

核技术利用建设项目
甘肃省同位素实验室项目（一期）
环境影响报告书

2021年1月

环境保护部监制

核技术利用建设项目
甘肃省同位素实验室项目（一期）
环境影响报告书

建设单位名称：中国科学院近代物理研究所

建设单位法人代表（签名或签章）：徐瑚珊



通讯地址：甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号

邮政编码：730030

联系人：骆鹏

电子邮箱：luopeng@impcas.ac.cn

联系电话：0931-4969198

打印编号: 1608513251000

编制单位和编制人员情况表

项目编号	9b48kq		
建设项目名称	甘肃省同位素实验室项目(一期)		
建设项目类别	50_191核技术利用建设项目 (不含在已许可场所增加不超出已许可活动种类和不高于已许可范围等级的核素或射线装置)		
环境影响评价文件类型	报告书		
一、建设单位情况			
单位名称 (盖章)	中国科学院近代物理研究所		
统一社会信用代码	121000004380021159		
法定代表人 (签章)	徐翔翊		
主要负责人 (签字)	赵红卫		
直接负责的主管人员 (签字)	陈金达		
二、编制单位情况			
单位名称 (盖章)	中国原子能科学研究院		
统一社会信用代码	12100000460000309R		
三、编制人员情况			
1. 编制主持人			
姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
许慧萍	2014035110350000003512110052	BH009725	许慧萍
2. 主要编制人员			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
金潇	审核	BH013175	金潇
严源	审定	BH013174	严源
孟庆森	第二、三、六、七章	BH009726	孟庆森
许慧萍	第一、四、五、八章	BH009725	许慧萍

目 录

1	概述	1
1.1	项目名称、地点	1
1.2	项目概况	1
1.2.1	单位概况	1
1.2.2	建设目的与意义	2
1.2.3	建设内容和规模	5
1.2.4	产业政策符合性分析	12
1.3	编制依据	13
1.3.1	遵循的法律、法规、部门规章和导则	13
1.3.2	采用的标准	14
1.3.3	其他资料	16
1.4	评价标准	16
1.4.1	放射性环境影响评价标准	16
1.4.2	电磁辐射	20
1.4.3	非放环境要素评价标准	21
1.5	评价范围和保护目标	23
1.5.1	辐射环境评价范围	23
1.5.2	非放射性环境要素评价范围及等级	23
1.5.3	保护目标	25
2	自然环境与社会环境概况	28
2.1	地理位置	28
2.2	自然环境概况	28
2.2.1	地形、地貌特征	28
2.2.2	地震	29
2.2.3	气候气象	29
2.2.4	水文地质概况	29
2.3	社会经济状况	30
2.3.1	人口情况	30
2.3.2	经济状况	30
2.3.3	交通运输状况	31
2.4	环境质量现状	31
2.4.1	辐射环境现状	31
2.4.2	空气质量现状	45
2.4.3	声环境质量现状	46
2.5	场址适宜性分析	47
3	工程分析与源项	48
3.1	项目规模与基本参数	48
3.2	工程设备与工艺分析	51
3.2.1	超重元素合成与核反应新机制研究	51
3.2.2	同位素产生与分离及其核心技术研究	60
3.2.3	人员配备情况	77

3.3	污染源项.....	78
3.3.1	非放射性源项分析.....	78
3.3.2	辐射源项分析.....	81
3.3.3	事故工况.....	92
3.4	废弃物.....	94
3.4.1	放射性废气.....	94
3.4.2	放射性废液.....	98
3.4.3	放射性固体废物.....	99
4	辐射安全与防护.....	101
4.1	场所布局与屏蔽.....	101
4.1.1	平面布局.....	101
4.1.2	辐射防护分区.....	110
4.1.3	屏蔽设计.....	123
4.2	人流物流设计.....	134
4.2.1	靶站、热室大厅、准备间人流物流.....	134
4.2.2	超重终端人流物流.....	135
4.2.3	辐射管理中心.....	135
4.3	安全联锁系统.....	144
4.3.1	设计原则.....	144
4.3.2	组成及结构.....	144
4.3.3	安全联锁系统关键设备.....	145
4.3.4	安全联锁逻辑.....	148
4.4	在线辐射监测系统.....	150
4.4.1	监测布点.....	150
4.4.2	探测器选择.....	154
4.4.3	数据处理与报警系统.....	158
4.4.4	辐射监测软件.....	159
4.5	通风系统.....	160
4.5.1	加速器.....	160
4.5.2	靶站.....	164
4.5.3	分离热室.....	165
4.5.4	超重终端二层非密封放射性实验室.....	170
4.5.5	辐射管理中心.....	170
4.6	其他防护措施.....	172
4.7	三废治理.....	172
4.7.1	废气及处理措施.....	172
4.7.2	放射性废液及处理措施.....	173
4.7.3	放射性固体废物及处理措施.....	181
4.8	服务期满后的环境保护措施.....	185
5	环境影响分析.....	186
5.1	建设阶段环境影响分析.....	186
5.1.1	施工期大气环境影响分析.....	186
5.1.2	施工期水环境影响分析.....	187

5.1.3	施工期噪声环境影响分析.....	187
5.1.4	施工期固废环境影响分析.....	189
5.1.5	生态环境影响分析.....	189
5.2	正常运行阶段影响分析.....	189
5.2.1	非放射性环境影响分析.....	189
5.2.2	辐射环境影响分析.....	192
5.3	事故情况下环境影响分析.....	237
5.3.1	事故分析.....	237
5.3.2	假想事故后果估算.....	240
6	辐射安全管理.....	251
6.1	辐射安全与环境保护管理机构.....	251
6.2	辐射工作人员.....	252
6.3	辐射安全管理制度.....	253
6.4	辐射监测.....	254
6.4.1	场所监测.....	254
6.4.2	个人剂量监测.....	255
6.4.3	环境监测.....	256
6.4.4	流出物监测.....	256
6.4.5	辐射监测设备.....	257
6.5	辐射事故应急.....	257
6.6	环保竣工验收“一览表”.....	260
7	代价-利益简要分析.....	262
7.1	利益分析.....	262
7.2	代价分析.....	262
7.2.1	社会代价.....	262
7.2.2	经济代价.....	263
7.2.3	环境代价.....	263
7.2.4	正当性分析.....	263
8	结论与建议.....	264
8.1	项目工程概况.....	264
8.2	辐射安全与防护.....	264
8.3	环境影响分析.....	264
8.3.1	施工期.....	264
8.3.2	营运期.....	265
8.4	辐射安全管理.....	265
8.5	公众参与情况.....	265
8.6	结论.....	266
8.7	建议与承诺.....	266

表目录

表 1-1 建设单位近几年履行核技术利用项目环保审批情况.....	2
表 1-2 本项目工程建设内容一览表.....	6
表 1-3 本项目拟使用射线装置情况.....	8
表 1-4 靶站、热室大厅非密封放射性工作场所放射性同位素操作情况.....	8
表 1-5 超重终端二层非密封放射性工作场所放射性同位素操作情况.....	11
表 1-6 本项目环保投资一览表.....	12
表 1-7 表面污染控制水平.....	17
表 1-8 废水中放射性核素排放导出限值.....	18
表 1-9 固体废物中放射性核素清洁解控水平.....	19
表 1-10 本项目电场强度控制目标.....	21
表 1-11 环境空气质量执行标准 单位: mg/m ³	21
表 1-12 噪声环境评价标准 单位: dB(A).....	22
表 1-13 排入城镇污水管网水质控制项目限值.....	22
表 1-14 大气污染物综合排放标准.....	22
表 1-15 建筑施工场界环境噪声排放标准 单位: Leq[dB(A)].....	23
表 1-16 噪声评价标准 单位: Leq[dB(A)].....	23
表 1-17 项目环境风险评价分级判定.....	24
表 1-18 评价范围范围内敏感目标情况.....	26
表 2-1 监测设备及主要性能指标.....	36
表 2-2 场址周边 500m 外照射剂量率监测结果.....	38
表 2-3 场址周边敏感点照射剂量率监测结果.....	39
表 2-4 场址内部外照射剂量率监测结果.....	39
表 2-5 气溶胶、土样及水样监测结果.....	42
表 2-6 甘肃省同位素实验室项目(一期)噪声现状监测结果.....	46
表 3-1 超重装置拟使用加速器的典型技术参数.....	48
表 3-2 超重终端二层非密封放射性工作场所放射性同位素操作情况.....	49
表 3-3 同位素生产研发拟使用加速器设计参数.....	49
表 3-4 靶站/热室大厅所在非密封放射性场所操作核素情况.....	49
表 3-5 目标核素产生方式.....	60

表 3-6 靶系统组成.....	63
表 3-7 本项目人员配备情况.....	77
表 3-8 施工期主要噪声源情况 单位: dB(A).....	79
表 3-9 营运期主要噪声源状况.....	80
表 3-10 危险物质使用情况.....	80
表 3-11 束流损失分布.....	81
表 3-12 辐照结束冷却 0min 后空气活化情况.....	85
表 3-13 超重元素合成研究加速器辐照结束冷却 10min 后冷却水活化情况.....	85
表 3-14 同位素产生及分离研究加速器辐照结束冷却 10min 后冷却水活化情况.....	86
表 3-15 辐照 209Bi 靶后冷却 1h 活化情况.....	88
表 3-16 辐照天然 Ga 靶后冷却 1h 活化情况.....	88
表 3-17 辐照天然 Zn 靶后冷却 1h 活化情况.....	89
表 3-18 其它材料活化产物情况.....	89
表 3-19 超重二层非密封放射性工作场所操作核素特征.....	91
表 3-20 超重装置终端每年排入环境的空气感生放射性核素总活度.....	95
表 3-21 干法操作各工艺环节释放份额.....	96
表 3-22 各工艺环节释放份额.....	96
表 3-23 放射性废气产生量.....	96
表 3-24 超重终端二层非密封放射性工作场所放射性废气产生量.....	98
表 3-25 本项目运行过程中放射性废液产生量.....	99
表 3-26 本项目运行过程中放射性固体废物产生量.....	100
表 4-1 甘肃同位素实验室主要建筑一览表.....	101
表 4-2 靶站、热室大厅各实验室情况.....	105
表 4-3 超重终端各实验室情况.....	108
表 4-4 各场所屏蔽设计.....	126
表 4-5 各热室屏蔽设计.....	127
表 4-6 辐射软件的详细功能.....	159
表 4-7 通风运行工况及工艺工作模式.....	160
表 4-8 加速器正常及过滤阶段排风量.....	161
表 4-9 本项目运行过程中放射性废液产生量.....	174

表 4-10 放射性废水处理设备参数一览表.....	177
表 4-11 本项目运行过程中放射性固体废物产生量.....	181
表 5-1 施工期距施工机械不同距离处的噪声值 单位: dB(A).....	188
表 5-2 项目厂界及敏感目标噪声预测结果.....	191
表 5-3 各靶件辐照情况.....	198
表 5-4 石墨碳管中的核素活度及其特征.....	203
表 5-5 209Bi 靶中的核素活度及其特征.....	203
表 5-6 天然 Ga 靶中的核素活度及其特征.....	203
表 5-7 天然 Zn 靶中的核素活度及其特征.....	204
表 5-8 干法操作热室操作 209Bi 靶时屏蔽体外剂量率水平.....	205
表 5-9 湿法操作热室操作天然 Ga 靶时屏蔽体外剂量率水平.....	206
表 5-10 湿法操作热室操作天然 Zn 靶时屏蔽体外剂量率水平.....	206
表 5-11 68Ge-68Ga 发生器制备研究箱体外剂量率水平.....	207
表 5-12 超重二层非密封放射性工作场所源项.....	208
表 5-13 手套箱屏蔽体外剂量率水平.....	208
表 5-14 关注点剂量率水平.....	209
表 5-15 关注点剂量率水平.....	211
表 5-16 工作人员外照射剂量计算结果.....	213
表 5-17 工作人员内照射受照剂量计算结果.....	214
表 5-18 核素质检工作人员受照剂量.....	217
表 5-19 发生器制备研究工作人员受照剂量.....	217
表 5-20 制靶、靶材料回收及微流体溶剂萃取实验过程工作人员外照射剂量.....	218
表 5-21 工作人员内照射受照剂量计算结果.....	219
表 5-22 工作人员受照剂量.....	219
表 5-23 各岗位工作人员年受照剂量.....	220
表 5-24 超重装置终端每年排入环境的空气感生放射性核素.....	221
表 5-25 超重终端二层非密封放射性工作场所气载流出物排放量.....	221
表 5-26 分离热室废气产生量及最终排放量.....	222
表 5-27 排风塔气载流出物年排放量情况.....	223
表 5-28 不同距离处的 F 值和扩散因子.....	224

表 5-29 空气浸没外照射计算结果.....	228
表 5-30 地面沉积外照射计算结果.....	230
表 5-31 吸入内照射计算结果.....	233
表 5-32 不同距离处公众受照总剂量.....	235
表 5-33 过滤器失效时释放源项.....	240
表 5-34 经通风口释放短期扩散因子.....	244
表 5-35 过滤器失效事故公众受照剂量.....	245
表 5-36 发生机械手皮老虎或窥视窗破裂事故时泄漏到房间内的放射性气溶胶的量.....	248
表 5-37 发生机械手皮老虎或者窥视窗破裂事故时工作人员所受的吸入内照射剂量.....	249
表 6-1 甘肃省同位素实验室项目（一期）周围环境监测及流出物监测方案.....	256
表 6-2 本项目配备监测设备.....	257
表 6-3 环保竣工验收一览表.....	261

图目录

图 1-1 拟建项目周围敏感目标现状图.....	26
图 1-2 辐射影响评价周围敏感目标分布情况图.....	27
图 2-1 兰州新区东南角 2014 年 70m 高度四季风向玫瑰图.....	29
图 2-2 场址周边 500m 点位.....	34
图 2-3 场址周边相关监测点位.....	34
图 2-4 场址监测点位.....	35
图 2-5 气溶胶、水及土壤取样点示意图.....	35
图 3-1 超重新元素合成专用研究装置布局图.....	51
图 3-2 差分抽气系统示意图.....	54
图 3-3 磁铁系统示意图.....	55
图 3-4 靶室总装图.....	56
图 3-5 转靶示意图.....	57
图 3-6 靶片结构图.....	57
图 3-7 超重元素合成及核反应研究工艺流程图.....	59
图 3-8 医用同位素生产专用主要研究装置布局图.....	61
图 3-9 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)$ 反应激发函数.....	65
图 3-10 ^{211}At 衰变纲图.....	65
图 3-11 ^{211}At 随辐照时间和冷却时间的变化.....	66
图 3-12 生成 ^{68}Ge 和 ^{68}Ga 反应的激发函数.....	66
图 3-13 ^{68}Ge - ^{68}Ga 衰变纲图.....	67
图 3-14 ^{68}Ge 随辐照时间和冷却时间的变化.....	67
图 3-15 $^{nat}\text{Zn}(\text{p}, \text{x})$ 反应激发函数.....	68
图 3-16 ^{67}Cu 衰变纲图.....	68
图 3-17 ^{67}Cu 随辐照时间和冷却时间的变化.....	68
图 3-18 照射室及转运热室布局图.....	69
图 3-19 热室拆解工位布局图.....	70
图 3-20 分离热室设计示意图.....	71
图 3-21 At-211 的工艺流程示意图.....	73
图 3-22 Ge-68 的分离工艺流程示意图.....	74

图 3-23Cu-67 的分离工艺流程示意图.....	76
图 3-24 质子、氦离子轰击不同材料靶件中子产额.....	83
图 3-25 Fe 离子轰击不同材料靶件中子产额.....	83
图 3-26 结构部件活化情况剂量率分布图.....	87
图 4-1 超导直线加速器所在建筑一层分区图.....	113
图 4-2 超导直线加速器所在二层分区图.....	114
图 4-3 靶站、热室地下一层分区图.....	115
图 4-4 靶站、热室一层分区图.....	116
图 4-5 热室二层分区图.....	117
图 4-6 超重实验终端一层分区图.....	118
图 4-7 超重实验终端二层非密封放射性工作场所分区图.....	119
图 4-8 辐射管理中心地下一层分区图.....	120
图 4-9 辐射管理中心一层分区图.....	121
图 4-10 辐射管理中心二层分区图.....	122
图 4-11 加速器隧道屏蔽设计平面图.....	128
图 4-12 加速器隧道屏蔽设计剖面图.....	129
图 4-13 局部屏蔽示意图.....	130
图 4-14 靶站地下一层屏蔽设计平面图.....	131
图 4-15 超重终端屏蔽设计平面图.....	132
图 4-16 超重终端屏蔽设计剖面图.....	133
图 4-17 靶站、热室大厅地下一层人流物流图.....	136
图 4-18 靶站、热室大厅一层人流物流图.....	137
图 4-19 靶站、热室大厅二层人流物流图.....	138
图 4-20 超重终端一层人流物流图.....	139
图 4-21 超重终端二层人流物流图.....	140
图 4-22 辐射管理中心地下一层人流物流示意图.....	141
图 4-23 辐射管理中心一层人流物流示意图.....	142
图 4-24 辐射管理中心二层人流物流示意图.....	143
图 4-25 安全联锁系统框图结构示意图.....	145
图 4-26 安全联锁系统网络控制结构示意图.....	145

图 4-27 加速器隧道安全联锁关键设备布局示意图.....	147
图 4-28 加速器逻辑示意图.....	149
图 4-29 安全联锁单元控制流程图.....	150
图 4-30 加速器隧道辐射监测布局图.....	151
图 4-31 靶站、热室地下一层区域辐射监测示意图.....	151
图 4-32 靶站、热室一层区域辐射监测示意图.....	152
图 4-33 超重实验终端区域辐射监测示意图.....	152
图 4-34 辐射管理中心域辐射监测示意图.....	153
图 4-35 环境监测点布局图.....	154
图 4-36 工作场所剂量监测系统结构示意图.....	155
图 4-37 加速器隧道管道穿墙示意图.....	161
图 4-38 超重低能隧道、束流终端通风空调系统流程图.....	162
图 4-39 25MeV 低能隧道、高能隧道通风空调系统流程图.....	163
图 4-40 热室通风空调系统流程图.....	168
图 4-41 其他控制区通风空调系统流程图.....	169
图 4-42 工艺废水中清洗液、浓酸中和液收集系统流程图.....	176
图 4-43 工艺废水处理工艺流程图.....	179
图 4-44 废水处理工艺流程图.....	180
图 4-45 蒸残液处理工艺流程方框图.....	183
图 4-46 废树脂处理工艺流程方框图.....	183
图 4-47 固体废物处理流程图.....	184
图 5-1 调束阶段周围剂量分布.....	194
图 5-2 超重装置加速器隧道四周剂量率水平模拟计算结果.....	195
图 5-3 超重装置加速器隧道屋顶及底部剂量率水平模拟计算结果.....	195
图 5-4 超重束流终端四周剂量率模拟计算结果.....	196
图 5-5 超重束流终端顶部剂量率模拟计算结果.....	197
图 5-6 束流调试阶段剂量率模拟计算结果.....	199
图 5-7 同位素研发装置加速器隧道剂量率水平模拟计算结果.....	200
图 5-8 同位素研发装置加速器隧道顶部剂量率水平模拟计算结果.....	200
图 5-9 靶站靶件照射室四周模拟计算结果.....	201

图 5-10 靶站靶件顶部及底部模拟计算结果.....	201
图 5-11 转运热室模拟计算结果.....	202
图 5-12 加速器隧道四周屏蔽体外关注点.....	209
图 5-13 加速器隧道屋顶关注点.....	209
图 5-14 靶站四周屏蔽体外关注点.....	211
图 5-15 Σ_y 修正因子 M.....	242
图 6-1 辐射事故应急响应流程图.....	259

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：甘肃省同位素实验室项目（一期）

建设性质：新建

建设地点：位于甘肃省兰州市兰州新区中南部，由纬五路（洮河街）、纬七路（渭河街）、经六路（鸣沙山路）、经七路（祁连山大道）围合的中科院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园东北角。

建设单位：中国科学院近代物理研究所

1.2 项目概况

1.2.1 单位概况

中国科学院近代物理研究所位于甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号，创建于 1957 年，是新中国成立后按照我国原子能科学技术和核工业发展战略布局创建的一所核科学研究机构。近代物理研究所 50 多年来，在重离子物理基础和应用研究的前沿领域完成了国家和省、部委等一系列重大科研项目，在世界上首次合成了 25 种新核素，并承担了国防科研 I、II 号任务，取得了一批具有国际先进水平的科研成果。截至 2019 年底，共有 197 项成果获得省、部级以上奖励，其中国家级奖励 18 项。主要科研成果先后 7 次入选全国十大科技成就、全国十大科技进展、全国十大科技新闻和全国基础科学研究十大新闻；“重（轻）离子合成新核素及衰变性质、核结构和生成机制研究”入选建国 60 周年“创新中国 60 项科技成就”；新核素合成、冷却储存环（CSR）工程、加速器驱动系统（ADS）关键核心技术等成果入选中科院改革开放四十年 40 项标志性重大成果。

中国科学院近代物理研究所创建于 1957 年，多年来一直以重离子核物理基础研究和相关领域的交叉研究为主要学科方向，相应发展加速器物理与技术及核技术。2012 年委托甘肃省核与辐射安全局编制了质子直线加速器及乙级放射化

学实验室改造项目的环境影响报告表，2016年建设单位编制了该项目质子直线加速器升级到25MeV的安全分析报告，2018年10月对该报告表中乙级放射化学实验室改造项目进行了自主验收，2019年建设单位编制了大科学装置科技创新创业园（一期）检验检测中心新增辐射工作场所项目环境影响报告书。建设单位辐射安全许可证：国环辐证00298，有效期：2023年12月31日。许可的种类和范围是：使用I、II、III类射线装置；使用III、IV、V类放射源；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所。目前有7台射线装置，1个乙级非密封放射性物质工作场所（放化实验室），1个放射性废物暂存库（位于兰州市皋兰县），1个密封放射源暂存库。有密封放射源62枚，其中5类及以上源33枚，豁免源29枚。

建设单位近几年履行核技术利用项目环保审批情况见表1-1。

表1-1 建设单位近几年履行核技术利用项目环保审批情况

序号	项目名称	环评批复文号	验收情况
1	质子直线加速器及乙级放射化学实验室改造项目	甘环核表【2013】72号	2018年10月，建设单位对环评中乙级放射化学实验室改造项目进行自主验收，质子直线加速器由于工况未达到竣工验收条件暂时未进行验收。
2	大科学装置科技创新创业园（一期）检验检测中心新增辐射工作场所项目	甘环核发【2020】22号	项目建设中

1.2.2 建设目的与意义

1.2.2.1 项目背景

同位素研究是核科学的重要领域。同位素及其放射性的发现和应用，是20世纪人类文明和工业发展的里程碑。同位素应用水平尤其是放射性同位素药物的研发是一个国家综合国力的重要标志，是世界强国重点发展的领域，受到了各国的高度重视，我国政府多次出台相关政策支持其发展。

当前国际形势下，针对同位素与辐射技术产业面临的严峻形势，加强、加快同位素相关技术的研发不仅可以提高科技竞争力、打破国外核心关键技术垄断局面，也是促进新产业发展、满足国家重大战略的需求。在基础研究领域，合成超

重元素、研究元素周期表延伸极限、发现和登上超重稳定岛是人类科学研究的梦想。新元素的合成和鉴别研究，一直是核物理最具挑战性的前沿课题之一，具有重大的科学、政治意义和潜在的重大应用，是大国实力角逐的主战场之一。

甘肃省是我国发展核工业和核科学技术的大省，自新中国成立以来，中国科学院近代物理研究所、兰州大学、中核四〇四有限公司、兰州理工大学、中核兰州铀浓缩有限公司等涉核研究机构和企业相继成立，建成了核物理基础科学、核技术应用和工业生产全方位的产学研体系，为我国核科学和核技术应用做出了重大贡献。特别是中科院近代物理所经过几十年的努力，在同位素（包括超重元素）相关的两项最核心技术即强流离子超导直线加速器和高功率靶的研究方面已经走到了世界前列，为我国自主生产具有重大需求的同位素包括超重元素合成奠定了良好的基础。甘肃省同位素实验室一期项目的建设对进一步提升全省核技术研究基础设施条件，加快科学技术进步和创新，推进科研和技术优势的转移转化具有积极推动作用，同时，也可为甘肃省核科学和核技术应用及相关产业发展创造前所未有的机遇。

甘肃省同位素实验室项目建设是省委、省政府积极落实习近平总书记视察甘肃重要讲话和指示精神，落实刘鹤副总理甘肃科技创新座谈会讲话精神和批示、以及《国务院办公厅落实刘鹤副总理关于改善优化甘肃科技生态环境批示情况的报告》中“请科技部先行支持甘肃建设同位素国家重点实验室”的要求，抢抓新一轮西部大开发、黄河流域生态保护和高质量发展等重大国家战略机遇的重要举措。项目建设符合党的十九大精神，对实现中科院科研资源、创新体系与地方资源深度融合共享，积极争取创建国家级综合科学中心，提升区域创新能力，促进甘肃高质量发展具有积极作用。

该项目建设符合国务院《“十三五”国家战略新兴产业发展规划》指出的“加快发展医用放射性同位素等新技术和新产品”要求，符合国家发展改革委《西部大开发“十三五”规划》提出的“依托国家级新区等重要载体，建设若干具有强大带动能力的区域创新中心”发展思路。项目建设符合《新时代甘肃融入“一带一路”建设打造技术制高点实施方案》提出的“推进兰州白银国家自主创新示范区和兰州综合性国家科学中心建设，布局建设同位素国家实验室，建成从新元素

合成基础研究、同位素产生核心技术研发、关键装置集成、核技术新产业示范创新全链条的国际一流实验室”的打造“技术制高点”实施方案。

该项目的建设将充分利用好中科院、甘肃省科研基础优势、争取建设兰州国家级科学中心的大支撑，十分有利于我国核产业发展、医用同位素、癌症靶向治疗药物的研发。项目建设依托甘肃核技术领域集中的科技资源优势，瞄准国际核科学前沿，符合国家相关规划和产业发展方向，对于促进西部地区核技术产业的发展、满足国家重大的战略需求具有十分重要的意义。

1.2.2.2 项目意义

甘肃省同位素实验室依托中国科学院近代物理研究所并联合兰州大学、中核兰州铀浓缩有限公司和兰州理工大学等单位进行建设。该实验室利用甘肃省内核技术领域科技资源和地缘优势，面向国家战略需求和地方经济新发展重大需求，瞄准国际科技前沿，以发展同位素及相关技术为核心目标。实验室的近期目标（2020~2022年）是建成新模式下的国家重点实验室，支撑兰州综合性国家科学中心建设；中远期目标（2023~2035年）是建成以核科学重大问题和核技术重大需求为导向的世界一流国家实验室以及产学研全链条创新园区。

该实验室的建成可创新我国同位素关键技术，实现由引进到引领，促进同位素如用于医疗、移动电源的量产应用，可解决我国医用同位素基本依赖进口的关键技术瓶颈问题，特别是极大地促进内照射肿瘤治疗新技术所需的靶向放射性同位素药物的发展，并与重离子束外照射肿瘤治疗形成完美互补，实现先进放疗技术创新和突破；在前沿基础科学研究方向，依托该实验室冲击超重新元素合成，力争实验合成原子序数高于118号的新元素，实现中国在新元素合成方面“零”的突破，这是体现国家创新能力和大国荣耀的重大事项。

甘肃省同位素实验室的研究成果可直接应用于医用同位素量产和靶向同位素药物研发，结合甘肃省已有的重离子肿瘤治疗装置产业化创新品牌，在甘肃聚集国内外同位素领域基础研究和核技术产业的优秀人才，对甘肃省抢占前沿基础研究和先进放射治疗的科技战略高地、赢得产业发展先机具有重要意义。实验室产出的同位素还可用于满足核电池、国防等国家重大战略需求，提高我国在核技术应用领域的国际竞争力。

1.2.2.3 项目目标

甘肃省同位素实验室的建设目标：一是建成新型超重元素合成研究装置，探索合成超重新元素，努力实现中国在新元素合成领域零的突破，并开展探索超重稳定岛的研究，使甘肃省在超重元素探索及超铀同位素应用方面处于国际前列，成为世界知名超重元素研究基地；二是建成基于强流超导直线加速器的同位素研发装置，研究同位素产生、高效分离和收集等关键核心技术，使甘肃省成为世界知名同位素关键技术研发基地；三是实现多种同位素量产核心技术和装备集成，使甘肃省成为世界知名同位素核心装置和新产品示范基地；四是通过实验室建设和运行，在甘肃省形成同位素相关人才绿洲，稳定和吸引一批高端科研人员，培养一批年轻科研人员和产业技能骨干。通过项目管理团队专业化管理和运行维护，依托甘肃省同位素实验室争取建成新模式下的国家重点实验室，支撑兰州综合性国家科学中心的发展。

该项目为非盈利性社会公益项目，项目效益主要体现在社会效益方面。甘肃省同位素实验室建成后，以开放共享合作的方式，聚焦探索超重稳定岛的存在性，同时进行超重元素化学性质和超铀元素应用研究；聚焦以稳定同位素和放射性同位素为主要研究方向，自主研制的同位素产生装置，进行有重大应用和产业前景的同位素核心技术研发以及自主化生产工艺探索，推动高附加值的同位素在工业、医药以及科研领域的应用；聚焦高端医用同位素生产核心设备研发、工业化技术转移和稳定性、可靠性研究及检测，带动地方高端装备研发产业发展。

1.2.3 建设内容和规模

本项目拟新建甘肃省同位素实验室一期项目，位于兰州新区中科院近代物理所大科学装置科技创新创业园内东北侧，本项目规划用地面积约 97740m²，其中建设用地面积 66440m²，本次新建总建（构）筑物面积为 19224m²，其土地用地性质为科研用地。

本项目实验主要是利用先进强流离子加速器、高功率靶技术、高效充气反冲分离技术、放射性同位素分离等先进技术，建设基于强流离子超导直线加速器的超重元素合成装置和同位素应用研发装置。主要开展超重元素合成与核反应新机

制研究和同位素产生与分离及其核心技术研究。主要建设内容包括超重元素合成装置、同位素应用研发装置以及相关基础配套设施等，涉及使用 2 台 I 类射线装置和甲级、乙级非密封放射性物质实验室。本项目工程建设内容一览表 1-2。

表 1-2 本项目工程建设内容一览表

工程类别	名称	建筑面积,m ²	备注
主体工程	超重加速器低能隧道	705	地上二层建筑，一层为加速器隧道区域，为射线装置工作场所，二层为功率源厅
	加速器副隧道	290	
	25MeV 加速器低能隧道	535	
	功率源厅	1300	
	25MeV 加速器高能段隧道	—	地上一层建筑，建筑面积纳入靶站
	超重实验终端	994	地上二层建筑，为超重元素合成装置终端及配套的乙级非密封放射性工作场所。一层为超重束流终端及配套房间，为射线装置工作场所，二层为非密封放射性工作场所及配套房间，主要进行放射性核素制靶、放射性核素的回收与提纯、超重化学研究与微流体萃取实验研究
	靶站、热室大厅、靶站准备厅	7210	为 25MeV 加速器终端及配套甲级非密封放射性工作场所。靶站准备厅为地上一层建筑；热室大厅为地下一层、地上 2 层建筑，其地下一层为三废暂存区域，一层为辐照后靶件目标核素分离热室，二层为配套核素质检等实验室；靶站为地下一层、地上一层，地下一层为靶站工艺布置区，主要进行靶件照射和转移，一层为配套区域。
辅助工程	低温厅	810	地上一层建筑，设有液氮低温制冷机、低温阀箱等设备
	氦压缩机厅	480	地上一层建筑，设有氦气压缩机及配套设备
	冷却水站	900	地上一层建筑，为各实验提供去离子冷却水，主要包括设备大厅、冷水机组、纯水制备间、送风机房、软化水站等
公用工程	变配电站	504	地上一层建筑，设有高压配电柜等
	运行维护楼	2300	地下一层、地上三层建筑，为加速器控制室、设备维护间等
	控制区主出入口	60	地上一层建筑
环保工程	辐射管理中心	2560	地下一层，地上两层建筑，设有三废暂存及废液处理等场所
	排风塔	占地面 64m ² ，直径底部 3.9m，顶部 2.6m，高 35m	

