

中国科学院近代物理研究所
强流重离子加速器装置核技术利用改扩建项目竣工环
境保护验收监测报告书

建设单位：中国科学院近代物理研究所

编制单位：中国原子能科学研究院

2026年9月

建设单位法人代表:孙志宇 (签章)

编制单位法人代表:赵 皓 (签章)

项目 负责人:王春霖

报告编写人:王春霖、杨金龙、罗浩源

建设单位: 中国科学院近代物理研究所 (盖章) 编制单位: 中国原子能科学研究院 (盖章)

电话:0931—4969220

电话: 010-69359058

传真: /

传真: 010-69358270

邮编: 730010

邮编: 102413

地址: 甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号

地址: 北京市房山区新镇中国原子能科学研究院

目录

1 项目概况.....	1
1.1 基本情况.....	1
1.2 环评报告编制情况.....	1
1.3 开工建设情况.....	2
1.4 辐射安全许可证办理情况.....	3
1.5 验收范围与内容.....	4
1.6 验收开展情况.....	4
2 验收依据.....	5
2.1 建设项目环境保护相关法律、法规和规章制度.....	5
2.2 建设项目竣工环境保护验收技术规范.....	5
2.3 建设项目环境影响报告书及其审批部门审批决定.....	6
2.4 其他相关文件.....	6
3 验收执行标准.....	7
3.1 剂量约束值.....	7
3.2 剂量率控制水平.....	7
3.3 放射性废液排放限值.....	7
3.4 放射性固体废物.....	7
4 项目建设情况.....	9
4.1 地理位置及平面布置.....	9
4.2 建设内容.....	16
4.3 源项情况.....	16
4.4 工艺设备与工艺分析.....	33
4.5 项目变动情况.....	55
5 辐射安全与防护设施/措施.....	56
5.1 辐射工作场所分区.....	56
5.2 辐射屏蔽.....	62
5.3 安全联锁系统.....	77
5.4 辐射监测.....	94

5.5 放射性三废处理.....	104
5.6 其他安全措施.....	112
5.7 辐射安全管理.....	114
6 环境影响报告书主要结论与建议及其审批部门审批决定	119
6.1 环境影响报告书主要结论与建议.....	119
6.2 审批部门审批决定.....	121
6.3 审批意见落实情况.....	122
7 验收监测内容.....	124
7.1 验收监测工况要求.....	124
7.2 验收监测因子.....	124
7.3 监测点位.....	125
8 质量保证与质量控制.....	139
8.1 监测分析方法.....	139
8.2 监测仪器.....	140
8.3 验收监测质量控制和保证	140
9 验收监测结果.....	141
9.1 运行工况.....	141
9.2 验收监测结果.....	142
9.3 工作人员受照射剂量计算.....	149
10 验收监测结论.....	152
10.1 辐射防护设施/措施运行情况.....	152
10.2 放射性污染物排放监测结果及结论.....	153
附件 1 广东省生态环境厅关于中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用改扩建项目环境影响报告书的批复.....	错误!未定义书签。
附件 2 辐射安全许可证.....	错误!未定义书签。
附件 3 辐射工作人员个人剂量监测报告（封面）	错误!未定义书签。
附件 4 验收监测报告.....	错误!未定义书签。
附件 5 注册核安全工程师证书及注册证	错误!未定义书签。
附件 6 辐射工作人员辐射防护与安全考核成绩单	错误!未定义书签。
附件 7 辐射安全管理制度.....	错误!未定义书签。

1 项目概况

1.1 基本情况

项目名称：中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用改扩建项目

建设性质：改扩建

建设单位：中国科学院近代物理研究所（简称“近代物理所”）

建设地点：广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村大科学装置园区

投资情况：项目总投资概算 167086 万元，实际总投资 167086 万元；其中环保投资概算 3740 万元，环保实际投资 3740 万元，占总投资 2.24%。

建设内容：于广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村大科学装置园区建设了强流重离子加速器装置（HIAF），装置最大能量 4.15GeV/u (^{12}C)，最大流强 $7.0\times 10^{11}\text{PPP}$ (^{12}C)，典型粒子类型为 ^{12}C 、 ^{18}O 、 ^{78}Kr 、 ^{209}Bi 及 ^{238}U ，由强流超导离子源 SECR（简称离子源）、强流超导直线加速器（简称 iLinac）、增强器（Booster Ring，简称 BRing）、放射性次级束分离器（High energy Fragment Separator，简称 HFRS）、高精度环形谱仪（Spectrometer Ring，简称 SRing）、低能综合终端、外靶实验终端、高能综合终端和高能量密度物理终端组成，属于 I 类射线装置。

1.2 环评报告编制情况

2017 年 11 月 29 日，《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》（惠东环建[2017]72 号），同意强流重离子加速器（HIAF）的配套设施建设；

2017 年 12 月 29 日，《中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用项目环境影响报告书》获得原广东省环境保护厅《关于中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用项目环境影响报告书的批

复》（粤环审[2017]671号）；

由于 2017 年 12 月环评报告批复后，在建设过程中，装置的设计随着国际相关科研领域的发展进行了优化，变更调整了以下内容：

①延长超导直线加速器（iLinac）隧道长度，部分隧道外侧不再回填，变为开放空间，相应区域增加混凝土厚度，同时优化加速器设计；

②原低能核结构谱仪、强流离子束辐照终端合并为低能综合终端；

③新增高能综合端和高能量密度物理终端；

④优化放射性次级束分离器（HFRS）设计及防护措施；

⑤优化外靶实验终端屏蔽设计及技术参数；

⑥隧道上方地面新建配套建筑，主要功能为电源间、设备间、空调机房及冷水水设备间等配套设施所在地，不属于辐射工作场所。相应区域由公众区（公众区主要指监督区以外的区域，不需要单独的管控措施）变为监督区；

⑦新增销售（含建造）活动，在国内拟销售 HIAF 装置，并于用户单位进行安装调试和维修维护，年最大销售量为 1 台。

因此重新编制了改扩建的环评报告，2024 年 3 月 31 日，《中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用改扩建项目》取得了广东省生态环境厅《关于中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用改扩建项目环境影响报告书的批复》（粤环审[2024]61 号）。

1.3 开工建设情况

2018 年 7 月 6 日，取得惠东县住房和城乡建设局颁发的《建设用地规划许可证》；

其中运行楼部分：

2021 年 1 月 12 日取得《建设工程施工许可证》和开工令；

2024 年 12 月 6 日通过竣工验收；

2024 年 12 月 25 日取得《房屋建筑工程和市政基础设施工程竣工验收备案表》；

2025 年 9 月 23 日取得不动产权证，建筑面积 2552.71 平方米；

加速器隧道、直线设备楼、综合站房等；

2021 年 10 月 13 日取得《建设工程施工许可证》；

2021 年 10 月 26 日取得开工令；

2024 年 12 月 6 日通过竣工验收；

2024 年 12 月 25 日完成《房屋建筑工程和市政基础设施工程竣工验收备案表》；

2025 年 9 月 23 日取得不动产权证，建筑面积合计 33982 平方米。

2024 年 4 月 HIAF 设备组件进场；

2025 年 6 月 HIAF 装置安装完成。

1.4 辐射安全许可证办理情况

2024 年 6 月近代物理所向生态环境部正式提交第一阶段辐射安全许可证重新申领材料；

2024 年 9 月已取得第一阶段许可，第一阶段为前端系统（离子源+RFQ）调试；

2025 年 4 月近代物理所向生态环境部正式提交现阶段辐射安全许可证重新申领材料

2025 年 7 月 30 日生态环境部华南核与辐射安全监督站与核与辐射安全中心完成对项目发证前的现场检查；

2025 年 10 月 15 日近代物理所取得辐安证，同年 12 月 7 日首次成功引出束流；

2026 年 7 月 21 日束流调试完成。

目前已取得的辐射安全许可证证号：国环辐证[00298]。活动种类与范围为：使用 I 类、III 类、IV 类、V 类放射源；生产、销售、使用 II 类射线装置；使用 I 类、III 类射线装置；销售（含建造）使用 I 类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。有效期为：2028 年 12 月 31 日。

1.5 验收范围与内容

本次验收范围为许可证中许可的范围：即强流超导离子源、强流超导直线加速器、低能综合终端、增强器 Bring、放射性次级束分离器以及高精度环形谱仪 SRing，外靶实验终端、高能综合终端和高能量密度物理终端待工况条件稳定且达标后再次开展验收。

同时本项目验收范围还包括 HIAF 装置的销售（含建造）和使用，销售（含建造）HIAF 装置属定制化设备，用于开展科学研究，主要面向国内科研院所、高校等单位进行销售，拟销售（含建造）的 HIAF 装置的主体设备由离子源、直线注入器、同步加速器、束流传输线及终端组成，所采用辐射安全防护措施以及设备参数均不会超过装置区 HIAF 装置的设置，因此其依托场所为下文装置区的 HIAF 装置，源项参数、辐射安全防护措施等不再重复描述。

1.6 验收开展情况

项目取得辐射安全许可证并进入调试阶段后，近代物理所着手开展本项目竣工环保验收工作。本项目的验收监测委托原子能院进行，在熟悉相关资料和现场踏勘的基础上，于 2026 年 7 月编制完成了竣工环保验收现场监测方案。在近代物理所的协调下，原子能院于 2026 年 7 月 20 日以及 2026 年 8 月 3 日和 2026 年 8 月 4 日完成了现场冷却水取样和现场外照射监测工作；2026 年 9 月编制完成了本项目的竣工环保验收监测报告书。

2 验收依据

2.1 建设项目环境保护相关法律、法规和规章制度

(1) 《中华人民共和国生态环境法典》（中华人民共和国主席令第七十号，2026年8月15日起施行）；

(2) 《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，2005 年 12 月 1 日起施行，2019 年 3 月 2 日第二次修订）；

(3) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（原环境保护总局令 第 31 号公布，2006 年 1 月 18 日起施行，2021 年 1 月 4 日第四次修订）；

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

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

(6) 《关于发布<放射性废物分类>的公告》（环境保护部办公厅 2017 年 12 月 1 日印发，自 2018 年 1 月 1 日起施行）；

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

(8) 关于发布《建设项目竣工环境保护验收技术指南 污染影响类》的公告（生态环境部 2018 年第 9 号公告，2018 年 5 月 16 日起施行）；

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

2.2 建设项目竣工环境保护验收技术规范

(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

(2) 《粒子加速器辐射安全与防护规定》（GB 5172-2025）；

- (3) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；
- (4) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；
- (5) 《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》（GBZ2.1-2019）；
- (6) 《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；
- (7) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；
- (8) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ1326-2023）；
- (9) (3) 《核技术利用建设项目重大变动清单（试行）》（环办辐射函〔2025〕313号，2025年8月29日）。

2.3 建设项目环境影响报告书及其审批部门审批决定

- (1) 《中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用改扩建项目环境影响报告书》，2024 年 3 月；
- (2) 《广东省环境保护厅关于中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置核技术利用改扩建项目环境影响报告书的批复》（粤环审[2024]61 号，2024 年 3 月）。

2.4 其他相关文件

建设单位提供的工程设计资料等。

3 验收执行标准

3.1 剂量约束值

(1) 工作人员剂量约束值

根据环评报告书及其批复，本项目工作人员的剂量约束是 5mSv/a。

(2) 公众年剂量约束值

根据环评报告书及其批复，本项目公众照射的年剂量约束值取 0.1mSv/a。

3.2 剂量率控制水平

根据环评文件及批复文件，按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,max}$ ($\mu\text{Sv/h}$)：人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所： $\dot{H}_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；人员居留因子 $T \leq 1/2$ 的场所： $\dot{H}_{c,max} \leq 10 \mu\text{Sv/h}$ ，屏蔽体外土壤 1m 处 $\leq 5\text{mSv/h}$ 。

3.3 放射性废液排放限值

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

(1) 每月排放的总活度不超过 $10\text{ALI}_{\min}$ ；

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

3.4 放射性固体废物

加速器运行期间可能产生的放射性固体废物主要有以下两类：

(1) 一些易损易活化的靶件，如实验靶、束诊元件。加速器停机后对活化

结构部件剂量率贡献较大的主要是主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 、 ^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。

(2) 冷却水系统更换下来的离子交换树脂。

本项目运行期间产生的放射性固体废物的清洁解控参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 A 中 A2.1 的规定“任何时间段内在进行实践的场所存在的给定核素的总活度或在实践中使用的给定核素的活度浓度不超过表 A1 所给出的或审管部门所规定的豁免水平”。

对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比的和小于 1 时，方可给予豁免。

表 3-1 放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

核素	活度浓度， Bq/g	活度，Bq	核素	活度浓度， Bq/g	活度，Bq
H-3	1E+06	1E+09	Mn-52	1E+01	1E+05
Be-7	1E+03	1E+07	Mn-53	1E+04	1E+09
F-18	1E+01	1E+06	Mn-54	1E+01	1E+06
Na-24	1E+01	1E+05	Mn-56	1E+01	1E+05
Si-31	1E+03	1E+06	Fe-52	1E+01	1E+06
P-32	1E+03	1E+05	Fe-55	1E+04	1E+06
P-33	1E+05	1E+08	Fe-59	1E+01	1E+06
S-35	1E+05	1E+08	Co-55	1E+01	1E+06
Cl-38	1E+01	1E+05	Co-56	1E+01	1E+05
Ar-37	1E+06	1E+08	Co-57	1E+02	1E+06
K-42	1E+02	1E+06	Co-58	1E+01	1E+06
K-43	1E+01	1E+06	Co-60	1E+01	1E+05
Sc-46	1E+01	1E+06	Co-61	1E+02	1E+06
Sc-47	1E+02	1E+06	Ni-59	1E+04	1E+08
Sc-48	1E+01	1E+05	Ni-63	1E+05	1E+08
Ca-45	1E+04	1E+07	Ni-65	1E+01	1E+06
Ca-47	1E+01	1E+06	Cu-64	1E+02	1E+06
V-48	1E+01	1E+05	Zn-65	1E+01	1E+06
Cr-51	1E+03	1E+07	——	——	——

4 项目建设情况

4.1 地理位置及平面布置

强流重离子加速器装置（HIAF）位于广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村大科学装置园区，HIAF 分为地下加速器隧道和地上单体建筑两部分。地下加速器隧道地面标高相对场坪完成面为-12.3m(其中 Liac 隧道地面标高为-12.4m)，总长约 1.6km，隧道四周一般为土壤。按束流走向，各隧道依次是离子源大厅、inac 隧道、低能综合终端、B Ring 环隧道、高能综合终端（不在本次验收范围内）、HFRS 预分离器隧道、活化部件暂存间、HFRS 主分离器隧道、外靶实验终端（不在本次验收范围内）、S Ring 环隧道、高能量密度物理终端（不在本次验收范围内）。

地上单体建筑主要包括直线设备楼 1、直线设备楼 2、一号测试大厅、二号测试大厅、一号综合站房、二号综合站房、三号综合站房、综合测试大厅、制冷中心及运行楼。按照地下隧道轮廓及主要设备的相对位置，在地面对应建设，使之靠近主要用户，管线短捷。地下隧道各区域与地上建筑对应关系如下：

1.离子源大厅对应地上建筑为直线设备楼 2，主要场所和房间包括 2K 低温站、功率源设备间、电源间、RFQ 恒温水站、设备转运间；

2.Lnac 隧道（含放射性废物暂存间 1）对应地上建筑为直线设备楼 1、2，主要场所和房间包括 2K 低温站、功率源设备间、电源间、RFQ 恒温水站、设备转运间等；

3.低能综合终端对应地上建筑为空地；

4.B Ring 环隧道（含放射性废物暂存间 2）对应地上建筑为 1 号测试大厅，主要场所和房间包括电源间、变配电站、设备转运大厅、空调机房、数据获取室、冷却水站等；

5.高能综合终端对应地上建筑为 1 号综合站房-1，主要场所和房间包括低温站、变配电室、电源间、转运大厅等；

6.HFRS 预分离器隧道及活化部件暂存间对应地上建筑为 1 号综合站房-1 及空地，主要场所和房间包括低温站、变配电室、电源间、转运大厅等；

7.HFRS 主分离器隧道对应地上建筑为 1 号综合站房-1 和 2 号综合站房，主要场所和房间包括低温站、变配电室、电源间、转运大厅等；

8.外靶实验终端对应地上建筑为空地；

9.SRing 环隧道对应地上建筑为 2 号测试大厅，主要场所和房间包括电源间、变配电站、设备转运大厅、空调机房、数据获取室、冷却水站、实验准备间等；

10.高能密度物理终端对应地上建筑为空地。

本项目地理位置图见图 4-1，周围环境及位置见图 4-2，系统结构组成示意图见图 4-3。地上建筑总平面图见图 4-4，地下隧道及装置布局图见图 4-5。

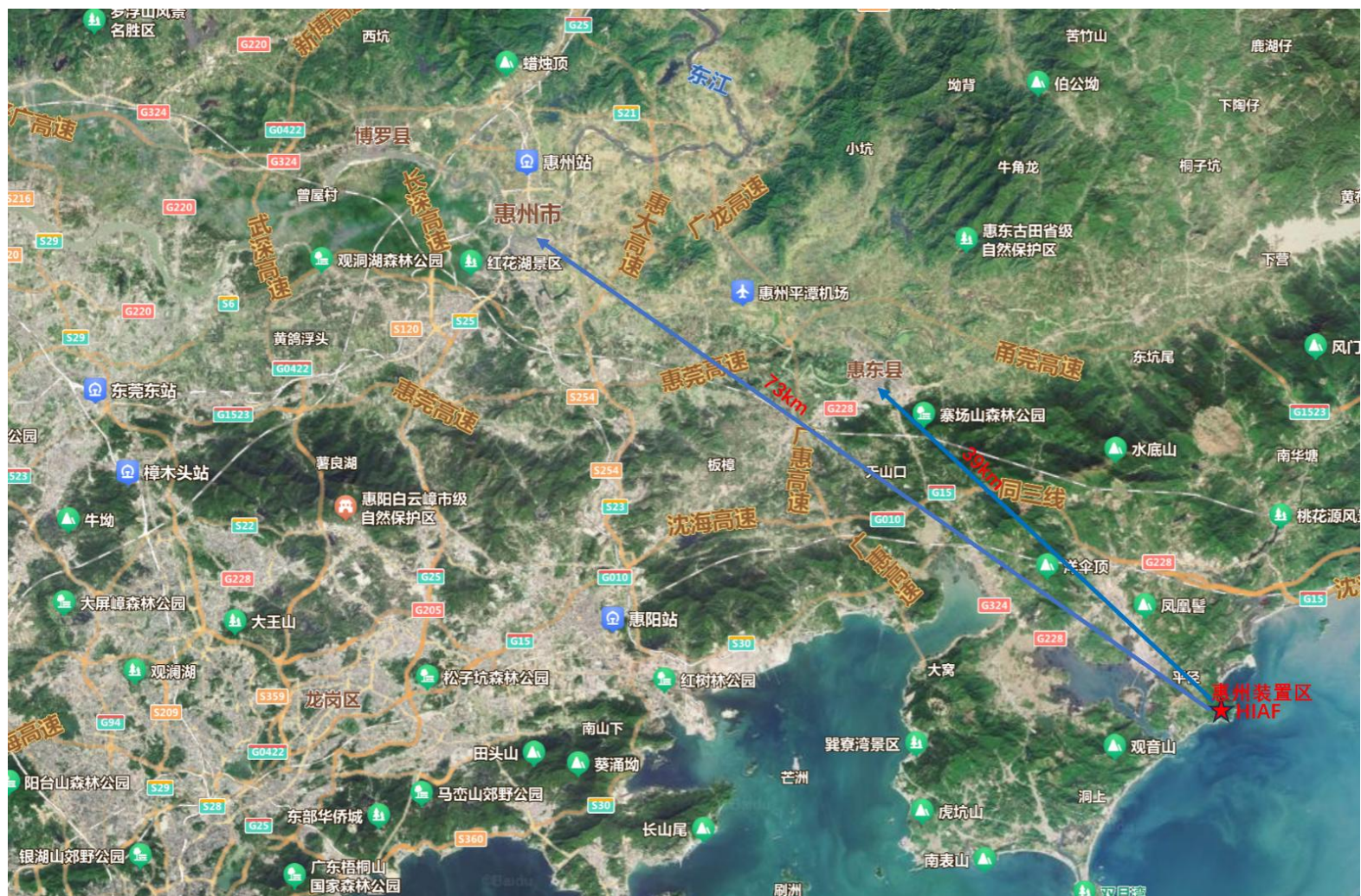


图 4-1 本项目地理位置示意图



图 4-2 本项目周围环境图



图 4-3 系统结构组成示意图

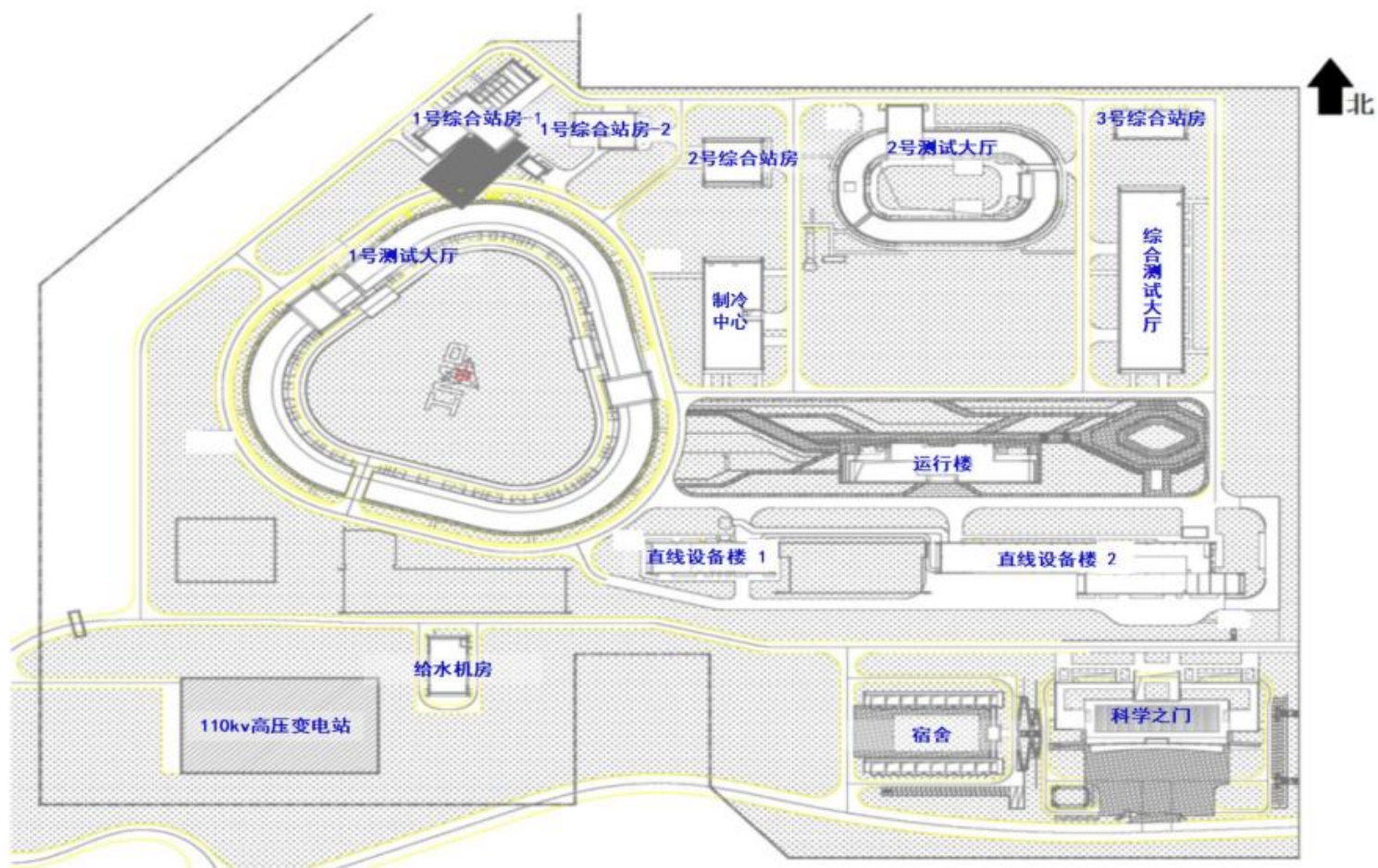


图 4-4 地上建筑总平面布局图

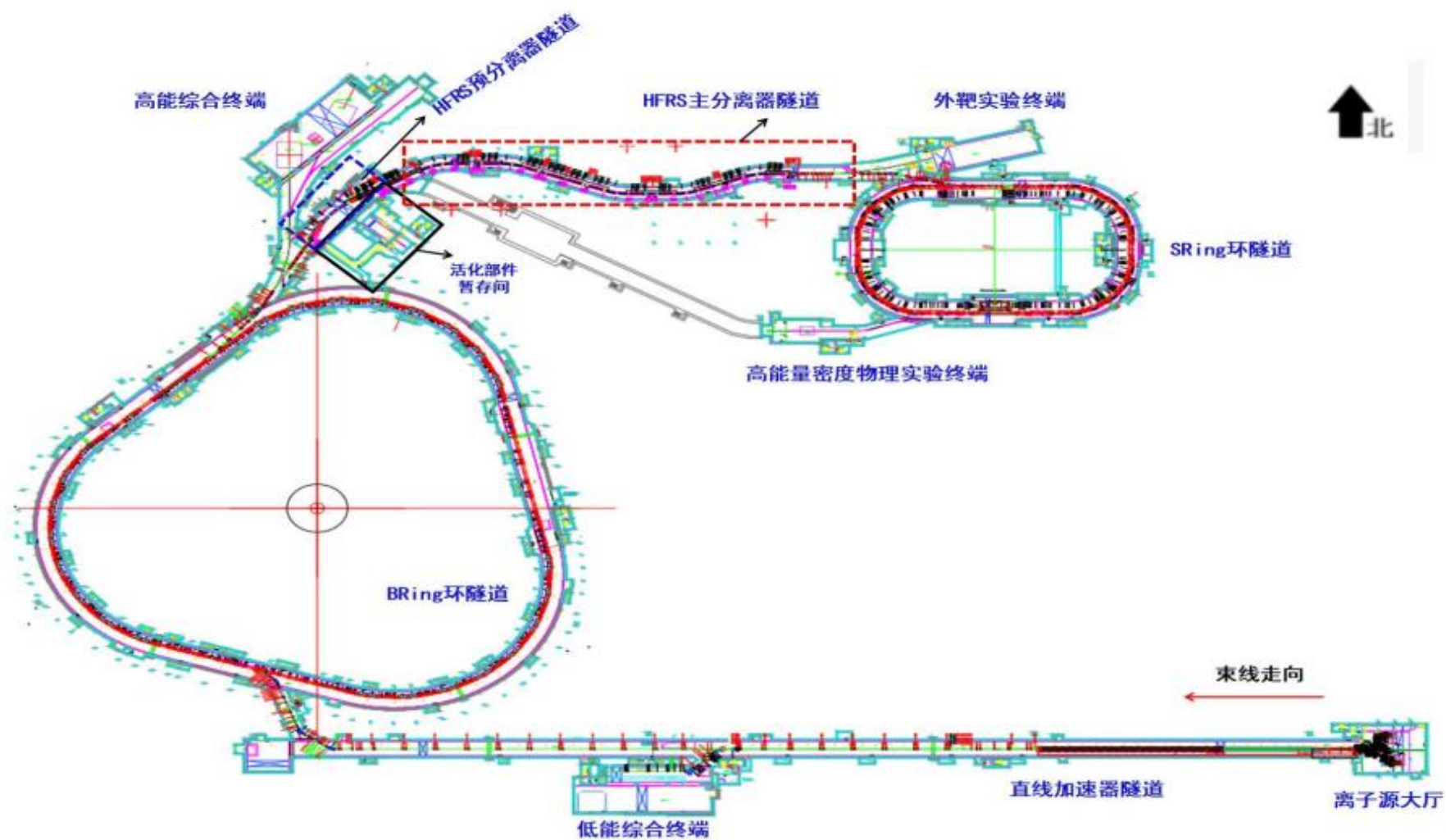


图 4-5 地下隧道及装置布局图

4.2 建设内容

强流重离子加速器装置（HIAF）由强流超导离子源、强流超导直线加速器、增强器、放射性次级束分离器、高精度环形谱仪、低能综合终端、外靶实验终端（不在本次验收范围内）、高能综合终端（不在本次验收范围内）和高能量密度物理终端（不在本次验收范围内）及配套设施组成。HIAF 作为国家十二五重大科技基础设施，它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。HIAF 最大能量 4.15GeV/u (^{12}C)，最大流强 $7.0\times 10^{11}\text{PPP}$ (^{12}C)：

表 4-1 本项目使用射线装置情况

装置名称	规格型号	加速粒子	主要参数（最大能量、最大流强）	脉冲参数	活动种类	生产厂家	类别
强流重离子加速器装置（HIAF）	自研	离子：H~U	4.15GeV/u (^{12}C)（同步加速器） $7.0\times 10^{11}\text{PPP}$ (^{12}C)（同步加速器）	脉冲频率： 1Hz	使用	中国科学院近代物理研究所	I

4.3 源项情况

强流重离子加速器（HIAF）的主要束流典型技术指标情况见表 4-2。

表 4-2 强流重离子加速器 HIAF 束流典型设计指标

粒子	能量 (GeV/u)	流强 (ppp 每脉冲粒子数)
p	9.3	$4.0\text{E}+11$
^{12}C	4.15	$7.0\text{E}+11$
^{18}O	2.6	$1.0\text{E}+11$
^{78}Kr	1.7	$7.5\text{E}+10$
^{209}Bi	0.85	$3.0\text{E}+10$
^{238}U	0.8	$3.0\text{E}+10$

4.3.1 瞬发辐射源

4.3.1.1 瞬发辐射场分析

强流重离子加速器装置，在粒子束加速、注入、传输、引出等过程中都会发生束流的损失。尤其是高能区的束流与物质的相互作用以原子的电离和激发为主，同时会穿过原子核的库仑势垒，进入原子核内，发生核内级联，通过核反应产生瞬发次级粒子。在产生的次级粒子中，带电粒子因电离作用迅速停止， π 介子等又因产生截面很小可以忽略，因此从靶中出来的主要是次级中子和 γ 。其中产生的次级中子能量由低到高可分为热中子、蒸发中子和级联中子三部分。在屏蔽材料的作用下，初始的热中子、蒸发中子和 γ 的数量迅速减少，级联中子成为穿透屏蔽的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数目，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过 (n, γ) 反应等转化成了光子，使得达到一定屏蔽深度，中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变，形成“平衡谱”。最终屏蔽内、外的瞬发辐射场都成为中子、光子的混合场。

4.3.1.2 各环节束流损失情况

强流重离子加速器（HIAF）主要的束流损失点位分布在强留超导直线加速器、BRing、HFRS、SRing 及低能综合终端，下表为 HIAF 各位置束流损失情况。

表 4-3 HIAF 束流损失一览表

装置组成	位置	束流种类	能量 (MeV/u)	流强 (pps)	束流损失率%	损失模式	束流损失 (pps)	束流损失 (pps/m)	长度 (米)	靶材
超导直线加速器	LEBT	^{12}C	0.014	1.73E+15	20.45%	均匀损失	3.538E+14	2.21E+13	16	不锈钢束流管壁
	RFQ	^{12}C	0.5	1.38E+15	20.51%	均匀损失	2.830E+14	4.72E+13	6	无氧铜腔壁
	MEBT	^{12}C	0.5	1.10E+15	10.29%	均匀损失	1.132E+14	1.89E+13	6	不锈钢束流管壁
	超导-QWR007	^{12}C	9.28	9.82E+14	0.02%	均匀损失	1.792E+11	5.60E+09	32	不锈钢束流管壁
	超导-HWR015	^{12}C	33	9.82E+14	0.01%	均匀损失	1.07E+11	1.58E+09	68	不锈钢束流管壁
脉冲注入，占空比 1/1000										
B Ring	B Ring 注入线	^{12}C	33	8.74E+11	9.04%	均匀损失	7.90E+10	1.58E+09	50	不锈钢束流管壁
	B Ring 注入	^{12}C	33	7.95E+11	4.83%	集中损失	3.84E+10	/	/	铜偏转板
	B Ring 全环	^{12}C	1380	7.57E+11	5.16%	均匀损失	3.907E+10	6.87E+07	569	不锈钢束流管壁
	B Ring 引出	^{12}C	4150	7.18E+11	2.49%	集中损失	1.79E+10	/	/	铜偏转板
	B Ring 引出线	^{12}C	4150	7.00E+11	0.59%	集中损失	4.12E+09	6.87E+07	60	不锈钢束流管壁
HFRS	HFRS 主分离器	^{12}C	1500	6.96E+11	0.98%	均匀损失	6.79E+09	3.77E+07	180	不锈钢束流管壁
S Ring	S Ring 注入线	^{10}B , ^{11}B	1143	6.89E+9	0.20%	均匀损失	1.37E+07	6.87E+05	20	不锈钢束流管壁

	SRing 注入	$^{10^{-11}}\text{B}$	1143	6.88E+9	4.19%	集中 损失	2.88E+8	/	/	铜偏转板
	SRing 全 环	$^{10^{-11}}\text{B}$	1143	6.59E+9	100%	均匀 损失	6.59E+9	2.34E+07	277	不锈钢束流管壁
低能综合 终端	低能综合 终端	^{238}U	17	3.00E+12	100%	集中 损失	3.00E+12	/	/	石墨实验靶
		^{238}U	835	2.20E+09	100%		2.20E+09	/	/	
HFRS	HFRS 预分离器（分 离器模式）	^{238}U	835	3.00E+10	100%	集中 损失	3.00E+10	/	/	石墨靶 /Beam Dump

4.3.2 感生放射性

HIAF 装置运行时初级粒子以及产生的次级粒子所形成的瞬发辐射场，使加速器构件及周围介质，如辐射区域内空气、设备冷却水、结构部件等活化从而产生感生放射性，放出 β 粒子、 γ 射线，构成残余辐射场。加速器停机后感生放射性依然存在，因放射性半衰期不同而不同程度地随时间的延长衰减。加速器运行期间，由于具有足够结构屏蔽，由部件产生的感生放射性不会对屏蔽体外的工作人员和公众造成影响。但在加速器停机维护期间，辐射工作人员检修结构部件和调整设备而进入控制区时，可能会对其造成辐射影响。

因此主要考虑加速器空气、冷却水以及结构部件的感生放射性。

4.2.1.1 空气的感生放射性

运行期间初级粒子或次级粒子与空气中的 H、N、O、Ar 等原子通过热中子俘获、 (γ, n) 反应和高能中子散裂反应等产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素如 ^3H 和 ^7Be ，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种核素。

表 4-4 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量份额	产生机制	活化反应截面 σ^2 , mb
^{11}C	20.364 min	N	7.55×10^{-1}	(γ, T)	0.7
		N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	(γ, an)	0.7
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
^{13}N	9.965 min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		N	7.55×10^{-1}	(γ, n) 反应	9
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	9
^{15}O	122.24 s	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	(γ, n) 反应	17
^{41}Ar	109.61 min	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	610

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告。

束流均匀损失的 FLUKA 计算模型如图 4-6 所示，模型采用了 HIAF 隧道的典型屏蔽结构，束流均匀损失加速器隧道内充满空气，隧道横向间距为 8 m、纵向间距为 6.2 m、侧墙混凝土屏蔽厚度 0.8 m、地面混凝土屏蔽厚度 0.9 m、顶部混凝土屏蔽厚度 0.9 m，混凝土屏蔽外是回填砂土。HIAF 真空管道的材料为不锈钢，管道典型内径 200 mm、壁厚 3 mm，管道中心距地面高度为 1.4 m。在真空管道下方距离 0.5 m 远处设置内径 100 mm、壁厚 3 mm 的冷却水铜管，管道内充满去离子冷却水。

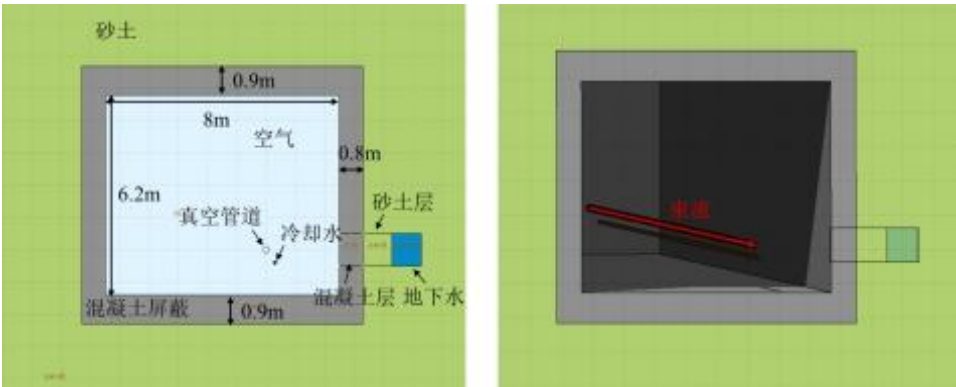


图 4-6 FLUKA 计算模型（左：平面图；右：立体图）

计算各实验终端束流损失引起的空气活化时，按照各终端实际尺寸进行简化建模，保守假设束流轰击在位于终端中心位置、与束流等高的厚铜靶上，靶的直径为 5 cm、厚度稍大于粒子射程，各区域束流参数见表 4-3。

表 4-5HIAF 装置各区域隧道空气体积及年运行时长

区域	隧道空气体积(m ³)	年运行时长(月)	年运行时长 (h)
直线加速器隧道	1.62E+04	11	7392
低能综合终端	6.08E+03	6	4032
BRing	2.82E+04	8	5376
HFRS 预分离器	3.20E+03	3	2016
HFRS 主分离器	7.24E+03	5	3360
SRing	1.36E+04	4	2688

4.2.1.1.1 计算方法及公式

加速器隧道内的空气并非静止，而是在通风系统的作用下具有一定的流动

性，下面介绍在动态情况下空气中感生放射性核素活度的计算方法。定义运行期间和停机之后的有效衰变常数，它由物理衰变常数 λ 和通风项系数 r 组成， r 是单位时间内的排风量 D 和空气总体积 V 的比值，因此 r 代表单位时间内换气的次数。一般在照射期间和停机后，通风系统的排风量并不一样，若其排风量分别是 D_i 和 D_c ，则其有效衰变常数分别为 λ_i 和 λ_c 。计算方法如公式 4-1~公式 4-2 所示。

$$\lambda_i = \lambda + r_i = \lambda + \frac{D_i}{V} \quad (4-1)$$

$$\lambda_c = \lambda + r_c = \lambda + \frac{D_c}{V} \quad (4-2)$$

某一放射性核素的静态饱和活度 C_{sat} 可由公式 4-3 计算得到。

$$C_{sat} = N\sigma\Phi \quad (4-3)$$

则在运行期间，空气中的动态饱和活度 C'_{sat} 与静态饱和活度 C_{sat} 之间的换算关系如公式 4-4 所示。

$$C'_{sat} = C_{sat} \frac{\lambda}{\lambda_i} \quad (4-4)$$

在运行期间（运行时间 t_i ）和停机后（停机时间 t_c ）的放射性核素活度 C_{ti} 和 C_{tc} 可由公式 4-5 和公式 4-6 求得。

$$C_{ti} = \frac{\lambda C_{sat}}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t_i}) \quad (4-5)$$

$$C_{tc} = \frac{\lambda C_{sat}}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t_i}) e^{-\lambda_c t_c} \quad (4-6)$$

