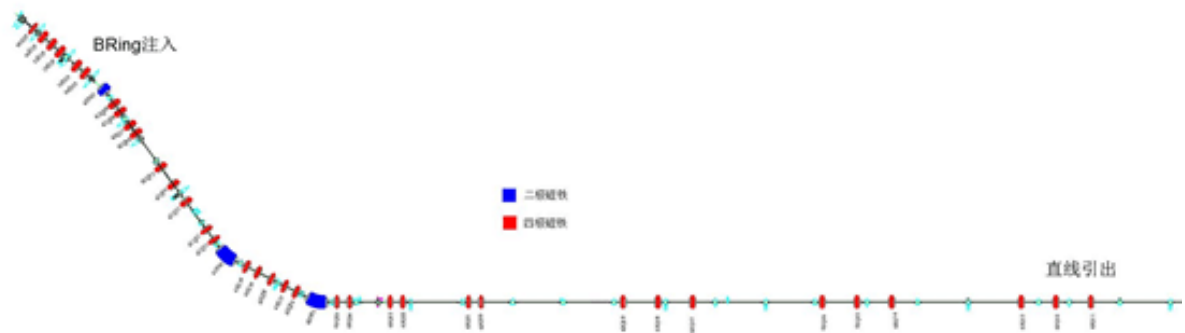


图 3-5 BRing 注入线总布局图

表 3-7 BRing 注入线束流参数

离子最大能量	48MeV/u (H^{2+}); 17MeV/u ($^{238}U^{34+}$);
注入线长度	140m
入口 Twiss 参数	$\beta_x = 1.634m$; $\alpha_x = 0.5896$; $\beta_y = 1.634m$; $\alpha_y = 0.5896$;
出口 Twiss 参数 (质子模式)	$\beta_x = 19.647m$; $\alpha_x = 2.4492$; $D_x = 0.5008$; $D_x' = -0.4475$ $\beta_y = 16.973m$; $\alpha_y = 0.7959$; $D_y = 0$; $D_y' = 0$
出口 Twiss 参数 (重离子模式)	$\beta_x = 76.94m$; $\alpha_x = 7.5293$; $D_x = 0.3911$; $D_x' = -0.4566$ $\beta_y = 7.805m$; $\alpha_y = -0.8859$; $D_y = 0$; $D_y' = 0$
束流发射度	$\leq 5 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (全发射度)
动量分散	$< \pm 0.2\%$

HIAF 项目 BRing 注入线的离子最大磁刚度设计为 4.63Tm，所有磁铁将在直流下运行。

3.2.1.4.2 SRing 注入束流传输线

SRing 注入线长约 50m，用于连接放射性次级束流分离器 HFRS 与高精度环形谱仪 SRing，设计磁刚度为 15 Tm。可以将 BRing 引出后的主束或者打靶产生的放射性次级束传输注入到高精度环形谱仪 SRing 中，开展高精度质量测量、原子物理实验等。图 3-6 给出 SRing 注入线布局图。

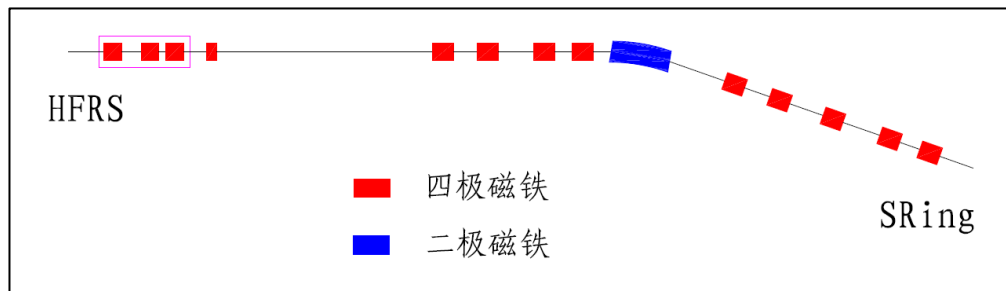


图 3-6 SRing 注入线布局图

SRing 注入线包括 1 台二极磁铁，实现束流的偏转。13 台四极磁铁，分为 3 种规格，实现束流的聚焦。4 台双向校正磁铁实现束流沿轨道的微校正。

3.2.2 实验终端系统

实验终端包括低能核结构谱仪、强流离子束辐照终端、放射性次级束流分离器、外靶实验终端、高精度环形谱谱仪，以及电子-离子复合共振谱仪。

3.2.2.1 低能核结构谱仪

低能核结构终端位于超导直线加速器中间引出段， U^{35+} 离子引出能量范围为 4~8MeV/u，主要开展充气反冲实验研究。

3.2.2.2 强流离子束辐照终端

强流离子束辐照终端长度约 15m，位于离子直线加速器 iLinac 末端，引出能量为 17MeV/u ($^{238}U^{34+}$) 或者 48 MeV/u (H^{2+})，主要用于开展低能辐照实验研究。

3.2.2.3 放射性次级束流分离器 HFRS

放射性次级束流分离器，简称 HFRS，利用 Bp-S 级束流分方法产生、分离以及鉴别目标离子，开展环内实验及外靶实验研究。HFRS 利用 BRing 快引出/慢引出的高能

重离子束流 ($^{238}\text{U}^{34+}$ 束最大能量为 800MeV/u) 轰击固体靶, 将碎裂反应及裂变反应产生的短寿命目标离子有效分离及鉴别。HFRS 位于增强器 BRing 和高精度环形谱仪 SRing 之间, 由两段磁分离系统组成: 预分离器 (Pre-Separator) 和主分离器 (Main-Separator), 其中预分离器采用主束轰击初级靶, 主要为产生、预分离次级离子, 主分离器则进一步纯化目标离子或者采用次级离子轰击次级靶研究次级反应。主分离器有两种光学模式, 分别对应两套次级靶和降能器系统, 多种组合方案, 开展不同实验研究。给出 HFRS 的总布局图。

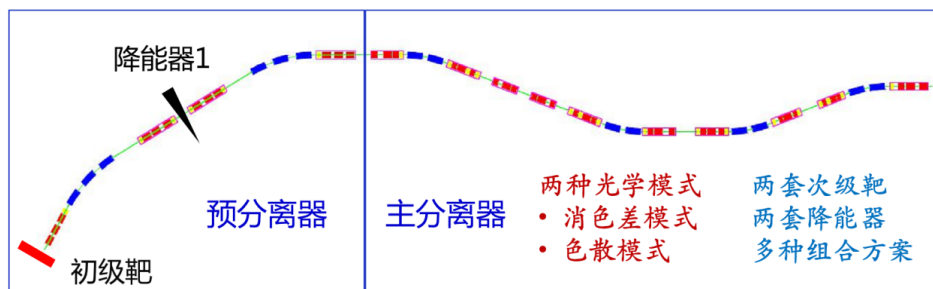


图 3-7 HFRS 总布局图

3.2.2.4 外靶实验终端

外靶终端长约 14.5m , 离子的最大磁刚度为 15Tm , 主要鉴别 HFRS 纯化后的次级粒子。外靶终端与 SRing 注入线公用 4 台四极磁铁, 然后再经过 4 台四极磁铁强聚焦到土四极磁 (水平方向) 和土水平方 (垂直方向) 束斑。图 3-8 给出了探测器阵列构型图。

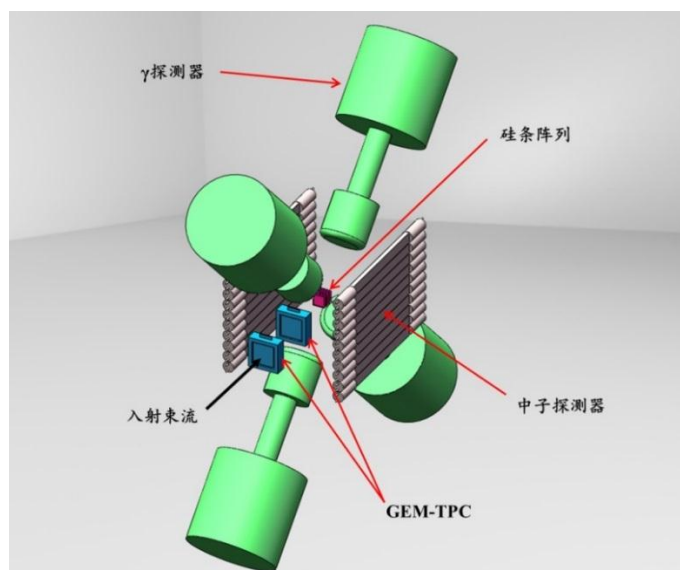


图 3-8 外靶终端衰变谱学探测器阵列构型图

探测器阵列主要由束流中心线上的位置探测器 GEM-TPC 和硅条阵列、以及包围硅条阵列的 γ 探测器和中子探测器组成，其中 GEM-TPC 探测器用于测量入射目标核的位置及方向，硅条阵列用于阻止目标核、以及测量其衰变产生的轻带电粒子， γ 探测器和中子探测器分别用于测量衰变放出的 γ 射线及中子。由于经过加速后的高能离子主要损失在 HRFS 和外靶终端区域，这一区域辐射场是最强的，也是辐射防护重点考虑的区域。

3.2.2.5 高精度环形谱仪 SRING

高精度环形谱仪 Spectrometer Ring (SRing) 是 HIAF 加速器系统的核心之一，由磁铁、电源、真空、高频、束诊、电子冷却、随机冷却和实验探测器等系统组成。SRing 总体布局如

图 3-9 所示，SRing 的主要参数和各模式下的束流参数见表 3-8、表 3-9。

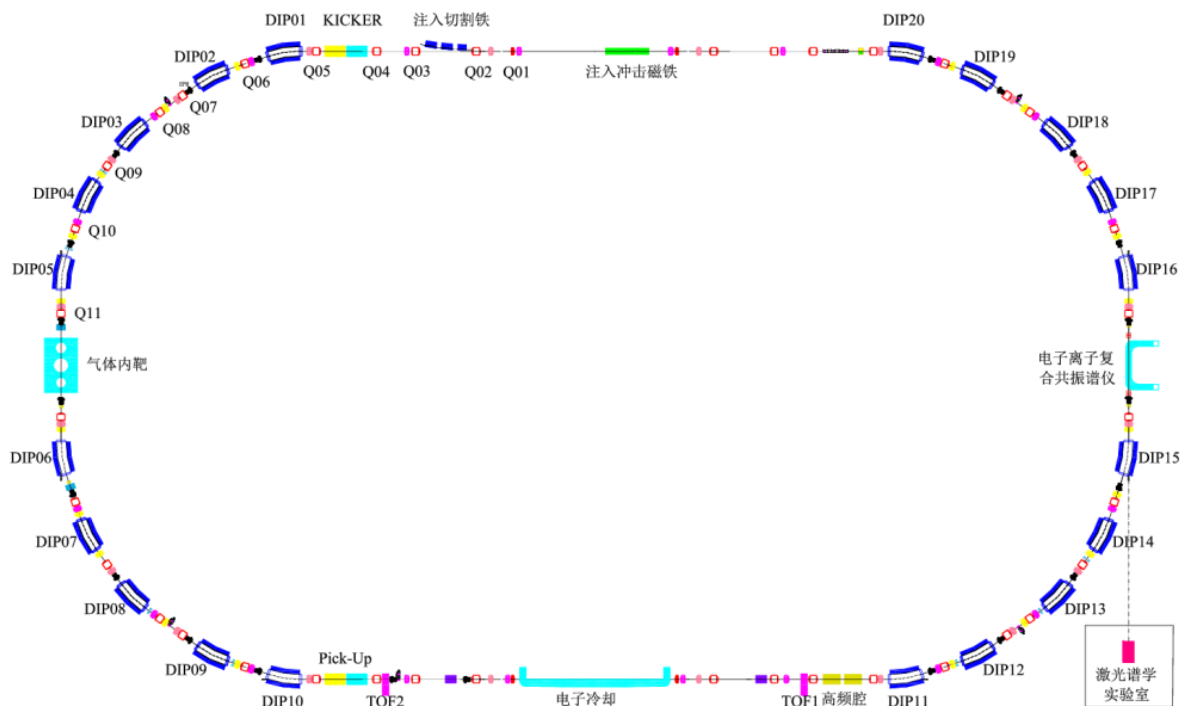


图 3-9 SRing 总体布局图

(蓝色、红色、黄色方块分别代表二极铁、四极铁、六极铁)

表 3-8 SRing 储存环主要参数列表

主参数	周长 (m): 270.5
	磁刚度 (Tm): 1.5 ~15.0
	减速时间 (s): 10.0
	运行周期(s): 10.0~120.0
光学	超周期: 2
	二极铁数量 (块): 20
	四极铁数量 (块): 44 (11 组)
磁铁	B 铁场强 (T): 0.16~1.60 ($\rho=9.375$ m)
	Q 铁场强 (T/m): 0.2~10
	S 铁梯度 (T/m ²): 20
	B 铁有效孔径 (mm ²): 318×88, 气隙 108
	Q 铁 5 种规格具体参见磁铁系统
	磁铁磁场稳定性好于 1.0×10^{-4}
高频	频率范围 (MHz): 0.25~8.15
	最高电压(kV): 50.0
	谐波数: h=1, 2
	跟踪精度: 好于 100Hz ($dE/E=0.5\%$)
	频率稳定性: $<1.0 \times 10^{-6}$
	电压稳定性: $<1.0 \times 10^{-2}$
	相位稳定性: $<\pm 3^\circ$
真空	真空度(mbar): 好于 1.0×10^{-11}
	磁铁真空壁 (mm): D/Q/S/C 铁 6/3/3/3mm(需要烘烤)
电源	纹波: 小于 $\pm 2 \times 10^{-5}$
	校正铁好于 $\pm 1 \times 10^{-4}$
	跟踪精度: 好于 $\pm 5 \times 10^{-5}$
束诊	DCCT: 分辨率好于 $0.1 \mu A$
	BPM: 位置分辨好于 0.2mm
电子冷却	电子束能量 (keV): 450
	电子束流强 (A): 2.0
随机冷却	带宽 (GHz): 1~2GHz
	冷却方法: TOF 和 Norch Filter

表 3-9 SRing 储存环束流参数列表

运行模式	等时性模式	正常模式	内靶模式
离子种类	放射性束 ($A < 238$): 丰中子, 丰质子		全剥离: p-U 类氢, 类氦: Ta-U
典型离子	$^{138}\text{Sn}^{50+}$ (400.5 MeV/u) $^{100}\text{Sn}^{50+}$ (624.1 MeV/u)	$^{132}\text{Sn}^{50+}$ (740 MeV/u) $^{104}\text{Sn}^{50+}$ (740 MeV/u)	$^{238}\text{U}^{92+}$ (800 MeV/u)
注入束能量	400 MeV/u~790 MeV/u	200 MeV/u~740 MeV/u	$\leq 1.5 \text{ GeV/u}$ ($^{12}\text{C}^{6+}$) $\leq 0.8 \text{ GeV/u}$ ($^{238}\text{U}^{92+}$)
流强	$< 1.0 \times 10^3$	$< 1.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^{9 \sim 11}$
冷却后束流动量分散横向发射度	无冷却	随机冷却+电子冷却后 $\Delta p/p \leq \pm 1.0 \times 10^{-6}$ $\varepsilon_x / \varepsilon_y \leq 0.1 \pi$ mm mrad	电子冷却后 $\Delta p/p \leq \pm 1.0 \times 10^{-5}$ $\varepsilon_x / \varepsilon_y \leq 0.1 \pi$ mm mrad
冷却时间	无冷却	$< 2.5 \text{ s}$	$\sim 1 \text{ min}$

高精度环形谱仪 SRing 的设计方案是在深入研究和比较了国内外已建成的和正在建造的相同类型的加速器的基础上, 充分考虑国内外用户和专家的意见、建议后形成的。SRing 的设计方案具有以下特点:

(1) 多运行模式; SRing 有三种运行模式: 等时性模式, 正常模式, 内靶模式。等时性模式下, SRing 能够测量极端远离稳定线核素(寿命在几十微秒量级)的质量。正常模式下, SRing 能够制备高品质的放射性次级束, 并将这些高品质放射性次级束用于较长寿命(几秒)核素的质量测量。内靶模式下, 能够进行束团堆积, 制备高流强高品质的高电荷态稳定重离子束, 并将束流用于双电子俘获实验, 气体内靶实验, 激光冷却实验, 激光光谱学实验等研究。

(2) 多种质量测量方法; SRing 将开展等时性质量测量与肖特基质量测量。既可以精确测量寿命在秒量级的核素质量, 又可以精确测量寿命只有几十微秒的核素质量。

(3) 多种束流冷却方式; SRing 上将安装电子冷却, 随机冷却系统。同时 SRing 上计划开展激光冷却相关实验研究, 并且设计方案已经考虑激光冷却以及激光光谱学实验。

(4) 质量测量精度高; SRing 上将采用双飞行时间探测器(Time of flight detector, 简称 TOF) 测量方法, 配合特殊的等时性高阶项校正, 将 SRing 的质量分辨能力提高

到 10^6 水平。

(5) 兼顾原子分子物理和原子核物理实验要求, 同时兼顾中高能物理实验要求。SRing 运行磁刚度 1.5-15Tm, 以 $^{238}\text{U}^{92+}$ 为例, 可以接收能量为 800MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{92+}$ 束, 并可以将 $^{238}\text{U}^{92+}$ 束减速到 30MeV/u。

SRing 建成后将成为获取高品质放射性次级束、高电荷态稳定重离子束并将束流用于原子物理实验及原子核物理实验的关键设备, 成为国际上最先进的短寿命核质量测量谱仪。

3.2.2.6 外电子-离子复合共振谱仪

电子-离子复合共振谱仪主要由低温电子靶和复合离子探测器组成, 其结构布局如图 3-10 所示, 它在 SRing 中主要用作低温电子靶及低能量离子束的冷却。存储离子束在靶区与低温电子束作用, 复合的离子因电荷态降低而经过偏转二极磁铁后偏离循环束, 在靶下游的第一块或第二块二极磁铁处由 MWPC 探测接收。在 SRing 中, 电子离子复合共振谱仪将与电子冷却结合共同完成 DR 实验。

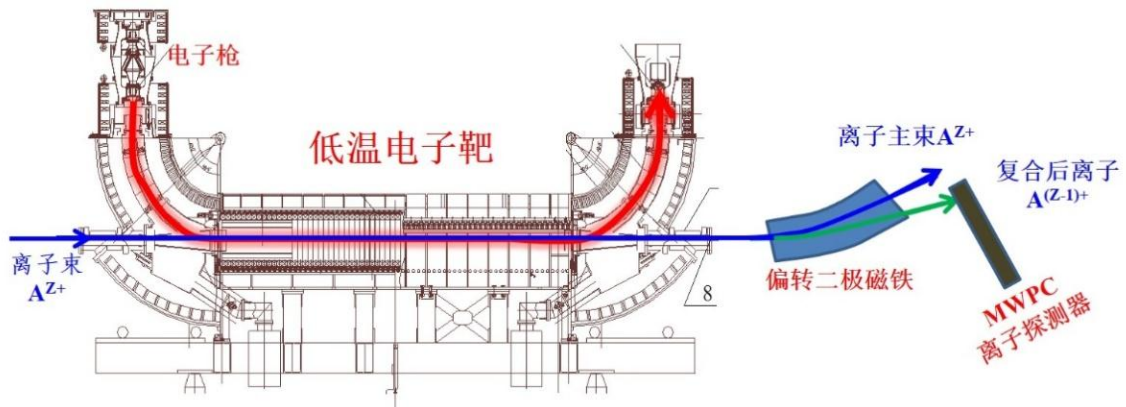


图 3-10 电子离子复合共振谱仪布局

3.2.3 辅助系统

3.2.3.1 配电系统

依据《民用建筑电气设计规范》JGJ/T16-2008 和《建筑设计防火规范》GB50016-2014 相关条文, 科研院所属于二级负荷。电力工程二级负荷用户和设备的供电措施为: 二级负荷的供电系统应做到当电力变压器或线路发生常见故障时, 不致中断供电或中断供电能及时恢复, HIAF 装置厂区交流进线电压等级为 10kV, 10kV 进线引自当地政府 110kV 变电站的不同母线。根据本项目用电负荷的分布情况, 在装

置厂区设置 4 座 10kV/0.4kV 变电站，总容量 80MVA，每个变电站由上级变电站引来两条 10 kV 进线，这种分布式供配电布局可以有效的减少低压电缆的长度，一方面降低供配电系统的建设成本，另一方面在以后的运行中，降低了线路损耗，是一种降低能损的布局结构。考虑到 10KV 电缆辐射及 10KV 母线容量，10KV 系统从外部变电站分 8 条线路引入装置区变电站，每条线路 10MVA 容量。配电系统结构下见图 3-11。

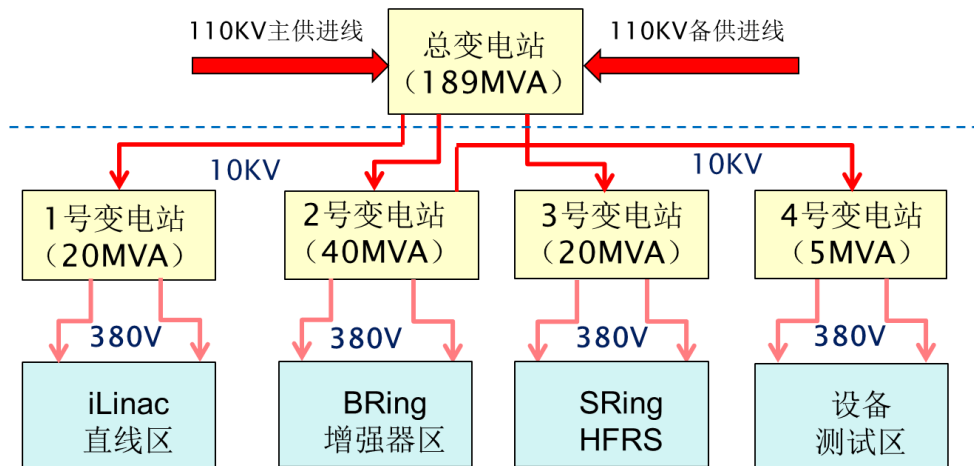


图 3-11 配电系统结构示意图

图中的总变电站由当地政府和南方电网为大科学装置专门建设（不属于本项目建设范畴），配置 3 台 63MVA 变压器，10KV 母线分四段。考虑到负荷的均匀分布及供电的可靠性，8 条 10KV 引线平均分布到 4 段母线。图中 4 号变电站为离线测试区提供电源，因其容量较小，且在加速器投入运行后离线测试区用电负荷较轻，因此 4 号变电站的 10K 进线引自 2 号变电站，这样可以降低高压系统的造价，提供系统运行的经济性。10 kV 高压系统为单母线分段运行模式，变电站内两段母线通过联络开关实现互为备用。当其中一路进线故障失电时，通过母线联络，保证重要设备的正常供电，配电系统共安装 29 台 SCB11-2500kVA/10kV/0.4kV 干式变压器。为了提高变压器的运行效率，在 0.4kV 侧设计无功及谐波补偿。对于单台功率大于 500kW 的水泵机组和压缩机组可选用 10KV 电压等级直接供电，以降低能耗。

3.2.3.2 冷却系统

HIAF 水冷系统要求使用水质 $\geq 1\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上，需要使用纯水作为冷却介质，考虑到换热需求和运行能耗的要求，采用双循环间接冷却方式，使用纯水作为冷却剂与冷却对象直接接触，组成密闭式内循环回路（内水），带走这些设备的热功耗，并通过

板式换热器将热量传递给外循环冷却水（外水），再经冷却塔将热量散发于外界大气中。当冷却塔的冷却能力无法满足加速器运行要求时，须投入人工冷源，采用冷水机组提供 $7\sim 12^{\circ}\text{C}$ 冷冻水进行二次温度补偿。因此，HIAF 水冷系统工艺设计原理如图 3-12 所示。

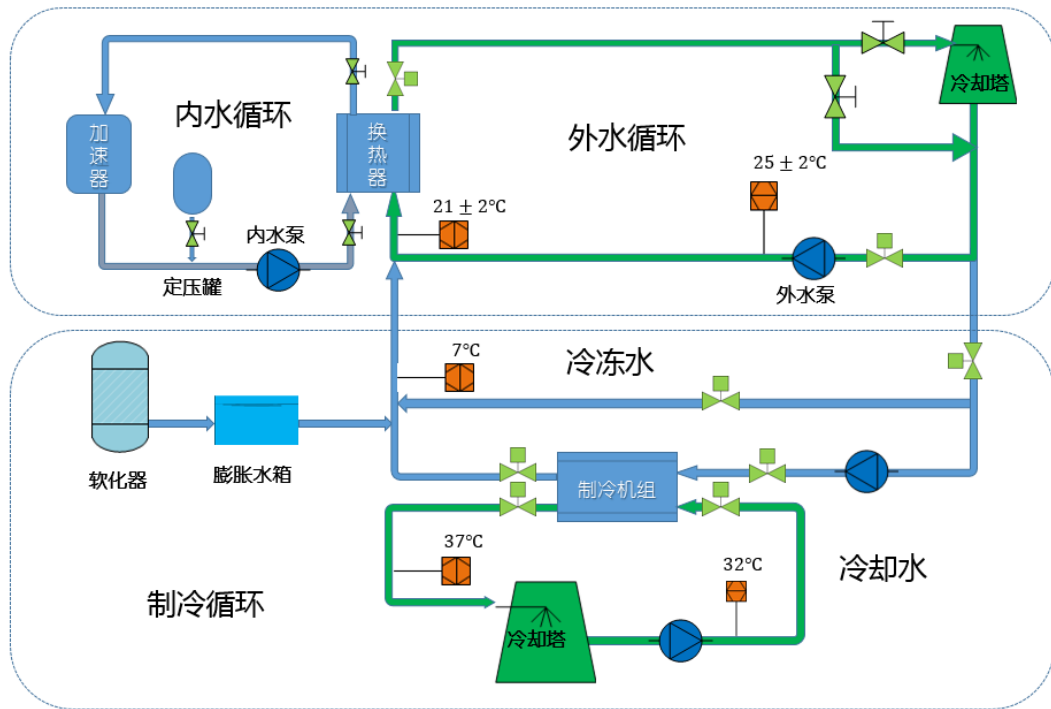


图 3-12 水冷系统工艺原理图

因 HIAF 装置占地面积较大，分布区域较广，综合考虑到装置以后的调试、运行及维护，本次设计采用集中建站模式，循环水站位置依装置布局见图 3-13 所示。

内冷水流经加速器部件时受到辐射照射可能产生感生放射性，内冷水为去离子水的闭循环模式，每年检修时排放一次，环路总存水量约为 480m^3 。

外冷水与内冷水之间只有热量交换而没有水的交换，因此外冷水中无放射性核素。HIAF 年总用水量约为 21万 m^3 。

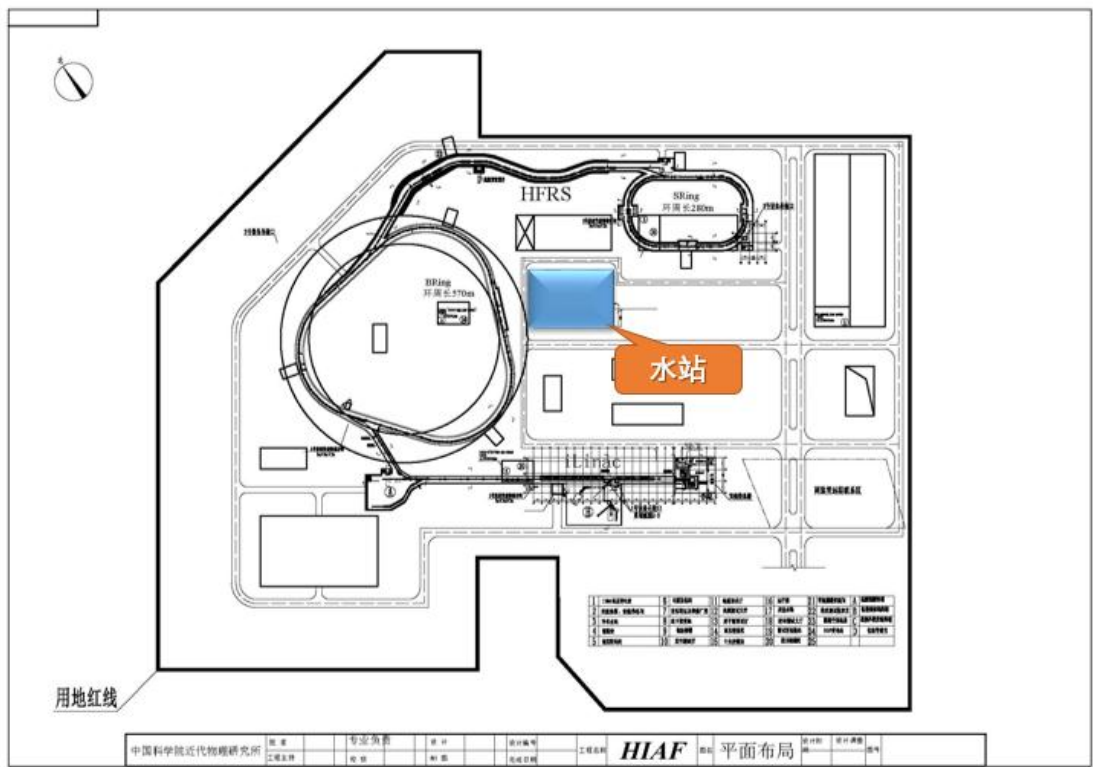


图 3-13 HIAF 泵站布局图

3.2.3.2.1 压缩空气系统

HIAF 加速器装置的束诊系统和真空系统有部分仪器、仪表采用气动执行元件，这些气动元件的工作均需干燥清洁的压缩空气，所需的压缩空气的压力为 4.5~6bar，压缩空气用气量估算为 5m³/min。按照总体布局，在冷却水站内设置空压站，每个站内配有两台空压机，一用一备，并能在运行设备发生故障时进行自动切换，同时配备油水分离器、干燥机、过滤器、储气罐以及相应的监控设备。压缩空气管路为不锈钢管道，阀门、过滤器及相应配件均采用不锈钢材质。HIAF 装置束线较长，在每个区域系统的末端均设置稳压罐来保证系统稳定运行，减少压力波动的可能。