本项目拟使用超导直线加速器见表 1-3，非密封放射性物质操作情况见表 1-4

和表 1-5。根据《射线装置分类》，由表 1-3 可知本项目拟使用的 2 台超导直线加速器均为 I 类直线加速器；由表 1-4 和表 1-5 可知，本项目靶站及热室大厅所在建筑为甲级密封放射性工作场所，超重终端二层非密封放射性工作场所为乙级非密封放射性工作场所。

根据《中华人民共和国环境影响评价法》、《建设项目环境保护管理条例》和《建设项目环境影响评价分类管理名录》等国家法律法规中的相关规定，本项目建设内容属于《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 版）》中两个及以上项目类别的建设项目，其环境影响评价类别按照其中单项等级最高的确定。根据该分类管理名录，本项目涉及类别为“四十五、研究和试验发展中 98、专业实验室、研发（试验）基地：其他”和“五十五、核与辐射中 172、核技术利用建设项目：使用 I 类射线装置、甲级非密封放射性物质工作场所”，前者为环评类别为报告表，后者环评类别为报告书，因此，按照单项最高确定，本项目编制环境影响报告书。环评单位在现场踏勘、收集有关资料的和基础上，根据相关导则、规范编制完成了本项目的环境影响报告书。

表 1-3 本项目拟使用射线装置情况

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量 (MeV)	额定电流 (mA)	用途	工作场所	备注
1	超导直线加速器	I	1 台	自研	^{51}V 、 ^{54}Cr 、 ^{55}Mn 、 ^{58}Fe	406 (7MeV/u)	0.01	使用 (超重元素合成)	甘肃省同位素实验室	
2	超导直线加速器	I	1 台	自研	H、 ^4He	H ⁺ : 25 $^4\text{He}^{2+}$: 29	2	使用 (同位素研发)	甘肃省同位素实验室	

表 1-4 靶站、热室大厅非密封放射性工作场所放射性同位素操作情况

操作部件	序号	核素	日最大操作量, Bq	操作因子	毒性因子	日等效操作量, Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途	操作场所
石墨包壳	1	^{13}N	2.71E+08	0.001	0.01	2.71E+09	4.61E+09	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	2	^{11}C	2.40E+09	0.001	0.01	2.40E+10	4.08E+10	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	3	^7Be	3.40E+05	0.001	0.01	3.40E+06	5.78E+06	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	4	^3H	1.72E+05	0.001	0.01	1.72E+06	2.92E+06	特别危险	科研	靶站、热室大厅
Bi 靶	1	$^{211}\text{At}^*$	7.37E+11	0.001	1	7.37E+14	1.25E+13	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	2	^{209}Po	241.3	0.001	10	2.41E+06	4.10E+03	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	3	^{208}Bi	1537	0.001	0.1	1.54E+05	2.61E+04	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	4	^{208}Po	3870	0.001	10	3.87E+07	6.58E+04	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	5	^{207}Bi	1.39E+07	0.001	0.1	1.39E+09	2.36E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	6	^{14}C	5366	0.001	0.1	5.37E+05	9.12E+04	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	7	^{13}N	2.10E+08	0.001	0.01	2.10E+09	3.57E+09	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	8	^{11}C	3.26E+08	0.001	0.01	3.26E+09	5.54E+09	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	9	^3H	1.43E+07	0.001	0.01	1.43E+08	2.43E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅

操作部件	序号	核素	日最大操作量, Bq	操作因子	毒性因子	日等效操作量, Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途	操作场所	
	小计					7.37E+14	-				
天然 Ga 靶	1	⁷⁴ As	1.11E+07	0.1	0.1	1.11E+07	1.89E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	2	⁷² Ga	1.13E+10	0.1	0.1	1.13E+10	1.92E+11	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	3	⁷² As	6.71E+07	0.1	0.1	6.71E+07	1.14E+09	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	4	⁷¹ Ge	2.69E+12	0.1	0.01	2.69E+11	4.57E+13	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	5	⁷⁰ Ga	4.50E+11	0.1	0.01	4.50E+10	7.65E+12	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	6	⁶⁹ Zn	2.48E+09	0.1	0.01	2.48E+08	4.22E+10	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	7	⁶⁹ Ge	1.31E+13	0.1	0.1	1.31E+13	2.23E+14	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	8	⁶⁸ Ga	8.90E+12	0.1	0.01	8.90E+11	1.51E+14	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	9	⁶⁸ Ge*	5.14E+11	0.1	0.1	5.14E+11	8.74E+12	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	10	⁶⁷ Cu	1.08E+10	0.1	0.1	1.08E+10	1.84E+11	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	11	⁶⁷ Ga	4.34E+11	0.1	0.1	4.34E+11	7.38E+12	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	12	⁶⁷ Ge	3.44E+07	0.1	0.01	3.44E+06	5.85E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	13	⁶⁵ Zn	2.08E+11	0.1	0.1	2.08E+11	3.54E+12	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	14	⁶⁴ Cu	2.66E+10	0.1	0.01	2.66E+09	4.52E+11	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	15	⁶³ Ni	2.62E+05	0.1	0.1	2.62E+05	4.45E+06	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	16	³ H	1.48E+07	0.1	0.01	1.48E+06	2.52E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	17	^{69m} Zn	1.61E+09	0.1	0.01	1.61E+08	2.74E+10	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	18	^{71m} Zn	2.61E+08	0.1	0.01	2.61E+07	4.44E+09	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	小计					1.55E+13	-				
天然 Zn 靶	1	⁷¹ Ge	8.15E+06	0.1	0.01	8.15E+05	1.39E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅	
	2	⁷⁰ Ga	1.91E+10	0.1	0.01	1.91E+09	3.25E+11	特别危险	科研	靶站、热室大厅	

操作部件	序号	核素	日最大操作量, Bq	操作因子	毒性因子	日等效操作量, Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途	操作场所
	3	⁶⁹ Zn	2.99E+10	0.1	0.01	2.99E+09	5.08E+11	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	4	⁶⁹ Ge	1.35E+07	0.1	0.1	1.35E+07	2.30E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	5	⁶⁸ Ga	3.36E+12	0.1	0.01	3.36E+11	5.71E+13	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	6	⁶⁷ Cu*	7.96E+09	0.1	0.1	7.96E+09	1.35E+11	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	7	⁶⁷ Ga	7.13E+12	0.1	0.1	7.13E+12	1.21E+14	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	8	⁶⁶ Ga	7.55E+12	0.1	0.1	7.55E+12	1.28E+14	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	9	⁶⁵ Ni	1.19E+07	0.1	0.1	1.19E+07	2.02E+08	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	10	⁶⁵ Zn	1.56E+11	0.1	0.1	1.56E+11	2.65E+12	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	11	⁶⁵ Ga	1.55E+11	0.1	0.01	1.55E+10	2.64E+12	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	12	⁶⁴ Cu	1.98E+12	0.1	0.01	1.98E+11	3.37E+13	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	13	⁶³ Ni	1.54E+06	0.1	0.1	1.54E+06	2.62E+07	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	14	⁶³ Zn	3.42E+12	0.1	0.01	3.42E+11	5.81E+13	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	15	⁶² Zn	1.12E+10	0.1	0.1	1.12E+10	1.90E+11	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	16	⁶¹ Co	1.19E+09	0.1	0.01	1.19E+08	2.02E+10	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	17	⁶¹ Cu	3.49E+12	0.1	0.01	3.49E+11	5.93E+13	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	18	⁶⁰ Co	4.38E+06	0.1	1	4.38E+07	7.45E+07	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	19	⁶⁰ Cu	2.57E+11	0.1	0.01	2.57E+10	4.37E+12	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	20	⁵⁹ Ni	2.01E+03	0.1	0.01	2.01E+02	3.42E+04	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	21	⁵⁸ Co	7.09E+05	0.1	0.1	7.09E+05	1.21E+07	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	22	⁵⁷ Co	3.82E+09	0.1	0.1	3.82E+09	6.49E+10	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	23	³ H	2.95E+06	0.1	0.01	2.95E+05	5.02E+07	特别危险	科研	靶站、热室大厅
	24	^{46m} Sc	3.62E+06	0.1	0.1	3.62E+06	6.15E+07	特别危险	科研	靶站、热室大厅

操作部件	序号	核素	日最大操作量, Bq	操作因子	毒性因子	日等效操作量, Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途	操作场所
	25	^{52m} Mn	4.77E+02	0.1	0.1	4.77E+02	8.11E+03	特别危险	科研	靶站、热室大厅
小计						1.62E+13	-			
注：该项目三种靶件不会同时操作，则日等效操作量取三种靶件操作中日等效操作量最大值，为 7.37E+14Bq，根据 GB18871-2002，日等效操作量大于 4.0E+09Bq,为甲级非密封放射性工作场所，因此，本项目靶站、热室大厅所在建筑为甲级非密封放射性工作场所										

注：*操作方式：本项目操作工艺中有固体靶件的高温挥发和溶解，根据《辐射防护分册 第三分册》属于有特别危险的操作。

*三种靶件分别提取的目标核素为 ²¹¹At、⁶⁸Ge 和 ⁶⁷Cu。

表 1-5 超重终端二层非密封放射性工作场所放射性同位素操作情况

序号	核素	物理、化学性状	日最大操作量,Bq	操作因子	毒性因子	日等效最大操作量,Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途	操作场所
1	²⁴³ Am	液体	2.66E+07	0.1	10	2.66E+09	2.66E+09	特别危险	科研	超重终端二层非密封放射性工作场所
5	⁹⁵ Nb	粉末	3.70E+06	0.001	0.1	3.70E+08	3.70E+08	特别危险	科研	
6	¹⁸² Ta	粉末	3.70E+06	0.001	0.1	3.70E+08	3.70E+08	特别危险	科研	
7	¹⁷⁹ Ta	粉末	3.70E+06	0.001	0.1	3.70E+08	3.70E+08	特别危险	科研	
小计						2.66E+09				
注：超重终端二层非密封放射性工作场所每次只操作一种核素，则日等效操作量最大为 2.66E+9Bq，根据 GB18871-2002，日等效操作量在 2.0×10 ⁷ ~4.0×10 ⁹ Bq,为乙级非密封放射性工作场所，因此，本项目超重终端二层非密封放射性工作场所为乙级非密封放射性工作场所										

注：*操作方式：本项目操作工艺中有固体粉末溶解，根据《辐射防护分册 第三分册》属于有特别危险的操作。

本项目环保投资情况见表 1-6。

表 1-6 本项目环保投资一览表

序号	辐射防护措施	投资金额（万元）
1	安全连锁系统、视频监控等	200
2	屏蔽措施	12242
3	警示警告标志等	1
4	三废处理系统	4412
5	人员培训等安全管理措施	5
6	环评及竣工验收	80
7	防护门	120
8	固定式监测设备、个人剂量计、个人剂量报警仪、巡检仪、表面污染监测仪等监测设备	2380
环保投资合计		19440
总投资		100000
环保投资占总投资比例		19.44

1.2.4 产业政策符合性分析

根据《产业结构调整指导目录(2019 年本)》，本项目属于“鼓励类第六、核能、第 6 项同位素、加速器及辐照应用技术开发”，同时符合国务院《“十三五”国家战略新兴产业发展规划》中指出的“加快发展医用放射性同位素等新技术和新产品”要求，符合国家发展改革委《西部大开发“十三五”规划》提出的“依托国家级新区等重要载体，建设若干具有强大带动能力的区域创新中心”发展思路。项目建设符合《新时代甘肃融入“一带一路”建设打造技术制高点实施方案》提出的“推进兰州白银国家自主创新示范区和兰州综合性国家科学中心建设，布局建设同位素国家实验室，建成从新元素合成基础研究、同位素产生核心技术研发、关键装置集成、核技术新产业示范创新全链条的国际一流实验室”的打造“技术制高点”实施方案。根据《兰州新区总体规划（2011-2030）》，本项目属于科研用地，已取得建设用地规划许可证，根据许可证，本项目所在位置属于兰州新区重点建设范围，不在规划中的限建区和禁建区，符合兰州新区总体规划。本项目符合《兰州新区“十三五”科技发展规划》中“依托兰白科技创新改革试验区和国家可持

续发展实验区两大战略平台，打造引领甘肃乃至西北地区的科技创新高地”的总体目标，符合该规划主要任务中“打造三大科技体系”的科技创新体系内容。另外，与《市场准入负面清单（2019年版）》对比，本项目不在其负面清单中。本项目的建设将努力实现中国在新元素合成领域零的突破，并探索超重稳定岛同位素性质和应用的研究，使甘肃省在超重元素探索及超铀同位素应用方面处于国际前列，成为世界知名超重元素研究基地。同时，谋划建成多个稳定同位素和放射性同位素产生及分离试验装置，研究同位素产生、高效分离和收集等关键核心技术，实现多种同位素量产核心技术、新产品和装备集成示范，使甘肃省成为世界知名同位素核心技术、新产品及其装备研发基地。

因此，本项目的建设具有重要的社会意义，项目运行对工作人员及周围社会带来的辐射影响远小于其产生的社会效益，经判断，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中“实践的正当性”要求。

1.3 编制依据

1.3.1 遵循的法律、法规、部门规章和导则

本报告书的编制遵循或参考下述法规文件：

- （1）《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003年6月28日；
- （2）《中华人民共和国环境保护法》，2014年4月28日；
- （3）《中华人民共和国环境影响评价法》，2018年12月29日；
- （4）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，2005年9月14日，国务院令 第449号，2019年3月2日第二次修正版；
- （5）《建设项目环境保护管理条例》，1998年11月29日，国务院第253号令，2017年7月16日第一次修订版；
- （6）《甘肃省辐射污染防治条例》，甘肃省人民代表大会常务委员会公告第50号，2020年12月3日；
- （7）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，2006年1月18日，

国家环境保护总局令第 31 号，2019 年 8 月 22 日第三次修正版；

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

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

(10)《放射性废物安全管理条例》，国务院令 第 612 号，2011 年 11 月 30 日；

(11) 关于发布《射线装置分类》的公告，国家环境保护部 国家卫生和计划生育委员会 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 06 日；

(12) 关于发布《放射性废物分类》的公告，环境保护部 工业和信息化部 国家国防科技工业局 2017 年第 65 号，2017 年 11 月 30 日；

(13)《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》，生态环境部国环规环评【2017】4 号，2017 年 11 月 22 日；

(14)《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》，生态环境部公告 2019 年第 57 号，2019 年 12 月 24 日；

(15)《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部令 第 9 号，2019 年 9 月 20 日；

(16)《产业结构调整指导目录》，2019 年本，国家发展和改革委员会令 第 29 号，2020 年 1 月 1 日起施行；

(17)《环境影响评价公众参与办法》，生态环境部令 第 4 号，2019 年 1 月 1 日起施行。

1.3.2 采用的标准

本报告书遵循以下主要标准：

(1)《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)；

(2)《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016);

(3)《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》(HJ2.1-2016);

(4)《环境影响评价技术导则—大气环境》(HJ2.2-2018);

(5)《环境影响评价技术导则—地表水环境》(HJ2.3-2018);

(6)《环境影响评价技术导则—声环境》(HJ2.4-2009);

(7)《环境影响评价技术导则—地下水环境》(HJ610-2016);

(8)《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ169-2018);

(9)《环境影响评价技术导则 土壤环境(试行)》(HJ 964-2018);

(10)《环境影响评价技术导则 生态影响》(HJ19-2011);

(11)《粒子加速器辐射防护规定》(GB5172-1985);

(12)《辐射环境监测技术规范》(HJ/T61-2001);

(13)《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2019);

(14)《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010);

(15)《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》(EJ-380-1989);

(16)《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》(GBZ2.1-2019);

(17)《环境空气质量标准》(GB3095-2012);

(18)《污水综合排放标准》(GB8978-1996);

(19)《电磁环境控制限值》(GB8702-2014);

(20)《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008);

(21)《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011);

(22)《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996);

(23)《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T31962-2015)。

1.3.3 其他资料

- (1) 项目委托书;
- (2) 设计报告等业主提供的其他资料。

1.4 评价标准

1.4.1 放射性环境影响评价标准

1.4.1.1 剂量限值

本项目执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)的规定,剂量限值如下:

(1) 职业照射

应对任何工作人员的职业照射水平进行控制,使之不超过以下限值:

- a) 由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量, 20mSv;
- b) 任何一年中的有效剂量, 50mSv;
- c) 四肢或皮肤的当量剂量, 500mSv/a。

(2) 公众照射

实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过以下限值:

- a) 年有效剂量, 1mSv;
- b) 特殊情况下, 如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv, 则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv;
- c) 四肢或皮肤的当量剂量, 50mSv/a。

1.4.1.2 剂量约束值

(1) 工作人员剂量约束值

本项目工作人员的剂量约束值为 5mSv/a。

(2) 公众剂量约束值

本项目公众照射的剂量约束值取上述限值的 1/10，为 0.1 mSv/a。

1.4.1.3 屏蔽体外剂量率控制水平

(1) 加速器顶部及四周屏蔽体外剂量率控制水平

参考以上标准并结合本项目情况，本项目剂量率控制水平设置如下：由于整个装置位于屏蔽隧道内，考虑顶部和侧屏蔽体外辐射对工作人员的影响，其剂量率控制水平设为 2.5 μ Sv/h。

(2) 热室屏蔽体外剂量率控制水平

参考《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》(EJ-380-1989)，热室前区屏蔽体外剂量率控制水平设为 7.5 μ Sv/h。

(3) 加速器屏蔽体底部剂量率控制水平

加速器底部主要考虑其对土壤、地下水的活化影响，参考日本 J-PARC 等国际加速器的相关设计，其屏蔽体外的剂量率控制水平设定为 5mSv/h。

1.4.1.4 表面污染控制水平

依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求，非密封放射性工作场所的表面污染水平按表 1-7 控制。

表 1-7 表面污染控制水平

表面类型		α 放射性物质, Bq/cm ²		β 放射性物质, Bq/cm ²
		极毒性	其他	
工作台、设备、墙壁、 地面	控制区	4	40	40
	监督区	0.4	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区和监督区	0.4	0.4	4
手、皮肤、内衣、工作袜		0.04	0.04	0.4

1.4.1.5 水污染物排放标准

根据《污水综合排放标准》(GB8978-1996)，车间或者车间处理设施排放口处总 α 和总 β 排放限值分别为 1 Bq/L 和 10Bq/L。

根据《电离辐射与辐射源安全基本标准》的第 8.6.2 款规定，不得将放射性废液排入普通下水道，除非经审管部门确认是满足下列条件的低放废液，方可直

接排入流量大于 10 倍排放流量的普通下水道，并应对每次排放作好记录：

a) 每月排放的总活度不超过 10ALImin (ALImin 是相应于职业照射的食入和吸入 ALI 值中的较小者，其具体数值可按 B1.3.4 和 B1.3.5 条的规定获得)；

b) 每一次排放的活度不超过 1ALImin，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

根据 GB18872-2002，计算了以下放射性废水中放射性核素排放导出浓度限值，见表 1-8。

表 1-8 废水中放射性核素排放导出限值

序号	核素	一次排放限值, Bq	月排放限值, Bq
1	²¹¹ At	1.82E+05	1.82E+06
2	²⁰⁷ Bi	3.85E+06	3.85E+07
3	¹⁴ C	3.45E+07	3.45E+08
4	⁷ B	3.85E+08	3.85E+09
5	¹¹ C	8.33E+08	8.33E+09
6	³ H	1.11E+09	1.11E+10
7	⁷⁴ As	9.52E+06	9.52E+07
8	⁷² Ga	1.82E+07	1.82E+08
9	⁷² As	1.11E+07	1.11E+08
10	⁷¹ Ge	1.67E+09	1.67E+10
11	⁷⁰ Ga	6.45E+08	6.45E+09
12	⁶⁹ Zn	4.65E+08	4.65E+09
13	⁶⁹ Ge	5.41E+07	5.41E+08
14	⁶⁸ Ga	2.00E+08	2.00E+09
15	⁶⁸ Ge	1.54E+06	1.54E+07
16	⁶⁷ Cu	3.45E+07	3.45E+08
17	⁶⁷ Ga	7.14E+07	7.14E+08
18	⁶⁷ Ge	3.08E+08	3.08E+09
19	⁶⁶ Ga	1.67E+07	1.67E+08
20	⁶⁵ Ni	1.11E+08	1.11E+09
21	⁶⁵ Zn	5.13E+06	5.13E+07
22	⁶⁵ Ga	5.41E+08	5.41E+09
23	⁶⁴ Cu	1.33E+08	1.33E+09
24	⁶³ Ni	3.85E+07	3.85E+08
25	⁶³ Zn	2.53E+08	2.53E+09
26	⁶² Zn	2.13E+07	2.13E+08
27	⁶¹ Co	2.67E+08	2.67E+09

序号	核素	一次排放限值, Bq	月排放限值, Bq
28	⁶¹ Cu	1.67E+08	1.67E+09
29	⁶⁰ Co	6.90E+05	6.90E+06
30	⁶⁰ Cu	2.86E+08	2.86E+09
31	⁵⁹ Ni	9.09E+07	9.09E+08
32	⁵⁸ Co	1.00E+07	1.00E+08
33	⁵⁷ Co	2.13E+07	2.13E+08
34	^{52m} Mn	2.90E+08	2.90E+09
35	^{69m} Zn	6.06E+07	6.06E+08
36	^{71m} Zn	8.33E+07	8.33E+08
37	²⁴³ Am	5.13E+02	5.13E+03
38	⁹⁵ Nb	1.25E+07	1.25E+08
39	¹⁸² Ta	2.06E+06	2.06E+07
40	¹⁷⁹ Ta	3.85E+07	3.85E+08

1.4.1.6 放射性固体分类

根据《放射性废物分类》，本项目产生的放射性废物主要为极短寿命放射性废物、低水平放射性废物、中水平放射性废物。

极短寿命放射性废物：废物中所含主要放射性核素的半衰期很短，长寿命放射性核素的活度浓度在解控水平以下。长半衰期固体废物中放射性核素解控水平见表 1-9。当固体废物中含多种放射性核素时，每种核素与其对应活动浓度上限值的比值之和应满足下列公式：

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i0}} \leq 1$$

式中， C_i 为废物中第 i 种放射性核素的活度浓度， C_{i0} 为第 i 种放射性核素的活度浓度上限值， n 是废物中放射性核素种类的数目。

极低水平放射性废物：废物中放射性核素活度浓度接近或者略高于豁免水平或解控水平，长寿命放射性核素的活度浓度应当非常有限；极低水平放射性废物的活度浓度下限值为解控水平，上限值一般为解控水平的 10~100 倍。

表 1-9 固体废物中放射性核素清洁解控水平

序号	核素	解控水平, Bq/g
1	²¹¹ At	1.00E+03
2	²⁰⁷ Bi	1.00E+01
3	¹⁴ C	1.00E+04

序号	核素	解控水平, Bq/g
4	⁷ B	1.00E+03
5	³ H	1.00E+06
6	⁷⁴ As	1.00E+01
7	⁷² Ga	1.00E+01
8	⁷¹ Ge	1.00E+04
9	⁶⁹ Zn	1.00E+04
10	⁶⁵ Ni	1.00E+01
11	⁶⁵ Zn	1.00E+01
12	⁶⁴ Cu	1.00E+02
13	⁶³ Ni	1.00E+05
14	⁶¹ Co	1.00E+02
15	⁶⁰ Co	1.00E+01
16	⁵⁹ Ni	1.00E+04
17	⁵⁸ Co	1.00E+01
18	⁵⁷ Co	1.00E+02
19	^{52m} Mn	1.00E+01
20	^{69m} Zn	1.00E+02
21	²⁴³ Am	1.00E+00
22	⁹⁵ Nb	1.00E+01
23	¹⁸² Ta	1.00E+01

低水平放射性废物：废物中短寿命放射性核素活度浓度可以较高，长寿命放射性核素含量有限，低水平放射性废物的活度浓度下限值为极低水平放射性废物活度浓度上限值，低水平放射性废物活度浓度上限值见表 1-9。

中水平放射性废物：废物中含有相当数量的长寿命核素，特别是发射 α 粒子的放射性核素，中水平放射性废物的活度浓度下限值为低水平放射性废物活度浓度上限值，中水平放射性废物的活度浓度上限值为 $4E+11Bq/kg$ ，且释热率小于或等于 $2kW/m^3$ 。

1.4.2 电磁辐射

本项目使用的高频设备的频率为 162.5MHz 和 24GHz，根据《电磁环境控制限值》（GB8702-2014），确定本项目各屏蔽体外电场强度控制目标见表 1-10。

表 1-10 本项目电场强度控制目标

频率范围, MHz	电场强度, V/m
30~3000	12
15000~300000	27

注: f 为频率, MHz

1.4.3 非放环境要素评价标准

1.4.3.1 环境质量标准

(1) 环境空气质量标准

评价范围内环境空气质量现状执行《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中二类标准, 具体标准值见表 1-11。

表 1-11 环境空气质量执行标准 单位: mg/m³

污染物	年平均	24 小时平均	8 小时平均	1 小时平均	一次浓度	标准来源
TSP	0.2	0.3	/	/	/	《环境空气质量标准》 (GB3095-2012) 的二级标准
PM ₁₀	0.07	0.15	/	/	/	
NO ₂	0.04	0.08	/	0.20	/	
O ₃	/	/	0.16	0.20	/	

(2) 声环境质量标准

根据《兰州新区声环境功能区划分方案》(新政发【2019】37号), 本项目所在场址、北侧兰州一号(在建小区)及东侧会展中心(在建)属于 2 类区, 声环境噪声执行《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 2 类标准; 南侧朱雀湖别墅区属于 1 类区, 声环境噪声执行《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 1 类标准; 本项目所在场所厂界东侧祁连山大道、南侧渭河街为城市主干道, 西侧的鸣沙山路、北侧的洮河街为城市次干道, 四周厂界距离主、次干道边界小于 35m, 因此本项目四周厂界执行《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 4a 类标准, 具体标准值见表 1-12。

表 1-12 噪声环境评价标准 单位：dB(A)

标准	昼间等效声级	夜间等效声级
《声环境质量标准》(GB3096-2008) 中 1 类标准	55	45
《声环境质量标准》(GB3096-2008) 中 2 类标准	60	50
《声环境质量标准》(GB3096-2008) 中 4a 类标准	70	55

1.4.3.2 污染物排放标准

(1) 水污染物排放标准

本项目非放射性排水主要为员工生活污水，生活污水经化粪池处理后排入市政污水管网，污水排放执行《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T31962-2015) 表 1 中 B 等级要求。排放限值见表 1-13。

表 1-13 排入城镇污水管网水质控制项目限值

污染物	最高允许浓度 (mg/L)
pH(无量纲)	6.5~9.5
化学需氧量	500
五日生化需氧量	350
悬浮物	400
氨氮	45
总氮	70

(2) 大气污染物

施工期大气污染排放标准执行《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996) 中颗粒物无组织排放标准。具体排放限值详见下表。

表 1-14 大气污染物综合排放标准

污染物	无组织排放监控浓度限值浓度 (mg/m ³)
颗粒物	1

(3) 噪声

施工期执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)，具体限值如下表所示。

表 1-15 建筑施工场界环境噪声排放标准 单位：Leq[dB(A)]

标准号	噪声限值[dB(A)]	
	昼间	夜间
GB12523-2011	70	55

营运期厂界噪声排放执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)中4类标准,标准值见下表1-16。

表 1-16 噪声评价标准 单位：Leq[dB(A)]

标准名称和类别	噪声限值 [dB(A)]	
	昼间	夜间
GB12348-2008 中 4 类标准	70	55

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 辐射环境评价范围

为确保本项目周围区域内活动的公众和工作人员所受到的辐射低于相应的剂量约束值,根据《辐射环境保护管理导则-核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》(2016)的规定和要求,本项目为使用I类射线装置和甲级、乙级非密封放射性工作场所,其评价范围取本项目放射性工作场所实体边界外500m区域。

1.5.2 非放射性环境要素评价范围及等级

(1) 大气环境影响评价范围及等级

本项目施工期主要的大气污染源为施工扬尘,主要污染物是TSP,经合理的施工管理,其对大气环境的影响是短暂且较小的。本项目营运期主要的大气污染源为加速器运行期间产生的少量臭氧和氮氧化物,其对周围环境影响很小,根据《环境影响评价技术导则—大气环境》(HJ2.2-2018),确定其大气评价等级为三级,本次评价对其施工期扬尘和营运期的防护措施进行简要分析。

(2) 地表水环境影响评价范围及等级

本项目营运期各类污水采用不同的方式处理达标后纳入市政污水管网，污水的排放不会对周围地表水环境质量造成明显的影响。根据《环境影响评价技术导则—地表水环境》（HJ2.3-2018），本项目废水为间接排放，确定本项目地表水环境影响评价等级为三级 B。因此，本次环评仅对是用排水状况、施工期所排放污染物类型和数量、排水依托进行简要的环境影响分析。

（3）声环境影响评价范围及等级

根据《兰州新区声环境功能区划分方案》（新政发【2019】37号），确定本项目属于 2 类区，按照《环境影响评价技术导则-声环境》（HJ2.4-2009）中的有关规定，声环境评价工作等级为二级。项目噪声评价范围为项目厂界外 200m。

（4）环境风险评价

根据《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ 169-2018），对照“附录 B 重点关注的危险物质和临界量”，可得危险物质数量和临界量比值 $Q=0.084$ ，环境风险潜势为 I，本项目环境风险评价等级见表1-17。

表 1-17 项目环境风险评价分级判定

环境风险潜势	IV、IV+	III	II	I
评价工作等级	一	二	三	简单分析 ^a
a 是相对于详细评价工作内容而言，在描述危险物质、环境影响途径、环境危害后果、风险防范措施等方面给出定性的说明。见附录 A。				

由上表可知，本项目环境风险评价工作划定为简单分析。

（5）地下水环境影响评价范围及等级

根据《环境影响评价技术导则 地下水环境》（HJ610-2016）中附录 A 的有关规定，本项目属于 IV 类建设项目，根据导则“4.1 一般要求”可知，IV 类建设项目不开展地下水环境影响评价。

（6）土壤环境影响评价范围及等级

根据《环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）》（HJ 964-2018），对照“附录 A 表 A.1 土壤环境影响评价项目类别”可知，本项目属于 IV 类建设项目，不需要开展土壤环境影响评价。

(7) 生态环境影响评价范围及等级

本项目位于兰州新区规划用地的科研用地范围内，且不涉及自然保护区、风景名胜等生态环境敏感区，根据《环境影响评价技术导则 生态影响》(HJ19-2011) 4.2.1 节可知，本次评价对生态环境影响进行简单分析。

1.5.3 保护目标

本项目辐射保护目标为评价范围内的相关人员，从拟建项目场所现状调查可知，拟建项目评价范围内敏感目标主要为企事业单位、在建小区及湿地公园等，其中评价范围内噪声的敏感目标主要为兰州一号（在建小区）、在建建筑(甘肃国际会展中心)及朱雀湖别墅区，其敏感目标现状图见图 1-1，其保护目标分布情况见图 1-2 和表 1-18。





图 1-1 拟建项目周围敏感目标现状图

表 1-18 评价范围范围内敏感目标情况

评价因子	序号	方位	环境敏感目标	受照人群	最近距离*, m
辐射影响	1	北	国家创业孵化基地	公众, 约 1200 人	440
	2	北	汇丰科技园	公众, 约 150 人	430
	3	东北	兰州一号 (在建小区)	公众, 预计约 7500	220
	4	东	在建建筑(甘肃国际会展中心)	公众	170
	5	南	朱雀湖别墅区	公众, 预计约 2500	415
	6	南	检验检测中心 (在建)	公众, 约 50 人	120
	7	西	秦王川国家湿地公园二期	公众	390
噪声影响	1	东北	兰州一号 (在建小区)	公众, 预计约 7500	130
	2	东	在建建筑(甘肃国际会展中心)	公众	70
	3	南	朱雀湖别墅区	公众, 预计约 2500	约 90