照射期间和停机后向公众环境中排放的放射性空气总活度 Q_i 和 Q_c 可由公式 4-7 和公式 4-8 计算得到。式中， C_{ti} 和 C_{tc} 是运行期间（运行时间 t_i ）和停机后（停机时间 t_c ）的放射性核素活度浓度， C_{sat} 是饱和活度浓度。

$$Q_i = \int_0^{t_i} D_i C_{ti} dt = \frac{D_i \lambda C_{sat}}{\lambda_i} \left(t_i - \frac{1 - e^{-\lambda_i t_i}}{\lambda_i} \right) \quad (4-7)$$

$$Q_c = \int_0^{t_c} D_c C_{tc} dt = \frac{D_c \lambda C_{sat}}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t_i}) \frac{1 - e^{-\lambda_c t_c}}{\lambda_c} \quad (4-8)$$

HIAF 装置运行时，在通风系统的作用下整个隧道保持负压、减少空气流动，隧道内空气整体的换气速率为 0.25 次/h；停机之后，继续保持负压 15 分钟后进行 15 分钟的清洁排风，换气频率为 5 次/h；之后恢复正常通风，换气频率为 1 次/h。加速器排放空气中的核素总活度主要是由运行过程中的排放量 Q_i 贡献的。

4.2.1.1.2 放射性核素活度计算结果

表 4-6~表 4-11 分别给出了直线加速器隧道、低能综合终端、BRing 隧道、HFRS 预分离器隧道、HFRS 主分离器隧道、SRing 隧道的隧道空气中放射性核素动态饱和活度浓度和年排放量。

从各隧道放射性核素活度浓度及其所占的比例来看，动态饱和活度和排放量较大的核素只有 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 四种。

表 4-6 直线加速器隧道空气中的放射性核素活度

元素	A	Z	$T_{1/2}$	C' (Bq/cm ³)
C	11	6	20.364 min	2.71E-05
N	13	7	9.965 min	5.28E-05
O	15	8	122.24 s	2.73E-05
Ar	41	18	109.61 min	2.79E-05

表 4-7 低能综合终端空气中的放射性核素活度

元素	A	Z	$T_{1/2}$	C' (Bq/cm ³)
C	11	6	20.364 min	7.04E-04
N	13	7	9.965 min	2.78E-03
O	15	8	122.24 s	1.13E-03
Ar	41	18	109.61 min	3.71E-04

表 4-8 BRing 隧道空气中的放射性核素活度

元素	A	Z	$T_{1/2}$	C' (Bq/cm ³)
C	11	6	20.364 min	1.69E-02
N	13	7	9.965 min	1.28E-02
O	15	8	122.24 s	1.36E-02
Ar	41	18	109.61 min	1.45E-03

表 4-9 HFRS 预分离器隧道空气中的放射性核素活度

元素	A	Z	$T_{1/2}$	C' (Bq/cm ³)
C	11	6	20.364 min	6.57E+00
N	13	7	9.965 min	5.33E+00
O	15	8	122.24 s	5.60E+00
Ar	41	18	109.61 min	1.69E+00

表 4-10HFRS 主分离器隧道空气中的放射性核素活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C' (Bq/cm ³)
C	11	6	20.364 min	9.86E-03
N	13	7	9.965 min	7.44E-03
O	15	8	122.24 s	8.05E-03
Ar	41	18	109.61 min	8.52E-04

表 4-11 SRing 隧道空气中的放射性核素活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C' (Bq/cm ³)
C	11	6	20.364 min	2.63E-02
N	13	7	9.965 min	1.97E-02
O	15	8	122.24 s	2.11E-02
Ar	41	18	109.61 min	2.22E-03

表 4-12 各区域年均排放率结果

区域	核素	年总排放率 Qi, Bq/a	年均排放率, Q'i, Bq/s
直线加速器隧道	¹¹ C	6.71E+08	2.64E+01
	¹³ N	1.30E+09	5.11E+01
	¹⁵ O	6.75E+08	2.65E+01
	⁴¹ Ar	6.89E+08	2.71E+01
低能综合终端	¹¹ C	1.54E+09	1.49E+02
	¹³ N	6.08E+09	5.86E+02
	¹⁵ O	2.48E+09	2.39E+02
	⁴¹ Ar	8.12E+08	7.83E+01
BRing 隧道	¹¹ C	5.99E+11	2.20E+04
	¹³ N	4.56E+11	1.68E+04
	¹⁵ O	4.83E+11	1.77E+04
	⁴¹ Ar	5.15E+10	1.89E+03
HFRS 预分离器隧道	¹¹ C	3.78E+12	3.65E+05
	¹³ N	3.07E+12	2.96E+05
	¹⁵ O	3.22E+12	3.11E+05
	⁴¹ Ar	9.74E+11	9.39E+04
HFRS 主分离器隧道	¹¹ C	6.42E+10	2.06E+03
	¹³ N	4.85E+10	1.56E+03
	¹⁵ O	5.24E+10	1.68E+03
	⁴¹ Ar	5.55E+09	1.78E+02
SRing 隧道	¹¹ C	2.58E+11	8.29E+03
	¹³ N	1.93E+11	6.20E+03
	¹⁵ O	2.07E+11	6.66E+03
	⁴¹ Ar	2.18E+10	7.01E+02
合计*	¹¹ C	4.67E+12	3.90E+05
	¹³ N	3.73E+12	3.13E+05
	¹⁵ O	3.91E+12	3.27E+05
	⁴¹ Ar	1.08E+12	9.05E+04
*注：保守假设 HIAF 所有区域的排风口汇集到一处排放。			

4.2.1.2 冷却水的感生放射性

根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯），高能中子与冷却水中的氧发生散裂反应，主要产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 等放射性核素，各放射性核素的参数见表 4-13；其中， ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 的半衰期很短，装置停机后，这些核素将迅速衰变，浓度也会很快降低。因此，冷却水中的感生放射性核素主要考虑半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 。

表 4-13 冷却水中产生的主要感生放射性核素及其参数

核素	半衰期 $T_{1/2}$	衰变常数, s^{-1}
^3H	12.32 a	1.78E-09
^7Be	53.22 d	1.51E-07
^{11}C	19.308 s	5.67E-04
^{13}N	9.965 min	1.16E-03
^{15}O	70.620 s	5.67E-03

4.2.1.2.1 计算模型及参数

根据 HIAF 装置冷却水系统的设计，加速器隧道内的冷却水共由八个常规水站负责供应，进入加速器隧道的内循环冷却水采用去离子水，一般每隔一年需要更换一次系统中的冷却水。表 4-14 给出了各站房冷却水回路的相关参数，图 4-7 给出了各站房负责供水的隧道区域。

表 4-14 各站房冷却水回路参数

站房	隧道内水量(m^3)	隧道外水量(m^3)	水路总水量(m^3)
直线 1 号水站	3.05	11	14.05
一号测试大厅 1 号水站	4.03	13.07	17.1
一号测试大厅 2 号水站-1	3.55	10.03	13.58
一号测试大厅 2 号水站-2	5.09	15.53	20.62
一号测试大厅 3 号水站	5.4	17.5	22.9
二号测试大厅水站	12.24	37.21	49.45

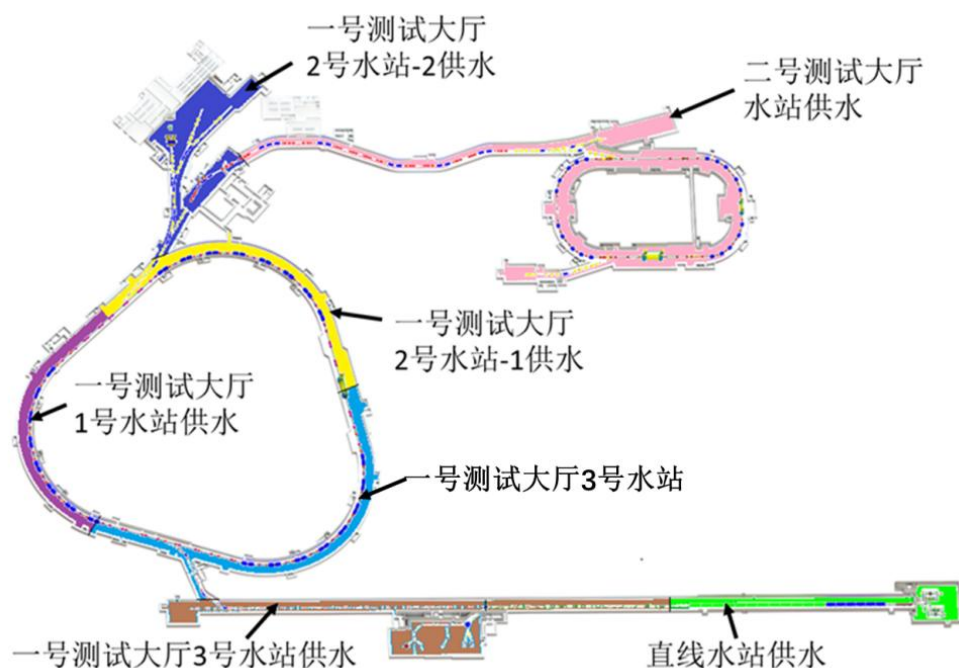


图 4-7 各水站房负责供水的隧道区域示意图

束流均匀损失引起的冷却水活化计算沿用了第 4.3.2.1.1 节提出的模型。束流集中损失引起的冷却水活化计算时，建立了图 4-8 所示的保守计算模型，模型中束流轰击在直径 5 cm、厚度稍大于其射程的厚铜靶上，由于束流损失在前向产生的次级辐射最强，且一般需要水冷的实验靶或 Beam dump 的冷却水容量在 0.4 L 左右，保守考虑在铜靶正后方 0.5 m 远处设置了体积为 0.4 L 的立方形水箱，计算得到水箱中产生的放射性核素总活度后，将其平均到整个冷却水回路中。活化水的计算是按照不同区域分别计算的，各区域的照射时长为表 4-5 给出的年运行时长。



图 4-8 束流集中损失的冷却水活化计算简化模型

4.2.1.2.2 计算结果

直线 2 号水站负责供水区域为离子源区域至 MEBT 区域，其束流最大能量

仅为 0.5MeV/u，因此该水站冷却水中不会产生感生放射性。假设加速器各区域在一年内按照预期年工作时间连续照射，表 4-15~表 4-20 给出了刚停机时，直线 1 号水站、一号测试大厅 1 号水站、一号测试大厅 2 号水站-1、一号测试大厅 2 号水站-2、一号测试大厅 3 号水站及二号测试大厅水站冷却水回路中半衰期大于 10s 的放射性核素的活度和活度浓度。

表 4-15 直线 1 号水站冷却水回路中放射性核素活度浓度、活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C(Bq/g)	A(Bq)
O	15	8	122.24 s	5.88E-02	8.26E+05
H	3	1	12.32 a	1.61E-03	2.27E+04
C	11	6	20.364 min	2.17E-02	3.05E+05
Be	7	4	53.22 d	6.53E-03	9.18E+04
N	13	7	9.965 min	3.58E-03	5.03E+04
C	10	6	19.308 s	6.16E-04	8.65E+03
O	14	8	70.620 s	2.06E-04	2.89E+03
Be	11	4	13.76 s	1.29E-06	1.81E+01
C	14	6	5700 a	5.88E-02	8.26E+05

表 4-16 一号测试大厅 1 号水站冷却水回路中放射性核素活度浓度、活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C(Bq/g)	A(Bq)
O	15	8	122.24 s	3.65E+01	6.25E+08
H	3	1	12.32 a	8.48E-01	1.45E+07
C	11	6	20.364 min	1.52E+01	2.60E+08
Be	7	4	53.22 d	7.66E+00	1.31E+08
N	13	7	9.965 min	3.32E+00	5.68E+07
C	10	6	19.308 s	1.56E+00	2.67E+07
O	14	8	70.620 s	9.83E-01	1.68E+07
Be	11	4	13.76 s	1.68E-01	2.87E+06
F	18	9	109.77 min	2.19E-02	3.74E+05
C	14	6	5700 a	4.31E-04	7.37E+03

表 4-17 一号测试大厅 2 号水站-1 冷却水回路中放射性核素活度浓度、活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C(Bq/g)	A(Bq)
O	15	8	122.24 s	4.05E+01	5.50E+08
H	3	1	12.32 a	9.41E-01	1.28E+07
C	11	6	20.364 min	1.69E+01	2.29E+08
Be	7	4	53.22 d	8.50E+00	1.15E+08
N	13	7	9.965 min	3.69E+00	5.01E+07
C	10	6	19.308 s	1.73E+00	2.35E+07
O	14	8	70.620 s	1.09E+00	1.48E+07
Be	11	4	13.76 s	1.86E-01	2.52E+06
F	18	9	109.77 min	2.43E-02	3.29E+05
C	14	6	5700 a	4.78E-04	6.50E+03

表 4-18 一号测试大厅 2 号水站-2 冷却水回路中放射性核素活度浓度、活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C(Bq/g)	A(Bq)
O	15	8	122.24 s	5.17E+00	1.07E+08
H	3	1	12.32 a	4.06E-02	8.38E+05

C	11	6	20.364 min	1.85E+00	3.81E+07
Be	7	4	53.22 d	6.62E-01	1.36E+07
N	13	7	9.965 min	4.97E-01	1.03E+07
C	10	6	19.308 s	3.02E-01	6.23E+06
O	14	8	70.620 s	1.46E-01	3.01E+06
Be	11	4	13.76 s	0.00E+00	0.00E+00
F	18	9	109.77 min	1.04E-02	2.15E+05
C	14	6	5700 a	1.50E-05	3.09E+02

表 4-19 一号测试大厅 3 号水站冷却水回路中放射性核素活度浓度、活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C(Bq/g)	A(Bq)
O	15	8	122.24 s	3.66E+01	8.37E+08
H	3	1	12.32 a	8.49E-01	1.94E+07
C	11	6	20.364 min	1.52E+01	3.49E+08
Be	7	4	53.22 d	7.66E+00	1.76E+08
N	13	7	9.965 min	3.32E+00	7.61E+07
C	10	6	19.308 s	1.56E+00	3.58E+07
O	14	8	70.620 s	9.83E-01	2.25E+07
Be	11	4	13.76 s	1.68E-01	3.84E+06
F	18	9	109.77 min	2.19E-02	5.01E+05
C	14	6	5700 a	4.32E-04	9.88E+03

表 4-20 二号测试大厅水站冷却水回路中放射性核素活度浓度、活度

元素	A	Z	T _{1/2}	C(Bq/g)	A(Bq)
O	15	8	122.24 s	6.14E+01	3.04E+09
H	3	1	12.32 a	7.50E-01	3.71E+07
C	11	6	20.364 min	2.58E+01	1.28E+09
Be	7	4	53.22 d	9.94E+00	4.91E+08
N	13	7	9.965 min	5.85E+00	2.89E+08
C	10	6	19.308 s	2.70E+00	1.33E+08
O	14	8	70.620 s	1.72E+00	8.53E+07
Be	11	4	13.76 s	2.07E-01	1.02E+07
F	18	9	109.77 min	6.41E-02	3.17E+06
C	14	6	5700 a	3.56E-04	1.76E+04

4.2.1.3 结构部件的感生放射性

加速器部件中的感生放射性主要来自束的直接损失，发生高功率束流集中损失的 Beam dump、初级靶等高活化部件往往具有很强的感生放射性，其主要材料为铁、石墨。相关实验研究表明，停机后被活化部件中的核素主要是 ⁵⁴Mn、⁵¹Cr、⁵²Mn 和 ⁶⁰Co 等半衰期较长的核素。

下面选取 HIAF 装置典型 Beam dump 的感生放射性的产生、分布及衰变规律进行说明。在以下计算中，分别考虑了单次实验及长期照射下的感生放射性影响。一般单次核物理实验的最大持续时长约一周，HFRS 预分离器单次束流实验的最大持续时长为一个月，因此对实验终端采取连续照射时长为 1 周，对预分离器的 Beamdump 采取连续照射时长为 1 个月。为了评估加速器长期运

行下结构部件感生放射性水平，采用照射 30 年平均水平叠加单次实验计算结果保守估计。为得到照射 30 年平均水平，在模拟计算时束流强度采用了终端一年内的平均流强（由最大流强乘以终端年负荷因子得到，对于长寿命核素的积累，这样设置是合理的），连续照射 30 年、冷却 1 个月（排除中短寿命核素）。

4.2.1.3.1 HFRS 初级靶、Beam dump

放射性次级束分离器（HFRS）是 HIAF 的重要组成部分，HFRS 总长度为 192 m，它连接了 BRing 和 SRing。HFRS 有两种运行模式，分别是传输线模式和分离器模式。在传输线模式中，HFRS 的主要功能是作为 BRing 和 SRing 的传输线。而在分离器模式中，HFRS 通过 $B\rho-\Delta E-B\rho$ 方法来产生、分离和鉴别放射性次级束。图 4-9 给出了 HFRS 束线的布局示意图，HFRS 由预分离器和主分离器段组成。预分离器被用来产生次级粒子并进行初步的分离，而主分离器的功能是实现次级粒子的进一步纯化。

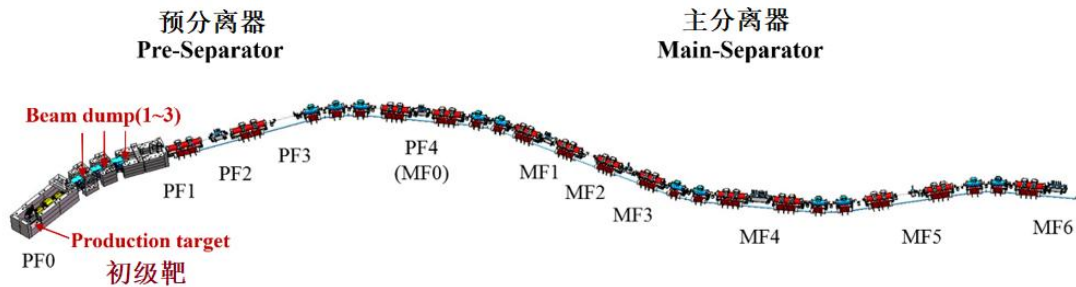


图 4-9 HFRS-预分离器区域初级靶及 Beam dump 所在位置示意图

PF0 区域是束流损失最为集中的区域，当束流被注入到 HFRS 中后首先会穿透初级靶(Production target)，在这个过程中产生一系列的次级粒子。在三台偏转二极磁铁的后方布置了 Beam dump，它们被用来吸收不需要的次级粒子，从而实现对次级束的初步分离。

初级靶的材料为石墨，为了产生不同的放射性次级束，其设计厚度有 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm 和 45 mm，石墨靶盘直径 300 mm。保守考虑，选用 45 mm 厚的石墨靶作为感生放射性计算分析的依据。Beam dump 被设计为 200 mm 厚石墨与 400mm 厚混凝土的组合结构，图 4-10 给出了 Beam

dump 的结构示意图。考虑到主束穿过最薄的 10 mm 石墨靶后，其能量和流强损失都较小，因此在 Beam dump 相关的模拟计算中，保守地简化为主束直接照射在 Beam dump 上。

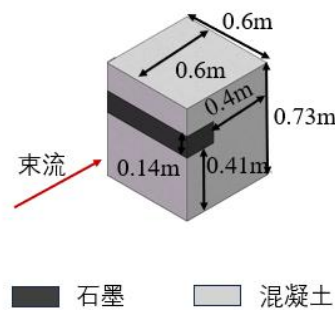


图 4-10Beam dump 模型结构示意图

表 4-21 给出了 HFRS 常用的 23 种束流，从中选取了束流功率最高、辐射影响最大的 ^{238}U 束作为防护计算的参数。

表 4-21 HFRS 常用的束流

粒子	快引出模式			慢引出模式		
	能量 (MeV/u)	流强(pps)	功率(W)	能量(MeV/u)	流强(pps)	功率(W)
^{12}C	685	1.80E+11	2.37E+02	2248	4.62E+09	1.99E+01
^{18}O	696	6.00E+10	1.20E+02	\	\	\
^{36}Ar	805	6.00E+10	2.78E+02	2224	1.54E+09	1.97E+01
^{40}Ar	787	1.50E+11	7.56E+02	\	\	\
^{48}Ca	791	5.50E+10	3.34E+02	\	\	\
^{58}Ni	893	4.20E+10	3.48E+02	2149	1.08E+09	2.15E+01
^{64}Ni	869	4.05E+10	3.60E+02	\	\	\
^{78}Kr	954	6.00E+10	7.13E+02	1601	2.31E+09	4.62E+01
^{86}Kr	925	4.59E+10	5.84E+02	\	\	\
^{112}Sn	1067	3.30E+10	6.31E+02	1614	8.46E+08	2.45E+01

^{124}Sn	1026	3.42E+10	6.96E+02	1243	8.77E+08	2.16E+01
^{124}Xe	1002	3.30E+10	6.56E+02	1477	8.46E+08	2.48E+01
^{136}Xe	971	3.30E+10	6.97E+02	1298	8.46E+08	2.39E+01
^{204}Pb	800	3.45E+10	9.01E+02	\	\	\
^{238}U	835	3.00E+10	9.54E+02	\	\	\

对于单次实验，利用 FLUKA 程序计算了连续照射一个月、停机不同时间后，初级靶、Beam dump 中的放射性总活度及不同距离处的残余剂量率，计算结果如表 4-22~表 4-23 所示。

表 4-22 初级靶放射性活度及残余剂量率结果

停机时长	初级靶中的放射核素总活度, Bq	表面剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	30cm 处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	100cm 处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
1 小时	4.87E+09	4.74E+05	1.30E+04	1.14E+03
1 天	2.53E+09	1.37E+05	3.42E+03	2.72E+02
7 天	2.35E+09	5.38E+04	1.38E+03	1.21E+02

表 4-23 Beam dump 放射性活度及残余剂量率结果

停机时长	Beam dump 石墨中的放射核素总活度, Bq	Beam dump 混凝土中的放射核素总活度, Bq	表面剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	30cm 处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	100cm 处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
1 小时	3.14E+10	8.39E+10	1.29E+06	3.83E+04	5.61E+03
1 天	1.59E+10	3.64E+10	3.42E+05	1.03E+04	1.75E+03
7 天	1.48E+10	1.98E+10	1.19E+05	2.38E+03	3.06E+02

表 4-24 初级靶残余剂量率结果(长期运行，停机一周)

/	停机时长	表面剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	30cm 处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	100cm 处剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
单次实验	1 周	5.38E+04	1.38E+03	1.21E+02
30 年平均水平	-	1.65E+04	5.18E+02	7.8E+01
长期运行水平估算	1 周	7.03E+04	1.90E+03	1.99E+02

表 4-25 Beam dump 残余剂量率结果(长期运行，停机一周)

/	停机时长	表面剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	30cm 处剂量 率， $\mu\text{Sv/h}$	100cm 处剂量率 ， $\mu\text{Sv/h}$
单次实验	1 周	1.19E+05	2.38E+03	3.06E+02
30 年平均水平	-	3.54E+04	3.31E+03	5.31E+02
长期运行水平 估算	1 周	1.54E+05	5.69E+03	8.37E+02

束流连续照射一个月后，HFRS 初级靶和 Beam dump 周围残留有很强的感生放射性，这使得人员无法直接进入并开展检修工作。为了解决这个问题，本项目在沿 HFRS 束线设置局部屏蔽的辐射防护方案，沿束线设置的混凝土屏蔽能够对初级靶和 Beam dump 中产生的感生放射性起到直接的屏蔽作用，有效降低隧道内的残余剂量率水平。图 4-11 给出了混凝土局部屏蔽的示意图。

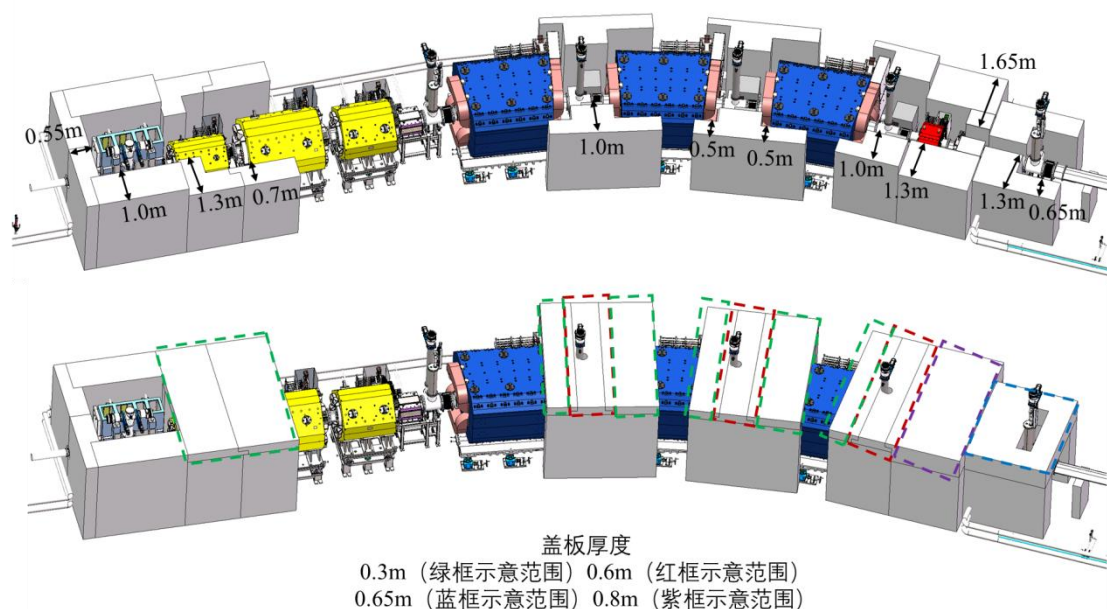


图 4-11 局部屏蔽机械结构设计图

在工作人员进入 HFRS-预分离器隧道开展检修工作时，应按照工作地点的实测残余剂量率严格控制工作时长，从而限制人员所受照射剂量不超过管理目标值。

4.2.1.3.2 低能综合终端实验靶的感生放射性

在低能综合终端实验靶的感生放射性计算中，主要考虑了重离子辐照实验

的束流参数（ ^{238}U 、能量 17MeV/u、流强 $3.0\text{E}+12\text{pps}$ ）。利用 FLUKA 程序计算了连续照射一周、停机不同时间后，距实验靶（石墨）不同距离处的残余剂量率，计算结果如表 4-26 所示。低能综合终端未设置 Beam dump，实验靶做完实验后将被取走，因此对该终端不再分析长期照射下的感生放射性。

表 4-26 实验靶的放射性核素活度及残余剂量率

停机时长	靶中的放射核素总活度 (Bq)	距靶 30cm 远剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	距靶 100cm 远剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	距靶 500cm 远剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
停机 1 小时	9.41E+07	8245	723.5	34.1
停机 1 天	5.08E+06	1651.1	144.1	4.44
停机 7 天	4.70E+06	288.9	27.8	1.12

4.2.1.4 臭氧等有害气体的产生

O_3 和 NO_2 是当光子能量低于 (γ, n) 反应的阈能时，光子对空气的辐照而产生，同时其产生量与带电粒子的质量密切相关，是电子加速器环境影响评价中需要考虑的因素。对强流重离子加速器装置而言，其辐射场主要为中子辐射，光子产额很小。重离子的质量比电子的质量高 5 个量级，因此，对强流重离子加速器装置，其 O_3 和 NO_2 产生量很小，可以不用考虑。

4.4 工艺设备与工艺分析

4.4.1 HIAF 装置组成

强流重离子加速器装置（HIAF）由强流超导离子源、强流超导直线加速器、增强器、放射性次级束分离器、高精度环形谱仪、低能综合终端、外靶实验终端（不在本次验收范围内）、高能综合终端（不在本次验收范围内）和高能量密度物理终端（不在本次验收范围内）及配套设施组成，其布局图如下所示。



图 4-12 系统结构组成示意图

4.2.2 HIAF 工作原理

HIAF 装置利用离子源产生从氢到铀的强流离子束，注入 iLinac 进行预加速。iLinac 是 BRing 的注入器，也可为低能综合终端提供实验所需的强流离子束。而 BRing 利用相空间涂抹和束流冷却技术将离子束累积到高流强并加速到高能。在 BRing 中完成加速和累积的束流可被输送至高能综合终端开展实验研究，也可被注入到 HFRS。HFRS 由预分离器和主分离器组成，其有两种运行模式：传输线模式和分离器模式。在传输线模式下，HFRS 的主要功能是作为连接 BRing 和 SRing 的传输线来传输主束，用于后端高能密度物理终端开展实验。而在分离器模式下，HFRS 利用 $B\rho$ - ΔE - $B\rho$ 方法产生、分离以及鉴别目标离子，开展放射性次级束物理实验。该模式下，预分离器采用主束在 PF0 区域轰击初级靶产生放射性次级束，接着通过三台二极管对产生的放射性次级束进行初步的筛选和分离，目标次级束会被偏转进入主分离器，其流强比主束约小 3~4 个量级，而不需要的次级束则被磁铁后方的 Beam dump 收集；主分离器会

对初步筛选的放射性次级束进行进一步的分离和纯化，最终将目标核输送至外靶实验终端或注入 SRing。

根据束流时间结构，HIAF 装置的离子源、强流超导直线加速器有两种工作模式：连续束（CW）模式和脉冲模式，而增强器 BRing 只有脉冲工作模式。当低能综合终端开展实验时，根据实验对束流参数的要求，离子源和强流超导直线加速器选择 CW 模式或脉冲模式；而束流需要引入 BRing 加速时，离子源和强流超导直线加速器的工作模式为脉冲模式。CW 模式和脉冲模式的区别在于束流的时间结构。CW 模式下，束流脉冲频率较高，在时间轴上可以认为是连续的，而脉冲模式下束流在时间轴上是不连续的，以周期性的脉冲波的方式存在，即在一个周期内，一段时间有束流，一段时间无束流。

为提供加速器资源利用率，HIAF 装置还设计有分时供束的能力。所谓分时供束，是通过时间分割的方式，将同一台加速器的束流按不同时间分配给多个实验或应用需求。由于时间极短，束流几乎同时供给的。例如，在分时供束下，iLinac 的束流会同时供束给低能综合终端和 BRing，以提高束流利用率，因此低能综合终端、BRing 年运行时间之和会大于 iLinac 年运行时间。

从功能来区分，HIAF 装置主要可以分为加速器系统和实验终端系统。

4.2.2.1 加速器系统

加速器系统是本项目的核心组成部分，主要包括强流超导离子源、强流直线加速器、增强器以及连接各部分之间的束流传输线。

4.2.2.1.1 强流超导离子源

离子源系统是整个加速器装置的源头（图 4-13 如所示），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。HIAF 系统需要离子源提供 H~U³⁵⁺的离子束流。离子源引出束流将先进入直线加速器 iLinac 加速，再注入同步加速器。图 4-14 为包括离子源与 iLinac 中的射频四极透镜加速器（RFQ）的前端系统整体的工程效果设计，本项目将重点建设高压平台-1、SECR-1、LEBT 等系统。

高压平台：离子源系统将提供能量为 14 keV/u 的强流高电荷态离子，达到 RFQ 注入能量的需求。由于 SECR 离子源的束流引出加速能力有限，需要将整

个装置悬浮于一个最高可运行至 100 kV 的高压品台上进行离子束流的预加速至 14 keV /u。

LEBT：为低能量束流传输段，涵盖了高压平台上的部分与高压平台加速后的部分，主要作用为：

- 1) SECR 强流多电荷离子混合束流的高分辨质谱分析；
- 2) 强流离子束流的高品质传输；
- 3) 满足 RFQ 注入器需求的束流匹配与束流品质控制；
- 4) 为加速器运行需求所设置的机器保护。

强流 SECR 离子源主要设计参数指标见表 4-27。

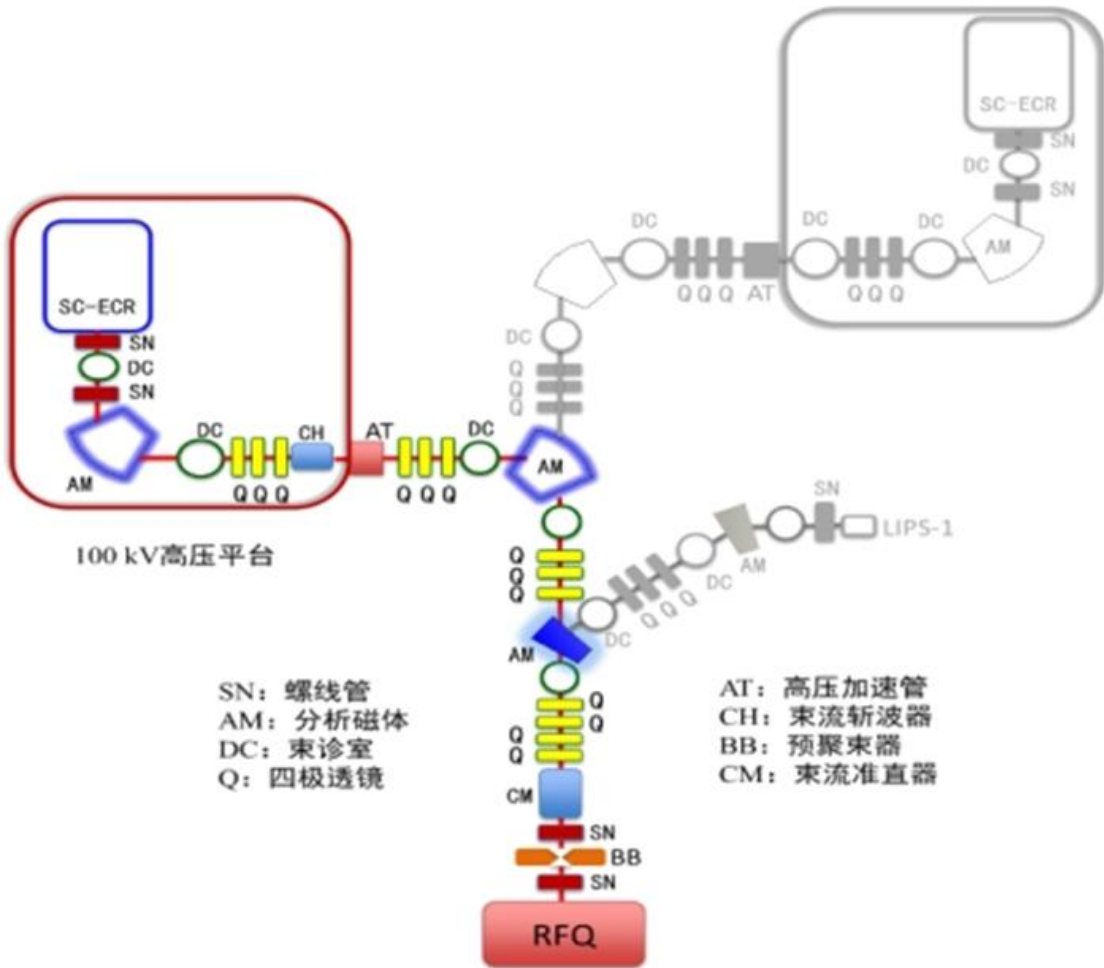


图 4-13 离子源系统的装置布局示意图

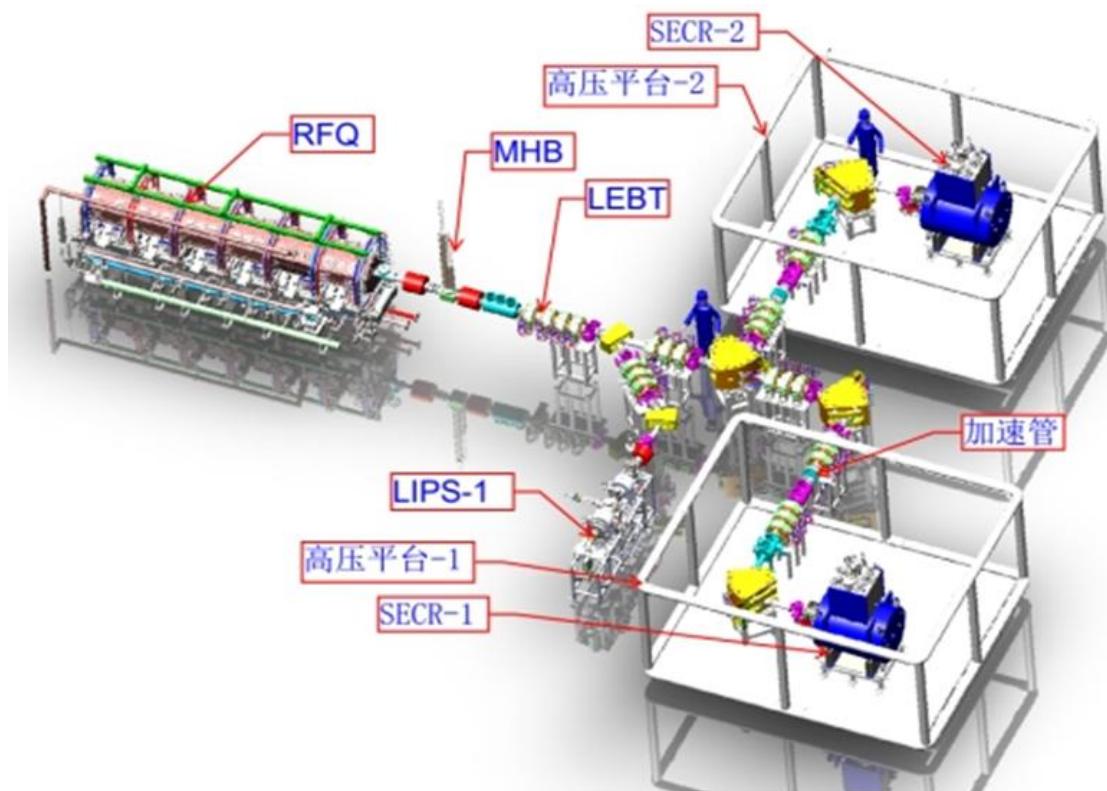


图 4-14 离子源系统设计效果图

表 4-27 强流超导离子源的主要设计参数指标

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)
^{12}C	14.0	脉冲	1000	≤ 5.0	0.2~2.0
		CW	1000	/	/
^{16}O	14.0	脉冲	1000	≤ 5.0	0.2~2.0
		CW	1000	/	/
^{78}Kr	14.0	脉冲	900	≤ 5.0	0.2~2.0
		CW	360	/	/
^{209}Bi	14.0	脉冲	1700	≤ 5.0	0.2~2.0
		CW	700	/	/
^{238}U	14.0	脉冲	1700	≤ 5.0	0.2~2.0
		CW	700	/	/

4.2.2.1.2 超导直线加速器 iLinac

超导直线加速器是 HIAF 的注入器，其主要作用是为 BRing 提供多种注入离子，iLinac 主要由射频四极透镜加速器 RFQ、中能传输线 MEBT、超导-

QWR007 和超导-QWR015 构成。

射频四极场加速结构（RFQ）是一种利用射频四极电场同时实现聚焦、聚束和加速，也是最常用的低能段加速结构，具有高流强、高传输效率和可以在高的负载周期稳定运行等优点。

中能传输段 MEBT 主要用于束流从 RFQ 到超导段的横向和纵向匹配，并在此处完成束流参数的测量，为离线匹配模拟提供准确的束流参数。

超导-QWR007、超导-QWR015 代表超导直线加速器的两个加速器阶段，粒子先经过超导-QWR007 加速，再经过超导-QWR015 加速，加速后能量分别为 9.28MeV/u （C 束）、 33MeV/u （C 束）。