压缩空气系统工艺流程图见图 3-14。

压缩空气系统主要设计参数见表 3-10。

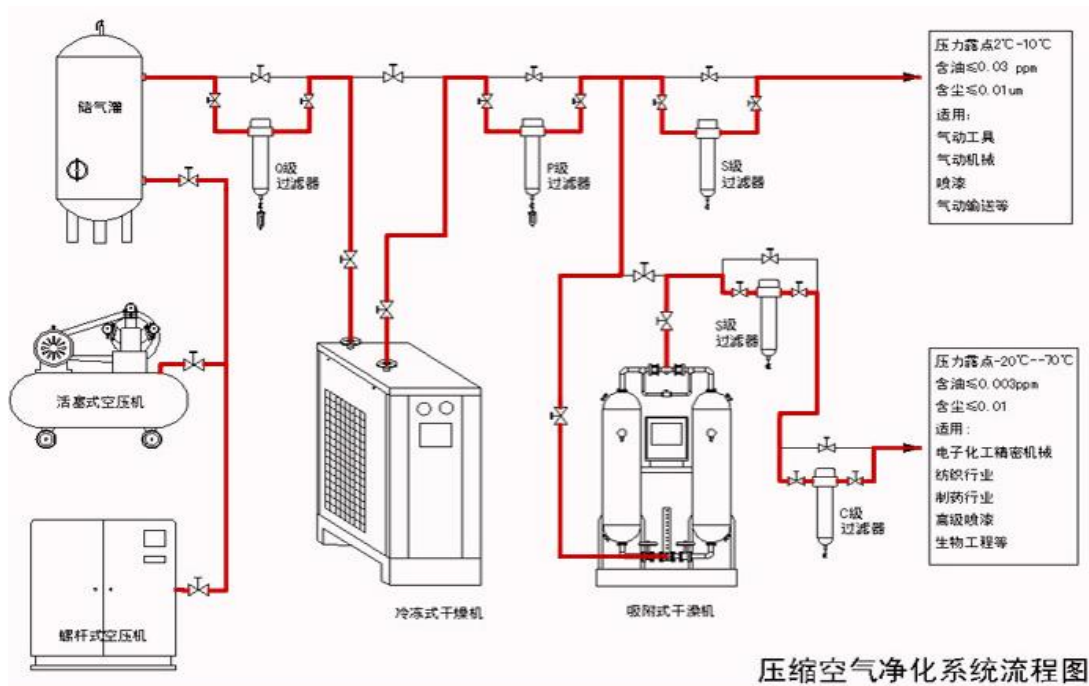


图 3-14 制冷系统工艺流程图

表 3-10 压缩空气系统主要设计参数一览表

系统划分	设备名称	设计参数
直线低温压缩空气系统	空压机	排气量：3.83 m ³ /min；排气压力：0.8 MPa；螺杆式；两台，一用一备。
	储气罐	容积：1.5 m ³ ；压力等级：1.0 MPa。
Bring 真空压缩空气系统	空压机	排气量：0.93 m ³ /min；排气压力：0.7 MPa；螺杆式；两台，一用一备。
	储气罐	容积：1 m ³ ；压力等级：0.8 MPa。
Sring 真空压缩空气系统	空压机	排气量：0.66 m ³ /min；排气压力：0.7 MPa；螺杆式；两台，一用一备。
	储气罐	容积：1 m ³ ；压力等级：0.8 MPa。

3.2.3.3 通风与空调系统

HIAF 装置占地广，根据使用功能不同主要划分为隧道设备间和工艺设备间等，其中：隧道区域的设备安装集中、散热量大、设备运行时含有放射活化颗粒；工艺设备间，如电源间、测试大厅、泵站、超导低温站等区域设备发热量大，但处于非辐射区，无辐射防护影响。图 3-15 给出了隧道通风空调机房（9 个）分布图，每个机房均有独立的进风和排风，每个机房采用两套组合式空调机组，每个机组设计制冷量为 200kW。

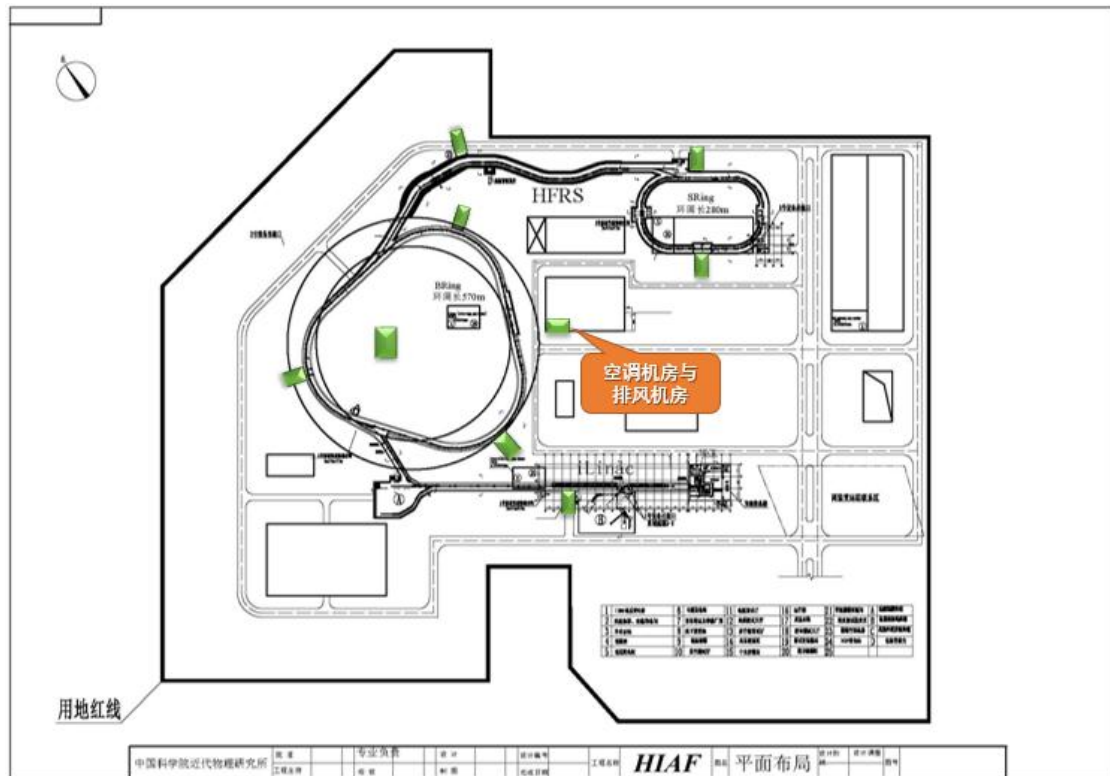


图 3-15 隧道通风空调机房分布图

隧道空调系统设计采用直膨式全空气空调系统，整个空调系统仅由室外机和室内机两部分组成，无需水泵、冷却塔、风机盘管等配套设备，亦无需冷凝排水管道，安装使用及运行维护均极为方便。机组不需二次冷媒，系统效率高，可实现空气净化、除湿、加湿、降温、供暖、新风量调节等多种功能。由于空气中含有一定的活化性气体，考虑到环境保护要求，将隧道区域设计为微负压系统。隧道空调系统设计为一次回风系统，以节约能源、同时减少活化气体的排放，降低排风系统的处理负荷；送风温差采取小温差设计，同时与通风系统联合考虑，由新风系统承担主要的湿负荷，通过单独处理新风，除去多余的含湿量，取消再热过程，降低机组自身的能耗问题，解决常规空调系统在运行过程中的冷热抵消现象。

隧道空调系统工艺原理见图 3-16 所示。隧道空调系统共分为 9 个机房，每个机房采用两套组合式空调机组，每个机组设计制冷量为 200kW，由 4 个空调冷冻水系统制冷，分别是直线站、B 站（2 个）、S 站冷冻水系统，冷站制冷工艺原理见图 3-17 所示。

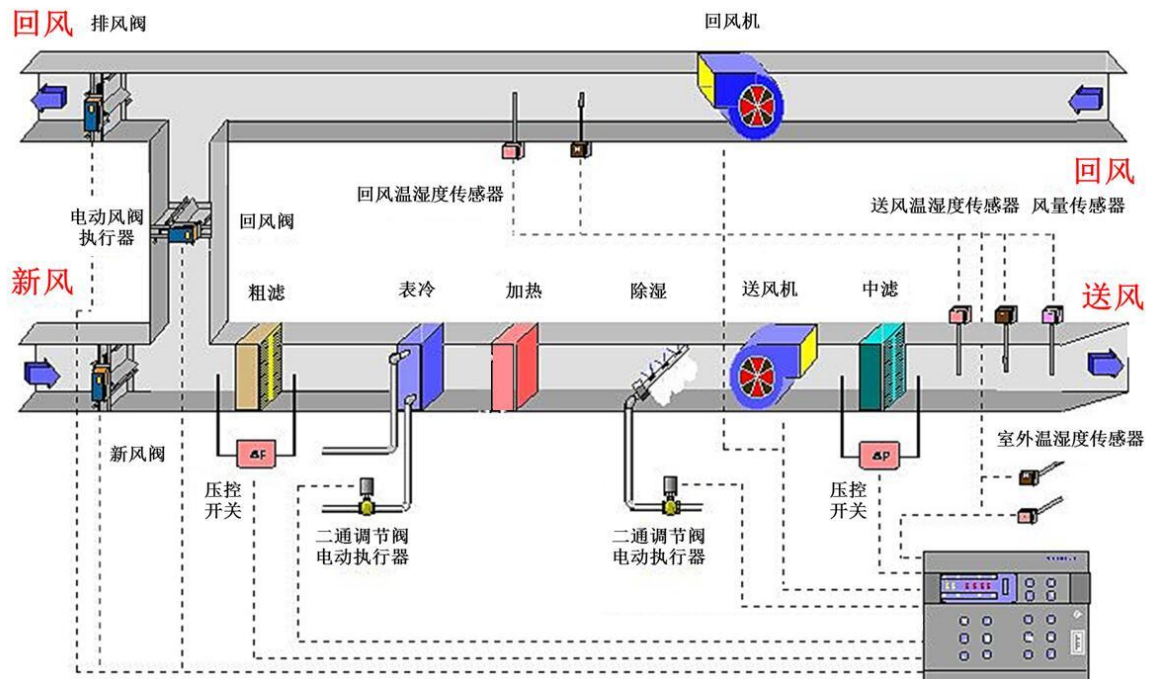


图 3-16 隧道空调系统工艺原理图

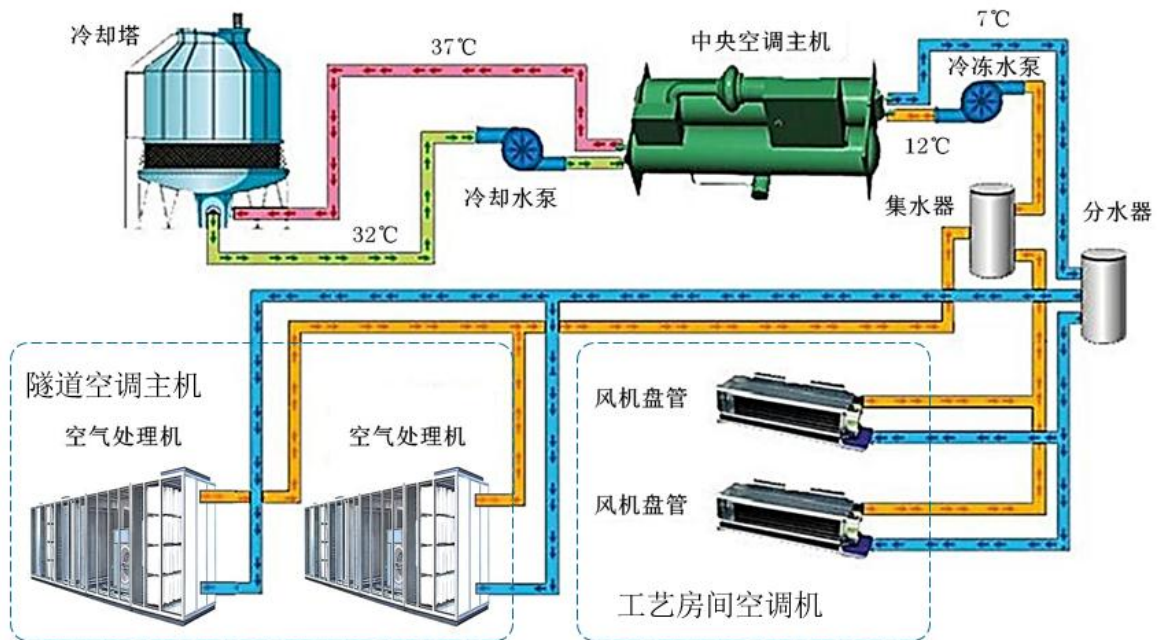


图 3-17 工艺空调系统工艺原理图

根据工艺要求，隧道装置区设置全面通风系统。通风空调系统按工艺运行可分为以下三种运行模式：

1) 机器停止模式——机器不运行，人员可进入。空调通风系统处于循环状态，同时开启新风系统，用于保持隧道空气的新鲜度。

2) 机器运行模式——隧道为禁入区和人员进入区，其中：禁入区的运行模式为空调通风系统处于循环状态，新风系统停止运行，平时排风系统运行以保持该区域微负压状态，以防止活化空气的泄漏。隧道大部分区域的排风速率 $\leq 0.4\text{m/s}$ ，可维持负压为 $-20\sim-50\text{Pa}$ ，次级束线和实验终端等区域的排风速率 $\leq 1\text{m/s}$ ，可维持负压为 $-50\sim-100\text{Pa}$ 。人员进入区的运行模式为空调通风系统处于循环状态，新风系统运行，平时排风系统停止运行以保持该区域正压状态。

3) 过渡期通风模式——从机器运行模式快速达到人员可进入的模式，经适当最长半小时衰减后，采取大风量排风，排风速率 $\geq 10\text{m/s}$ ，快速置换隧道中的空气，以满足人员进入的要求。

以上三种模式下，隧道中的空气均于循环状态，且经过空调箱的连续过滤。组合式空调箱采用初、中效两级过滤组合，其过滤效率分别为 30% 和 85%，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 ≥ 5 微米的粒子，其过滤效率 $80\% \geq E \geq 20$ ，初阻力 $\leq 50\text{Pa}$ ；中效过滤器，用以过滤粒径 ≥ 1 微米的粒子，过滤效率 $70\% \geq E \geq 20$ ，初阻力 $\leq 80\text{Pa}$ 。

每个空调机房均设有独立的排风系统，其中排风管道尺寸为 $1200\text{X}1000\text{ mm}$ ，排风管道高出建筑屋面 2 米以上。

隧道通风系统原理如图 3-18 所示。

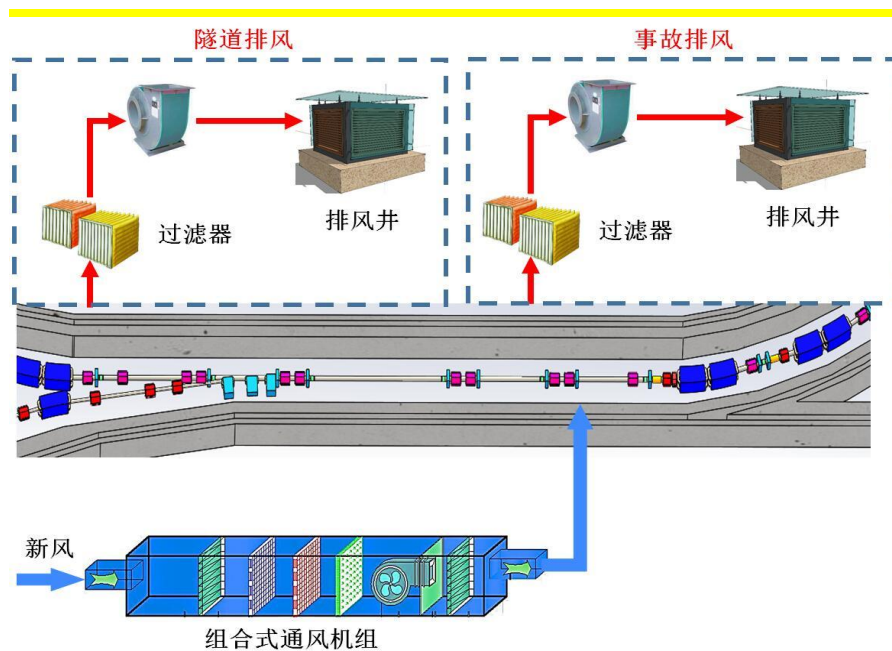


图 3-18 隧道通风系统工艺原理图

3.2.3.4 低温系统

HIAF 加速器超导段由 3 种不同超导腔型的 23 个低温恒温器组成,总长度 125 米,低温恒温器设计运行温度为 2K。低温系统给低温恒温器的运行提供必要的制冷量和低温状态的控制,低温系统具有不同的工作模式以满足低温恒温器不同工作状态的需求,以保证低温系统长期、安全、稳定、可靠地运行。系统按照加速器不同工况的运行需求,设计有不同的工作模式:降温、回温、液氮注液、4.5K 温区待机、77 K 温区待机、2K 温区运行等,这些工作模式可以随意切换,以满足加速器不同的工作状态。同时,低温系统还具有闭环运行、开环运行等多种运行模式,开环运行时,系统应具备氦气回收、提纯再利用的功能以节约运行成本。另外,系统还应具有超导腔失超低温保护功能,还需安装其它必要的安全保护措施,如安全阀、泄压阀、爆破膜等。此外,低温系统应能长期、稳定、可靠的运行。

HIAF 低温系统主要包括氦制冷机系统、分配与传输系统、氦气回收纯化系统、控制系统以及低温配套系统等。其总流程结构如图 3-19 所示。系统总体分为制冷机站和分配系统两个部分,氦制冷机站负责产生冷量,分配系统负责冷量的分配调节和输运。

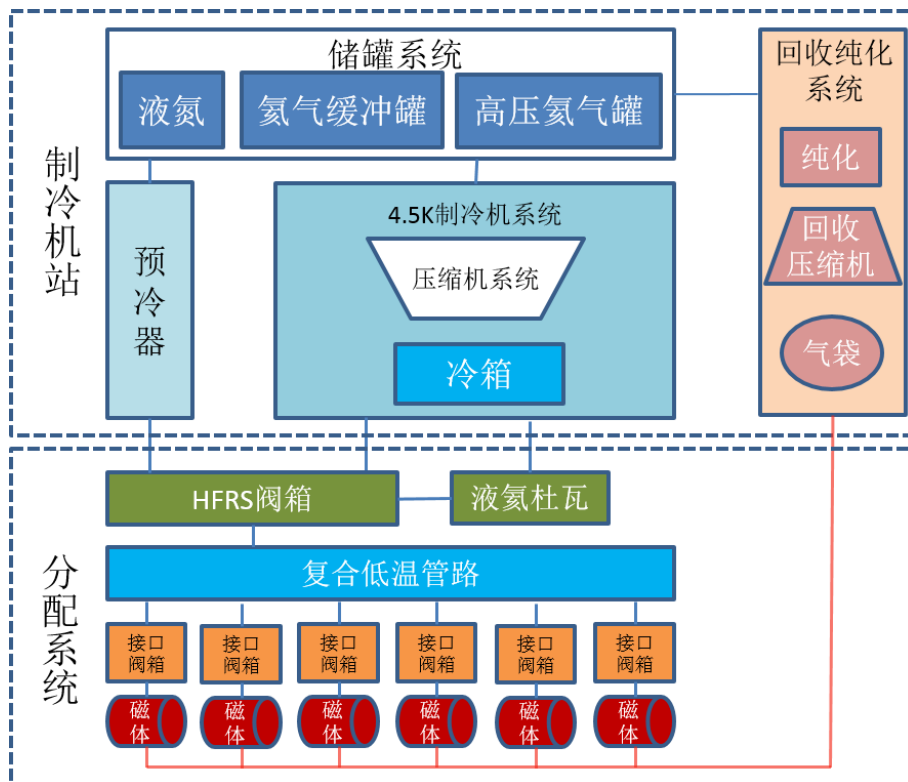


图 3-19 HFRS 低温冷却系统的总流程结构

3.3 污染源项

HIAF 运行时产生的辐射场，包括加速器的运行时产生的“瞬发辐射场”和加速器停机后依然存在的“残余辐射场”。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部件、设备冷却水、隧道内空气被主束或次级粒子轰击产生的活化产物，在加速器停机后依然存在。

对于质子/重离子加速器，其初级辐射(被加速的离子束流)种类多，能量、流强变化大。较轻的粒子能量高、射程长、流强大，束流聚焦好，沿途散失小。束流轰击外靶时束流损失大，甚至全部，适于采用束流收集器、局部厚屏蔽等措施。加速器运行时产生的辐射主要是高能粒子引起的核反应而发射出的瞬发中子，主要包括由核内级联产生的高能中子及复合核退激出射的蒸发中子（各向同性部分）两部分，其他粒子（电子， γ 等）不论是产生的量还是穿透能力皆小于中子。

3.3.1 瞬发辐射

（1）中子产额

重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，还受靶核性质的影响。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。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，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。

HIAF 各阶段束流损失的能量不尽相同，因此各束损点产生的次级中子场也就各具特点。利用蒙特卡罗程序 FLUKA 对单核能分别为 11.72 MeV、33 MeV、1.5 GeV、2.94 GeV 及 4.15 GeV 的 C 束轰击厚铜靶产生的中子场进行了模拟，图 3-20 给出了其计算模型，图 3-21 至图 3-25 分别给出了靶的厚度及各个能量的 C 束与厚铜靶作用时产生中子场的能量分布和空间分布。