注: *辐射影响的最近距离是指与辐射工作场所实体边界的最近距离; 噪声影响的最近距离指的是距离厂界的最近距离



图 1-2 辐射影响评价周围敏感目标分布情况图

2 自然环境与社会环境概况

2.1 地理位置

本项目位于中科院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园内，位于在建的检验检测中心北侧。

大科学装置科技创新创业园位于兰州新区洮河街（纬五路）南侧、鸣沙山路（经六路）东侧、渭河街（纬七路）北侧、祁连山大道（经七路）西侧区域。其地理位置图见附图 1。

2.2 自然环境概况

2.2.1 地形、地貌特征

项目建设场地处于兰州新区秦王川盆地，秦王川盆地形成于第三纪，在中更新世晚期由于受东西两侧边界断裂挤压逆冲活动的影响而成为一个封闭式的断陷盆地。中更新世晚期~晚更新世早期金强河及黑马圈河沿盆地两侧古河道穿过秦王川盆地，注入黄河，从而使盆地内堆积了较厚的冲洪积砂砾石层。晚更新世晚期~全新世早期由于坪城盆地的持续抬升，河流改道，使秦王川盆地成为一个干旱盆地。兰州新区也是祁连山脉东延之余脉插入陇西盆地的交错地带，属典型的黄土高原丘陵地貌类型，平川、梁峁、沟壑及河谷地貌发育。整个地域宽阔，地势由西北向东南倾斜，东西两面是低矮黄土山丘，南北长约 60km，东西最宽处约 20km，平均海拔高度 1910m。兰州新区地势由 NE 向 SW 倾斜，北部为低山，东西南三面为低缓的黄土丘陵，相对高差为 40~60m。盆地基底为上第三系(N)河湖相及山麓相的碎屑堆积物，厚约 400~500m，以淡紫红色、桔红色泥岩、泥质砂岩、砂砾岩为主。其上为冲洪积砾石层，砾石层厚 5~30m，砾石的分选性和磨圆度较好。上覆次生黄土，土质多为黄绵土，表土层平均厚度在 0.5~3m 之间，自然植被稀疏。

2.2.2 地震

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2016)有关规定,该场地抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.15g,设计地震分组为第三组,设计特征周期为0.45s,建筑场地类别属II类,场地属对建筑抗震一般地段。拟建场地位于断陷盆地边缘的黄土丘陵地带,20m深度范围内无地下水,无饱和土分布。

2.2.3 气候气象

场地处于兰州市秦王川盆地,水文区划属兰州北部干旱区,大陆性季风气候特征显著。兰州新区深居内陆,远离海洋,受地形和大气环流影响,气候具有明显的温带大陆性季风气候特征,冬季寒冷干燥,春季多风少雨,夏无酷暑,秋季温凉。根据甘肃省气象局《关于兰州新区建设应重视气象灾害风险防范的意见》甘气发(2011)206号文件提出的兰州新区的主要气象特征为:兰州新区年平均降水量218.7mm;年平均气温为6.9℃,年平均相对湿度54.9%,年平均风速1.9m/s,风向偏北,约占32%。

另外,根据《兰州新区近地层风场时空特征分析》中4个测风塔布设位置,本项目拟建场所距离该文献中兰州新区东南角测风塔位置最近,由文献资料可知,新区东南角,春夏两季以东北风为主,出现频率为11%~12%,秋冬两季以东风为主,出现频率分别为10.8%和11.5%。夏季东南风明显增加,出现频率接近10%。

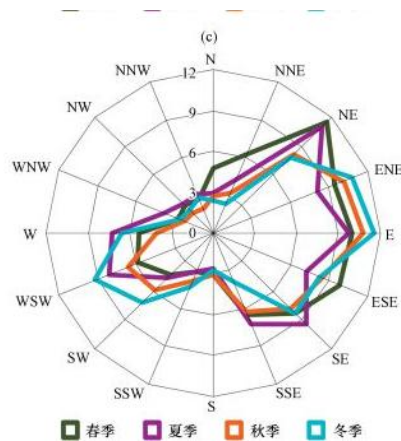


图 2-1 兰州新区东南角 2014 年 70m 高度四季风向玫瑰图

2.2.4 水文地质概况

兰州新区属黄河流域，庄浪河、大通河、咸水河、李麻沙沟、大沙沟、倒水沟、牛可沟等七条独立流出县境的河（沟）中，只有大通河和庄浪河属常年性河流，其他为泉水排泄或季节性洪水河。

根据甘肃省建筑设计研究院有限公司 2020 年 7 月完成的《兰州新区大装置科创园甘肃省同位素实验室项目勘察》（详细勘察、工程号 2020-109），场地内稳定地下水埋深 1.4~6.9m，层面高程为 1891.44~1892.62m 之间。地下水位埋藏较浅，主要赋存于透水性较强的粗颗粒砾砂层和透水性弱的粉土层中；粉质粘土层具有一定的隔水性，其下的地下水具有一定的承压性；泥岩在不扰动情况下为相对隔水层。粉土中渗透系数 $K=0.01\text{m/d}$ ，砾砂层中渗透系数 $K=25\text{m/d}$ ，属潜水类型。场地地下水主要接受地下径流、大气降水等补给，排泄方式主要以径流排泄、人工开采和蒸发消耗为主。

2.3 社会经济状况

2.3.1 人口情况

本项目位于兰州新区，兰州新区下辖中川园区、秦川园区、西岔园区三个正县级行政管理区。三区管辖永登、皋兰两县中川镇、秦川镇、上川镇、树屏镇、西岔镇和水阜乡 6 个乡镇，73 个行政村。2018 年，全区人口近 30 万人，主要民族为汉族，还有回、东乡、藏、土族等少数民族。

根据现状调查，本项目周围居民点主要为朱雀胡别墅区和在建的兰州一号，该两个小区目前未有居民入住，预计未来居住人口约 1 万人。

2.3.2 经济状况

2018 年，兰州新区实现地区生产总值 205 亿元、增长 16%，增速在国家级新区中位居前列；固定资产投资 310 亿元，增长 20%；一般公共预算收入 15.2 亿元，增长 15.6%；政府性基金收入 30.8 亿元，增长 46.5%；社会消费品零售总额 36.6 亿元，增长 14.8%；城乡居民人均可支配收入分别达到 30792 元、11020 元，增长 10%、10.5%。兰州新区由基础设施投资拉动为主的起步阶段迈入产业

支撑发展的高质量发展新阶段。

先进装备制造、绿色化工、大数据、新材料、新能源汽车、生物医药、商贸物流、文化旅游、现代农业等具有核心竞争力的九大产业集群日趋形成。其中，100平方公里的千亿级绿色高端化工产业园全面建设，近期重点发展化工新材料、产品研发和中试、医药中间体以及仓储物流，远期发展以石油化工、无机化工为基础的大化工；国际互联网数据专用通道全面建成，华为、清创、未来新影等云计算上网运营；石化重型装备制造、新能源装备生产、电工电器生产等设备制造产业体系基本建立，形成集研发、设计、制造、服务于一体的装备制造基地；充分发挥中药材资源优势，建成现代中药、生物制药、化学制药等一批医药企业，佛慈、兰药、和盛堂等一批出城入园企业绽放新颜，尚方堂现代中药与大健康产业等项目即将建成，现代化生物医药产业集群欣欣向荣，“西部药谷”加快建设；西部恐龙园、长城影视城、秦王川国家湿地公园、晴望川民俗文化村、农投花海等旅游景区影响力不断扩大；布局建设现代农业公园、现代农业示范园、生态循环养殖园和亚高原现代农业基地等现代农业，现代丝路寒旱农业初具规模。

2.3.3 交通运输状况

兰州新区构建了航空、铁路、公路三位一体的现代综合交通网络，“四纵四横”核心区骨架路网结构成型。甘肃大型国际机场——中川国际机场位于新区，年旅客吞吐量1380万人，现有客运航线218条，T3建成后国际航线将达到300条，年旅客吞吐量达3000万人。兰新、包兰等10条铁路干线贯通，2020年有19条铁路交汇，形成徐兰—兰新东西大通道，沈兰—兰渝南北大通道。连霍、京藏等7条高速公路相连。兰州至张掖三四线铁路、中卫至兰州客运专线、兰州至新区市郊铁路，景中高速、中白高速、中通道等高速公路建成后将与兰州主城区形成半小时经济圈。

2.4 环境质量现状

2.4.1 辐射环境现状

中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室于 2020 年 6 月~8 月对拟建甘肃省同位素实验室场址及周边 500 米范围进行了辐射现场监测和环境样品取样实验室分析。

2.4.1.1 监测项目

根据本项目特点,现状监测项目主要为外照射剂量率和样品特征核素,特征核素的选取主要考虑拟操作核素种类、操作量、衰变周期等,在地表水中增加了 H-3 和 Ni-63,同时测量了 Po-210。

外照射剂量率(包括 γ 辐射剂量率,中子周围剂量当量率);

气溶胶(总 α ,总 β , ^{211}At , ^{68}Ge , ^{67}Cu , ^{60}Co , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{67}Ga);

土样(总 α ,总 β , ^{211}At , ^{68}Ge , ^{67}Cu , ^{60}Co , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{67}Ga);

水样(总 α ,总 β , ^{211}At , ^{68}Ge , ^{67}Cu , ^{60}Co , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{67}Ga , ^3H , ^{63}Ni , ^{210}Po)。

2.4.1.2 监测场所

本项目位于兰州新区,场址在经六路以东、纬五路以南、纬七路以北、经七路以西。

2.4.1.3 监测对象及点位布设

监测对象:对拟建甘肃省同位素实验室场址及其周边 500 米范围进行布点及测量。

环境地表 γ 剂量率和中子剂量率:现场测量采用网格布点的方法,网格点约为 $20\text{m}\times 25\text{m}$ 网格,测量点交叉点位上。仪器开机预热稳定后,在距离地面 1m 高度处,每 5 秒读取一个数,记录 10 个数,取平均值作为测量结果。点位布设图见图 2-2~图 2-4。

气溶胶取样:根据当地气象特点,本项目所在地区春夏两季以东北风为主,秋冬两季以东风为主,结合本项目现场条件,分别在春夏上风向东北角、下风向西南角各布设 1 个气溶胶取样点,另外在场所东南角设置 1 个气溶胶取样点。气溶胶样品采集使用森雅 JL150 大流量空气采样器,滤材选用对直径 $0.5\mu\text{m}$ 粒子捕

集效率 99.95%以上的 TD/G-99B 聚丙烯滤膜(可完全灰化)。采样器布设在开阔的平地上，周围 100m 范围内无高大建筑，采样口高出基础面 1.5m，以 $2\text{m}^3/\text{min}$ 的流量采样，取样量约为 10000m^3 ，并同时测量温湿度和气压。观察取样流量变化及时更换滤膜。每次采样详细记录样品详细信息，并在样品袋上注明样品编号，以便样品交接。

水样：根据现场调查，本项目评价区内无水井等地下水取样点，地表水体只有秦川湿地公园内水域，因此，本项目水样布设点为有地下水补给的秦川湿地公园二期中的水体。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。往盛水容器中按 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(监测 ^3H 的水样品不能加酸)。地表水在湿地公园水池中取样，取样量为 25L。

土壤：在场所四周及场址各布设一个取样点。使用土壤采集器，在 $10\times 10\text{m}^2$ 范围内，采用梅花五点法采集。条件不具备时用蛇型布样采集。每点采 $10\times 10\text{cm}^2$ 的表层土样(1~5cm)，在现场充分混合，去除石头、草根等杂物后取 3kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。采集的土壤样品主要为表层土壤，每个样品的采样量一般为 3kg。

气溶胶、水样及土壤样品取样点示意图见图 2-5。



图 2-2 场址周边 500m 点位



图 2-3 场址周边相关监测点位

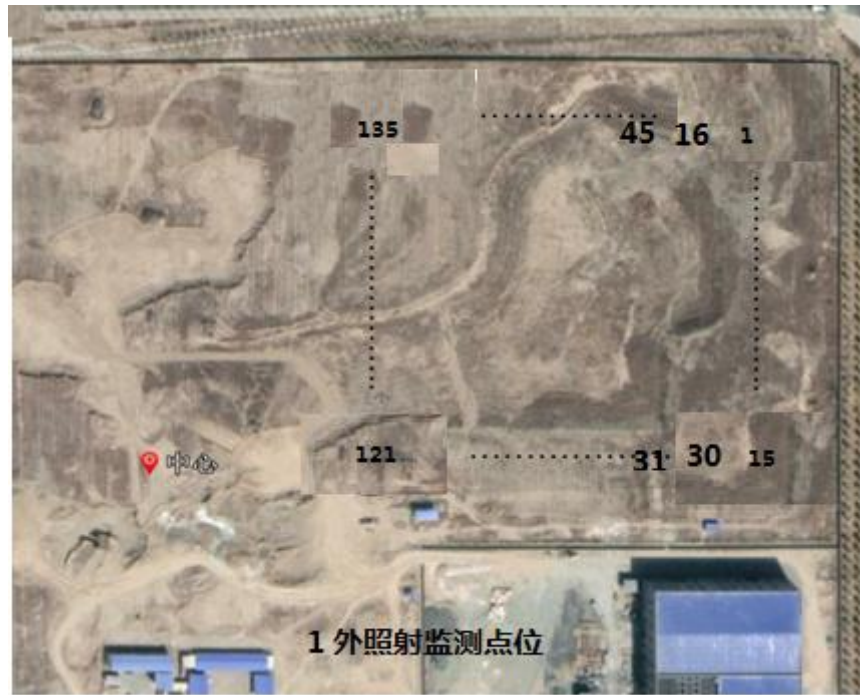


图 2-4 场址监测点位



图 2- 5 气溶胶、水及土壤取样点示意图

2.4.1.4 监测仪器及方法

2.4.1.4.1 监测设备

本次 γ 辐射剂量率，中子周围剂量当量率监测及实验室分析采用的监测设备及主要性能指标见表 2-1。

表 2-1 监测设备及主要性能指标

仪器名称	型号	出厂编号	主要技术性能指标
辐射测量仪	FH40G-X+ FHZ672 E-10	023290 +0700	测量范围：10nGy/h~100 μ Gy/h； 能量范围：48keV~6MeV； 相对响应之差：< \pm 15%。
中子周围剂量当量率仪	LB123+LB6411	178982-4092/1501	测量范围：50 nSv/h~100 mSv/h； 能量响应：热中子~20 MeV。
HPGe γ 谱仪	GEM35P4-83	104687	能量在 50~2000keV 的范围内，相对探测效率 35%，能量分辨率 1.85keV(Co-60 点源 1332.5keV)。
液闪谱仪	QUANTULUS1220	2200266	探测限：1.5Bq/L 水； 探测效率：24%
低本底 α 、 β 测量仪	BH1227	1003	平面源探测效率： α 探测效率： \geq 65%， β 探测效率： \geq 56%；本底计数率： α ： \leq 0.0008cps； β ： \leq 0.033cps。
α 谱仪	7200-08	090927	效率 43.8%~50.4% 重复性 0.1%~1.1%

2.4.1.4.2 监测方法

(1) 外照射监测

采用便携式监测仪表，以定点的测量方式进行。监测时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 10 次，每次间隔 5 秒钟，取平均值作为监测结果。

(2) 环境样品监测

在甘肃省同位素实验室场址东北角、东南角及西南角取气溶胶样品，土样选取场址四个方向周界及中心点取土壤样品，场址附近湿地公园取水样。送实验室按照国家标准或行业标准进行核素分析。

2.4.1.5 质量保证

质量保证是使实验室活动结果具有适当的置信度而采取的有计划/system行

动，其目的是通过对监测过程的全面质量控制，保证测量结果的代表性、可比性、准确性和可靠性。

本次监测任务承担单位中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室严格按照有效的标准、规范、质量管理体系文件等技术和管理规定进行监测工作，确保监测数据准确、有效。

(1) 实验室资质

实验室获得了检验检测机构资质认定和实验室认可。

(2) 监测人员素质要求

本项目监测人员具备辐射防护基本知识，掌握辐射环境监测技术和管理控制程序，参加生态环保部辐射安全与防护培训，取得合格证，同时参加项目培训并考核合格，持证上岗。

(3) 设备检定

本项目使用便携式设备每年在国防科工委放射性计量一级站检定一次，设备管理员制定仪器设备的检定/校准计划，对在用设备严格按照检定/校准周期组织检定，检定后进行检定证书确定，每年定期安排期间核查等工作。

(4) 监测方法的选用

监测方法原则上采用《辐射环境监测技术规范》中推荐的标准分析方法。实验室根据标准方法编制了相应的作业文件，规范了监测方法实施和监测记录。

(5) 现场测量的质量控制

本项目使用便携式设备等离开实验室设备暂存间设备应制定核查的具体标准，在离开、返回实验室时进行核查，合格后方可带离或归还实验室，设备在开始现场实验室活动和实验室活动结束后应进行仪器核查，仪器工作状态正常方可开展后续实验室活动。

2.4.1.6 监测依据

(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)；

- (2) 《辐射环境监测技术规范》(HJT 61-2001);
- (3) 《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》(GB/T14583-1993);
- (4) 《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》(GB/T11713-2015);
- (5) 《气载放射性物质取样一般规定》(HJ/T22-1998);
- (6) 《水中氚的分析方法》(GB12375-90);
- (7) 《水中钋-210的分析方法》(HJ813-2016);
- (8) 《水中总 α 放射性浓度的测定厚源法》(EJ/T1075-1998);
- (9) 《水中总 β 放射性测定蒸发法》(EJ/T900-1994);
- (10) 《水质总 α 放射性的测定厚源法》(HJ 898-2017);
- (11) 《水质总 β 放射性的测定厚源法》(HJ 899-2017);
- (12) 《土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法》(GB/T 11743-2013);
- (13) 《空气中放射性核素的 γ 能谱分析方法》(WS/T 184-2017);
- (14) 《水中放射性核素的 γ 能谱分析方法》(GB/T 16140-2018)。

2.4.1.7 监测结果

外照射剂量率监测结果见表 2-2、表 2-3、表 2-4，气溶胶、土样及水样监测结果见表 2-5。

表 2-2 场址周边 500m 外照射剂量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
1	西 50m	66.2 \pm 2.6	<LLDn
2	西 250m	68.0 \pm 1.0	<LLDn
3	西 500m	72.2 \pm 0.5	<LLDn
4	北 50m	67.8 \pm 0.6	<LLDn
5	北 250m	66.4 \pm 0.5	<LLDn
6	北 500m	67.5 \pm 0.5	<LLDn
7	南 50m	69.1 \pm 1.1	<LLDn
8	南 250m	68.7 \pm 1.1	<LLDn
9	南 500m	69.0 \pm 0.7	<LLDn
10	东 50m	67.2 \pm 1.4	<LLDn

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
11	东 250m	67.5 \pm 0.4	<LLDn
12	东 500m	69.4 \pm 0.4	<LLDn
13	中心	73.9 \pm 0.5	<LLDn

注：*监测结果含宇宙射线响应值；

LLDn=0.05 μ Sv/h。

表 2-3 场址周边敏感点照射剂量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
1	东在建建筑	72.0 \pm 0.5	<LLDn
2	东北兰州壹号	71.8 \pm 0.6	<LLDn
3	汇丰科技园	71.9 \pm 0.5	<LLDn
4	全国创业孵化示范基地	71.1 \pm 0.6	<LLDn
5	西侧湿地公园	71.3 \pm 0.5	<LLDn
6	朱雀湖小区	72.4 \pm 0.5	<LLDn
7	检验检测中心	72.1 \pm 0.4	<LLDn

注：*监测结果含宇宙射线响应值；

LLDn=0.05 μ Sv/h。

表 2-4 场址内部外照射剂量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
1	东北角第一排 1	65.5 \pm 1.5	<LLDn
2	东北角第一排 2	61.9 \pm 2.2	<LLDn
3	东北角第一排 3	62.5 \pm 1.6	<LLDn
4	东北角第一排 4	67.8 \pm 1.9	<LLDn
5	东北角第一排 5	68.7 \pm 1.7	<LLDn
6	东北角第一排 6	67.2 \pm 2.8	<LLDn
7	东北角第一排 7	63.6 \pm 1.8	<LLDn
8	东北角第一排 8	69.4 \pm 3.8	<LLDn
9	东北角第一排 9	66.8 \pm 2.1	<LLDn
10	东北角第一排 10	66.0 \pm 1.1	<LLDn
11	东北角第一排 11	66.0 \pm 0.5	<LLDn
12	东北角第一排 12	64.2 \pm 1.1	<LLDn
13	东北角第一排 13	60.2 \pm 1.0	<LLDn
14	东北角第一排 14	59.8 \pm 1.3	<LLDn
15	东北角第一排 15	65.5 \pm 4.3	<LLDn
16	东北角第二排 1	56.5 \pm 4.4	<LLDn
17	东北角第二排 2	61.4 \pm 5.4	<LLDn
18	东北角第二排 3	65.1 \pm 6.4	<LLDn
19	东北角第二排 4	66.8 \pm 1.6	<LLDn

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
20	东北角第二排 5	65.1±0.5	<LLDn
21	东北角第二排 6	74.2±1.0	<LLDn
22	东北角第二排 7	68.2±1.1	<LLDn
23	东北角第二排 8	69.7±1.9	<LLDn
24	东北角第二排 9	67.5±3.0	<LLDn
25	东北角第二排 10	70.4±0.9	<LLDn
26	东北角第二排 11	68.7±2.0	<LLDn
27	东北角第二排 12	66.8±1.0	<LLDn
28	东北角第二排 13	72.2±0.8	<LLDn
29	东北角第二排 14	68.7±1.8	<LLDn
30	东北角第二排 15	66.6±3.4	<LLDn
31	东北角第三排 1	68.2±0.6	<LLDn
32	东北角第三排 2	66.5±0.9	<LLDn
33	东北角第三排 3	65.5±0.7	<LLDn
34	东北角第三排 4	67.0±0.8	<LLDn
35	东北角第三排 5	68.1±1.4	<LLDn
36	东北角第三排 6	63.3±1.6	<LLDn
37	东北角第三排 7	68.3±0.7	<LLDn
38	东北角第三排 8	68.1±0.8	<LLDn
39	东北角第三排 9	67.6±0.8	<LLDn
40	东北角第三排 10	67.7±0.9	<LLDn
41	东北角第三排 11	67.3±0.5	<LLDn
42	东北角第三排 12	65.4±0.5	<LLDn
43	东北角第三排 13	62.0±0.6	<LLDn
44	东北角第三排 14	67.3±1.1	<LLDn
45	东北角第三排 15	65.6±0.8	<LLDn
46	东北角第四排 1	65.3±0.6	<LLDn
47	东北角第四排 2	62.6±0.7	<LLDn
48	东北角第四排 3	60.6±0.4	<LLDn
49	东北角第四排 4	62.0±0.5	<LLDn
50	东北角第四排 5	65.4±0.5	<LLDn
51	东北角第四排 6	61.6±0.6	<LLDn
52	东北角第四排 7	60.1±0.4	<LLDn
53	东北角第四排 8	63.3±0.4	<LLDn
54	东北角第四排 9	65.1±0.4	<LLDn
55	东北角第四排 10	61.4±0.7	<LLDn
56	东北角第四排 11	62.0±0.4	<LLDn
57	东北角第四排 12	64.3±0.5	<LLDn
58	东北角第四排 13	63.9±0.9	<LLDn
59	东北角第四排 14	64.2±0.7	<LLDn
60	东北角第四排 15	60.9±0.3	<LLDn

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
61	东北角第五排 1	64.8±0.8	<LLDn
62	东北角第五排 2	65.3±0.5	<LLDn
63	东北角第五排 3	64.7±0.5	<LLDn
64	东北角第五排 4	62.3±0.4	<LLDn
65	东北角第五排 5	62.4±0.5	<LLDn
66	东北角第五排 6	62.4±0.7	<LLDn
67	东北角第五排 7	62.6±0.3	<LLDn
68	东北角第五排 8	61.4±0.7	<LLDn
69	东北角第五排 9	63.6±1.5	<LLDn
70	东北角第五排 10	62.7±0.5	<LLDn
71	东北角第五排 11	64.3±0.8	<LLDn
72	东北角第五排 12	64.3±0.4	<LLDn
73	东北角第五排 13	67.1±1.1	<LLDn
74	东北角第五排 14	68.0±0.7	<LLDn
75	东北角第五排 15	67.1±1.1	<LLDn
76	东北角第六排 1	67.4±0.5	<LLDn
77	东北角第六排 2	67.5±0.5	<LLDn
78	东北角第六排 3	62.8±0.6	<LLDn
79	东北角第六排 4	66.8±0.9	<LLDn
80	东北角第六排 5	65.5±0.6	<LLDn
81	东北角第六排 6	64.8±0.4	<LLDn
82	东北角第六排 7	62.2±0.7	<LLDn
83	东北角第六排 8	66.5±0.6	<LLDn
84	东北角第六排 9	63.7±0.6	<LLDn
85	东北角第六排 10	62.6±0.5	<LLDn
86	东北角第六排 11	60.7±0.6	<LLDn
87	东北角第六排 12	62.5±0.5	<LLDn
88	东北角第六排 13	65.7±0.6	<LLDn
89	东北角第六排 14	69.4±0.9	<LLDn
90	东北角第六排 15	69.1±0.5	<LLDn
91	东北角第七排 1	68.4±0.3	<LLDn
92	东北角第七排 2	67.1±0.7	<LLDn
93	东北角第七排 3	66.4±0.7	<LLDn
94	东北角第七排 4	66.5±0.6	<LLDn
95	东北角第七排 5	65.5±0.5	<LLDn
96	东北角第七排 6	65.3±0.7	<LLDn
97	东北角第七排 7	64.4±0.5	<LLDn
98	东北角第七排 8	61.8±0.6	<LLDn
99	东北角第七排 9	61.4±0.4	<LLDn
100	东北角第七排 10	65.6±0.4	<LLDn
101	东北角第七排 11	65.9±1.0	<LLDn

监测点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
102	东北角第七排 12	65.6±0.4	<LLDn
103	东北角第七排 13	66.4±0.6	<LLDn
104	东北角第七排 14	62.5±0.4	<LLDn
105	东北角第七排 15	66.3±0.4	<LLDn
106	东北角第八排 1	65.0±0.6	<LLDn
107	东北角第八排 2	65.0±0.8	<LLDn
108	东北角第八排 3	65.8±0.9	<LLDn
109	东北角第八排 4	67.0±0.8	<LLDn
110	东北角第八排 5	67.7±0.7	<LLDn
111	东北角第八排 6	67.4±0.6	<LLDn
112	东北角第八排 7	67.0±0.8	<LLDn
113	东北角第八排 8	68.0±0.7	<LLDn
114	东北角第八排 9	67.1±0.8	<LLDn
115	东北角第八排 10	66.6±0.5	<LLDn
116	东北角第八排 11	64.5±0.5	<LLDn
117	东北角第八排 12	63.1±0.8	<LLDn
118	东北角第八排 13	64.7±0.7	<LLDn
119	东北角第八排 14	64.4±0.8	<LLDn
120	东北角第八排 15	65.1±1.0	<LLDn
121	东北角第九排 1	67.8±0.6	<LLDn
122	东北角第九排 2	68.6±0.7	<LLDn
123	东北角第九排 3	68.4±0.5	<LLDn
124	东北角第九排 4	67.8±0.8	<LLDn
125	东北角第九排 5	71.1±0.7	<LLDn
126	东北角第九排 6	69.6±0.9	<LLDn
127	东北角第九排 7	66.9±0.9	<LLDn
128	东北角第九排 8	67.9±0.8	<LLDn
129	东北角第九排 9	68.4±0.6	<LLDn
130	东北角第九排 10	67.9±0.9	<LLDn
131	东北角第九排 11	68.1±0.8	<LLDn
132	东北角第九排 12	69.2±0.4	<LLDn
133	东北角第九排 13	68.0±1.0	<LLDn
134	东北角第九排 14	66.7±0.9	<LLDn
135	东北角第九排 15	66.2±0.5	<LLDn

注：*监测结果含宇宙射线响应值；

LLDn=0.05 μ Sv/h。

表 2-5 气溶胶、土样及水样监测结果

样品编号	检测项目	结果	备注
2020008-20200604- 场址东南角(气溶胶)	总 α	\leq LD=5.8E-05 Bq/m ³	-
	总 β	(5.32±0.15)E-04 Bq/m ³	-

样品编号	检测项目	结果	备注
样)	⁵⁷ Co	≤LD=4.3E-06 Bq/m ³	参考日期：2020.7.12
	⁶⁷ Cu	≤LD=6.0E-04 Bq/m ³	
	⁶⁵ Zn	≤LD=1.6E-05 Bq/m ³	
	⁶⁸ Ge	≤LD=2.1E-04 Bq/m ³	
	⁶⁰ Co	≤LD=6.3E-06 Bq/m ³	
	⁶⁷ Ga	≤LD=1.0E-04 Bq/m ³	
	²¹¹ At	≤LD=3.4E-03 Bq/m ³	
2020008-20200604- 场址东北角(气溶胶 样)	总α	≤LD=5.6E-05 Bq/m ³	-
	总β	(1.05±0.02)E-03 Bq/m ³	-
	⁵⁷ Co	≤LD=3.8E-06 Bq/m ³	参考日期：2020.7.13
	⁶⁷ Cu	≤LD=5.9E-04 Bq/m ³	
	⁶⁵ Zn	≤LD=1.3E-05 Bq/m ³	
	⁶⁸ Ge	≤LD=2.3E-04 Bq/m ³	
	⁶⁰ Co	≤LD=7.1E-06 Bq/m ³	
	⁶⁷ Ga	≤LD=1.1E-04 Bq/m ³	
²¹¹ At	≤LD=2.6E-03 Bq/m ³		
2020008-20200604- 场址西南角(气溶胶 样)	总α	≤LD=7.7E-05 Bq/m ³	-
	总β	(1.07±0.02)E-03 Bq/m ³	-
	⁵⁷ Co	≤LD=5.1E-06 Bq/m ³	参考日期：2020.7.16
	⁶⁷ Cu	≤LD=7.0E-04 Bq/m ³	
	⁶⁵ Zn	≤LD=1.8E-05 Bq/m ³	
	⁶⁸ Ge	≤LD=2.5E-04 Bq/m ³	
	⁶⁰ Co	≤LD=8.2E-06 Bq/m ³	
	⁶⁷ Ga	≤LD=1.2E-04 Bq/m ³	
²¹¹ At	≤LD=4.2E-03 Bq/m ³		
2020008-20200604- 场址东周界外(土壤 样)	总α	≤LD=3.9E+02 Bq/kg	-
	总β	(7.63±0.53)E+02 Bq/kg	-
	⁵⁷ Co	≤LD=3.1E-01 Bq/kg	参考日期：2020.7.13
	⁶⁷ Cu	≤LD=4.5E+01 Bq/kg	
	⁶⁵ Zn	≤LD=9.6E-01 Bq/kg	
	⁶⁸ Ge	≤LD=1.9E+01 Bq/kg	
	⁶⁰ Co	≤LD=6.0E-01 Bq/kg	
	²¹¹ At	≤LD=2.0E+02 Bq/kg	
⁶⁷ Ga	≤LD=7.4 Bq/kg		
2020008-20200604- 场址西周界外(土壤 样)	总α	≤LD=3.7E+02 Bq/kg	-
	总β	(1.14±0.07)E+03 Bq/kg	-
	⁵⁷ Co	≤LD=2.4E-01 Bq/kg	参考日期：2020.7.11
	⁶⁷ Cu	≤LD=3.2E+01 Bq/kg	
	⁶⁵ Zn	≤LD=8.2E-01 Bq/kg	
	⁶⁸ Ge	≤LD=1.2E+01 Bq/kg	
	⁶⁰ Co	≤LD=4.8E-01 Bq/kg	
	²¹¹ At	≤LD=1.4E+02 Bq/kg	