超导直线加速器系统主要涉及超导加速腔、超导磁铁、射频功率源、电源系统、束流诊断系统、真空系统及低温系统。

iLinac 的总体结构和布局见图 4-15，典型离子的束流指标见表 4-28。

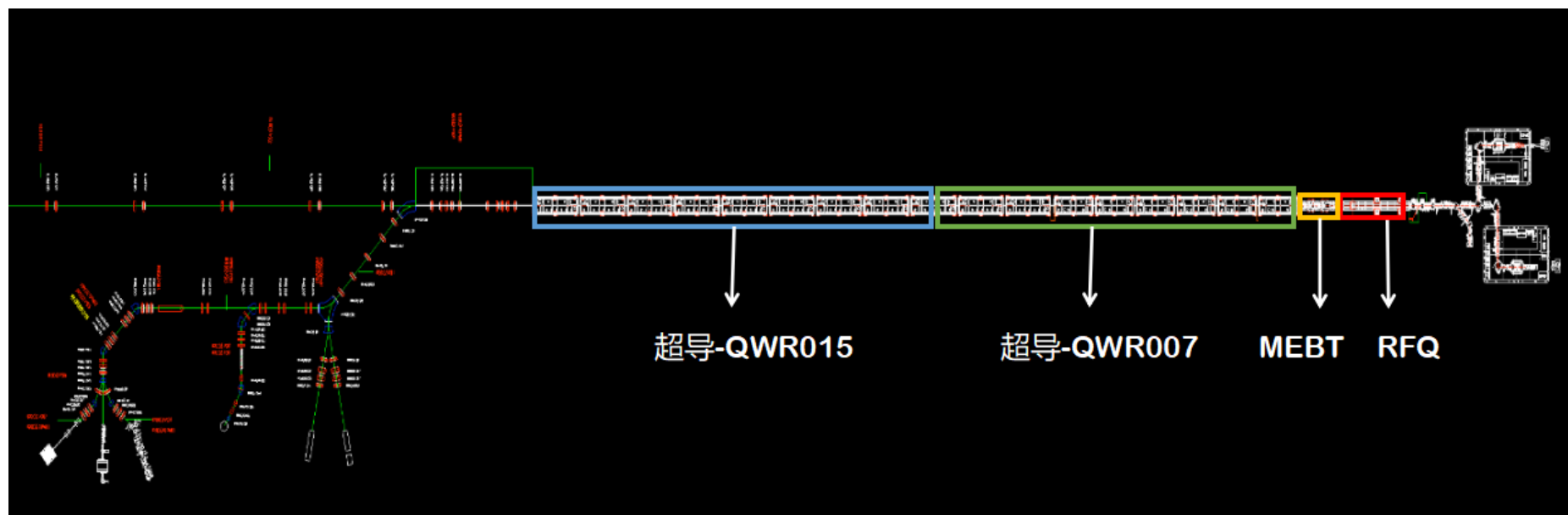


图 4-15iLinac 的总体结构和布局

表 4-28iLinac 典型离子的束流指标

离子	荷质比	能量(MeV/u)	流强(pps)
^{12}C	1/3	33	9.82E+14
^{18}O	1/3	33	4.58E+14
^{78}Kr	19/78	27	1.97E+14
^{209}Bi	31/209	17	2.02E+14
^{238}U	35/238	17	1.79E+14

4.2.2.1.3 增强器 BRing

增强器 BRing 是 HIAF 装置加速器系统的核心，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，循环频率为 1Hz。

增强器 BRing 周长 569.1 m，为三角形布局，三个长直线段分别用于放置注入、引出及高频系统元件，三个弧段提供用于离子偏转的二极磁铁和必要的色品校正元件，四极磁铁用于束流工作点等光学参数设置，总体布局见图 4-16，主要参数见表 4-29。

BRing 主要包含以下系统：

(1) BRing 磁铁系统

BRing 磁铁系统中主要有包含以下几种磁铁：

- 1) 二极磁铁：在物理要求的均匀区范围内提供均匀磁场，其作用是使束流的运动轨道按照要求偏转；
- 2) 四极磁铁：在一个范围内提供梯度磁场，使束流运动轨道以轨道中心为轴线聚焦，磁场梯度越大，聚焦力越大；
- 3) 六极磁铁：提供一个均匀的二阶梯度磁场，用来消除束流运动的色散，起到对束流的校正作用；
- 4) 校正磁铁：实现束流水平方向或者垂直方向的偏转；
- 5) 注入引出元件：注入引出元件属于特种元件，用于束流注入和引出，主

要包括切割磁铁、凸轨磁铁、冲击磁铁、静电偏转板。①切割磁铁：属于二极磁铁的一种，提供偏转磁场，对束流进行注入和引出。②凸轨磁铁：采用上升、下降沿磁场，上升及下降沿时间到百 μs 量级。③冲击磁铁：上升沿及下降沿时间达到百 ns 量级。④静电偏转板：提供静电场对束流进行注入和引出。所有 200 多台磁铁按束流物理要求分布在整个区域内，所有磁铁考虑采用水冷或者自然冷却方式。

（2）BRing 电源系统

BRing 电源系统主要由二极铁电源、四极铁电源、六极铁电源、校正电源、注入引出电源（BUMP 电源、Kicker 电源、高压电源）等组成。二极铁电源、四极铁电源、六极铁电源、校正电源磁铁数量及可串并联。

本次增强器 BRing 电源（主要为二极铁电源、四极铁电源、六极铁电源、校正电源）拓扑拟采用模块化设计思路，设计基本的功率单元，再通过基本功率单元的串/并联来达到电源输出要求。

（3）BRing 真空系统

BRing 真空系统主要为该同步环加速器提供满足束流寿命的真空环境，为 $1 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 的超高真空，采用 0.3mm 薄壁二极铁真空室。

（4）BRing 高频系统

高频系统采用三次谐波对重离子束流进行加速，其电压扫频范围为 0.3MHz-1.78MHz，高频电压需 240kV。为兼顾所有粒子的工作频率，高频腔体设计工作频率范围为 0.3MHz~2.1MHz，高频电压按照最高峰值电压 240kV 来设计。

（5）BRing 束流诊断系统

BRing 束流诊断系统主要有荧光靶测量系统、法拉第筒测量系统、流强测量系统、剖面测量系统、位置测量系统、肖特基测量系统、工作点测量系统、慢引出激励系统及慢引出反馈系统组成。每种探测器由机械结构、电子学、运动驱动、数据采集等部分组成。

（6）BRing 束流准直系统

束流准直系统的功能是控制束流损失，降低材料的出气率，减少束流损失对于真空系统的影响，维持长时间的束流寿命。

(7) BRing 束流反馈系统

对强流加速器而言，束流不稳定性是限制流强无法提高的重要因素之一，对 HIAF/BRing，尾场及耦合壁阻抗是引起束流不稳定性、限制束流流强累积的最重要因素，需要束流反馈系统来抑制束流不稳定性。

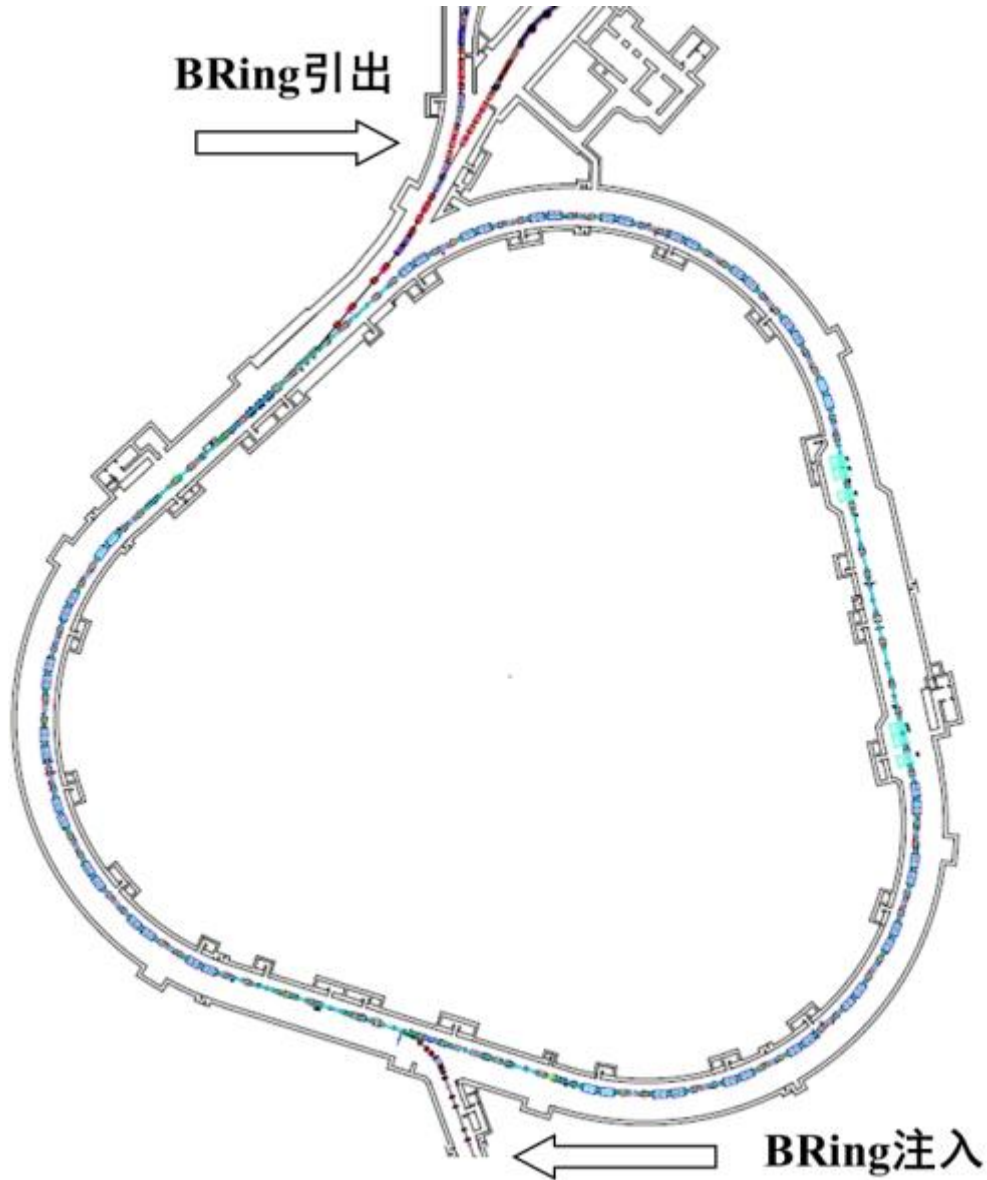


图 4-16 增强器 BRing 总体布局图

表 4-29 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): 0.19(p)

	运行周期(s): 1~13 (正常模式 1s, 慢引出模式最长 13s)
Lattice	超周期: 3
	工作点: $Q_x/Q_y=9.47/9.43$ (正常模式)
	$Q_x/Q_y=9.353/9.43$ (慢引出模式)
	接受度: $A_h/A_v(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$: 200/100($\Delta P/P=\pm 0.5\%$)
注入束流参数	离子种类: $p \sim {}^{238}\text{U}$
	能量(MeV/u): 48(p), 17(${}^{238}\text{U}$)
	注入流强(emA): 2.0(p), 1.0(${}^{238}\text{U}$)
	归一化 rms 发射度($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$): ≤ 0.2
	动量分散($\Delta p/p$): $\leq \pm 2 \times 10^{-3}$
引出束流参数	离子种类: $p \sim {}^{238}\text{U}$
	最高能量(GeV/u): 9.3(p), 0.85(${}^{238}\text{U}$)
	离子数(ppp): 6.0×10^{12} (p), 1.0×10^{11} (U)
磁铁	二极磁铁(台): 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(台): 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): 0.3~1.05 (p), 0.3-1.78(${}^{238}\text{U}$)
	谐波数: $h=1, 2$ (p), $h=1, 2, 4$ (${}^{238}\text{U}$)
	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; 四极铁)(陶瓷内衬烘烤)

4.2.2.1.4 束线系统

BRing 注入束流传输线长约 302m，将直线加速器 iLinac 引出的离子输送到增强器 BRing 中，二极磁铁偏转半径为 6m。BRing 注入束流传输线采用特殊的光学设计，将束流坐标系旋转 45 度，束流倾斜注入到 BRing 同步加速器，满足 BRing 双向涂抹注入的要求。表 4-30 给出 BRing 注入束流传输线的束流参数。

表 4-30 BRing 注入束流传输线的束流参数

离子最大能量	48MeV/u (H_2^+) ; 17MeV/u ($^{238}U^{35+}$)
入口 Twiss 参数	$\beta_x = 4.280m$; $\alpha_x = -0.342$; $D_x = 0m$; $D_x' = 0$; $\beta_y = 4.327m$; $\alpha_y = -0.334$; $D_y = 0m$; $D_y' = 0$
出口 Twiss 参数	$\beta_x = 86.320m$; $\alpha_x = 8.690$; $D_x = 0.391m$; $D_x' = -0.457$; $\beta_y = 16.210m$; $\alpha_y = -1.053$; $D_y = 0m$; $D_y' = 0$
束流发射度	$\leq 6.5\pi \cdot mm \cdot mrad$ (全发射度)
动量分散	$< \pm 0.2\%$

BRing 引出束流传输线用于将增强器 BRing 加速后的粒子分别以快引出或慢引出的方式传输到放射性次级束分离器 HFRS 入口轰击初级靶或者进行继续传输、慢引出传输到高能综合终端，分别参与单粒子效应终端、超核终端和低温高密度核物质测量谱仪终端的核物理实验。BRing 快、慢两种引出方式共用同一束流引出通道。

BRing 引出有快慢两种方式，两者的主要差别在于引出周期的不同，即在环内储存的粒子，在快引出模式下其引出周期 $<1s$ ，在慢引出模式下其引出周期最长可达 13s。如果环内储存的粒子数相同，后续位置上的束流损失在慢引出模式下会比快引出模式小一个量级左右。

表 4-31 BRing 引出束流传输线束流参数

离子最大能量	9.3GeV/u (p) ; 835MeV/u ($^{238}U^{35+}$) ;
入口 Twiss 参数 (慢引出)	$\beta_x = 4.884m$; $\alpha_x = 1.406$; $D_x = -0.364$; $D_x' = -0.115$; $\beta_y = 14.6110m$; $\alpha_y = -1.267$; $D_y = 0m$; $D_y' = 0$
入口 Twiss 参数 (快引出)	$\beta_x = 7.467m$; $\alpha_x = 0.610$; $D_x = -0.281$; $D_x' = -0.144$; $\beta_y = 14.924m$; $\alpha_y = -1.329$; $D_y = 0m$; $D_y' = 0$
束流发射度	1pmm·mrad (水平方向) ; 28pmm·mrad (垂直方向)

（慢引出）	
束流发射度 （快引出）	24~56pmm·mrad（水平方向）； 12~28pmm·mrad（垂直方向）
动量分散	<±0.2%（快、慢引出）
出口束斑尺寸 （HFRS 靶点）	x=±1mm; y=±2mm（慢引出） x=±2mm; y=±4mm（快引出）

SRing 注入束流传输线用于连接放射性次级束分离器 HFRS 与高精度环形谱仪 SRing，SRing 注入束流传输线可以将 BRing 加速后引出的主束或者在放射性次级束线 HFRS 上打靶产生的放射性次级束注入到高精度环形谱仪 SRing 中，开展高精度质量测量、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。注入线束流参数如表 4-32。

表 4-32SRing 注入束流传输线束流参数

最大磁刚度	25Tm
入口 Twiss 参数 （慢引出）	$\beta_x = 0.267\text{m}; \alpha_x = 0; D_x = 0\text{m}; D_x' = 0$ $\beta_y = 2.133\text{m}; \alpha_y = 0; D_y = 0\text{m}; D_y' = 0$
入口 Twiss 参数 （快引出）	$\beta_x = 0.267\text{m}; \alpha_x = 0;$ （内靶模式） $\beta_x = 0.133\text{m}; \alpha_x = 0;$ （正常模式 1） $\beta_x = 0.533\text{m}; \alpha_x = 0;$ （正常模式 2） $\beta_x = 0.533\text{m}; \alpha_x = 0;$ （等时性模式） $D_x = 0\text{m}; D_x' = 0;$ $\beta_y = 2.133\text{m}; \alpha_y = 0;$ $D_y = 0\text{m}; D_y' = 0$
出口 Twiss 参数 （内靶模式）	$\beta_x = 11.248\text{m}; \alpha_x = 0.755; D_x = -0.541\text{m}; D_x' = 0.238;$ $\beta_y = 13.801\text{m}; \alpha_y = -2.960; D_y = 0\text{m}; D_y' = 0$
出口 Twiss 参数 （正常模式 1/2）	$\beta_x = 21.996\text{m}; \alpha_x = 2.193; D_x = -0.571\text{m}; D_x' = 0.246;$ $\beta_y = 0.456\text{m}; \alpha_y = 0.646; D_y = 0\text{m}; D_y' = 0$
出口 Twiss 参数 （等时性模式 1）	$\beta_x = 22.727\text{m}; \alpha_x = 2.439; D_x = -0.565\text{m}; D_x' = 0.245;$ $\beta_y = 1.025\text{m}; \alpha_y = -1.088; D_y = 0\text{m}; D_y' = 0$
出口 Twiss 参数 （等时性模式 2）	$\beta_x = 10.985\text{m}; \alpha_x = 0.909; D_x = -0.546\text{m}; D_x' = 0.240;$ $\beta_y = 6.517\text{m}; \alpha_y = -2.645; D_y = 0\text{m}; D_y' = 0$
出口 Twiss 参数 （等时性模式 3）	$\beta_x = 16.577\text{m}; \alpha_x = 1.547; D_x = -0.553\text{m}; D_x' = 0.242;$ $\beta_y = 3.967\text{m}; \alpha_y = -2.071; D_y = 0\text{m}; D_y' = 0$

4.2.2.1.5.2 放射性次级束分离器 HFRS

放射性次级束分离器（简称 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：预分离器和主分离器，结构组成见图 4-18。

HFRS 有两种运行模式：传输线模式和分离器模式。在传输线模式下，HFRS 的主要功能是作为连接 BRing 和 SRing 的传输线来传输主束，用于后端高能密度物理终端开展实验。而在分离器模式下，HFRS 利用 $B\rho - \Delta E - B\rho$ 方法产生、分离以及鉴别目标离子，开展放射性次级束物理实验。该模式下，预分离器采用主束在 PF0 区域轰击初级靶，产生放射性次级束，接着通过三台二极铁对产生的放射性次级束进行初步的筛选和分离，目标次级束会被偏转进入主分离器，而不需要的次级束则被磁铁后方的 Beam dump 收集；之后主分离器对放射性次级束进行进一步的分离和纯化，最终将目标核输送至外靶实验终端或注入 SRing。

HFRS 常用 23 种束流，其中功率最大的束流参数为： ^{238}U ，835MeV/u， $3.0\text{E}+10\text{pps}$ 。

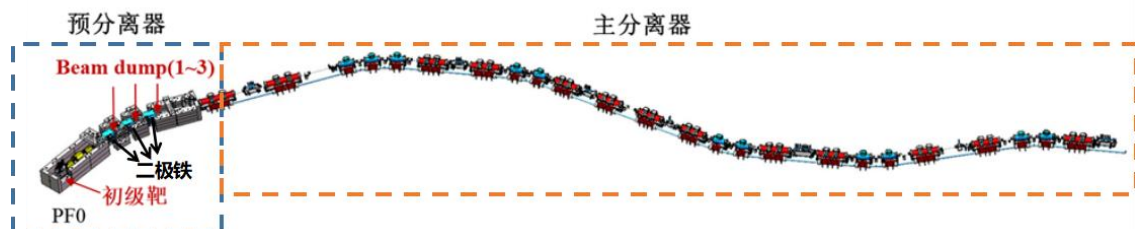


图 4-18 HFRS 总布局图

4.2.2.1.5.3 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 有四种运行模式：等时性模式、正常模式、内靶模式与堆积模式。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，同时能制备高流强高品质的高电荷态稳定重离子束，开展双电子复合实验和激光精细谱学研究。内靶模式下，SRing 能够制备高流强高品质的高电荷态稳定重离子束，开展高精度的原子物理及核物理实验研究。堆积模式下，SRing 能够进行多束团堆积，获取更高流强的稳定重离子束，用于开展高能量密度物理研究。根据磁铁磁刚度设计，SRing 最大接收的束流参数为： ^{12}C ，1.5GeV/u，6.89E+11pps，束流损失详见表 4-33。

SRing 建成后将成为获取高品质放射性次级束与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。

表 4-33SRing 主要参数列表

主参数	周长（m）	277.3
	磁刚度（Tm）	2-15.77
	减速时间（s）	11.6
	运行周期（s）	10-120
光学	超周期数	2
	消色散长直线节总长（m）	56
	电子冷却段长度（m）	16
	靶区短直线节长度（m）	9.4
	二极铁数量	20
	四极铁数量	44（11 组）
磁铁	二极铁场强（T）	0.21-1.66
	二极铁好场区（mm ² ）	320×80
	二极铁气隙（mm）	104
	四极铁场梯度（T/m）	0.37-10.7
	四极铁规格	4 种，参考磁铁系统
	二、四磁铁磁场稳定性	< 3.0×10 ⁻⁴
	六极铁场梯度（T/m ² ）	1-30
真空	真空度（mbar）	< 1.0×10 ⁻¹¹
	二极铁真空室	壁厚 6mm，需要烘烤
	四极铁真空室	参考真空系统，需要烘烤

电源	跟踪精度	$< \pm 1.0 \times 10^{-4} / 8h$
	稳定度	二、四极铁 $< \pm 1.0 \times 10^{-4}$ 六极铁 $< \pm 3.0 \times 10^{-4}$ 校正铁 $< \pm 3.0 \times 10^{-4}$

SRing 总体布局如下所示，采用两个超周期的双对称跑道型结构，周长 277.3m，由两个长 56m 的直线节和两个弧区构成。两个长的直线节用于放置注引元件、电子冷却装置、随机冷却装置与高频腔等元器件，两个长的弧区提供大的色散函数并用于色品校正与等时性高阶项校正。

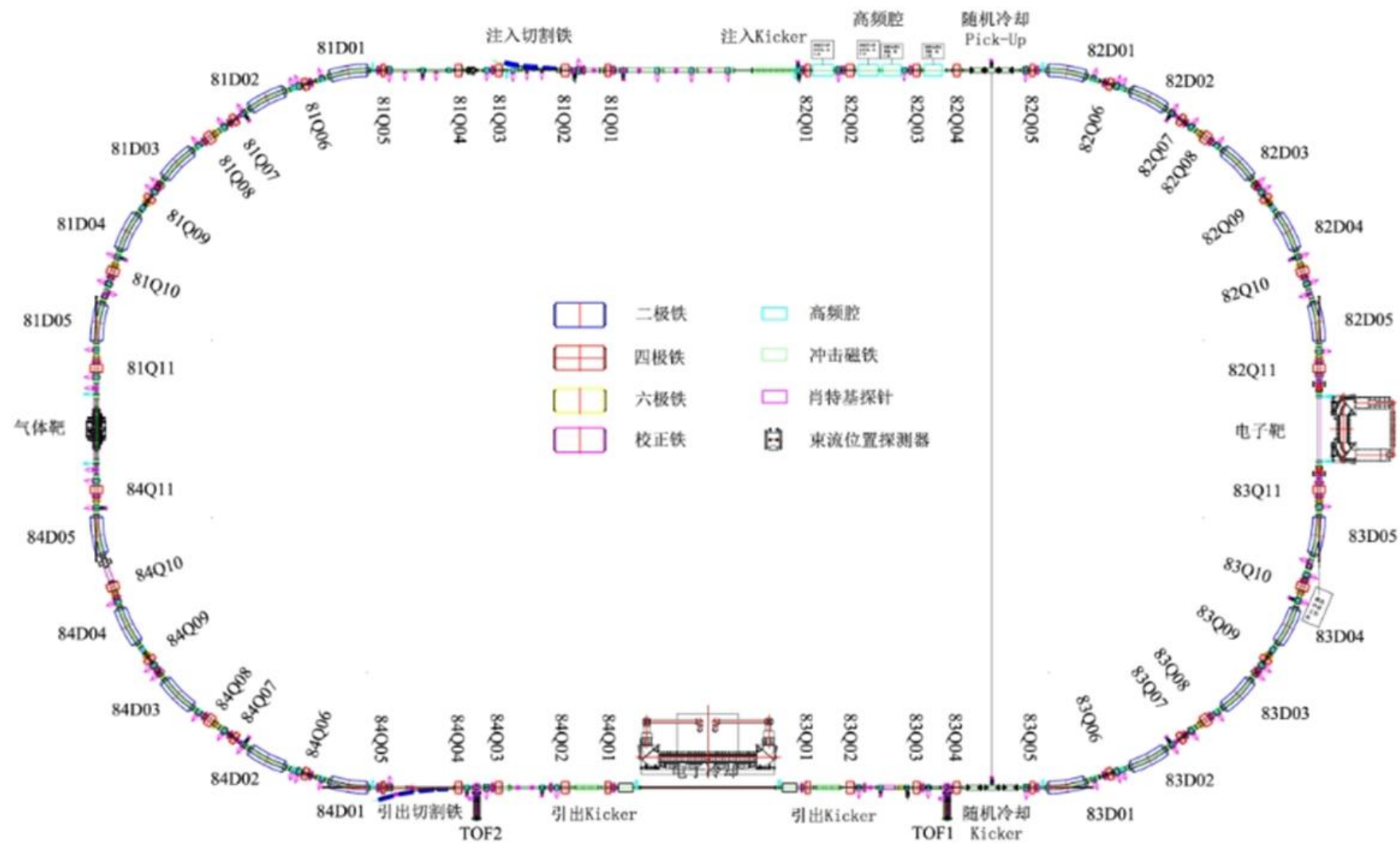


图 4-19SRing 总体布局图

4.4.3 工艺流程

HIAF 装置年出束时长为 7392h，各区域年运行时长见表 4-34，主要工艺流程分为实验工作流程和维修维护工作流程。

表 4-34HIAF 各区域运行时长

区域	年运行时长（月）
iLinac	11
BRing	8
SRing	4
低能综合终端	6
HFRS 预分离器	5（分离器模式：3，传输线模式：2）
HFRS 主分离器	5（分离器模式：3，传输线模式：2）
综合本表，保守考虑 HIAF 年总出束时长等同于 iLinac 的出束时长，以每月 4 周，每周工作 7 天，每天 24h 的模式进行估算，年总出束时长为 7392h。	

4.4.3.1 实验工作流程

HIAF 主要用于各种科学实验，其典型的实验工作流程见图 4-20。

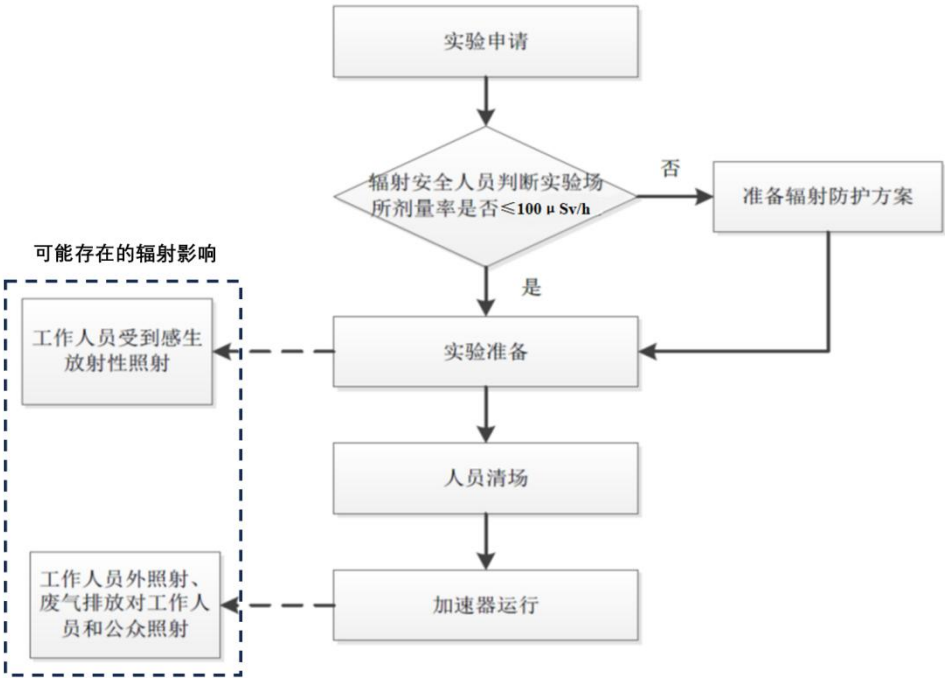


图 4-20 典型实验工作流程

依据实验流程，实验申请后将根据实验终端大厅内的残余剂量率是否小于

等于 $100\mu\text{Sv/h}$ ，若大于则需要准备辐射防护方案，然后进行实验准备，完成清场后开始实验。出束过程中人员不可进入实验终端大厅，实验结束后，拆除靶件、靶件运输等工作将由多人操作、控制距离、设置屏蔽措施并短时间内完成，以降低人员受照剂量，拆除不用的靶件将转运至放射性废物暂存至放射性废物暂存间，待一定量后送至城市废物库。

对于外来实验人员采取以下方式进行辐射安全管理：

- (1) 外来实验人员需提前登记；
- (2) 近代物理所对外来实验人员进行实验操作以及辐射防护方面的培训及考核；
- (3) 培训及考核成绩合格后为所有外来实验人员配备热释光个人剂量计，用来监测其实验期间的累积剂量，确保其符合剂量约束值的要求；
- (4) 实验准备及实验期间进入终端需严格执行近代物理所制定的实验流程及相关规章制度，保障实验有序安全的进行；
- (5) 实验期间的终端内实验操作需近代物理所工作人员全程陪同指导。

4.4.3.2 维修维护工作流程

维修维护期间的典型工作流程见图 4-21。

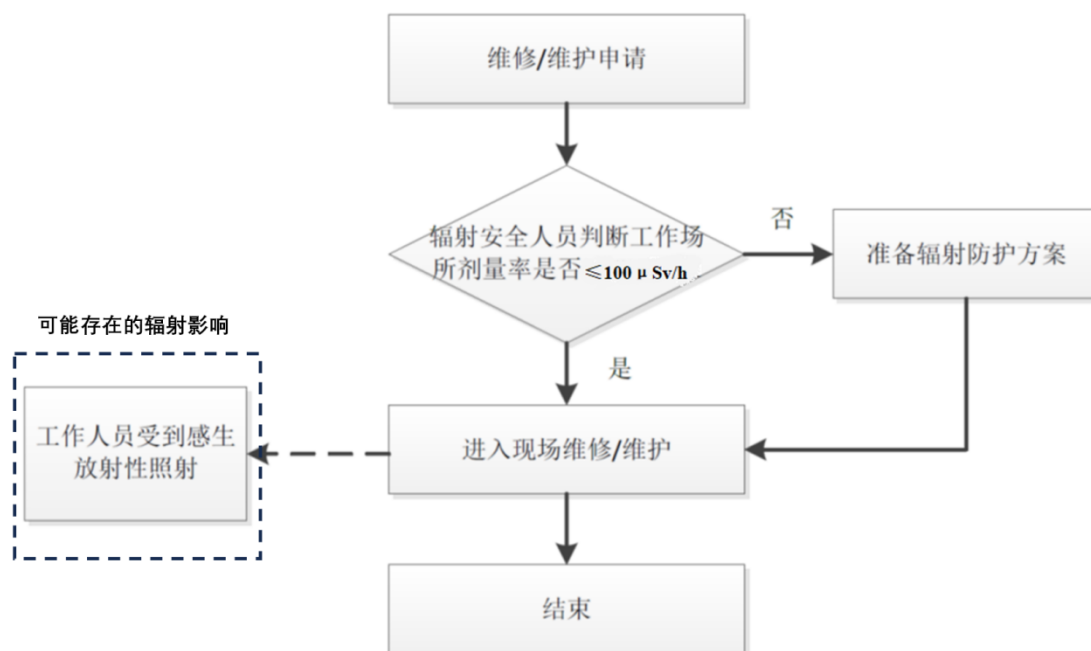


图 4-21 维修维护典型工作流程

4.4.3.3 科学实验阶段工作人员配备情况

表 4-35 科学试验阶段工作人员配置、工作内容及工作时间汇总

工作人员类别		岗位职责	主要工作内容	工作位置	人员配置（个）	工作负荷
实验工作团队	加速器运行组	负责整个装置的运行	运行加速器	中央控制室	30	每班 8h，每天 3 班倒
	实验研究	负责终端实验探测器及数据获取等工作	实验操作	日常在监督区，靶件操作及维修维护时进入控制区	40	每班 8h，每天 3 班倒、维修时间不固定
运维团队	物理组	负责束流动力学设计及机器研究	巡视、检修相关设备	日常在监督区待命，出现设备故障时会进入控制区巡视检修	16	常白班 8h
	离子源组	负责离子源的调试及运行维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	直线组	负责直线设备的运行及维护			20	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	磁铁组	负责磁铁及注引元件的运行及维护			20	常白班 8h，维修时间不固定
	电源组	负责电源设备的运行及维护			20	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定

	真空组	负责真空设备的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	束诊组	负责束诊设备的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	高频组	负责高频设备的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	控制组	负责控制及网络设备的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	束流反馈及机器保护组	负责束损探测器的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	冷却水组	负责装置冷却水系统设备的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	通风空调组	负责装置通风空调系统设备的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定
	电气及电磁兼容组	负责装置电气系统及电气兼容系统设备的运行及			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定

		维护				
	低温组	负责装置低温系统设备的运行及维护			16	每班 8h，每天 3 班倒，维修时间不固定

4.5 项目变动情况

本项目实际建设内容及环评批复一致。

5 辐射安全与防护设施/措施

5.1 辐射工作场所分区

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

HIAF 的地下隧道全部为控制区，其中各设备楼的电梯通道包括为控制区，隧道上方地上配套建筑的一层为监督区，辐射工作场所分区见图 5-1~图 5-7，具体如下：

（1）控制区：离子源区域、强流超导直线加速器区域、低能综合终端、BRing、HFRS 预分离器及其活化部件暂存间、HFRS 主分离器、SRing、1、2 号测试大厅及 1 号综合站房通往隧道的楼梯通道、电梯和门厅（红色区域）；

（2）监督区：加速器及实验终端所对应的地上配套建筑一层（黄色区域）；离子源本地控制室（位于离子源大厅二楼）及出入口位于地下的控制区门口；高能综合终端、外靶实验终端、高能量密度物理实验终端。

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

监督区管理要求：监督区入口处设置标识表明监督区。

HIAF 装置中央控制室位于运行楼，为非辐射区。

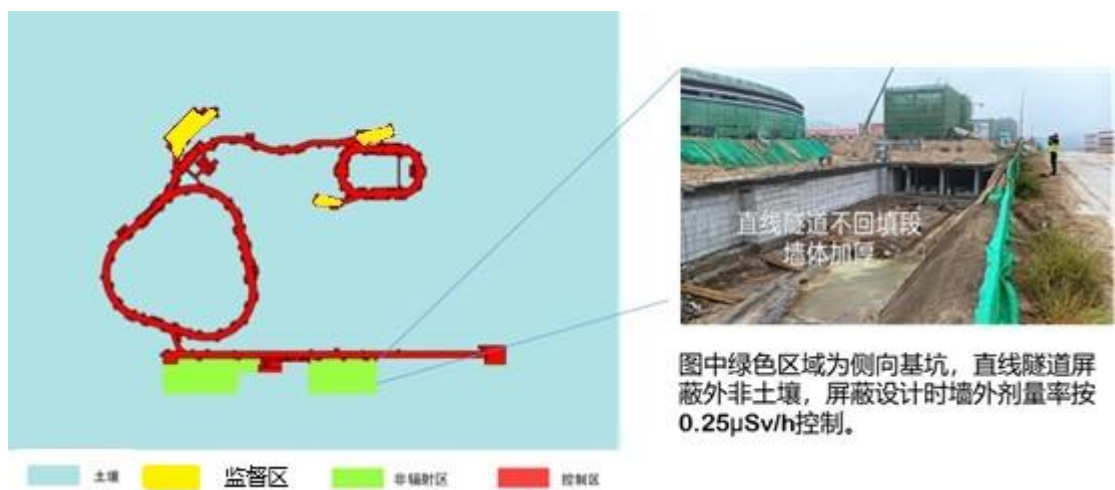


图 5-1HIAF 装置地下隧道

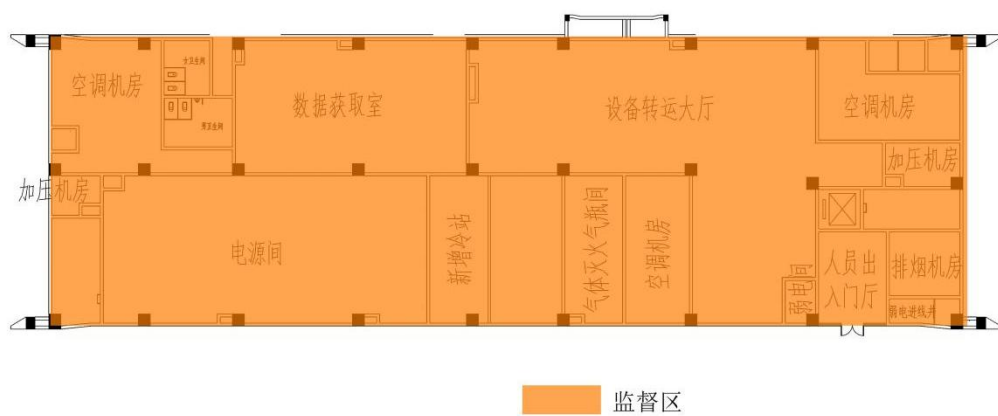


图 5-2 地上直线设备楼 1（iLinac 上方）一层

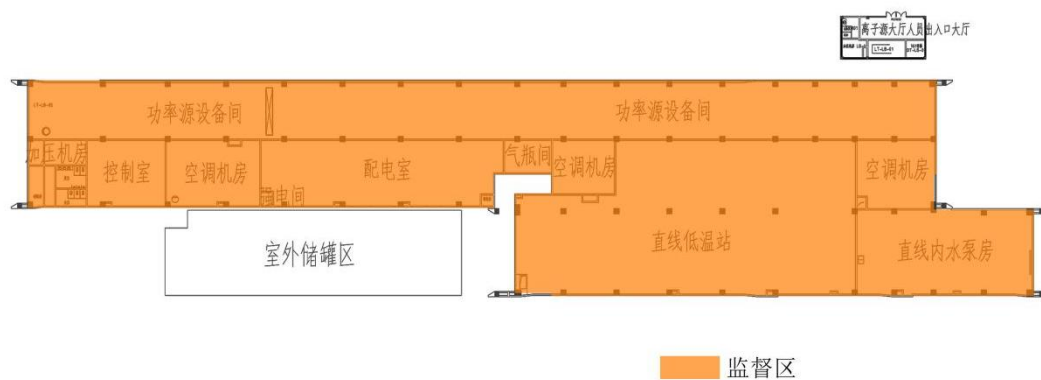


图 5-3 地上直线设备楼 2 (iLinac 上方) 一层

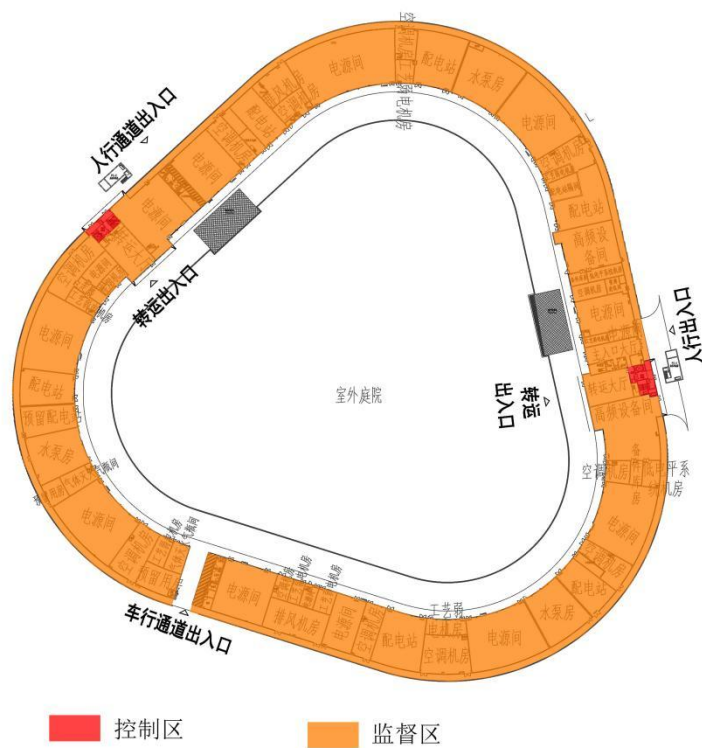


图 5-4 地上 1 号测试大厅 (B Ring 上方)