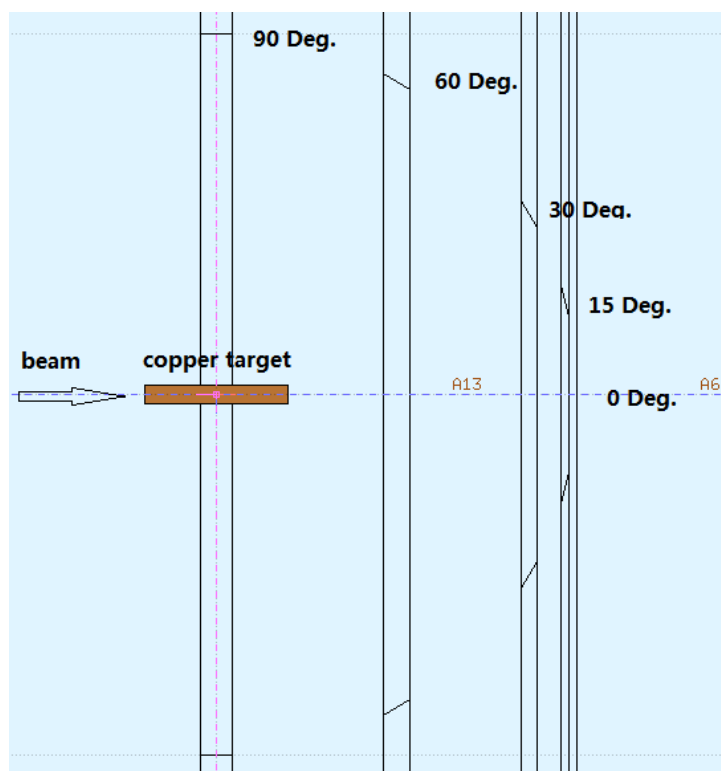


图 3-20 计算模型示意图

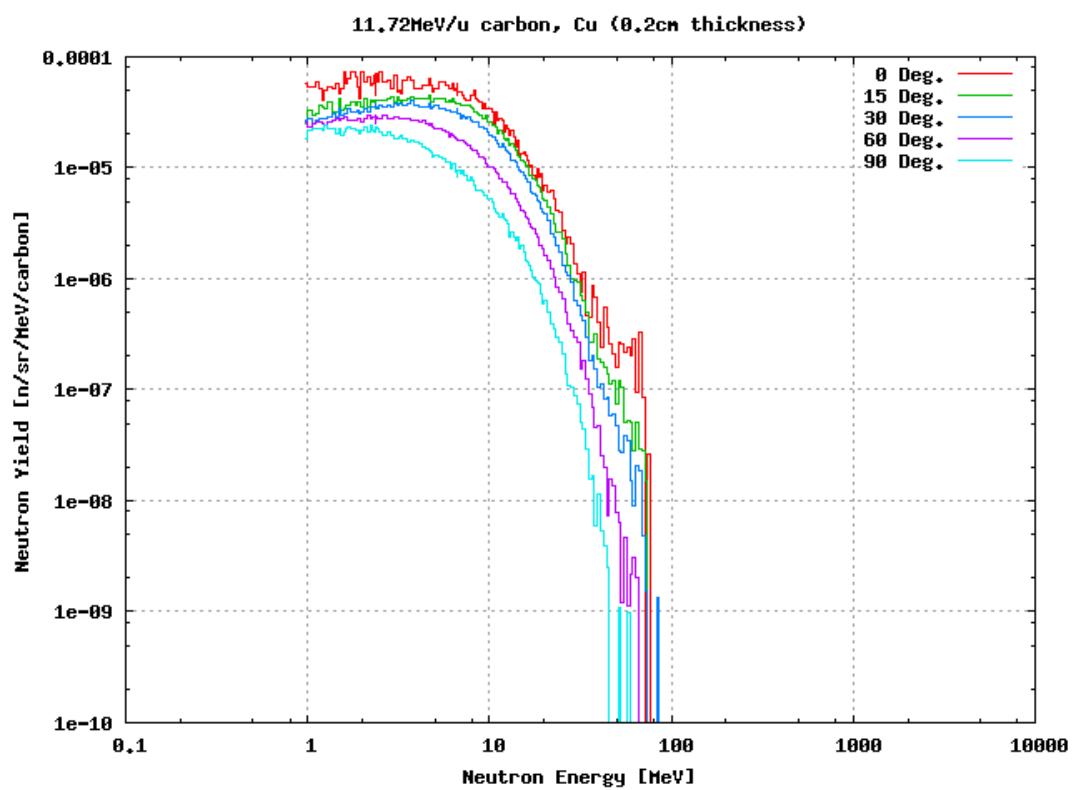


图 3-21 11.72MeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场

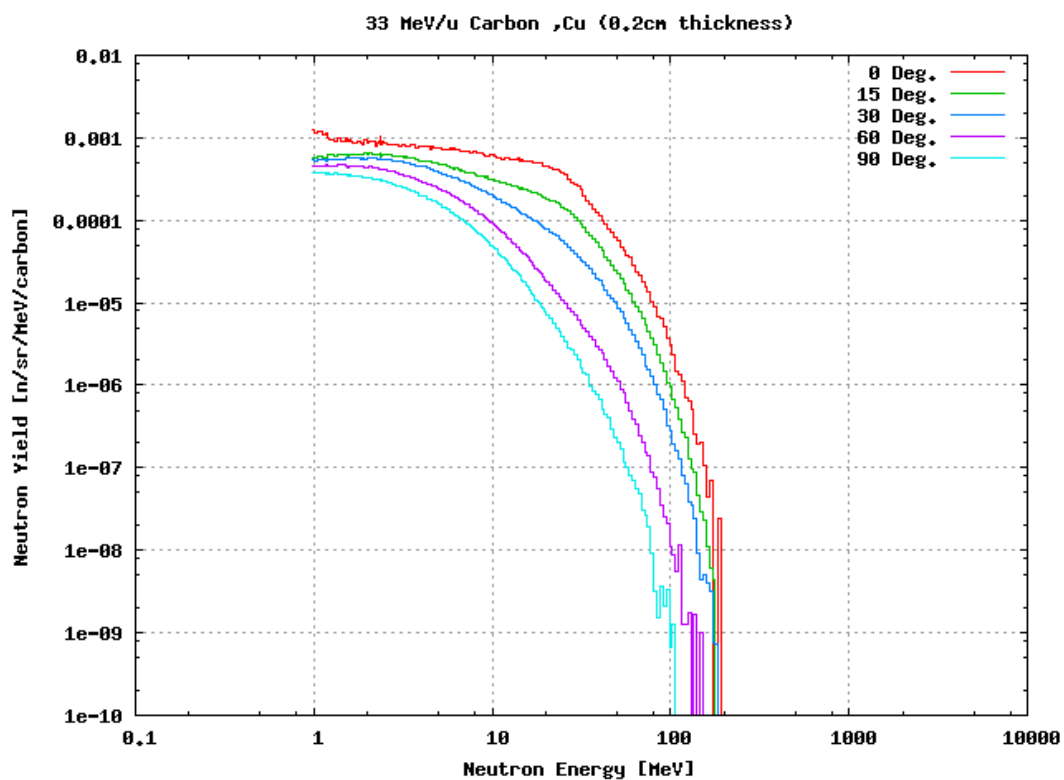


图 3-22 33MeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场

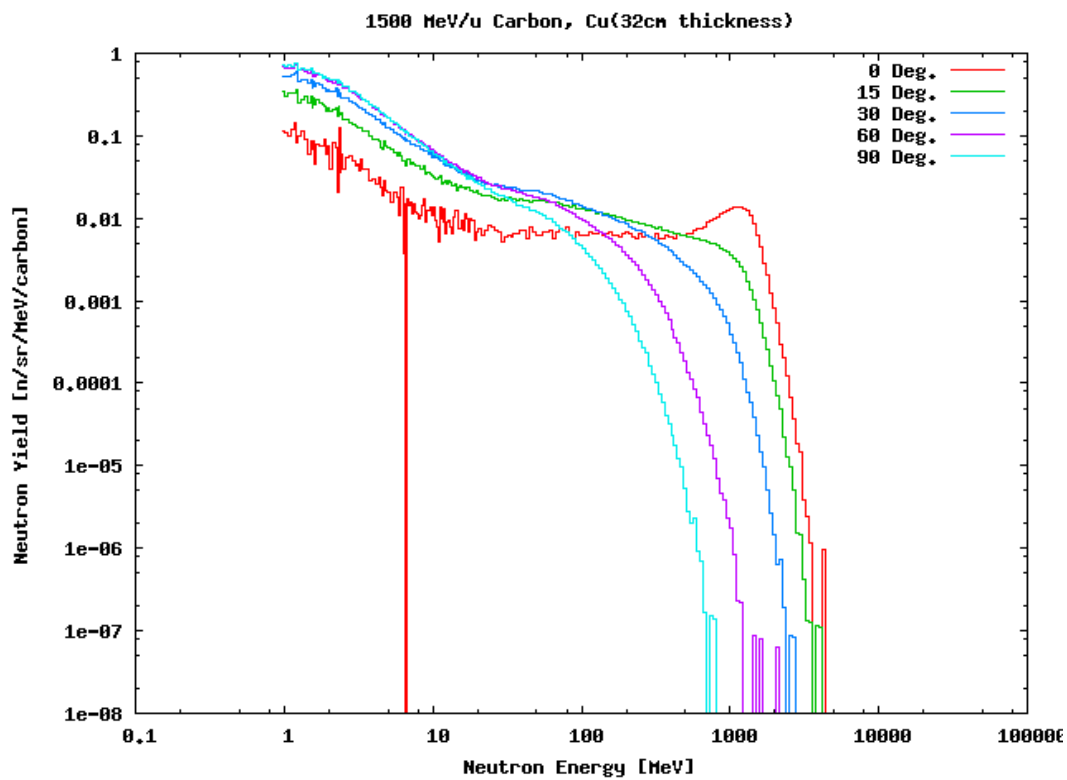


图 3-23 1.5GeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场

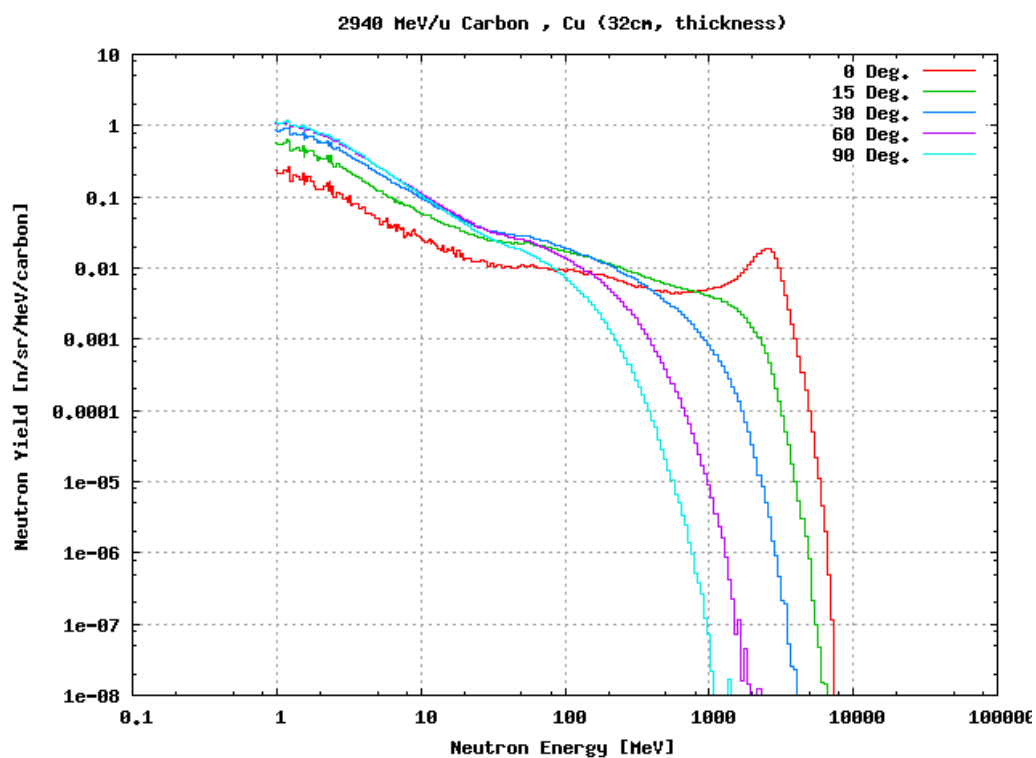


图 3-24 2.94GeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场

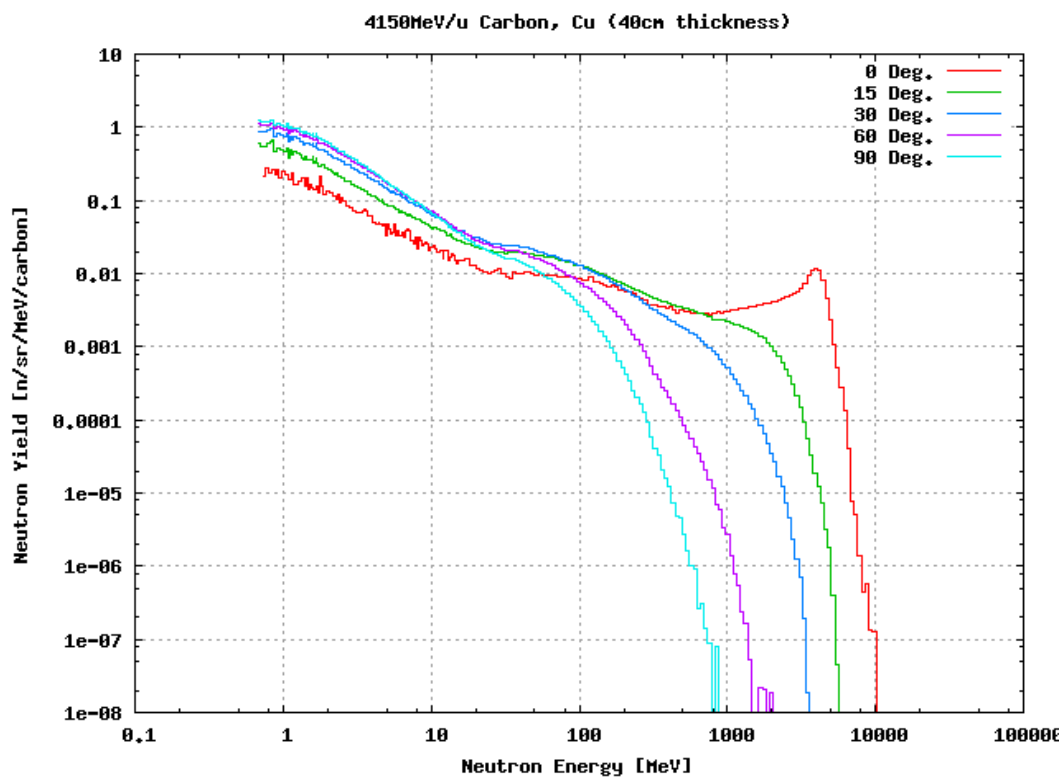


图 3-25 4.15GeV/u 的 C 束轰击铜靶的中子场

由以上计算结果可以看出，高能重离子轰击厚靶时， 0° 方向的中子能谱有明显峰值，峰位中子能量约在入射离子单核能的 E_u 的 $2/3$ 左右，且中子最高能量可达 E_u 的 2 倍。表 3-11 给出了各能量的 C 束与铜靶作用产生的总中子产额。

表 3-11 各能量的 C 束与铜靶作用产生的总中子产额

能量 MeV/u	11.72	33	980	1500	1860	2930	4150
中子产额 (n/carbon)	2.34×10^{-3}	3.29×10^{-2}	26.20	51.31	59.66	79.88	98.90

(2) HIAF 束流损失表

加速器束流损失是其辐射源项的来源，本项目 HIAF 束流能量及损失情况见表 3-12，表中损失束流单位“表中损失为每秒钟损失的入射离子数，隧道区域束流为均匀损失，束流引出、注入点和实验终端束流为集中损失。

表 3-12 HIAF 束流损失表 ($^{12}\text{C}^{6+}$)

序号	束流损失区域	隧道长度 m	损失束流 pps	束流能量 MeV/u	损失方式
1	LEBT	16	$3.537\text{E}+14$	0.014	均匀损失
2	RFQ	6	$2.830\text{E}+14$	0.5	均匀损失
3	MEBT	6	$1.132\text{E}+14$	0.5	均匀损失
4	超导-QWR005	16.42	$3.932\text{E}+12$	3.84	均匀损失
5	超导-HWR010	26.59	$1.837\text{E}+12$	11.72	均匀损失
6	核结构谱仪传输线	43	$1.519\text{E}+14$	11.72	均匀损失
7	核物理终端靶点	—	$9.623\text{E}+14$	11.72	集中损失
8	超导-HWR015	38.4	$9.218\text{E}+11$	33	均匀损失
9	低能辐照传输线	43	$1.518\text{E}+14$	33	均匀损失
10	低能辐照终端靶点	—	$9.614\text{E}+14$	33	集中损失
11	BRing 注入线	140	$1.518\text{E}+12$	33	均匀损失
12	BRing 注入	—	$3.836\text{E}+10$	33	集中损失
13	BRing 全环	569.09	$3.644\text{E}+10$	1380	均匀损失
14	BRing 引出	—	$1.786\text{E}+10$	4150	集中损失
15	BRing 引出线	60	$1.750\text{E}+10$	4150	均匀损失
16	打靶后至 DUMP	27	$3.396\text{E}+11$	2940	均匀损失

序号	束流损失区域	隧道长度 m	损失束流 pps	束流能量 MeV/u	损失方式
17	DUMP 至降能器	9	3.259E+10	2940	均匀损失
18	降能器至出口	146	3.096E+10	2940	均匀损失
19	外靶终端束线	15	1.470E+10	2940	均匀损失
20	外靶终端靶点	—	2.882E+11	2940	集中损失
21	SRing 注入线	50	1.470E+10	1500	均匀损失
22	SRing 注入	—	2.882E+10	1500	集中损失
23	SRing 全环	274	2.738E+10	1500	均匀损失

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 HIAF 来说，感生放射性主要是加速器主束与加速器部件以及产生的次级中子、 γ 光子与加速器部件、设备冷却水及隧道内的空气相互作用引起的。其辐射水平取决于加速粒子的能量、种类、流强、加速器运行时间、冷却时间和被照材料性质等诸多因素。一般来说，半衰期长的核素达到饱和放射性的时间较长，对于损失流强较低的加速器，该类放射性核素一般不会产生大量的核素，而半衰期短的核素则衰变得非常快。

(1) 空气活化

加速器运行期间初级粒子或次级粒子与靶室中空气相互作用产生放射性气体。这种空气中的放射性核素一般是短寿命的，即使产生的放射性达到不能接受的高水平，放射性衰变和放射性空气的稀释部分都非常快地使放射性浓度降低到可接受水平。实际上，只有在非常少的情况下才会使空气的放射性水平达到不可接受的水平。其放射性核素主要通过热中子俘获、 $(n, 2n)$ 、 (γ, n) 反应和散裂反应而产生。产生的活化核素主要有 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 。它们对人体的危害是 β 、 γ 放射性气体浸没外照射和吸入引起的内照射。可以看到，空气中大部分活化核素半衰期都很短，不存在长期累积问题，且毒性较小，危害不大。

隧道内的气压设计为负压，在正常工作时，隧道内的换气束率为 1 次/小时，在停机后工作人员要进入隧道之前需紧急通风，其换气频率为 6 次/小时，清除隧道内空气中的放射性物质，以保障工作人员的健康。

HIAF 隧道排风口布局见图 3-26，iLinac 直线段设置 1 个排风口（1#空调机房），

排风口所属加速器区域			iLinac 直线 加速器段	BRing 环形加速 器段	HFRS 隧道 段	SRing 环形 谱仪段
隧道年工作时间			9 个月	7 个月	3 个月	4 个月
度, Bq	^{15}O	122.2s	-	1.94E+12	4.44E+12	9.47E+11
	^{14}C	5730y	1.76E+07	2.54E+07	5.47E+07	1.23E+07
	^{14}O	70.6s	-	9.73E+10	2.17E+11	2.75E+10
	^{13}N	9.965min	-	5.09E+12	1.07E+13	2.32E+12
	^{11}C	20.39min	-	1.98E+12	4.46E+12	9.58E+11
	^{10}C	19.3s	-	1.86E+10	3.51E+10	8.82E+09
	^7Be	53.29d	-	1.04E+09	2.24E+09	4.43E+08
	^3H	12.33y	5.08E+06	6.68E+07	1.46E+08	3.02E+07

(2) 冷却水活化

加速器冷却水为去离子水的闭循环模式，每年检修时排放一次。加速器的冷却水因受次级粒子（主要是中子）的照射而活化，主要是中子引起水中 ^{16}O 的散裂，其中 ^{15}O 、 ^{11}C 和 ^7Be 为最主要的放射性活化核素。

HIAF 加速器冷却水主要用于冷却加速部件，而束流主要损失在偏转磁体（二极磁体）处，因此位于二极磁体处的冷却水是冷却水环路中的活化核素的主要来源。HIAF 加速器主要使用的 2 种型号二极磁体模型见图 3-27，其中位于单个二极磁体内的水量分布为 21L 和 59L。而隧道内冷却水存水量估算值为 245m^3 ，泵站内按同量估算，则冷却水环路总存水量约为 480m^3 。

根据磁体模型和各隧道区域的束流能量和损失流强，建立冷却水活化计算模型（图 3-28）。在加速器连续运行 1 年的条件下计算得到的冷却水中活化核素活度及活度浓度见表 3-14，从表中可以看到，冷却水中的活化核素除了 ^3H 、 ^7Be 以及极少量的 ^{14}C 外，其余活化核素半衰期都很短，辐照后冷却 1h 后几乎可衰变完全。

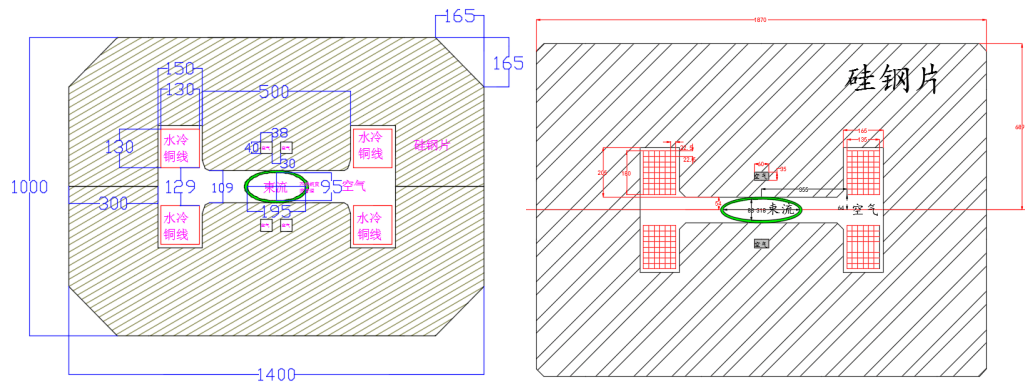


图 3-27 2 种类型二极磁体模型

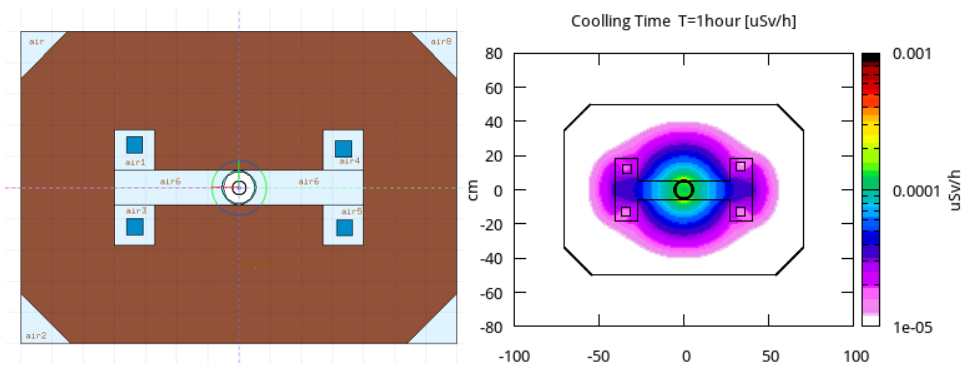


图 3-28 二极磁体冷却水活化计算模型（右图为活化核素产生的剂量场）

表 3-14 加速器运行一年后冷却水中放射性核素含量

核素	半衰期	活化产生区域				总活度, Bq	浓度, Bq/L
		Linac	Bring	HFRS	Sring		
¹⁶ N	7.13s	4.38E+06	7.51E+06	2.96E+06	1.56E+06	2.39E+07	4.97E+01
¹⁵ O	122.2s	-	7.99E+09	2.82E+09	1.89E+09	2.16E+10	4.50E+04
¹⁴ C	5730y	-	2.06E+05	6.68E+04	3.99E+04	4.93E+05	1.03E+00
¹⁴ O	70.6s	-	1.31E+08	3.89E+07	3.21E+07	3.28E+08	6.83E+02
¹³ N	9.965min	-	7.57E+08	1.90E+08	1.18E+08	1.58E+09	3.28E+03
¹¹ Be	13.76s	-	3.86E+06	3.45E+05	1.29E+05	6.20E+06	1.29E+01
¹¹ C	20.39min	1.45E+09	3.36E+09	1.38E+09	6.84E+08	1.07E+10	2.22E+04
¹⁰ C	19.3s	-	2.11E+07	1.05E+07	3.64E+06	6.37E+07	1.33E+02
⁷ Be	53.29min	-	1.54E+09	4.92E+08	2.93E+08	3.46E+09	7.21E+03
³ H	12.33y	-	1.69E+08	6.87E+07	3.75E+07	4.31E+08	8.99E+02

(3) 元器件活化

对于加速器部件的感生放射性，实际用于建造加速器的材料并不多，最重要的是铁、几种不锈钢、铜、铝合金等，虽然在理论上可能产生的放射性核素的数目很大，但根据国际上对各类加速器的研究，已证明实际上只有少数放射性核素控制着加速器关闭以后所观察到的辐射场。

表 3-15 给出加速器周围受辐照材料中活化产生的放射性核素种类。

表 3-15 在加速器周围受辐照的材料中活化产生的放射性核素一览表

靶材料	放射性核素	半衰期	靶材料	放射性核素	半衰期
塑料与油	^7Be	53.6d	钢	^{54}Mn	300d
	^{11}C	20.4min		^{56}Co	77d
杜拉铝	同上加以下			^{57}Co	270d
	^{18}F	110min		^{58}Co	72d
	^{22}Na	2.60y		^{55}Fe	2.94y
	^{24}Na	15.0h		^{58}Fe	5.1d
钢	同上加以下		不锈钢	同上加以下	
	^{42}K	12.47h		^{60}Co	5.27y
	^{43}K	22.4h		^{57}Ni	37h
	^{44}Sc	3.92h		^{60}Cu	2.4min
	$^{44\text{m}}\text{Sc}$	2.44d	铜	同上加以下	
	^{46}Sc			^{65}Ni	2.56h
	^{47}Sc	3.43d		^{61}Cu	3.33h
	^{49}Sc	1.83d		^{62}Cu	9.80min
	^{48}V	16.0d		^{64}Cu	12.82h
	^{51}Cr	27.8d		^{63}Zn	38.3min
	^{52}Mn	5.55d		^{65}Zn	2.5d
	$^{52\text{m}}\text{Mn}$	21.3min	/		

(4) 土壤、地下水活化

HIAF 加速器建筑结构位于地下，隧道或终端屏蔽墙外均为土壤。混凝土屏蔽墙阻挡了绝大部分中子源项，但混凝土屏蔽墙外还剩余部分中子通量，可导致加速器隧道周围的土壤内产生活化核素。为研究活化核素在土壤中的产生范围，在 C 以最大能量入射的条件分别计算屏蔽墙外不同距离处的活化核素产生量，计算结果见，由图 3-29 可知，土壤中活化核素主要集中在屏蔽墙外 4m 范围内。

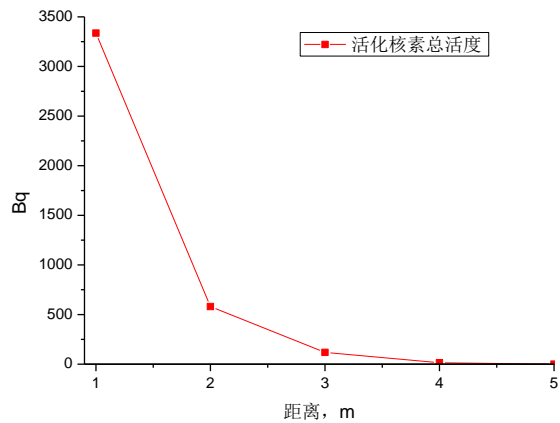


图 3-29 屏蔽墙外土壤中活化核素总活度随距离的变化

根据屏蔽计算结果，HFRS 放射性束流分离段屏蔽墙外中子辐射剂量率相对其余区域较大。因以该隧道段作为计算模型，对土壤活化情况进行保守计算。采用典型土壤成分，计算模型见图 3-30，计算得到核素种类见图 3-31。

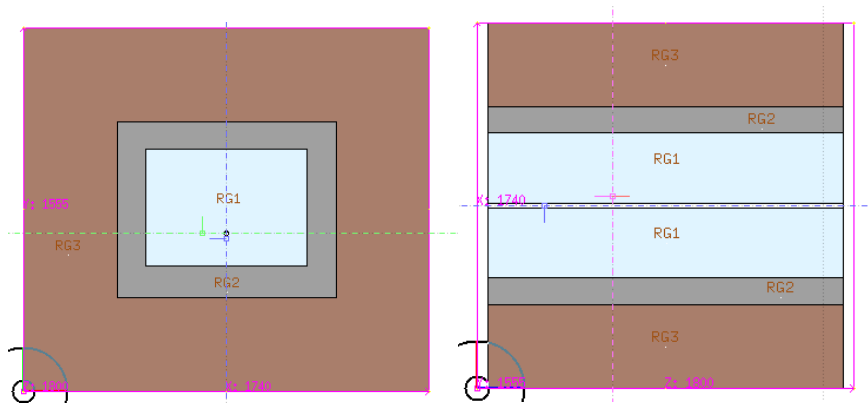


图 3-30 土壤活化计算模型

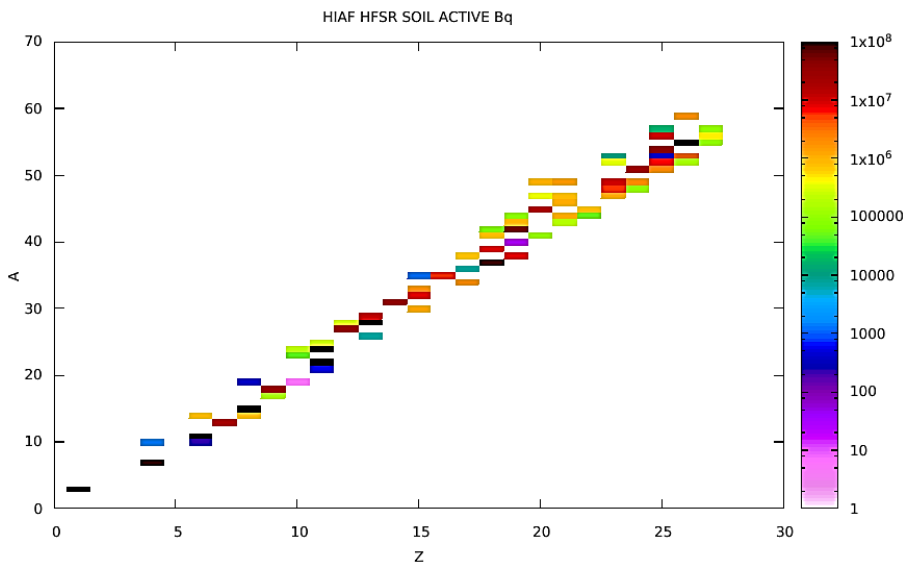


图 3-31 土壤中活化核素种类

HIAF 加速器束流损失最大的 HFRS 放射束流分离隧道段屏蔽墙周围 4m 范围内土壤中主要活化核素种类和浓度计算结果见表 3-16, 计算结果为保守假定加速器连续运行 50 年, 计算隧道长度 10.8m, 土壤厚度 4m, 土壤含水率为 10%, 计算模型土壤总量为 $3.88\text{E}+6\text{kg}$ 。从表 3-16 可见, 由于土壤成分较为复杂因此活化核素种类较多, 主要集中在从 ^3H 到 ^{59}Fe 之间。土壤活化核素大部分半衰期较短, 在很短的时间内便可衰变完全, 其中半衰期大于 1 天的活化核素主要有 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{22}Na 、 ^{32}P 、 ^{33}P 、 ^{45}Ca 、 ^{48}V 、 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 。