样品编号	检测项目	结果	备注
	^{67}Ga	$\leq\text{LD}=6.0\text{ Bq/kg}$	
2020008-20200604- 场址南周界外(土壤 样)	总 α	$\leq\text{LD}=3.6\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	-
	总 β	$(6.88\pm 0.64)\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	-
	^{57}Co	$\leq\text{LD}=2.3\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	参考日期: 2020.7.11
	^{67}Cu	$\leq\text{LD}=3.2\text{E}+01\text{ Bq/kg}$	
	^{65}Zn	$\leq\text{LD}=9.3\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	
	^{68}Ge	$\leq\text{LD}=1.4\text{E}+01\text{ Bq/kg}$	
	^{60}Co	$\leq\text{LD}=5.0\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	
	^{211}At	$\leq\text{LD}=1.4\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	
	^{67}Ga	$\leq\text{LD}=6.0\text{ Bq/kg}$	
2020008-20200604- 场址北周界外(土壤 样)	总 α	$\leq\text{LD}=2.6\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	-
	总 β	$(4.48\pm 0.43)\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	-
	^{57}Co	$\leq\text{LD}=2.3\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	参考日期: 2020.7.10
	^{67}Cu	$\leq\text{LD}=2.9\text{E}+01\text{ Bq/kg}$	
	^{65}Zn	$\leq\text{LD}=7.9\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	
	^{68}Ge	$\leq\text{LD}=1.1\text{E}+01\text{ Bq/kg}$	
	^{60}Co	$\leq\text{LD}=4.2\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	
	^{211}At	$\leq\text{LD}=1.2\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	
	^{67}Ga	$\leq\text{LD}=5.6\text{ Bq/kg}$	
2020008-20200604- 场址周界内(土壤样)	总 α	$\leq\text{LD}=2.6\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	-
	总 β	$(5.63\pm 0.44)\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	-
	^{57}Co	$\leq\text{LD}=2.2\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	参考日期: 2020.7.14
	^{67}Cu	$\leq\text{LD}=3.0\text{E}+01\text{ Bq/kg}$	
	^{65}Zn	$\leq\text{LD}=7.7\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	
	^{68}Ge	$\leq\text{LD}=1.2\text{E}+01\text{ Bq/kg}$	
	^{60}Co	$\leq\text{LD}=4.5\text{E}-01\text{ Bq/kg}$	
	^{211}At	$\leq\text{LD}=1.4\text{E}+02\text{ Bq/kg}$	
	^{67}Ga	$\leq\text{LD}=5.4\text{ Bq/kg}$	
2020008-20200604- 场址附近湿地(水样)	总 α	$\leq\text{LD}=1.3\text{ Bq/L}$	-
	总 β	$\leq\text{LD}=4.9\text{E}-01\text{ Bq/L}$	-
	^{57}Co	$\leq\text{LD}=1.2\text{E}-03\text{ Bq/L}$	参考日期: 2020.7.11
	^{67}Cu	$\leq\text{LD}=1.5\text{E}-01\text{ Bq/L}$	
	^{65}Zn	$\leq\text{LD}=3.4\text{E}-03\text{ Bq/L}$	
	^{68}Ge	$\leq\text{LD}=5.1\text{E}-02\text{ Bq/L}$	
	^{60}Co	$\leq\text{LD}=2.0\text{E}-03\text{ Bq/L}$	
	^{67}Ga	$\leq\text{LD}=2.4\text{E}-05\text{ Bq/L}$	
	^{211}At	$\leq\text{LD}=8.6\text{E}-01\text{ Bq/L}$	
	^3H	$\leq\text{LD}=1.37\text{ Bq/L}$	-
	^{210}Po	$(1.31\pm 0.14)\text{E}-02\text{ Bq/L}$	-
	^{63}Ni	$\leq\text{LD}=1.0\text{E}-01\text{ Bq/L}$	-

由表 2-2、表 2-3、表 2-4 可知, 场址周边 500 米 γ 辐射剂量率在(66.2~73.9)

nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限；周边敏感点监测点位辐射剂量率在（71.1~72.4）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限；场区内部东北角 γ 辐射剂量率在（60.1~74.2）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限。由表 2-5 可知，气溶胶样品总 β 检测结果在 5.32E-04~1.07E-03Bq/m³，其余检测项目均小于探测限；土样总 β 检测结果在 4.48E+02~1.14E+03Bq/m³，其余检测项目均小于探测限；水样 ²¹⁰Po 检测结果为 1.31E-02Bq/L，其余检测项目结果均小于探测限。

2.4.1.8 结论

通过本次监测，可以得出以下结论：

甘肃省同位素实验室场址周边 500 米 γ 辐射剂量率在（66.2~73.9）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限；周边敏感点监测点位辐射剂量率在（71.1~72.4）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限；场区内部东北角 γ 辐射剂量率在（60.1~74.2）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限，根据《甘肃省环境天然贯穿辐射水平调查研究》（刘纯亭等，《辐射防护》第 16 卷第 2 期，1996 年 3 月），兰州市原野 γ 辐射剂量率在（34~104.5）nGy/h 范围内，拟建场址及周围环境 γ 辐射剂量率在兰州市原野 γ 辐射剂量率本底范围内。

三个气溶胶样品总 β 检测结果在 5.32E-04~1.07E-03Bq/m³，其余检测项目均小于探测限；五个土样总 β 检测结果在 4.48E+02~1.14E+03Bq/m³，其余检测项目均小于探测限；湿地水样的 ²¹⁰Po 检测结果为 1.31E-02Bq/L，其余检测项目结果均小于探测限。

2.4.2 空气质量现状

根据《兰州市 2019 年环境状况公报》可知，2019 年兰州市空气质量达标天数 296 天，空气质量达标率 81.1%，未发生人为因素导致的重度及以上污染天气；1-12 月份城区可吸入颗粒物（PM₁₀）浓度 79 μ g/m³；细颗粒物（PM_{2.5}）浓度 36 μ g/m³；二氧化硫（SO₂）浓度 18 μ g/m³；二氧化氮（NO₂）浓度 50 μ g/m³；臭氧（O₃）第 90 百分位数浓度 151 μ g/m³、一氧化碳（CO）第 95 百分位数浓度为

2.5 mg/m³；其中二氧化硫（SO₂）、臭氧（O₃），一氧化碳（CO）浓度达标；

2.4.3 声环境质量现状

2020年12月17日对拟建项目场址及其周围噪声现状情况进行了监测。

2.4.3.1 监测点位及监测因子

场界四周各设置1处监测点，周围3处敏感点各设1个监测点，拟建场址设置1个监测点，共8个监测点，监测项目为L_d，L_n。

2.4.3.2 监测时间及监测频次

监测时间：2020年12月17日；监测频次：昼、夜间各一次。

2.4.3.3 监测方法

按照《声环境质量标准》（GB3096-2008）中有关规定进行，采用环境噪声自动监测仪监测。

2.4.3.4 监测结果及评价

噪声现状监测结果见表2-6。

表2-6 甘肃省同位素实验室项目（一期）噪声现状监测结果

监测点位	监测点位名称	昼间测值 (dB(A))	夜间测值 (dB(A))	备注
1#	甘肃省同位素实验室项目(一期)	拟建站址处	43.7	/
2#		站址东侧厂界	43.9	/
3#		站址南侧厂界	42.6	/
4#		站址西侧厂界	44.2	/
5#		站址北侧厂界	43.5	/
6#	甘肃国际会展中心（在建）	48.1	32.3	工地施工
7#	兰州一号小区（在建）	49.8	31.4	
8#	朱雀湖别墅	42.6	35.7	/

从表2-6可知，本项目各监测点昼间噪声在42.6dB（A）~49.8dB（A）之间，夜间噪声在31.4dB（A）~36.8dB（A）之间。在监测时间段内各监测点位昼、夜间噪声值均能达到《声环境质量标准》（GB3096-2008）相应标准要求。依据现场调查，项目所在地周边较为空旷，噪声主要为周边道路交通噪声及建设

施工噪声，无其他高噪声源，结合区域声环境监测结果，项目所在地周边声环境质量较好。

2.5 场址适宜性分析

本项目地震烈度按 7 度设防考虑，设计基本地震加速度值为 0.15g，最大冻土深度 145cm。本项目为干旱少雨区，周围地势广阔平坦，距离河渠较远，除及时排除场区雨水外，不存在防洪、防潮、排涝等问题。

本项目位于兰州新区中川镇的洮河街(纬五路)南侧、北侧为纬五路、西侧经六路、南侧纬七路、东侧的七路，场区交通非常便利。

与本项目相邻的经七路、纬七路、经六路、纬五路等市政道路下均埋有给水、排水、电力、电讯、燃气、供暖等市政管道或线缆，场区公用及辅助设施可对应就近接入。

本项目建设内容不在周围住宅小区的主导风向的上风向，与周边湿地公园有一定距离，采用一定的屏蔽措施和辐射防护措施，对周围环境的辐射影响较小。

项目用地为兰州新区中科院近代物理所无偿划拨科研用地，场地为待开发空地，不存在征地、拆迁、移民安置等问题。

本项目严格按照甘肃省兰州新区有关部门规划要求设计，项目周围环境质量良好，与现有周边建筑物布局合理，项目运行不会对周边建筑物和居民生活造成影响，施工条件有保障，周边环境许可。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

本项目主要开展两大研究方向：(1) 探索超重稳定岛的存在性，同时进行超重元素化学性质和超铀元素应用研究；(2) 以稳定同位素和放射性同位素为主要研究方向，自主研制同位素产生装置，进行有重大应用和产业前景的同位素核心技术研发以及自主化生产工艺探索，推动高附加值的同位素在工业、医药以及科研领域的应用。

(1) 超重元素合成与核反应新机制研究

该研究主要利用超导直线加速器加速超重离子打靶，合成新的核素，并开展新核素方面的研究。该研究涉及使用 1 台超导直线加速器和 1 个非密封放射性工作场所。使用加速器的离子为重离子，主要包括 $^{51}\text{V}^{17+}$ 、 $^{54}\text{Cr}^{18+}$ 、 $^{55}\text{Mn}^{19+}$ 和 $^{58}\text{Fe}^{20+}$ ，该加速器的最大流强约 $10\mu\text{A}$ 、总能量最大为 406MeV （最大能量 7MeV/u ），该研究开展超重新核素合成、超重元素化学性质、超重核结构和性质等方面的研究。超重装置加速器参数见表 3-1，非密封放射性工作场所使用核素情况见表 3-2。

表 3-1 超重装置拟使用加速器的典型技术参数

名称型号	生产厂家	加速粒子	能量*, Mev	流强*, μA	用途	位置
超导直线 加速器	自研	^{51}V	357	10	科研	超重加 速器隧 道及终 端
		^{54}Cr	378	10	科研	
		^{55}Mn	385	10	科研	
		^{58}Fe	406	10	科研	

*该表中给出的流强为最大设计参数。

*该表给出的是典型的技术参数，最高加速离子的能量为 $A \times 7\text{MeV}$ ，每个粒子的能量为 7MeV/u ，其中 A 为加速离子的质量数。

(2) 同位素产生与分离及其核心技术研究

该研究拟使用超导直线加速器加速的质子或者氦离子打靶，分离并提取靶中的目标核素，并对提取的目标核素进行质检。拟使用的超导直线加速器装置参数见表 3-3，其靶站、热室大厅拟操作核素情况见表 3-4。

表 3-2 超重终端二层非密封放射性工作场所放射性同位素操作情况

核素	物理、化学性状	日最大操作量,Bq	日等效最大操作量*,Bq	年操作量, Bq	操作方式	用途
²⁴³ Am	液体	2.66E+07	2.66E+09	2.66E+09	特别危险	科研
⁹⁵ Nb	粉末	3.70E+06	3.70E+08	3.70E+08	特别危险	科研
¹⁸² Ta	粉末	3.70E+06	3.70E+08	3.70E+08	特别危险	科研
¹⁷⁹ Ta	粉末	3.70E+06	3.70E+08	3.70E+08	特别危险	科研
小计			2.66E+09	—	—	—

注：超重终端二层非密封放射性工作场所每次只操作一种核素，则日等效操作量最大为2.66E+9Bq，根据 GB18871-2002，日等效操作量在 $2.0 \times 10^7 \sim 4.0 \times 10^9$ Bq，为乙级非密封放射性工作场所。

表 3-3 同位素生产研发拟使用加速器设计参数

名称型号	生产厂家	加速粒子	能量*, Mev	流强*, mA	用途	位置
超导直线加速器	自研	H	25	2	科研	同位素装置隧道、靶站照射室
		⁴ He	29	2	科研	

表 3-4 靶站/热室大厅所在非密封放射性场所操作核素情况

操作部件	核素	物理、化学状态	日最大操作量, Bq	日等效操作量, Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途
石墨包壳	¹³ N	固态、气态、液态	2.71E+08	2.71E+09	4.61E+09	特别危险	科研
	¹¹ C	固态、气态、液态	2.40E+09	2.40E+10	4.08E+10	特别危险	科研
	⁷ Be	固态、气态、液态	3.40E+05	3.40E+06	5.78E+06	特别危险	科研
	³ H	固态、气态、液态	1.72E+05	1.72E+06	2.92E+06	特别危险	科研
Bi 靶	²¹¹ At*	固态、气态、液态	7.37E+11	7.37E+14	1.25E+13	特别危险	科研
	²⁰⁹ Po	固态、气态、液态	241.3	2.41E+06	4.10E+03	特别危险	科研
	²⁰⁸ Bi	固态、气态、液态	1537	1.54E+05	2.61E+04	特别危险	科研
	²⁰⁸ Po	固态、气态、液态	3870	3.87E+07	6.58E+04	特别危险	科研
	²⁰⁷ Bi	固态、气态、液态	1.39E+07	1.39E+09	2.36E+08	特别危险	科研
	¹⁴ C	固态、气态、液态	5366	5.37E+05	9.12E+04	特别危险	科研
	¹³ N	固态、气态、液态	2.10E+08	2.10E+09	3.57E+09	特别危险	科研
	¹¹ C	固态、气态、液态	3.26E+08	3.26E+09	5.54E+09	特别危险	科研
	³ H	固态、气态、液态	1.43E+07	1.43E+08	2.43E+08	特别危险	科研
小计				7.37E+14	-	-	-
天然 Ga 靶	⁷⁴ As	固态、液态	1.11E+07	1.11E+07	1.89E+08	特别危险	科研
	⁷² Ga	固态、液态	1.13E+10	1.13E+10	1.92E+11	特别危险	科研
	⁷² As	固态、液态	6.71E+07	6.71E+07	1.14E+09	特别危险	科研
	⁷¹ Ge	固态、液态	2.69E+12	2.69E+11	4.57E+13	特别危险	科研
	⁷⁰ Ga	固态、液态	4.50E+11	4.50E+10	7.65E+12	特别危险	科研

操作部件	核素	物理、化学状态	日最大操作量, Bq	日等效操作量, Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途
	⁶⁹ Zn	固态、液态	2.48E+09	2.48E+08	4.22E+10	特别危险	科研
	⁶⁹ Ge	固态、液态	1.31E+13	1.31E+13	2.23E+14	特别危险	科研
	⁶⁸ Ga	固态、液态	8.90E+12	8.90E+11	1.51E+14	特别危险	科研
	⁶⁸ Ge*	固态、液态	5.14E+11	5.14E+11	8.74E+12	特别危险	科研
	⁶⁷ Cu	固态、液态	1.08E+10	1.08E+10	1.84E+11	特别危险	科研
	⁶⁷ Ga	固态、液态	4.34E+11	4.34E+11	7.38E+12	特别危险	科研
	⁶⁷ Ge	固态、液态	3.44E+07	3.44E+06	5.85E+08	特别危险	科研
	⁶⁵ Zn	固态、液态	2.08E+11	2.08E+11	3.54E+12	特别危险	科研
	⁶⁴ Cu	固态、液态	2.66E+10	2.66E+09	4.52E+11	特别危险	科研
	⁶³ Ni	固态、液态	2.62E+05	2.62E+05	4.45E+06	特别危险	科研
	³ H	固态、液态	1.48E+07	1.48E+06	2.52E+08	特别危险	科研
	^{69m} Zn	固态、液态	1.61E+09	1.61E+08	2.74E+10	特别危险	科研
	^{71m} Zn	固态、液态	2.61E+08	2.61E+07	4.44E+09	特别危险	科研
小计				1.55E+13	-		
天然Zn靶	⁷¹ Ge	固态、液态	8.15E+06	8.15E+05	1.39E+08	特别危险	科研
	⁷⁰ Ga	固态、液态	1.91E+10	1.91E+09	3.25E+11	特别危险	科研
	⁶⁹ Zn	固态、液态	2.99E+10	2.99E+09	5.08E+11	特别危险	科研
	⁶⁹ Ge	固态、液态	1.35E+07	1.35E+07	2.30E+08	特别危险	科研
	⁶⁸ Ga	固态、液态	3.36E+12	3.36E+11	5.71E+13	特别危险	科研
	⁶⁷ Cu*	固态、液态	7.96E+09	7.96E+09	1.35E+11	特别危险	科研
	⁶⁷ Ga	固态、液态	7.13E+12	7.13E+12	1.21E+14	特别危险	科研
	⁶⁶ Ga	固态、液态	7.55E+12	7.55E+12	1.28E+14	特别危险	科研
	⁶⁵ Ni	固态、液态	1.19E+07	1.19E+07	2.02E+08	特别危险	科研
	⁶⁵ Zn	固态、液态	1.56E+11	1.56E+11	2.65E+12	特别危险	科研
	⁶⁵ Ga	固态、液态	1.55E+11	1.55E+10	2.64E+12	特别危险	科研
	⁶⁴ Cu	固态、液态	1.98E+12	1.98E+11	3.37E+13	特别危险	科研
	⁶³ Ni	固态、液态	1.54E+06	1.54E+06	2.62E+07	特别危险	科研
	⁶³ Zn	固态、液态	3.42E+12	3.42E+11	5.81E+13	特别危险	科研
	⁶² Zn	固态、液态	1.12E+10	1.12E+10	1.90E+11	特别危险	科研
	⁶¹ Co	固态、液态	1.19E+09	1.19E+08	2.02E+10	特别危险	科研
	⁶¹ Cu	固态、液态	3.49E+12	3.49E+11	5.93E+13	特别危险	科研
	⁶⁰ Co	固态、液态	4.38E+06	4.38E+07	7.45E+07	特别危险	科研
⁶⁰ Cu	固态、液态	2.57E+11	2.57E+10	4.37E+12	特别危险	科研	
⁵⁹ Ni	固态、液态	2.01E+03	2.01E+02	3.42E+04	特别危险	科研	
⁵⁸ Co	固态、液态	7.09E+05	7.09E+05	1.21E+07	特别危险	科研	

操作部件	核素	物理、化学状态	日最大操作量, Bq	日等效操作量, Bq	年操作量, Bq	操作方式*	用途
	⁵⁷ Co	固态、液态	3.82E+09	3.82E+09	6.49E+10	特别危险	科研
	³ H	固态、液态	2.95E+06	2.95E+05	5.02E+07	特别危险	科研
	^{46m} Sc	固态、液态	3.62E+06	3.62E+06	6.15E+07	特别危险	科研
	^{52m} Mn	固态、液态	4.77E+02	4.77E+02	8.11E+03	特别危险	科研
	小计			1.62E+13	-		

注: *该项目三种靶件不会同时操作, 则日等效操作量取三种靶件操作中日等效操作量最大值, 为 7.37E+14Bq, 根据 GB18871-2002, 日等效操作量大于 4.0E+09Bq, 为甲级非密封放射性工作场所, 因此, 本项目靶站、热室大厅所在建筑为甲级非密封放射性工作场所。
*²¹¹At、⁶⁸Ge 和 ⁶⁷Cu 为三种靶件分别提出的目标核素。

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1 超重元素合成与核反应新机制研究

超重新元素合成专用研究装置由重离子超导直线加速器、稀有同位素靶, 以及核反应、充气谱仪实验研究终端等组成。

3.2.1.1 超导直线加速器

超导直线加速器系统主要包括由超导离子源、低能传输线 (LEBT)、射频四极加速器 (RFQ)、中能传输线 (MEBT)、超导加速段 (CM1-4)、高能传输线 (HEBT) 以及超重实验终端组成, 涉及到磁铁、电源、控制、低温、真空、束测、准直、功率源、低电平、耦合器、超导腔等子系统。其装置布局图见图 3-1。

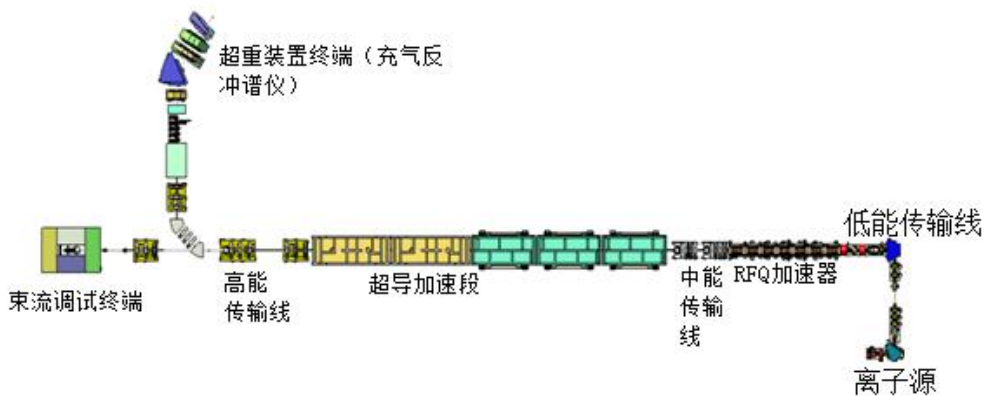


图 3-1 超重新元素合成专用研究装置布局图

超重核研究专用强流重离子加速器的离子源采用超导离子源，引出束流经过 LEPT 匹配到常温 RFQ 入口，被 RFQ 加速后接超导 HWR 腔将束流继续加速到 7MeV/u。在 RFQ 和超导加速段之间的 MEPT 采用 buncher 对束流的纵向品质进行匹配，超导加速段 CM4 的末端为 HEPT，束流可偏转 90 度传输到超重装置终端。

(1) 离子源

超重核研究超导直线加速器的离子源采用中科院近代物理研究所研制的现有的具有高稳定性的全超导 ECR 离子源，频率为 24GHz。主要包括微波发生装置、离子源源体、低温制冷系统及束流引出系统四部分。

(2) 低能传输段

低能传输段 LEPT 的主要作用是为了实现 ECR 离子源与 RFQ 之间的束流匹配和传输，同时肩负着束流的整形和约束作用，尽可能地降低束流在低能段损失，对整个系统有着非常重要的意义。LEPT 段利用三个可调节光阑刮除 20% 的外围粒子，束流水平和垂直方向归一化发射度为 0.19mm.mrad 满足 RFQ 入口的反射度要求。通过两台反极性双螺线管透镜实现束流匹配，同时避免束流横向相空间耦合。

(3) 射频四极加速器

RFQ 是加速器的第一个高频元件，RFQ 系统包括：RFQ 腔体、功率源系统、真空系统、水冷系统、控制系统、低电平系统、准直测量、机械调整支架系统等。为了避免损失的粒子打在真空管道、磁体、高频腔体等元件上引起材料的活化辐射，其输出能量选择在 1.33MeV/u，RFQ 运行频率为 162.5MHz。工作为 CW 模式，RFQ 腔体材料为无氧铜板料，RFQ 分成 7 段加工，每段腔体是高纯度无氧铜装配钎焊接组成的真空密闭腔体，每个工艺段之间用带有真空和高频密封的法兰连接。

(4) 中能传输段

中能传输段 MEPT 主要用于实现束流从 RFQ 到超导加速段的横向和纵向匹配，并在此处完成束流参数的全面测量，束流位置和参数的误差校正以及束晕刮

除。MEBT 的长度约为 3.2m，由 6 台四极磁铁和两台 162.5MHz 常温聚束腔组成，分别用于横向和纵向的束流匹配。配备了束流调试所需的束诊元件，包括束流位置探测器 BPM，束流流强探测器 ACCT，以及用于测量束流发射度的狭缝和法拉第桶。

(5) 超导加速段

超导加速段将荷质比为 1/3 的重离子由 1.33MeV/u 加速到 7MeV/u，整个超导加速段包括 4 个 CM，前 3 个 CM 为 HWR010 低温恒温器，每个 CM 包括 6 台超导 HWR010 腔体和 6 台超导螺线管。第 4 个 CM 为 HWR015 低温恒温器，包括 5 台超导 HWR015 腔体和 5 台超导螺线管。CM 之间采用常温过度，总长度为 17.3 米。其中 CM1 出口能量为 2MeV/u，CM2 出口能量为 3.1MeV/u，CM3 出口能量为 4.5MeV/u，CM4 出口能量为 7MeV/u。

(6) 高能传输段

HEBT 是连接超导加速段和束流垃圾桶或实验终端的一条束运线，HEBT 主要为将束流传输匹配到超重实验终端，测量束流品质，偏转束流，防止反冲中子进入超导加速段。

3.2.1.2 超重实验终端

3.2.1.2.1 充气反冲谱仪

该终端对实验研究的反应产物通过磁铁进行选择，将产生反应后穿过靶的束流进行分离，同时尽可能地提高目标核的分离效率，减少其它干扰产物。在研究中由于使用的核反应开放的反应道有很多，同时也可能存在不同的反应机制产物，而这些产物都有可能对目标核的指定鉴别造成干扰，因此需要将目标核尽可能地分离出来；充气反冲谱仪包括差分抽气系统、磁铁系统、真空系统、束流监测、数据获取、探测系统及气相、液相色谱装置。

(1) 差分抽气系统

差分抽气系统用于实现加速器的高真空区与充气谱仪的低气压工作区的过渡。通常加速器的真空要求在 10^{-8} 帕以上，而充气谱仪由于平衡电荷态的要求，

通常工作在 0.5 到 1mb 间, 为了达到这一目的, 在充气谱仪前需要加入差分系统。该系统包含五级差分, 前两级使用大抽速的抽气泵, 用于保证大量的气体不会传输到加速器真空管道中, 后三级用于逐步提升真空度, 达到加速器真空要求。其示意图见图 3-2。

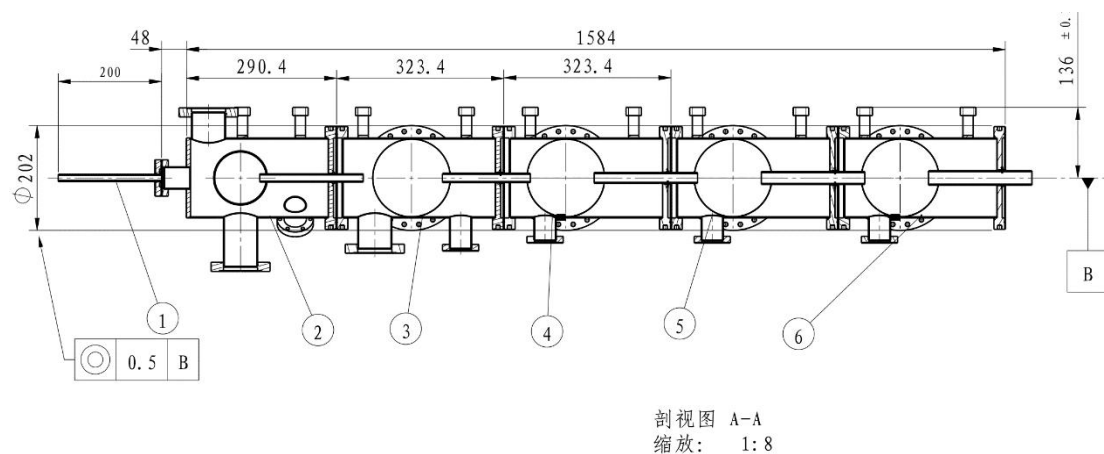


图 3-2 差分抽气系统示意图

(2) 磁铁系统

磁铁系统主要用于对目标离子进行选择。参考俄罗斯、德国、日本等实验室的充气谱仪的分离效率, 选择用 2 个二极铁、3 个四极铁的结构, 其结构如图 3-3。设计以 118 号元素 294 质量为参考场, 能够满足以类似方法产生的附近核素的分离要求。

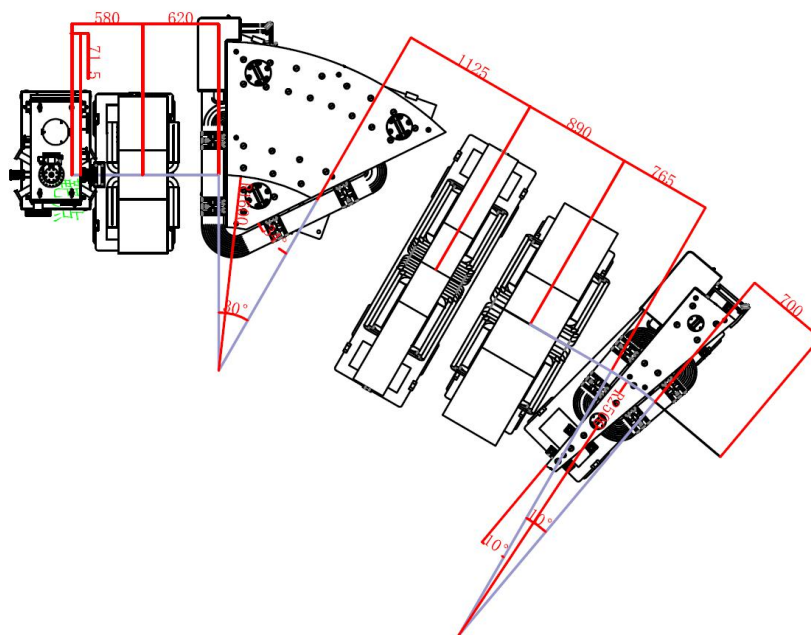


图 3-3 磁铁系统示意图

(3) 探测及获取系统

在焦平面安装探测系统，该系统对目标核的带电粒子衰变及 γ 跃迁进行在线测量。焦平面的带电粒子测量采用 Micron 出厂的 BB17 双面 Si 条作为探测器，该 Si 正面被分为 128 条，背面为 48 条，每条的宽度为 0.9mm，条间距为 0.1mm；周边探测器采用 Micron 出厂的 8 块 W4 的 Si 片组成，该 Si 片正面每块分为 8 条，背面为整体；vito 探测器采用相同尺寸的 Si 探测器构成； γ 探测采用 Cover 和 HPGe 探测器围绕在带电粒子探测器的外围。

数据获取系统采用数字化的波形采集系统，该系统原则上没有死时间，有利于研究短寿命的核素。该系统将采用 CAEN 生产的数字化的波形记录 ADC。系统不仅需要记录低能量的带电粒子衰变，同时需要记录高能量的裂变碎片等高能量的大信号，共需 500 路的相关电子学。

3.2.1.2.2 靶室及转靶系统

靶室是核反应发生的地方。在超重研究中由于采用强的束流轰击靶材料产生

超重区域的核素，因此要求束流打到靶后，靶的温度要保持在熔点以下，因此采用适用于强流的转靶，靶室总装图见图 3-4。在该系统中转靶将以 1000 每分钟转的速度高速平稳地转动，同时在靶的周围用低温的酒精进行冷却，以保障靶处于熔点以下。转靶示意图见图 3-5，靶被安装在该转盘上，同时在转盘上有用于束流脉冲调制标记，还被用于记录靶的位置。靶片外框的设计图见图 3-6。