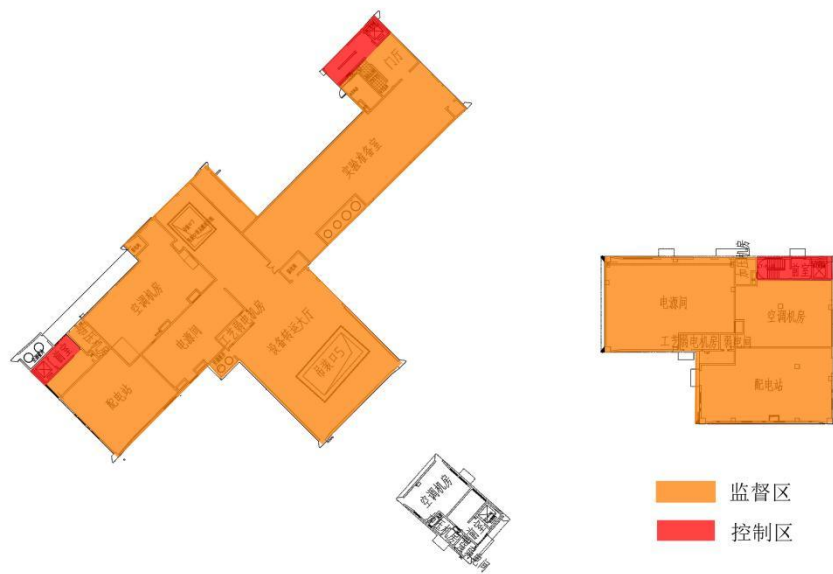


图 5-5 地上 1 号综合站房（高能综合终端上方）一层

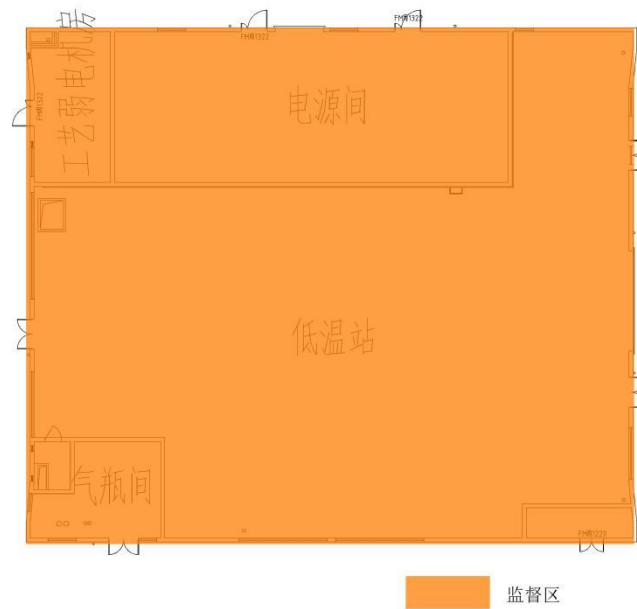


图 5-6 地上 2 号综合站房（HFRS 主分离器上方）一层



图 5-8 控制区标识现场照片



图 5-9 监督区标识现场照片

5.2 辐射屏蔽

HIAF 加速器采用全地下建设模式，隧道上方覆盖回填土石。根据束流能量和束流损失强度，在加速器不同的区域采用不同的屏蔽厚度和屏蔽方法进行屏蔽。在满足设备正常运行的情况下，屏蔽设计符合防护与安全最优化原则，符合标准要求。本项目主体屏蔽材料为普通混凝土（ 2.3g/cm^3 ），回填土石（ 1.8g/cm^3 ）。

5.2.1 离子源大厅

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。

离子源大厅剖面图见图 5-10，左侧（北）、右侧（南）、顶和底依次为 0.8m 、 0.8m 、 0.4m 和 1.0m 厚的混凝土屏蔽墙。大厅东墙为 0.8m 厚的混凝土屏蔽墙。二楼控制室墙体为 0.2m 混凝土，墙上设有观察窗，铅当量为 2mm 。

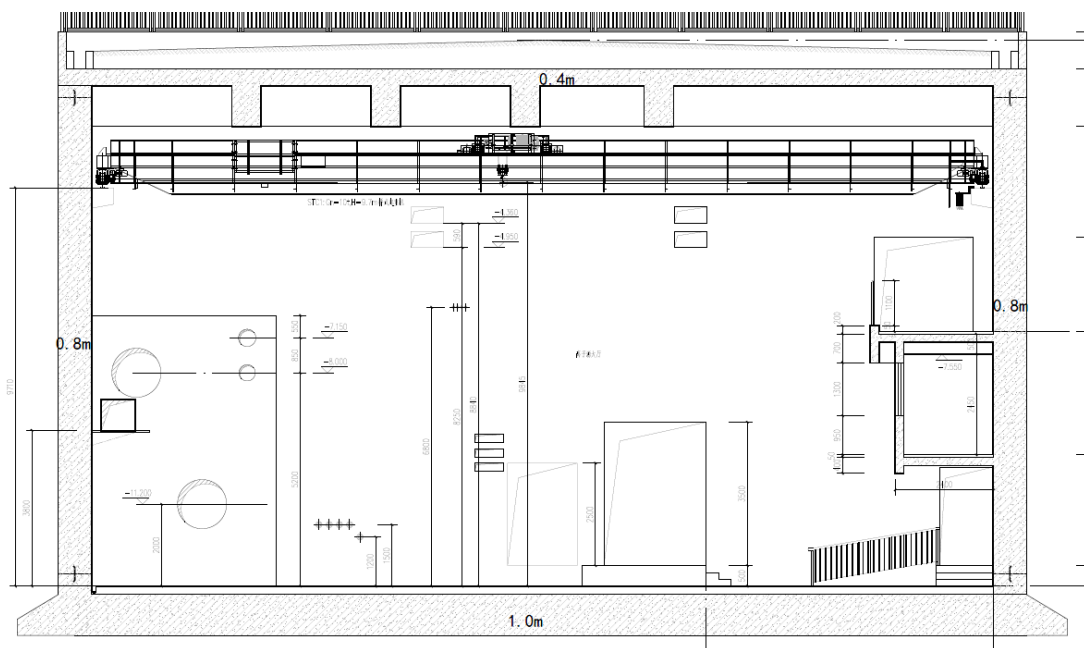


图 5-10 离子源大厅剖面图

5.2.2 超导直线加速器区

直线加速器段隧道分为两个部分，第一段为设备夹层段，第二段为回填土

段。设备夹层段加速器隧道含设备夹层，地面为直线设备楼，隧道剖面见图 5-12~图 5-13，隧道左侧（北）、右侧（南）、顶和底依次为 0.8 m、1.8 m、1.5 m 和 0.9 m 厚的混凝土屏蔽墙。回填段，隧道剖面见图 5-12、图 5-13，隧道左侧（北）、右侧（南）、顶和底依次为 0.8 m、1.8 m、1.5 m 和 0.9 m 厚的混凝土屏蔽墙。顶上方另有 4.7 m 厚度的回填土石。

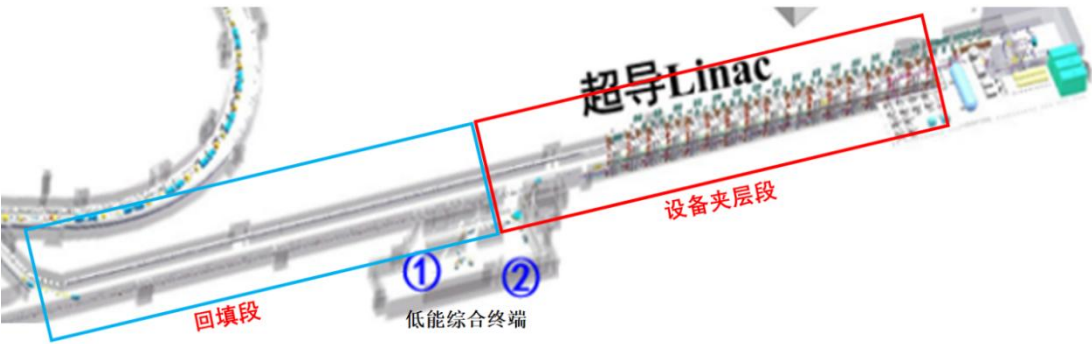


图 5-11 直线加速器段隧道设备夹层和回填土段分布

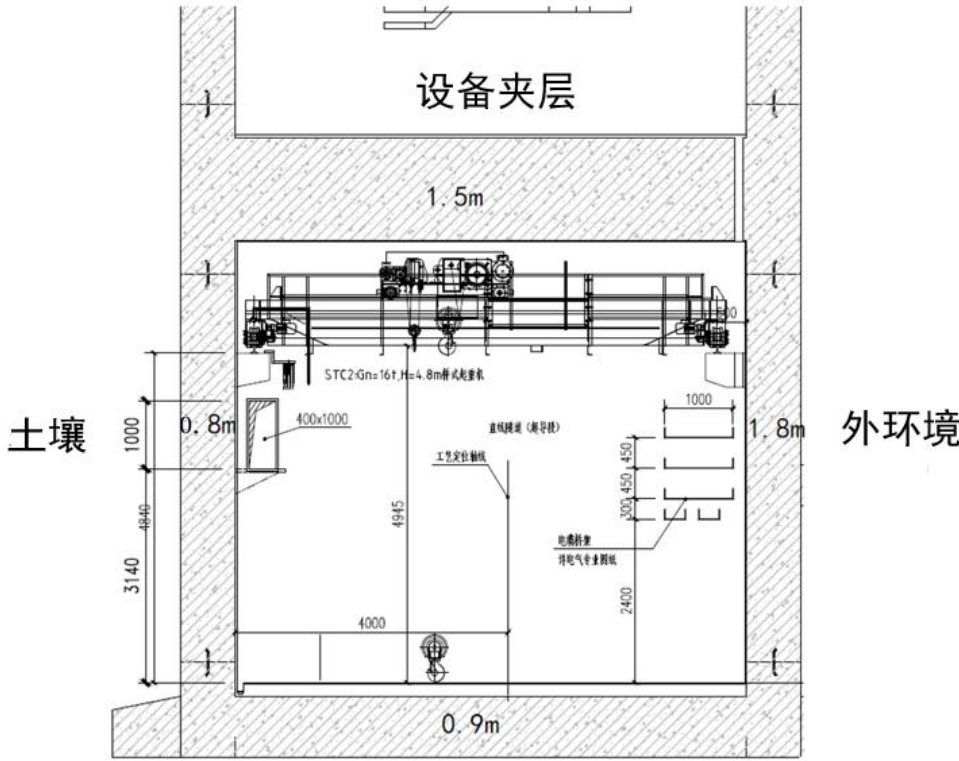


图 5-12 直线加速器段隧道第一段剖面图

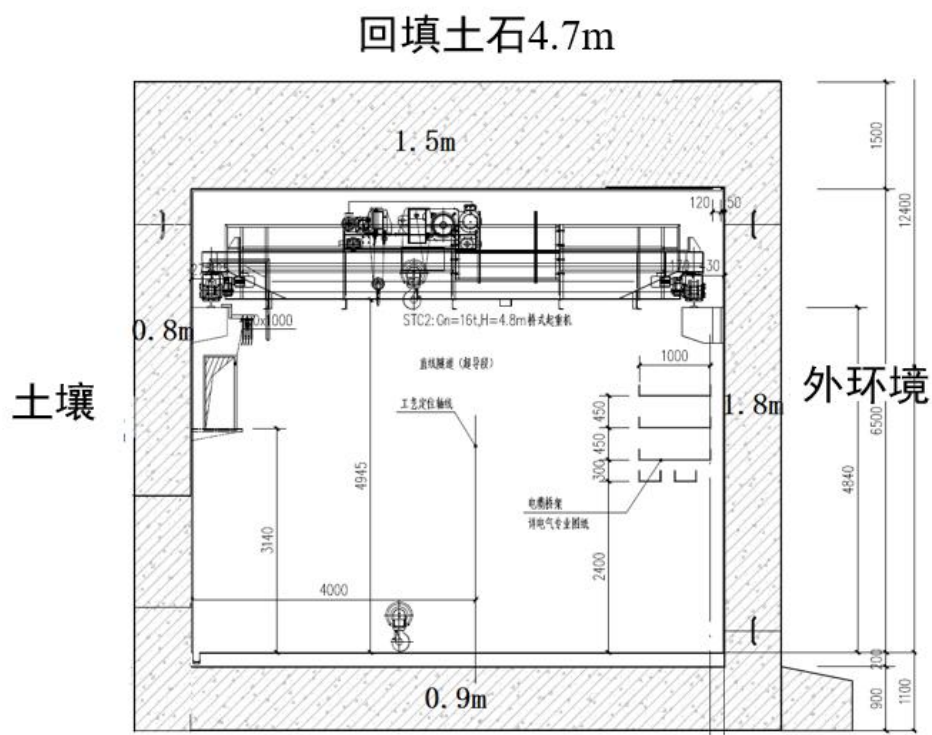
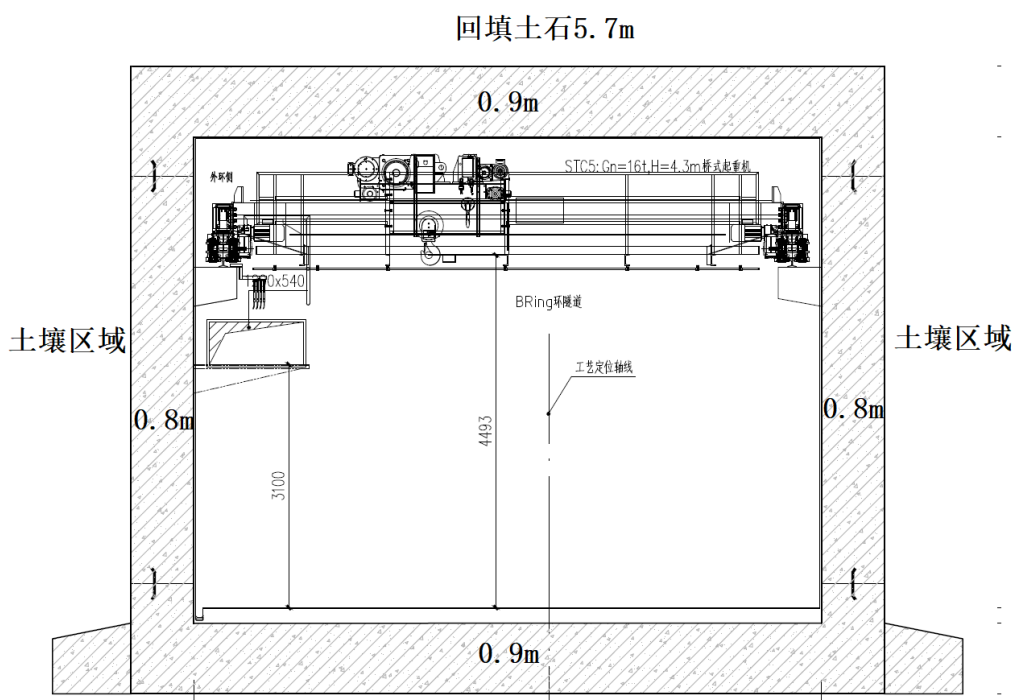
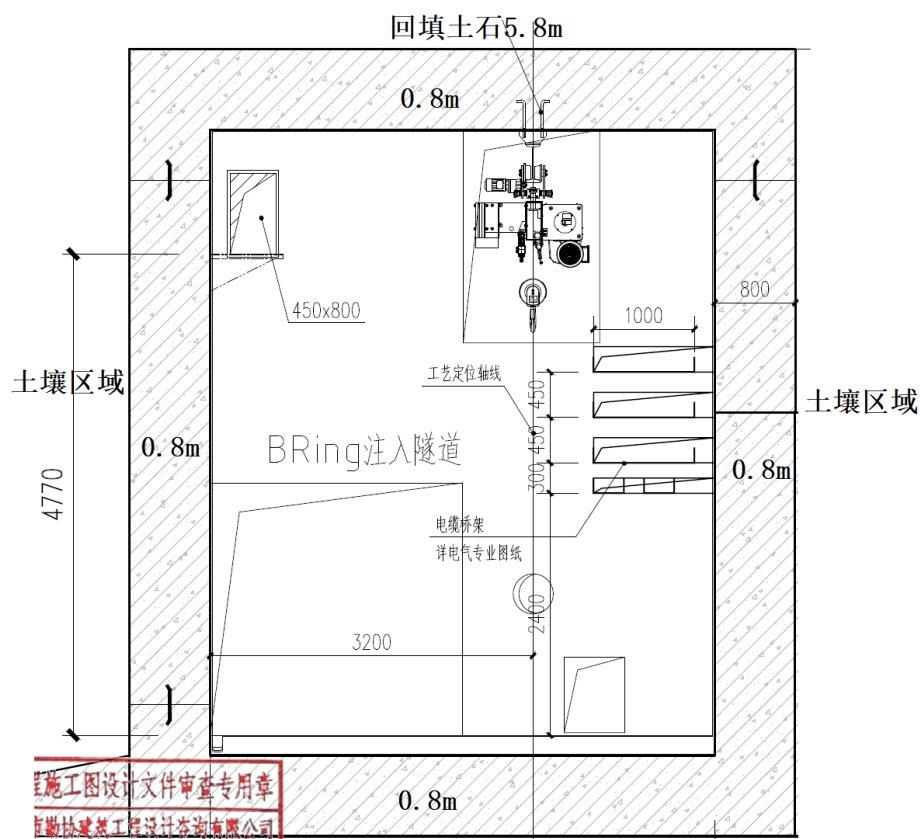


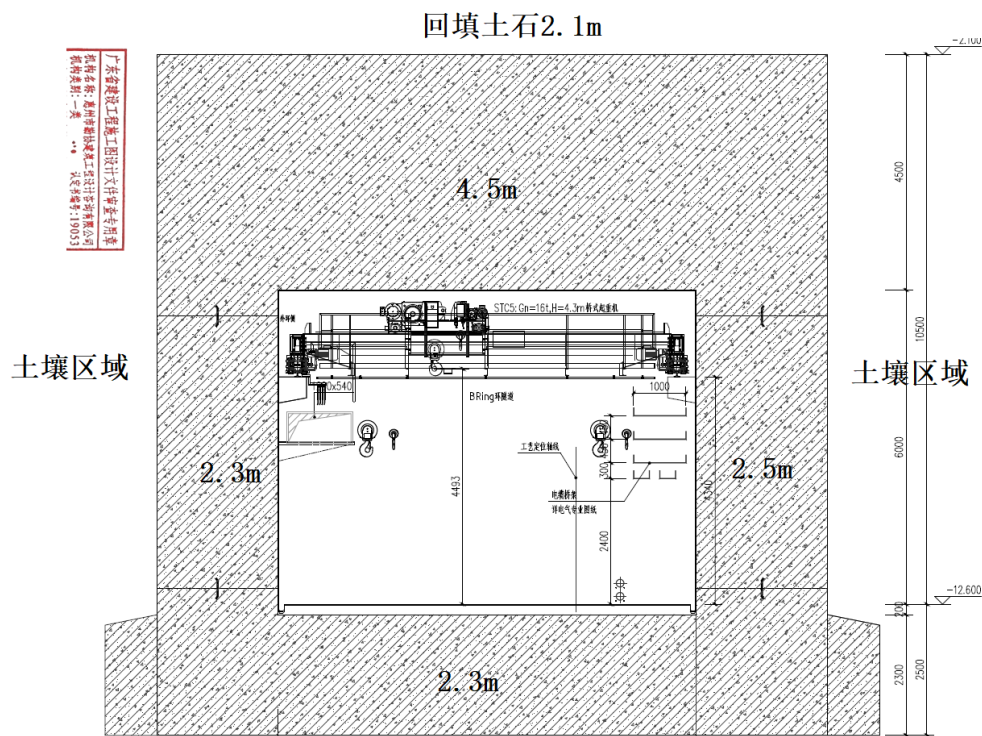
图 5-13 直线加速器段隧道第二段剖面图

5.2.3 Bring 隧道

根据损失 C 束能量和流强不同，BRing 隧道屏蔽设计分为 3 个部分，分别是注入段隧道、加速段隧道、引出段隧道。注入段隧道截面见图 5-14 (a)，注入段隧道左侧、右侧、顶和底依次设计为 0.8m、0.8m、0.8m 和 0.8m 厚的混凝土屏蔽墙，顶上方另有 5.8m 回填土石。

加速段隧道截面见图 5-14 (b)，隧道左侧、右侧、顶和底依次设计为 0.8m、0.8m、0.9m 和 0.9m 厚的混凝土屏蔽墙，顶上方另有 5.7m 回填土石；引出段隧道截面见图 5-14 (c)，隧道左侧、右侧、顶和底依次设计为 2.3m、2.5m、4.5m 和 2.3m 厚的混凝土屏蔽墙，顶上方另有 2.1m 回填土石。





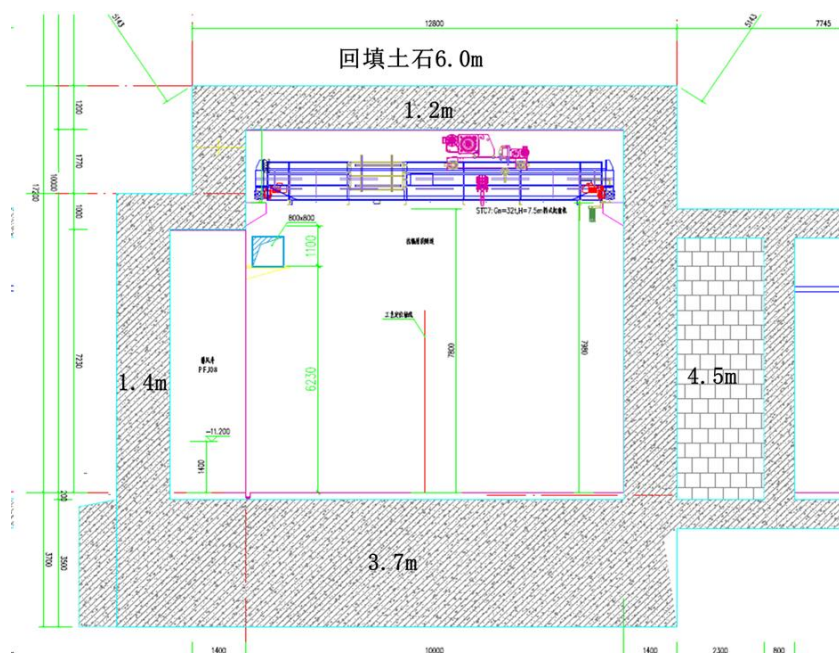
(c) BRing 引出段隧道剖面

图 5-14BRing 引出段隧道剖面屏蔽建造图

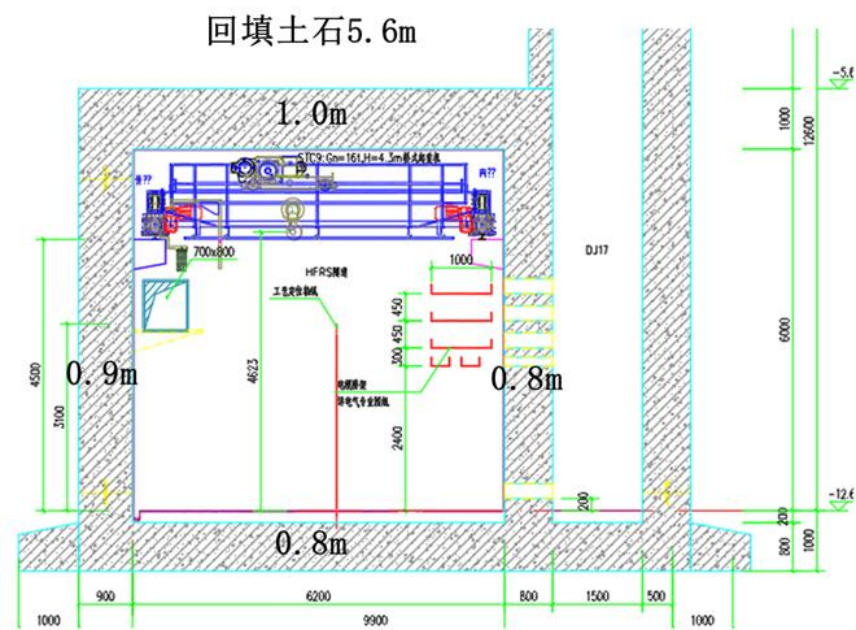
5.2.4 HFRS

根据加速束流参数的不同，HFRS 隧道屏蔽设计分为 3 个部分，分别为预分离器段隧道、主分离器前段隧道、主分离器后段隧道。预分离器段隧道截面见图 5-15 (a)，隧道侧墙、顶板和底板依次设计为 1.4m~4.5m、1.2m 和 3.7m 厚的混凝土屏蔽，顶部在混凝土屏蔽外加覆 6.0 m 厚砂石；

主分离器前段隧道截面见图 5-15 (b)，隧道侧墙、顶板和底板依次设计为 0.8m~0.9m、0.8m~1.0m 和 0.8m 厚的混凝土屏蔽墙；主分离器后段隧道截面见图 5-15 (c)，隧道侧墙、顶和底依次设计均为 0.8m 厚的混凝土屏蔽墙。主分离器段顶部在混凝土屏蔽外加覆 5.6m~5.8 m 厚砂石。

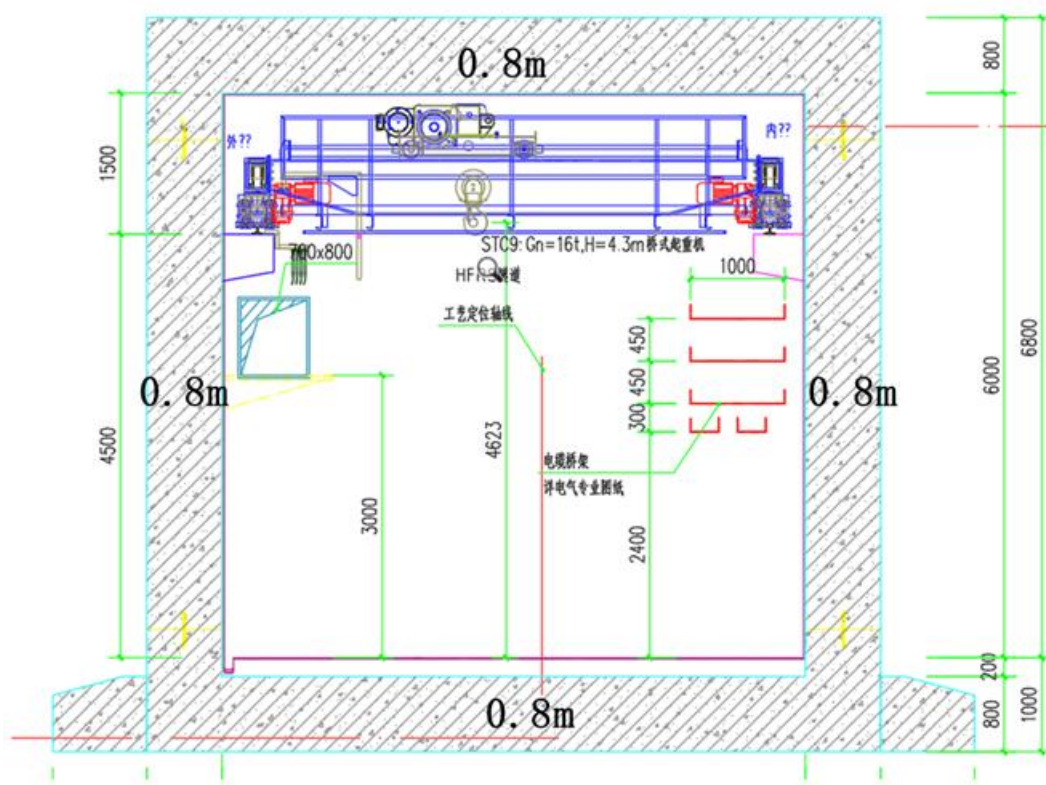


(a) 预分离器段隧道



(b) 主分离器前段隧道

回填土石5.8m

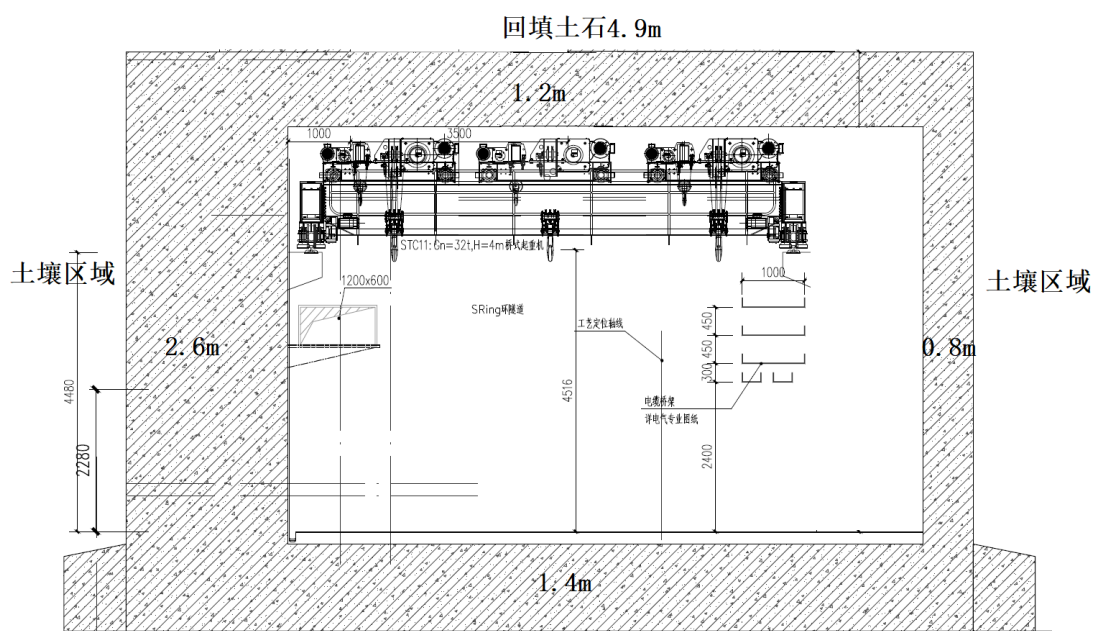


(c) 主分离器后段隧道

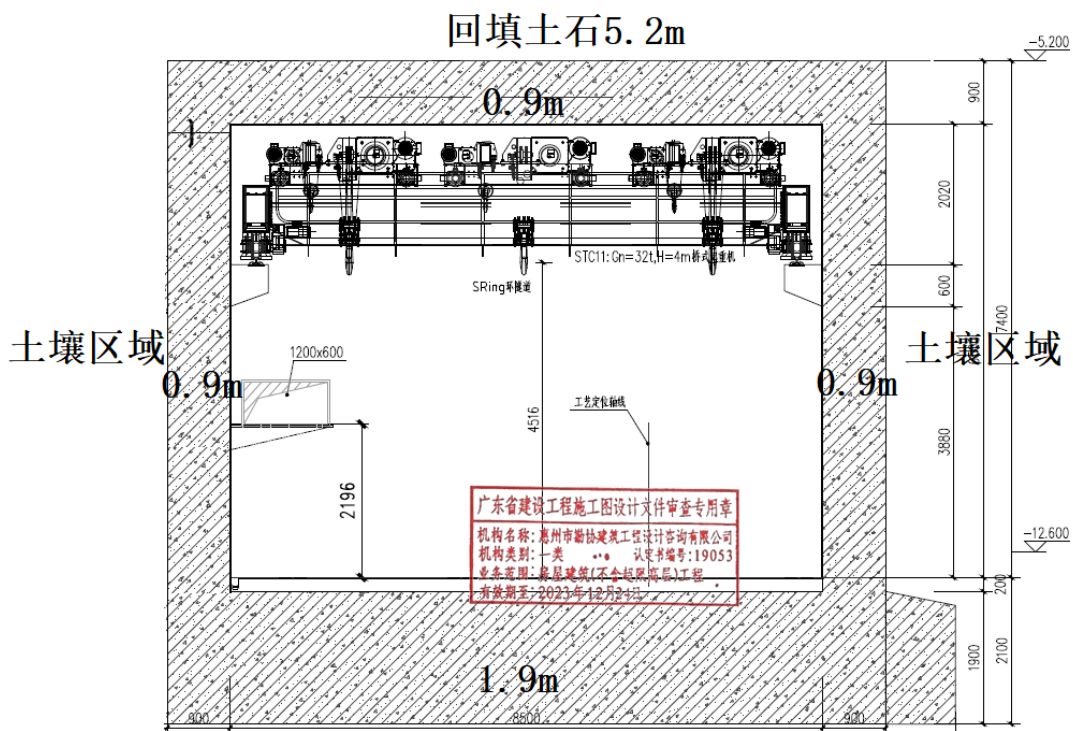
图 5-15 主分离器后段隧道剖面屏蔽建造图

5.2.5 SRing 隧道

根据损失 C 束能量和流强不同，SRing 隧道屏蔽设计分为 2 个部分，分别是注入段隧道、加速段隧道。注入段隧道截面见图 5-16 (a)，隧道侧墙、顶和底依次设计为 0.8m~2.6m、1.2m 和 1.4m 厚的混凝土屏蔽墙，顶上方有 4.9m 回填土石；加速段隧道截面见图 5-16 (b)，隧道侧墙、顶和底依次设计为 0.9m、0.9m 和 0.9m 厚的混凝土屏蔽墙。顶上方有 5.2m 回填土石。



(a) 注入段隧道



(b) 加速段隧道

图 5-16 SRing 加速器隧道剖面屏蔽建造图

5.2.6 低能综合终端

低能综合终端侧墙厚 0.8m~1.6m、顶墙厚 1.2m、底板厚 0.9-1.6m，顶上方有

5m 回填土石。平面图及剖面图见图 5-17~图 5-18。

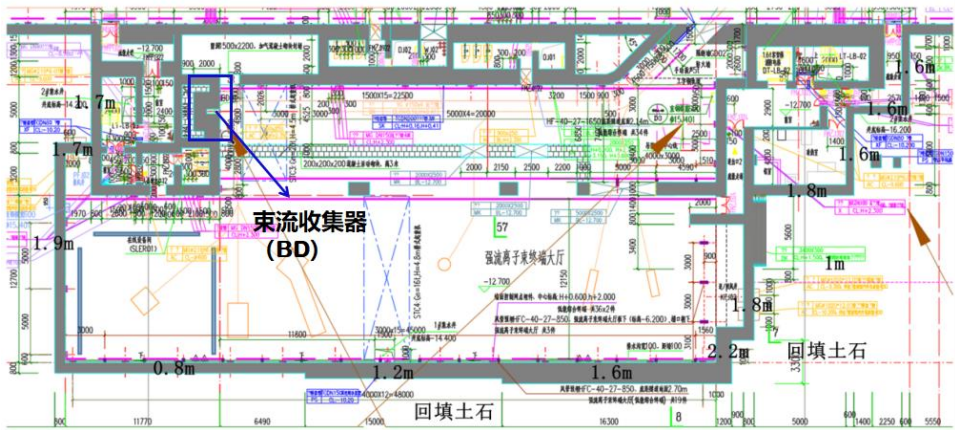


图 5-17 低能综合端平面屏蔽建造图

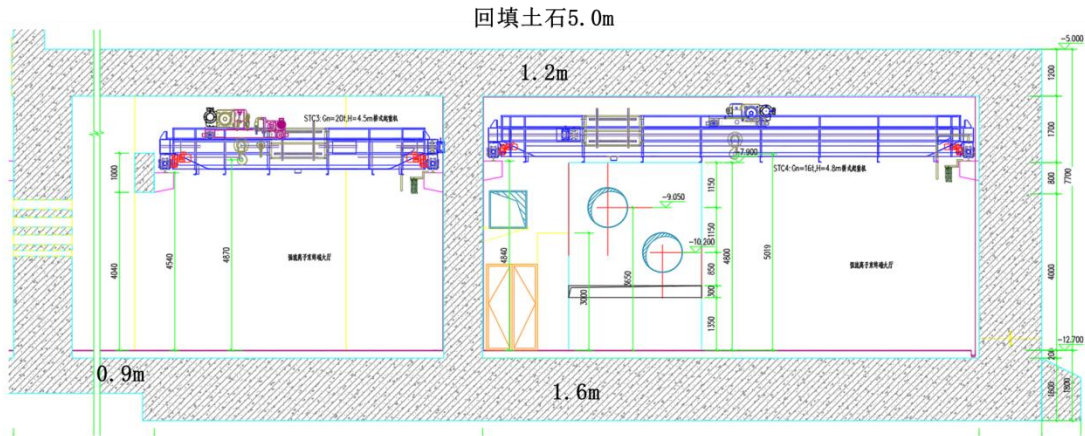


图 5-18 低能综合端剖面屏蔽建造图

低能综合终端设计有一个石墨（50cm 厚）束流收集器（BD），其位于用作局部屏蔽的混凝土墙中，前方留有直径 35cm、长 50cm 的空气孔洞。BD 位置见图 5-17，结构见图 5-19。

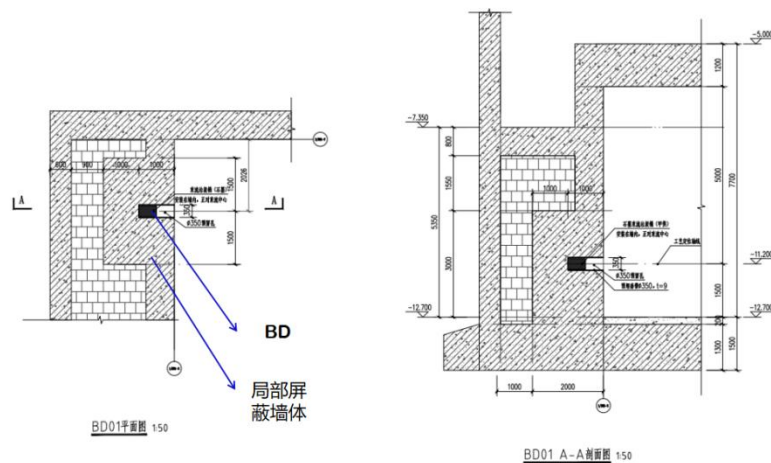


图 5-19 低能综合终端 BD 及局部屏蔽混凝土墙体结构建造图

5.2.7 管道屏蔽

各类管线采用管道竖井的方式，从隧道外侧以 L 型进入加速器隧道，穿墙部分采取防护堵料填充。各类管道竖井都建造在束流损失相对较小的位置。

5.2.7.1 电缆管道

HIAF 装置加速器隧道位于地下，电源间建设在隧道上方，电缆管道竖井建造情况如图 5-20 所示，本装置 BRing 三个弧段共 24 处，每个弧段均匀分布 8 个，直线加速器段 6 个，SRing 处 10 个，加速器隧道内电缆采用桥架铺设，与设备相连，桥架位于距离加速器地面 2.5m 的隧道内墙面，采用型钢架固定。控制类线采用吊架铺设，位于隧道顶面。