表 3-16 土壤中活化核素活度水平

活化核素	半衰期	总活度, Bq	活度浓度, Bq/g
^3H	12.28 y	$3.09\text{E}+08$	$7.97\text{E}-02$
^7Be	53.4 d	$7.91\text{E}+07$	$2.04\text{E}-02$
^{14}C	5730 y	$8.27\text{E}+05$	$2.00\text{E}-04$
^{22}Na	2.6 y	$1.11\text{E}+08$	$2.87\text{E}-02$
^{32}P	14.29 d	$7.42\text{E}+06$	$1.90\text{E}-03$
^{33}P	25.34 d	$1.85\text{E}+06$	$5.00\text{E}-04$
^{45}Ca	162.6 d	$1.48\text{E}+07$	$3.80\text{E}-03$
^{48}V	15.9 d	$1.11\text{E}+06$	$3.00\text{E}-04$
^{51}Cr	27.7 d	$2.39\text{E}+07$	$6.20\text{E}-03$
^{54}Mn	312 d	$4.15\text{E}+07$	$1.07\text{E}-02$
^{55}Fe	2.73 y	$1.60\text{E}+08$	$4.11\text{E}-02$
^{59}Fe	44.7 d	$1.94\text{E}+06$	$5.00\text{E}-04$

加速隧道墙外 4m 范围内无可流动的地下水, 土壤含水率取 10%, 而土壤活化的放射性核素主要考虑易溶于水的 ^{22}Na 和 ^3H , 保守假设核素均溶解到土壤中的水, 则土壤水分中 ^{22}Na 和 ^3H 的活化浓度分别为 287Bq/L 和 797Bq/L 。

依据 IAEA 安全导则《排除、豁免和解控概念的适用》(第 RS-G-1.7 号), 对于含人工放射性核素大量材料的活度浓度解控限值见表 3-17。

表 3-17 用于解控的大量人工放射性核素活度浓度值 (Bq/g)

核素	活度浓度	核素	活度浓度	核素	活度浓度
^3H	100	^{32}P	1000	^{51}Cr	100
^7Be	10	^{33}P	1000	^{54}Mn	0.1
^{14}C	1	^{45}Ca	100	^{55}Fe	1000
^{22}Na	0.1	^{48}V	1	^{59}Fe	1

由表 3-16 和表 3-17 可以看出，在极端保守情况下（加速器在最大工况连续运行 50 年），土壤活化产生的放射性核素的活度浓度也远低于 IAEA 安全导则《排除、豁免和解控概念的适用》（第 RS-G-1.7 号）中规定的解控水平，由此可以看出，加速器运行对土壤活化的影响可以忽略不计。

3.3.3 电磁辐射

高频系统产生射频电磁辐射的设备主要为安装在隧道内的高频功率源和合金加载腔，但是这些设备全部都被屏蔽在无缝隙机柜和微细金属孔外壳内部，不会产生电磁辐射外漏。

离子源采用高频率微波（18~45 GHz）加热等离子体，微波发生器本身出厂时有微波辐射泄漏防护要求，因此设备本身不存在辐射安全问题，在波导传输路径上，设置金属屏蔽网，对微波泄漏进行有效屏蔽与防护，类似设备实测值表明，经屏蔽后设备表面功率密度不超过 $2\text{W}/\text{m}^2$ ，满足 GB8702-2014 中对公众曝露控制限值要求，不会对周边环境与人身安全造成影响。

3.3.4 噪声

本项目中采用的冷却塔为低噪音方形横流式冷却塔，按照国家标准设计工况设计：进水温度 37°C ，出水温度 32°C ，湿球温度 28°C ，干球温度 31.5°C ，大气压力 $9.94 \times 10^4\text{Pa}$ 。冷却塔有两组，一组总处理水量设计为 $3000\text{m}^3/\text{h}$ ，一组总处理水量设计为 $3600\text{m}^3/\text{h}$ ，位于水站楼顶。

本项目属于工业区，属城市环境噪声标准的 3 类标准，昼间 $65\text{dB}(\text{A})$ ，夜间 $55\text{dB}(\text{A})$ 。本项目采用的冷却塔为低噪音冷却塔，冷却塔 1m 处的等效噪声级 $\leq 65\text{dB}(\text{A})$ 。

3.4 废弃物

3.4.1 放射性废水

放射性废水来源于内水系统，原因是内水系统与磁铁线圈直接接触，会使水感活化而具有微量放射性，每年加速器检修季时，管网因维护需要基本处于排空状态，因此内水系统的运行每年均有一次排空模式。内水系统运行期间，系统发生漏水可通过防漏水监测系统和水冷监测系统发现。系统采用闭式循环，正常运行情况下泄漏损

失量非常少。检修排水（每年一次）与事故排水，全部收集至衰变池，经检测合格后，排至市政管网。

隧道内存水量估算值为 245m^3 ，泵站内按同量估算，因此，内水总存水量约在 480m^3 左右。事故泄水量按 10% 取值，约为 48m^3 。

冷却水每年检修时会分段排空一次，每段排出的水量不会大于事故最大漏水量，每年最大排水量 530m^3 。

冷却水每年在检修的时候都会排空一次，这里按照运行一年计算冷却水中产生的放射性核素，计算采用 FLUKA 蒙特卡洛程序，计算结果见表 3-14。

3.4.2 固体废物

维修更换的活化部件，主要包括靶、束诊元件、真空管、以及维修所用的面纱、手套等物品。依据 HIRFL 的运行经验，加速器产生的放射性废物量是很少的，每年大约十几公斤，除靶等束流直接照射的部件外均为低放废物，HIAF 规模大于 HIRFL，其放射性废物年产量估计不超过 0.2m^3 ，可在 HIAF 辐射区内设置专用放射性废物暂存间，待收集、冷却一段时间后送交城市放射性废物库存放。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再利用（加速器感生放射性一般半衰期较短）。

放射性废物暂存间分布图见图 3-32。

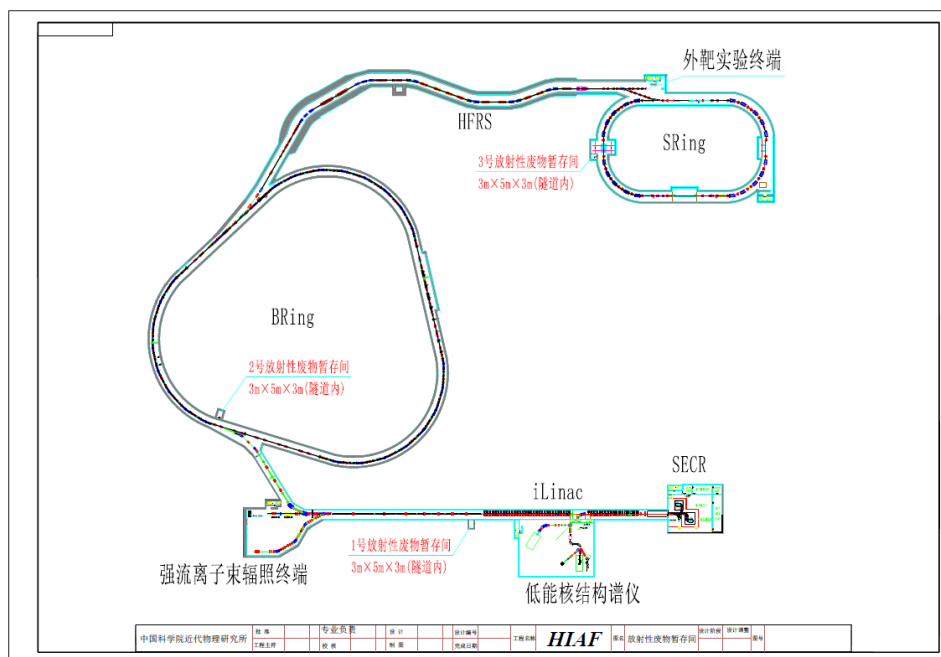


图 3-32 放射性废物暂存间

与内循环水接触的全部过流部件均有被活化的可能性，水泵密封组件、过滤器滤芯和水净化树脂等。水泵密封组件不可重复利用，产生量按一年更换一次计算约 12 个；过滤器滤芯不可重复利用，滤芯每三个月更换一次，每年计约 1920 根（单根滤芯尺寸 Φ （单根 \times 1000mm）；水净化树脂为抛弃型，不可重复利用或再生使用，每年消耗量约 18000L。因此，所有更换下来的水泵密封组件、过滤器滤芯和水净化树脂，均先存放在临时废物库，待环保部门监测解控后再作处理。临时废物库设置于水泵站内，每个水泵站设置一个废物库，占地约 15m²。

3.4.3 放射性废气

放射性废气来源于加速器运行期间初级粒子或次级粒子与隧道、靶室中空气相互作用产生放射性气体。

气体放射性主要通过热中子俘获、(n, 2n)、(γ , n)反应和散裂反应而产生。产生的短寿命核素主要是 ³H、⁷Be、¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar。它们对人体的危害是 β 、 γ 气体浸没外照射和吸入引起的内照射。除了 ⁷Be 半衰期稍长外，其他成分半衰期都很短，不存在长期累积问题，且毒性较小，危害不大。

通过蒙特卡罗程序计算得到各段隧道年产生活化气体见表 3-13。

4 辐射安全与防护

4.1 场所布局与屏蔽

4.1.1 总体布局

根据总体规划布局原则，综合考虑 HIAF 实验装置的特点，及其与辅助实验设施的工艺联系、厂址地形条件、运输条件、分期建设的要求等各方面因素，装置区分为四大功能区：主装置区、离线设备区、装置后勤服务区和装置对外服务区。

HIAF 装置区围绕加速器主装置进行布局。主装置区布置在基岩埋深适宜、均匀的岩石地基上。其它建筑物根据使用功能成组布置，同时考虑内外分区，动静分隔，疏密有致，高低错落又相互渗透。

4.1.1.1 主装置区

根据厂址地形地貌、工程地质、工艺要求等条件，主装置均布置在中间开挖区域，地基条件良好。

主装置区包括加速器隧道、电源间、配电间、低温系统设备间、冷却水系统设备间、直线设备间等，基本覆盖厂区中部和北部，见图 4-1。

加速器隧道：根据 HIAF 物理设计，沿束线建设，根据加速器装置各个系统设备最大尺寸选择合理的隧道净截面尺寸，再依据辐射防护屏蔽厚度，考虑建筑承重要求，隧道位于地下 12.3m。由于 HIAF 工程庞大，为了便于设备运输安装，各部分单独设置吊装口，直线加速器段处设置 1 号吊装口，该处隧道采用直线隧道形式，建筑分上下两层，该吊装口作为 iLinac 和 SECR 等实验设备以及上层建筑内设备的出入口；增强器 BRing 引出位置设置 2 号吊装口，用于 BRing 及其相邻束运线元件的入口；SRing 右端束线终端设置 3 号吊装口，用于 SRing 及其相邻束运线元件的入口。吊装口上方地面大厅设置足够能力天车，用于设备吊装。

其中，直线设备楼位于厂区西南部，直线隧道及 BRing 隧道向北延伸，与 SRing 构成“U”字形。冷却水站，低温站，运行楼，中央控制室等位于“U”型口里面，使整个厂区紧凑。BRing 环顶部布置环形状电源设备间，覆盖整个 BRing 区域，SRing 顶部设置电源间，线缆通过就近下穿迷宫方式进入加速器隧道。

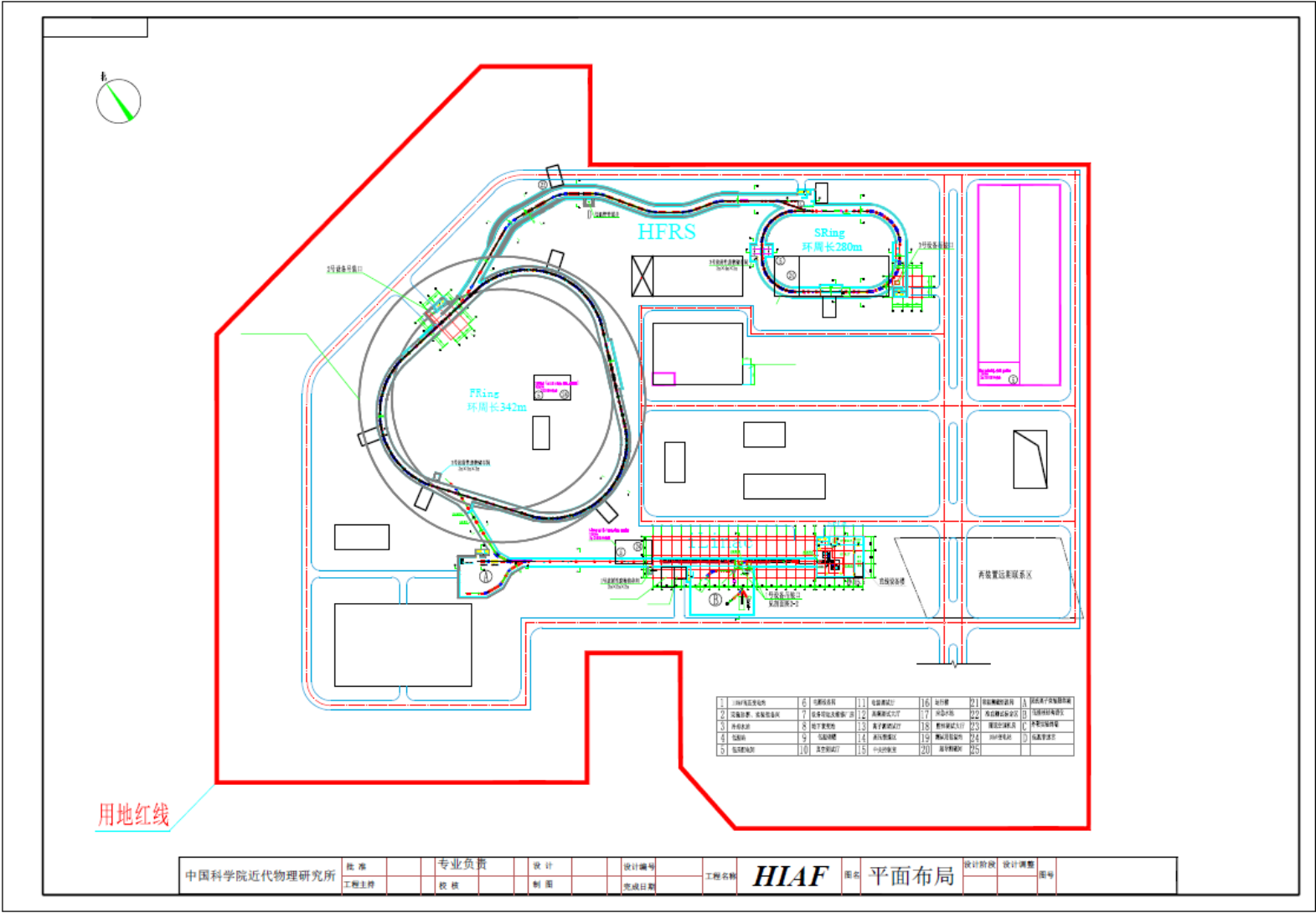


图 4-1 HIAF 装置总平面布置图

HIAF 超导磁体低温冷却系统的功能是提供某一温度的低温氦流，对各类超导磁体进行持续冷却。HIAF 低温系统由制冷机和氦分配系统组成。氦制冷机负责产生冷量，分配系统负责冷量的分配、调节和输运。氦制冷机由 4.5K 冷箱、压缩机、除油器、气体管理面板、控制系统、液氮杜瓦、氦气储罐、液氮储罐、回收系统、外置纯化系统等组成。氦分配系统由主阀箱，复合低温传输管线，室温传输管线，子阀箱，以及接口阀箱组成。

4.1.1.2 离线设备区

在装置区的南侧布置了离线设备测试设施建筑。靠近道路布置建设了设备转运间、设备维修间、加速器设备（真空、高频、高压、电源、离子源设备）调试间、运行楼、应急水池等，在运行楼前方布置建设低温设备测试建筑，在各调试间周围人员出入频繁，设置了足够的停车位。

4.1.1.3 后勤服务区和对外服务区

装置后勤服务区和对外服务区位于主入口两侧，后勤服务区建设值班公寓、客座公寓、食堂、活动中心等，位于主入口南侧。对外服务区建设资料中心、科普中心及学术交流中心等，位于主入口的北侧。组合楼群便于创造良好的人文景观，厂区工作或参观的路线均由此展开，符合厂区的使用和形象塑造要求；另一方面通过绿化场地与装置试验区相对隔离的布置，能够为研究人员提供相对安静、独立而又惬意的工作、交流和休息场所。

4.1.2 竖向设计

根据厂址现有资料，综合考虑 HIAF 主装置的防洪要求、基岩埋置深度、土石方工程量等因素，结合工艺和结构的要求，HIAF 装置隧道底标高定为 142.7m。

HIAF 装置隧道底标高定为 142.7m，直线设备楼位于直线加速器隧道上方，直线设备楼及其周边部分室外标高定为 155m，离线设备楼周边部分室外标高定为 150m，由此形成了厂区南低北高的布置形式。

厂区分三个台阶高度设计。主入口、后勤服务区 140m，对外服务区标高为 155m，离线设备楼、运行楼标高 150m，电源设备间、水系统设备间、低温系统设备间标高 155m。

各平台间利用边坡相衔接，对边坡采取防护加绿化处理，既满足安全的要求，又符合环境保护的要求。装置区道路纵坡控制在 5% 以内。

4.1.3 屏蔽防护

4.1.3.1 屏蔽设计

对于 HIAF 这样一台高能强流重离子加速器，其主束与靶材料相互作用后产生的次级辐射场是一个中子、光子及介子等多种粒子复合的复杂混合场。大量的研究及经验已经表明，粒子加速器的屏蔽主要由束流损失所产生的次级中子场及屏蔽外剂量率限值所决定，但在进行屏蔽计算时，考虑所有粒子的辐射剂量贡献。

计算时所有屏蔽材料均采用普通混凝土及回填碎砂石，密度分别为 2.34g/cm^3 及 1.8g/cm^3 。对于回填碎砂石，计算时砂、石、水分的比例为 6:3:1。

对于加速器屏蔽的设计，依据加速器各个阶段的辐射场特性，采用各种经验公式法及蒙特卡罗模拟的方法来计算和设计。可以采用的经验公式法包括分出截面法、张弛长度法、1/10 减弱厚度法及查表法等，蒙特卡罗模拟计算可以采用 MCNPx 和 FLUKA 等多种程序。此处采用通用蒙特卡罗计算程序包 FLUKA 来进行。FLUKA 可以对低能（1keV）到 TeV 量级的电子、光子、中子、质子和重离子及其可能的相互作用进行输运模拟。在计算过程中，我们利用 FLUKA 对各辐射区域进行了 3D 建模，并通过 2D 和 1D 中子剂量分布来确定辐射区屏蔽内外的中子剂量率。

HIAF 加速器屏蔽设计见图 4-2，根据束流能量和束流损失强度，在不同的加速器区域采用不同的屏蔽厚度和屏蔽方法进行屏蔽。加速器主要分为离子源大厅、iLinac 直线加速器区、BRing 增强器区、HFRS 放射性束流分离区、环形谱仪 SRing 区以及实验终端等区域。

1) 离子源大厅（SECR）屏蔽设计

离子源大厅为加速器提供加速粒子，能量最大为 14keV/u ，初级束完全阻挡在加速器束流管道内，辐射影响较小。离子源大厅剖面图见图 4-3，左侧、右侧、顶和底依次为 25cm、25cm、120cm 和 100cm 厚的混凝土屏蔽墙。

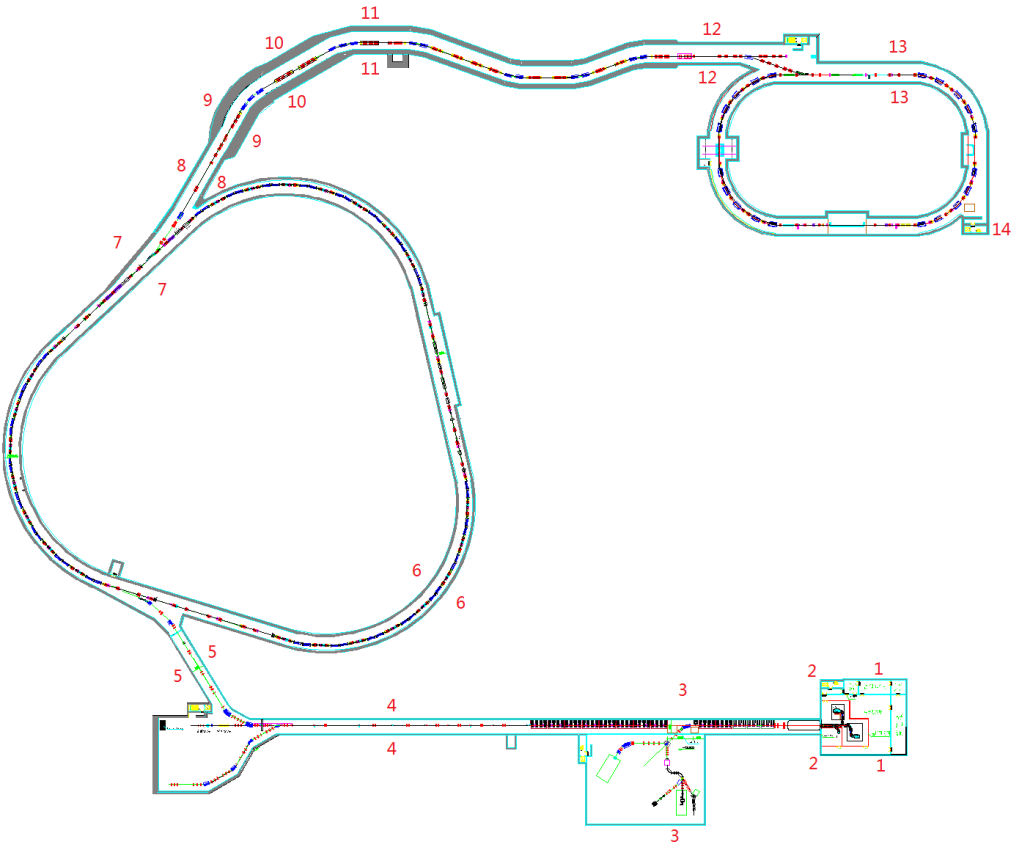


图 4-2 HIAF 屏蔽设计总图

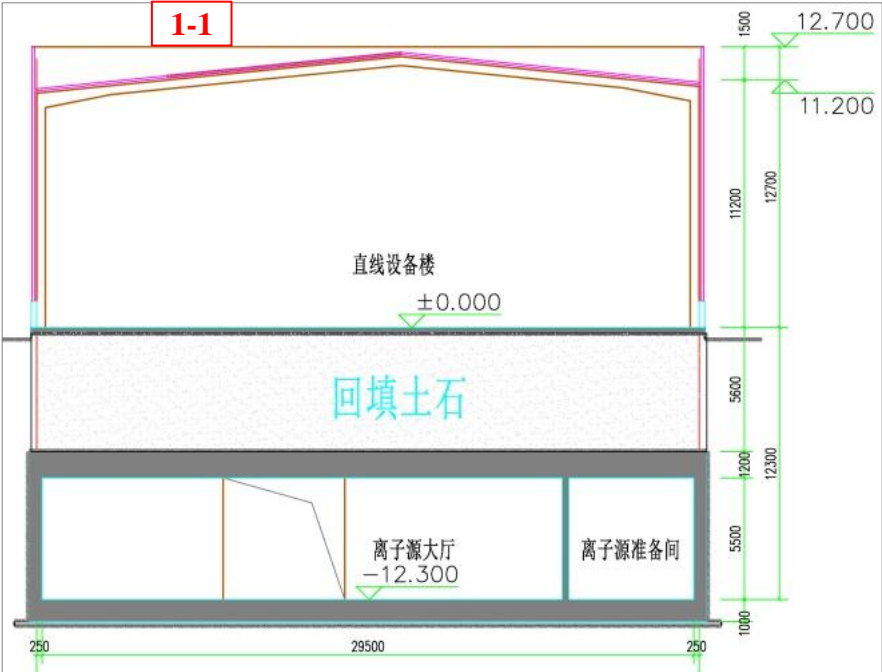


图 4-3 离子源大厅剖面图

2) iLinac 直线段屏蔽设计

直线加速器段隧道分为两个部分第一段为离子源至低能核结构终端的隧道，该区域加速器隧道含设备夹层，地面为直线设备楼，该段隧道损失 C 束最大能量为 11.7MeV/u。隧道左侧、右侧、顶和底依次为 0.6m、0.6m、1.15m 和 1.0m 厚的混凝土屏蔽墙，隧道截面见图 4-4（2-2）。直线加速器的第二段为从低能核结构终端到底能重离子辐照终端，该段隧道损失 C 束最大能量为 33MeV/u，隧道左侧、右侧、顶和底依次为 0.6m、0.6m、1.55m 和 1.0m 厚的混凝土屏蔽墙，隧道顶屏蔽墙至地面为 4.75m 的回填土石，隧道截面见图 4-4（4-4）。

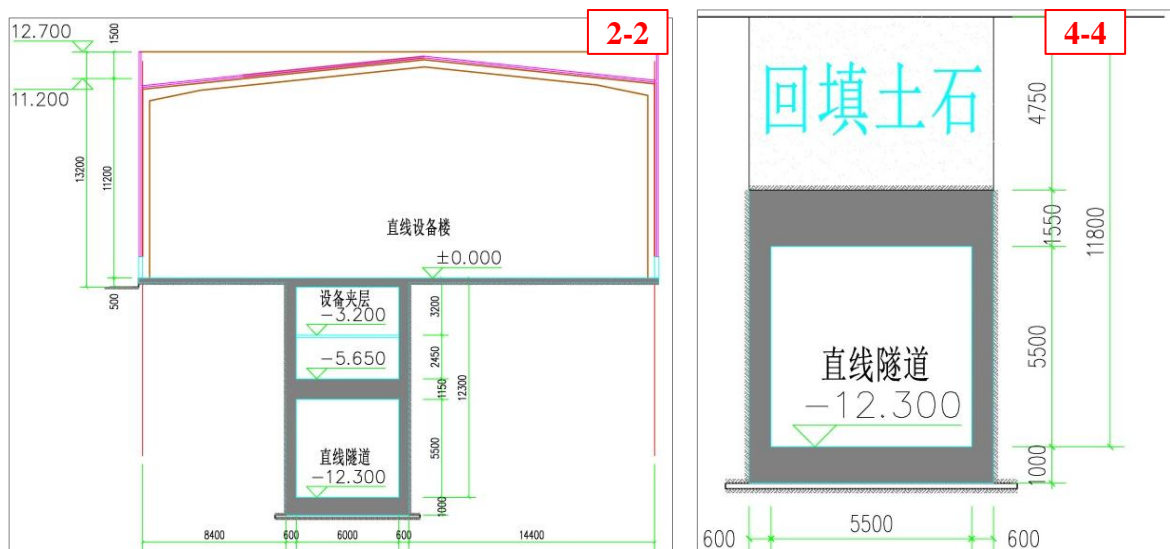


图 4-4 iLinac 直线加速段隧道屏蔽设计

3) BRing 环屏蔽设计

BRing 至 BRing 引出段，根据粒子量能和束流损失情况分 5 种屏蔽设计。

BRing 环隧道损失 C 束最大能量为 1.38GeV/u，隧道屏蔽墙左侧、右侧、顶和底依次设计为 1.0m、1.0m、1.2m 和 1.1m 厚的混凝土，隧道顶屏蔽墙至地面为 6.1m 的回填土石，隧道截面见图 4-5(6-6)；BRing 引出段隧道损失 C 束最大能量为 5.58GeV/u，隧道屏蔽墙左侧、右侧、顶和底依次设计为 1.55m、1.55m、1.2m 和 1.65m 厚的混凝土，隧道顶屏蔽墙至地面为 5.8m 的回填土石，隧道截面见图 4-5（7-7）。