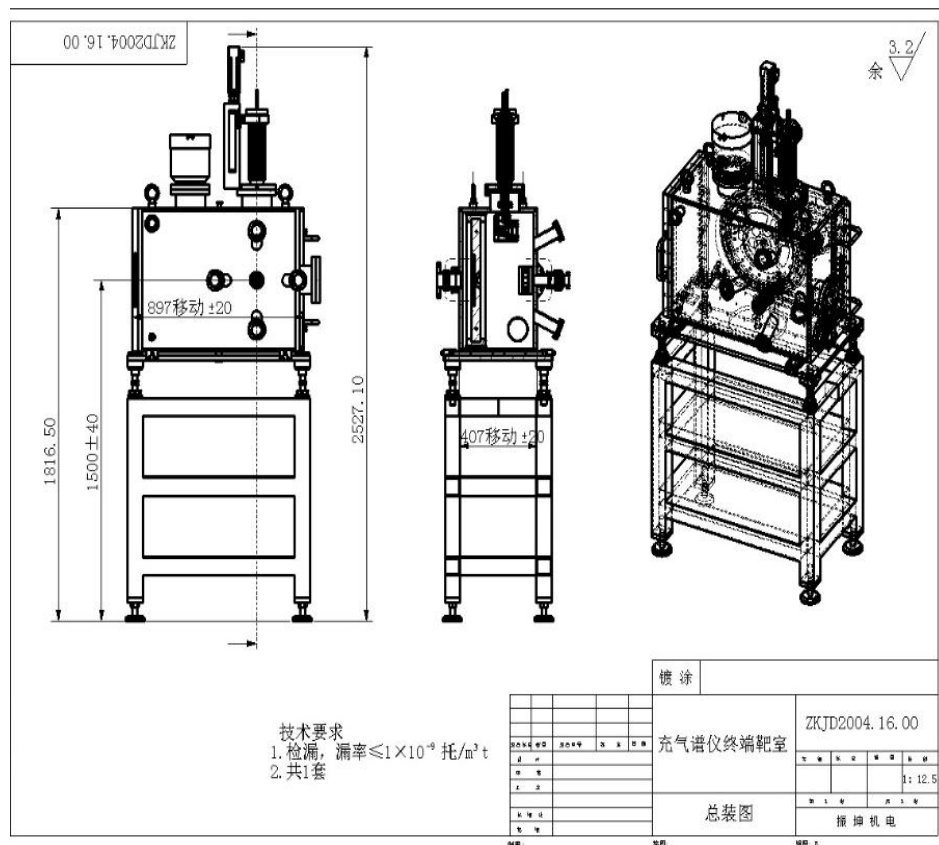


图 3-4 靶室总装图

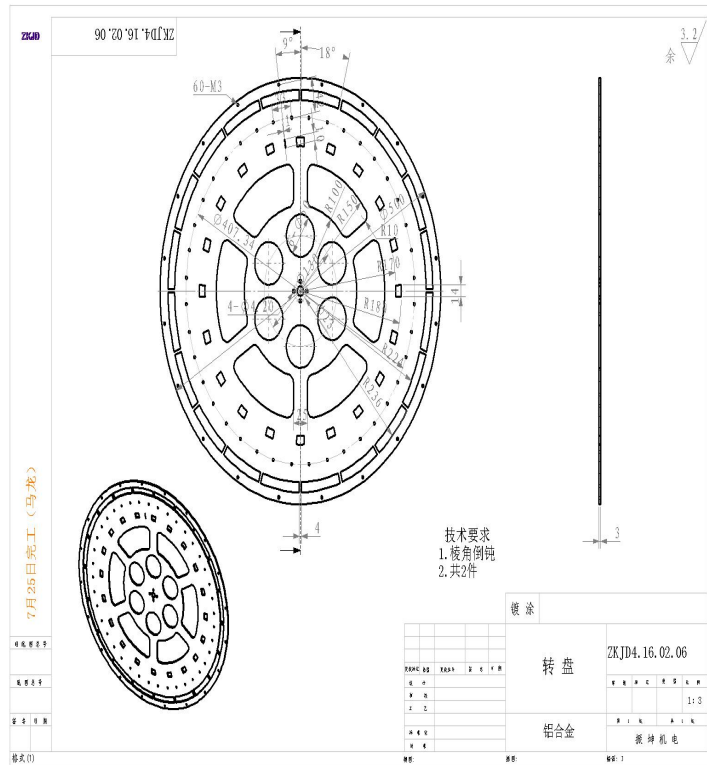


图 3-5 转盘示意图

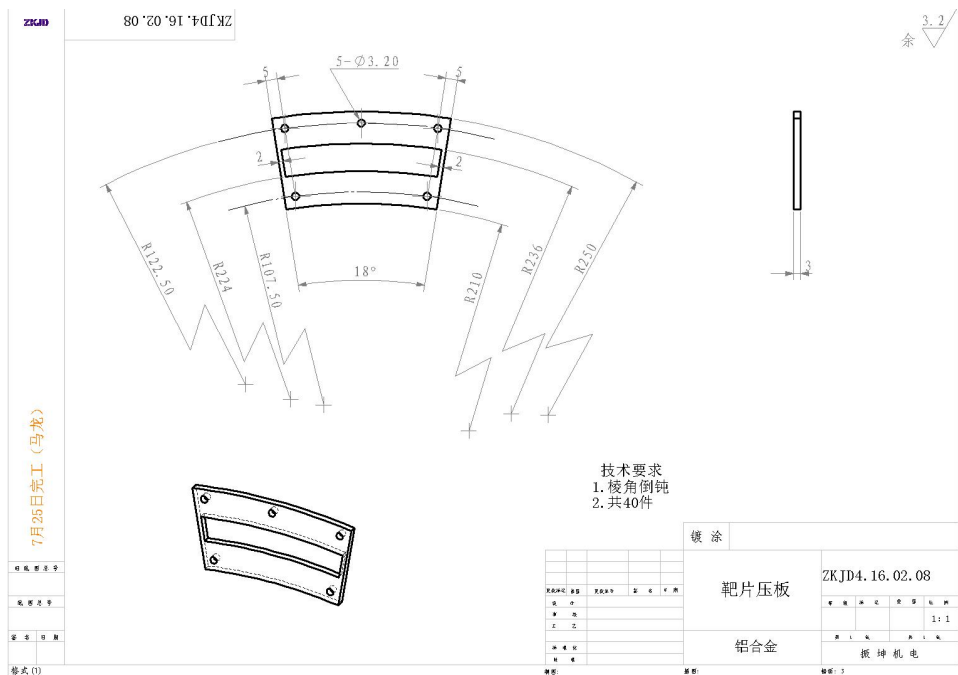


图 3-6 靶片结构图

3.2.1.3 非密封放射性工作场所

超重终端二层非密封放射性工作场所为乙级非密封放射性工作场所，主要用于放射性核素制靶、放射性核素的回收与提纯、超重化学研究与微流体萃取实验

研究，主要操作的放射性核素包括 ^{243}Am 、 ^{182}Ta 、 ^{179}Ta 、 ^{95}Nb 。其中 ^{243}Am 主要用于制靶及回取， ^{182}Ta 、 ^{179}Ta 和 ^{95}Nb 主要用于微流体溶剂萃取实验。

3.2.1.4 操作流程

3.2.1.4.1 制靶（以 ^{243}Am 为例）

(1) 原料： ^{243}Am 样本以水溶液形式从俄罗斯购得，分装为 3.6mg 的 ^{243}Am 样本，转运至近代物理研究所超重终端二层非密封放射性工作场所保险柜储存。需要使用该物质制靶时，取出该溶液的试剂瓶。

(2) 电沉积制靶：取少量上述制靶溶液加入自制电沉积槽，含 ^{243}Am 约 3.6mg，加入 20mL 的异丁醇，少量异丙醇，连通高压直流电源，进行分子镀制靶，沉积持续时间 2 小时。沉积完毕分析沉积残液的 α 能谱，计算 ^{243}Am 沉积率，分析时间约 10 分钟。制靶完成后，在检测分析设备的实验室进行靶样本检测分析。

3.2.1.4.2 打靶

将制备好的靶件送至一层的超重实验终端的靶室中的转靶系统，操作人员在中控室对超导直线加速器进行调试，设置相应参数，进行束流打靶。

3.2.1.4.3 放射性核素回收流程

(1) ^{243}Am 辐照靶的回收与纯化

将辐照过的 Am 靶从靶框上切割剥离，用 HNO_3+HF 溶解至 Teflon 烧杯中。采用 CaF_2 共沉淀法将微量的 AmF_3 载带为沉淀，离心后 Am 与水相中 Ti 分离。

向 Am 沉淀烧杯中加入 $\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}+\text{H}_3\text{BO}_3$ ，加热，加入 $\text{HNO}_3+\text{H}_3\text{BO}_3+\text{Fe}_3+\text{NH}_3$ ，经过热的化学反应后，离心机分离为 $\text{Am}^{x++}\text{Fe}^{x+}$ 的氢氧化物沉淀，而 Ca^{x+} 与 F 离子将滞留在溶液中，Am 与 Ca、F 实现分离。每一步都用 γ 探测器测试分离后 Am 容器中是否有 Am 残留。将 $\text{Am}^{x++}\text{Fe}^{x+}$ 沉淀溶解在 9M HCl 中，溶液流经 Dowex 阴离子树脂， Am^{x+} 离子流出， Fe^{x+} 被树脂吸收。Am 与 Fe 分离。下柱液烘干得到 Am 固相。

使用 HCl+MtOH(Methanol)溶解上述 Am 固相，过 Dowex 阳离子树脂柱，浓 HCl 洗脱 Am 至烧杯中，烘干后即得 Am 纯化产物。纯化后 Am 溶于 HNO₃，制备成制靶溶液待用。

该过程操作时间约 4~6 小时。

(2) 电沉积废液中 ²⁴³Am 回收与纯化：

电镀废液为异丙醇或异丁醇体系，红外灯烘干废液后向废液烧杯中加入加入 HCl+H₂O₂ 后蒸干。加入 HCl+MtOH(Methanol)制成溶液流经阳离子 Dowex 树脂柱，用浓 HCl 将 Am 洗脱，洗脱液烘干后制成粉色的 Am 化合物，然后加浓 HNO₃ 后蒸干，再过一次 Dowex 阴离子树脂后得纯化产物，下柱液蒸干，转化为硝酸介质，留待下一次制靶。

该回收流程约 6~8 小时。

超重元素合成及核反应研究工艺流程图见图 3-7。

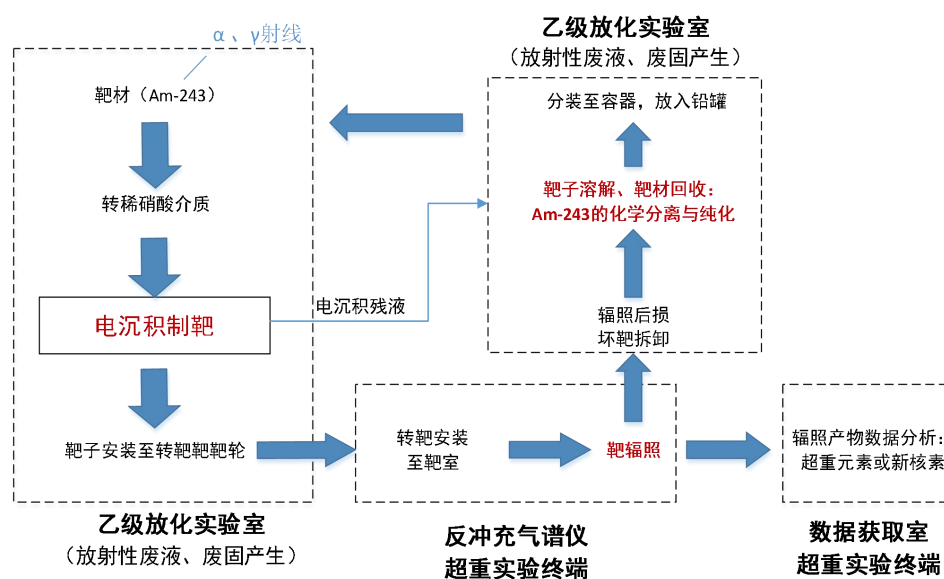


图 3-7 超重元素合成及核反应研究工艺流程图

3.2.1.4.4 其他实验流程

该实验室进行微流体溶剂萃取和超重化学实验，其主要目的为放射性核素及超重元素化学性质研究奠定基础。具体实验情况如下：

(1) 微流体溶剂萃取实验流程（以 ^{95}Nb 为例）

含 ^{95}Nb 示踪剂的 $\text{HF-H}_2\text{SO}_4$ 溶液 2mL 与等体积的 TOA-甲苯有机相混合，两相震荡，离心分离，分别取 1mL 有机相与水相，用 HPGe 测量 γ 能谱，计算 ^{95}Nb 分配系数 D。按照最佳萃取条件，将 ^{95}Nb 示踪剂溶液用微注射泵注入玻璃微芯片混合器，每次注射体积约 150 μL ，调整泵流速，在微芯片通道内完成萃取后从各自出口两相分离，萃取液收集于塑料瓶，用 γ 能谱分析两相活度。计算分配系数 D 与萃取效率 E%。萃取流程 1 小时。

(2) 超重化学实验流程

在真空腔体中，将密封的三组份 α 放射源置于硅探测器前 2-50mm，对硅探测器进行能量刻度。

3.2.1.5 年运行计划

根据设计，超重元素合成装置一般为连续运行，每年连续运行时间为 3-6 个月，年最多运行 10 个月，则年运行时间不超过最大为 7200h。

超重终端二层非密封放射性工作场所每年操作 100 天，每天最多操作 8h，每次只操作 1 种核素。

3.2.2 同位素产生与分离及其核心技术研究

基于强流超导直线加速器的同位素技术研发装置由超导直线加速器、高功率靶、同位素分离、提纯、分装等设备组成。其目标核素生产方式见表 3-5。

表 3-5 目标核素产生方式

目标核素	半衰期	衰变方式	(P、N) 反应	靶材料	轰击能量 MeV
^{211}At	7.2h	EC	$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$	^{209}Bi	29 (氦离子)
^{68}Ge	270.93d	EC	$^{\text{nat}}\text{Ga}(p, x)^{68}\text{Ge}$	$^{\text{nat}}\text{Ga}$	25 (质子)
^{67}Cu	61.83h	β^-	$^{\text{nat}}\text{Zn}(p, x)^{67}\text{Cu}$	$^{\text{nat}}\text{Zn}$	25 (质子)

3.2.2.1 超导直线加速器

同位素应用研发装置的加速器布局图见图 3-8。

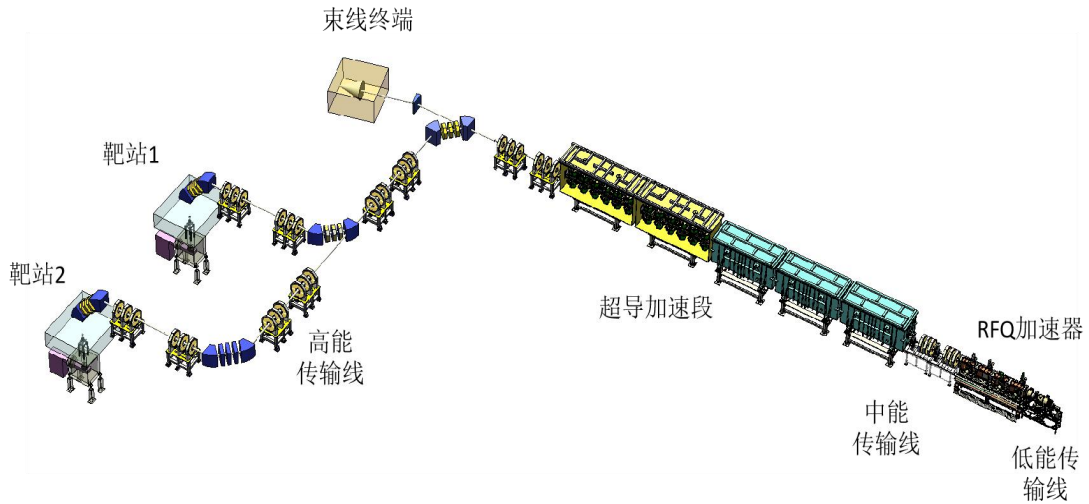


图 3-8 医用同位素生产专用主要研究装置布局图

同位素应用研发装置超导直线加速器的离子源采用超导离子源，引出束流经过 LEBT 匹配到常温 RFQ 入口，被 RFQ 加速到 1.5MeV/u ，然后接超导 HWR 腔将束流继续加速到质子 25MeV 、氦离子 29MeV 。在 RFQ 和超导加速段之间的 MEBT 采用 buncher 对束流的纵向品质进行匹配，超导加速段 CM4 的末端为 HEBT，束流可偏转传输到靶站。

(1) 离子源

离子源采用中科院近代物理研究所研制的现有的具有高稳定性的全超导 ECR 离子源，频率为 24GHz 。其关键技术主要包括微波发生装置、离子源源体、低温制冷系统及束流引出系统等四部分。

(2) 低能传输段

低能传输段 LEBT 的主要作用是为了实现 ECR 离子源与 RFQ 之间的束流匹配和传输，同时肩负着束流的整形和约束作用，尽可能地降低束流在低能段损失。LEBT 段利用三个可调节光阑刮除 20% 的外围粒子，束流水平和垂直方向归一化发射度为 0.19mm.mrad 满足 RFQ 入口的反射度要求。通过两台反极性双螺线管透镜实现束流匹配，同时避免束流横向相空间耦合。

(3) 射频四极加速器

RFQ 是加速器的第一个高频元件，包括：RFQ 腔体、功率源系统、真空系统、水冷系统、控制系统、低电平系统、准直测量、机械调整支架系统等。为了

避免损失的粒子打在真空管道、磁体、高频腔体等元件上引起材料的活化辐射，其输出能量为 1.5MeV/u。RFQ 加速器采用四翼型结构，运行频率为 162.5MHz，工作为 CW 模式，每段腔体是高纯度无氧铜装配钎焊接组成的真空密闭腔体，每个工艺段之间用带有真空和高频密封的法兰连接。

(4) 中能传输段

中能传输段 MEBT 主要用于实现束流从 RFQ 到超导加速段的横向和纵向匹配，并在此处完成束流参数的全面测量，束流位置和参数的误差校正以及束晕刮除。由 14 台四极磁铁和 4 台 162.5MHz 常温聚束腔组成，分别用于横向和纵向的束流匹配。配备了束流调试所需的束诊元件，包括束流位置探测器 BPM，束流流强探测器 ACCT，以及用于测量束流发射度的狭缝和法拉第桶。

(5) 超导加速段

超导加速段 HWR010 加速段采用 3 个低温恒温器，每个低温恒温器包含 6 个超导腔和 6 个超导螺线管。HWR010 段将质子束流从 1.5MeV 加速到 10MeV。HWR015 加速段采用 2 个低温恒温器，其中一个低温恒温器内布局 5 个超导腔和 5 个超导螺线管，另一个低温恒温器内布局 6 个超导腔和 6 个超导螺线管，HWR015 段将质子束流从 10MeV 加速到 25MeV。

(6) 高能传输段

HEBT 是连接超导加速段和束流垃圾桶或靶站的一条束运线，HEBT 主要为将束流传输匹配到束流垃圾桶或靶站，测量束流品质，偏转束流，防止反冲中子进入超导加速段。

3.2.2.2 非密封放射性工作场所

同位素产生及分离研究涉及的非密封放射性工作场所为靶站和热室大厅所在的建筑。

3.2.2.2.1 靶站

靶整体系统主要包含靶体、冷却系统、测控系统、遥控换靶系统、辅助配套系统及器靶耦合系统等，其组成情况见表 3-6。

表 3-6 靶系统组成

系统	构成及功能
靶及冷却系统	含靶体、靶托盘、靶体冷却结构、靶支撑件等
真空靶室系统	真空靶室、束流界面、靶体界面，为整个靶体提供真空氛围，并防止靶窗破裂 α 放射性核素对加速器管道和真空靶室的污染
屏蔽体系统	屏蔽体，用于保护工作人员和设备的安全
遥控维护系统	转运热室和辐照靶件转运系统。主要完成靶站关键部件遥控维护，靶件拆解和安装，热室及靶站公用系统维护等
三废暂存和转运系统	靶站三废暂存及三废运输通道
测控系统	靶站控制及其关键数据监测
辅助配套系统	含真空系统、水电气支撑系统、辐射防护系统等

靶体由靶材料，石墨管、石墨窗、Cu 基托盘、支撑部件、冷却剂接头以及密封装置等组成，主要功能是在靶系统热工机械等参数许用运行下产生一定量的目标同位素。

换热系统主要由主循环系统、二回路、最终的冷阱、冷却剂纯化系统、稳压系统以及测控系统等组成，其作用是将束流沉积在靶上和靶容器上的热量通过水带出一回路，再通过二回路水对一回路的水进行换热。保证靶体工作在合理的温度范围之内。

测控系统的总体任务是监测和控制靶设备，使其按照要求保持良好的工作状态，在发生故障时，能够启动正确的故障处理程序进行故障处理，从而保障被控设备和人身的安全。

遥操换靶系统由进靶口，出靶口，装拆靶吊车、机械手等组成，主要作用是通过装靶吊车并配合动力机械手将一组靶装到靶组件合理的位置，然后利用轨道车/机械臂将要辐照的靶件推到照射部位进行照射，再利用传动装置将辐照过的靶通过出靶口退到转运热室，将靶及其托盘拆下，通过自动转运系统送到拆解部位进行单靶管的拆解和封装，最后将密封的单靶管通过过渡热室转运到热室大厅一层分离热室进行分离纯化。

辅助配套系统主要包括真空系统、水电气支撑系统、辐射防护系统等。其主

要功能是提供同位素生产靶主回路运行的配套条件,保证整体系统的安全运行和维护。

靶站主要分为靶件照射室、转运热室、过渡热室、靶站后区、靶站前区等,其中照射室为靶件进行束流辐照产生同位素区域,由靶更换机构将靶件送至目标位置进行辐照。转运热室主要承担靶盘与靶更换机构的拆卸装配和维护工作,为靶件进行照射做前期准备工作,同时兼顾接收靶件与靶盘,并完成靶件靶盘的装配和后期拆卸封装工作。过渡热室负责辐照后靶件向热室大厅一层分离热室的物料转运。

(1) 靶件照射室

本项目设有 2 个靶室,靶采用三种材料: Bi-209 (100 μm),天然 Zn (2mm),天然 Ga (2mm),三种靶采用同样的靶托和冷却系统设计,靶托中镶嵌 20 个靶,束流通过点扫描轰击打在靶上。

三种靶件辐照情况: ^{209}Bi 靶用 2mA 的 29MeV 的 ^4He 辐照 20 小时,天然 Ga 靶用 2mA 的 25MeV 质子辐照 10 天,天然 Zn 靶用 2mA 的 25MeV 质子辐照 5 天,各靶件辐照后停留 1h 将转入转运热室。具体情况如下:

① ^{209}Bi 靶

靶体由 20 个石墨管、石墨基座以及冷却铜板组成,靶材料 Bi 以镀膜或冷压的方式固着在每个石墨管底部,再用石墨膜密封,石墨管尺寸为直径 25mm,质量为 50g, ^{209}Bi 靶厚度为 100 μm ,质量为 0.49g。将装有 ^{209}Bi 靶的石墨管放入靶站的靶托中,通过加速器加速的 α 离子轰击 ^{209}Bi 靶发生 $^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)$ 反应生成 ^{211}At 。其辐照时间为 20 小时, ^4He 离子流强为 2mA,最大能量为 29MeV。 $^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)$ 反应的激发函数和 ^{211}At 的衰变纲图分别见图 3-9 和图 3-10。 ^{211}At 随辐照时间和冷却时间的变化图见 3-11。

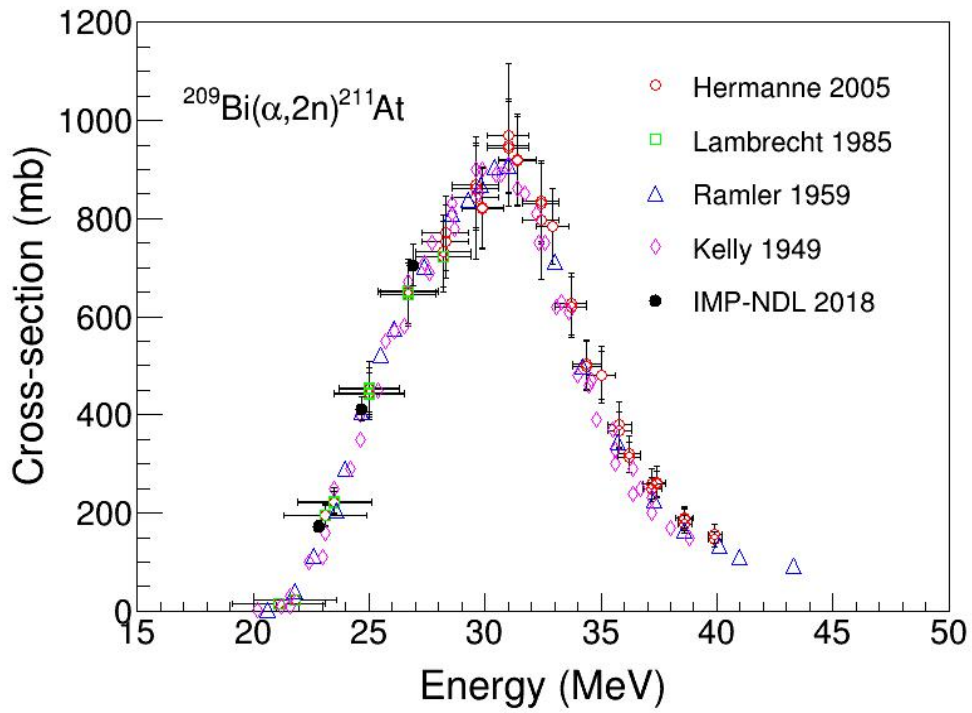


图 3-9 $^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)$ 反应激发函数

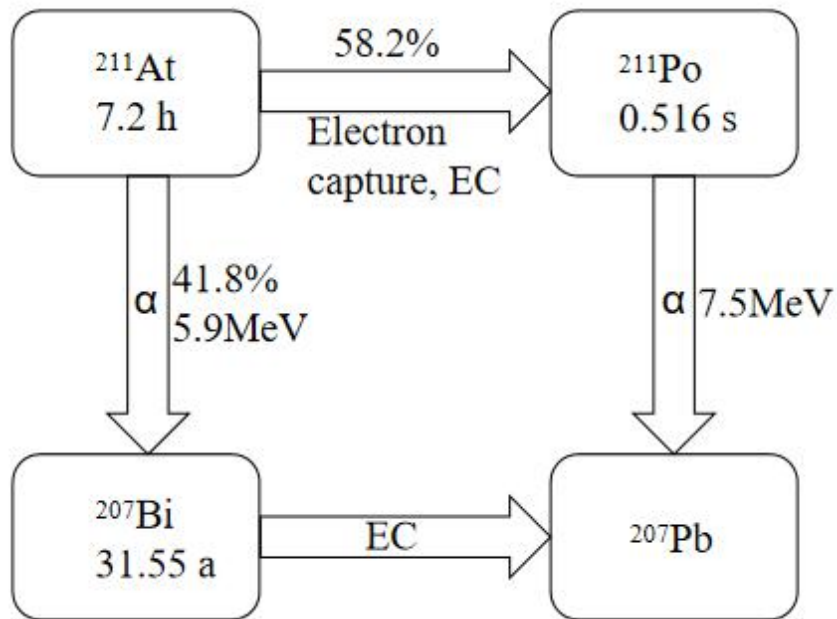


图 3-10 ^{211}At 衰变纲图

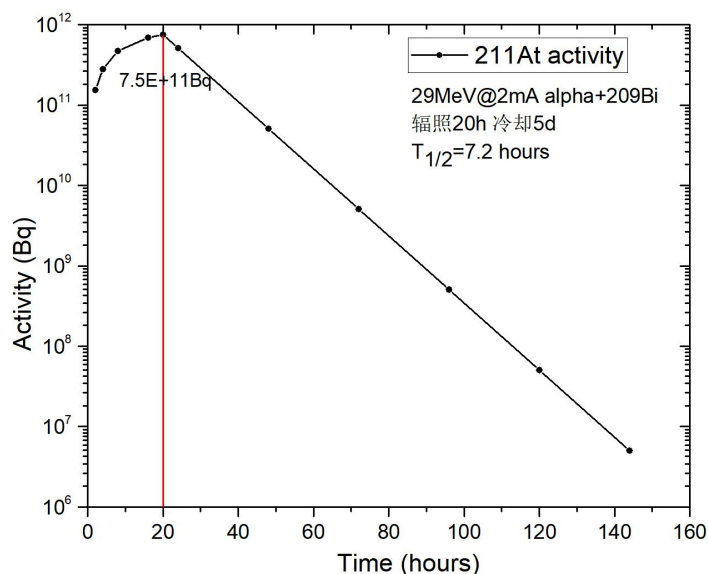


图 3-11 ^{211}At 随辐照时间和冷却时间的变化

② $^{\text{nat}}\text{Ga}$ 靶

靶体由 20 个石墨管、石墨基座以及冷却铜板组成，其中靶材料 Ga 以液体的形式附着在每个石墨管底部，再用石墨膜密封石墨管，防止 Ga 蒸汽以及产生的放射性核素释放到真空靶室中，单个石墨管直径为 25mm，质量为 50g，Ga 靶厚度为 2mm，质量为 7.3g。通过加速器加速的质子束轰击天然镓靶发生 $^{\text{nat}}\text{Ga}(p,x)$ 反应生成 ^{68}Ge ，辐照时间为 10 天，质子流强为 2mA，能量为 25MeV。生成 ^{68}Ge 、 ^{68}Ga 反应的激发函数和 ^{68}Ge - ^{68}Ga 的衰变纲图分别见图 3-12 和图 3-13， ^{68}Ge 随辐照时间 t_0 和冷却时间 t_1 的变化曲线见图 3-14。

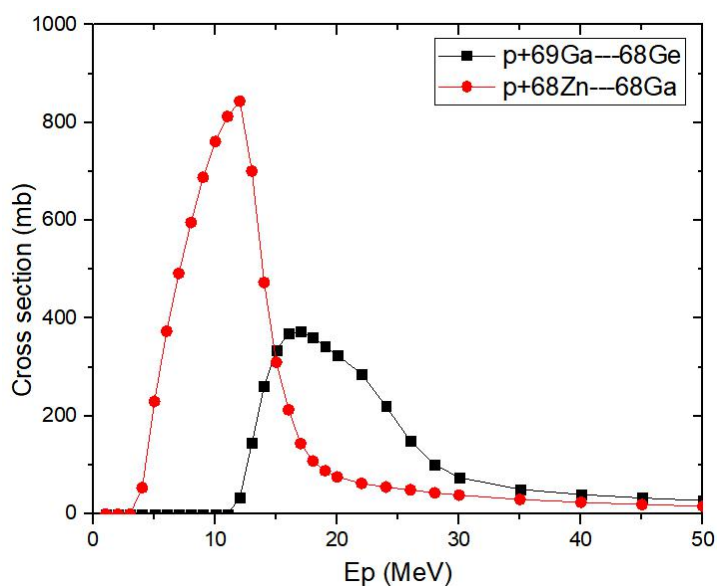


图 3-12 生成 ^{68}Ge 和 ^{68}Ga 反应的激发函数

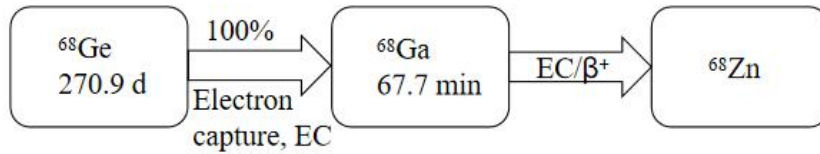


图 3-13 ^{68}Ge - ^{68}Ga 衰变纲图

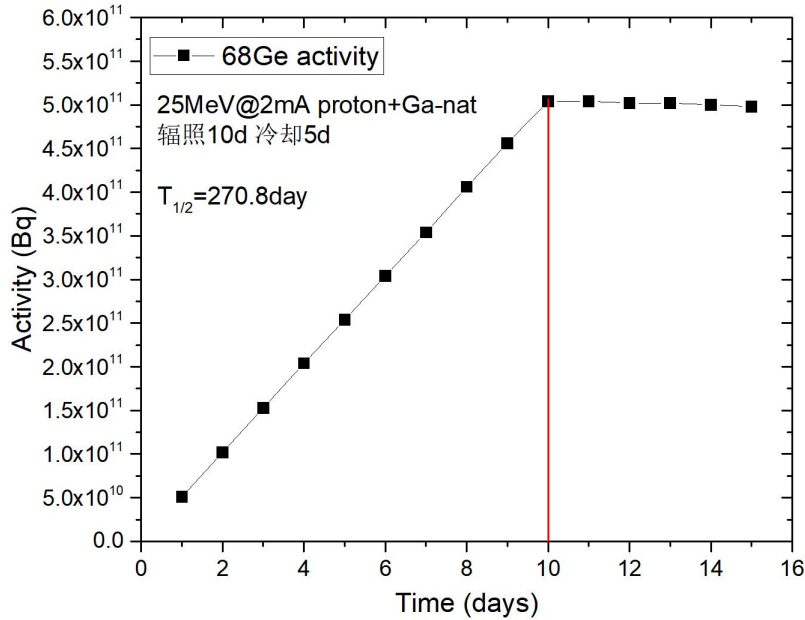


图 3-14 ^{68}Ge 随辐照时间和冷却时间的变化

③ $^{\text{nat}}\text{Zn}$ 靶

靶体由 20 个石墨管、石墨基座以及冷却铜板组成，其中靶材料 Zn 以镀膜或冷压的方式固着在每个石墨管底部，再用石墨膜密封石墨管，防止蒸汽以及产生的放射性核素释放到真空靶室中，单个石墨管直径为 25mm，质量为 50g，Zn 靶厚度为 1.5mm， $^{\text{nat}}\text{Zn}$ 的质量为 7g。将装有靶材料 Zn 的石墨管放入靶站的靶托中，通过加速器加速的质子束轰击天然锌靶发生 $^{\text{nat}}\text{Zn}(p,x)$ 反应生成 ^{67}Cu ，其辐照时间为 5 天，质子流强为 2mA，能量为 25MeV。 $^{\text{nat}}\text{Zn}(p,x)$ 反应的激发函数和 ^{67}Cu 的衰变纲图分别见图 3-15 和图 3-16， ^{67}Cu 随辐照时间 t_0 和冷却时间 t_1 的变化曲线见图 3-17。