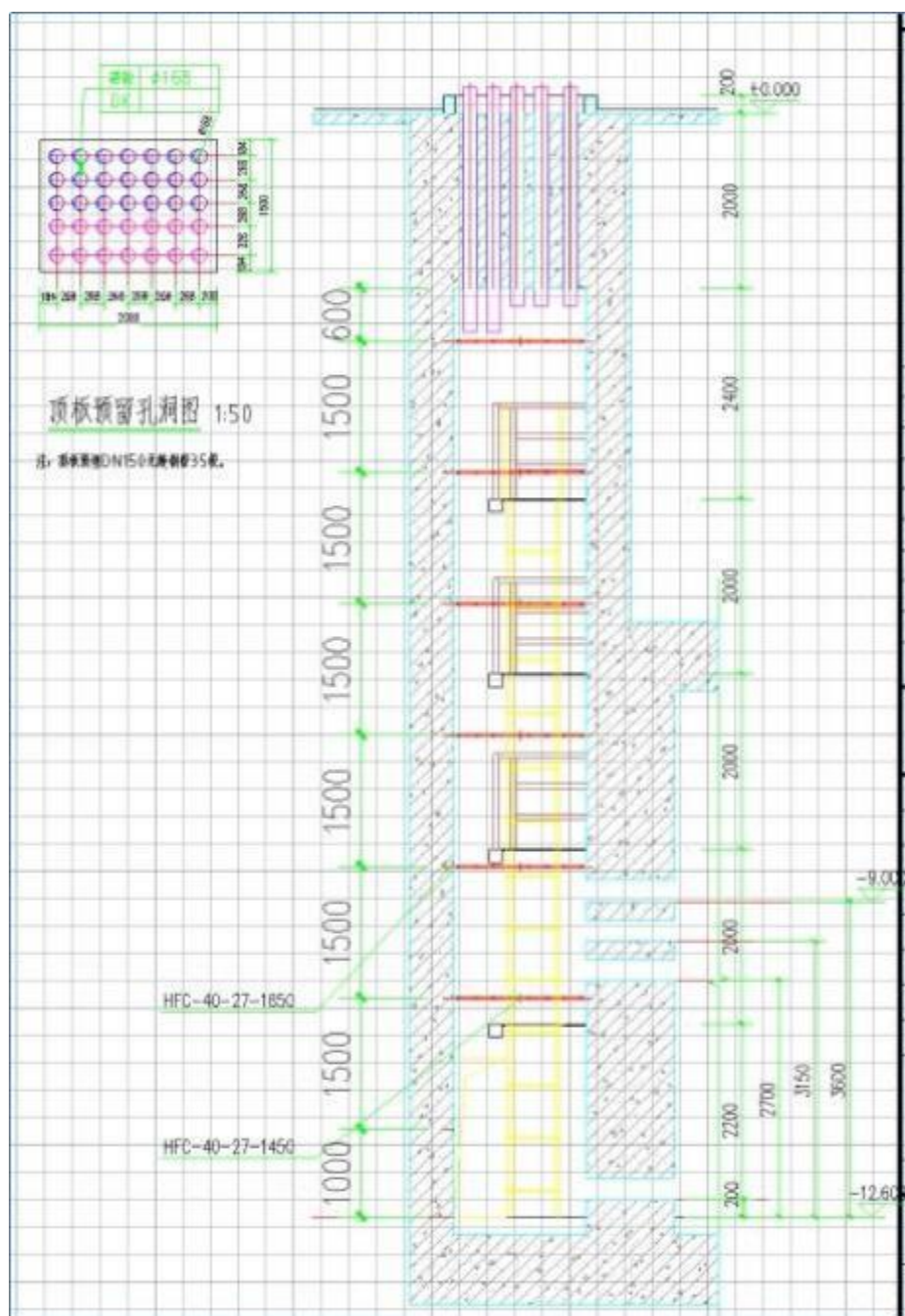


图 5-20 电缆管道竖井剖面建造图

5.2.7.2 给排水/冷却水管道

冷却水站位于加速器隧道上方建筑一层，水管管道竖井建造情况如图 5-21 所示。给排水和加速器冷却水管共用一个管道竖井。加速器隧道内冷却水管沿着加速器束线布置。

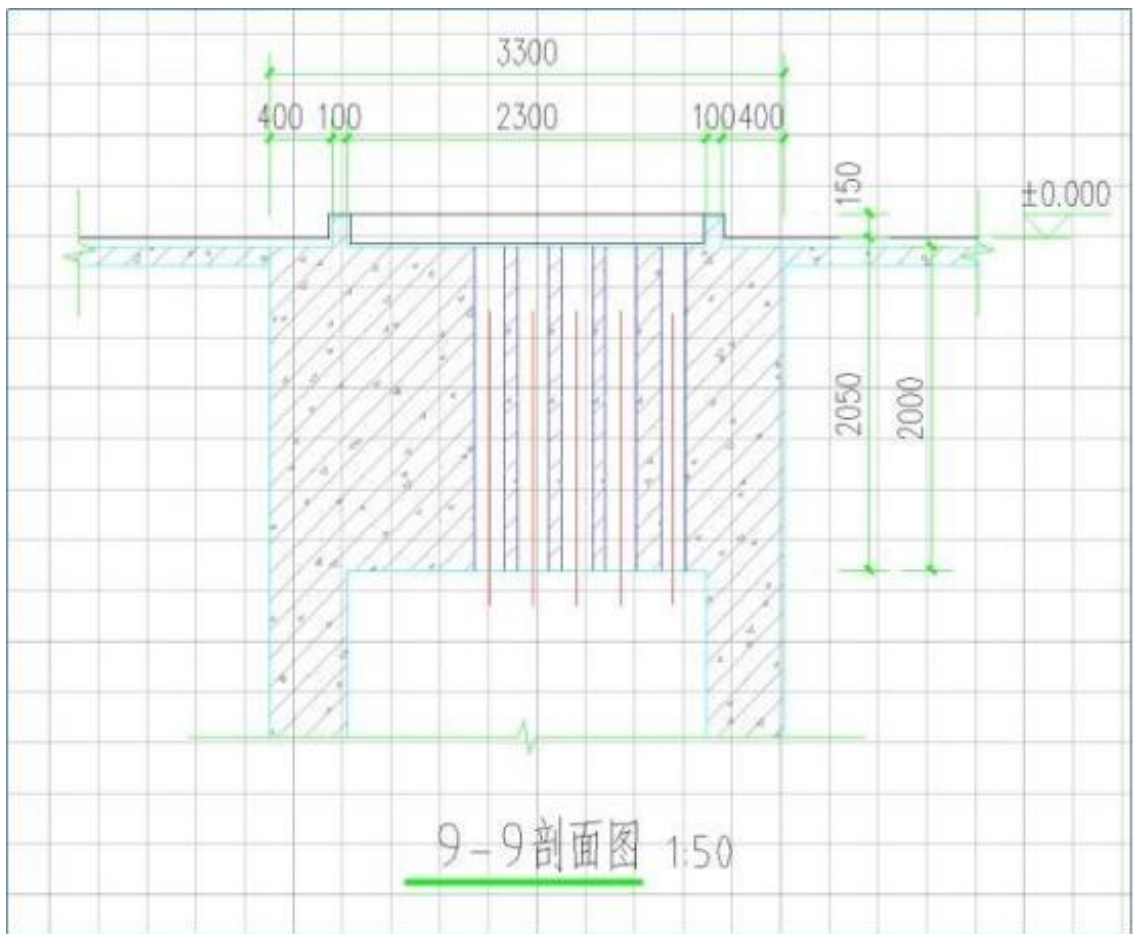


图 5-21 给排水/冷却水管道建造剖面图

5.2.7.3 低温管道

低温站位于SRing上方地面综合站房，HFRS段及直线加速器段各设有一处。

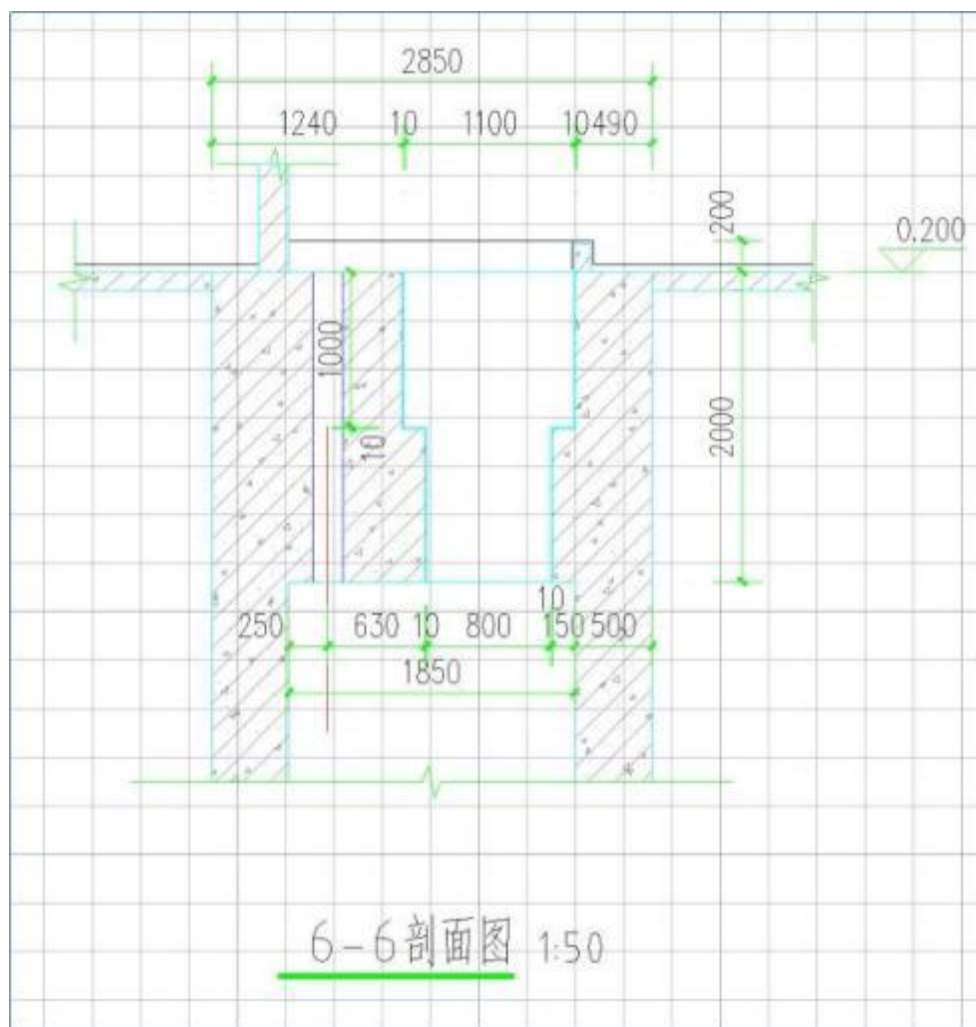


图 5-22 低温管道竖井剖面建造图

5.2.7.4 空调通风管道

空调机房位于隧道上方配套建筑一层。空调管道由地下穿出以“L”型、“Z”型预埋至地面后接入地上空调机房。



图 5-23 空调管道剖面建造图

5.2.8 出入口迷道

为减少隧道出入口的通道中散射射线的影响，所有出入口均采用迷道设计，除低能段（离子源、iLinac 及低能综合终端）的通道门安装在隧道入口处，其余辐射控制区通道门均安装在地上电梯门厅处。迷道设计目标是控制区入口处剂量率不超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

本项目控制区出入口防护门均设计为普通防护门，对于控制区出入口位于地下且辐射较大的直线高能段隧道、HFPS 预分离器隧道，为保证控制区出入口防护门外的剂量率小于控制水平，在其控制区内迷宫与隧道交界处设置碳钢屏蔽防护门，其编号为 S25、S26、S62，其中防护门 S25、S26 的厚度为 20cm，防护门 S26 的厚度为 30cm

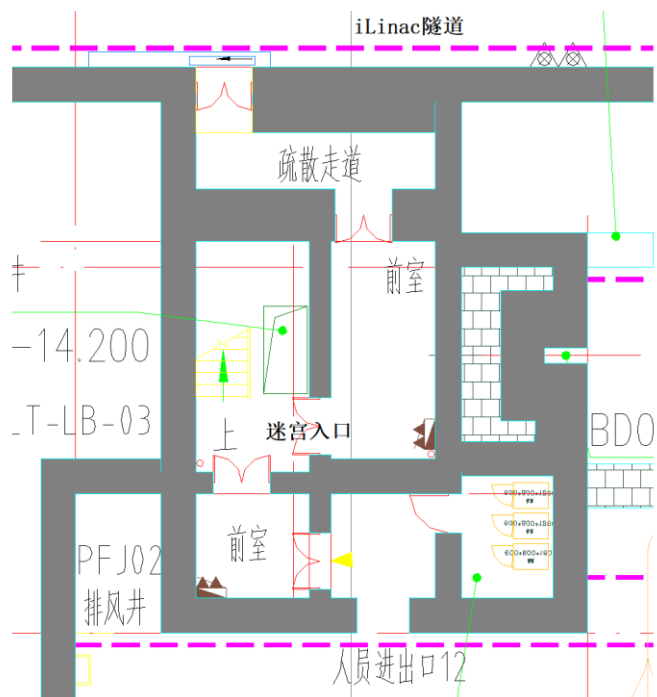


图 5-24 直线加速器段出入口迷宫典型设计（地下）

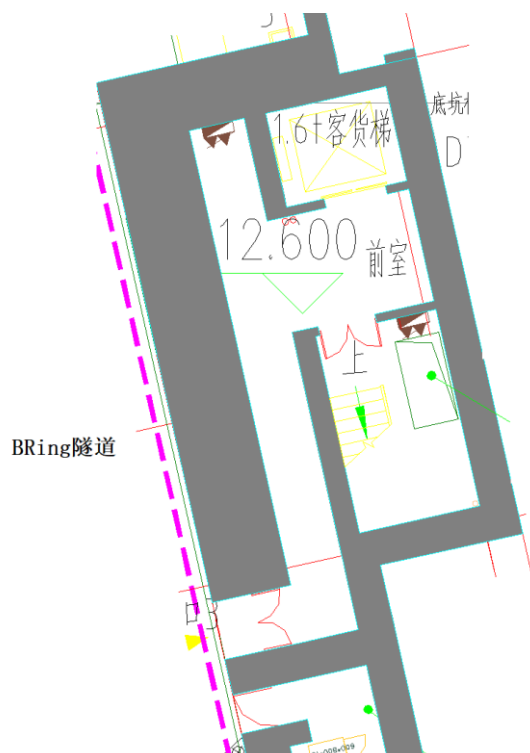


图 5-25 环型隧道上的出入口迷宫典型设计（地下，入口位于地上一层）



图 5-26 防护门建造情况

5.3 安全联锁系统

5.3.1 系统设计准则

(1) 分区联锁

根据加速器的运行模式，利用实体屏蔽及“束流闸”将整个加速器辐射区分为控制区和监督区。按工艺要求，在束流上流区域有束流时，可以允许下流无束流区域人员进入工作。利用“束流闸”保证束流不会被送到有人的区域。

(2) 冗余设计及独立性

控制区的每个门都有三重联锁：一为通道门限位开关；二为身份识别，可对进入控制区的人员进行权限验证，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中；三为人员出入管理箱，确保人员出入管理箱在没有复位的情况下，束流闸不会被打开。采用冗余设计的多套联锁设备相互独立，不会因为一套设备的失效而影响到其他系统的安全性。

(3) 最优切断

联锁系统应尽可能地切断前级控制或是机器的最初始的运行功能（如离子源的高压等），更好地保证在后级区域的辐射安全。对于加速器来说，切断束流的设备主要有束流闸、偏转磁铁及离子源高压等。

（4）失效保护

所有线路、电动装置、气动装置均采用失效保护设计。失效保护是指束流切断设备在失效后该设备下游的区域处于一个安全的状态。如束流闸是气动设备，依靠气体将其升起以打开束流通道，一旦其气路或电路发生故障，束流闸将会自动落下；偏转磁铁是依靠电源进行工作的，一旦发生断电故障，磁铁将无法工作。在这两种情况下，束流都无法到达下游区域。

5.3.2 联锁分区

根据装置工作模式，将辐射区细分为 10 个相互独立的子区，其中高能综合终端、高能外靶终端及高能量密度终端不在此次申请范围内，做为监督区。各子区通过物理实体和束流切断设备分隔，只有在当前区域联锁建立后，束流才允许到达该区域。各区域之间均采用混凝土屏蔽块搭建的墙体进行分隔。

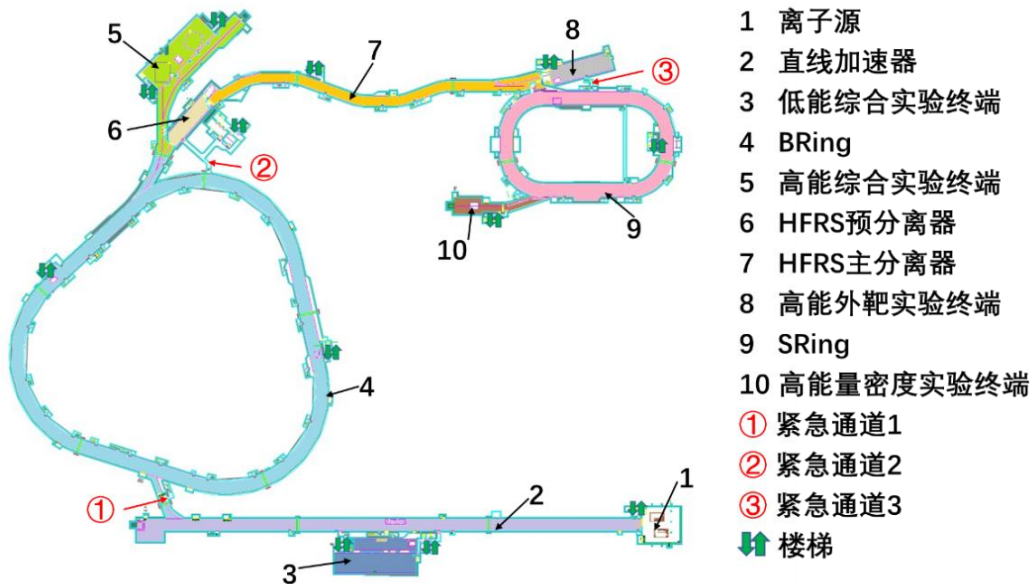


图 5-27 安全联锁系统分区示意图



图 5-28 区域之间物理实体隔断照片

表 5-1HIAF 装置联锁分区

序号	联锁分区
1	离子源
2	直线加速器
3	低能综合终端
4	BRing
5	HFRS 预分离器
6	HFRS 主分离器
7	SRing

5.3.3 束流切断设备及 BD 活动挡块

HIAF 装置束流切断设备共有 7 处束流切断设备，其中包括离子源高压、一台法拉第筒、二台阻挡器及三台偏转磁铁。

当联锁触发时，如防护门打开、急停按钮按下、清场信号失效或人员出入管理箱打开，法拉第筒、阻挡器将自动落下，偏转磁铁将自动断电，从而束流无法进入至联锁触发区域。同时，联锁触发信号将会发送至机器保护系统，在极短时间内（ms 量级）从离子源（BRing 及之前区域）或 BRing 引出口（BRing 之后区域）关闭束流。

束流切断设备及 BD 活动挡块位置如图 5-29 所示，明细表见表 5-2。

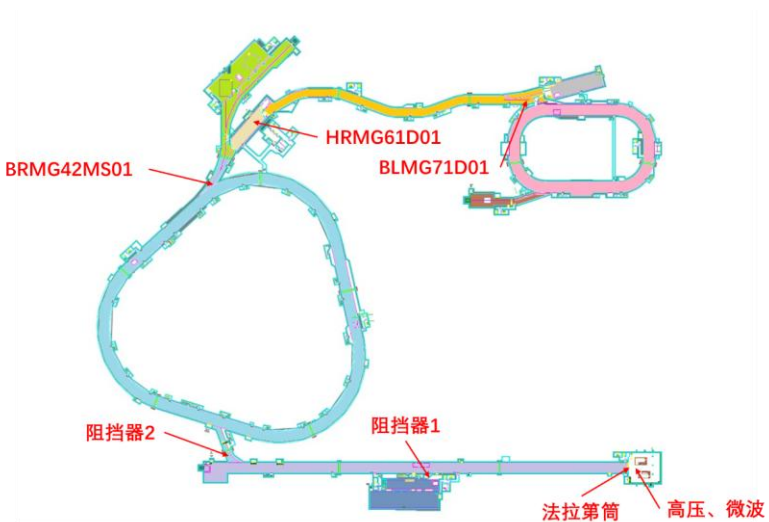


图 5-29 束流切断设备位置示意图

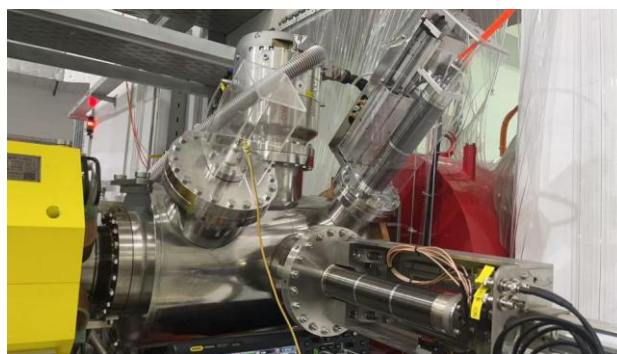


图 5-30 直线加速器-低能综合终端阻挡器实体图



图 5-31 直线-BRing 阻挡器实体图



图 5-32 偏转磁铁电源实体图

表 5-2 束流切断设备明细表

序号	区域	对应束流切断设备
1	离子源	高压、微波
2	直线	法拉第筒
3	低能综合终端	阻挡器 1
4	BRing	阻挡器 2
5	HFRS 预分离器	BRMG42MS01
6	HFRS 主分离器	HRMG61D01
7	SRing	BLMG71D01

5.3.4 门机联锁及人员出入管理系统

HIAF 装置每个控制区出入口处均安装有通道门，用于各控制区的人员出入管理。根据各控制区迷宫口的剂量水平及用途，通道门的设置分为如下三类：

1. 各控制区入口通道门处设置人员出入管理箱：分别为离子源（C11）、直线加速器（C21、C22、C23）、低能综合终端（C31、C32）、BRing（C41、C42）、HFRS 预分离器（C61）、HFRS 主分离器（C71）、SRing（C91），人员刷卡验证后通道门打开，人员可进入对应控制区。
2. 常锁门：包括防火门（L1、L2、L3、L72、L92五道）及离子源大厅、直

线隧道辐射控制区常闭门三道（L12、L13、L24）。常锁门不配置人员出入管理功能，但其状态会接入联锁系统，一旦打开必须经重新清场、现场确认后方可重新供束。

3. 迷宫防护门：位于控制区内迷宫与隧道交界处，包括S25、S26、S62、S63、S64，防护门关闭时加速器才能运行，以降低控制区入口通道门处的剂量率。

所有通道门均设置限位开关，在门没有关到位的情况，对应控制区不能供束；而在某一控制区供束时门一旦打开，对应控制区将立即切断束流。

控制区内每扇防护门口出口处，均安装 1 个紧急开门开关。任何时间按下该按钮，通道门将自动打开。

HIAF 通道门共设置 24 道，地下 20 道，地上 4 道，分布见图 5-33。部分通道门实物照片见图 5-36。

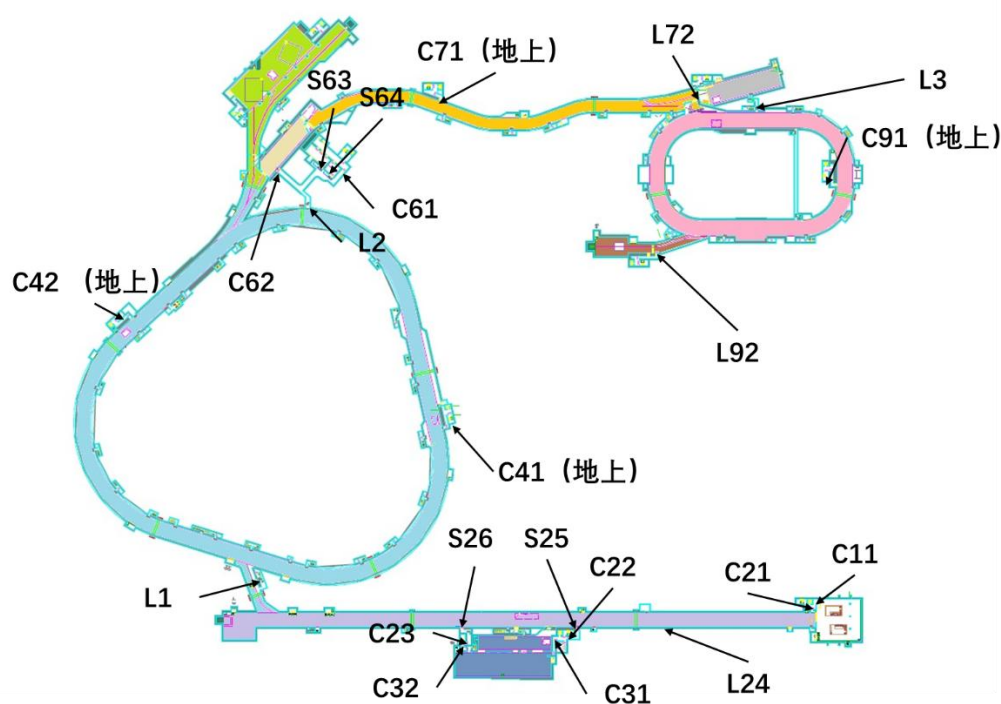


图 5-33 防护门所在位置示意图



图 5-34 门机联锁的控制界面截图



图 5-35 PLC 系统实物照片



图 5-36 部分通道门实物照片

从控制区门口进入各加速器隧道的详细流程如下：

离子源：C11（地下、防火门）→ 迷宫 → 离子源大厅。

直线隧道：路径① C21(地下、3mm 铅防护门) → 迷宫 → 直线隧道；路径② C22(地下、防火门) → 迷宫 → S25(地下、20cm 碳钢防护门)→直线隧道；路径③ C23(地下、防火门) → 迷宫 → S26(地下、20cm 碳钢防护门) → 直线隧道。

低能综合终端：路径① C31（地下、防火门）→ 迷宫 → 低能综合终端；路径② C32（地下、防火门）→ 迷宫 → 低能综合终端。

BRing 隧道：路径① C41(地上、玻璃门) → 电梯 → 地下迷宫 → BRing 隧道；路径② C42(地上、玻璃门) → 电梯 → 地下迷宫 → BRing 隧道。

HFRS 预分离器隧道：C61（地下、防火门）→ 迷宫 → S62(30cm 碳钢防护门) → HFRS 预分离器隧道。

HFRS 主分离器隧道：C71(地上、玻璃门) → 电梯或步梯 → 地下迷宫 → HFRS 主分离器隧道。

SRing 隧道：C91(地上、玻璃门) → 电梯 → 地下迷宫 → SRing 隧道。

各区域的第一道门均安装人员出入管理箱，为控制区与监督区的隔离门，控

制人员出入。对于有多条路径进入控制区的区域，其清场路线不变，开始清场后各路径均不能进入。

辐射工作人员进入辐射工作场所的管理设备为人员出入管理箱，如图 5-37 所示，安装于各控制区通道口入口处，其集成了人员出入管理与人员个人剂量管理两部分功能，实现对进入辐射工作场所的人员出入及人员个人剂量的统计和管理，是确保人员安全的重要部件。



图 5-37 人员出入管理箱

人员出入管理箱分为“全部归位”和“未归位”两种状态。只有人员出入管理箱上设定数量的个人剂量计全部归还于管理箱时，人员出入管理箱才处于“全部归位”状态，允许该人员出入管理箱所在控制区进行供束；而至少一枚剂量计未归还时，人员出入管理箱处于“未归位”状态，此时该人员出入管理箱所在控制区不允许供束。

人员进入控制区时，须在允许进入的前提下，在通道门的人员入口处的出入管理箱进行权限验证（权限验证可通过刷卡或刷脸的方式），权限验证通过后人员出入管理箱会分配一枚个人剂量计，人员在拔取分配的个人剂量计后通道门会自动打开，此时人员可进入该区域工作，且剂量计会在被拔取后开始记录人员个人受照剂量。人员退出该区域后，须将剂量计归还至人员出入管理箱的空余仓位，人员出入管理箱会将此次测量剂量上传至服务器。服务器会将从事辐射工作

的人员年累积剂量进行统计，当某工作人员个人剂量超过管理目标值（5mSv/a）时，系统自动取消该人员入口授权，禁止其进入控制区。

5.3.5 急停、清场按钮和声光报警灯

HIAF 装置各控制区安装有数量不等的急停清场盒与声光报警灯。

急停按钮在计划停机或被自救人员按下后可使所处控制区立即停束，需要安全人员到现场复位后才能重新供束。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，保障自身安全。

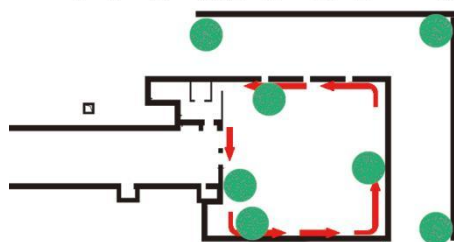
清场按钮是控制区供束前的清场确认装置。某一控制区供束前，值班人员须对该控制区进行清场，以确保辐射区内无人员滞留。清场时，值班人员确定清场按钮附近无人时，可按下墙壁上的清场按钮进行确认。特别的，由于 BRing、SRing 两区域较为复杂，故将 BRing、SRing 两区域的清场工作改为 3 人进行，以免造成清场时漏清人员的情况。BRing、SRing 两区域清场时，由 1 人站在隧道入口，以免后方人员跟随清场人员行进，另 2 名清场人员于束线两侧同时同方向对沿途区域及在线设备间进行清场。当某一辐射区内所有清场按钮均被按下时，才允许束流到达该区域。

HIAF 装置声光报警灯分为绿灯、红灯和报警声三种信号。在加速器进行开机供束前的清场过程中，当按下某一清场按钮时，该按钮附近的声光报警灯会亮起红灯，并发出报警声，提醒仍在辐射区逗留的人员撤离。

HIAF 装置为了减少在线控制设备所受照射，在隧道两侧设置若干带有迷道的功能房间，用于放置在线控制设备，这种功能房间称为在线设备间，其中布置了急停、清场按钮及声光报警灯并于在线设备间门口布置了限位开关，在上次清场完毕后若限位开关再无打开记录则保持清场状态。因此在线设备间相对于隧道是一个的独立的清场区域，不计入清场顺序中。

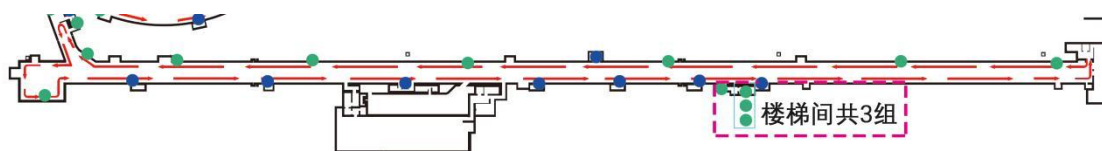
各区域清场路线图见图 5-38。

离子源大厅3楼



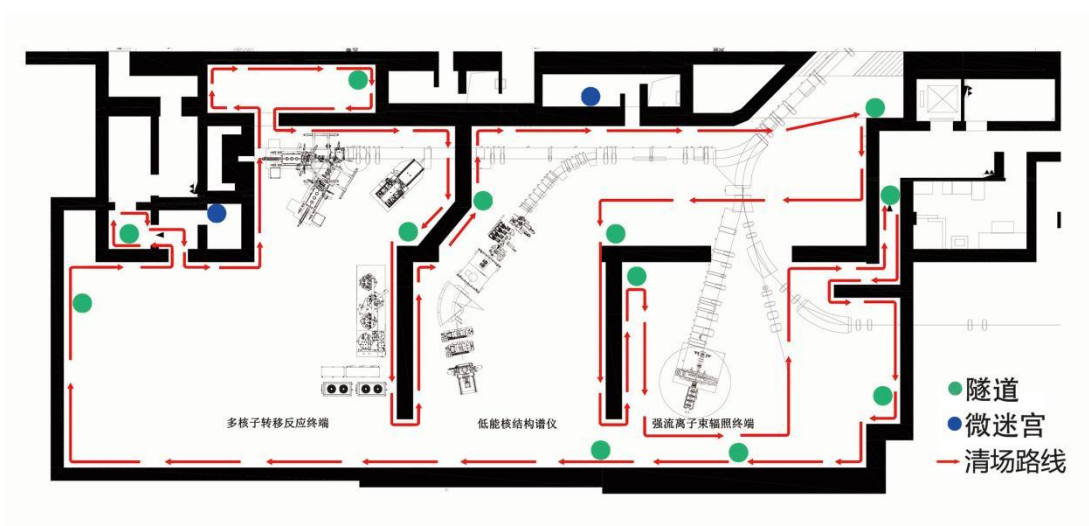
● 隧道 ● 微迷宫
→ 清场路线

(1) 离子源大厅

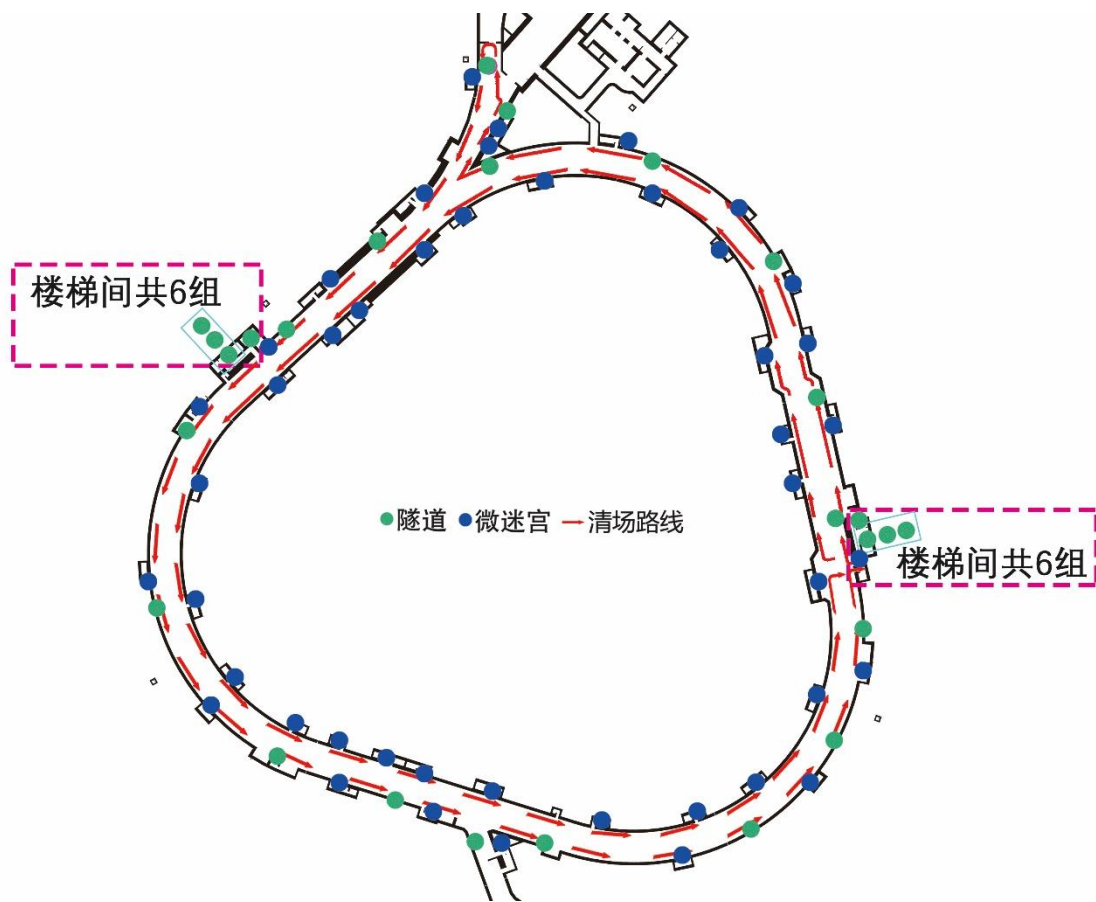


● 隧道 ● 微迷宫 → 清场路线

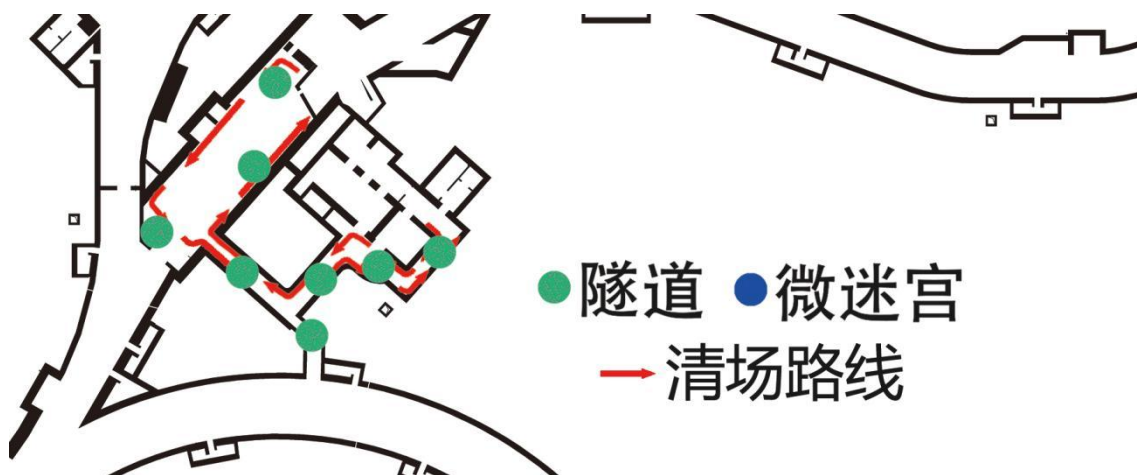
(2) 强流直线加速器隧道



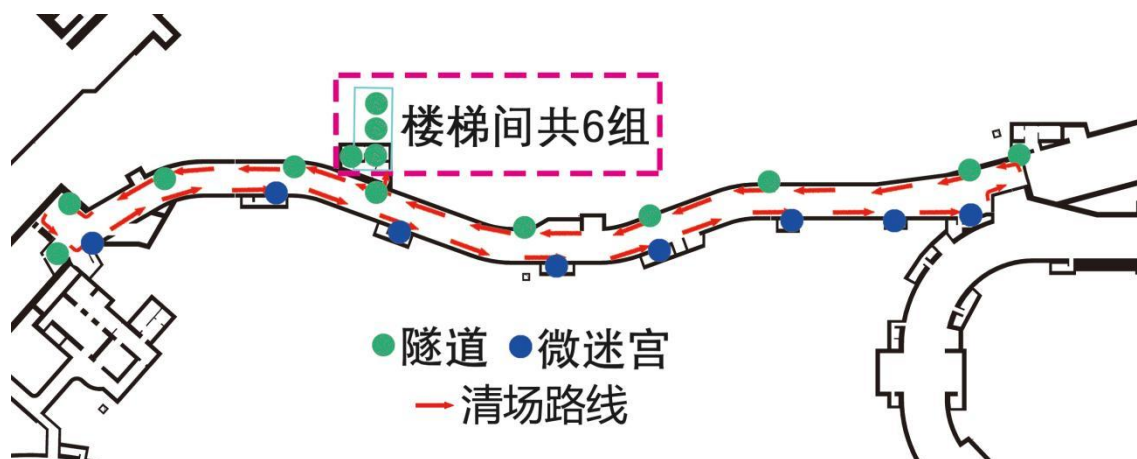
(3) 低能综合终端



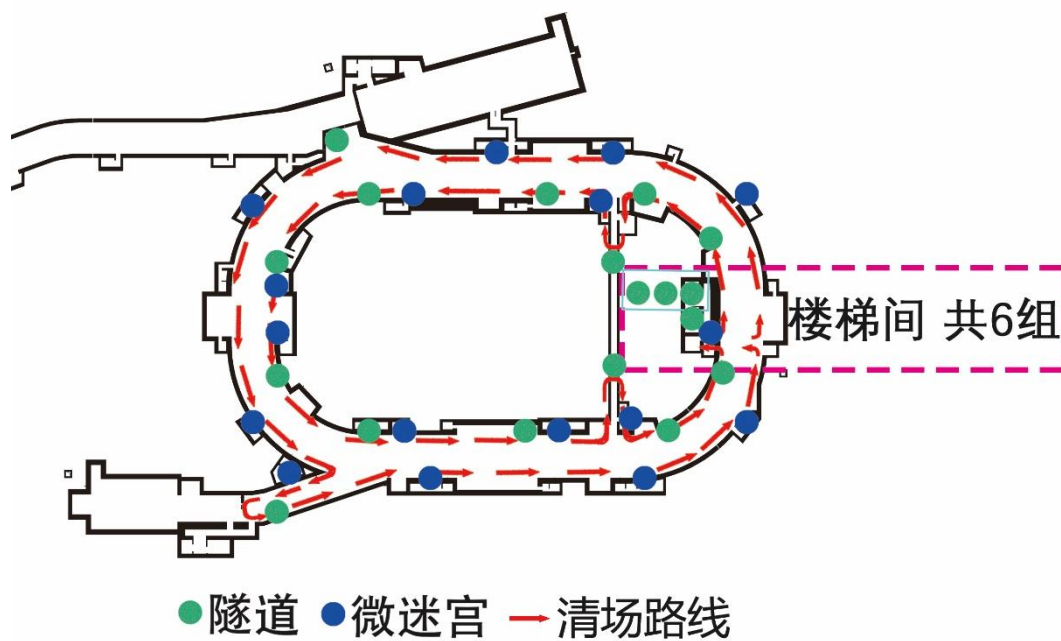
(4) BRing 隧道



(5) HFRS 预分器隧道及活化部件暂存间



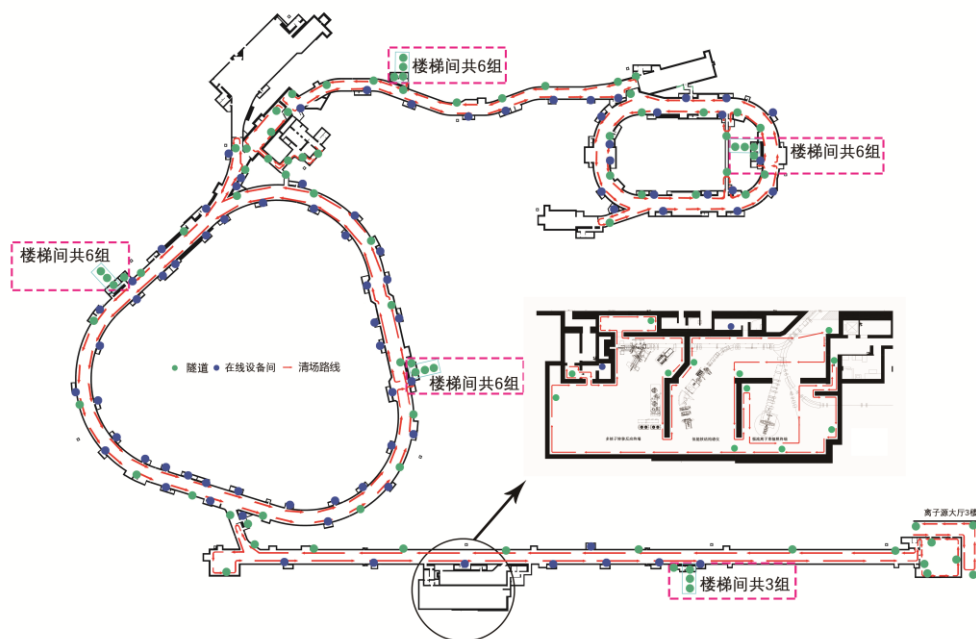
(6) HFRS 主分离器隧道



(7) SRing 隧道

图 5-38 地下隧道各区域清场路线

HIAF 装置急停清场开关和声光报警灯布局及各控制区数量统计见图 5-39 及表 5-3。部分实物照片见图 5-40。



注：图中每个隧道及在线设备间处均安装有一组清场急停按钮及声光报警灯。

图 5-39 急停按钮、清场按钮和声光报警灯点位示意图

注：图中每个点位处均安装有一组清场急停盒（盒内包括急停按钮、清场按钮）及声光报警灯





图 5-40 停机清场按钮和声光报警灯实物照片

表 5-3HIAF 装置各控制区内清场急停盒及声光报警灯数量统计

序号	区域	隧道内		在线设备间	
		设计数量	实际安装数量	设计数量	实际安装
1	离子源	3	7	0	0
2	直线	8	13（含楼梯间 3 组）	8	8
3	低能综合终端	4	12	2	2
4	BRing	20	30（出入口每个楼梯间含 4 组，地上、地下各 1 组，共 6 组）	45	45
5	HFRS 预分离器	8	8	0	0
6	HFRS 主分离器	8	16（出入口每个楼梯间含 4 组，地上、地下各 1 组，共 6 组）	8	8
7	SRing	16	20（出入口每个楼梯间含 4 组，地上、地下各 1 组，共 6 组）	17	17