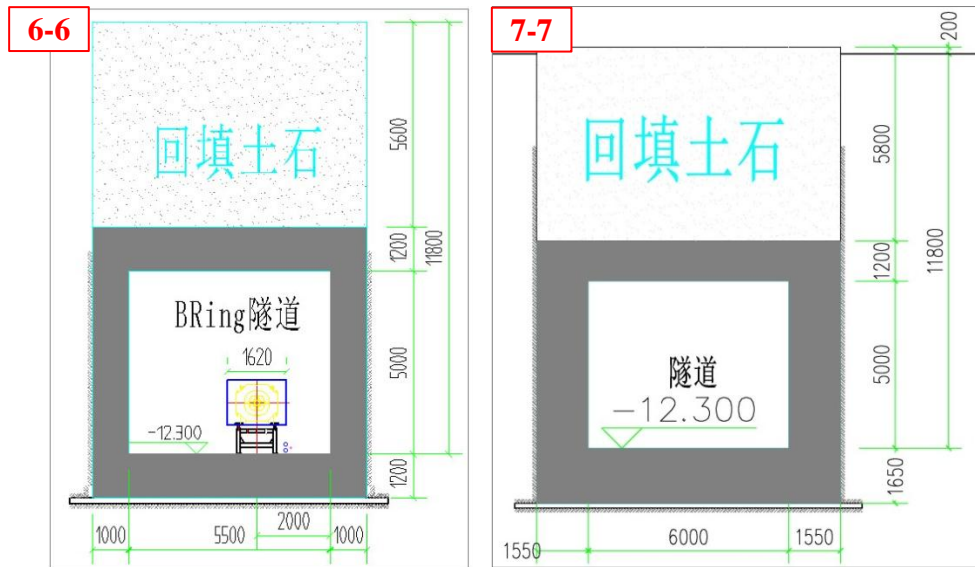


图 4-5 BRing 加速段隧道屏蔽设计

4) HFRS 屏蔽设计

HFRS 放射性束流分离段损失 C 束最大能量为 2.94GeV/u，但根据束流损失强度的不同分为 3 种屏蔽结构。第一段为束流打靶后至 3 个 BeamDump 段，屏蔽墙左侧、右侧、顶和底依次设计为 4.35m、4.35m、1.2m 和 4.5m 厚的混凝土，隧道顶屏蔽墙至地面为 9.4m 的回填土石，隧道截面见图 4-6（9-9）；第二段为 3 个 BeamDump 至将能器段，屏蔽侧墙、顶和底依次设计为 3.7m、1.2m 和 3.8m 厚的混凝土，隧道顶屏蔽墙至地面为 8.6m 的回填土石，隧道截面见图 4-6（10-10）；第三段为降能器值 HFRS 出口段，隧道屏蔽侧墙、顶和底依次设计为 2.2m、1.2m 和 2.3m 厚的混凝土，隧道顶屏蔽墙至地面为 6.6m 的回填土石，隧道截面见图 4-6（11-11）。

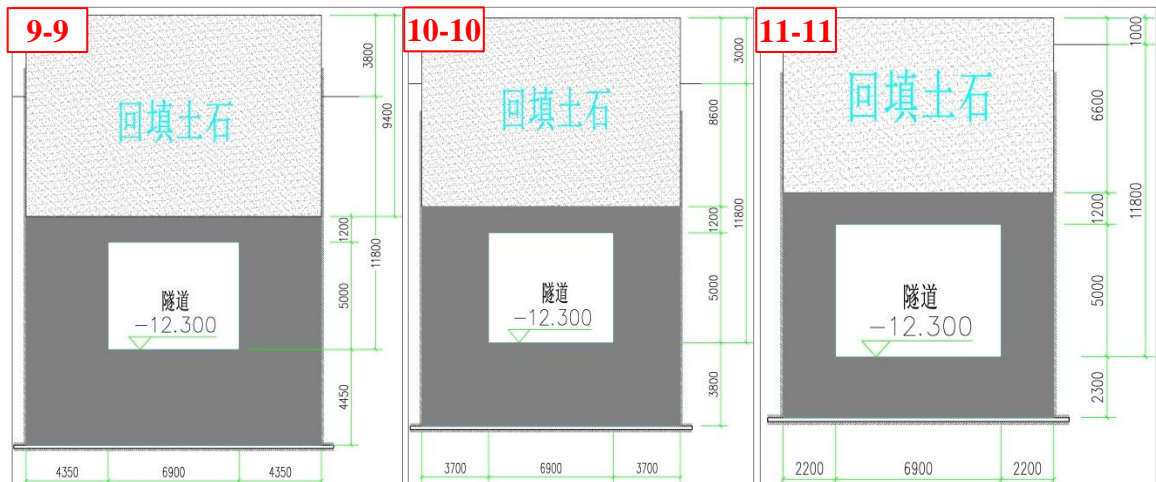


图 4-6 HFRS 放射性束流分离段屏蔽设计

5) SRing 环形谱仪段屏蔽设计

SRing 放射性束流分离段损失 C 束最大能量为 1.5GeV/u ，根据束流损失强度的不同分为 2 种屏蔽结构。第一段为 SRing 引入段，隧道屏蔽侧墙、顶和底依次设计为 1.25m 、 1.2m 和 1.35m 厚的混凝土，隧道顶屏蔽墙至地面为 5.6m 厚的回填土石，隧道截面见图 4-7(12-12)；第二段为 SRing 环形谱仪测量段，隧道屏蔽侧墙、顶和底依次为 1.1m 、 1.2m 和 1.2m 厚的混凝土，隧道顶屏蔽墙至地面为 5.6m 厚的回填土石，隧道截面见图 4-7 (13-13)。

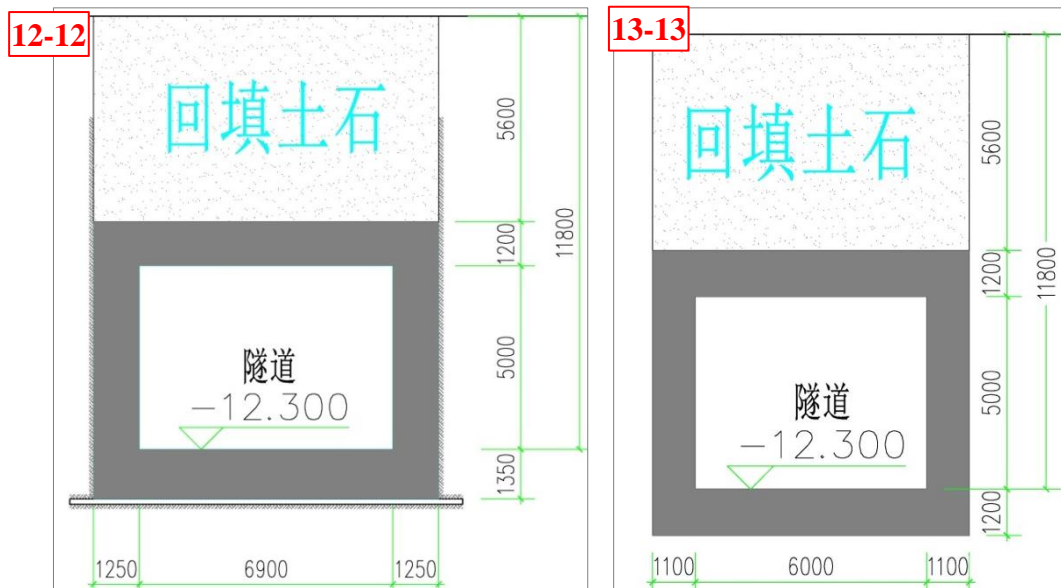


图 4-7 SRing 环形谱仪段隧道屏蔽设计

6) 集中损失区域屏蔽设计

HIAF 加速器束流集中损失需关注的区域主要为 BRing 注入点、BRing 引出点、SRing 注入点和三个实验终端，实验终端分别为低能核物理终端（A）、强流离子束辐照终端（B）和外靶终端（C）。

BRing 注入区域侧墙、顶和底分别为 2.6m 、 3.25m 和 1.2m 厚混凝土，顶墙距地面为 7.67m 厚的回填土石；BRing 引出区域侧墙、顶和底分别为 2.9m 、 3.5m 和 1.2m 厚混凝土，顶墙距地面为 8.38m 厚的回填土石；SRing 注入区域侧墙、顶和底分别为 2.2m 、 2.8m 、 1.2m 厚混凝土，顶墙距地面为 7.08m 厚的回填土石。

试验终端平面布局示意图见图 4-8~图 4-10。低能核物理实验终端 C 束能量为 11.72MeV/u ，束流损失强度为 $9.62\text{E}+14\text{pps}$ ，终端侧墙、顶和底为 0.7m 、 2.5m 和 1.1m 厚的混凝土墙；强流离子束辐照终端 C 束能量为 33MeV/u ，束流损失强度为

9.61E+14pps，终端侧墙、顶和底为 1.1m、2.9m 和 1.2m 厚的混凝土墙，终端运行时，在束流前向放置尺寸 30cm 土墙，终端运行时，在（长、宽、厚）的束流收集器； 外靶终端 C 束能量为 2.94GeV/u，束流损失强度为 2.88E+11pps，终端侧墙、顶和底分别为 1.4m、1.2m 和 2.1m 厚的混凝土墙，顶屏蔽强距地面为 5.6m 厚的回填土石，另外，束流前向为厚 7.35m 的混凝土墙，墙中放置直径 30cm、长 200cm 的 BeamDump 铁柱，铁柱前段留 100cm 的空洞。

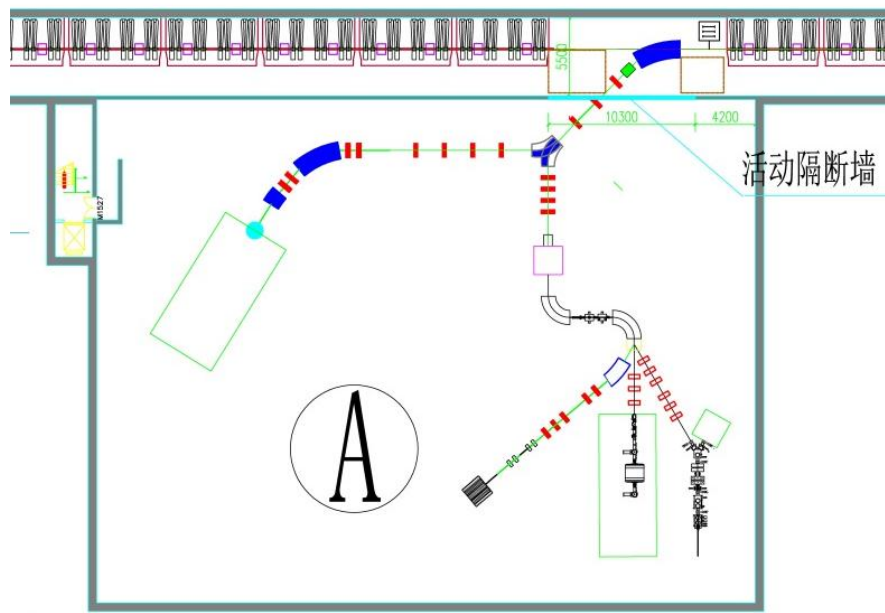


图 4-8 低能核物理实验终端平面布局示意图

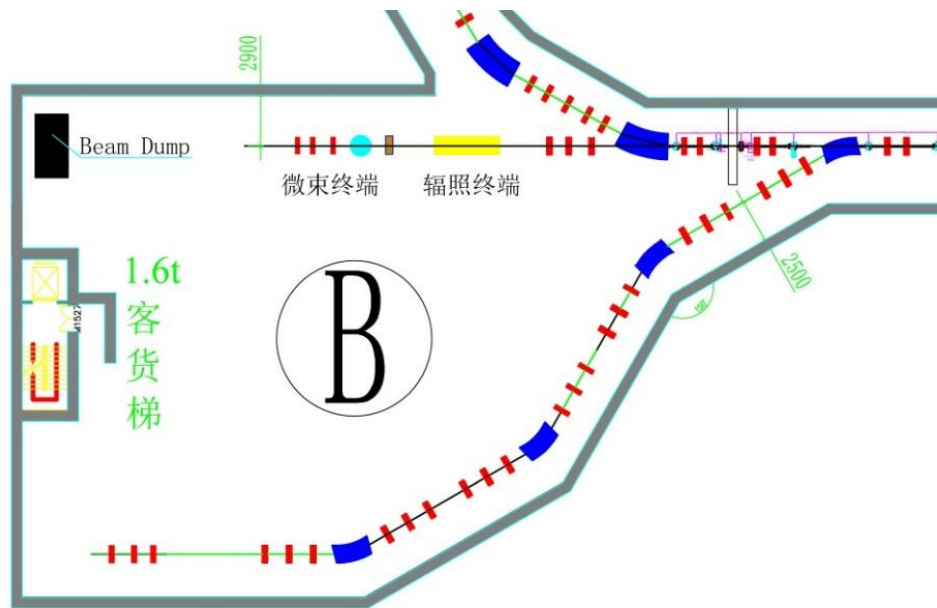


图 4-9 强流离子束辐照实验终端平面布局示意图

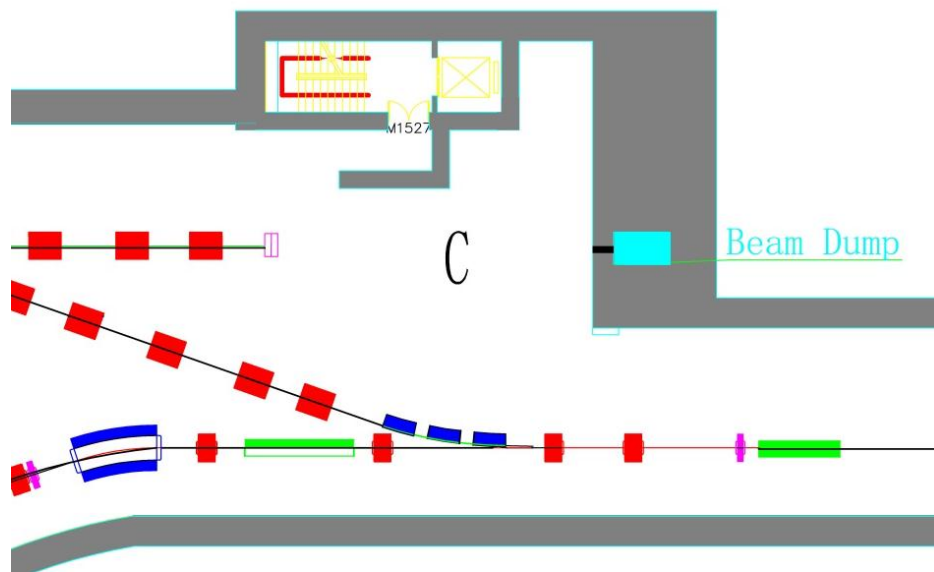


图 4-10 外靶终端平面布局示意图

4.1.3.2 屏蔽计算结果

隧道屏蔽墙的厚度要求主要由瞬发辐射的大小决定，HIAF 加速器瞬发辐射主要有两种形式，一种为加速器隧道的均匀损失，另一种为隧道引入、引出点和实验终端的集中损失。

为降低模拟计算结果的统计误差，均匀损失计算时损失束流长度取 10.8m、隧道模型长度约为 20m，损失束流发射角为 5 度；集中损失计算时，靶物质为铜靶、靶厚取 2cm。

图 4-11、图 4-12 分别为隧道和终端瞬发辐射剂量率计算模型；图 4-13、图 4-14 分别为 BRing 环段束流均匀损失（瞬发辐射）在隧道周围产生的辐射剂量空间分布计算结果和外靶终端集中损失（瞬发辐射）在隧道周围产生的辐射剂量空间分布计算结果，其中左图为垂直于束流运行方向（Z）的辐射剂量率分布，右图为隧道垂直方向（Y）的辐射剂量率分布图（2D 图）。图 4-15 为垂直方向（Y）的辐射剂量率（1D 图），图 4-16 为水平方向（X）的辐射剂量率（1D 图）。由上述计算结果可方便的得到隧道侧屏蔽墙、顶屏蔽墙、底屏蔽墙以及地面的辐射剂量率结果。采用上述相同的方法分别计算不同屏蔽设计区域的各屏蔽墙以及地面的辐射剂量率，计算结果见表 4-1。计算结果满足隧道侧屏蔽外剂量率小于 5mSv/h 和隧道顶部地面剂量率小于 0.25 μ Sv/h 的设计要求。

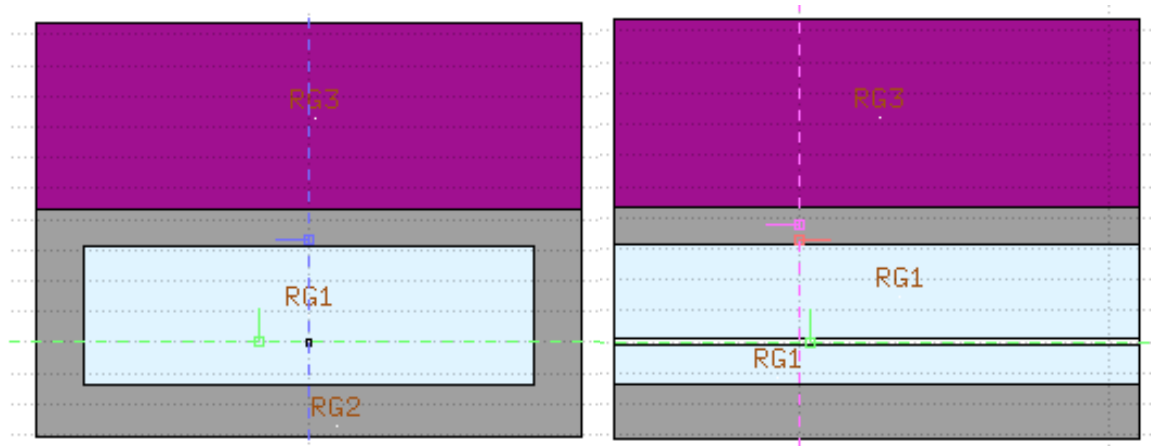


图 4-11 BRing 瞬发辐射屏蔽体外剂量计算模型（均匀损失）

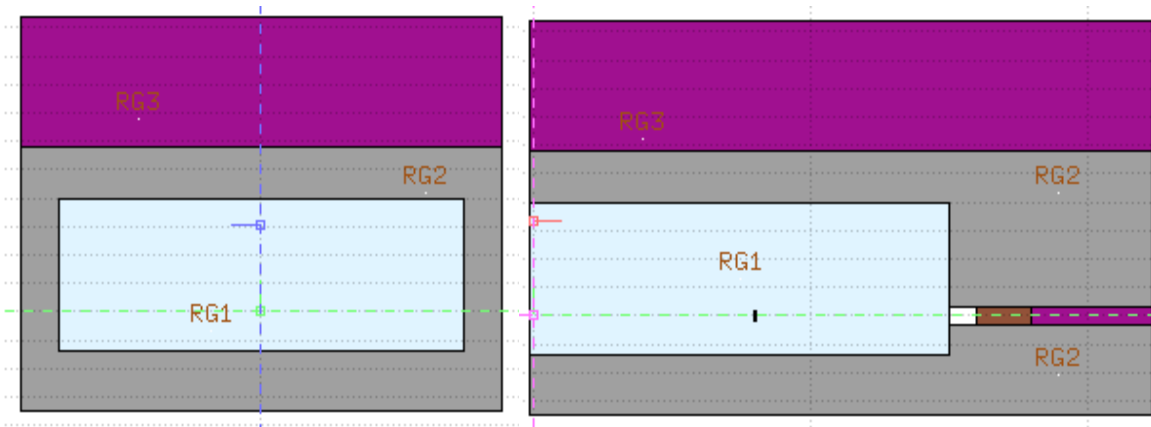


图 4-12 外靶终端瞬发辐射屏蔽体外剂量计算模型（均匀损失）

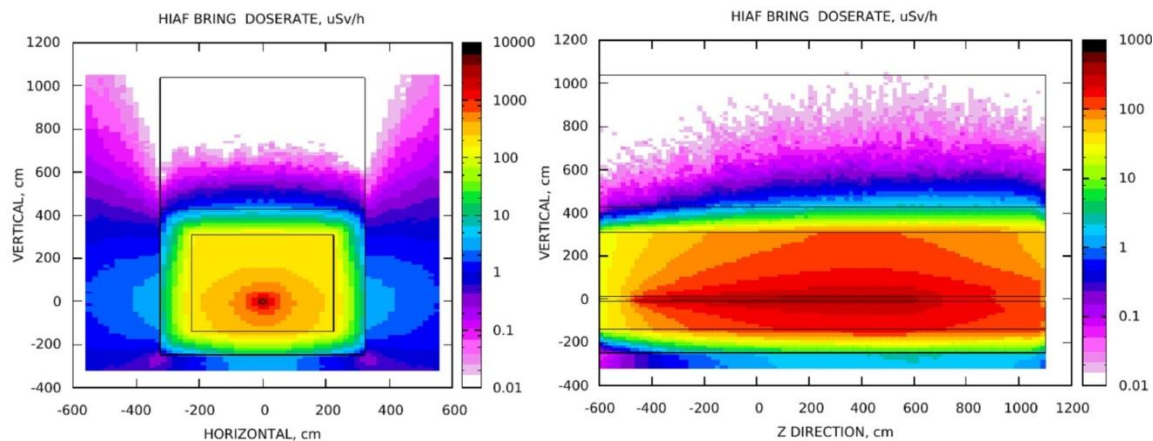


图 4-13 BRing 瞬发辐射剂量率空间分布（均匀损失）

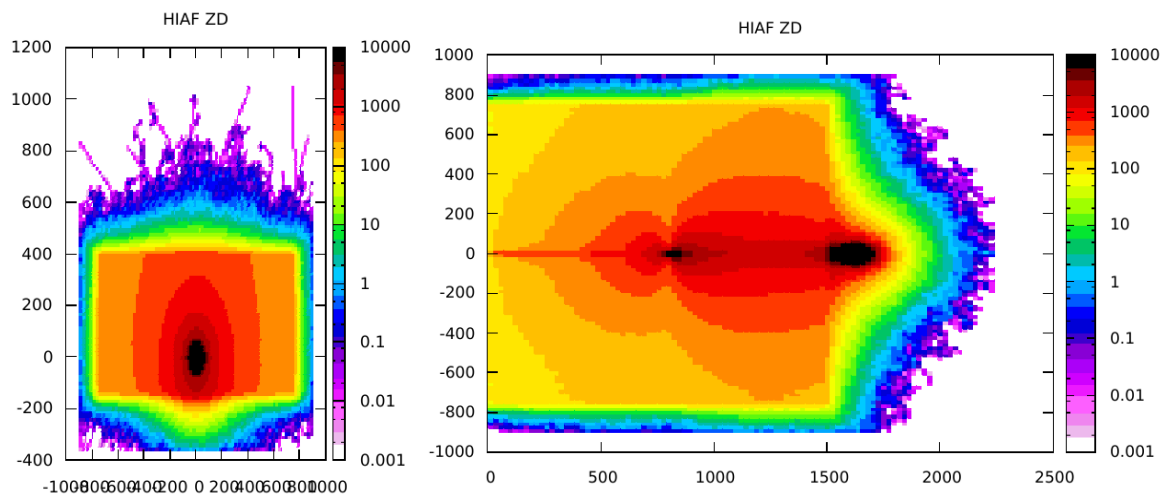


图 4-14 外靶终端集中瞬时剂量率空间分布图

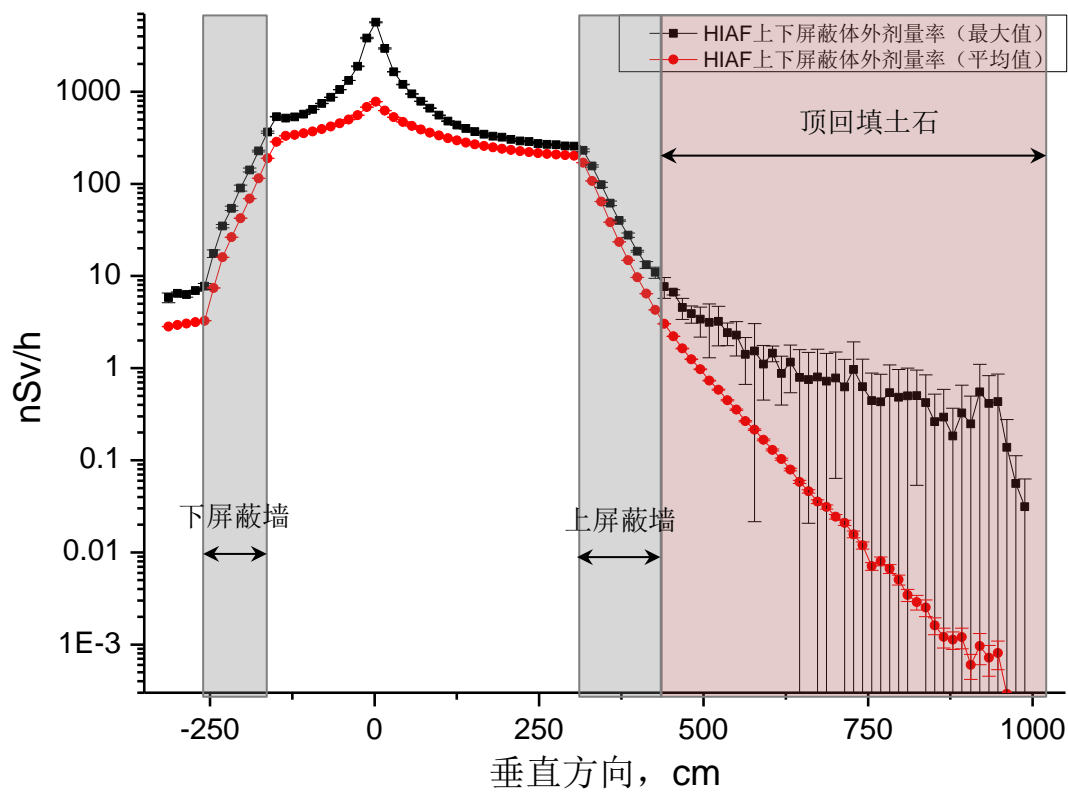


图 4-15 BRing 瞬发辐射剂量率随垂直方向的变化

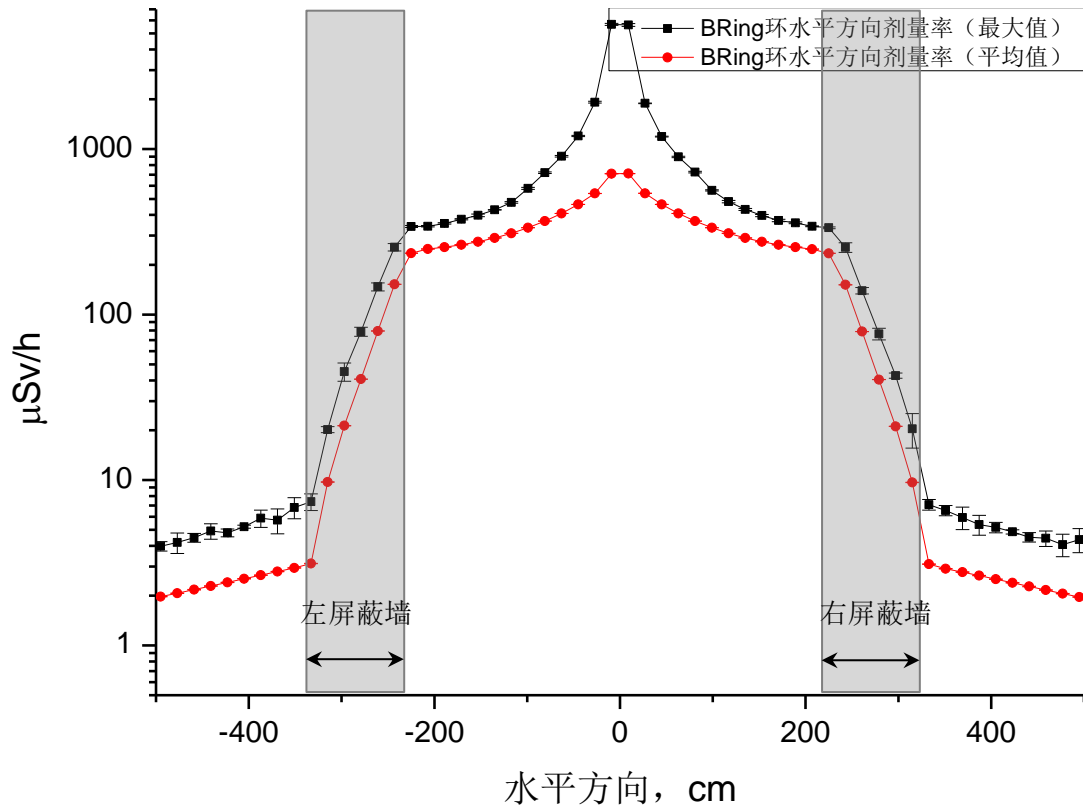


图 4-16 BRing 瞬发辐射剂量随水平方向的变化

表 4-1 HIAF 辐射屏蔽计算结果表 (μSv/h)