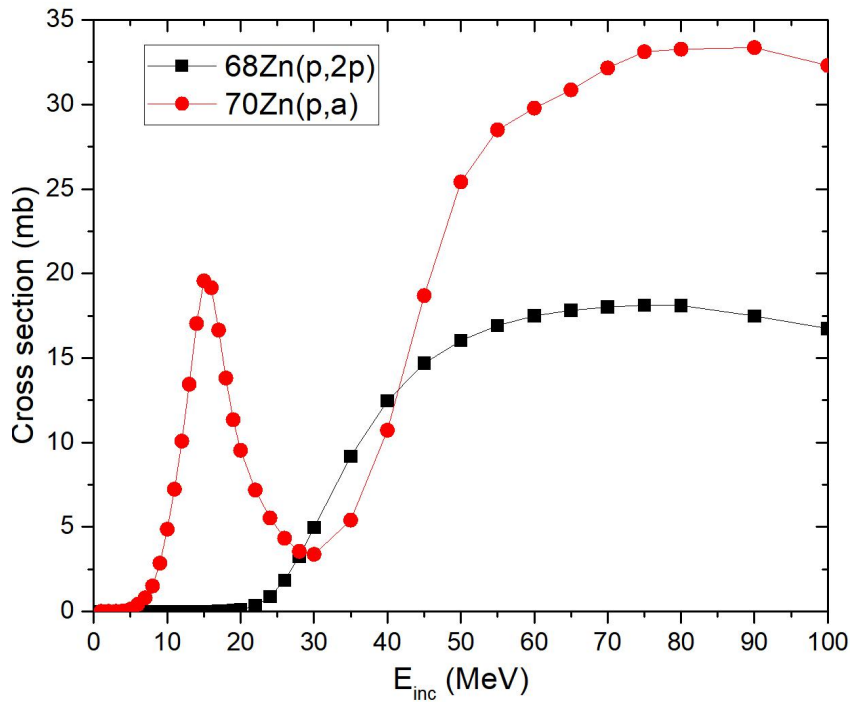


图 3-15 $^{15}\text{natZn}(p,x)$ 反应激发函数

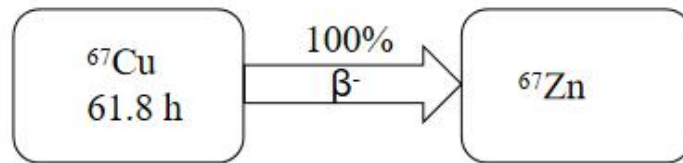


图 3-16 ^{67}Cu 衰变纲图

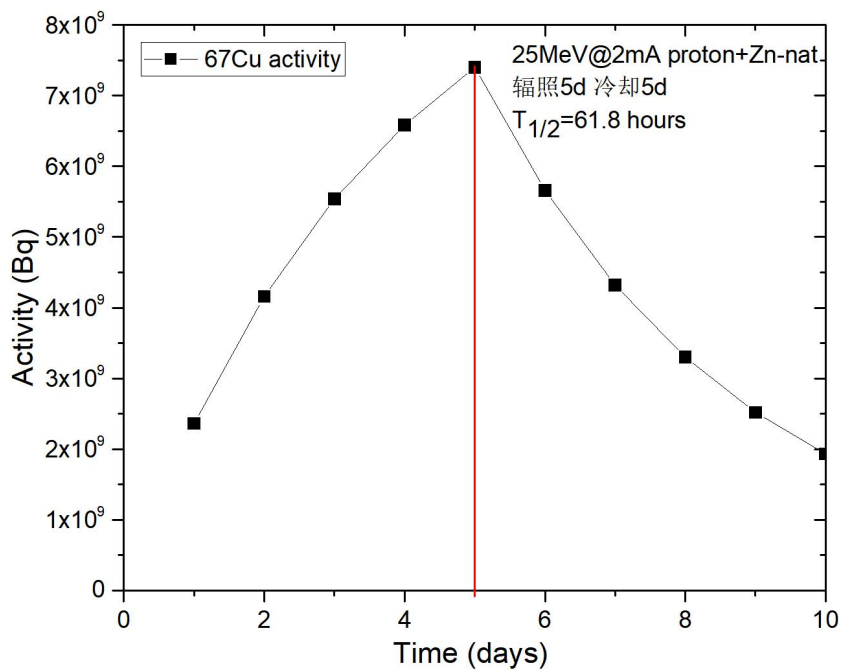


图 3-17 ^{67}Cu 随辐照时间和冷却时间的变化

(2) 转运热室

转运热室作为靶盘中转站，承担靶盘与靶更换机构的拆卸装配和维护工作，为靶件进行照射做前期准备工作。同时兼顾接收靶件与靶盘，并完成靶件靶盘的装配和后期拆卸封装工作。

热室主要遥控操作设备有真空隔离门、靶盘转运机构、主从机械手以及动力机械手。真空隔离门负责热室前端和尾端的大气隔离，在靶件送入照射室通道后，真空隔离门关闭，开启泵组，对靶室进行抽真空，其目的主要是防止辐射泄漏和保持靶室高真空。靶盘转运机构是靶站热室的转运系统，负责靶盘的转运工作。主从机械手和动力机械手配合作为靶盘安装和拆卸的主要工具，也承担着后期靶更换设备及其他设备的维修工具。其布局图见图 3-18。

热室内拆解工位的主要功能是靶盘与靶件安装拆卸、单靶管封装及靶盘减容等。主要由拆解转运机构、地轨、货叉转运机构、主从机械手和电气系统等组成。主要完成以下两项功能：一方面可将靶盘从后端转运靶转运机构位置后为靶盘安装做准备；另一方面，将照射好的靶盘进行单靶管拆解并封装运送至过渡热室。

主从机械手作为工作人员维护和部分拆卸安装工具，可以实现对靶盘与靶件安装与拆卸、设备维护等工作。货叉转运机构配合地轨实现对靶盘及靶件密封及转运至过渡热室的工作。同时配备视觉辅助及前端执行器，实现对靶件分装拆卸的高精度抓取。拆解工位设备布局见图 3-19。

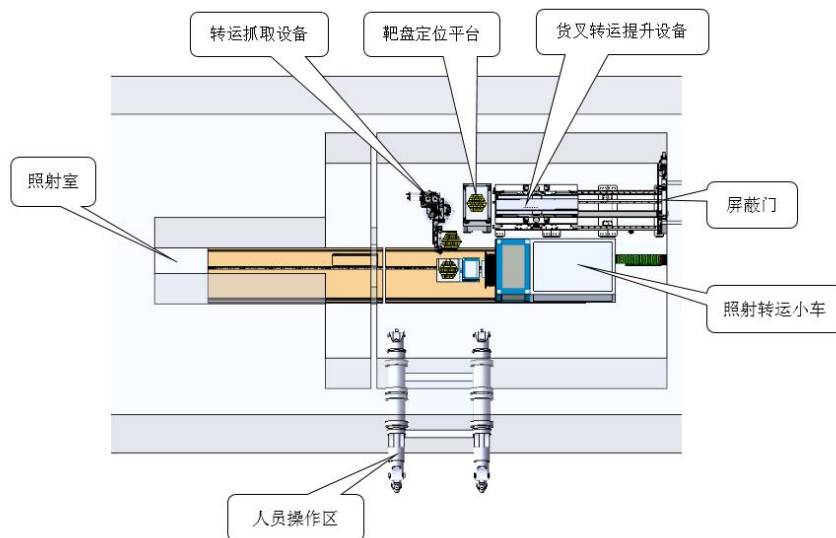


图 3-18 照射室及转运热室布局图

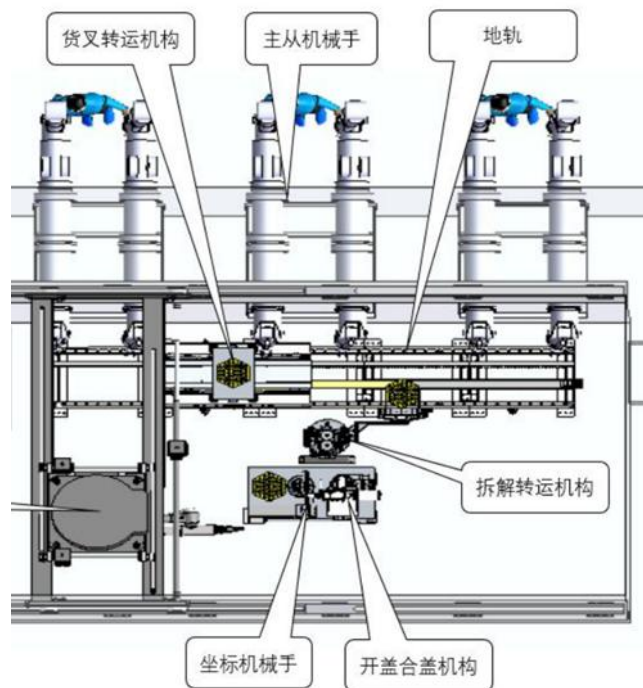


图 3-19 热室拆解工位布局图

(3) 过渡热室

过渡热室负责辐照后靶件向分离热室的物料转运。

3.2.2.2.2 热室大厅

热室大厅主要包括放化分离系统、发生器研发系统、三废暂存系统及辅助配套系统等。

放化分离系统用于完成辐照后靶及同位素的分离纯化工艺流程的操作，发生器研发系统用于医用同位素发生器的制备研发，三废暂存系统用于收集暂存靶站、热室大厅产生的放射性废物，辅助配套系统包括辅助设备、产品检测间、化学研究实验室等配套设施。

(1) 分离热室

分离热室主要为辐照后靶的处理、放射性同位素的分离纯化及分装流程提供操作、防护空间。根据同位素分离设计方案，设置三条同位素分离研发线，共 2 个接收热室和 10 个分离热室，分别对应 ^{211}At 、 ^{67}Cu 、 ^{68}Ge 三种同位素的生产工艺流程。根据同位素分离检测和准备需求，布局足够的检测分析实验室、化学实

验室、三废暂存室等配套设施，配套设施的功能与热室相辅相成，并辅以必要的检修场所。热室设计示意图见图 3-20。



图 3-20 分离热室设计示意图

(2) 发生器研发区

发生器研发区主要用于 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究，主要包含有发生器制备工作箱、发生器固定相制备实验室、实验室准备间、维修间等。

(3) 核素质检、实验

将分离热室分离出来的同位素，在制样间取样采集，将取得的同位素样品进一步送去检测分析或者开展研究实验，每种样品每次质检最大活度为 $1.0\text{E}+07\text{Bq}$ 。

放射性同位素分离研究过程中放射性同位素样品的检测分析主要涉及样品中同位素的性状、纯度、放射性活度以及样品中杂质含量的检测。1) 在样品取样采集时，首先进行同位素性状的检查，包括：产品的外观与颜色、气味等；2) 再利用 γ 探测系统和 α 谱仪进行样品的放射性测量，获得样品的放射性同位素纯度和放射性活度；3) 通过等离子体电感耦合光谱 (ICP-OES) 和等离子体电感耦合质谱 (ICP-MS) 对样品中杂质含量进行检测。同位素样品经过稀释、取样、自动上样、设备检测、数据分析等步骤获得杂质含量的检测结果。

研究实验主要以 ^{211}At 、 ^{67}Cu 、 $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ 的简单化学标记实验和非放射性化学分离冷实验为主。通过化学反应将放射性核素引入到待标记化合物的特定位置上，完成同位素的标记。例如，在 CHCl_3 体系中，在 N-氯代丁二酰亚胺 (NCS) 存在下， ^{211}At 与 N-琥珀酰亚胺-3-三正丁基锡-苯甲酸酯 (ATE) 通过化学反应将 ^{211}At 标记在 ATE 上，形成放射性碳标记蛋白质的中间体。

3.2.2.3 操作流程

(1) ^{211}At 的生产研发-利用 α 束轰击 ^{209}Bi 靶生产放射性同位素 ^{211}At

α 核素 ^{211}At 是最适宜于靶向内放射治疗的理想核素之一。 ^{211}At 半衰期为 7.2 小时，平均每衰变一次发射一个 α 粒子和 6.3 个俄歇电子，由于其 α 射线具有能量高、射程短等特点，对弥散癌和微转移癌的内放射性治疗具有良好的应用前景，是目前国际上放射性肿瘤治疗药物发展的新趋势。

本研究拟将 ^{209}Bi 靶封装在石墨碳管中，碳管尺寸为直径 25mm，质量为 50g， ^{209}Bi 的质量为 0.49g。将装有 ^{209}Bi 靶的石墨管放入靶站的靶托中，利用同位素应用研发装置中 ^4He 离子轰击 ^{209}Bi 靶 20 小时，其 ^4He 离子流强为 2mA，最大能量为 29MeV，单次最多辐照 20 个碳管，辐照后的靶件冷却一段时间后自动由靶室送至转运热室进行拆解，将拆后的封装 ^{209}Bi 靶材料的石墨管通过过渡热室运至分离系统接收暂存热室，进行分离纯化。生产工艺流程见图 3-21。

封装 ^{209}Bi 靶材料的石墨碳管运送至分离系统接收暂存热室，利用热室拆解工具将碳管切割出小口，随后将碳管置于铜舟中，送至高温分离热室，将承载碳管的铜舟放入高温管式炉的石英管/不锈钢管中，法兰密闭后，通入氧气

(10-20ml/min)，并检查气密性。接着，控制高温管式炉，快速升温至 700-1000℃，保温 15-60min，以保证 Bi 靶材料完全氧化。在加热过程中， ^{211}At 从 Bi 靶材料中挥发出来，进入冷凝管冷凝。随后，通过泵将氯仿/水/甲醇等溶剂注入冷凝管，浸泡 5-20min 后，用使用氯仿/水/甲醇等溶剂冲洗 ^{211}At 约 1.5-2min，使冷凝在管壁上 ^{211}At 溶解在溶液中，并收集 ^{211}At 溶液至收集罐，实现靶材料和目标产物的分离。然后将 ^{211}At 溶液通过管路输送至分装室，利用分装设备，按产品需求分装于产品瓶中，并利用氮气将 ^{211}At 液体吹干，得到 ^{211}At 固体产品。分离流程需要用时 24 小时。

得到的 ^{211}At 产品进一步送至样品检测室，利用 α 谱仪、ICP-MS 和 ICP-OES 等设备进行相关放射性同位素纯度、放射性活度和杂质含量的检测分析。

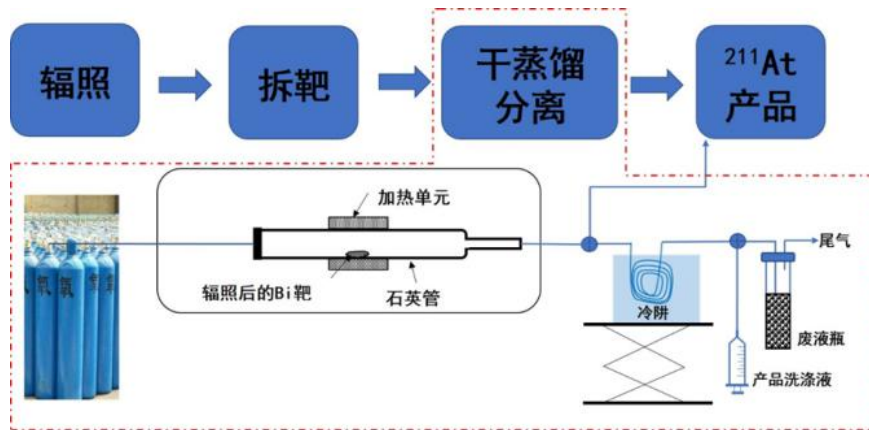


图 3-21 At-211 的工艺流程示意图

(2) ^{68}Ge 的生产研发-利用质子束轰击 ^{nat}Ga 靶生产放射性同位素 ^{68}Ge

^{68}Ga 是最早应用于临床医学的正电子发射放射性核素， ^{68}Ga 适用于标记小化合物、生物大分子以及纳米和微米微粒，主要应用于肿瘤显像，如受体分子（如 G 蛋白偶联受体、人表皮生长因子受体、叶酸和尿激酶受体）、酶、抗原的靶向显像；也可用于心肌灌注、肺灌注和通气、炎症和感染显像；对增殖、乏氧、糖酵解和血管生成等生物过程的显像等。 ^{68}Ga 由发生器上半衰期较长的母体 ^{68}Ge ($T_{1/2}=270.8\text{d}$) 产生，使得 ^{68}Ga 放射性药物不再依赖于定点的加速器。 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器中，母体 ^{68}Ge 由加速器生成，通过电子俘获衰变，满足 ^{68}Ga 的供应。

本研究拟将 ^{nat}Ga 靶封装在石墨碳管中，碳管尺寸为直径 25mm，质量为 50g， ^{nat}Ga 的质量为 7.3g。将封装好的石墨管放入靶站的靶托中，利用同位素应用研发装置的质子轰击 ^{nat}Ga 靶 10 天，质子流强为 2mA，能量为 25MeV，单次最多辐照 20 个碳管。将轰击 10 天靶件冷却一段时间后靶室运至转运热室进行拆解，拆完后的封装 ^{nat}Ga 靶材料的石墨管由过渡热室转运至分离系统接收暂存热室，进行分离纯化。

封装 ^{nat}Ga 靶材料的石墨管通过过渡热室运送至分离系统接收暂存热室，利用热室拆解工具对碳管进行简单切割，随后送至溶解热室，利用靶溶解系统设备，通过 5M 盐酸 360mL 和双氧水 40mL（或者混合酸和双氧水）加热溶解 Ga 靶，使 Ga 靶完全溶解，并通过过滤，使不溶的碳管与溶液分离，收集溶液并输送到分离纯化热室。通过分离纯化热室的萃取分离系统设备进行 ^{68}Ge 的分离，利用浓盐酸将溶液酸度调至 $>9\text{M}$ ，利用 120mL CCl_4 /甲苯溶剂萃取三次，分离 ^{68}Ge ；

再进一步利用浓度>9M 的盐酸 360mL 洗涤有机相三次，除去 ^{68}Ge 中残存的 Ga、 ^{65}Zn 及其他杂质核素。再用 720mL 0.1M 盐酸反萃得到 ^{68}Ge 溶液，收集 ^{68}Ge 溶液，并加入 NaOH/柠檬酸钠溶液使 ^{68}Ge 溶液呈碱性。将调节好酸度的 ^{68}Ge 溶液，输送到纯化系统中，使 ^{68}Ge 溶液通过葡萄糖凝胶柱纯化 ^{68}Ge ，最后用 0.1M 盐酸淋洗，得到 ^{68}Ge 盐酸溶液 60-80mL。 ^{68}Ge 盐酸溶液输送到分装热室，利用分装系统将 ^{68}Ge 溶液分装，形成最终 ^{68}Ge 产品。同时，分离纯化后获得的 ^{68}Ge 盐酸溶液可输送至发生器研发热室，开展 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器的研发工作。其分离工艺流程图见图 3-22。

分离纯化流程时间操作：溶解时间为 24h；分离纯化时间为 24h；发生器的制备研究为 20-60 min。

得到的 ^{68}Ge 产品进一步送至样品检测室，利用 γ 谱仪、ICP-MS 和 ICP-OES 等设备进行相关放射性同位素纯度、放射性活度和杂质含量的检测分析。

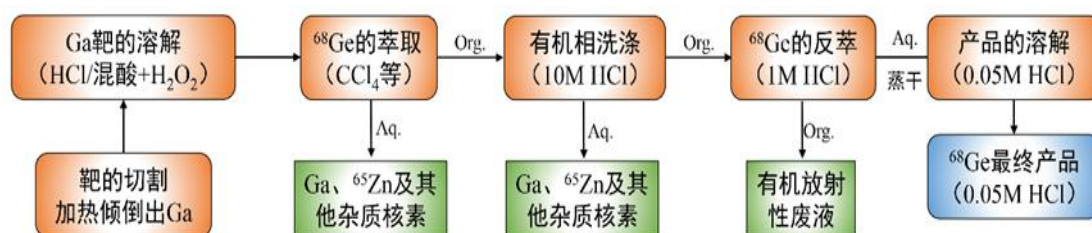


图 3-22 ^{68}Ge - ^{68}Ga 的分离工艺流程示意图

(3) ^{67}Cu 的生产研发-利用质子束轰击 ^{nat}Zn 靶生产放射性同位素 ^{67}Cu

同位素 ^{67}Cu ($T_{1/2}=67.71\text{h}$) 被认为是单克隆抗体用于肿瘤放疗最有前途的药物之一。 ^{67}Cu 具有 67.71 小时的半衰期，发射 β 射线 ($E_{\beta}=141\text{ keV}$) 和 γ 射线 ($E_{\gamma}=184.58\text{ keV}$, 48.7%)，相比较纯的 β 发射体 ^{90}Y ， ^{67}Cu 为 SPECT 成像和剂量学评价提供了可能；而与 ^{177}Lu ($T_{1/2}=6.647\text{ d}$) 和 ^{131}I ($T_{1/2}=8.025\text{ d}$) 等寿命较长的放射性核素相比， ^{67}Cu 更适合于标记在靶点停留时间较短的配体。

本研究拟将 ^{nat}Zn 靶封装在石墨碳管中，碳管尺寸为直径 25mm，质量为 50g， ^{nat}Zn 的质量为 7g。将封装好的石墨管放入靶站的靶托中，利用同位素应用研发装置的质子轰击 ^{nat}Zn 靶 5 天，质子流强为 2mA，能量为 25MeV，单次最多辐照 20 个碳管。辐照冷却一段时间后由靶站转运至转运热室进行拆解，将拆解后的石墨碳管通过过渡热室转运至分离系统接收暂存热室，进行分离纯化。生产工艺

流程图见图 3-23。

封装 ^{nat}Zn 靶材料的石墨管通过过渡热室运送至分离系统接收暂存热室，利用热室拆解工具对碳管进行简单切割，随后送至溶解热室，放入靶溶解系统设备，利用 1L 12M 浓盐酸加热溶解辐照后的锌靶，使锌靶完全溶解，并通过过滤，使不溶的碳管与溶液分离，收集溶液并输送到分离纯化热室。在分离纯化热室，利用柱分离+纯化系统，通过多次离子交换法从大量的 Zn 载体中分离纯化得到无载体的医用同位素 ^{67}Cu ，中间需要多次调解溶液的酸度，以便更好地分离纯化。溶解后的 Zn 靶盐酸溶液经过第一个阳离子交换树脂，除去杂质 Ga，产生废液 1L 浓盐酸。用 1L 10M 盐酸洗脱第一个阳离子树脂，将得到的 0.6L 盐酸加热蒸干再用水或者 0.5M 乙酸钠缓冲溶液溶解，得到 1.6L 的乙酸钠溶液。将上述乙酸钠溶液经过第二个螯合树脂，产生含有 Zn 的废液 1.6L 的乙酸钠溶液。利用不同浓度的 0.001~0.1M 盐酸 10L 梯度洗脱第二个螯合树脂的杂质核素 Zn、Co、Mn、Ni 等，产生相应的废液。再用 2M 盐酸 1.6L 洗脱第二个螯合树脂，得到含有 ^{67}Cu 的溶液，经过第三个阴离子交换树脂纯化，产生含有 Co、Ni 等核素的废液约 1.6L，并用 0.6L 的 2M 盐酸洗脱除去杂质，同时产生相应的废液。最后用 1.2L 的 2M HCl+2.5% H_2O_2 洗脱产品 ^{67}Cu 。然后蒸干最后的溶液，再用 0.5L 的 12M HCl 溶解再蒸干，最后溶解在 0.1M HCl 中得到 ^{67}Cu 溶液。将 ^{67}Cu 溶液输送到分装热室，利用分装系统将 ^{67}Cu 溶液分装，形成最终医用 ^{67}Cu 产品。

得到的 ^{67}Cu 产品进一步送至二层样品检测室，利用 γ 谱仪、ICP-MS 和 ICP-OES 等设备进行相关放射性同位素纯度、放射性活度和杂质含量的检测分析，完成产品质量检测。

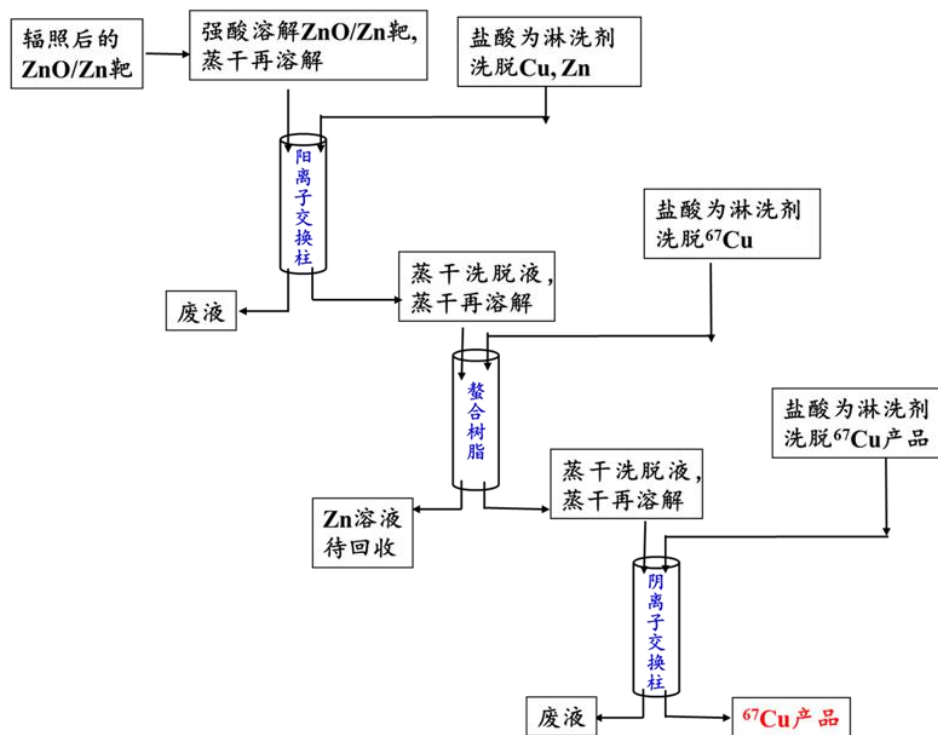


图 3-23⁶⁷Cu 的分离工艺流程示意图

(4) ⁶⁸Ge-⁶⁸Ga 发生器制备研发

1) 吸附材料的制备

目前初选为 SnO₂，作为吸附柱填料，主要制备方法如下：将金属 Sn 粉的加入至圆底烧瓶中，并逐滴加入浓硝酸，加热氧化反应 3 天，反应完成后移除溶剂，将固体粉末利用去离子水进行洗涤，直至 pH 值接近中性，洗涤结束后在真空干燥箱干燥 1-2 天，再置于管式炉中高温烧结 3 h，烧结完成后，待自然降温后进行筛分，筛出 100-300 目的 SnO₂，待装柱。

2) 发生器色谱柱的制备

选择石英或者硼硅酸玻璃，制成合适的分离柱，并将上述制备的 SnO₂ 装入。

3) ⁶⁸Ge 的装配

分离热室生产的 ⁶⁸Ge 产品运送至二层发生器研发区，在工作箱内，利用进样装置将小于 100mCi 的 ⁶⁸Ge 溶液通过 SnO₂ 分离柱，并利用稀盐酸淋洗，使放射性同位素 ⁶⁸Ge 吸附到发生器固定柱上，研制成 ⁶⁸Ge-⁶⁸Ga 发生器。

4) ⁶⁸Ge-⁶⁸Ga 的检验

研制成功的 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器送至制样间,通过0.1-1mol/L盐酸淋洗 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器得到同位素 ^{68}Ga 淋洗液样品,利用 α 、 γ 谱仪和ICP-MS、ICP-OES等设备进行样品的相关放射性同位素纯度、放射性活度和杂质含量的检测分析,完成产品质量检测。

3.2.2.4 年运行计划

根据操作流程可知,进行 ^{211}At 的生产研发时,其单次辐照时间为20h,分离时间为24h,进行 ^{68}Ge 的生产研发时,单次辐照时间为连续10天,溶解时间为24h,分离纯化时间为24h, ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器的制备研发时间为20min~60min; ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器的制备研究时,单次制备时间为16h;进行 ^{67}Cu 的生产研发时,单次辐照时间为5天,溶解时间为24h,分离纯化时间为24h,每年每种放射性同位素的生产研发最多不超过17次。分离后核素每次质检,实验时间不超过0.5h,每年每种核素最多操作100次。

则加速器年运行时间为6460h, ^{211}At 的生产研发年操作时间为408h, ^{68}Ge 的生产研发操作时间为833h, ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器的制备时间为816h, ^{67}Cu 的生产研发操作时间为816h,核素质检实验时间为50h。

3.2.3 人员配备情况

本项目涉及辐射工作人员主要包括:加速器运行及维护人员、靶站操作人员、热室大厅操作人员、超重终端操作人员、辐射防护人员(包括三废处理运行人员)。具体人员配置情况见表3-7。

表 3-7 本项目人员配备情况

场所	岗位	人数	备注
加速器装置	加速器运行及设备维护	30人	每班10人,一天3班,每班8h
靶站	靶站热室前区操作及设备维护	12人	每班4人,一天3班,每班8h
	靶站安全监测	6人	每班2人,一天3班,每班8h
	新靶件制备	6人	一天一班,一班8h,每班8h
	靶站运行控制	6人	每班2人,一天3班,每班8h
	小计	30人	—
热室大厅	核素分离	12人	每班4人,一天3班,每班8h
	发生器研发	6人	每班2人,一天3班,每班8h

场所	岗位	人数	备注
	质量检验	9 人	ICP-OES、ICP-MS、放射性检测各 1 人，一天 3 班，每班 8h
	安全监测与设备维护	3 人	每班 1 人，一天 3 班，每班 8h
	小计	30 人	—
超重终端	放射性靶制备	4 人	每次实验至少 2 人一组
	放射性核素回收	4 人	每次实验至少 2 人一组
	微流体溶剂萃取	2 人	
	超重化学分析	3 人	
	小计	13 人	
辐射防护	加速器运行维护	2 人	
	加速器运行值班	3 人	
	辐射管理中心	3 人	
	辐射监测	2 人	
	小计	10 人	
合计		113 人	

3.3 污染源项

3.3.1 非放射性源项分析

3.3.1.1 施工期污染物分析

(1) 施工期大气污染源

施工期间大气污染源主要是厂房建设、装修、物料装卸及运输产生的扬尘以及施工机械、运输车辆尾气。

(2) 施工期水污染源

施工过程中产生的废水主要为施工人员排放的生活污水、施工作业产生的废水及工地地面降雨径流污水。

本项目施工人员排放的生活污水和城市居民生活污水水质相似，污水中主要污染物为 pH、SS、COD、BOD 等。

(3) 施工期噪声污染

施工期施工噪声源是建筑机械设备噪声和车辆交通噪声。机械设备主要包括打桩机、挖掘机、空压机及混凝土搅拌机等，噪声主要来自挖掘机、翻斗车、混

凝土震捣器的操作噪声和重型卡车的行驶噪声。不同施工阶段。所用机械设备也不同，对周围环境造成的影响也不同。施工期主要设备产生的噪声强度见表 3-8。

表 3-8 施工期主要噪声源情况 单位：dB(A)

施工设备名称	5m*
液压挖掘机	86
轮式装载机	93
推土机	86
重型运输车	86
静力压桩机	73
混凝土输送泵	92
风镐	90
压路机	85
木工电锯	96
商砼搅拌车	88
云石机、角磨机	93
空压机	90

备注：*数据来源于《环境噪声与振动控制工程技术导则》（HJ2034-2013）。

（4）施工期固体废物污染源

本项目施工期固体废物主要为施工建筑垃圾及施工人员的生活垃圾。其中工程渣土所占比例较大，主要成分为泥土、混凝土碎块等。施工期产生的建筑垃圾由建设单位运送到指定地点处理。

（5）施工期生态环境影响

主要生态环境影响为拟建项目场地内土方的开挖以及施工临时占地等会引起场地内地表植被破坏。

3.3.1.2 运行期污染物分析

（1）大气污染物

营运期大气污染物主要 O₃ 和 NO₂，其是当光子能量低于 (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。对质子和超重离子加速器而言，其辐射场主要为中子辐射，光子产额很小。且质子和重离子的质量比电子的质量高几个量级。因此，对质子和重离子加速器，其 O₃ 和 NO₂ 很小，可以不用考虑。