5.3.6 分区联锁逻辑

HIAF 装置每个控制区只有在所有的急停按钮复位、清场确认按钮有效、防护门关闭、人员出入管理箱按钮及总按钮复位、中控室的区域按钮复位等条件都满足的情况下，才能进行供束。以直线加速器区域为例：直线加速器调试时，BRing 注入段的阻挡器保持关闭，仅当直线加速器区域的急停按钮复位、清场确认按钮信号有效、通道门闭锁、人员出入管理箱所有按钮及主开关复位、区域人员出入管理箱区域按钮按下后，直线加速器上游的法拉第筒才可打开，允许离子源的束流进入。直线加速器区域的供束逻辑如图 5-41 所示。

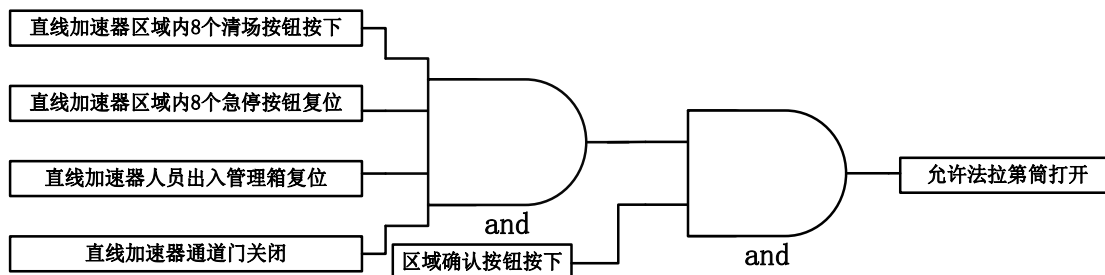


图 5-41 直线加速器区域联锁逻辑图

5.3.7 联锁工作流程

HIAF 装置安全联锁系统的工作流程图参见图 5-42。

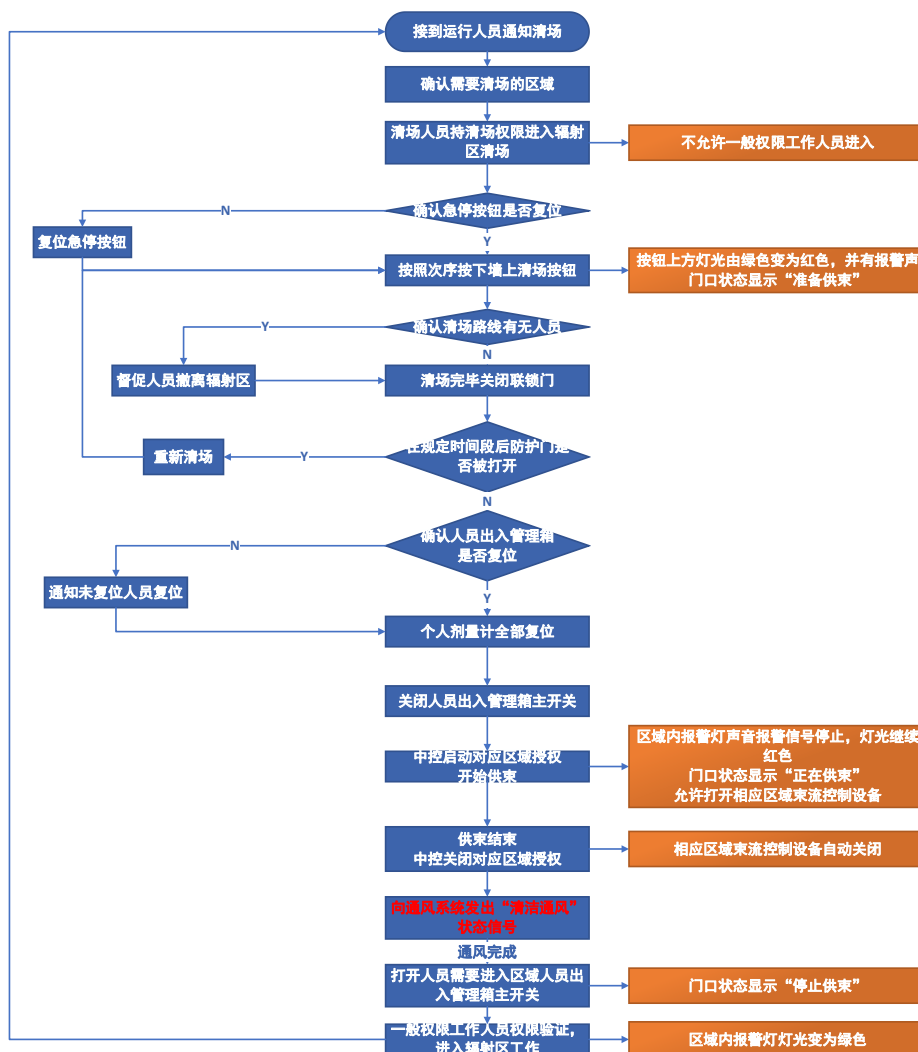


图 5-42 安全联锁系统的工作流程图

5.4 辐射监测

5.4.1 工作场所监测

工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测、移动式巡测和委托第三方有资质单位监测相结合的方式。

(1) 固定在线监测

辐射监测布点共 43 个，其中控制区 25 个，监督区 18 个（高能综合终端、高能外靶终端及高能量密度终端 3 个区域内由于不在此次验收范围内，而这 3 个终端与控制区相邻，故将这 3 个终端作为监督区，三个区域共 4 个监测点作为监督区辐射剂量监测点）。每个监测点位根据各监测点剂量水平和中子能量选择不同灵敏度的辐射探测器。主要功能是确定参考点的辐射水平，测定工作场所内部和屏蔽体外的辐射水平，验证屏蔽措施的可靠性，保证工作人员和公众的安全，使其接受的辐射剂量能实现“可合理达到的尽量低（ALARA）”的原则。每个监测点由一台中子探测器和一台 γ 射线探测器组成。

图 5-43~图 5-44 为 HIAF 控制区、监督区监测布点图，表 5-4 为监督区监测点位说明。



图 5-43HIAF 控制区、部分监督区监测点位

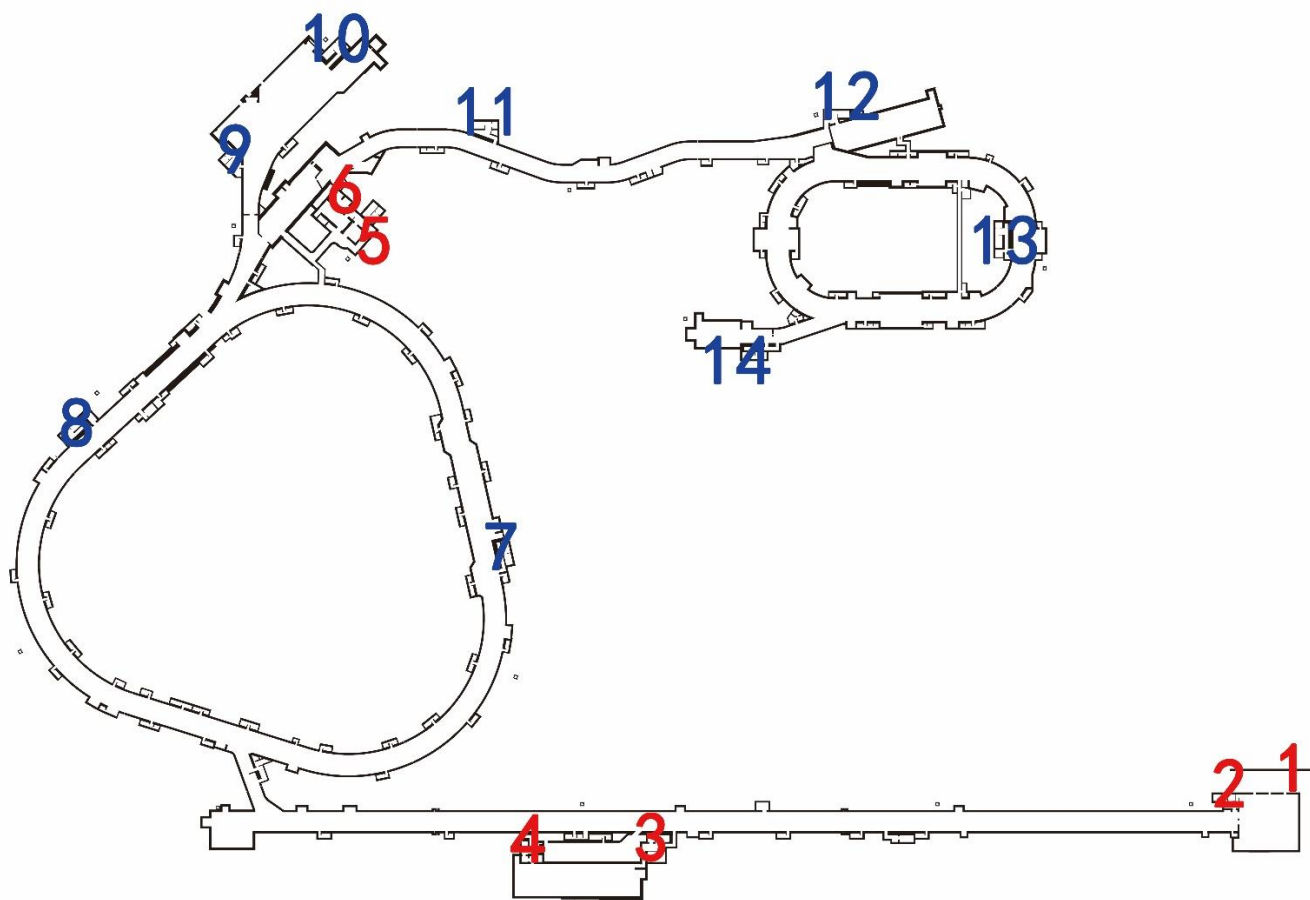


图 5-44HIAF 监督区监测点位

表 5-4 监督区监测点位说明

点位序号	点位位置	备注
1	离子源-2F 控制室	地下
2	离子源、直线出入口	地下
3	低能综合终端 1 出入口	地下
4	低能综合终端 1 出入口	地下
5	HFRS 预分离器出入口	地下
6	HFRS 预分离器出入口	地下
7	BRing 出入口 1	地上
8	BRing 出入口 2	地上
9	高能综合终端出入口 1	地上
10	高能综合终端出入口 1	地上
11	HFRS 主分离器出入口	地上
12	高能外靶终端出入口	地上
13	SRing 出入口	地上
14	高能量密度终端出入口	地上
15	高能综合终端内	地下
16	高能综合终端内	地下
17	高能外靶终端内	地下

18	高能量密度终端内	地下
----	----------	----

每个监测点安装的区域辐射监测仪包括一台中子探测器和一台 γ 探测器，可实时监测区域中子和 γ 剂量，同时能将数据上传至监测软件界面显示。探测器见图 5-49~图 5-50，所有探测器出厂时均完成检定。辐射监测软件显示界面见图 5-47。



图 5-45 固定式中子探测器实物照片



图 5-46 固定式伽马探测器实物照片图



图 5-47 区域辐射监测软件界面

(2) 区域巡测

配备了 4 台 X/γ、2 台中子移动便携式辐射监测仪表，对加速器顶部周围中子、γ 剂量率一年进行一次巡测。

(3) 委托巡测

每年还将委托有资质的单位进行运行期间的年度监督监测。

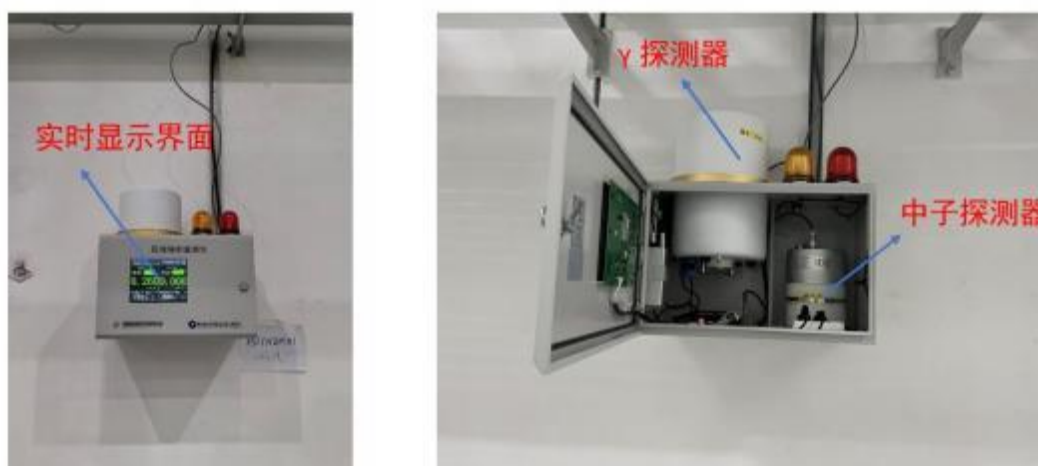


图 5-48 固定式探测仪



图 5-49 固定式中子探测器实体图



图 5-50 固定式伽马探测器实体图

(2) 区域巡测

配备了便携式 X/γ 监测仪、便携式中子监测仪表、便携式 α、β 表面沾污仪、手脚污染监测仪、小物品污染监测仪，其中外照射巡测频次为一年一次。

主要用于：

- (1) HIAF 装置运行期间，为设置固定监测点的位置或关心的热点位置进

行辐射剂量的监测；

(2) HIAF 装置停机后，对工作场所进行移动式监测，确保进入辐射区的工作人员的所受辐射水平是正常的；

(3) 在系统运行期间，可做监测点探测器的对比，固定监测点故障时备用；

(4) 实施日常管理，定期进行巡检工作，包括周检、月检和年检等，巡测包括范围为辐射工作场所和重点关注点位；

(5) 在固定监测点的探测器每年定期送检校核时的临时替代监测。



图 5-51 配备的便携式环境 γ 剂量仪实物照片

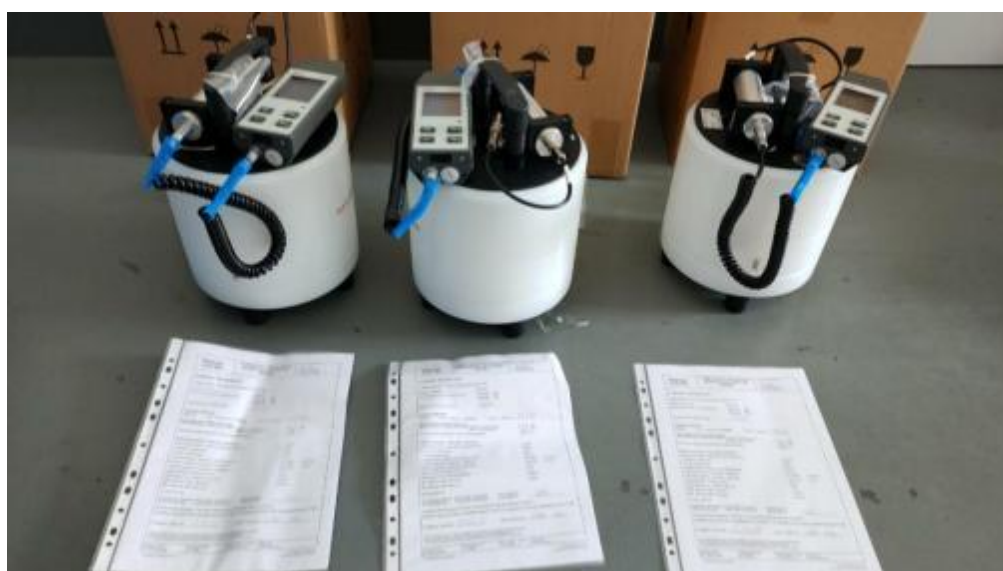


图 5-52 配备的便携式中子剂量率仪实物照片

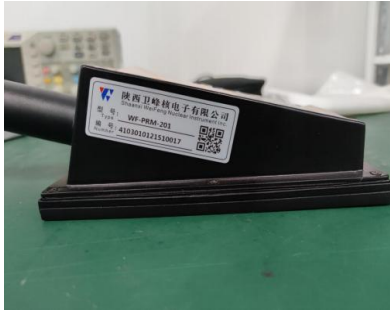


图 5-53 便携式 α 、 β 表面沾污仪实体图



图 5-54 配备的手脚污染监测仪实物照片



图 5-55 小物品污染监测仪实体图

(3) 委托巡测

近代物理所每年还将委托有资质的单位进行运行期间的年度监督监测。

5.4.2 环境监测

本项目配备 4 个环境监测站连续监测环境剂量率。环境监测站布置在加速器机房屏蔽体外人员可达处、主要束流损失点屏蔽体外和需关注的敏感点等位置，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。监测点位见图 5-56。环境中子探测器采用大尺寸的 He-3 正比计数管，环境 γ 探测器采用高压电离室。探测器照片见图 5-57。

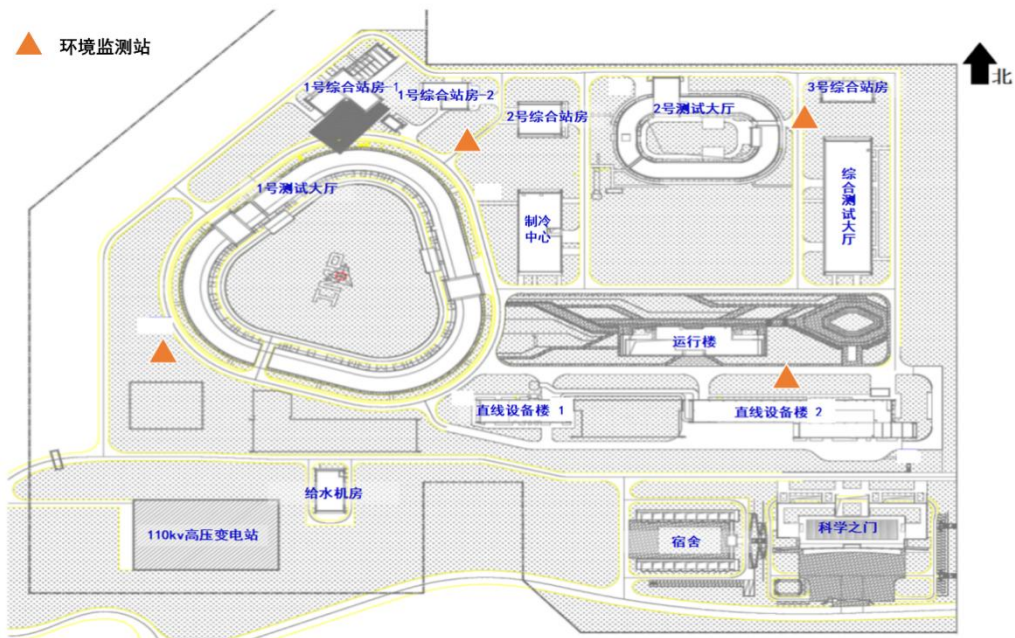


图 5-56 环境监测站布点



图 5-57 环境监测站实物照片

5.4.3 个人剂量监测

中国科学院近代物理研究所辐射工作人员个人剂量监测按《职业性外照射剂量监测规范》（GBZ128-2002）和 2002 年 1 月 3 日卫生部发布的“放射工作卫生防护管理办法”有关规定及《近代物理研究所个人剂量监测管理规定》执行。从事辐射工作人员配备了个人剂量计，每季度委托有资质的单位负责检测一次，并建立个人剂量档案。

本项目还配备了 300 台直读式伽玛个人剂量报警仪，用于工作人员进入控制区必要时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，具有剂量预警功能。每次工作结束后，由辐射安全管理人员负责回收直读式个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，作为下次工作制定工作方案的依据。

5.5 放射性三废处理

5.5.1 放射性废气及处理措施

（1）废气来源

强流重离子加速器装置运行期间将产生感生放射性气体，其主要放射性核

素为 ^{13}N ($T_{1/2}=9.965\text{min}$)、 ^{15}O ($T_{1/2}=2.037\text{min}$)、 ^{11}C ($T_{1/2}=20.39\text{min}$) 和 ^{41}Ar ($T_{1/2}=1.8\text{h}$)。

(2) 废气处理措施

加速器运行及科学实验期间产生的气态感生放射性核素主要为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平。隧道装置区设置通风系统，具体设计如下：

1) 通风系统

通风系统将隧道保持微负压状态。各放射区域的新风需经高效过滤器处理，保证上述区域中达到一定洁净要求，减少排风中放射性污染物的处理量。排风系统均采用初效（G4）、中效（F8）两级过滤净化措施（G4 级纤维式预过滤器，用于捕获小水滴，较大的潮湿盐晶体及其他大颗粒物（ $1-10\mu\text{m}$ ）；F8 级超细纤维主过滤器，用于去除超细盐颗粒和其他小颗粒（ $<1\mu\text{m}$ ）），采用高空排放方式。

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

a. 人员进入模式——加速器不运行，人员可进入，人员进入时设计换气次数约为 1 次/h。

b. 加速器运行模式——加速器运行期间，隧道为禁入区，通风系统处于封闭循环状态，并保持隧道区在一定的负压状态，以防止活化空气的泄漏。此模式下，排风换气次数设计为 0.25 次/h。

c. 过渡模式（含事故排风模式）——从加速器运行模式到人员进入模式的过渡期，经延时衰减后（15min），采取大风量排风，换气次数设计为 5 次/h，通风时间为 5-15 分钟，置换隧道中的空气，以满足人员进入的要求。

隧道通风系统原理如图 5-58 所示。根据预设的通风模式及隧道体积，配置的风机参数如下表 5-5 所示。

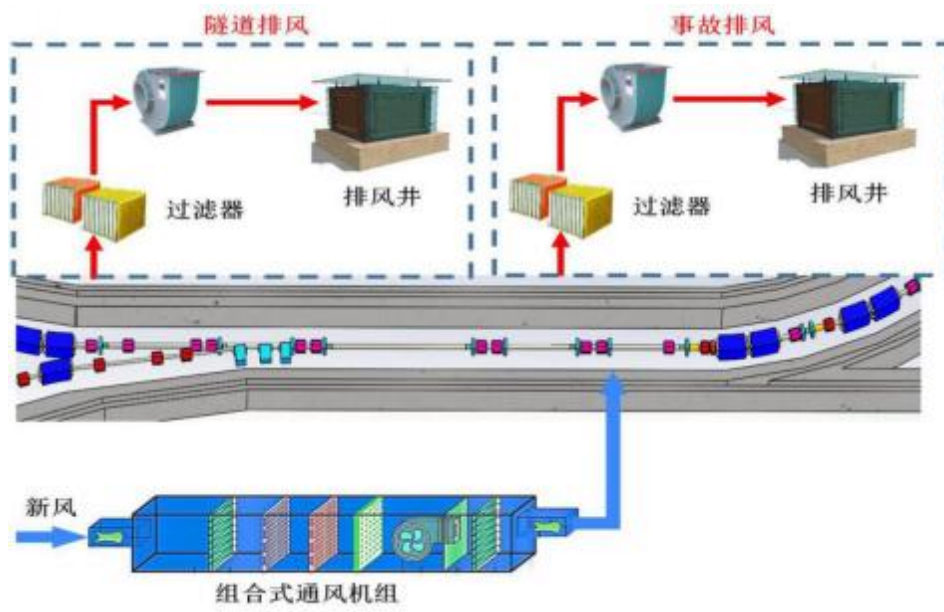


图 5-58 隧道通风系统工艺原理图

表 5-5 配置的风机参数

区域名称	序号	各主要设备或空间	选型风量 (m ³ /h)
加速器隧道	1	离子源大厅	35000
	2	ilinc 隧道-1	35000
	3	强流离子束终端大厅	30000
	4	ilinc 隧道-2	20000
	5	Bring 环隧道	100000
	6	HFRS 隧道	45000
	7	Sring 环隧道	50000

通风系统的排风口位置如下所示：

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，排气筒高度 17.5 米，高于临近建筑物 2 米。HIAF 隧道排风口布局见图 5-59。排风口照片见图 5-60。

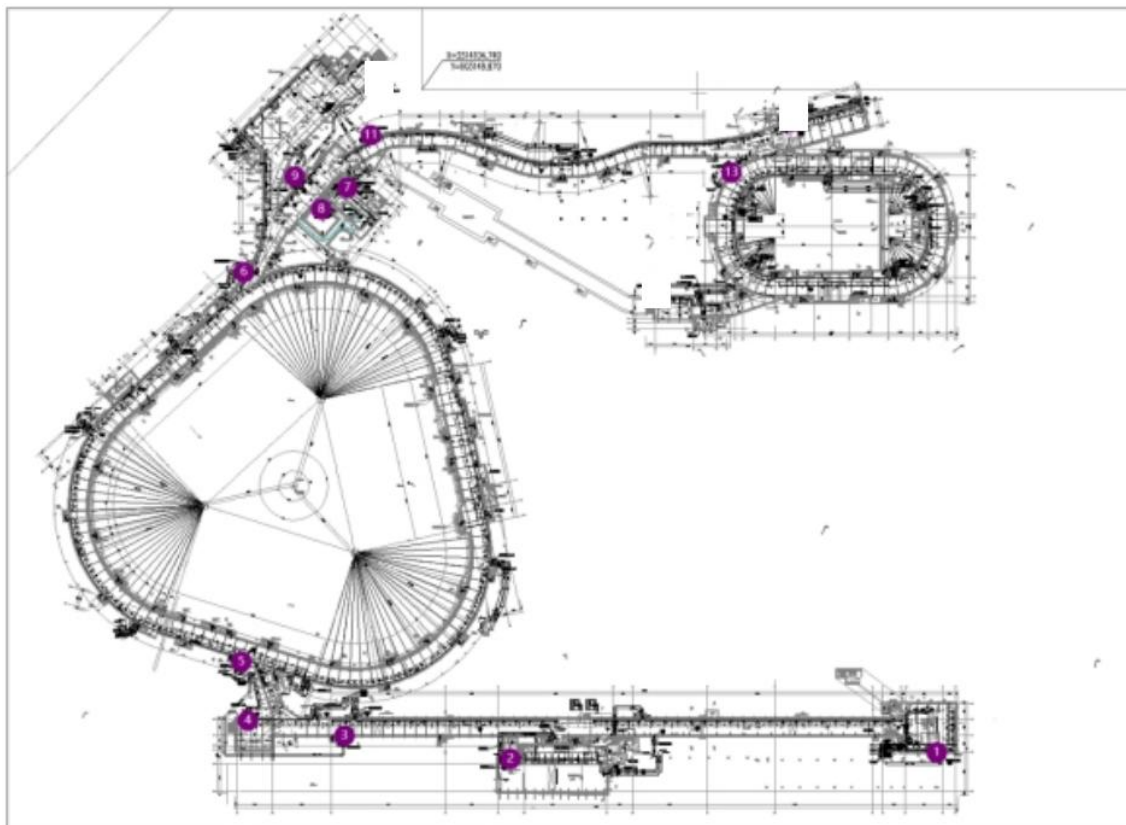


图 5-59HIAF 隧道排风口布局



图 5-60HIAF 隧道排风口照片

离子源设置 1 个排风口，iLinac 直线段设置 2 个排风口，低能综合终端设置 1 个排风口，B Ring 共设置 2 个排风口，放射性次级束流分离段 HFRS 设置 4 个排风口，S Ring 设置 1 个排风口，总共设置 11 个排风口。

由于各段隧道及实验终端大厅停机后进入前会继续保持负压 15 分钟的冷却，之后再进行 15 分钟的清洁排风，换气频率为 5 次/h；之后恢复正常通风，换气频率为 1 次/h。结合空气中主要感生放射性核素的半衰期及通风换气速率，经过此过程可认为各段隧道及实验终端大厅内已基本不存在活化空气，因此活化空气对工作人员的影响也可忽略。由于换气频率为 5 次/h，且停机后进行 15 分钟通风，可认为各段隧道及实验终端大厅内空气已完全更新了 1 次，因此各段隧道及实验终端大厅内将基本不存在活化空气。

5.5.2 放射性废液及处理措施

本项目科学实验、安装调试及维修维护期间可能产生的放射性废液主要是活化的冷却水。由于冷却水中 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素中，除 ^3H 、 ^7Be 外其余核素的半衰期都很短，放置一段时间基本可以衰变。

(1) 废水收集

水冷系统泵站、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暂存池。

HIAF 装置共设置 5 个暂存池，单个容积 30m^3 ，总存水容积设计为 150m^3 ，位于水站附近。暂存池采用三级间歇式排水结构，每段容积为 10m^3 ，暂存池结构示意图见图 5-61~图 5-63，现场照片见图 5-64。池体采用钢筋混凝土建造，暂存池池底和池壁均做环氧防水防腐处理，每段暂存池设置有水样采样口，随时可对暂存池内的水体进行采样测量。

(2) 排放

HIAF 装置共设计检修区域约 17 段，每段主供管道上设置阀门一组。同时冷却水系统设置有隧道漏水监测及水箱液位监测及低水位停泵联锁。对于检修排放，在开展冷却水系统检修前，可能需要排放检修区域的冷却水。检修时只排放检修区域的一段水路，不会全部排放，预期单次检修排放的总水量不会超过 15m^3 ，该类型检修频次最多 1 次/年。对于漏水排放，HIAF 冷却水系统设计有隧道漏水监测、水箱液位监测及低水位停泵联锁，保障单次事故的最大排水量不超过 10m^3 。HIAF 装置共设置 5 个暂存池，单个容积 30m^3 ，总存水容积设

计为 150m³。冷却水暂存池的容积能够满足上述两种工况的排放需要。

暂存池上设有取样口，活化的冷却水在排放前委托有资质单位进行取样测量，满足放射性废水排放标准，并报审管部门批准后，方可排放。

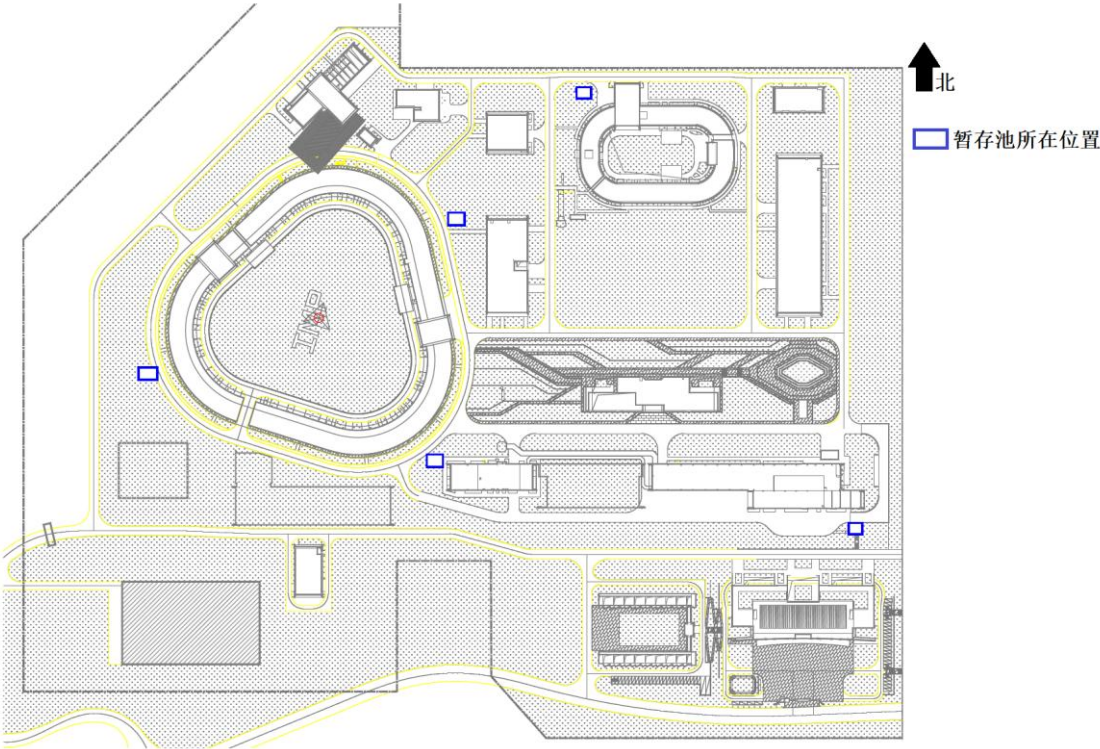


图 5-61 暂存池所在位置示意图

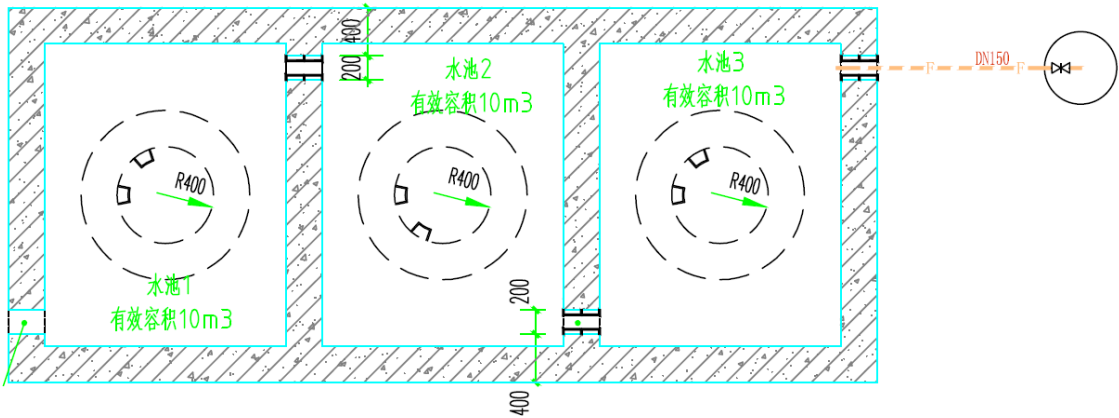


图 5-62 暂存池平面示意图

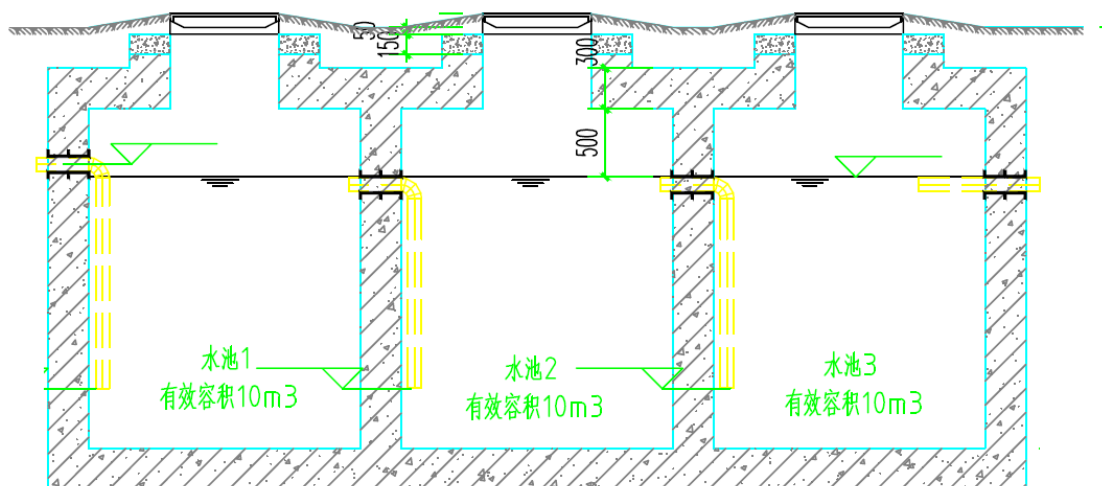


图 5-63 暂存池剖面示意图



图 5-64 暂存池照片

5.5.3 放射性固体废物及处理措施

本项目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、冷却水离子交换树脂、空气滤芯、防护手套、棉纱、鞋套等含感生放射性的固体废物。这些放射性固体废物的主要材料是钢、碳和镍，停机后对活化结构部件剂量率贡献较大的主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 、 ^{57}Co 和 ^{58}Co 等半衰期较长的核素。