序号	加速器区域	侧屏蔽墙外		下屏蔽墙外		上屏蔽墙外		地表面
		最大值	均值	最大值	均值	最大值	均值	
1	直线隧道 (含设备夹层)	1.22	0.114	0.88	0.01	0.69	0.008	—
2	直线隧道	5.52	1.47	1.23	0.167	0.66	0.010	—
3	BRing 注入段隧道	3.32	0.682	1.11	0.082	0.74	0.005	—
4	BRing 环隧道	7.14	3.17	7.57	3.25	10.2	3.68	0.01
5	BRing 引出段隧道	37.04	8.95	115.84	21.60	346.85	57.97	0.03
6	靶后至 DUMP 段隧道	116	1.30	207.9	1.19	1581	627	0.20
7	靶后至将能器段隧道	67	1.2	86.5	4.73	1001	401.6	0.14
8	降能器至出口段隧道	14.5	1.85	18.1	2.52	65.7	21.5	0.03
9	外靶终端束线隧道	231	93.0	500	148	291	105	0.15
10	SRing 环隧道	8.82	1.72	15.62	4.17	9.77	2.78	0.01
11	外靶终端	3190	245	5518	131	4743	21	0.09
12	低能辐照终端	1028	117	156	13	0.17	—	—
13	低能核物理终端	251	64	185	18	0.55	—	—

4.2 辐射安全与防护措施

4.2.1 辐射工作场所分区及辐射安全管理措施

建设单位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，按辐射水平和可能受到辐射影响的范围分为控制区和监督区。辐射工作场所内除了正在开机或调试的控制区以外，其它区域（包括主控室、未开机调试的控制区）均为监督区。

控制区管理要求：只有经授权人员拥有门禁权限才能进入控制区。控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标识。控制区入口设有视频监控，所有涉及辐射操作的工作场所均被视频记录。控制区采用实体屏蔽和束流闸控制管理。进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人报警仪。

监督区管理要求：进出监督区出入口的人员和工具，要进行辐射剂量率监测，满足相关标准的才能通过，所有出入检测均予以记录和保存。进入监督区的人员也要佩戴个人剂量计和个人报警仪。

4.2.2 加速器辐射安全和联锁设计

安全联锁系统的设计，用于保护辐射工作人员的人身安全，避免加速器开机出束时人员受到超剂量限值照射。安全联锁的设计，遵循“分区联锁”、“多重性”和“失效保护”等原则。

其中的多重性体现在三方面的设计：一限位开关；二为身份识别卡，对进入控制区人员确认其身份，记录每个进出人员情况；三为钥匙箱，在钥匙箱上的钥匙没有全部归还的情况下束流不会进入相应的控制区。采用多套联锁设施相互独立，不会因为一套系统的实效而影响到其它系统的安全性。

失效保护设计：所有的线路、气动装置、电动装置均采用失效保护设计。气动束流阻挡器在气路或电路故障下其均处于阻挡束流的状态。通道门的限位开关在门关上后不能立即接通联锁，需要该区域所有钥匙全部归位且打开主控室内控制总钥匙才能接通。

本项目辐射安全和联锁系统设计具体如下：

（1）分区联锁

根据本项目加速器的运行特点，将加速器工作场所分为可以独立调试和运行的 7

个控制区，每个控制区设置独立的实体屏蔽和束流闸，各自独立设置安全联锁。束流前端区域开机调试，不影响后端区域内有辐射工作人员居留。

7 个控制区分别是：

- SECR1 区域
- SECR2 区域
- ECR 区域
- iLinac 直线加速和强流离子辐照终端区域
- 低能核结构终端区域
- BRing 区域
- SRing+外靶实验终端区域

联锁控制分区图见图 4-17。

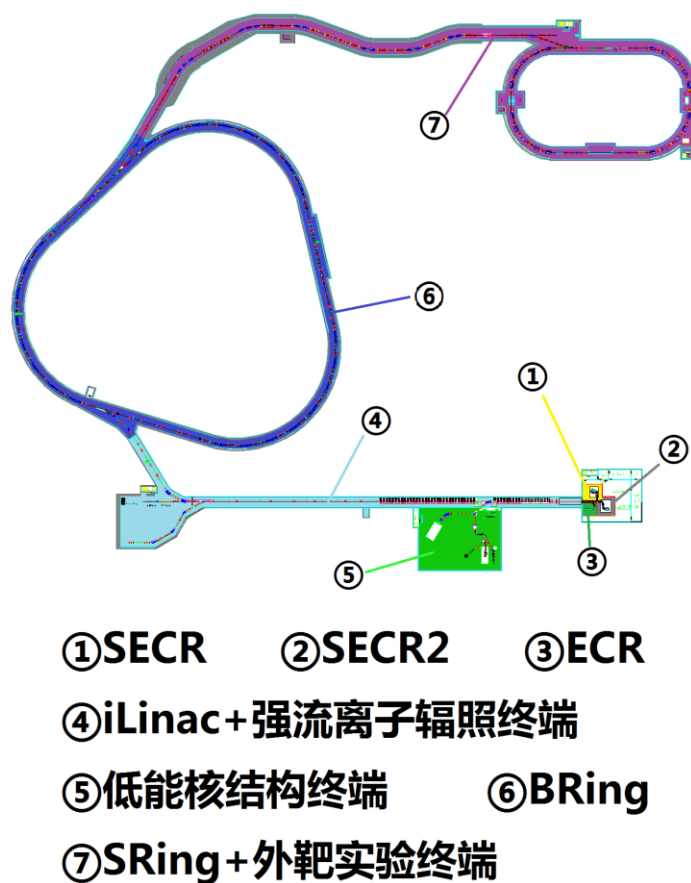


图 4-17 辐射工作场所联锁系统分区示意图

（2）束流闸切断保护

根据“硬件最可靠”这一原则，每个辐射分区前都有一个可以切断束流的关键设备，其主要作用是防止误操作，保证有人区域为绝对的封闭区间。束流切断设备只有当下游的联锁逻辑符合条件时才可打开，束流方可进入下游区域。

加速器共有五处束流切断设备，其中包括三台法拉第筒及两台偏转磁铁，如图 4-18 所示。

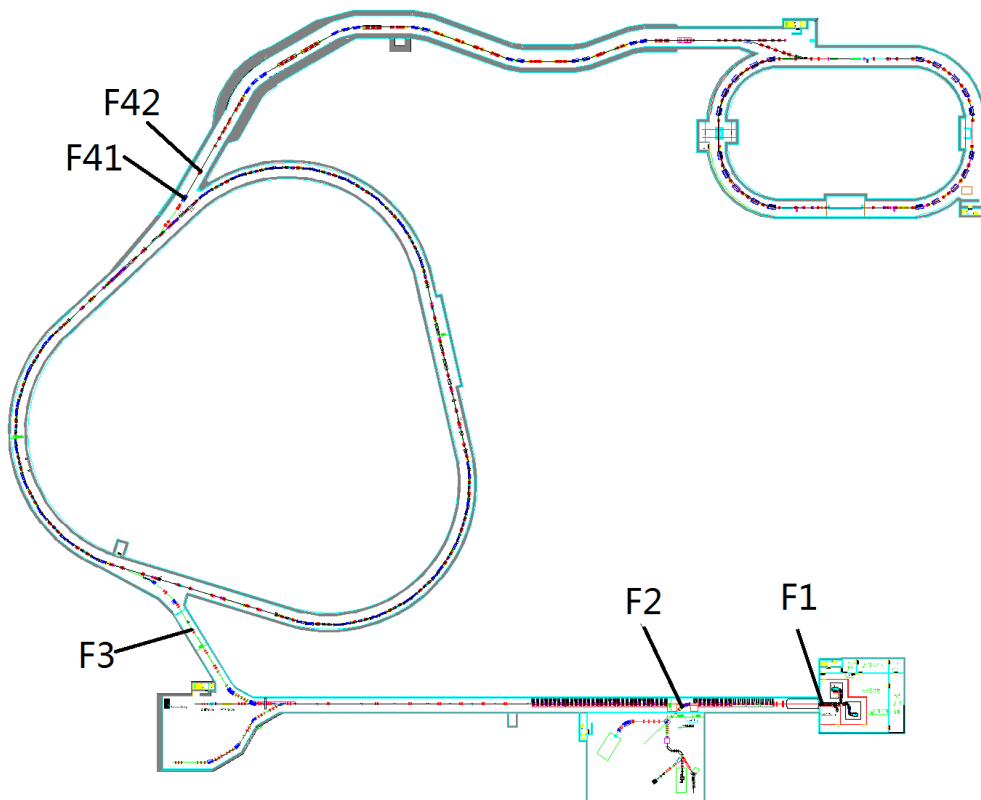


图 4-18 束流切断设备设置位置示意图

上图所示的 F1、F2、F3 分别是位于直线加速器区域注入口、低能核结构终端注入口、BRing 注入口的法拉第筒。F41 和 F42 是位于 BRing 引出口的两块偏转磁铁。

（3）人员出入管理系统

辐射工作人员进入辐射工作场所的管理系统分为人员出入管理箱、个人剂量管理平台两个部分，且均与出入口授权进行联锁。

人员出入管理箱：主要实现对进入辐射工作场所的人员统计和管理，是确保人

员安全的重要部件，放置在各个辐射分区的入口，与服务器等相互通信。只有经过授权和累积剂量未超剂量约束值的人员刷 IC 卡，才能控制通道门打开。

出入管理箱又具有“钥匙箱”的功能，分为“全部归位”和“未归位”两种状态。每个进入独立控制区的人员，拔出“钥匙”开关，自动门方可打开。人员退出控制区后再次刷卡并按下“钥匙”开关，进入控制区的所有人员均“归位”后，主控室才能驱动加速器开机。该功能用于防止人员未全部退出控制区时，人员误操作时发生误照事故。

通道门口的显示屏会显示已进入人员的数量等信息。人员通过出入口时，系统会通过红外感应来驱动摄像头进行抓拍，并对影像进行保存。通道门配备限位开关，通道门关闭到位信号也是重要的安全联锁信号，是设备能否运行的重要条件。

个人剂量管理平台：实现工作人员 IC 卡和个人剂量计的自动绑定。对从事辐射工作的人员年累积剂量进行统计，当个人剂量超过剂量约束值时，系统自动取消入口授权，禁止进入辐射工作场所。

综合上述出入管理系统的逻辑，人员进出控制区的程序如下：

- 1) 读取人员 IC 卡信息，在数据库验证其权限，比对个人累积剂量；
- 2) 为刷卡人员分配可操作的按钮，用灯光指示；
- 3) 在显示屏上用亮起灯光按钮数量指示内部区域人员数量；
- 4) 与服务器通讯，将当前内部工作的人员情况全部上传；
- 5) 显示屏上显示当前加速大厅的逻辑状态、与服务器通讯信息等；
- 6) 通道门自动打开，进入工作区；
- 7) 出门时按下通道内的开门按钮，打开门，从工作区域离开。

（4）急停清场开关

辐射工作场所内，每相隔 50m~100m，侧墙上安装 1 个急停清场盒，每一个急停清场盒上均有一个急停按钮和一个清场按钮。

急停开关在计划停机或被自救人员按下后可立即处于断开状态，加速器停止出束，需要安全人员到现场复位后才能重新开机。该开关可以使得紧急情况下，人员就近按下开关立即切断束流。

清场开关，加速器开机前，必须按照规定的路线，逐一按下清场开关，主控室内才能对加速器开机出束。该开关的功能是确保辐射安全员在加速器开机前同巡视

确认控制区内所有人员均已离开，防止人员滞留误照。

急停清场开关布局示意图见图 4-19。

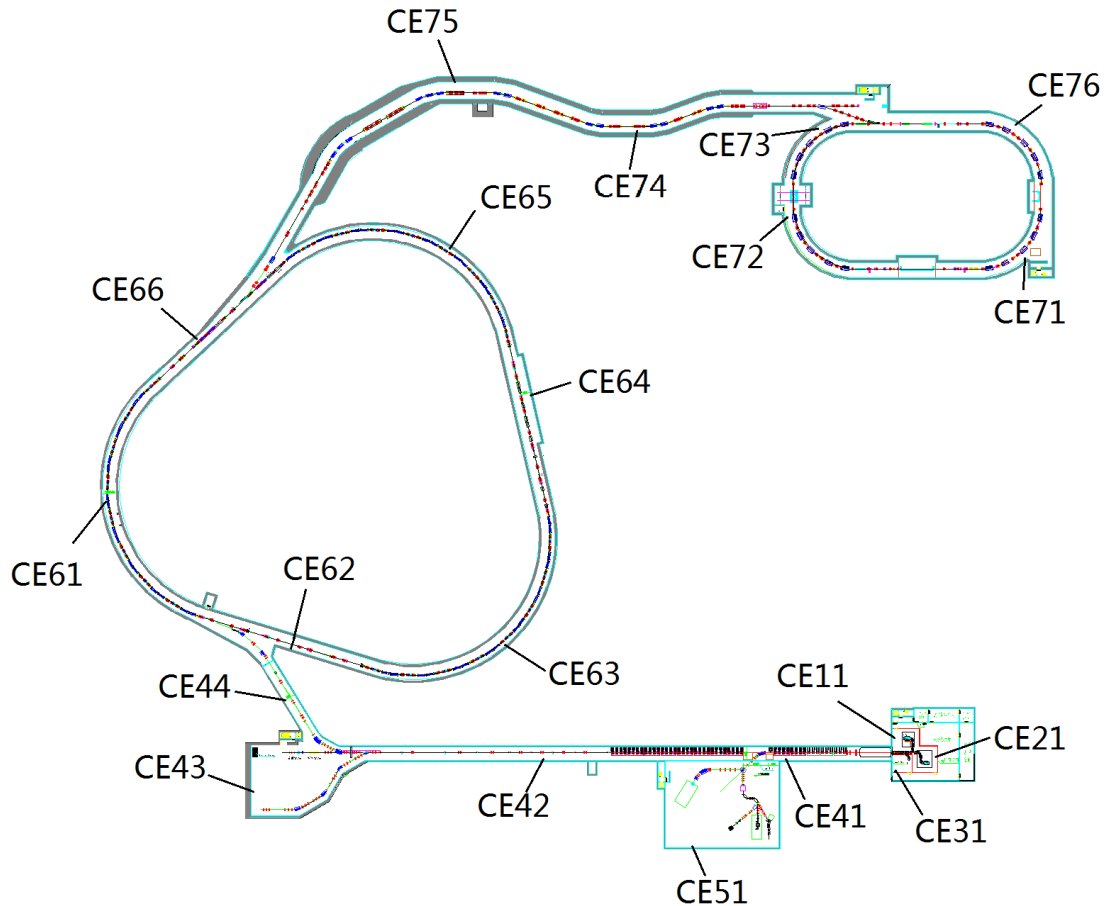


图 4-19 急停清场盒布局示意图

上图中，CE 代表急停清场盒，以 CE72 为例，它代表⑦区域（SRing+外靶实验终端）的第 2 个急停清场盒。

（5）开门开关

控制区内每扇防护门口出口处，均安装 1 个开门开关，按下该按钮，实现自动开门的同时，可以实现切断束流的功能。

（6）声光报警系统

加速器开机准备期间，在控制区入口和加速器大厅内均有声光报警，提醒加速器大厅内未离开人员迅速撤离。如果来不及离开或者加速器开机之后仍有工作人员滞留在厅内，可就近按下大厅内侧墙上的紧急停机按钮来切断加速器束流。

本项目加速器安全联锁系统的工作流程图见图 4-20。

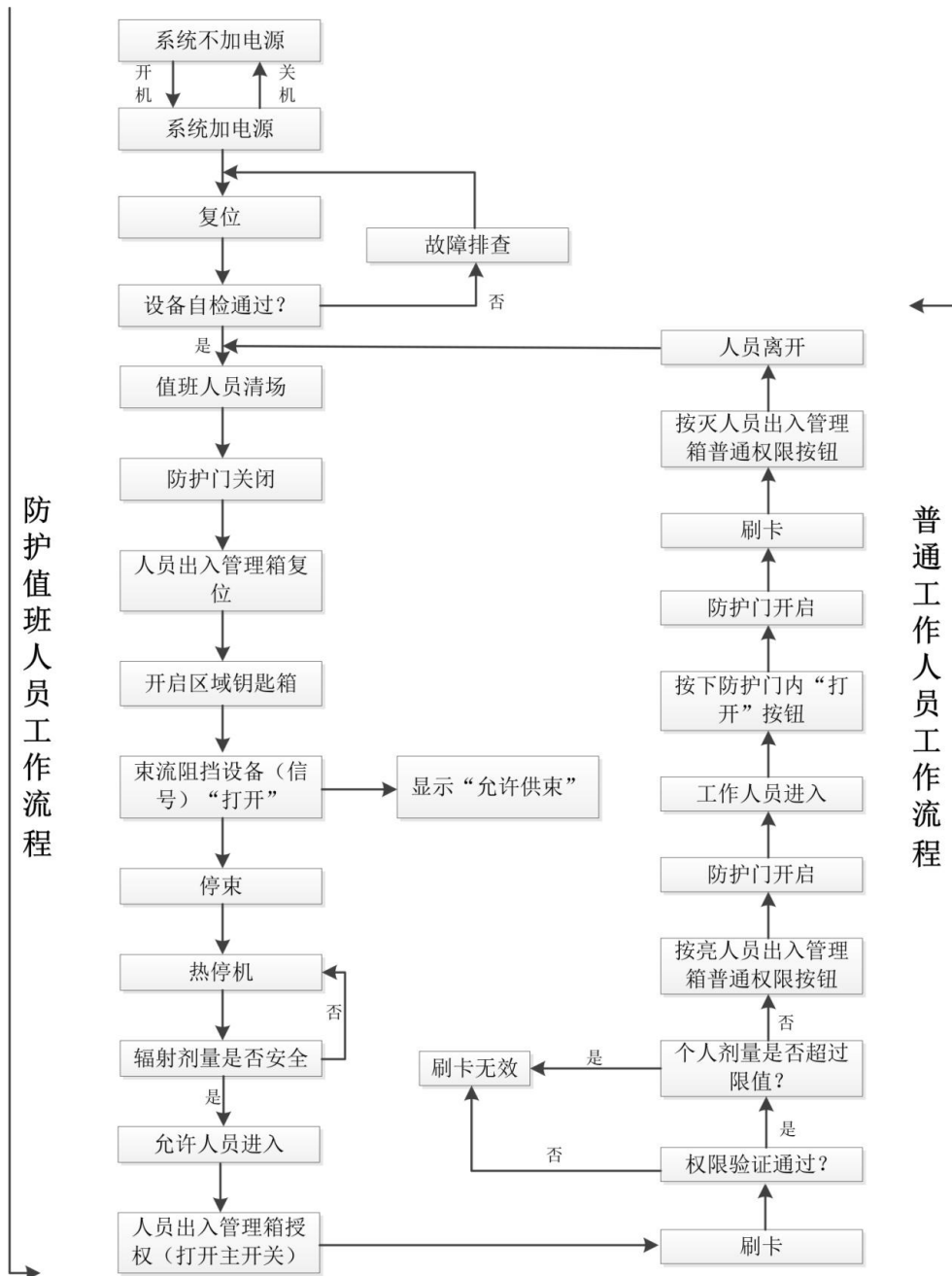


图 4-20 人身安全联锁系统工作流程

4.2.3 安全保卫

加速器大厅主出入口由人员每天 24 小时值守，有安保人员提供现场保护，确保装卸和出入库安全。

安保人员按照建设单位规章制度，定期巡查，详细记录巡查记录，发现隐患和问题及时处置和上报。巡查时携带安保和防护器具，并配带与监控中心随时联系的通讯器材，如对江装置、手机等。

4.2.4 照明和报警系统

厂界照明系统包括厂址围墙、出入口照明，为确保日常工作和保安巡逻提供必须的工作照度。在自然光不足时，系统能手动和通过光电传感器自动控制开启/关闭保安照明系统回路。在门口警卫监控中心可以开启控制区的保安照明系统。

厂址出入口设置电子围栏和视频监控，连接警卫监控中心。

4.3 三废的治理

4.3.1 放射性废气及处理措施

加速器在运行时，由于空气的活化，加速器隧道中的空气中会含有放射性核素，为减少放射性废气的排放，主要采取了以下措施：

- 所有进入隧道的空气都将经过两级过滤，减少空气中的杂质，以减少活化气体中放射性核素的种类和数量；
- 隧道内部的空气不停的在内部进行循环，气体在内部循环时经过两级过滤器过滤，减少向环境中的排放量。

隧道采用通风与空调相结合的一次回风全空气系统以保证隧道内环境，沿线分布有 12 个机房，每个机房设置两台组合式空调箱，对空气进行处理。新风量按 0.5 次/h 设计，常规排风按 1 次/h 设计，过渡期排风量按 6 次/h。

根据工艺要求，隧道装置区设置全面通风系统。通风空调系统按工艺运行可分为以下三种运行模式：

- 1) 机器停止模式——机器不运行，人员可进入。空调通风系统处于循环状态，同时开启新风系统，用于保持隧道空气的新鲜度。
- 2) 机器运行模式——隧道为禁入区和人员进入区，其中：禁入区的运行模式为空调通风系统处于循环状态，新风系统停止运行，平时排风系统运行以保持该区域微负压状态，以防止活化空气的泄漏。隧道负压设计为-20~-50Pa，次级束线和实验终端的负压要求为-50~-100Pa。人员进入区的运行模式为空调通风系统处于循环状态，新风系统运行，平时排风系统停止运行以保持该区域正压状态。

3) 过渡期通风模式——从机器运行模式快速达到人员可进入的模式，经适当最长半小时衰减后，采取大风量排风，快速置换隧道中的空气，以满足人员进入的要求。

以上三种模式下，隧道中的空气均于循环状态，且经过空调箱的连续过滤。组合

式空调箱采用初、中效两级过滤组合，其过滤效率分别为 30% 和 85%，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 ≥ 5 微米的粒子，其过滤效率 $80\% \geq E \geq 20$ ，初阻力 $\leq 50\text{Pa}$ ；中效过滤器，用以过滤粒径 ≥ 1 微米的粒子，过滤效率 $70\% \geq E \geq 20$ ，初阻力 $\leq 80\text{Pa}$ 。

4.3.2 含放射性核素的废水及处理措施

水冷系统泵站、加速器隧道、电源间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。与普通生活污水分隔开，工艺废水通过防倒流地漏、排水沟等进行收集，其收集管道采用无缝钢管，收集的放射性废水按 0.1% 坡度通过自流的方式汇入衰变池，衰变池的存水排入市政管网时采用提升泵进行加压排放。

根据 HIRFL 的运行经验，事故排水不会超过总水量的 10%，即每年事故排水量大约 48 m^3 ，在检修期间控制冷却水分段排放，每次排放量控制不超过 48 m^3 。因此，地下衰变池总存水容积设计为 100 m^3 ，位于水站附近，池底低于隧道地面 0.6 米以上。衰变池采用折流三级连续式结构，每段容积为总容积的 1/3。池体采用钢筋混凝土建造，衰变池池底和池壁均并做环氧防水防腐处理。

冷却水在衰变池中衰变 1 天后放射性核素含量见表 4-2。

表 4-2 加速器运行 1 年活化的冷却水衰变 1 天后放射性核素含量

核素	半衰期	总活度, Bq	活度浓度, Bq/g	IAEA安全导则RS-G-1.7号规定的解控水平, Bq/g
^{16}N	7.13s	-	-	
^{15}O	122.2s	-	-	
^{14}C	5730y	4.93E+05	1.03E-3	1
^{14}O	70.6s	-	-	
^{13}N	9.965min	-	-	
^{11}Be	13.76s	-	-	
^{11}C	20.39min	-	-	
^{10}C	19.3s	-	-	
^7Be	53.29min	3.41E+09	7.11	10
^3H	12.33y	4.31E+08	0.90	100

依据 IAEA 安全导则《排除、豁免和解控概念的适用》（第 RS-G-1.7 号），对含多种人工放射性核素混合物的材料，应满足下式要求：

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(\text{活度浓度})_i} \leq 1$$

式中 C_i 是材料中第 i 中放射性核素的活度浓度， $(\text{活度浓度})_i$ 是第 i 中放射性核素的活度浓度解控限值， n 是放射性核素种类数。

由表 4-2 中的数据可以计算得到，衰变 24h 后，满足 $\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(\text{活度浓度})_i} \leq 1$ 的要求，可以向环保部门申请解控。

水池废水的活化浓度和活度采用离线采样测量，经监测合格后，直接排入市政管网。

4.3.3 放射性固体废物及其处理措施

本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、靶件、冷却水过滤树脂、空气滤芯等含感生放射性的结构部件。

而加速器部件一般会在经擦拭等操作后重新使用，属于重复利用的部件。

对于损坏不再使用的部件可在分类收集、包装后，暂存于加速器活化部件暂存区，大部分部件经衰变、监测合格后作为一般废物（非放射性废物）处理，对于极少数无法豁免的放射性固体废物最终移交至城市放射性废物库。