（2）水污染源

营运期间水污染源主要由工作人员日常生活所产生生活污水、卫生出入口的淋浴排水。项目建成后，约有工作人员 200 人，按每人每天给水量 80L，排水系数 0.85，年工作 250 天计，共产生生活污水 13.6m³/d（3400m³/a）。生活污水排入化粪池后，达到《污水排入城镇下水水质标准》（GB/T31962-2015）表 1 中 B 等级要求后，排入市政污水管网。

（3）噪声污染源

项目营运期的噪声污染源主要来自制冷机房、水泵房、冷却塔、送排风机房等产生的噪声，主要噪声源强情况见表 3-9。

表 3-9 营运期主要噪声源状况

序号	设备名称	数量	源强 dB(A)	位置	措施
1	冷却塔	2	80	冷却水站	选用低噪声设备、基础减振、墙体隔声等消声措施
2	冷水机组	2	50	冷却水站	
3	风机	49	75	各建筑通风机房	
4	水泵	15	65	冷却水站、水泵房、换热站等	
5	空调机组	17	65	各建筑送风机房	
6	消防给水泵	—	65	运行维护楼	

（4）固体废物

营运期固体废物主要是工作人员日常产生的生活垃圾。项目建成后，约有工作人员 200 人，按每人每日 0.5kg，年工作 250 天计，共产生生活垃圾 100kg/d（25t/a）。

（5）环境风险物质

本项目运行过程中涉及使用盐酸、丙酮、硫酸、硝酸等物质，根据《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ169-2018），属于危险物质。各物质使用情况见表 3-10。

表 3-10 危险物质使用情况

物质名称	CAS 号	年使用量,t	最大贮存量,t	临界量,t
盐酸（≥37%）	7647-01-0	0.10218	0.60318	7.5
丙酮	67-64-1	0.01279	0.00679	10
硫酸	7664-93-9	0.00158	0.00392	10
硝酸	7697-37-2	0.00271	0.00542	7.5
氨水（浓度≥20%）	1336-21-6	0.00200	0.00400	10
四氯化碳	56-23-5	0.00600	0.00300	7.5
甲苯	108-88-3	0.00022	0.00087	10

物质名称	CAS号	年使用量,t	最大贮存量,t	临界量,t
氢氟酸	7664-39-3	0.00012	0.00058	1
异丙醇	67-73-0	0.00079	0.00157	10

盐酸、硝酸、硫酸及氢氟酸具有腐蚀性和氧化性，氨水具有一定的腐蚀性和弱碱性，四氯化碳属于有毒物质，甲苯、异丙醇属于易燃易爆物质，从表 3-10 可知，本项目运营期拟使用的危险物质远远小于其临界量，其发生事故的概率很小，采取一定措施后引起环境事故可能性更小。

3.3.2 辐射源项分析

3.3.2.1 加速器

离子加速器运行时产生的辐射场，包括加速器运行时产生的“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。

3.3.2.1.1 瞬时辐射

(1) 束流损失

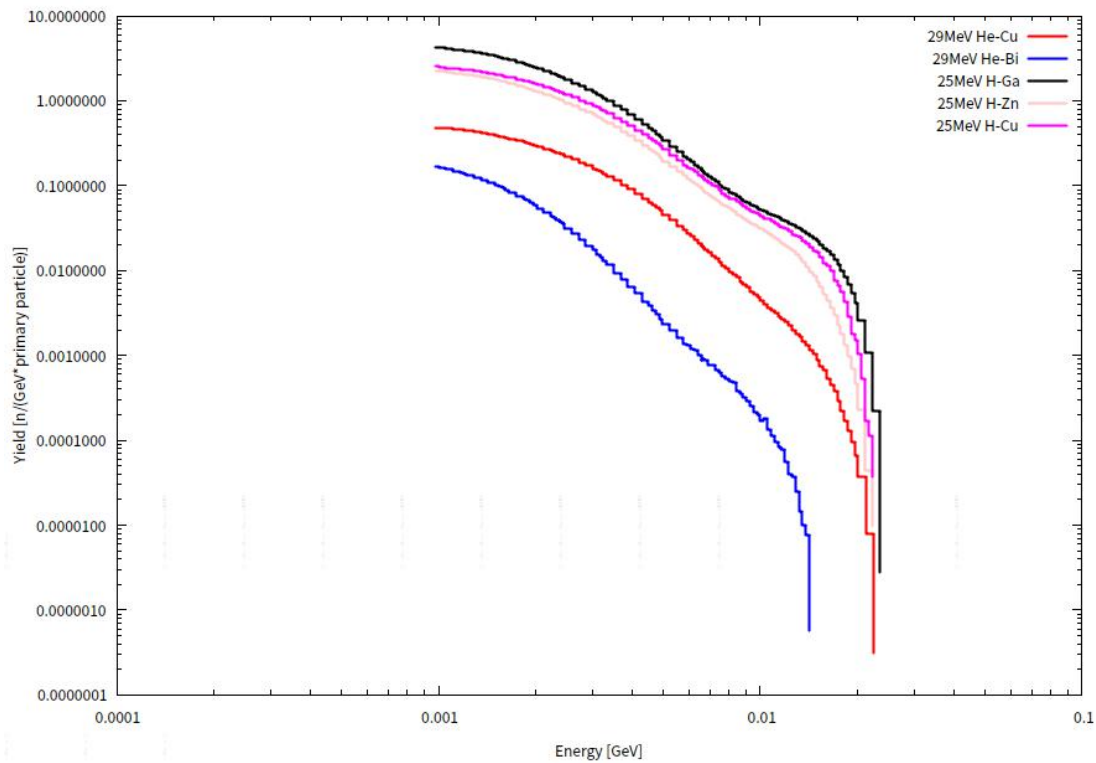
加速器瞬发源项是由束流损失部位和材料决定的，束流损失分布见表 3-11 所示。

表 3-11 束流损失分布

损失部位	损失方式	损失能量	损失流强	损失离子	损失部位材料
传输线	均匀瞬时	7MeV/u	1W/m	V、Cr、Mn、Fe	Cu、不锈钢、铌
超重调试终端	集中损失	7MeV/u	10pμA	V、Cr、Mn、Fe	C、Cu、Al 等
传输线	均匀瞬时	H: 25MeV He: 29MeV	1W/m	H/He	Cu、不锈钢、铌
靶站	集中损失	H: 25MeV He: 30MeV	2mA	H/He	Bi、Ga、Zn、不锈钢、Cu
调试终端	集中损失	H: 25MeV He: 30MeV	2mA	H/He	C、Cu、Al 等
超重终端	集中损失	7MeV/u	10pμA	V、Cr、Mn、Fe	Ta、不锈钢

(2) 中子辐射

对于加速器，其能量、流强变化大，束流在轰击靶时全部损失。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，其它粒子（电子， γ 射线等）不论是产生的量还是穿透能力皆小于中子，同时，次级中子也是造成空气、冷却水和屏蔽体活化的主要因素。采用 FLUKA 程序计算质子、氦离子轰击不同靶件中子产额情况见图 3-24。由于核反应产生中子的产额和能谱与加速离子的每核子能量有关，即每核子能量相同时，不同离子与相同靶反应产生的单位流强中子产额和能谱基本相同，本项目超重离子单个核子能量相同，因此选取铁离子轰击不同材料靶件中子产额情况，采用 FLUKA 程序计算中子产额情况见图 3-25。



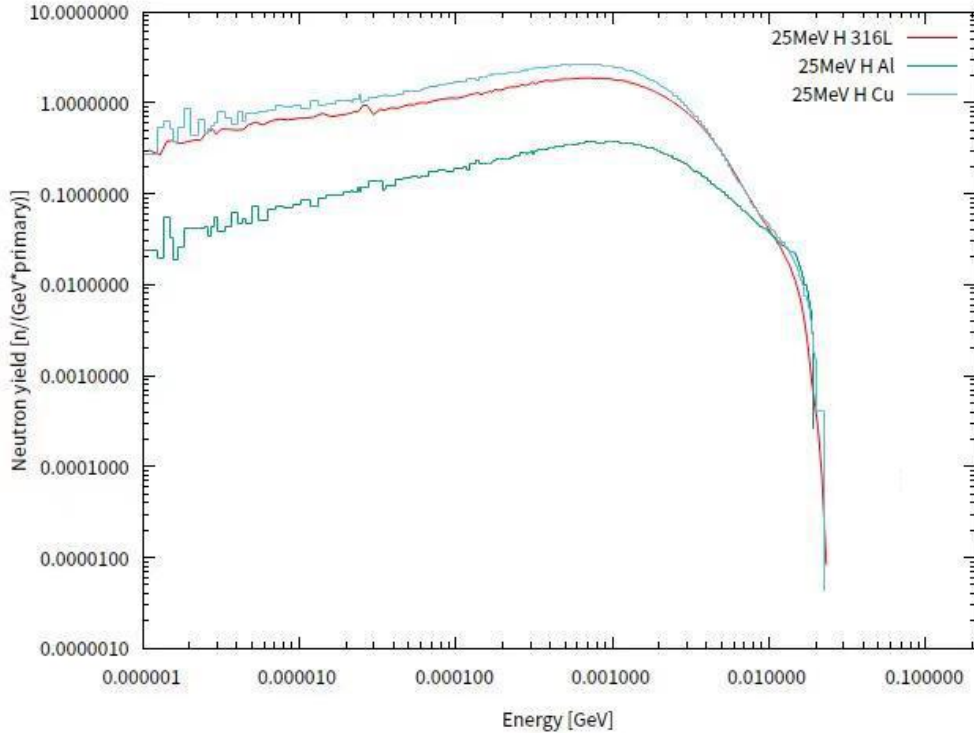


图 3-24 质子、氦离子轰击不同材料靶件中子产额

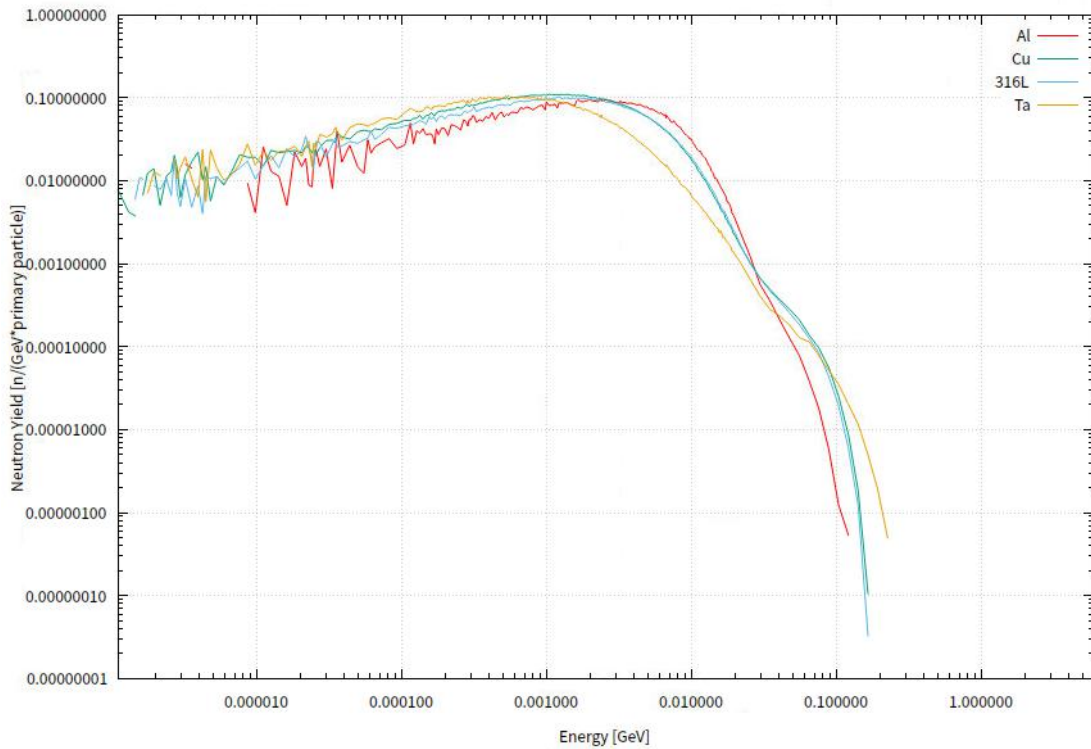


图 3-25 Fe 离子轰击不同材料靶件中子产额

从图 3-24 可知，质子和氦离子轰击不同材料靶时，其中子产额和能量比较高的为质子轰击天然 Ga 靶、Cu 靶和不锈钢靶，其中子产额分别为 $7.64e-3n/p$ 、

5.11e-3n/p、5.85e-3n/p; 从图 3-25 可知, 铁离子攻击不同材料靶时, 铁离子轰击铝靶和铜靶中子产额最高, 其中子产额分别为 8.87e-4n/p 和 6.93E-4n/p。

3.3.2.1.2 天空反散射

穿过屏蔽墙顶射向天空的各种辐射, 由于空气的散射作用, 将部分又回到地面。本项目同位素装置靶站、25MeV 加速器低能隧道及超重加速器低能隧道均不是位于顶层, 因此不考虑天空反散射影响。超重装置束流终端所在实验室局部和 25MeV 加速器高能隧道为一层建筑, 其顶墙厚度为 1m, 属于厚屏蔽, 且根据 5.2.2.1 节计算结果, 其顶板外瞬时剂量率均低于 2.5 μ Sv/h。因此, 可不考虑天空反散射的影响。

3.3.2.1.3 感生放射性

感生放射性主要是主束或次级中子与靶、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质子的能量、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。

(1) 空气感生放射性

加速器运行期间初级粒子或次级粒子与空气的 N、O、H 等相互作用产生放射性气体, 其放射性核素主要通过热中子俘获 (n, 2n)、(γ , n) 反应和散裂反应而产生, 产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性核素, 对人体的危害是气体浸没外照射和吸入引起的内照射。

① 超重元素合成研究过程中超导直线加速器运行过程中空气活化

根据超重元素合成研究超导直线加速器拟采用的离子, 保守采用离子为 Fe, 能量 7MeV/u, 靶材料为 Cu 靶, 采用 FLUKA 计算空气活化, 照射时间为连续照射 180 天, 流强为 10 μ A, 超重装置加速器运行过程中室内空气活化各核素总活度情况见表 3-12。

表 3-12 辐照结束冷却 0min 后空气活化情况

序号	核素	活化活度,Bq	半衰期
1	³ H	7012.32	12.32a
2	⁷ Be	19100.88	53.22d
3	¹¹ C	32640	20.36min
4	¹³ N	50299.2	9.96min
5	¹⁴ C	10038	5700a
6	¹⁵ O	28615.2	2.1min
7	⁴¹ Ar	353352	1.8h

②同位素产生及分离过程中超导直线加速器运行过程中空气活度

同位素产生及分离研究中超导直线加速器打靶的靶件所在位置为靶件照射室的真空室中，因此，正常情况下空气活化可能性很小。

(2) 冷却水感生放射性

加速器在运行过程中，加速器器件的冷却水因受次级粒子的照射而活化，主要是中子引起水中 ¹⁶O 的散裂。¹⁵O、¹¹C、³H 和 ⁷Be 为最重要的放射性核素。

①超重元素合成研究过程中超导直线加速器运行过程中冷却水活化

根据超重元素合成研究超导直线加速器拟采用的离子，保守采用离子为 Fe，能量 7MeV/u，靶材料为 Cu 靶，采用 FLUKA 计算冷却水活化，照射时间为连续照射 180 天，流强为 10pμA，冷却时间为 10min，超导直线加速器运行过程中冷却水活化情况见表 3-13。

表 3-13 超重元素合成研究加速器辐照结束冷却 10min 后冷却水活化情况

序号	核素	活化活度,Bq	半衰期
1	³ H	5633.52	12.32a
2	⁷ Be	28975.2	53.22d
3	¹¹ C	91219.2	20.36min
4	¹³ N	5595.36	9.96min
5	¹⁵ O	10722	2.1min
6	¹⁸ F	1003.008	1.8h

②同位素产生及分离研究过程中超导直线加速器运行过程中冷却水活化

据同位素产生及分离研究超导直线加速器拟采用的离子，保守采用质子，能量 25MeV，靶材料为不锈钢，采用 FLUKA 计算冷却水活化，照射时间为连续

照射 10 天，流强为 2mA，冷却时间为 10min，超导直线加速器运行过程中冷却水活化情况见表 3-14。

表 3-14 同位素产生及分离研究加速器辐照结束冷却 10min 后冷却水活化情况

序号	核素	活化活度,Bq	半衰期
1	^3H	3.28E+02	12.32a
2	^{13}N	4.16E+06	9.96min
2	^{14}C	2.43E+02	5700a
3	^{15}O	4.34E+05	2.1min

(3) 加速器结构部件的感生放射性

加速器结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。加速器产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，主要材料为铁、不锈钢、铜、铝和铝合金等。根据业主现有 25MeV 质子加速器运行经验，加速器隧道活化情况基本可忽略不计，主要考虑束流损失最大部位终端部件活化情况。

① 超重元素合成研究过程中超导直线加速器运行过程中结构部件活化

根据本项目超重元素合成装置超导直线加速器运行情况，本项目运行期间使用离子，保守采用离子为 Fe，能量 7MeV/u，流强 10 μA ，靶材料为 Cu 靶，采用 FLUKA 计算照射时间 6 个月冷却 1 小时，1 天，10 天，30 天结构部件活化情况，计算结果示意图见图 3-26。

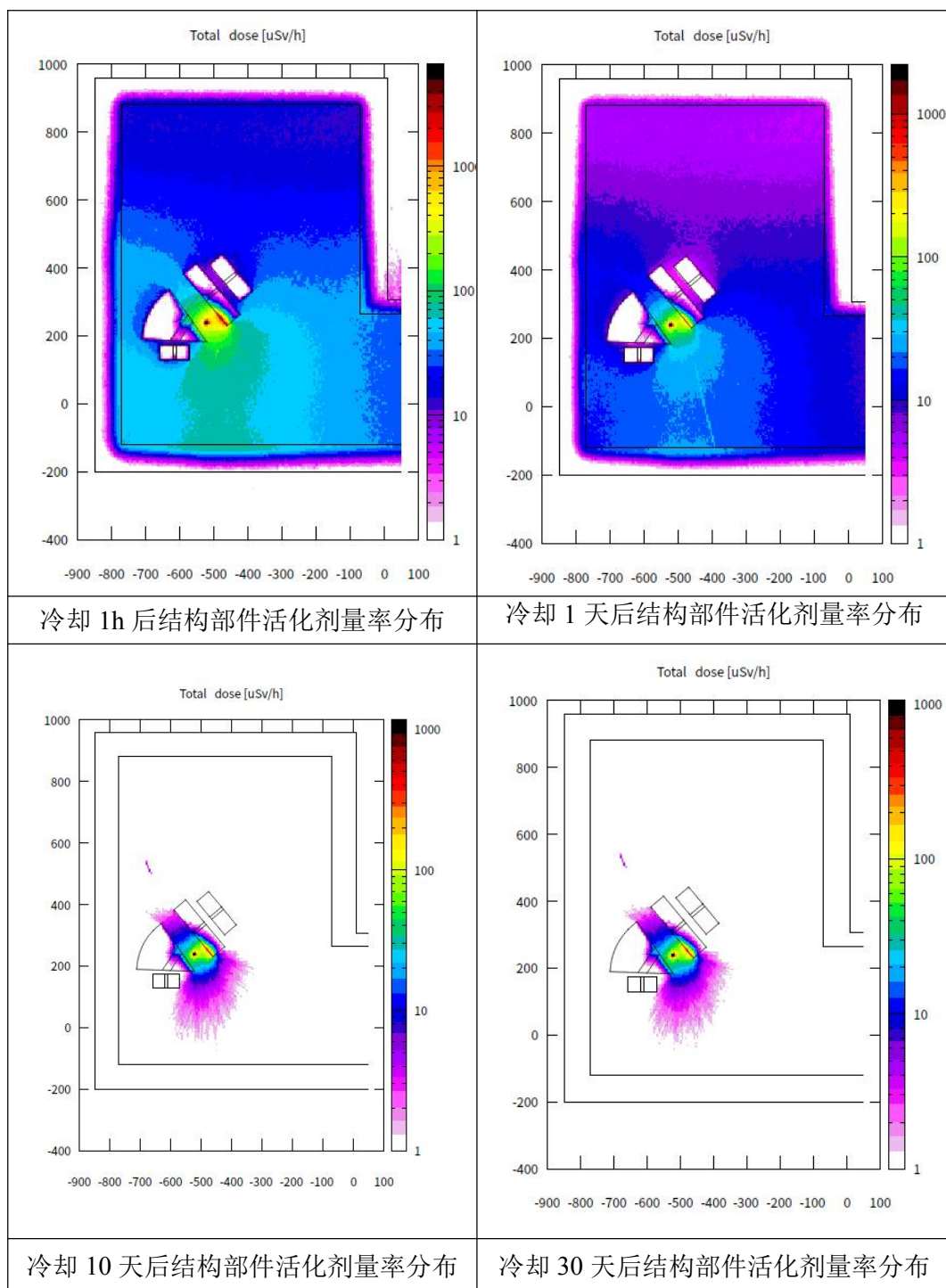


图 3-26 结构部件活化情况剂量率分布图

从计算结果可知，距靶 1 米处，照射后冷却 1 小时，剂量为约 $95\mu\text{Sv/h}$ ，冷却 10 天约为 $7\mu\text{Sv/h}$ ，10 天后衰变非常缓慢。

②同位素产生及分离研究过程中超导直线加速器运行过程中结构部件活化

根据同位素产生及分离实验可知，加速器束流损失最大部位为靶站，其主要

材料为 ^{209}Bi 靶件、天然 Ga 靶、天然 Zn 靶、石墨包壳、不锈钢支架和铜基底。根据各靶件辐照要求即 ^{209}Bi 靶采用流强为 2mA，能量为 29MeV ^4He 离子攻击 20 小时， $^{\text{nat}}\text{Ga}$ 靶采用流强为 2mA，能量为 25MeV 质子轰击 10 天， $^{\text{nat}}\text{Zn}$ 靶采用流强为 2mA，能量为 25MeV 质子轰击 5 天，采用 FLUKA 计算各材料的活化产物情况，由于该三个靶件主要进行目标核素分离研究，因此，为减少短半衰期核素的影响，将辐照后靶件冷却 1h 再进行相应研究。离子轰击靶件的活化情况见表 3-15、表 3-16 和表 3-17，其他部件活化情况见表 3-18。

表 3-15 辐照 ^{209}Bi 靶后冷却 1h 活化情况

核素	20 个靶活度; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线; keV
^{211}At	7.37E+11	7.2h	ec	669.78
^{209}Po	241.3	102a	ec/ β +	260.5
^{208}Bi	1537	368000a	ec/ β +	74.69
^{208}Po	3870	2.98a	ec/ β +	291.81
^{207}Bi	1.39E+07	30.2a	ec/ β +	569.69
^{14}C	5366	5700a	β -	/
^{13}N	2.10E+08	9.96min	ec/ β +	511
^{11}C	3.26E+08	20.36min	ec/ β +	511
^3H	1.43E+07	12.32a	β -	/

表 3-16 辐照天然 Ga 靶后冷却 1h 活化情况

核素	20 个靶活度; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线;
^{74}As	1.11E+07	17.77d	ec/ β +	595.83
^{72}Ga	1.13E+10	14.1h	β -	834.13
^{72}As	6.71E+07	26h	ec/ β +	833.99
^{71}Ge	2.69E+12	11.42d	ec	9.25
^{70}Ga	4.50E+11	21.14min	β -	1039.2
^{69}Zn	2.48E+09	56.4min	β -	318.4
^{69}Ge	1.31E+13	39.05h	ec/ β +	1106.77
^{68}Ga	8.90E+12	67.71min	ec/ β +	1077.34
^{68}Ge	5.14E+11	270.93d	ec	9.25
^{67}Cu	1.08E+10	61.83h	β -	184.57
^{67}Ga	4.34E+11	3.26d	ec	93.3
^{67}Ge	3.44E+07	18.9min	ec/ β +	167.01
^{65}Zn	2.08E+11	243.93d	ec/ β +	1115.539
^{64}Cu	2.66E+10	12.701h	ec/ β +	1345.77
^{63}Ni	2.62E+05	101.2a	β -	/
^{60}Fe	0.4372	2.62a	β -	58.6
^{60}Co	7.90E-04	1925.28d	β -	1332.49

核素	20 个靶活度; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线;
^3H	1.48E+07	12.32a	β -	/
激发态	^{60}Co	0.4372	IT	58.6
	^{69}Zn	1.61E+09	IT	438.63
	^{71}Zn	2.61E+08	β -	386.28

表 3-17 辐照天然 Zn 靶后冷却 1h 活化情况

核素	20 个靶件活度; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线; keV
^{71}Ge	8.15E+06	11.42d	ec	9.25
^{70}Ga	1.91E+10	21.14min	β -	1039.2
^{69}Zn	2.99E+10	56.4min	β -	318.4
^{69}Ge	1.35E+07	39.05h	ec/ β +	1106.77
^{68}Ga	3.36E+12	67.71min	ec/ β +	1077.34
^{67}Cu	7.96E+09	61.83h	β -	184.57
^{67}Ga	7.13E+12	3.26d	ec	93.3
^{66}Ga	7.55E+12	9.49h	ec/ β +	1039.2
^{65}Ni	1.19E+07	2.51h	β -	1481.84
^{65}Zn	1.56E+11	243.93d	ec/ β +	1115.539
^{65}Ga	1.55E+11	15.2min	ec/ β +	115.09
^{64}Cu	1.98E+12	12.7h	ec/ β +	1345.7
^{63}Ni	1.54E+06	101.2a	β -	/
^{63}Zn	3.42E+12	38.47min	ec/ β +	669.62
^{62}Zn	1.12E+10	9.19h	ec/ β +	596.56
^{61}Co	1.19E+09	1.65h	β -	68.41
^{61}Cu	3.49E+12	3.33h	ec/ β +	282.95
^{60}Co	4.38E+06	1925.28d	β -	1332.49
^{60}Cu	2.57E+11	23.7min	ec/ β +	1332.5
^{59}Ni	2.01E+03	7.6e4a	ec/ β +	6.9
^{58}Co	7.09E+05	70.86d	ec/ β +	810.75
^{57}Co	3.82E+09	271.74d	ec	122.06
^3H	2.95E+06	12.32a	β -	/
激发态	^{46}Sc	3.62E+06	IT	142.58
	^{52}Mn	476.8	ec/ β +	1424.6

表 3-18 其它材料活化产物情况

铜基底		不锈钢支架		石墨包壳	
核素	活度 Bq	核素	活度 Bq	核素	活度 Bq
^{68}Ga	1.26E+07	^{65}Ni	1.72E+08	^{13}N	2.71E+08
^{66}Cu	1.20E+11	^{63}Ni	1.23E+06	^{11}C	2.40E+09
^{66}Ga	5.51E+06	^{62}Co	1.23E+04	^7Be	3.40E+05
^{65}Ni	4.33E+09	^{61}Co	6.94E+06	^3H	1.72E+05
^{65}Zn	1.16E+11	^{60}Co	6.46E+05		

铜基底		不锈钢支架		石墨包壳	
核素	活度 Bq	核素	活度 Bq	核素	活度 Bq
⁶⁴ Cu	6.00E+12	⁵⁹ Fe	4.60E+07		
⁶³ Ni	4.55E+07	⁵⁸ Co	5.25E+08		
⁶³ Zn	6.63E+12	⁵⁷ Mn	9.22E+05		
⁶² Co	1.01E+07	⁵⁷ Co	2.23E+07		
⁶² Cu	9.06E+12	⁵⁷ Ni	1.97E+07		
⁶² Zn	2.12E+12	⁵⁶ Mn	3.44E+10		
⁶¹ Co	1.15E+10	⁵⁵ Cr	1.73E+07		
⁶¹ Cu	1.23E+11	⁵⁵ Fe	1.10E+08		
⁶⁰ Co	6.84E+07	⁵⁴ Mn	4.55E+07		
⁵⁹ Fe	4.02E+05	⁵³ V	5.83E+04		
⁵⁹ Ni	1.65E+06	⁵³ Fe	2.46E+06		
⁵⁸ Co	4.38E+08	⁵² V	7.69E+07		
⁵⁵ Fe	1.53E+06	⁵¹ Cr	3.50E+09		
³ H	9.36E+06	⁴⁹ V	2.63E+06		
		⁴⁹ Cr	4.52E+07		
激发态	^{60m} Co	4.91E+09	³³ P	6.68E+04	
	^{62m} Co	3.68E+08	³² P	2.35E+07	
		³¹ Si	1.06E+07		
		²⁸ Al	1.40E+07		
		激发态	^{53m} Fe	1.60E+05	
			^{58m} Co	2.86E+09	

(4) 土壤活化

参考日本 J-PARC 等国际上的加速器的相关设计, 本项目加速器底部剂量率水平低于 5mSv/h, 不需要考虑其对土壤、地下水的活化影响。

3.3.2.1.4 电磁辐射

本项目运行期间可能产生的电磁辐射主要来自加速器射频系统、磁铁以及电源机柜等。

可能产生电磁辐射的设备的最外层/外壳均为金属, 金属外壳能够有效地屏蔽电磁辐射, 且整个加速器隧道采用混凝土屏蔽结构, 能够使其对周围环境所致的电场强度低于表 1-10 所列的控制目标值。

3.3.2.2 非密封放射性物质工作场所

(1) 靶站、热室大厅

甲级非密封放射性工作场所主要为靶站和热室大厅， ^{209}Bi 靶用 2mA 的 ^4He 辐照 20 小时，天然 Ga 用 2mA 的质子辐 10 天，天然 Zn 靶用 2mA 的质子辐照 5 天，照射后冷却 1 小时靶件中的核素活度及其特性分别见表 3-15、表 3-16 和表 3-17，靶托等其它材料核素分析见表 3-18。本项目实验阶段，每次最多操作 20 个靶件，每年每种靶件最多操作 17 次。

发生器研发区用于 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器的研发，该区域操作的放射性同位素为分装后 ^{68}Ge ，放射性核素 ^{68}Ge 单次最大操作量为 $3.7\text{E}+09\text{Bq}$ 。

本次评价核素选取活化产物中核素活度产额高（核素活度超过 3 次方）且半衰期大于 10min 的放射性核素。

(2) 超重二层非密封放射性工作场所

该场所主要操作有 ^{243}Am 、 ^{95}Nb 、 ^{182}Ta 、 ^{179}Ta ，在正常工作情况下污染源项如下：

a) 核素 ^{243}Am 衰变发生 α 衰变，同时伴随发射 γ 射线及 β 射线，能量较低。

b) 核素 ^{95}Nb -95、 ^{182}Ta 衰变方式是 β 衰变，能衰变出多条 β 射线，还能释放 γ 射线。 β 射线穿透能力较弱，在组织内辐射距离较短，不会对环境产生明显影响，但 β 射线被周围其他物质阻止时产生的韧致辐射会对周围环境产生辐射污染，本项目主要考虑韧致辐射影响。

c) 核素 ^{179}Ta 衰变方式是 EC 衰变，能衰变出多条 X 射线，主要考虑核素的 X 射线影响。

表 3-19 超重二层非密封放射性工作场所操作核素特征

核素	日最大操作量,Bq	日等效最大操作量,Bq	半衰期	主要衰变类型
^{243}Am	2.66E+07	2.66E+09	7370a	α 衰变
^{95}Nb	3.70E+06	3.70E+07	34.9d	β -衰变
^{182}Ta	3.70E+06	3.70E+07	114d	β 衰变
^{179}Ta	3.70E+06	3.70E+07	1.82a	EC 衰变

3.3.3 事故工况

(1) 安全联锁失效事故

超重元素合成装置及同位素应用研发装置运行时，由于安全联锁装置失效，运行期间工作人员或公众可能误入加速器大厅内未及时发现，造成工作人员或公众误照。由于超重元素合成装置及同位素应用研发装置设施有较为完善的监控和安全联锁系统，发生这类事故的机率很小。

(2) 人员滞留事故

事故工况的极端状态就是加速器开机但加速器隧道或束流终端室内有人员滞留的情况。在辐射防护联锁系统的保护下，人员不可能在加速器隧道或束流终端室内且防护门完全关闭，加速器待开机前还滞留在加速器隧道或束流终端室内；一旦发生这种极端情况，人员也可以通过安装在加速器隧道或束流终端室内紧急开门按钮（同时具有急停按钮功能）和紧急报警按钮（同时具有急停按钮功能）打开防护门离开加速器隧道或束流终端。射线装置的辐射场性质为瞬发场，极端事故情况时加速器会立即停止，切断辐射源。