加速器部件、靶件等由于活化产生的放射性核素活度浓度较高，科学实验期间存放在隧道内的放射性废物暂存库中，隧道内共设置了 3 个放射性废物暂存间，每个暂存间大约 15 m^2 ，具体位置见图 5-65，现场照片见图 5-66。

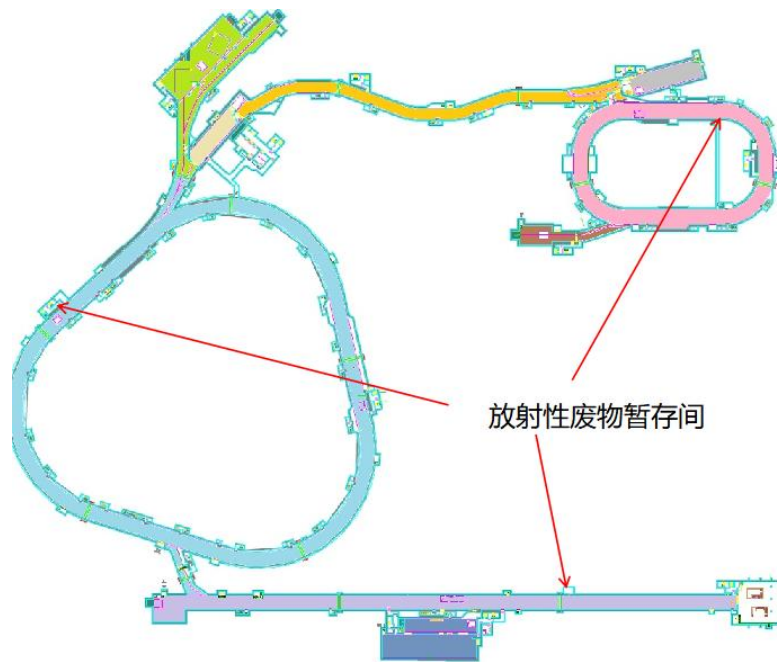


图 5-65放射性废物暂存间位置示意图



图 5-66 放射性废物暂存间现场照片

对于冷却水离子交换树脂和过滤滤芯，含放射性核素较少，在水站附近设置固体废物暂存间 1 个，用于存放冷却水离子交换树脂和过滤滤芯。

（2）固体废物处理

放射性固体废物先暂存在暂存库，暂存量接近一定容量时，委托有资质单位进行集中测量分析：

（1）对于满足解控标准（本项目 5.1.4 小节中放射性固体废物清洁解控标准，即《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中表 A1 给出的活度及活度浓度）的：

①可回收利用的部件，回收后复用；

②不能回收利用的部件，经审管部门认可后，解控后按一般废物处理。

（2）对于不满足解控标准的，交至广东省城市放射性废物库。石墨靶废物目前暂存在放射性废物库暂存，后续待有资质的单位接收。

各类放射性固废年最大产生量预计 50 kg；转运前进行剂量监测，对于低于 100uSv/h 的固废，采用放射性固体废物筒及转运小车进行转运，对于大于 100uSv/h 的固废，根据具体情况委托第三方处理或自行转运时采用废物筒+屏蔽的方式进行转运。放射性废物暂存间均设置于控制区内，并实行专人管理，区域内设置清场、急停按钮。

5.6 其他安全措施

（1）电离辐射警告标志：在控制区入口醒目位置设置电离辐射警告标志；

（2）安装监控摄像头

（3）操作人员都通过上岗前培训和在岗定期培训，熟练掌握业务技术和射线防护知识，考试合格。

（4）操作人员进控制区需佩戴个人剂量计。

（5）制度上墙，严格执行各操作规程。

（6）控制区、监督区入口张贴“控制区”、“监督区”标识。

（7）各区域通道门口张贴区域名称及巡检路线图。

（8）吊装口安装链条锁。

（9）室外衰变池增加隔离护栏及标识。

（10）内照射防护办法：

HIAF 项目内照射的主要防护对象为 HIAF 隧道内的活化空气。目前对此进

行防护的主要措施为等待与通风。

- ①等待：加速器从运行状态结束后，进行停机等待，时长为 15min；
- ②通风：等待时间过后，隧道进行大风量排风，换气速率为 5 次/h，通风时间为 5-15 分钟，置换隧道内的空气，以满足人员防护的要求。

现场照片见下图。



图 5-67 其他安全措施照片

5.7 辐射安全管理

5.7.1 辐射安全与环境保护管理机构

中国科学院近代物理研究所按照《放射性同位素与射线装置安全与防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，成立有专门的安全与防护管理机构，辐射安全工作的最高管理机构为辐射安全管理委员会（成员情况见表 5-6）：

辐射安全管理委员会主要职责是：

- （1）贯彻落实国家和地方政府辐射安全相关的法律法规及标准，负责全所辐射安全工作的统一监督管理及决策；
- （2）制订全所辐射安全管理工作基本方针及工作计划；
- （3）建立健全所辐射安全管理规定及辐射事故应急预案等相关辐射安全管理制度；
- （4）其它辐射安全相关重大事项。

表 5-6 辐射安全管理委员会成员

姓 名		性别	职务或职称	工作部门	专/兼职
主任	孙志宇	男	所长/研究员	近代物理研究所	兼职
副主任	胡正国	男	书记、副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
	何 源	男	副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
	杨建成	男	副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
委员	王 猛	男	副所长/研究员	近代物理研究所	兼职
	宋华龙	男	纪委书记	近代物理研究所	兼职
	张雪莹	男	副主任/研究员	先进核能材料中心	兼职
	孙良亭	男	中心副主任/研究员	加速器技术中心	兼职
	段敬来	男	副主任/研究员	材料研究中心	兼职
	岳珂	男	处长/研究员	科技处	兼职

	苏有武	男	主任/正高级工程师	辐射安全与防护室	专职
	杨维青	男	正高级工程师	加速器总体室	兼职
	吴建强	男	正高级工程师	直线加速器中心	兼职
	张子民	男	中心主任/研究员	电子加速器中心	兼职
	秦 芝	男	中心副主任/研究员	先进核能材料中心	兼职
	王思成	男	处长/研究员	工程处	兼职
	王玥	男	副处长/研究员	工程处	兼职
	骆 鹏	男	副主任/研究员	核安全与核数据室	专职
	杨胜利	男	主任/高级工程师	技术安全办公室	专职
	赵卫平	男	副主任	综合办公室	兼职

5.7.2 辐射工作人员管理

根据生态环境部公告《核技术利用辐射安全与防护培训和考核》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），自 2020 年 1 月 1 日，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当通过培训平台报名并参加考核。2020 年 1 月 1 日前已取得的原培训合格证书在有效期内继续有效。

目前近代物理所辐射工作人员，包括加速器各系统工程师等均通过了生态环境部门认可的辐射安全与防护考核。已经对新入所的职工和学生进行辐射安全内部培训，培训内容包括辐射安全法规，熟悉辐射安全防护基础知识。

本项目涉及的各类辐射工作人员除负责 HIAF 装置的安装调试及维修维护外，还会进行其他核技术利用工作。存在工作项目跨地区、异地情况的辐射工作人员，在各地工作场所处均配备一支个人剂量计，每季度收集其所有工作场所的个人剂量计进行个人剂量监测并做累加，监测结果建立档案，严格按照个人剂量约束值 5mSv/a 控制，同时各个项目为进入辐射区的工作人员提供直读式个人剂量报警仪，监测数据作为在该项目所受职业照射的参考依据。

近代物理所制定了辐射工作人员考核计划，从事辐射工作的人员必须参加辐射安全防护考核，取得合格成绩单后才能上岗。已经取得辐射安全与防护考核合格证书及合格成绩单的工作人员，到期后若要继续从事辐射工作，需再次

考核并合格。新上岗及调入的辐射工作人员在上岗前必须通过生态环境部培训平台报名参加辐射安全与防护考核，考核合格后，方可上岗。

此外，近代物理所从事加速器安装调试和维修维护的工作人员在入职后，均会参加所内组织的各类专业技术培训，培训内容主要包括两类：

（1）加速器安装调试、维修维护流程培训，规程培训和各类内部工具培训；

（2）质量和安全体系培训；

除上述培训外，工作人员还必须接受与其工作相关的专项技术培训，主要培训内容包括加速器的原理及其应用、辐射安全防护，等内容，培训结束并通过所内考核后方可上岗。



图 5-68 人员培训现场



图 5-69 辐射安全培训现场照片

5.7.3 辐射安全管理制度

近代物理所已制定了《中国科学院近代物理研究所辐射安全管理规定》、《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急预案》等，针对本项目拟制定相应的制度和规程，如：《HIAF 装置操作规程》、《HIAF 装置运行、维护规程》、《HIAF 装置监测方案》、《加速器销售，安装调试，维修维护辐射安全管理办法》、《加速器安全操作规程》、《加速器辐射环境监测方案》、《加速器维护、检修规程》等。

5.7.4 个人防护用品

近代物理所为本项目从事科学实验、加速器安装调试和维修维护的辐射工作人员配备个人剂量计和个人剂量报警仪，进入辐射工作场所必须佩戴个人剂量计，必要时佩戴个人剂量报警仪。其中，个人剂量计每季度委托有相关资质的单位进行监测一次，并建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。

同时，为辐射工作人员配备工作服、手套和鞋套等个人防护用品，保证工作人员的安全。

本项目辐射工作场所主要为科学实验场所及各用户单位的使用场所，近代物理所配备 γ 巡检仪及中子巡检仪，在设备运行过程中，定期对工作场所的辐射水平进行巡测。



图 5-70 个人剂量报警仪实物照片



图 5-71 配备的个人剂量计实物照片



图 5-72 铅衣、铅帽、工作服、手套和鞋套等辐射防护用品实物照片

5.7.5 辐射事故应急预案

根据《核技术利用单位辐射事故应急预案编制规范》及我所的实际 情况，2023 年重新修订了《中国科学院近代物理研究所辐射事故应急 预案》并通过了所务会审议和发布。参考《中国科学院近代物理研究所 辐射事故应急预案》结合 HIAF 项目具体情况，制定了《中国科学院近代物理研究所 HIAF 装置辐射事故应急预案》。



图 5-73 应急演练现场

6 环境影响报告书主要结论与建议及其审批部门审批决定

6.1 环境影响报告书主要结论与建议

(1) 本项目的建设内容为对原环评进行改扩建，变动内容包括：

①延长超导直线加速器（iLinac）隧道长度，部分隧道外侧不再回填，变为开放空间，相应区域增加混凝土厚度；

②原低能核结构谱仪、强流离子束辐照终端合并为低能综合终端；

③新增高能综合端和高能量密度物理终端；

④优化放射性次级束分离器（HFRS）设计及防护措施；

⑤优化外靶实验终端屏蔽设计及技术参数；

⑥隧道上方地面新建配套建筑，相应区域由公众区变为监督区；

⑦新增销售（含建造）活动，在国内对 HIAF 装置进行销售，年最大销售量为 1 台。

(2) 近代物理所在拟销售的 HIAF 装置生产、销售过程中不涉及出束操作，因此不会对工作人员和环境造成辐射影响。HIAF 装置的科学实验、运行维护及拟销售的 HIAF 装置的调试和维修维护环节，设备开机出束产生的瞬发辐

射和感生放射性为本项目主要的污染源。

(3) 根据屏蔽设计及模拟计算结果,近代物理所惠州装置区的 HIAF 装置将满足屏蔽设计标准的要求。近代物理所为其用户推荐拟销售(含建造)的 HIAF 装置结构布置和建筑布局的基础方案和基本要求。同时,用户单位在使用拟销售的 HIAF 装置前,需要进行环境影响评价和安全分析,并对其使用场所建筑墙体的屏蔽设计进行评价,确保其能够满足拟销售的 HIAF 装置屏蔽设计标准的最低要求。

(4) 强流重离子加速器装置科学实验和运行维护期间,工作人员所受最大个人年有效剂量为 2.97mSv/a , 低于本项目工作人员剂量约束值 5mSv/a 。公众年受照剂量最大为 0.0832mSv/a , 低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。拟销售(含建造)的 HIAF 装置工作人员所受年最大有效剂量为 2.7mSv/a , 低于本项目工作人员剂量约束值 5mSv/a , 公众年受照剂量最大为 0.0528mSv/a , 低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。由于其技术参数等的不确定性,同时结合近代物理所已运行装置经验,工作人员年受照剂量将不会超过本项目的工作人员剂量约束值 5mSv/a , 公众年受照剂量也将低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

(5) HIAF 装置及拟销售的 HIAF 装置运行、维修维护过程中可能发生的故事主要是工作人员在设备开机出束的情况下误入机房内造成的人身伤害。HIAF 装置及拟销售的 HIAF 装置设计有功能齐全,具有安全冗余的高安全等级的安全联锁系统,采用清场搜索、紧急停机、警报装置等安全设备和措施,并且在进行调试及维修维护活动前确认辐射安全防护措施与用户单位使用环评一致,所有能够辐射安全防护措施已落实可用。保证工作人员在调试和维修维护过程中的安全。此外,近代物理所拟制定辐射事故应急预案和一系列辐射安全管理制度,通过加强管理,严格遵守各种规章制度和操作规程,采取有效的事故预防措施,可有效防止事故的发生,减小和缓解事故的影响。近代物理所在调试和维修维护期间的辐射安全与防护措施满足相关标准要求。

(6) 对近代物理所辐射工作能力的分析评价表明,其辐射工作人员的能力能够达到相关要求;单位设立专门的辐射安全与环境保护管理机构,能够做到

职责和分工明确，满足管理要求；近代物理所在射线装置调试场所采取的安全防护措施，能够满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。配备了工作人员个人防护用品和辐射监测仪表；近代物理所正在完善相关辐射安全管理制度，按要求制定完成并严格落实以后，能够确保 HIAF 装置及拟销售的 HIAF 装置运行和维修维护过程中的安全；在严格按照国家相关法律法规以及技术规范制定管理制度，完善以上提出各项要求后，能够满足国家相关的管理及技术层面要求。

(7) 建设单位按照《环境影响评价公众参与办法》（生态环境部令第 4 号）的规定，通过网络公示、项目所在地报纸公示、项目所在地张贴公示等方法开展了公众参与工作，至意见反馈截止日期，未收到与本项目环境影响和环境保护措施有关的建议和意见。

综上所述，本项目在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，本项目的建设对环境和影响符合环境保护的要求，故从环境影响的角度考虑，本项目的建设是可行的。

6.2 审批部门审批决定

一、你单位此次核技术利用改扩建项目位于惠州市惠东县黄埠镇东头村大坑口附近。项目主要内容为:为适应国际相关科研领域发展需要，计划对原已获得环境影响评价文件批复(粤环审[2017]671 号)的 1 套强流重离子加速器装置(简称 HIAF，束流离子最大能量 4.15 吉电子伏/核子($^{12}\text{C}^{6+}$)，最大流强 $7.0\text{E}+11$ 每脉冲粒子数，属 I 类射线装置)进行改扩建，并增加 HIAF 销售(含建造)、使用(安装调试、维修维护)活动。具体包括:

(一)改扩建建设内容。保持 HIAF 最大能量、最大流强及离子类型等参数不变，优化加速器装置设计，主要包括:延长 HIAF 装置超导直线加速器隧道长度，将原低能核结构谱仪，强流离子束辐照终端合并为低能综合终端，新增高能综合端和高能量密度物理终端，优化放射性次级束分离器设计、外靶实验终端屏蔽设计，并在加速器隧道上方地面新建直线设备楼、1 号测试大厅、2 号测

试大厅等配套建筑。

(二)HIAF 销售(含建造)、使用活动。在国内对上述 HIAF(属I类射线装置)进行销售(含建造),并对用户单位开展相应的使用(安装调试、维修维护)活动。年最大销售、使用(安装调试、维修维护)量为 1 套。

二、广东省环境辐射监测与核应急响应技术支持中心于 2024 年 1 月 29 日组织专家对报告书进行了技术评审,出具的评估意见认为,报告书有关该扩建项目建设可能造成的环境影响分析,预测和评价内容,以及提出的辐射安全防护措施合理可行,环境影响评价结论总体可信。你单位应按照报告书内容组织实施

三、项目在建设和运行中应严格落实报告书提出的各项辐射安全防护措施以及辐射安全责任,确保辐射工作人员有效剂量约束值低于 5 毫希沃特/年,公众有效剂量约束值低于 0.1 毫希沃特 1 年。

四、项目建造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。项目建成后,你单位应按规定程序重新申请辐射安全许可证。

五、项目建造期环境保护日常监督管理工作由惠州市生态环境局负责,建成中领辐射安全许可后由我省生态环境部门协同生态环境部华南核与辐射安全监管站负责该项目的环境保护日常监督检查工作。

6.3 审批意见落实情况

本项目属于改扩建类项目,通过与环评影响报告书及其批复内容对比分析,满足三同时的要求,落实的环境影响评价报告提出的各项污染防治措施。审批意见落实情况一览表见表 6-1。

表 6-1 审批意见落实情况一览表

序号	审批部门审批决定	落实情况
1	你单位此次核技术利用改扩建项目位于惠州市惠东县黄埠镇东头村大坑口附近。项目主要内容为:为适应国际相关科研领域发展需要,计划对原已获得环境影响评价文件批复(粤环审[2017]671号)的 1 套强流重离子加速器装置(简称	已落实,本次核技术利用改扩建项目位于广东省惠州市惠东县黄埠镇东头村大科学装置园区。 项目主要内容为:建设了强流重离子加速器装置(HIAF),装置最大能量 4.15GeV/u (¹² C),最大流强 7.0×10 ¹¹ PPP (¹² C),

	HIAF, 束流离子最大能量 4.15 吉电子伏/核子 ($^{12}\text{C}^{6+}$), 最大流强 $7.0\text{E}+11$ 每脉冲粒子数, 属 I 类射线装置)进行改扩建, 并增加 HIAF 销售(含建造)、使用(安装调试、维修维护)活动。	典型粒子类型为 ^{12}C 、 ^{18}O 、 ^{78}Kr 、 ^{209}Bi 及 ^{238}U , 由强流超导离子源 SECR (简称离子源)、强流超导直线加速器 (简称 iLinac)、增强器 (Booster Ring, 简称 BRing)、放射性次级束分离器 (High energy Fragment Separator, 简称 HFRS)、高精度环形谱仪 (Spectrometer Ring, 简称 SRing)、低能综合终端组成, 并增加 HIAF 销售(含建造)、使用(安装调试、维修维护)活动。
2	改扩建建设内容。保持 HIAF 最大能量、最大流强及离子类型等参数不变, 优化加速器装置设计, 主要包括: 延长 HIAF 装置超导直线加速器隧道长度, 将原低能核结构谱仪, 强流离子束辐照终端合并为低能综合终端, 新增高能综合端和高能量密度物理终端, 优化放射性次级束分离器设计、外靶实验终端屏蔽设计, 并在加速器隧道上方地面新建直线设备楼、1 号测试大厅、2 号测试大厅等配套建筑。	已落实, 本次验收中, 保持 HIAF 最大能量、最大流强及离子类型等参数不变。
3	HIAF 销售(含建造)、使用活动。在国内对上述 HIAF(属 I 类射线装置)进行销售(含建造), 并对用户单位开展相应的使用(安装调试、维修维护)活动。年最大销售、使用(安装调试、维修维护)量为 1 套。	已落实, HIAF 销售(含建造)、使用活动。在国内对上述 HIAF(属 I 类射线装置)进行销售(含建造), 并对用户单位开展相应的使用(安装调试、维修维护)活动。年最大销售、使用(安装调试、维修维护)量为 1 套。
4	广东省环境辐射监测与核应急响应技术支持中心于 2024 年 1 月 29 日组织专家对报告书进行了技术评审, 出具的评估意见认为, 报告书有关该扩建项目建设可能造成的环境影响分析, 预测和评价内容, 以及提出的辐射安全防护措施合理可行, 环境影响评价结论总体可信。你单位应按照报告书内容组织实施	已落实, 近代物理所已按照环评批复、报告书辐射安全防护措施进行建设。
5	项目在建设和运行中应严格落实报告书提出的各项辐射安全防护措施以及辐射安全责任, 确保辐射工作人员有效剂量约束值低于 5 毫希沃特/年, 公众有效剂量约束值低于 0.1 毫希沃特 1 年。	已落实, 在建设和运行中应严格落实报告书提出的各项辐射安全防护措施以及辐射安全责任。 经过监测, 现有定的辐射安全防护措施可以有效保证辐射工作人员有效剂量约束值低于 5 毫希沃特/年, 公众有效剂量约束值低于 0.1 毫希沃特 1 年。
6	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)的有关规定, 你单位须据此批复文件并满足相关条件后向环境保护部申请办理辐射安全许可证的相关手续, 取得许可证后方可从事销售(含建造)和使用活动, 并及时开展环保验收工作。	已落实, 近代物理所根据批复文件并满足相关条件后已向环境保护部申请办理辐射安全许可证的相关手续, 并及时开展了环保验收工作。

7 验收监测内容

2026 年 7 月 20 日，浙江国辐环保科技有限公司进行了现场冷却水取样检测，2026 年 8 月 3 日~8 月 4 日广州星环科技有限公司对辐射工作场所及外环境进行了辐射监测，监测报告见附件 5，监测内容如下：

- (1) γ 辐射空气吸收剂量率；
- (2) 中子剂量当量率；
- (3) 冷却水中总 β ；
- (4) 放射性废物柜表面。

7.1 验收监测工况要求

本次验收监测在确保主体工程调试工况稳定、环境保护设施运行正常的情况下进行，如实记录监测时的实际工况。

工况 1：开机运行时（最大能量 4.15GeV/u（12C），最大流强 7.0×10^{11} PPP（12C），束流全通）

工况 2：设备运行约 3 天后，停机 1 小时后，进入各终端，对典型实验、维修点位进行检测。

工况 3：设备运行约 3 天后，停机 3 小时以上，对辐射背景进行调查检测。

工况 4：对放射性废物柜表面进行检测，目前固废存量约 0.3m^3 ，其中，法拉第筒约 0.2m^3 ；真空管道约 0.1m^3 。

冷却水监测工况：设备运行约 3 天后，停机半小时进行取样。

7.2 验收监测因子

项目监测因子为 γ 辐射剂量率、中子周围剂量当量率及冷却水中总 β 。

7.3 监测点位

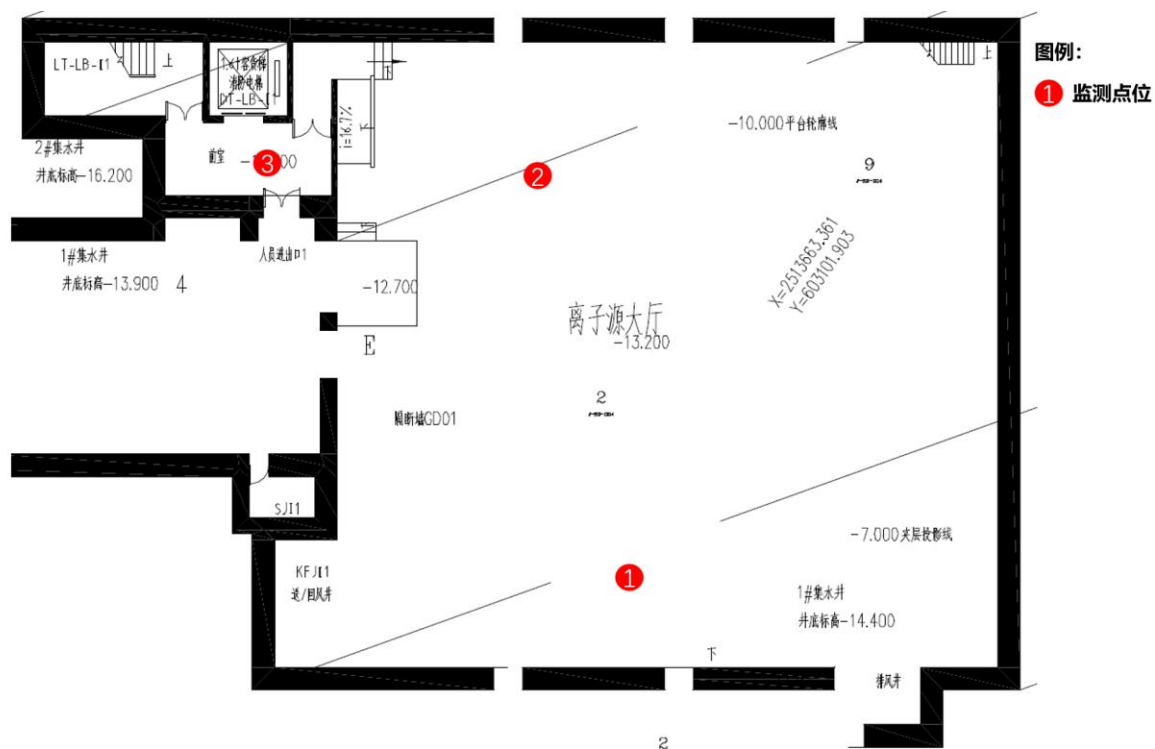


图 7-1 离子源大厅的监测点位

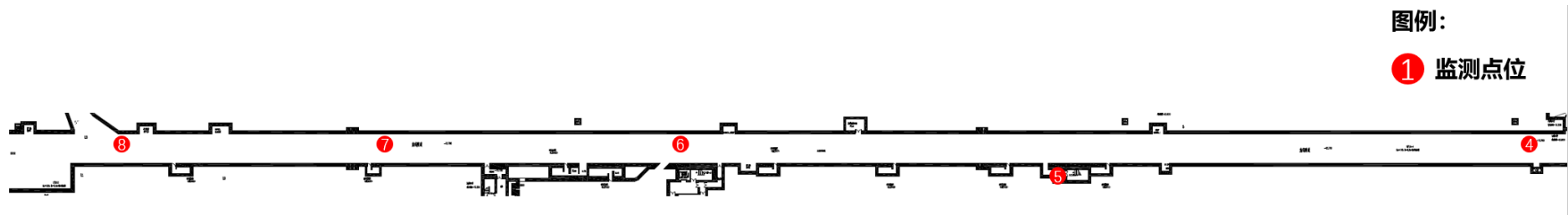
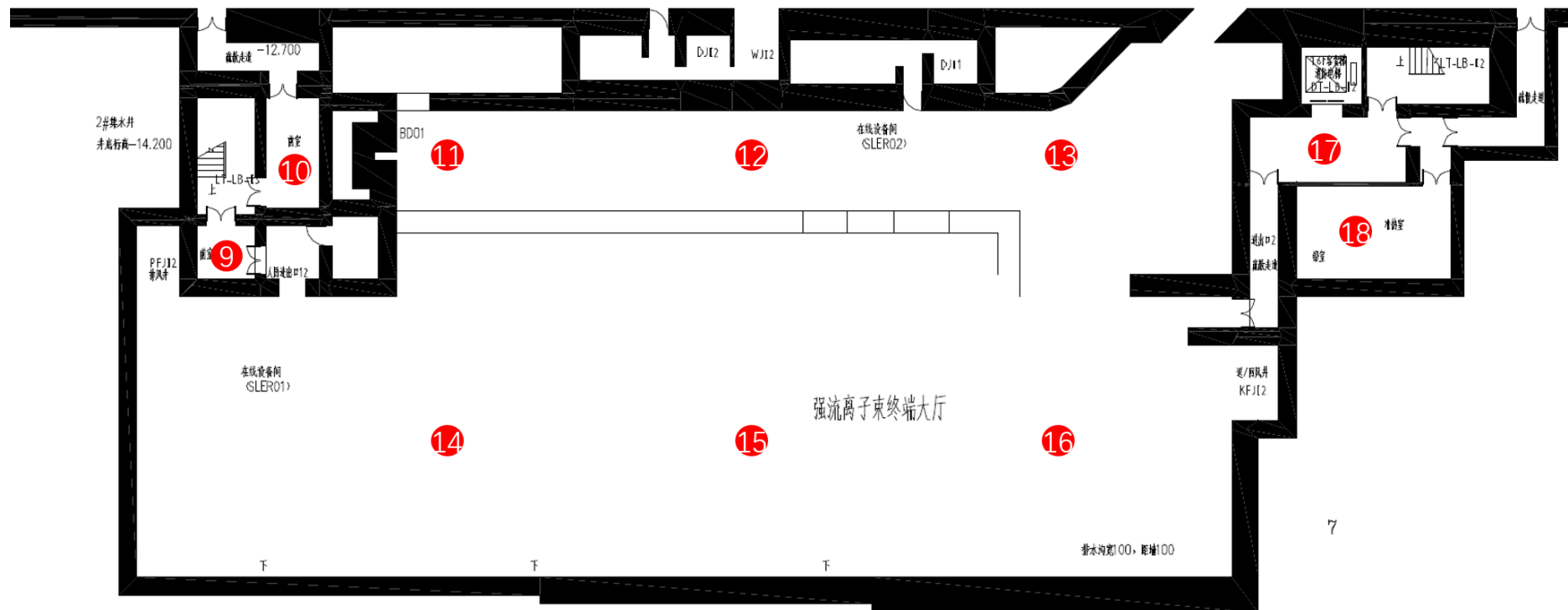


图 7-2 超导直线监测点位图

1 监测点位



127

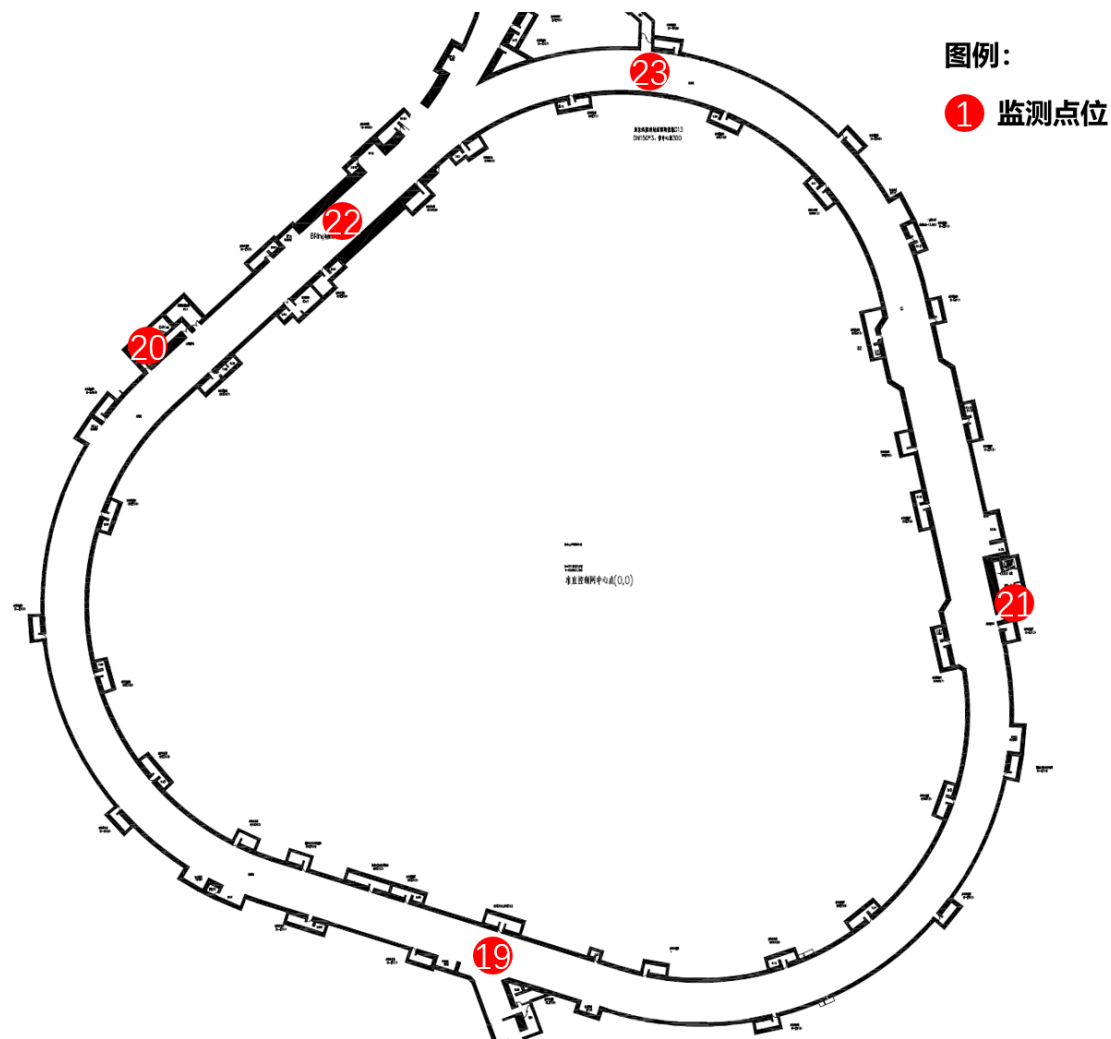


图 7-4B Ring 监测点位图

1 监测点位

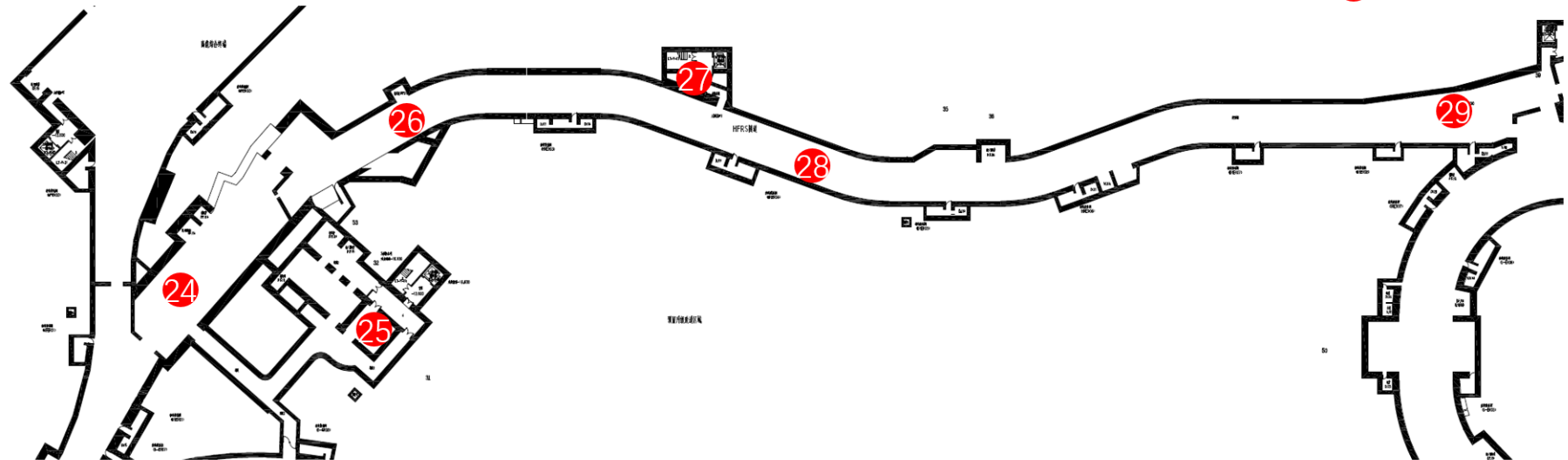


图 7-5HFRS 监测点位图

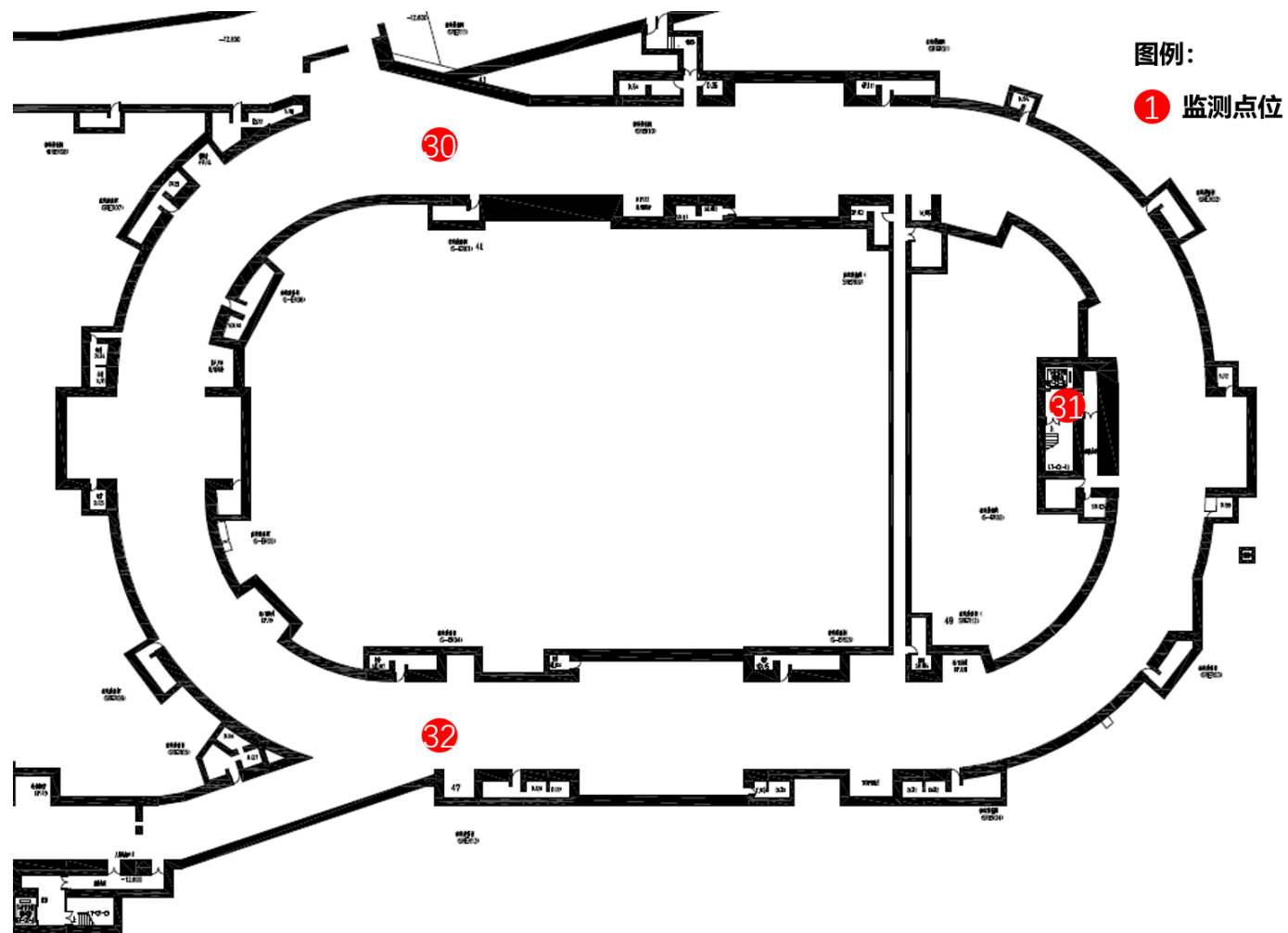


图 7-6SRing 监测点位图

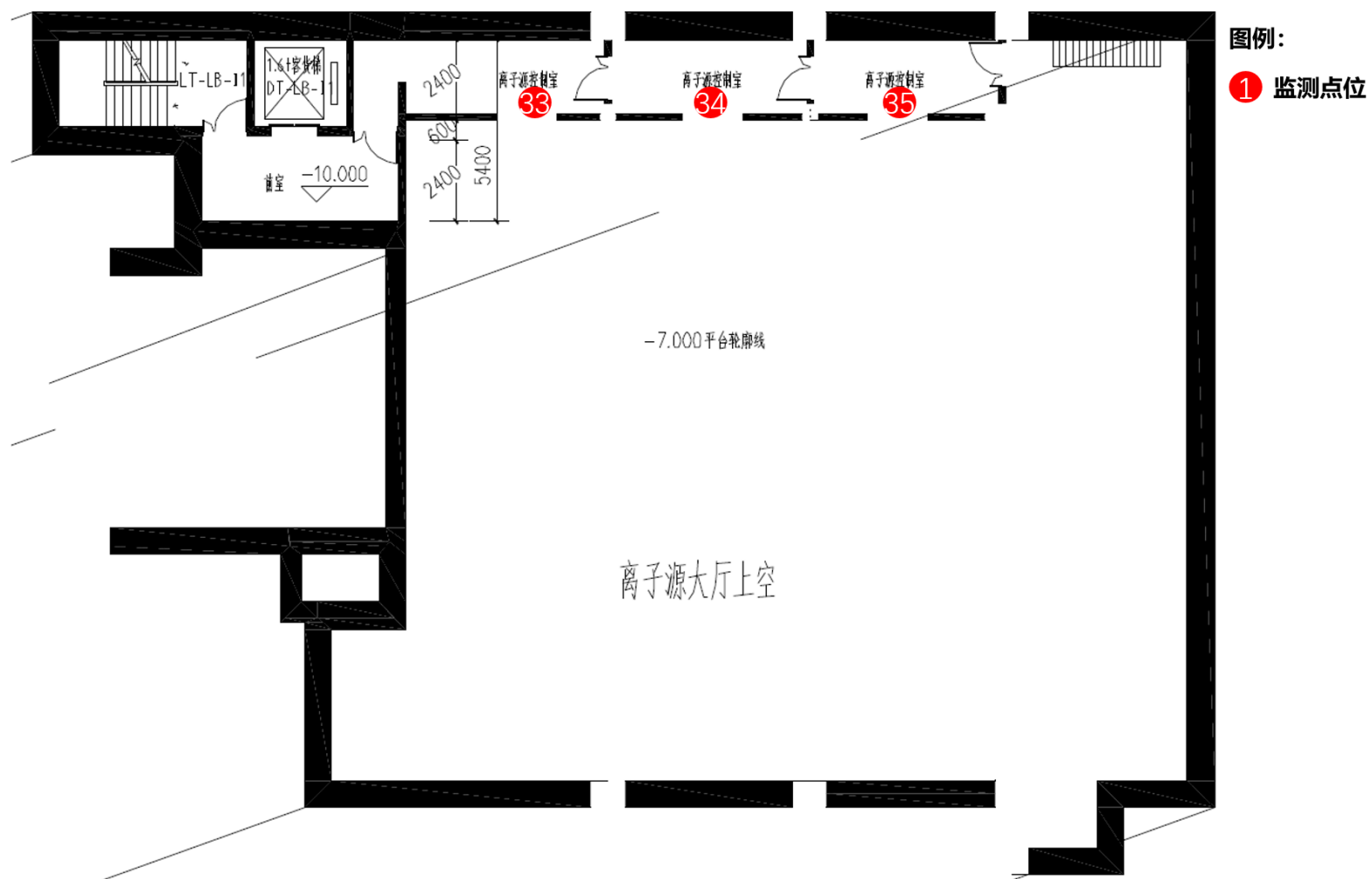


图 7-7 离子源大厅上空监测点位图

图例:

① 监测点位

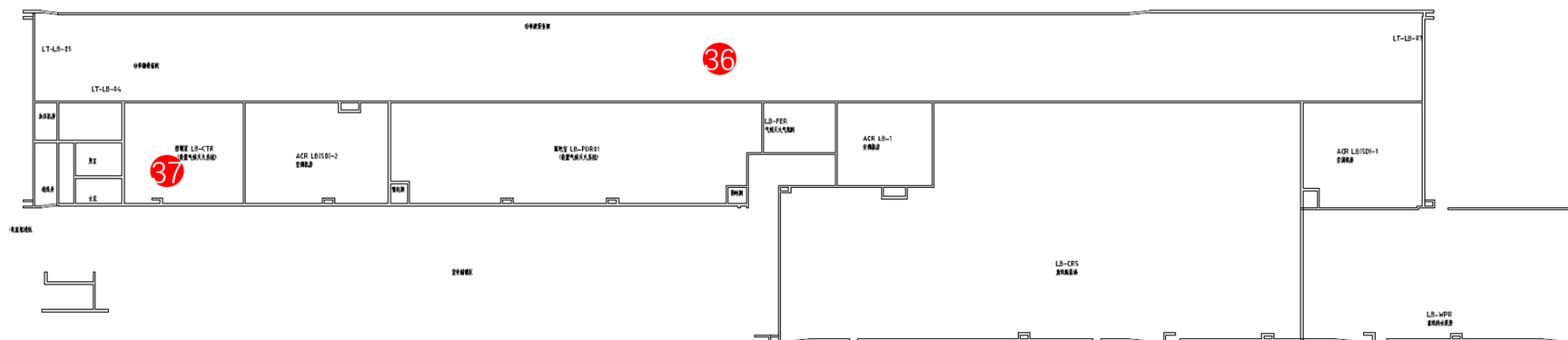


图 7-8 直线设备楼 1 监测点位图

图例：

① 监测点位

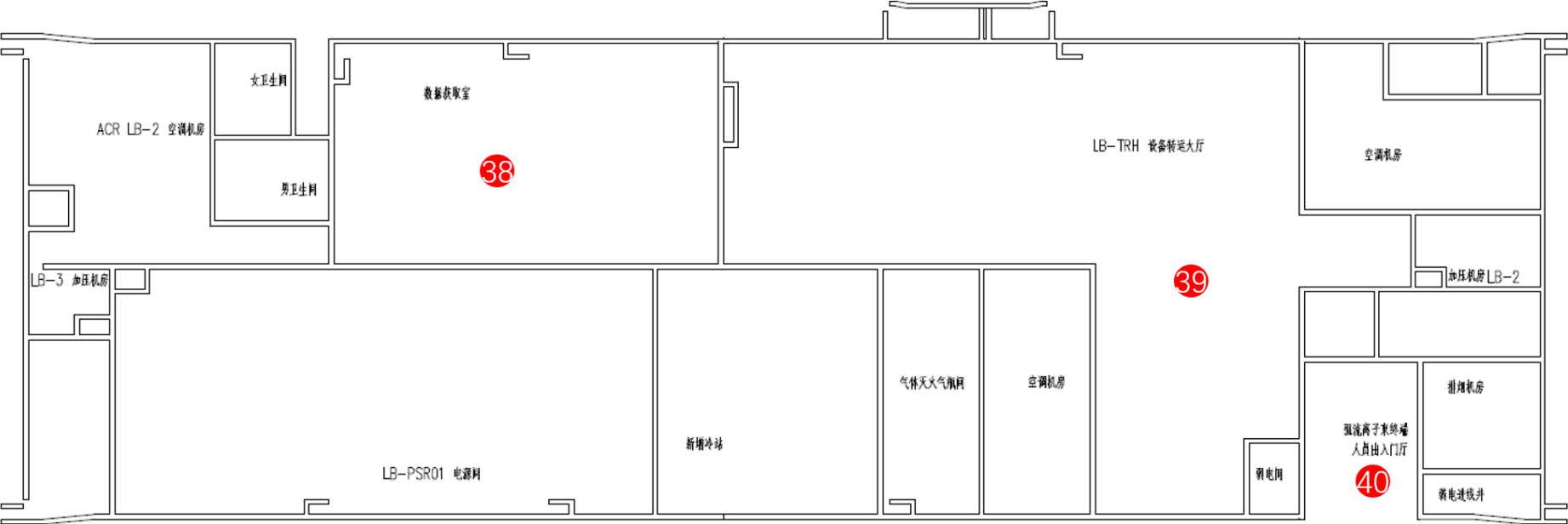


图 7-9 直线设备楼监测点位图

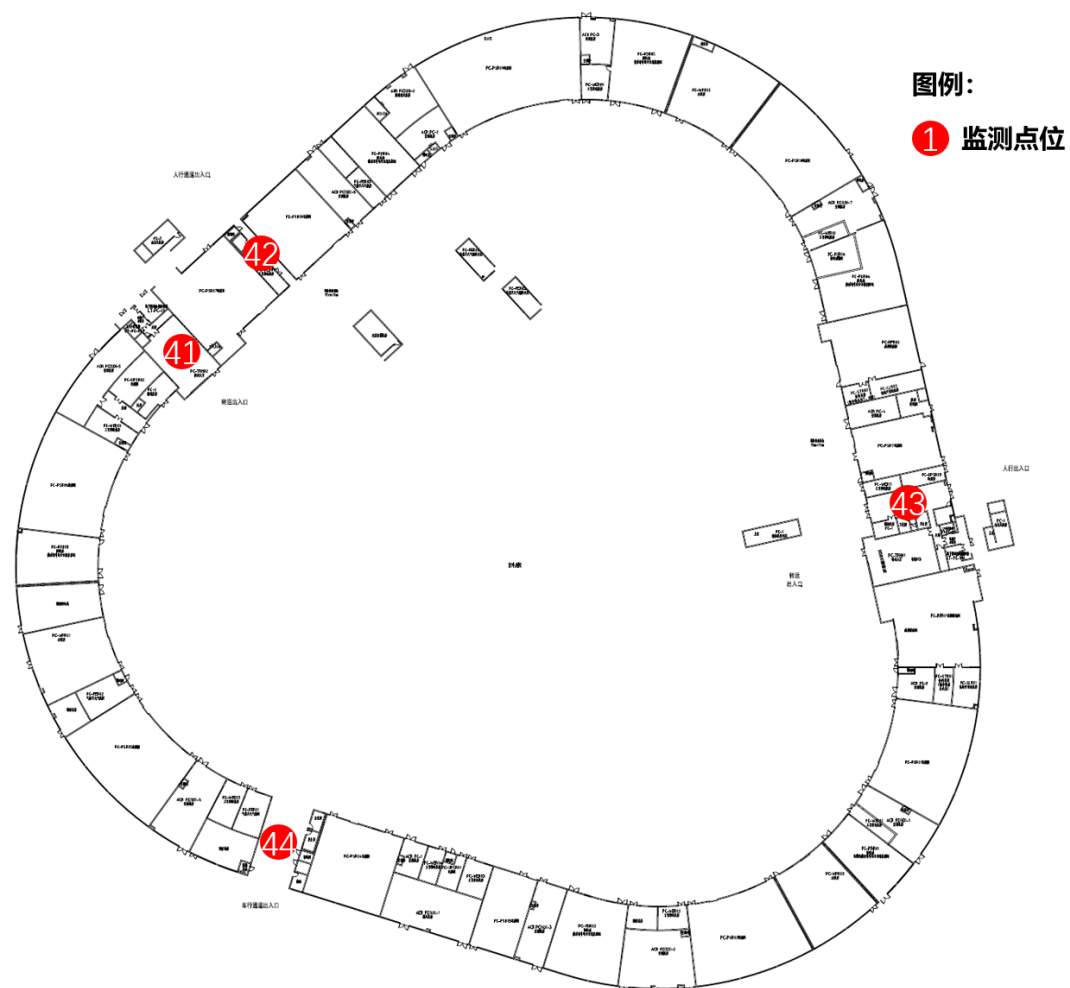


图 7-10 1 号测试大厅监测点位图

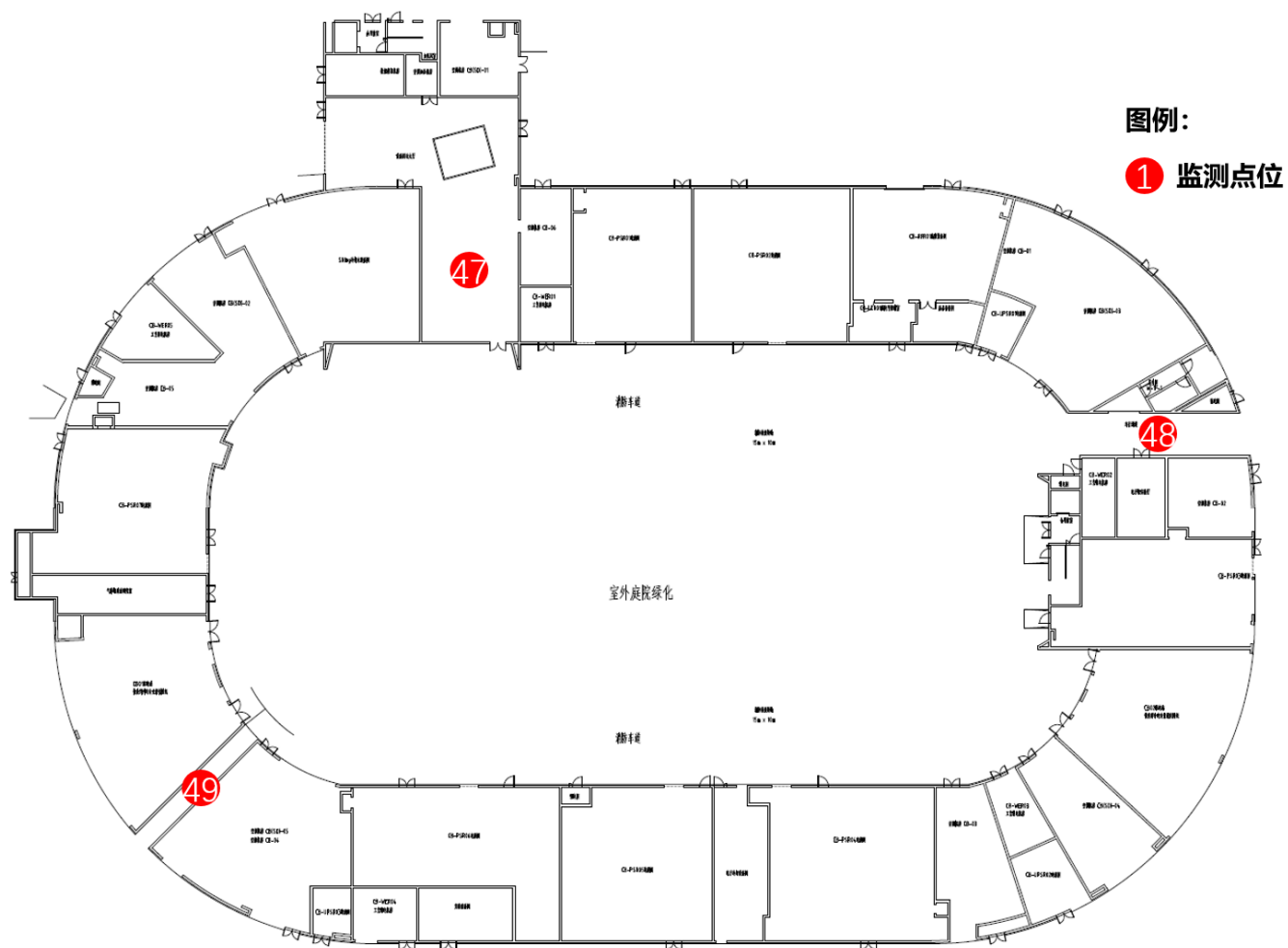


图 7-122 号测试大厅监测点位图



图 7-13 外环境监测点位图



图 7-14 冷却水取样点位

8 质量保证与质量控制

8.1 监测分析方法

8.1.1 γ 辐射剂量率

采用便携式监测仪表，以巡测加定点的测量方式进行。监测工作场所时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 4 次，每次间隔 5 秒钟，取平均值。开展环境辐射监测时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 10 次，每次间隔 10 秒钟，取平均值。

8.1.2 中子周围剂量当量率

采用便携式监测仪表，以巡测加定点的测量方式进行。监测工作场所时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 4 次，每次间隔 5 秒钟，取平均值。开展环境辐射监测时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 10 次，每次间隔 10 秒钟，取平均值。

8.1.3 样品分析

样品容器选用聚乙烯塑料桶。采集工具先用洗涤剂除去油污、用自来水冲洗干净，再用 10%硝酸或者盐酸洗刷，用自来水冲洗干净后使用。向盛水容器中按 10mL 酸/L 水样加入浓 HNO_3 使水样 pH 为 1.5 左右，避免器壁对放射性的吸附。。样品送实验室开展放射性分析。

8.1.4 监测依据

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；

《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；

《水质 总 α 放射性的测定 厚源法》（HJ 898-2017）；

《水质 总 β 放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）；

《电离辐射工作场所监测的一般规定》（EJ 381-1989）。

8.2 监测仪器

本次监测采用的监测设备及主要技术性能指标见表 8-1。

表 8-1 监测设备及主要技术性能指标

仪器名称	型号	出厂编号	主要技术性能指标	检定有效期
X-γ 辐射剂量当量率仪	AT1123 型	56810	能量范围：15keV~10MeV 测量范围：50nSv/h~10Sv/h	2026/9/4
中子周围剂量当量率仪	RN200 型	NR2024H1101	能量范围：0.0025eV~15MeV 测量范围：0.01 μSv/h~99.99mSv/h	2026/12/3
流光正比计数器	MPC9604	GF-12-1-2016	探测器：流光式正比计数管，使用 P-10 气体（90%氙气 + 10%甲烷） 有效面积：约 20 cm ² 本底：α 800V；β 坪斜 ≤ 2.5%/100V，坪长 > 200V	/
流光正比计数器	MPC9604	19018513	探测器：流光式正比计数管，使用 P-10 气体（90%氙气 + 10%甲烷） 有效面积：约 20 cm ² 本底：α 800V；β 坪斜 ≤ 2.5%/100V，坪长 > 200V	/

8.3 验收监测质量控制和保证

- 1、监测单位通过中国国家认证认可监督管理委员会资质认定；
- 2、合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性；
- 3、监测方法采用国家有关部门颁布的标准，测量操作严格按照标准进行；
- 4、监测仪器定期经计量部门检定校准，合格后方可使用，每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否良好；
- 5、样品采集、运输、保存、实验室分析和数据计算的全过程按照相应规范进行；
- 6、监测至少 2 名监测人员，监测人员必须按国家规定持证上岗；

7、由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；

8、整个监测过程必须有完整的记录，采样期间发生的任何异常情况及未能按方案执行的原因，都需要详细记录说明；

9、测量过程中，测量操作严格按照标准进行；

10、最终的分析测试结果和采样记录，必须按规范进行数据处理，并执行严格的三级审核制度。此外，根据最新的监管趋势，监测机构正被要求使用信息管理系统对数据和信息进行全过程管理，以确保操作留痕、数据可追溯，防止篡改或伪造。

9 验收监测结果

9.1 运行工况

本项目现场监测时，分为四种工况进行监测。

工况 1：开机运行时（最大能量 4.15GeV/u （12C），最大流强 $7.0 \times 10^{11}\text{PPP}$ （12C），束流全通）

工况 2：设备运行约 3 天后，停机 1 小时后，进入各终端，对典型实验、维修点位进行检测。

工况 3：设备运行约 3 天后，停机 3 小时以上，对辐射背景进行调查检测。

工况 4：对放射性废物柜表面进行检测，目前固废存量约 0.3^3 ，其中，法拉第筒约 0.2^3 ；真空管道约 0.1^3 。

冷却水监测工况：设备运行约 3 天后，停机半小时进行取样。

9.2 验收监测结果

表 9-1 开机及停机时 γ 剂量率监测结果

点位 编号	点位描述	开机时检测结果($\mu\text{Sv/h}$)		停机时检测结果($\mu\text{Sv/h}$)	
		测量值	标准差	测量值	标准差
1	SCER1 处	/	/	0.24	0.01
2	SCER2 处	/	/	0.25	0.01
3	离子源大厅前室	/	/	0.22	0.01
4	直线隧道前段	/	/	0.23	0.01
5	直线隧道内前室	/	/	0.23	0.01
6	超导直线束流偏转点 (进入低能综合终端)	/	/	0.24	0.01
7	直线隧道后段	/	/	0.24	0.01
8	超导直线束流偏转点 (进入 BRing)	/	/	0.23	0.01
9	低能综合终端前室 (1)	/	/	0.21	0.01
10	低能综合终端前室 (2)	/	/	0.21	0.01
11	低能综合终端束流偏转点 (多核子转移实验)	/	/	0.28	0.01
12	低能综合终端束流偏转点 (低能核物理实验)	/	/	0.26	0.01
13	低能综合终端束流偏转点 (低能离子束辐照实验)	/	/	0.26	0.01
14	低能综合终端束流偏转点 (多核子转移实验靶点)	/	/	0.27	0.01
15	低能综合终端束流偏转点 (低能核物理实验靶点)	/	/	0.27	0.01
16	低能综合终端束流偏转点 (低能离子束辐照实验靶点)	/	/	0.27	0.01
17	低能综合终端前室 (3)	/	/	0.27	0.01

18	低能综合终端前室 (4)	/	/	0.23	0.01
19	Bring 注入线	/	/	0.26	0.01
20	Bring 前室 (1)	/	/	0.24	0.01
21	Bring 前室 (2)	/	/	0.24	0.01
22	Bring 引出线	/	/	0.96	/
23	Bring 与高活化部件检修 间通道处	/	/	0.26	0.01
24	HFRS 初级靶	/	/	0.31	0.01
25	高活化部件检修间内有 人操作间	/	/	0.23	0.01
26	HFRS 预分离器	/	/	0.30	0.01
27	HFRS 前室	/	/	0.22	0.01
28	HFRS 主分离器前段	/	/	0.23	0.01
29	HFRS 主分离器后段	/	/	0.24	0.01
30	SRing 注入线	/	/	0.26	0.01
31	SRing 前室	/	/	0.23	0.01
32	SRing 引出线	/	/	0.24	0.01
33	离子源大厅上空控制室 (1)	0.28	0.01	0.29	0.01
34	离子源大厅上空控制室 (2)	0.28	0.01	0.28	0.01
35	离子源大厅上空控制室 (3)	0.32	0.01	0.32	0.01
36	直线设备楼 1 功率源设 备间	0.32	0.02	0.31	0.01
37	直线设备楼 1 灭火控制 室	0.26	0.01	0.26	0.01
38	直线设备楼 2 数据获取 室	0.27	0.01	0.27	0.01
39	直线设备楼 2 转运大厅	0.28	0.01	0.27	0.01
40	直线设备楼 2 人员出入 门厅	0.27	0.01	0.27	0.01
41	1 号测试大厅转运 大厅	0.29	0.02	0.28	0.01

42	1 号测试大厅人行通道	0.31	0.02	0.31	0.01
43	1 号测试大厅主入口大厅	0.37	0.01	0.34	0.02
44	1 号测试大厅车行通道	0.29	0.01	0.27	0.01
45	2 号综合站房低温站 (1)	0.28	0.01	0.27	0.01
46	2 号综合站房低温站 (2)	0.26	0.01	0.25	0.01
47	2 号测试大厅转运大厅	0.28	0.01	0.30	0.01
48	2 号测试大厅车行通道	0.32	0.01	0.31	0.01
49	2 号测试大厅人行通道	0.31	0.01	0.29	0.01
50	近代物理所惠州工作区 (1)	0.21	0.01	0.23	0.01
51	近代物理所惠州工作区 (2)	0.23	0.01	0.23	0.01
52	宿舍楼	0.22	0.01	0.23	0.01
53	食堂	0.22	0.01	0.22	0.01
54	近代物理所惠州工作区 (3)	0.23	0.01	0.23	0.01
55	直线设备楼西侧道路	0.26	0.01	0.24	0.01
56	运行楼	0.22	0.01	0.23	0.01
57	离子源大厅东侧道路	0.23	0.01	0.24	0.01
58	制冷中心	0.21	0.01	0.21	0.01
59	综合测试大厅	0.22	0.01	0.22	0.01
60	Bring 东侧道路	0.22	0.01	0.23	0.01
61	1 号综合站房	0.22	0.01	0.22	0.01
62	2 号综合站房东侧道路	0.26	0.01	0.25	0.01

注：1、以上数据已校准，校准系数为 1.01；

2、在指定的位置进行定点检测，待仪器读数稳定后每个点间隔 10s 读取 10 个读数；读数大于本底值 3 倍时，读取 1 个最大数值；

3、检测结果没有扣除本底值和宇宙射线响应值；

4、测量值“/”表示该工况时，人员无法进入检测。

表 9-2 停机 1h 后典型实验、维修点的 γ 剂量率监测结果

点位编号	点位描述	检测结果($\mu\text{Sv/h}$)	
		测量值	标准差
1	低能综合终端靶件更换工作位置	0.31	0.01
2	高能综合终端靶件更换工作位置	0.28	0.01
3	HFRS 预分离器有人操作间	0.28	0.01
4	HFRS 预分离器靶件更换工作位置	0.28	0.01
5	外靶实验终端靶件更换工作位置	0.31	0.01
6	SRing 靶件更换工作位置	0.31	0.01
7	高能量密度物理终端靶件更换工作位置	0.30	0.01
8	离子源	0.28	0.01

注：1、以上数据已校准，校准系数为 1.01；

2、在指定的位置进行定点检测，待仪器读数稳定后每个点间隔 10s 读取 10 个读数；读数大于本底值 3 倍时，读取 1 个最大数值；

3、检测结果没有扣除本底值和宇宙射线响应值。

表 9-3 放射性固废柜监测结果

点位编号	点位描述	检测结果($\mu\text{Sv/h}$)	
		测量值	标准差
1	放射性固废柜表面	0.30	0.01

注：1、以上数据已校准，校准系数为 1.01；

2、先对检测点位进行巡测，再进行定点检测，待仪器读数稳定后每个点间隔 10s 读取 10 个读数；读数大于本底值 3 倍时，读取 1 个最大数值；

3、检测结果没有扣除本底值和宇宙射线响应值。

表 9-4 开机及停机时中子剂量率监测结果

点位 编号	点位描述	开机时检测结果($\mu\text{Sv/h}$)		停机时检测结果($\mu\text{Sv/h}$)	
		测量值	标准差	测量值	标准差
1	SCER1 处	/	/	未检出	/
2	SCER2 处	/	/	未检出	/
3	离子源大厅前室	/	/	未检出	/
4	直线隧道前段	/	/	未检出	/
5	直线隧道内前室	/	/	未检出	/
6	超导直线束流偏转点 (进入低能综合终端)	/	/	未检出	/
7	直线隧道后段	/	/	未检出	/
8	超导直线束流偏转点 (进入 BRing)	/	/	未检出	/
9	低能综合终端前室 (1)	/	/	未检出	/
10	低能综合终端前室 (2)	/	/	未检出	/
11	低能综合终端束流偏 转点 (多核子转移实 验)	/	/	未检出	/
12	低能综合终端束流偏 转点 (低能核物理实验)	/	/	未检出	/
13	低能综合终端束流偏 转点 (低能离子束辐 照实验)	/	/	未检出	/
14	低能综合终端束流偏 转点 (多核子转移实 验靶点)	/	/	未检出	/
15	低能综合终端束流偏 转点 (低能核物理 实验靶点)	/	/	未检出	/
16	低能综合终端束流偏 转点 (低能离子 束辐照实验靶点)	/	/	未检出	/
17	低能综合终端前室 (3)	/	/	未检出	/
18	低能综合终端前室 (4)	/	/	未检出	/
19	Bring 注入线	/	/	未检出	/

20	Bring 前室 (1)	/	/	未检出	/
21	Bring 前室 (2)	/	/	未检出	/
22	Bring 引出线	/	/	未检出	/
23	Bring 与高活化部件检修间通道处	/	/	未检出	/
24	HFRS 初级靶	/	/	未检出	/
25	高活化部件检修间内有人操作间	/	/	未检出	/
26	HFRS 预分离器	/	/	未检出	/
27	HFRS 前室	/	/	未检出	/
28	HFRS 主分离器前段	/	/	未检出	/
29	HFRS 主分离器后段	/	/	未检出	/
30	SRing 注入线	/	/	未检出	/
31	SRing 前室	/	/	未检出	/
32	SRing 引出线	/	/	未检出	/
33	离子源大厅上空控制室 (1)	未检出	/	未检出	/
34	离子源大厅上空控制室 (2)	未检出	/	未检出	/
35	离子源大厅上空控制室 (3)	未检出	/	未检出	/
36	直线设备楼 1 功率源设备间	未检出	/	未检出	/
37	直线设备楼 1 灭火控制室	未检出	/	未检出	/
38	直线设备楼 2 数据获取室	未检出	/	未检出	/
39	直线设备楼 2 转运大厅	未检出	/	未检出	/
40	直线设备楼 2 人员出入门厅	未检出	/	未检出	/
41	1 号测试大厅转运大厅	未检出	/	未检出	/
42	1 号测试大厅人行通道	未检出	/	未检出	/
43	1 号测试大厅主入口大厅	未检出	/	未检出	/

44	1 号测试大厅车行通道	未检出	/	未检出	/
45	2 号综合站房低温站 (1)	未检出	/	未检出	/
46	2 号综合站房低温站 (2)	未检出	/	未检出	/
47	2 号测试大厅转运大厅	未检出	/	未检出	/
48	2 号测试大厅车行通道	未检出	/	未检出	/
49	2 号测试大厅人行通道	未检出	/	未检出	/
50	近代物理所惠州工作区 (1)	未检出	/	未检出	/
51	近代物理所惠州工作区 (2)	未检出	/	未检出	/
52	宿舍楼	未检出	/	未检出	/
53	食堂	未检出	/	未检出	/
54	近代物理所惠州工作区 (3)	未检出	/	未检出	/
55	直线设备楼西侧道路	未检出	/	未检出	/
56	运行楼	未检出	/	未检出	/
57	离子源大厅东侧道路	未检出	/	未检出	/
58	制冷中心	未检出	/	未检出	/
59	综合测试大厅	未检出	/	未检出	/
60	Bring 东侧道路	未检出	/	未检出	/
61	1 号综合站房	未检出	/	未检出	/
62	2 号综合站房东侧道路	未检出	/	未检出	/

注：1、仪器检测出下限为 10nSv/h；

2、在指定的位置进行定点检测，待仪器读数稳定后每个点间隔 10s 读取 10 个读数；

3、测量值“/”表示该工况时，人员无法进入检测。

表 9-5 冷却水中总 β 检测结果

采样点位编号	采样点位	样品性状	样品编号	监测项目	监测结果	单位
1	一号测试大厅	冷却水：	CWX202607171076	总 β (总 β 放)	12	mBq/L

采样点位 编号	采样点位	样品性状	样品编号	监测项目	监测 结果	单位
	1 号	澄清		射性)		
2	一号测试大厅 2 号 - 1	冷却水: 澄清	CWX202607171077	总 β (总 β 放 射性)	2.7	mBq/L
3	一号测试大厅 2 号 - 2	冷却水: 澄清	CWX202607171078	总 β (总 β 放 射性)	3.6	mBq/L
4	一号测试大厅 3 号	冷却水: 澄清	CWX202607171079	总 β (总 β 放 射性)	4.0	mBq/L
5	二号测试大厅	冷却水: 澄清	CWX202607171080	总 β (总 β 放 射性)	2.0	mBq/L
6	直线 1 号	冷却水: 澄清	CWX202607171081	总 β (总 β 放 射性)	4.8	mBq/L
7	直线 2 号	冷却水: 澄清	CWX202607171082	总 β (总 β 放 射性)	2.4	mBq/L

注：一号测试大厅 1 号总 β 探测限为 2.1mBq/L，一号测试大厅 2 号 - 1 总 β 探测限为 2.1mBq/L，一号测试大厅 2 号 - 2 总 β 探测限为 1.7mBq/L，一号测试大厅 3 号总 β 探测限为 1.9mBq/L，二号测试大厅总 β 探测限为 1.8mBq/L，直线 1 号总 β 探测限为 1.8mBq/L，直线 2 号总 β 探测限为 1.8mBq/L。

9.3 工作人员受照射剂量计算

本项目正式运行期间工作人员主要分为三类：近代物理所惠州装置区加速器运行人员、实验操作人员、维修维护人员。

销售的 HIAF 装置工作人员主要分为两类：安装调试人员、维修维护人员。

9.3.1 正常运行期间工作人员

9.3.1.1 加速器运行人员

正常运行期间，加速器运行人员所受剂量主要来自于隧道内的活化部件。综合监测报告可知停机 1h 后典型、维修点人员可达处剂量率最大为 0.31 μ Sv/h（低能综合终端靶件更换工作位置），根据工作安排，隧道内巡查时间全年将不超过 20h，由此估算出瞬时辐射照射所致工作人员的最大个人年有效剂量为 6.20E-03mSv。

9.3.1.2 实验操作人员

本项目实验操作人员所受的辐射剂量结果如下表所示，HIAF 装置正常运行期间保守考虑，所有实验操作均由一名实验操作人员完成。

表 9-6 实验操作人员受照剂量估算

工作区域		剂量率, μSv/h	年受照时间, h	居留因子	受照剂量, mSv/a
监督区	运行楼内	0.22	960	1	2.11E-01
实验终端大厅内	低能综合终端	0.32	6		1.92E-03
	HFRS	0.28	6		1.68E-03
	SRling	0.31	6		1.86E-03
总计					2.17E-01

注：剂量率水平取自验收监测结果中较大值，受照时间均来自于近代物理所提供的相关材料。

9.3.1.3 维修维护人员

本项目检修工作人员所受的辐射剂量结果如下表所示，HIAF 装置正常运行期间保守考虑，所有工作均有一名检修工作人员完成。

工作区域		剂量率, μSv/h	年受照时间 ⁵ (h)	居留 因子	受照剂量 (mSv/a)
实验 终端 大厅 内	低能综合终端	0.32	48	1	1.54E-02
	HFRS	0.28	48		1.34E-02
	SRling	0.31	48		1.49E-02
	活化部件检修间		0.62		16
总计					5.36E-02

注：剂量率水平取自验收监测结果中较大值，受照时间均来自于近代物理所提供的相关材料

9.3.1.4 小结

综上所述，本项目 HIAF 装置在科学实验、运行维护活动期间辐射工作人员年最大受照剂量低于其剂量约束值 5mSv/a。

9.3.2 销售（含建造）和使用拟销售的 HIAF 装置工作人员

本项目销售（含建造）和使用拟销售的 HIAF 装置的辐射工作人员与装置区工作类似，其年最大受照剂量不会超过装置区辐射工作人员的受照剂量，因此同样低于其个人剂量约束值 5mSv/a。

9.3.3 正常运行期间公众

公众主要包括装置区内其他工作人员和周边道路的流动人员，根据监测结果，园区内公众所受最大剂量率为 $0.37\mu\text{Sv/h}$ ，按照工作时长一年 7392h，居留因子取 1/40，经计算，公众年最大受照剂量为 $6.84\text{E-}02\text{mSv}$ ，低于其个人剂量约束值 0.1mSv/a。

10 验收监测结论

10.1 辐射防护设施/措施运行情况

(1) 辐射安全防护措施

近代物理所已按照环保手续中的要求对 HIAF 装置辐射工作场所的屏蔽设计进行了建设，相关工作场所进行分区管理并设置明显的电离辐射警示标志；设置了较为完备安全联锁系统装置；配备了固定式辐射监测仪表（每个点位为中子+ γ ）实时监测，同时配备了便携式 X- γ 剂量率仪、便携式中子剂量率仪以及个人剂量报警仪等，定期对工作场所的辐射水平进行巡测，且每年委托有资质的单位对工作场所及周围环境进行年度监测。

销售（含建造）和使用的 HIAF 装置不会低于装置区 HIAF 装置的辐射安全与防护设置。

(2) 放射性三废

1) 放射性废气：

排风系统均采用初效（G4）、中效（F8）两级过滤净化措施（G4 级纤维式预过滤器，用于捕获小水滴，较大的潮湿盐晶体及其他大颗粒物（1-10 μm ）；F8 级超细纤维主过滤器，用于去除超细盐颗粒和其他小颗粒（<1 μm ）），采用高空排放方式，排气筒高度 17.5 米，高于临近建筑物 2 米。考虑到其排入大气后的扩散和稀释，其对环境的影响很小。

2) 放射性废液：

HIAF 装置共设置 5 个暂存池，单个容积 30 m^3 ，总存水容积设计为 150 m^3 ，位于车站附近。暂存池采用三级间歇式排水结构，每段容积为 10 m^3 。

HIAF 装置共设计检修区域约 17 段，每段主供管道上设置阀门一组。同时冷却水系统设置有隧道漏水监测及水箱液位监测及低水位停泵联锁。对于检修排放，在开展

冷却水系统检修前，可能需要排放检修区域的冷却水。检修时只排放检修区域的一段水路，不会全部排放，预期单次检修排放的总水量不会超过 15m^3 ，该类型检修频次最多 1 次/年。对于漏水排放，HIAF 冷却水系统设计有隧道漏水监测、水箱液位监测及低水位停泵联锁，保障单次事故的最大排水量不超过 10m^3 。HIAF 装置共设置 5 个暂存池，单个容积 30m^3 ，总存水容积设计为 150m^3 。暂存池上设有取样口，活化的冷却水在排放前委托有资质单位进行取样测量，满足放射性废水排放标准，并报审管部门批准后，方可排放。

3) 放射性固废：

隧道内设 3 间废物暂存间，水站附近另设 1 间存放树脂与滤芯。废物先暂存，达到容量后委托资质单位检测：达标者可复用或解控作一般废物；不达标送广东省城市放射性废物库，石墨靶暂存待接收。固废年最大产生量约 50kg ，按表面剂量率选用对应转运方式；暂存间设在控制区，专人管理并配备清场、急停装置。

(3) 辐射安全管理

建设单位已成立辐射安全与防护管理机构，并制定一系列辐射安全管理制度，制定较为完善的辐射事故应急预案、操作规程、监测方案、放射性废物管理制度，对辐射工作人员进行一系列培训，辐射工作人员均通过考核后上岗，为辐射工作人员配备了个人剂量计并定期监测，为每名辐射工作人员建立职业病健康档案，定期进行职业健康体检。按时向相关生态环境部门上报了年度评估报告。

综上，本项目辐射防护设施/措施运行情况可满足其环保手续中的相关要求。

10.2 放射性污染物排放监测结果及结论

(1) 辐射监测结果

1) 开机运行时（最大能量 4.15GeV/u (^{12}C)，最大流强 $7.0 \times 10^{11}\text{PPP}$ (^{12}C)，束流全通)， γ 剂量率监测结果 $0.21 \sim 0.37\mu\text{Sv/h}$ ，中子周围当量剂量率结果小于探测下限 10nSv/h ；

2) 周围环境的 γ 剂量率监测结果在 $0.21 \sim 0.26\mu\text{Sv/h}$ ，中子周围剂量当量率均小于

探测下限 10nSv/h;

综上，本项目综合考虑工作负荷、束流损失情况、装置布局、建筑结构布局以及生态环境主管部门的相关要求等因素，实际运行中 X/γ 和中子辐射剂量率满足环评报告及其批复中对辐射工作场所屏蔽体外剂量率水平的要求。

综上所述，近代物理所认真履行了国家环境保护审批和许可手续，严格执行了环保“三同时”制度，落实了本项目环保手续中所规定的各项污染防治和管理措施，经过现场验收监测，环保措施的环保效果也满足本项目环保手续中的相关要求。