对于冷却水过滤树脂和空气过滤滤芯，一般经短暂储存后就能达到豁免水平，经环保部门监测合格后作为非放射性废物处理。

4.4 服务期满后的环境保护措施

加速器退役的辐射防护问题主要是由于感生放射性引起的，加速器产生的感生放射性的特点是短寿命核素较多，研究表明经过几十年后对环境有影响的唯一长寿命核素为 ^{60}Co ，半衰期 5.3 年，其它核素的影响几乎可以忽略不计。而 ^{60}Co 主要存在于受束流直接照射的铜、不锈钢等加速器部件材料中，相对集中形成一个个“热点”。因此对加速器退役的初步设想是首先封存冷却一段时间，然后进行“热点”清除，产生的放射性废物属于低放废物，可送交城市放射性废物库存放，其它部件经监测合格后可清洁解控，进行回收利用。

5 环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

施工活动对环境的影响主要是工程开挖、土石方爆破、道路施工、汽车运输以及设备安装等造成的地面振动、噪声、粉尘和植被破坏等生态方面的影响。

5.1.1 振动的影响

施工过程中的打桩、强夯、爆破和碾压等活动会对周围环境产生一定的振动影响。振动主要是由施工引起的地面振动在土体中传播产生的，其频率和强度变化范围与振源特征、土体条件、周围建筑物结构特点、振源与人或建筑物的距离等因素有关。

5.1.2 声环境的影响

施工过程中，厂区内可能产生噪声的活动包括场地开挖，土石方爆破、道路平整、辅助配套设施的建设，另外设备安装和汽车运输也会产生一定噪声。

爆破施工是间歇性的，集中在施工初期场地平整阶段。现场施工机械设备如挖掘机、推土机、钻孔机等噪声值也较高，且在实际施工过程中，通常是多台机械设备同时作业，各台设备产生的噪声会互相叠加。

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，一般昼间在 50m 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 85dB 的标准；夜间除灌注桩机外，在 350m 外可以达到 GB12523-2011 中 55dB 的标准。

5.1.3 大气环境的影响

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、爆破、土石方开挖和填筑、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_x 和碳氢化合物。

爆破过程除产生大量粉尘外，还会产生一定量的烟气，烟气量与炸药种类、用量和操作方式等诸多因素有关。使用过程中，建议委托相关资质公司对爆破过程进行全

程监理。

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。

5.1.4 生态环境的影响

施工期主要对隧洞口和辅助配套设施建设场地进行平整，需剥离原有地表植被面积有限，会对局部生态环境产生影响。在建设过程中，应有规划地对整个厂区和厂外道路实施绿化，建造全新的人文景观。预计工程建设对当地局部生态环境的影响是可以接受的。

5.1.5 施工固体废弃物对环境的影响

建设过程中，施工队会产生一定量的生活垃圾和工业废弃物，且部分工业废弃物属于危险固废。为此，建设单位需制定严格的施工环境管理规定，对生活垃圾和施工垃圾均需制定相应的管理措施，做到文明施工，尽量减少固废产生量；生活垃圾定点堆放，及时清运；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）设置危废暂存仓库，定期交由有资质的单位处理或由供货商回收处置。

通过采取上述措施，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。

5.2 运行阶段对环境的影响

5.2.1 场所辐射水平

由于整个装置位于地下，屏蔽计算结果表明地面最大剂量率为 $0.20 \mu\text{Sv/h}$ ，因此地面工作场所和公众到达区域的最大附加剂量率为 $0.20 \mu\text{Sv/h}$ 。

BRing 和 SRing 运行期间，工作人员可能到低能核物理实验终端准备试验，该区域最大剂量率为 $1.22 \mu\text{Sv/h}$ 。

5.2.2 人员受照剂量

5.2.2.1 工作人员

(1) 操作人员

加速器操作人员在加速器开启时位于地面的操作室，地面操作室的剂量率不超过 $0.20 \mu\text{Sv/h}$ ，按年工作 2000 小时计算，年受照剂量不超过 0.4mSv/a 。

(2) 实验准备人员

当加速器运行时，实验准备人员会到实验终端进行实验准备工作，该区域经屏蔽后剂量率不超过 $1.22 \mu\text{Sv/h}$ ，按年工作 2000 小时计算，年受照剂量低于剂量约束值 2.44mSv/a 。

(3) 维修维护人员

维修维护人员有可能要进入隧道进行维护维修，隧道内的剂量率可能会超过 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ，这种工作情形需经特殊许可，并制定辐射防护方案，控制作业时间，保证工作人员年受照剂量不超过 5mSv/a 。

5.2.2.2 公众

(1) 厂内非辐射工作人员

厂内非辐射工作人员可能会进入加速器隧道上方的区域，该区域为室外非工作区域，人员居留因子按 $1/32$ 计算，地面最大剂量率为 $0.20 \mu\text{Sv/h}$ ，按工作人员每年在厂内停留 2000h 计算，厂内非辐射工作人员受到的直接外照射每年不超过 0.012mSv/a 。

(2) 厂外公众

根据现有屏蔽设计估算厂区边界处剂量率水平将达到天然本底水平，对厂外公众的直接外照射可以忽略不计。

加速器运行期间，由于隧道中空气活化，会产生放射性核素排放，排放源项见表 3-13。

采用 IAEA 安全系列报告第 19 号推荐的第二级筛选模式-稀释模式对评价范围内的厂外公众年个人有效剂量进行计算，计算模型见附件 A。

稀释模式根据排放源高度、邻近最高建筑物高度和接收点离排放点的距离，不考虑烟羽的抬升进行大气弥散因子的计算。稀释模式的辐射剂量计算采用基本剂量模式，不分年龄组，只计算成人所受到的有效剂量。考虑的照射途径包括：空气浸没外照射、

地面沉积外照射、吸入内照射和食入内照射。其中空气浸没外照射采用半无限烟云模式计算，同时保守地假设受照个人无屏蔽而且全部时间停留在野外。地面沉积的放射性物质产生的外照射有效剂量模式采用常规计算模式，同时不考虑屏蔽和居留时间份额。食入放射性物质的内照射首先根据空气中放射性核素浓度或地面沉积浓度计算食品中放射性核素的比放，最后根据全国平均的公众个人饮食习惯计算得到。计算中采用的剂量转换因子包括烟云浸没和地面沉积外照射剂量转换因子、吸入和食入内照射有效剂量转换因子，它们主要取自《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、联邦导则（FRG）12号报告（1993）。

保守假定项目气载放射性核素全部集中于直线设备楼排风管（10号空调机房）排放。排风管排放高度为13.2米，邻近最高建筑物高度11.2米。由于稀释模式考虑距离排放口相同距离的各方位的气载流出物均匀分布，故保守选取厂址评价范围内距离气载流出物排放口最近的居民点坑口村（离排放口SW方位730米）作为厂外公众年个人有效剂量的评价目标。

根据项目附近太平岭核电厂厂址气象塔10米高度2016年一整年逐时观测数据代表本项目释放源高度的平均风速，其值为3.7m/s。

表5-1给出了坑口村公众个人有效剂量结果，由表可知，公众受到的年个人有效剂量为0.004mSv/a。

表 5-1 放射性气体排放对坑口村公众个人有效剂量（mSv/a）

序号	核素	空气浸没	地面沉积	吸入	食入	合计
1	Ar-41	3.25E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.25E-06
2	Ar-37	2.15E-16	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.15E-16
3	Be-7	2.74E-12	4.36E-09	3.72E-09	2.92E-07	3.00E-07
4	C-14	9.57E-15	0.00E+00	6.61E-08	3.28E-07	3.94E-07
5	H-3	9.40E-16	0.00E+00	1.98E-10	1.07E-11	2.08E-10
合计						3.94E-06

综上所述，HIAF加速期运行对厂外公众的年照射剂量低于0.1mSv/a，满足国家标准要求。

5.2.3 噪声影响

运行期间噪声影响主要来自于冷却塔。冷却塔为低噪音方形横流式冷却塔，共设

置两组合 11 台,均位于水站楼顶处。单台冷却塔 1 m 处的等效声压级小于 65dB(A)。

保守考虑冷却塔均位于水站地面处,在预测影响时不考虑噪声的大气、地面吸收效应以及屏障效应,仅考虑噪声随距离的扩散衰减效应。水站距离最近场址边界约 150m,距离坑口村和东头村分别为 820m 和 1400m,其距离远远大于冷却塔最大几何尺寸的两倍,可按点声源衰减模式计算冷却塔噪声影响,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)。

表 5-2 给出了单台冷却塔随距离衰减的关系。

表 5-2 单台冷却塔随距离的衰减关系 (dB (A))

主要声源	噪声级	1m	厂界(150m)	坑口村 (820m)	东头村 (1400m)
单台 冷却塔	65	65	21.5	6.7	2.1

不考虑冷却塔的功率因子,保守考虑所有冷却塔同时运行,预测点的噪声影响叠加计算。当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_p —为几个声源在受声点的噪声迭加, (dB (A))。

L_{pi} —为第 i 噪声源在上述受声点的声级, (dB (A))。

表 5-3 给出了考虑 11 台冷却塔噪声叠加后在预测点处产生的贡献。

表 5-3 11 台冷却塔噪声贡献值 (dB (A))

主要声源	厂界 (150m)	坑口村 (820m)	东头村 (1400m)
11 台冷却塔	31.9	17.1	12.5

可见, HIAF 装置在运行时厂界处的最大排放噪声值均可满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)中 3 类限值标准要求(昼间 ≤ 65 dB (A), 夜间 ≤ 55 dB (A))。

距离本项目最近的两个居民点是 WSW 方位 0.4km 的惠州市黄埠镇的坑口村和 SSW 方位 1.1km 处的东头村,其噪声背景值为昼间 47.4dB (A)、夜间 43 dB (A)

和昼间 50.7 dB (A)、夜间 43.5 dB (A)；分别叠加表 5-3 中的噪声贡献值后，两个居民点昼间噪声值均小于昼间 60 dB (A) 及夜间 50 dB (A) 的标准限值。可见，即使考虑冷却塔满负荷运行，由于这两个村距离厂址均较远，居民点噪声满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）中声环境质量标准 2 类限值要求，对其影响很小，不会出现扰民的现象。

5.3 事故影响分析

5.3.1 人员误入事故

人员误入事故是有可能造成人员伤亡的重大事故，因此，系统的安全联锁和安全控制系统必须满足独立性、多重性和冗余性的要求，防止该类事故的发生。

人员误入事故不会对加速器外的人员和环境造成影响。

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。运营单位需严格控制工作人员超剂量照射事故，该类事故不会对加速器外的人员和环境造成影响。

5.3.3 冷却水泄漏事故

本项目设计了冷却水泄漏收集储存系统，泄漏的冷却水被收集到衰变池内，经衰变、监测合格后排放，该类事故不会对环境造成污染，也不会引起辐射事故。

5.3.4 空气过滤器失效事故

本项目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，由于过滤器失效造成的活化气体排放量很少，不会对环境造成污染，也不会引起辐射事故。

6 辐射安全管理

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），使用 I 类射线装置的单位申请许可证，应有专门的安全和防护管理机构或者专职、兼职安全和防护管理人员，并配备必要的防护用品和监测仪器。

HIAF 项目运行后，为保障中国科学院近代物理研究所的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，结合项目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。

6.1 机构与人员

拟设置辐射安全管理委员会，辐射安全工作的最高管理机构为辐射安全管理委员会。辐射安全与防护室（以下简称防护室）对射线装置、放射性同位素的安全和防护工作实施统一监督管理。各部门设专职或兼职辐射安全员，根据规定开展相关工作。

6.2 辐射安全管理规章制度

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），使用 I 类射线装置的单位申请许可证，应有健全的安全和防护管理规章制度、辐射事故应急措施。

参照中国科学院兰州近代物理研究所现有 HIRFL-CSR 重离子加速器，HIAF 项目运行后拟建立《辐射安全管理规定》、《辐射安全运行管理规定》、《电子加速器运行辐射安全规定》、《放射源库安全管理规定》、《活化物质暂存库安全管理规定》以及《个人剂量监测管理规定》。

项目运行后，将根据项目本身的运行情况，并借鉴现有加速器的经验反馈，对拟制定的安全和防护管理规章制度进行修订和完善，以满足法律法规要求，确保 HIAF 项目运行后的辐射安全管理。

6.3 辐射监测

高能粒子加速器在运行过程中，束流损失使粒子与物质相互作用，通过低能、中能核反应以及高能核反应产生中子。由于以上反应机制使得加速器周围的次级辐射具

有以下特征：

1) 具有能量大于 20MeV 的中子和光子，高能中子（特别是能量大于 20MeV 的中子）贡献占 50% 以上，产生的中子最高能量可达 10GeV，要求中子监测器 的能量响应范围从热中子到 GeV 量级的级联中子。

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

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

辐射剂量监测系统主要包括环境剂量监测、工作场所剂量监测及个人剂量监测。

6.3.1 工作场所剂量监测系统

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

在加速器工作场所辐射剂量监测中，对脉冲辐射场性能良好，有能作为实时监测，同时稳定可靠，价格便宜的是包有慢化体的 BF_3 正比计数管（He-3 管）和电离室。根据 HIAF 的布局，在其辐射区及周围共布置了 23 个监测点，每个监测点由一台中子探测器和一台 γ 探测器组成，图 6-1 给出了辐射剂量监测点的详细布局。

根据辐射场的特点，设计了工作场所辐射监测系统，其系统结构如图 6-2 所示。辐射监测系统由剂量监测器、数据采集单元、内部局域网、监控计算机、中心管理计算机与辐射防护数据库组成。探测器用于测量辐射水平；数据采集单元用于采集探测器的输出信号和完成信号的加权处理、剂量率显示、本地报警及通讯；内部局域网是探测器和监控计算机进行通讯的媒介；监控计算机用于完成 监测数据的日常分析与 管理，监管探测器的工作状态，向辐射安全连锁系统提供剂量报警信号；中心管理计算机用于发布剂量监测数据；辐射防护数据库用于存储剂量数据，存储探测器测得的实时剂量数据，包括剂量率、测量时间、监测点代号、测量辐射类型(γ /中子)。相关的接口主要由软件完成，包括通讯协议。信息的通信在内部控制网上进行。

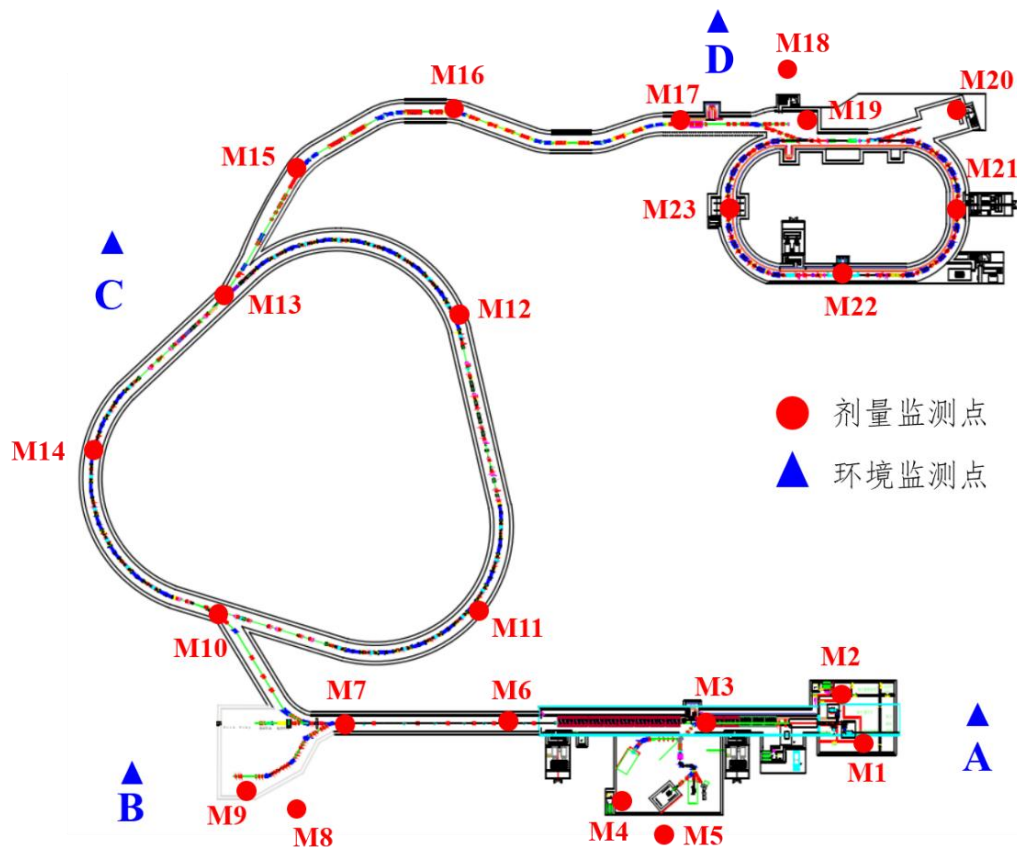


图 6-1 辐射剂量监测点布局

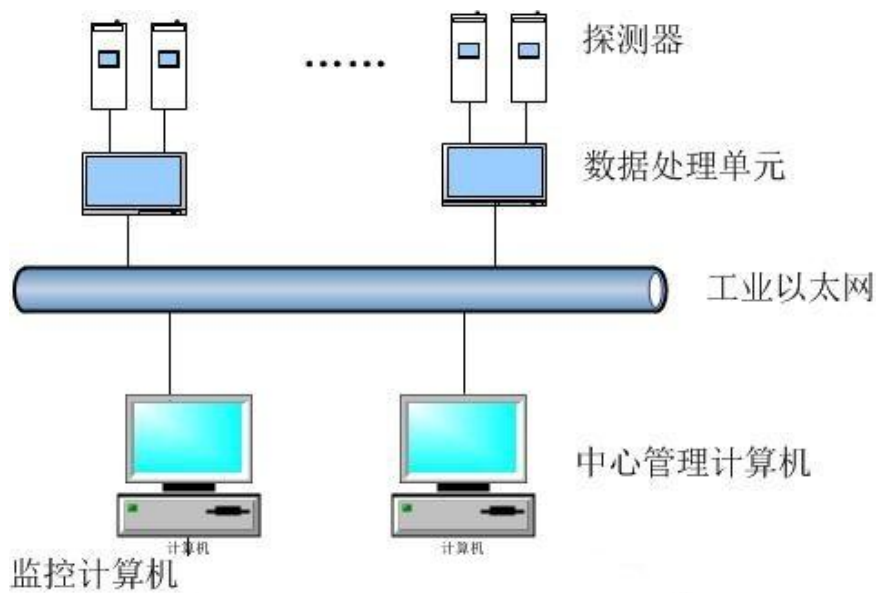


图 6-2 工作场所剂量监测系统结构示意图

6.3.1.1 中子探测器

目前用于辐射防护目的常用的中子剂量当量仪是称为 Andersson-Braun 的中子雷姆计数器，简称 A-B 雷姆计数器，它适用的中子能量范围从热中子到 10MeV。当中子能量大于 20MeV 时，普通 A-B 中子雷姆计数器测量高能质子加速器的辐射场时，必然会造成不同程度上的过低估计。为了减小常规中子监测器对 20MeV 以上中子测量存在的不足，需对 A-B 型中子雷姆计数器进行改进，采用宽能谱中子监测器，如图 6-3 给出了一种宽能谱中子检测器的结构示意图，正比计数管放在由不同中子减速材料层构成的减速球中心，最外层由聚乙烯慢化体（低能中子减速材料）组成，第二层由 10mm 厚的 Pb（高能中子减速材料）组成，第三层由 6mm 厚、钻有占 10% 面积的均匀小孔的含硼聚乙烯（中能中子减速材料）组成，第四层是聚乙烯。由于增加适当厚度的铅层，17MeV 以下中子通过这一铅层时不损失能量，当高能中子通过铅层时，与铅核发生非弹性散射，从而使高能中子得到慢化，经过蒙特卡罗方法的理论计算其能量相应从 0.025eV 到 1GeV 范围符合 ICRP 推荐的能量相应曲线（图 6-4）。

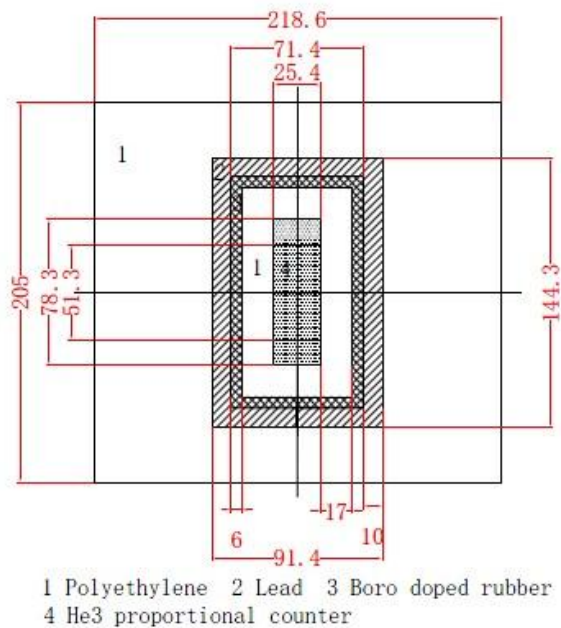


图 6-3 宽能谱中子监测器结构

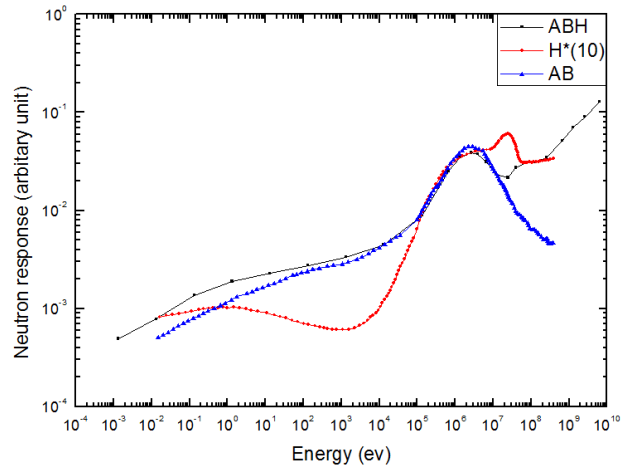


图 6-4 宽能谱中子雷姆仪能量相应 (Cal.)

正比计数管通过穿过慢化体各层孔的电缆连接电子电路,电路组成如图 6-5 所示。前置放大器对信号进行初步放大,同时完成阻抗匹配。主放大完成信号的进一步放大。甄别电路的作用是通过幅度分离方法消除干扰,特别是将 γ 射线产生的伪信号去掉。成形电路用于对脉冲信号进行展宽和整形。输出电路主要功能是对输出电流进行放大,增强剂量仪的带负载能力和远距离传输能力。

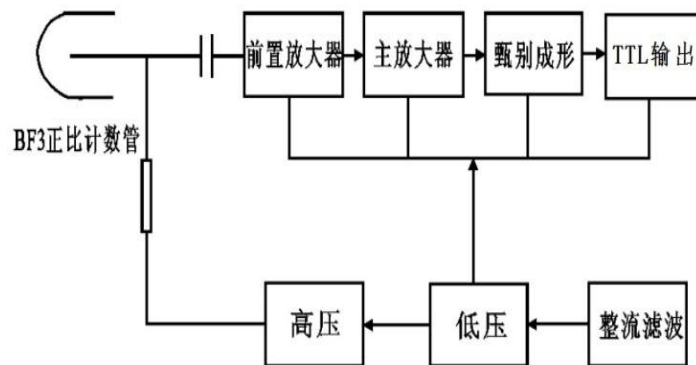


图 6-5 宽能谱中子监测器电路原理

对中子监测器的要求是:

- (1) 能量响应范围: $0.025\text{eV} \sim 1\text{GeV}$;
- (2) 量程范围: $1\text{-}100000\mu\text{Sv/h}$ 。

6.3.1.2 γ 射线探测器

针对 HIAF 产生脉冲辐射场的特点,推荐采用能适用于 γ 脉冲辐射场的电离室结构作为 γ 监测器,其性能指标如下:

- 灵敏度为 $\geq 0.250\text{nSv/脉冲}$,测量范围 $0.1\text{-}15000\mu\text{Sv/h}$;

- 能量响应范围约为 80KeV-3MeV;
- 在中子、 γ 的混合辐射场中, 对中子的响应不至影响 γ 探测器对 γ 照射量的测量结果;
- 长期稳定性: 探测器连续工作 96 小时, 所测得数据的最大相对偏差 $\leq 0.3\%$ 。

图 6-6 是 γ 探测器的电路框图, 它是一个 I-F 变换电路。

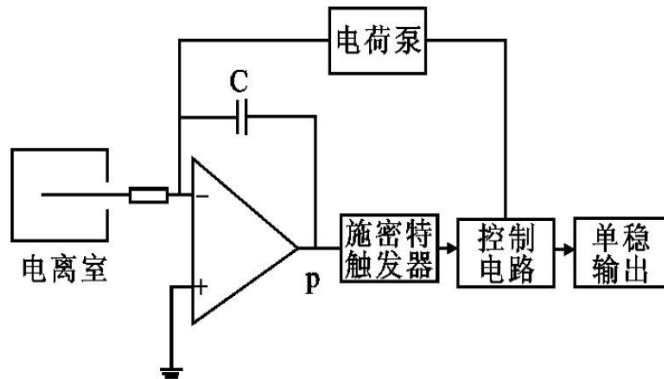


图 6-6 γ 探测器电路框图

6.3.1.3 软件的主要功能

- (1) 数据保存功能: 对监测数据在数据库中长期保存;
- (2) 数据查询功能: 对监测数据以时间区间可查询;
- (3) 数据统计功能: 对各通道的剂量监测数据进行周、月、年的累积剂量、平均剂量率、最大值、最小值等信息的统计报表。
- (4) 实时显示功能: 各通道的剂量实时显示;
- (5) 作图功能: 以曲线图形直观地显示各个探测器的剂量率随时间的变化;
- (6) 参数设置: 设置各个探测器的刻度系数和报警阈值;
- (7) 报警功能: 对超过报警阈值的监测点在显示界面给出颜色提示。

6.3.2 环境监测系统

环境剂量监测系统由 4 个环境监测站组成 (位置见图 6-1), 用于监测加速器运行时场区内加速器主体建筑以外的中子、 γ 辐射剂量率, 以验证屏蔽的有效性并保证加速器运行时射线不会泄露至主体建筑以外。同时, 在将来 HIAF 的运行过程中, 还会根据监测计划及加速器运行功率定期、不定期利用便携式仪器对装置周边进行中子、 γ 剂量率进行监测。

6.3.3 个人剂量监测

个人剂量监测将会委托有资质的单位监测，同时监测 X / γ 剂量和中子剂量，检测周期不超过 3 个月。

6.4 辐射事故应急

HIAF 项目拟建立“辐射事故应急预案”，按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令第 18 号）等相关规定，辐射事故应急预案主要包括以下几个方面：

- （1）应急机构和职责分工；
- （2）应急的具体人员和联系电话；
- （3）应急人员的组织、培训以及应急和救助的装备、资金、物资准备；
- （4）辐射事故分级及应急响应措施；
- （5）辐射事故调查、报告和处理程序。

7 利益-代价简要分析

7.1 利益分析

HIAF 是一台构型独特、束流指标领先、多学科用途的重离子科学综合研究装置。基于 HIAF，将开展重离子物理基础研究和重离子束应用研究。因此，建设 HIAF 项目的科学技术、经济和社会效果主要表现在以下几个方面。

7.1.1 科学技术效益

HIAF 是世界上第一台超导直线加速器、超导同步加速器和储存环组合的先进重离子研究装置，其完美结合了直线加速器的高脉冲流强和同步加速器的高能量特点，其主要功能是认识原子核内有效相互作用、理解宇宙中重元素的来源、解决与粒子辐射相关的关键技术等。

HIAF 系统将成为我国研究原子核结构、核反应机制、宇宙演化中的核过程、以及重离子相关前沿科学问题的重要工具，同时在核能开发等领域应用也极为广泛。面对当前极具挑战的国际环境，HIAF 系统可以提升我国国际地位，提升核科学创新能力，为人类了解物质结构、探索自然界基本规律作出重大贡献，为未来核能开发、核安全及核技术应用提供理论、方法、技术和人才支撑。

7.1.2 经济效益

利用 HIAF 系统可以产生可观的潜在经济效益。关于重离子束应用，已经在抗辐射航天电子器件研发、先进核能技术研发、新型材料研制、肿瘤治疗、优质农作物和经济作物新品种培育等领域进行了一系列应用研究。利用 HIAF 提供的先进实验条件、开展重离子束流应用研究，必将提升我国在相关领域的创新和应用能力，形成一批高新技术，通过成果转移转化，为社会经济发展做贡献。

7.1.3 社会效益

在基础研究领域，有望在原子核存在极限和奇特结构、宇宙演化中的核过程、极端环境原子过程研究领域取得具有重大国际影响的研究成果，显著提升我国的重离子科学创新能力，为人类了解自然奥秘做出中国人应有的贡献。

在离子束应用研究领域，有望解决与粒子辐照效应相关的关键技术，加大高新技

术研发和成果转移转化力度，促进我国经济社会有关领域的发展。

在工程建设过程中，通过与装置制造企业和高新技术企业的合作，掌握先进加速器制造领域的核心技术，研发关键设备，带动和提升国内相关企业设计能力、加工制造水平。

通过工程建设和后续的科学研究的培养一大批加速器和核物理研究领域的优秀年轻人，为未来核能开发、核安全及核技术应用持续提供理论、方法、技术和人才支撑。

7.2 代价分析

7.2.1 经济代价

本项目范围 HIAF 建设总投资约 154566 万元，其中拟申请国家投资 149566 万元，中国科学院匹配 5000 万元。

广东省政府将提供建设用地 900 亩，同时负责土石方开挖工作，达到七通一平（路、上水、下水、电、讯、暖、燃气、土地平整）的基础设施标准。

7.2.2 社会和环境代价

场址用地全部为林业用地，不涉及居民搬迁，对社会的影响较小。

本项目加速器隧道采用全地下建设方式，通过屏蔽后，对厂址外外照射影响可忽略不计，活化产生的废气和废水中大多数为短半衰期核素，经衰变、过滤后排放对环境的辐射影响很小，几乎可以忽略不计。

7.2.3 资源代价

项目用地均为林业用地，主要包括场区内用地和场外用地。场区内用地主要为各建构筑物及堆场的面积，需征地总计约 29.352 hm^2 ，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、回填区属于租借用地。进场道路完成了初步设计，占地约 19 hm^2 ，施工准备区和回填区租地面积约 30 hm^2 。

因此，大约 50 hm^2 的林业资源会受到影响，租地面积在施工完成后进行绿化，可适当恢复部分林业资源。

7.3 正当性分析

综上所述，HIAF 集成离子超导直线加速器和环形同步加速器最先进的技术，是

一台束流指标领先、多学科用途的重离子科学研究装置。建成后，HIAF 将为核物理和核天体物理基础研究创造国际领先水平的条件；为重离子束应用研究提供先进的实验平台；为核能开发、核安全及核技术应用提供理论、方法、技术和人才支撑。依托 HIAF，将使我国重离子科学研究从“紧跟”走向“并行”、并逐步实现“引领”，形成在国际上具有重大影响的重离子科学研究中心，项目是必要的、正当的。

8 结论与建议

8.1 项目工程概况

本建设项目名称为强流重离子加速器装置（High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility, HIAF），属于新建国家重大科技基础设施建设项目，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，拟建于广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村附近，场区内规划用地面积约 35.1hm²，相关“七通一平”和其他配套设施由地方政府配套建设，不在本项目评价范围内。

HIAF 是用人工方法产生高速离子束流的装置，由加速器系统、实验终端和配套支撑设施构成，主要包括：强流离子源系统、超导离子直线加速器、磁刚度为 34Tm 的增强器、束线系统、低能核结构谱仪、磁刚度为 13Tm 的高精度环形谱仪、放射性束流线、电子-离子复合共振谱仪、外靶终端以及相关配套设施，其中加速器系统是项目的核心组成部分，辐射源项主要产生于加速器系统及实验终端。

8.2 辐射安全与防护

（1）辐射防护

本项目加速器采用全地下隧道建设模式，根据辐射场的特点，HIAF 屏蔽方式选择隧道主体屏蔽、局部屏蔽和束流收集器配合使用的原则，根据现有设计的屏蔽计算结果表明，地面公众区域最大剂量率为 0.20μSv/h，工作人员区域（低能核物理实验终端）最大剂量率为 1.22 μSv/h，满足设计要求。

建设单位将按照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，同时设计中也将采用分区联锁、束流闸切断保护、人员出入管理系统、声光报警系统等保护装置，以保护辐射工作人员的人身安全。

（2）三废的治理

为降低加速器在运行时空气的活化产生的放射性核素主要通过两种措施实现：

- 所有进入隧道的空气都将经过两级过滤，减少空气中的杂质，以减少活化气体中放射性核素的种类和数量；
- 隧道内部的空气不停的在内部进行循环，气体在内部循环时经过两级过滤器

过滤，减少向环境中的排放量。

含放射性核素废水的处理主要通过折流三级连续式结构的衰变池进行衰变处理，分析表明，加速器运行期间活化的冷却水中放射性核素衰变 24h 后，满足清洁解控水平，经监测合格后可作为普通废水排入市政管网。

加速器运行期间产生的含放射性固体包括活化的元器件和空气过滤器、纯水过滤树脂，空气过滤器、纯水过滤树脂衰变后经监测达到解控水平，按普通废物处理，无法解控的固体废物送城市废物库。

根据分析，项目运行期间现有的三废治理措施可以满足环境保护的要求。

8.3 环境影响分析

（1）辐射环境影响

— 工作人员受照辐射剂量

加速器操作人员在加速器开启时位于地面的操作室，按年工作 2000 小时计算，年受照剂量不超过 0.4mSv/a，满足小于其剂量约束值 5 mSv/a 的要求。

实验准备人员在加速器运行时，会到实验终端进行实验准备工作，按年工作 2000 小时计算，年受照剂量低于剂量约束值 2.44mSv/a，满足小于其剂量约束值 5 mSv/a 的要求。

由于加速器元器件活化会导致部分隧道中剂量率较高，对于维修人员会产生较大的照射剂量，运行单位将根据剂量率水平制定维修方案，控制维修人员的工作时间，保证维修人员年受照剂量不超过 5mSv/a。

— 公众受照剂量

场内非辐射工作人员年受照剂量约 0.012mSv/a，保守估计，场外坑口村的公众的受照剂量 0.004mSv/a，均小于对公众的 0.1 mSv/a 的剂量约束值要求。

（2）非放射性影响

本项目运行期间对非放射性环境影响主要是冷却塔运行产生的噪声对厂址边界和居民点的影响，经过估算，满足标准的要求，不会造成扰民现象。

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

本项目为新建项目，建设单位将根据本项目的最终设计和运行方案，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，并制定辐射事故应急预案。

8.5 建议与承诺

（1）完善辐射安全管理

加速器设计的安全联锁装置能够有效防止加速器运行期间人员误入，但是，由于本项目建设期较长，建设单位目前尚未成立相应的安全管理组织和建立相应的安全管理制度，应在加速器调试前按国家法律法规的要求建立相应的安全防护组织结构和规章制度，以保证加速器安全运行。

（2）加强事故应急措施

加速器发生的各类事故均不会对环境造成污染，但是人员误入或管理不善，都可能造成超剂量照射或人员伤亡，建设单位应采取措施保证安全联锁系统正常运行，并严格控制工作人员进入高辐射剂量区域的工作时间，避免发生事故事件，并在加速器调试前编制完善的相应的应急预案。

附录 A

A.1 大气弥散因子

稀释模式的大气弥散计算考虑大气稀释作用，不考虑烟羽的抬升，评价范围不大于 20km。

$$C_{ai} = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \quad (1)$$

P_p —一年中风吹向接收点所在扇形方位 p 的时间份额，无量纲。计算中不考虑风向的实际频率，保守地取为 $P_p=0.25$ ；

Q_i —放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s；

u_a —在释放高度上年平均风速，m/s；

F —在下风距离 x 处的释放高度 H 的高斯扩散因子， $1/m^2$ ；

B —在下风距离 x 处的高斯扩散因子， $1/m^2$ 。

$$B = \frac{16}{\sqrt{2\pi^3}} \frac{1}{x \Sigma_z} \quad (2)$$

其中 $\Sigma_z = [\sigma_z^2 + \frac{A_b}{\pi}]^{0.5}$ ，

σ_z —垂直扩散参数，距离按下式计算：

当 $H \leq 45m$ ， $\sigma_z = 0.06x / \sqrt{1 + 0.0015x}$ ；

当 $H > 45m$ ， $\sigma_z = Ex^G$ ；

其中：若释放高度为 46m—80m，则 $E=0.215$ ， $G=0.885$ ，若释放高度大于 80m，则 $E=0.265$ ， $G=0.818$ 。

A_b 为邻近最高建筑物的截面积。

A.2 地面沉积

在稀释模式中，地面沉积采用干湿沉积速度和地面空气浓度乘积计算，即

$$G_{gi} = (V_d + V_w) C_{ai} \quad (3)$$

其中： G_{gi} —核素 i 在地面上的年均沉积率，Bq/m².s；

V_t —总沉积速度, $V_t = V_d + V_w = 1000 \text{ m/d} = 0.0116 \text{ m/s}$;

V_d —干沉积速度, m/s ;

V_w —湿沉积速度, m/s 。

A.3 辐射剂量

稀释模式的辐射剂量计算采用基本剂量模式, 不分年龄组, 只计算成人所受到的有效剂量。考虑的照射途径包括: 空气浸没外照射、地面沉积外照射、吸入内照射和食入内照射。

A.3.1 空气浸没外照射

空气浸没外照射采用半无限烟云模式计算, 同时保守地假设受照个人无屏蔽而且全部时间停留在野外。

$$H_{\gamma,i} = g_{\gamma,i} (\chi/Q)_i Q_i \quad (4)$$

其中:

$H_{\gamma,i}$ —核素 i 的空气浸没外照射有效剂量, Sv/a ;

$g_{\gamma,i}$ —核素 i 的空气浸没外照射有效剂量转换因子, $(\text{Sv/a}) / (\text{Bq/m}^3)$ 。空气浸没外照射的有效剂量转换因子采用文献[1]的数据, 所缺少核素的有效剂量转换因子则取文献[2]的相应数值。

$(\chi/Q)_i$ —核素 i 的大气弥散因子, s/m^3 ;

Q_i —放射性核素 i 的年均释放率, Bq/s 。

A.3.2 地面沉积外照射

地面沉积的放射性物质产生的外照射有效剂量模式采用常规计算模式, 同时不考虑屏蔽和居留时间份额, 按下式计算:

$$H_{b,i} = 3600 \cdot G_{g,i} \cdot K_{b,r} \cdot g_{b,i} \cdot b \quad (5)$$

$$G_{g,i} = (W_D + W_W) Q_i \quad (6)$$

$$K_{b,r} = [1 - \exp(-(\lambda_i + \lambda_m) \cdot t_b)] / (\lambda_i + \lambda_m) \quad (7)$$

式中:

$H_{b,i}$ —沉积在地面上的放射性核素 i 产生的外照射有效剂量, Sv/a ;

$G_{g,i}$ —放射性核素 i 在地面上的全年平均沉积率, Bq/m².s;

Q_i —核素 i 的年均释放率, Bq/s;

$g_{b,i}$ —放射性核素 i 的地面辐射产生的外照射有效剂量转换因子, (Sv/a)/(Bq/m²)。

b —考虑地面粗糙度和渗透到深层土壤的校正因子, 保守地取 $b=1$;

λ_i —核素 i 的衰变常数, 1/h;

λ_m —核素在陆地环境中的去除常数, 1/h;

t_b —核素在地面上的沉积时间, h。取 $t_b=30$ 年 (262800 小时)。

A.3.3 吸入放射性物质产生的内照射

吸入放射性核素 i 产生的内照射有效剂量与计算点处地面空气中放射性浓度成正比:

$$H_{h,i} = 8760 \cdot C_i \cdot V \cdot g_{h,i} \quad (8)$$

式中:

$H_{h,i}$ —核素 i 产生的吸入内照射有效剂量, Sv/a;

C_i —核素 i 在空气中的浓度, Bq/m³;

V —公众个人正常情况下的呼吸率, m³/h;

$g_{h,i}$ —吸入放射性核素 i 产生的内照射有效剂量转换因子, Sv/Bq。

A.3.4 食入放射性物质的内照射

计算食入放射性物质的内照射, 首先需要根据空气中放射性核素浓度或地面沉积浓度计算食品中放射性核素的比放, 最后根据人的饮食习惯计算得到。

1) 植物食品或饲料中放射性浓度 (除 ³H 和 ¹⁴C 以外)

陆生植物中的放射性污染浓度分别由直接沉积于植物表面和沉积于土壤中通过根部吸收而造成, 其计算式为:

$$C_{n,i} = (B_{n,Pl,i} + B_{n,So,i}) \quad (9)$$

$$B_{n,Pl,i} = 3600 \cdot (W_{Di} + W_{Wi} \cdot f_w) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_{Pl,eff,i} \cdot t_{n,e})}{Y_n \cdot \lambda_{Pl,eff,i}} \cdot Q_i \quad (10)$$

$$B_{n.Soi} = 3600 \cdot (W_{Di} + W_{Wi}) \cdot T_{n.i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_{Soeff.i} \cdot t_b)}{P_m \cdot \lambda_{Soeff.i}} \cdot Q_i \quad (11)$$

式中：

$C_{n.i}$ — n 种陆生植物内放射性核素 i 的浓度，Bq/kg；

$B_{n.Pl.i}$ — n 种陆生植物内由放射性直接沉积于其表面产生的放射性核素 i 的污染浓度，Bq/kg；

$B_{n.Soi}$ — n 种陆生植物内由放射性沉积于土壤中通过根部吸收产生的放射性核素 i 的污染浓度，Bq/kg；

Q_i —放射性流出物的年平均释放率，Bq/s；

W_{Di} 、 W_{Wi} —全年的放射性核素 i 的平均干、湿沉积因子， $1/m^2$ ，

f_w —由湿沉积而造成的滞留在植物地面以上部分的放射性份额，无量纲。保守地取 $f_w=1$ ；

$T_{n.i}$ — n 种陆生植物从根部吸收地面放射性的转移因子， $(Bq/kg)/(Bq/kg \text{ 干土})$ ；

$\lambda_{Pl-eff.i}$ —放射性核素 i 滞留在植物上和植物中的有效衰变常数， $1/h$ ， $\lambda_{Pl-eff.i}=\lambda_i+\lambda_v$ ；

$\lambda_{So-eff.i}$ —放射性核素 i 滞留在土壤中的有效衰变常数， $1/h$ ， $\lambda_{So-eff.i}=\lambda_i+\lambda_m$ ；

λ_v —放射性核素在植物中的去除常数， $1/h$ ；

λ_m —放射性核素在陆地环境中的去除常数， $1/h$ ；

$t_{n.e}$ — n 种陆生植物的生长期， h ；

t_b —放射性核素在地面的沉积时间， h ；

Y_n — n 种陆生植物单位面积产量， kg/m^2 ；

P_m —土壤有效面密度， kg/m^2 ；

n —表示叶类蔬菜（V）、粮食作物（C）、牧草（P）、饲料（F）。

2) 陆生植物中氚的浓度

$$C_{n.H3} = Q_{H3} \cdot f_{n-w} \left(\frac{f_L \cdot (\chi/Q)_{H3}}{G_w} + 3.15 \times 10^7 \frac{f_N \cdot (W_w)_{H3}}{J \cdot \rho_w} \right) \quad (12)$$

式中：

$C_{n.H3}$ — n 种陆生植物中氚的浓度，Bq/kg；

Q_{H3} —气态放射性源项中氚的年均排放量，Bq/s；

$f_{n.w}$ — n 种陆生植物中的含水率;

f_L —植物中来自空气湿度中氡的份额, 无量纲, 取 $f_L=0.3$;

f_N —植物中来自降水中氡的份额, 无量纲, 取 $f_N=0.7$;

$(\chi/Q)_{H3}$ —放射性核素 3H 的大气弥散因子, s/m^3 ;

$(W_w)_{H3}$ —放射性核素 3H 的湿沉积因子, l/m^2 ;

G_w —空气中湿度, kg/m^3 ;

J —全年的降水强度, m/a ;

ρ_w —水的密度, kg/m^3 。

3) 陆生植物中碳 14 的浓度

$$C_{n.C14} = Q_{C14} \cdot (\chi/Q)_{C14} \cdot f_{n.C} / C_{L.C} \quad (13)$$

式中:

$C_{n.C14}$ — n 种陆生植物中碳 14 的浓度, Bq/kg ;

Q_{C14} —放射性核素碳 14 的年均排放量, Bq/s ;

$(\chi/Q)_{C14}$ —放射性核素碳 14 的长期大气弥散因子, s/m^3 ;

$f_{n.C}$ — n 类植物产品中碳的质量份额, 无量纲, 取 $f_{n.C}=0.20$;

$C_{L.C}$ —空气中碳的含量, kg/m^3 , $C_{L.C}=1.8 \times 10^{-4} kg/m^3$ 。

4) 陆生动物食品中放射性浓度

$$C_{n.i} = T_{n.i} [f_p \cdot C_{P.i} + (1 - f_p) \cdot C_{F.i} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_s)] E_n \quad (14)$$

式中:

$C_{n.i}$ —牛奶或肉类食品中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg ;

$T_{n.i}$ —产奶或产肉动物摄入的放射性物质平均转移到奶中或肉中的份额, $(Bq/kg)/(Bq/d)$ 。

f_p —产肉动物或产奶动物一年中在牧场吃牧草的时间份额, 无量纲;

$C_{P.i}$ —牧草植物中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg ;

$C_{F.i}$ —贮存饲料中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg ;

t_s —饲料的贮存时间, h ;

E_n —产奶动物或产肉动物每天消费的饲料量, kg/d ;

n —表示产奶动物 (M)、产肉动物 (FI)。

5) 食入陆生食品产生的内照射

食入受放射性污染的食品对人体产生内照射，其辐射剂量取决于个人饮食习惯和食品受污染的程度。计算食入有效剂量时，把个人食入的陆生食品分成四组：叶类蔬菜、作物（包括非叶类菜、水果、谷物、薯类等）、肉类食品和奶类食品。肉类食品包括牛肉、羊肉、猪肉、禽肉和蛋类，为保守起见，以牛肉类核素参数为肉类食品的参考数据；奶类食品主要是牛奶和羊奶，取牛奶的有关核素参数为奶类食品的参考数据。计算保守假定食入的所有食品均来自本子区，且食物被人消费的延迟时间为 0。

食入陆生食品产生的内照射有效剂量由下式计算：

$$H_{g,i} = (U_V \cdot C_{V,i} + U_C \cdot C_{C,i} + U_M \cdot C_{M,i} + U_{Fl} \cdot C_{Fl,i}) \cdot g_{g,i} \quad (15)$$

式中：

$H_{g,i}$ —公众个人食入含有放射性核素 i 的食物造成的内照射有效剂量，Sv/a；

U_V —公众个人的蔬菜（指叶类蔬菜，下同）消费量，kg/a；

U_C —公众个人的作物（包括谷物、非叶类蔬菜和水果等，下同）消费量，kg/a；

U_M —公众个人的牛奶消费量，kg/a；

U_{Fl} —公众个人的肉类消费量，kg/a；

$C_{V,i}$ —本子区内叶类蔬菜中放射性核素 i 的含量，Bq/kg；

$C_{C,i}$ —本子区作物中放射性核素 i 的含量，Bq/kg；

$C_{M,i}$ —本子区内牛奶中放射性核素 i 的含量，Bq/kg；

$C_{Fl,i}$ —本子区内肉类食品中放射性核素 i 的含量，Bq/kg；

$g_{g,i}$ —食入放射性核素 i 的有效剂量转换因子，Sv/Bq。

其中参数“公众个人四种食物的消费量”在稀释模式中提供了全国平均值作为缺省（见下表）。

全国平均的公众个人饮食习惯(kg/a)

蔬菜	粮食	肉类	奶
118	257	24	4.0

建设项目环评审批基础信息表

填表单位(盖章):		中国科学院近代物理研究所				填表人(签字):		项目经办人(签字):							
建设 项目	项目名称		强流重离子加速器装置				建设内容、规模		(建设内容: 加速器系统、实验终端系统及其土建公用配套设施 规模: 大型科研装置 计量单位: 一台)						
	项目代码 ¹														
	建设地点		广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村												
	项目建设周期(月)		84.0				计划开工时间		2017年12月						
	环境影响评价行业类别						预计投产时间		2025年1月						
	建设性质		新建(迁建)				国民经济行业类型 ²		自然科学研究和试验发展						
	现有工程排污许可证编号(改、扩建项目)						项目申请类别		新申项目						
	规划环评开展情况		不需开展				规划环评文件名								
	规划环评审查机关						规划环评审查意见文号								
	建设地点中心坐标 ³ (非线性工程)		经度	E115°0'13.95"		纬度	N22°42'22.05"		环境影响评价文件类别		环境影响报告书				
	建设地点坐标(线性工程)		起点经度		起点纬度		终点经度		终点纬度		工程长度(千米)				
总投资(万元)		154566.00				环保投资(万元)		8000.00		所占比例(%)	5.18%				
建设 单位	单位名称		中国科学院近代物理研究所		法人代表	肖国青		评价 单位	单位名称		苏州热工研究院有限公司		证书编号	国环评证甲字第1904号	
	统一社会信用代码(组织机构代码)		43800211-5		技术负责人	苏有武			环评文件项目负责人		赵锋		联系电话	0512-68602168	
	通讯地址		甘肃省兰州市城关区南昌路509号		联系电话	0931-4969578			通讯地址		江苏省苏州市金阊区西环路1788号				
污 染 物 排 放 量	污染物		现有工程(已建+在建)		本工程(拟建或调整变更)		总体工程(已建+在建+拟建或调整变更)				排放方式				
			①实际排放量(吨/年)	②许可排放量(吨/年)	③预测排放量(吨/年)	④“以新带老”削减量(吨/年)	⑤区域平衡替代本工程削减量 ⁴ (吨/年)	⑥预测排放总量(吨/年)	⑦排放增减量(吨/年)						
	废水	废水量(万吨/年)				0.053			0.053	0.053	<input type="radio"/> 不排放 <input checked="" type="radio"/> 间接排放: <input checked="" type="checkbox"/> 市政管网 <input type="checkbox"/> 集中式工业污水处理厂 <input type="radio"/> 直接排放: 受纳水体_____				
		COD							0.000	0.000					
		氨氮							0.000	0.000					
		总磷							0.000	0.000					
		总氮							0.000	0.000					
	废气	废气量(万标立方米/年)							0.000	0.000	/				
		二氧化硫							0.000	0.000					
		氮氧化物							0.000	0.000					
		颗粒物							0.000	0.000					
挥发性有机物							0.000	0.000							
项目涉及保护区与风景名胜区的 情况	影响及主要措施		名称		级别	主要保护对象(目标)	工程影响情况	是否占用	占用面积(公顷)	生态防护措施					
	生态保护目标									<input type="checkbox"/> 避让 <input type="checkbox"/> 减缓 <input type="checkbox"/> 补偿 <input type="checkbox"/> 重建(多选)					
	自然保护区					/				<input type="checkbox"/> 避让 <input type="checkbox"/> 减缓 <input type="checkbox"/> 补偿 <input type="checkbox"/> 重建(多选)					
	饮用水水源保护区(地表)					/				<input type="checkbox"/> 避让 <input type="checkbox"/> 减缓 <input type="checkbox"/> 补偿 <input type="checkbox"/> 重建(多选)					
	饮用水水源保护区(地下)					/				<input type="checkbox"/> 避让 <input type="checkbox"/> 减缓 <input type="checkbox"/> 补偿 <input type="checkbox"/> 重建(多选)					
风景名胜区					/					<input type="checkbox"/> 避让 <input type="checkbox"/> 减缓 <input type="checkbox"/> 补偿 <input type="checkbox"/> 重建(多选)					

注: 1、同级经济部门审批核发的唯一项目代码
 2、分类依据: 国民经济行业分类(GB/T 4754-2011)
 3、对多点项目仅提供主体工程的中心坐标
 4、指该项目所在区域通过“区域平衡”专为本工程替代削减的量
 5、⑦=③-④-⑤, ⑧=②-④+③

强流重离子加速器（HIAF）环境影响评价公众参与情况说明

1.1 公众参与方案

公众参与工作目标：解释两装置的科学意义和目标、安全性以及核技术产业转化和社会效益等，让社会相关公众很好地了解了近物所和“两装置”项目的基本信息，深刻理解“两装置”项目的重要意义。

公众参与的方案内容及实施规划：鉴于“两装置”项目的特殊性，近物所邀请监管部门国家核安全局，及其技术支持单位核与辐射安全中心、苏州热工院的专家举办专题研讨，深刻研读和理解《中华人民共和国环境影响评价法》、《建设项目环境影响评价公众参与办法》（送审稿）等相关法规的规定和指导精神，同时广泛听取来自于中广核集团、中国核学会、中国原子能科学院等单位专家的建议。经与惠州市政府、惠东县政府、黄埠镇政府及各级政府主管部门反复沟通后，最终确定了“2+N”的公众沟通方案（“2”指两次信息公开即同步征求意见，“N”指若有具体需要可开展进一步的公众沟通工作）。近物所举行了四次大型科普报告，就两装置的科学意义和目标、安全性以及核技术产业转化和社会效益等公众关心的主要问题作了讲解。徐珊珊副所长分别面向惠东县科以上干部和市发改局干部做了两次报告，夏佳文副所长分别面向惠东县和黄埠镇的干部群众做了两次报告。共约 500 人听取了报告，取得了良好的宣传效果。其次，近物所组织三批共约 60 名公众沟通对象分别前往兰州、武威、北京等地，现场参观考察重离子加速器、武威重离子治癌示范装置、中科院高能

所正负电子对撞机、清华大学核研院高温气冷堆等科学装置和多个实验平台，同时近物所惠州分部展厅长期开放，接待公众的参观咨询。

公众参与的对象按照有效性、广泛性和代表性相结合的原则进行选择，严格按照国家相关规定开展公众沟通工作。

1.2 信息公告

环境影响评价公告一共发布了两次。第一次公告公示期（征求意见期限）是2017年5月31日至2017年6月13日。第二次公告公示期（征求意见期限）是2017年6月15日至2017年6月28日。两次公告的公示期均为10个工作日。

环境影响评价公告发布的形式为以下三种：（1）张贴：厂址附近公告栏；（2）挂网：惠州市政府网站、惠州市环保局网站、近物所网站；（3）登报：惠州日报。

环境影响报告书公开的方式为公开（二次公告），公众可以现场查阅环境影响报告书简本。惠州市查阅地点为：惠州市政府核电领导小组办公室，联系电话：0752-2882121；惠东县查阅地点为：惠州市惠东县核电项目现场指挥部（黄埠镇新渔村悦景湾酒店），联系电话：0752-8117136。

两次环评公告的内容详见《附件1：HIAF环评第一次公告》；《附件2：HIAF环评第二次公告》。

1.3 公众参与结果

公众参与的方式采用召开座谈会、专家咨询、发放调查问卷、挂网、登报、现场张贴等。

团体问卷发放范围为：市直部门 8 份，惠东县部门 14 份。

个人问卷发放范围为：惠州市 10 份，惠东县 20 份，黄埠镇 25 份，东头村 15 份，坑口村 15 份，沙埔村、上太平村和下太平村共发放 17 份问卷。

收回有效团体问卷和个人问卷的支持率达 100%。

中国科学院近代物理研究所
2017 年 11 月 14 日