(3) 加速器冷却水泄露事故

加速器运行过程中发生冷却水管故障或破裂事故，导致冷却水泄露。发生该事故时，应立即停止出束，对冷却水系统进行检查、维修；检查冷却水管路，若发生破裂，立即维修或更换。

同位素产生及分离研究加速器和超重元素合成研究加速器事故情况下冷却水泄漏量最大分别为 2m^3 ，设置地面排水沟，事故情况下泄露冷却水排至废水收集池，废水收集池设在靶站、热室大厅地下一层，其容积为 6m^3 ，一旦发生冷却水泄露事故，将其泄露的冷却水收集到该废水收集池中暂存一段时间，经检测满足要求后外排。

(4) 物料掉落

放射性物料在转运过程中，由于人员操作不慎，物料掉出转运容器。本项目操作的放射性物料均自带包装容器，且转运时有转运容器，转运过程中有剂量员

全程跟踪。当发生物料掉落出转运容器的情况时，若包装容器不破损，则不会产生污染。若包装容器破损，剂量员利用表面污染仪对可能沾污的区域进行检测，并进行去污处理，多次擦拭去污后，直至利用表面污染仪检测达到环境本底水平。

(5) 溶液洒漏

本项目大部分工艺过程操作对象为溶液，实验过程中由于操作不慎，导致溶液洒漏造成表面沾污或人员沾污。

当工艺溶液洒漏时，采用去污材料进行擦拭，对可能沾污的区域多次擦拭后进行表面污染测量，直至达到环境本底水平。人员沾污将在去污间首选擦拭去污，然后根据情况在去污间选择淋浴去污，淋浴去污过程中产生的污水将进入洗消废水收集池暂存，洗消废水收集池设在靶站、热室大厅地下一层，其容积为 2m³，一旦发生人员沾污事故，将去污产生的废水收集暂存一段时间，经检测满足要求后外排，不满足要求送辐射管理中心进行处理。

(6) 过滤器失效事故

在实验过程中可能发生过滤器失效事故，使得排放气体未经过滤直接外排。为避免此类事件的发生，放射性废气处理系统将采用“冗余”设计原则，对非密封放射性工作场所设置两道以上的过滤设备，并配备必要的放射性监测仪器，定期进行放射性水平的监测。

(7) 机械手皮老虎脱落、窥视窗玻璃破裂

机械手和窥视窗在使用过程中，会出现裂纹、脱落等情况，外界空气进入热室，破坏热室的负压环境，导致热室内实验过程中产生的放射性气溶胶泄漏到操作区房间内。

在实验过程中，随时观察热室负压计的变化，当发现负压计的负压降低，立刻检查热室各密封部位。如突然出现机械手、窥视窗玻璃破裂现象，应马上停止活动。

(8) ²¹¹At 冷凝回收装置发生故障

²¹¹At 采用干馏法分离，主要原理是利用高温将易挥发的 ²¹¹At 从 Bi 靶中分离，

沉积在后端冷凝管上。冷凝回收装置发生故障主要有：外部冷凝水失效、管路破损、载气异常、分离温度异常等。冷凝回收装置发生故障将导致 ^{211}At 未经冷凝回收扩散到空气中，对外环境和工作场所造成辐射影响。

在实验过程中，加强前区的监测，一旦发生异常，立即停止实验。

(9) 超重终端靶室酒精泄露事故

靶室内部是真空，如靶室内部发生酒精泄露因无氧气环境，不会引起燃烧；靶室外部无火源，也无法引起燃烧，另外，靶室附近放置配置灭火器。超重终端产生的放射性核素的截面很小，在 fb 级别，半衰期很短，在 ms（毫秒）级别，不会出现次生放射性伤害。

(10) 击穿靶事故

由于束流、靶工艺等方面的影响，有可能会发生靶窗破裂事故，靶窗破裂可能会导致靶体内放射性气体泄露，致使靶真空腔体真空度发生变化，其对加速器和靶室抽真空的真空泵造成污染。

为防止此类事故造成的影响，在加速器段设置快保护，监测到真空度有较大的变化，快速切断束流，并关闭与靶连接的闸板阀；在抽真空时增加两道高效过滤装置以防靶内的放射性物质对真空泵组的污染。

3.4 废弃物

本项目运行过程中产生的放射性废物主要有：放射性废气、放射性废液和放射性固体废物。

3.4.1 放射性废气

3.4.1.1 加速器运行产生的废气

超重元素合成装置加速器在运行时，排风量很小，主要考虑停机后大排风情况下室内活化空气排入外环境的量。假设加强排风期间，室内的空气活化产物全部外排至外环境，则该装置每年排入环境的空气感生放射性核素量表 3-20。

表 3-20 超重装置终端每年排入环境的空气感生放射性核素总活度

核素	年排放量, Bq
^3H	7.01E+03
^7Be	1.91E+04
^{11}C	3.26E+04
^{13}N	5.03E+04
^{14}C	1.00E+04
^{15}O	2.86E+04
^{41}Ar	3.53E+05

3.4.1.2 非密封放射性工作场所产生废气

非密封放射性工作产生废气环节主要是在分离热室进行相关操作时, 废气由固相或者液相进入气相。

3.4.1.2.1 释放源项

废气中各放射性核素的产生量由下式计算:

$$Q = Q_0 \cdot K_1$$

式中: Q 为各放射性核素的年产生量, Bq/a;

Q_0 为各工艺段每年操作的放射性核素量, Bq/年;

K_1 为放射性核素的释放份额(放射性核素由固/液相进入气相的份额)。

3.4.1.2.2 释放份额

(1) 辐照靶件切割后气体的释放

根据工艺情况, 正常情况下切割过程辐照靶件封装切割后, 石墨管部分活化气体核素直接释放, 释放份额为 100%。

(2) 干法操作工艺过程

本项目干法操作主要是辐照后 ^{209}Bi 靶提取同位素 ^{211}At 。

在干法分离过程中, 加热使 ^{211}At 从 Bi 靶材料中挥发出来, 进入冷凝管冷凝, 使用氯仿/水/甲醇等溶剂使冷凝在管壁上 ^{211}At 溶解在溶液中, 并收集 ^{211}At 溶液

至收集罐，实现靶材料和目标产物的分离。假设该过程中靶件内的活化气体 100% 释放， ^{211}At 的释放份额 100% 释放，采用冷凝方法后假设其释放份额为 1%，其他不易挥发的核素释放份额 $1\text{E-}04$ 。

表 3-21 干法操作各工艺环节释放份额

核素	气体释放	^{211}At	其他气溶胶释放
释放份额	100%	100% (回收 99%)	$1\text{E-}04$

(3) 湿法操作工艺过程

湿法操作涉及的工艺主要是辐照后的 $^{\text{nat}}\text{Ga}$ 靶提取同位素 ^{68}Ge 和辐照后的 $^{\text{nat}}\text{Zn}$ 靶提取同位素 ^{67}Cu 。

在溶靶、过滤与酸化过程中，位于靶件内的气体释放份额保守取 100%，在分离及纯化工艺过程操作的放射性物料为液态，大部分为不易挥发核素，因此，这些实验工艺过程中产生的放射性废气的量较小，且处于密闭设备中进行，因此放射性核素的释放份额保守取 $1\text{E-}04$ 。

(4) 超重终端二层非密封放射性工作场所

超重终端二层非密封放射性工作场所在实验过程中操作核素为液态或者粉末状态，建设放射性核素释放份额保守取 $1\text{E-}03$ 。

综上所述，各工艺环节释放份额见表 3-22。

表 3-22 各工艺环节释放份额

工艺过程	溶靶、过滤与酸化		分离及纯化工艺过程	超重终端二层非密封放射性工作场所
	气体释放	其他气溶胶释放	其他气溶胶释放	气溶胶释放
释放份额	100%	$1\text{E-}04$	$1\text{E-}04$	$1\text{E-}03$

3.4.1.2.3 废气源项计算

(1) 分离热室

各中活化产物切割、干法和湿法操作释放源项见表 3-23。

表 3-23 放射性废气产生量

材料	核素	年操作量	其他产生量, Bq	
			气体	其他气溶胶
石墨碳管	¹³ N	1.38E+10	1.38E+10	
	¹¹ C	1.22E+11	1.22E+11	
	⁷ Be	1.73E+07		1.73E+03
	³ H	8.77E+06	8.77E+06	
²⁰⁹ Bi 靶	²¹¹ At	1.25E+13		1.25E+11
	²⁰⁹ Po	4.11E+03		4.11E-01
	²⁰⁸ Bi	2.61E+04		2.61E+00
	²⁰⁸ Po	6.58E+04		6.58E+00
	²⁰⁷ Bi	2.36E+08		2.36E+04
	¹⁴ C	9.10E+04	9.10E+04	
	¹³ N	3.57E+09	3.57E+09	
	¹¹ C	5.54E+09	5.54E+09	
天然 Ga 靶	³ H	2.43E+08	2.43E+08	
	⁷⁴ As	1.89E+08		1.89E+04
	⁷² Ga	1.92E+11		1.92E+07
	⁷² As	1.14E+09		1.14E+05
	⁷¹ Ge	4.57E+13		4.57E+09
	⁷⁰ Ga	7.65E+12		7.65E+08
	⁶⁹ Zn	4.22E+10		4.22E+06
	⁶⁹ Ge	2.23E+14		2.23E+10
	⁶⁸ Ga	1.51E+14		1.51E+10
	⁶⁸ Ge	8.74E+12		8.74E+08
	⁶⁷ Cu	1.84E+11		1.84E+07
	⁶⁷ Ga	7.38E+12		7.38E+08
	⁶⁷ Ge	5.85E+08		5.85E+04
	⁶⁵ Zn	3.54E+12		3.54E+08
	⁶⁴ Cu	4.52E+11		4.52E+07
	⁶³ Ni	4.45E+06		4.45E+02
	³ H	2.52E+08		2.52E+04
	^{69m} Zn	2.74E+10		2.74E+06
^{71m} Zn	4.44E+09		4.44E+05	
天然 Zn 靶	⁷¹ Ge	1.39E+08		1.39E+04
	⁷⁰ Ga	3.25E+11		3.25E+07
	⁶⁹ Cu	3.67E+02		3.67E-02
	⁶⁹ Zn	5.08E+11		5.08E+07
	⁶⁹ Ge	2.30E+08		2.30E+04
	⁶⁸ Ga	5.71E+13		5.71E+09
	⁶⁷ Cu	1.35E+11		1.35E+07
	⁶⁷ Ga	1.21E+14		1.21E+10
	⁶⁶ Ga	1.28E+14		1.28E+10
	⁶⁵ Ni	2.02E+08		2.02E+04
⁶⁵ Zn	2.65E+12		2.65E+08	

材料	核素	年操作量	其他产生量, Bq	
			气体	其他气溶胶
	⁶⁵ Ga	2.64E+12		2.64E+08
	⁶⁴ Cu	3.37E+13		3.37E+09
	⁶³ Ni	2.62E+07		2.62E+03
	⁶³ Zn	5.81E+13		5.81E+09
	⁶² Zn	1.90E+11		1.90E+07
	⁶¹ Co	2.02E+10		2.02E+06
	⁶¹ Cu	5.93E+13		5.93E+09
	⁶⁰ Co	7.45E+07		7.45E+03
	⁶⁰ Cu	4.37E+12		4.37E+08
	⁵⁹ Ni	3.42E+04		3.42E+00
	⁵⁸ Co	1.21E+07		1.21E+03
	⁵⁷ Co	6.49E+10		6.49E+06
	³ H	5.02E+07	5.02E+07	

(2) 超重终端二层非密封放射性工作场所

超重终端二层非密封放射性工作场所在操作过程中释放源项见表 3-24。

表 3-24 超重终端二层非密封放射性工作场所放射性废气产生量

核素	日最大操作量, Bq	年操作量, Bq	气溶胶产生量, Bq
²⁴³ Am	2.66E+07	2.66E+09	2.66E+06
⁹⁵ Nb	3.70E+06	3.70E+08	3.70E+05
¹⁸² Ta	3.70E+06	3.70E+08	3.70E+05
¹⁷⁹ Ta	3.70E+06	3.70E+08	3.70E+05

3.4.2 放射性废液

本项目正常运行期间加速器装置冷却水、靶站冷却水循环使用,不外排;正常运行过程中产生的放射性废液主要是非密封放射性工作场所实验过程中,具体产生情况如下:

(1) ²¹¹At 生产研发过程中由于吸收瓶吸收尾气中放射性杂质核素而产生的放射性废液,每年产量不超过 0.6L;该过程中管道及设备清洗产生的放射性废液,年产生量不超过 20L。

(2) ⁶⁸Ge 的生产研发过程中萃取、洗涤、反萃取及淋洗过程中产生含放射性核素的有机废液和废盐酸溶液,每年含放射性核素的有机废液产生量不超过 6.2L,浓酸中和液不超过 80L。

(3) ^{67}Cu 的生产研发过程中阳离子交换和阴离子交换环节将产生含放射性核素的废盐酸溶液，每年产生的浓酸中和液不超过 120L。

(4) ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器研制过程将产生放射性废液，其每年产生量不超过 3L。

(5) 重终端二层非密封放射性工作场所实验过程中产生的放射性废液，其年产生量不超过 1L。

本项目运行过程中放射性废液产生情况见表 3-25。

表 3-25 本项目运行过程中放射性废液产生量

类别		年产生量	备注
At-211 生产研发过程	尾气吸收液	0.6L	放射性废液中主要核素 ^{211}At 、 ^{211}Po 、 ^{209}Po 、 ^{208}Po 、 ^{207}Bi 、 ^{208}Bi 等
	清洗液	20L	
Ge-68 生产研发过程	浓酸中和液	80L	萃取和纯化过程中产生的放射性废液中主要核素 ^{69}Ge 、 ^{71}Ge 、 ^{68}Ge 、 ^{70}Ga 、 ^{74}As 、 ^{65}Zn 、 ^{64}Cu 、 $^{69\text{m}}\text{Zn}$ 、 ^{72}Ga 及 ^{63}Ni 等
	有机废液	6.2 L	萃取过程中，有机废液以 CCl_4 /甲苯为主，主要核素 ^{69}Ge 、 ^{71}Ge 、 ^{68}Ge 、 ^{70}Ga 、 ^{74}As 、 ^{65}Zn 、 ^{64}Cu 、 $^{69\text{m}}\text{Zn}$ 、 ^{72}Ga 及 ^{63}Ni 等，
Cu-67 生产研发过程浓酸中和液		120L	分离纯化过程中产生放射性废液，主要核素 ^{69}Ge 、 ^{71}Ge 、 ^{67}Ga 、 ^{65}Zn 、 ^{63}Ni 、 ^{62}Zn 、 ^{60}Co 、 ^{59}Ni 、 ^{58}Co 及 ^{57}Co 等
^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器研制过程废液		3L	主要核素为 ^{68}Ge 、 ^{68}Ga
超重终端靶件制备、回取及其他实验废液		1L	主要核素为 ^{243}Am 、 ^{182}Ta 、 ^{179}Ta 、 ^{95}Nb
合计		230.8L	其中有机废液 6.2L,其他放射性废液 224.6L

3.4.3 放射性固体废物

本项目运行期间，产生的放射性固体废物主要包括：（1）工艺过程产生的放射性废物，主要包括 ① ^{211}At 的生产研发过程中溶解热室中产生的封装靶件的废石墨碳管、分离热室中的废石英管/不锈钢管； ② ^{68}Ge 的生产研发过程中溶解热室中产生的封装靶件的废石墨碳管、分离热室中的产生的废交换柱； ③ ^{67}Cu 的生产研发过程中溶解热室中产生的封装靶件的废石墨碳管、分离纯化过程中的废交换柱； ④非密封放射性工作场所实验过程中产生的一次性手套、烧杯和移液枪头等； ⑤辐射工作人员实验过程中的操作手套、口罩等防护用品； ⑥靶站打靶过程

中产生的废靶托及废靶、靶车密封件、冷却水系统中离子交换树脂和通风管道气体过滤设备；（2）实验过程中工作人员产生的劳保用品；（3）放射性废水处理过程中产生的废树脂、蒸残液等。本项目运行过程中固体废物产生量见表 3-26。

表 3-26 本项目运行过程中放射性固体废物产生量

废物流	年产生量	处理方式	废物包产生量 200L 桶	备注
废树脂/浓缩液固化废物	50kg	装 200L 桶	4	
废过滤器芯	50kg	装 200L 桶	30	
废靶体托盘	2400kg	装 200L 桶	15	
废靶车密封件	100kg	装 200L 桶	2	
碳管、石英管	66kg	装 200L 桶	3	
交换柱	120 个	装 200L 桶	2	
杂项干废物（软废物）	劳保服 120 套， 口罩 8400 个，鞋 套 8400 个等	装 200L 桶	23	劳保用品等
杂项干废物（不可压）		装 200L 桶	5	试剂瓶等

4 辐射安全与防护

本章将从辐射工作场所分区、人流物流、辐射屏蔽、安全联锁、防护措施、三废治理等方面对工作场所的辐射安全情况进行分析评价。

4.1 场所布局与屏蔽

4.1.1 平面布局

本项目规划用地面积约 97740m²，其中建设用地面积 66440m²，本次新建总建（构）筑物面积为 19224m²。

本项目厂区主要分为主工艺设施区、厂前区和预留区，本项目主工艺设施区由加速器装置区、靶站及热室区、通用设施区构成。其中加速器装置区包括超重加速器低能段隧道、25MeV 同位素加速器低能段隧道、25MeV 同位素加速器高能段隧道、加速器副隧道、超重试验终端、功率源厅；靶站及热室区包括靶站、靶站准备厅、热室、辐射管理中心和排风塔；通用设施区包括低温厅、冷却水站、氦压缩机厅、变配电站；厂前区包括运行维护楼和控制区主出入口。其平面布局图见附图 2，本项目主要建筑物情况见表 4-1。

表 4-1 甘肃同位素实验室主要建筑一览表

序号	建筑名称	占地面积, m ²	建筑面积, m ²	层数
1	超重低能加速器隧道	705	705	1F
2	25MeV 加速器低能隧道	535	535	1F
3	25MeV 加速器高能段隧道	0	0	1F
4	加速器副隧道	290	290	1F
5	靶站、热室、准备厅	3350	7210	2F/1D
6	超重实验终端	642	994	2F
7	辐射管理中心	894	2560	2F/1D
8	功率源厅	-	1300	2F
9	低温厅	810	810	1F
10	氦压缩机厅	480	480	1F
11	冷却水站	900	900	1F
12	变配电站	504	504	1F

序号	建筑名称	占地面积, m ²	建筑面积, m ²	层数
13	运行维护楼	541	2300	3F/1D
14	控制区主出入口	60	60	1F
15	排风塔	64	-	

(1) 加速器装置区

加速器装置区位于厂区中北部，整体呈 T 型布置，超重加速器低能段隧道、加速器副隧道、25MeV 同位素加速器低能段隧道自北向南共用中间墙布置，均位于地上一层，厂房东西向呈现细长型，长度约为 70m；25MeV 加速器高能段隧道与 25MeV 加速器低能段隧道在其西端连接，向正南方向延伸，布置在靶站厂房西北部；功率源厅布置在超重加速器低能段隧道、加速器副隧道和 25MeV 加速器低能段隧道的上面。

(2) 靶站、热室大厅及准备厅

靶站、热室大厅和准备厅位于厂区中部，靶站贴临加速器低能段隧道西端布置；热室位于靶站西侧，贴临建设；靶站准备厅位于靶站南侧，贴临建设，并在准备厅南侧预留发展区。

(3) 辐射管理中心

辐射管理中心主要接收本项目运行过程中产生的废物，布置在热室的北侧，东侧是超重试验终端，排风塔布置在辐射管理中心和超重试验终端之间。

(4) 其他配套设施

通用设施区主要是服务于加速器装置区，低温厅贴临超重加速器低能段隧道、加速器副隧道、加速器低能段隧道联合厂房的东端布置，位于地上一层；冷却水站布置在厂区东北部，位于低温厅北侧；氦压缩机厅、变配电站自东向西一字布置在低温厅南侧，气体贮存场地位于氦压缩机厅和变配电站之间的空地上，变配电站西侧临靶站和靶站准备厅，靠近主要用电负荷设施。

厂前区位于厂区东南部，运行维护楼布置在配电站南侧，西侧临靶站预留发展区，东侧临厂区围墙，靠近厂区主要出入口，方便厂区内外部联系；控制区主出入口位于厂区东南角，向东接祁连山大道（经七路）。

预留区位于厂区西部，主要考虑建设同位素研究中心、药物研究中心、试验大楼。

4.1.1.1 加速器隧道

加速器隧道由超重加速器低能段隧道、25MeV 加速器低能段隧道、25MeV 加速器高能段隧道、加速器副隧道五个隧道区组成。加速器隧道平面布局及剖面图见附图 3、附图 4 和附图 5。

(1) 超重加速器低能段隧道

超重加速器低能段隧道是加速器主装置安装、低温管线布置等的通道。隧道为钢筋混凝土结构，平面轴线尺寸为：长 74.6m、宽 8.15m，位于地上一层，层高 8.0m，占地面积 705m²，建筑面积 705 m²。

(2) 25MeV 加速器低能段隧道

25MeV 加速器低能段隧道是加速器主装置安装、低温管线布置等的通道。隧道为钢筋混凝土结构，平面轴线尺寸为：长 58.1m、宽 8.35m，位于地上一层，层高 8.0m，占地面积 535 m²，建筑面积 535 m²。

(3) 25MeV 加速器高能段隧道

25MeV 加速器高能段隧道内布置高能传输线、加速器与靶站的束流匹配段设备及其配套系统。隧道为钢筋混凝土结构，长 30.35m、宽 16.0m，位于地上一层，建筑高度 12.5m，位于靶站内。

(4) 加速器副隧道

加速器副隧道内布置电源柜中继站、馈管、电缆等附属装备，供超重加速器与 25MeV 加速器共同使用。隧道为钢筋混凝土结构，长 61m、宽 4m，位于地上一层，层高 8.0m，占地面积 290 m²，建筑面积 290 m²。

4.1.1.2 靶站、热室大厅、靶站准备厅

本建筑中布置的装置是将加速器输出的中能 α 或者质子脉冲轰击靶材料发生核反应生成一定量适合治疗和诊断的放射性核素的设施，再通过分离纯化等工艺得到可用于实现医学目标的放射性同位素。装置主要用于安装自动装换靶系统、

冷却系统等。长 88.5m、宽 54.5m，建筑高度 12.5m，占地面积 3350 m²，总建筑面积 7210 m²，地上两层，地下一层。其平面布局图分别见附图 6~附图 8，剖面图见附图 9，热室剖面图见附图 10。

地下一层主要房间有废物暂存间、设备间、转运和过渡热室、靶室。主要用于固体废物、少量气废和液废的暂存和靶件的辐照、转运工作，此外还布置有靶件冷却设备间，用于靶体的热移除。

地上一层设加速器束流线的安装区、吊装大厅、汽车门斗、靶站过渡间、分离热室及其辅助配套设施等。

地上二层设同位素产品检测间、发生器研发区、化学实验室、卫生通道等。

靶站准备厅主要用于非放射性靶的制备、检测、整个靶站的控制和监控、电子设备间、去污间和卫生通道等。

靶站、热室大厅各实验室情况见表 4-2。

表 4-2 靶站、热室大厅各实验室情况

建筑名称	楼层	房间名称	主要用途及功能	拟配备仪器设备
热室大厅	二层	制样间	对同位素产品进行取样采集,取得的同位素样品进一步送去检测分析或者开展研究实验	通风橱,实验台
		留样间	用于同位素样品的留存	试剂柜
		质谱仪间	用于同位素样品的质谱检验,分析同位素产品中的杂质元素的含量	ICP-MS 设备
		光谱仪间	用于同位素样品的光谱检验,分析同位素产品中的杂质元素的含量	ICP-OES 设备
		辅助设备间	放置 ICP-MS 设备和 ICP-OES 设备的制冷机、液氮灌等辅助设备	制冷机、液氮灌等辅助设备
		生物实验室	用于同位素样品的无菌化处理(生物灭菌)	
		洁具间	用于仪器的清洁消毒	
		洗衣间	用于实验服的清洗消毒	
		γ/α 谱仪间	用于同位素样品的放射性检验,分析同位素产品的放射性纯度	γ 谱仪和 α 谱仪
		放射化学实验室	用于开展低活度放射性同位素研究实验	通风橱,实验台
		普通化学实验室	用于开展冷实验(非放射性)研究	通风橱,实验台
		设备样机间	用于开展分离样机的安装调试	台架,实验台
		发生器研发区工作箱	用于制备 Ge-Ga 发生器	屏蔽工作箱
		发生器研发区工作箱后区	用于工作箱中设备的临时维修检测	
		发生器研发区机械手维修间	用于机械手的维修存放	实验台
发生器研发区实验准备间	用于发生器实验准备	通风橱,实验台		
发生器固定相制备实验室	用于发生器固定相制备	通风橱,实验台		

建筑名称	楼层	房间名称	主要用途及功能	拟配备仪器设备
		纯水制备间	用于分离系统的纯水制备供应	纯水机
		材料暂存区	用于同位素生产材料的暂存	
	一层	分离热室	用于同位素分离工艺研发	甲级热室
		热室前区	热室人员操作区	
		热室后区	用于热室中设备的临时维修检测	
		原料准备间	用于原料的配置准备	通风橱，实验台
		天平室	用于原料的称量	天平台
		仓储区	用于耗材的存放	货架
		取样间	试剂取样间	通风橱，实验台
		机械手储存间	存放机械手	
		试剂储存间	用于试剂的储存	
		气瓶间 1	用于惰性气体和氧气的存放	
		气瓶间 2	用于易燃易爆气体的存放	防爆柜
		送风机房	用于靶站和热室大厅	送风机
		空压机房	用于靶站和热室大厅	空压机
		制冷机房	用于靶站和热室大厅	制冷机
		配电室	用于靶站准备大厅、靶站和热室大厅	配电箱
		地下一层	低放废液暂存间	用于低放废液暂存
	中放废液暂存间		用于中放废液暂存	废液罐
	低放废液转运泵间		放置废液转运泵	废液转运泵
	中放废液转运泵间		放置废液转运泵	废液转运泵
	固废暂存区		用于固废暂存	废物罐
		通风过滤器间	用于靶站和热室大厅	通风过滤器
靶站	负一层	靶辐照室	靶件的辐照	真空腔室

建筑名称	楼层	房间名称	主要用途及功能	拟配备仪器设备
		转运热室	靶盘靶件的转运	不锈钢壳体、窥视窗、机械手、2t 吊车、自动转运设备、照明灯具、通风过滤装置等
		过渡热室	新靶件、靶盘的接收及其安装、拆卸以及辐照后靶件的包装与传输	不锈钢壳体、窥视窗、机械手、屏蔽门、照明灯具、通风过滤装置等
		靶站前区	热室操作间	遥操设备、监控等
		靶站后区	热室设备的维护和固废的转运	固废转运小车等
		靶站辅助设备间	冷却水系统及其真空系统设备间	换热器、稳压罐、过滤器、捕集器、真空泵组等
		固废暂存间	靶站及其放化分离热室内产生的固态废物的临时储存	固废暂存罐、转运设备
		通风过滤器间	靶站及其分离热室各功能区的通风过滤设备	通风过滤机组
		废液暂存间	放化分离热室内产生的中低放液态废物的临时储存	废液收集罐，转运泵
		废水收集池间	异常情况下活化冷却水及其地面排水收集	废液收集池、废水运输泵
		洗消水收集池	异常情况下洗涤消防水的收集	废液收集池、废水运输泵
	一层	吊装大厅	用于设备的吊装以及固废的转运	吊车
		加速器束线区	加速器设备安装区	吊车
		准备间	卫生通道及实验室区	监控、监测等设备

4.1.1.3 超重实验终端

超重实验终端设有 2 层，一层主要布设与束流匹配段设备、充气反冲谱仪及配套的实验间，二层主要为制靶实验室配套的非密封放射性实验室及送风机房等。超重实验终端为钢筋混凝土框架结构，由南侧单层建筑和北侧 2 层建筑组成，南侧单层建筑长 18.0m、宽 14.25m，地上一层，建筑高度 12.5m，占地面积 290 m²，建筑面积 290 m²。北侧 2 层建筑长 21.5m，宽 15.5m，建筑高度 16.50m，建筑占地面积 352m²，建筑面积 704m²。超重终端平面布局图见附图 11~附图 12，剖面图见附图 13。超重终端各实验室情况见表 4-3。

表 4-3 超重终端各实验室情况

建筑名称	楼层	房间名称	主要用途及功能	拟配备仪器设备
超重实验终端	一楼	充气反冲谱仪实验间	放置充气反冲谱仪、开展超重核与新核素合成实验	与束流匹配段设备、充气反冲谱仪
		数据获取室	放置计算机、服务器、实验数据的实时获取与处理	计算机、服务器
		配电室	充气反冲谱仪供电	配电柜
		气瓶间	存储备用气瓶与空的气瓶	
		备用件	放置清洁卫生用品与杂物	
		卫生间	个人卫生	
	二楼	准备室	数据处理、办公	计算机、打印机
		靶件检测室	放射性靶的分析	γ 谱仪、方硅探测器、通风橱
		靶件制备室	放射性靶的制备	通风橱、手套箱、表面沾污仪
		送风机房	提供实验室新风	风机
		备用间	存储密封放射性物质（铅罐封存）	
		废物储藏间	暂存放射性废物	
		试剂间（含过渡间）	存储化学试剂	
		天平室（含前室）	实验用化学物质称量	微量天平
		检测去污间	测量工作人员放射性表面沾污与去污	手脚沾污仪
		工作服更衣间	更换实验服、铅衣	
		家庭服更衣间	更换、存放私人衣物	
		卫生间	个人卫生	

4.1.1.4 辐射管理中心

辐射管理中心是用来处理同位素研发过程中产生的放射性废物，专门用于控制、收集、输送、储存和处理放射性废气、废液及固体废物等。辐射管理中心为钢筋混凝土抗震墙结构，长 34.8m，宽 24m，地上两层，地下一层，建筑高度 12.5m，建筑占地面积 894m²，建筑面积 2560m²。辐射管理中心的平面布局图见附图 14~附图 16，剖面图见附图 17。

4.1.1.5 排风塔

排风塔主要用于放射性废气的高架排放。排风塔主体为钢筋混凝土筒体结构，塔顶结构标高 35.0m，塔底最大内径为 3.9m，塔顶出口内径为 1.6m，塔壁根部壁厚 0.3m，顶部壁厚 0.2m。

4.1.1.6 其他配套设施

4.1.1.6.1 功率源厅

功率源厅位于超重低能隧道和 25MeV 加速器低能段隧道的上方，主要用于放置功率源柜和标准电源柜以及电缆、馈管、波导管等设备。轴线长 58.1m、宽 20.5m、建筑高度 20.5m，建筑面积 1300 m²。

4.1.1.6.2 低温厅

低温厅为地上一层建筑物，主要放置液氦低温制冷机，低温阀箱等设备，其长约 30m、宽约 20.5m、高约 12.5m，占地面积 810m²，建筑面积 810m²。

4.1.1.6.3 氦压缩机厅

氦压缩机厅为地上一层建筑物，用于安放氦气压缩机，该建筑内的主要功能区域有压缩机安装区域，控制间，电源间，备品库房，维修区域。长约 23.4m，宽约 19.4m，高 14.5m，占地面积 480m²，建筑面积 480m²。

4.1.1.6.4 冷却水站

冷却水站是地上一层建筑物，为实验区各个实验室提供所需的去离子冷却水。水站包括去离子水的产生及净化、泵、散热器等设备。主要功能房包括设备大厅、冷水机组间、纯水制备间、送风机房、软化水站等。主要布置有配电室、送风机房、维修间、值班室、值班室、软化水站、纯水制备间、冷水机组、设备大厅、男女卫生间等房间，其长度为 49.5m、宽度为 17.5m，高 8.5m，占地面积 900m²，建筑面积 900m²。

4.1.1.6.5 变配电站

配电站布置高压配电柜，其长 23.4m，宽 20.4m，高 6.5m，占地面积 504m²，建筑面积 504m²。

4.1.1.6.6 运行维护楼

用于加速器控制室、设备维护间等，地上三层，地下一层，地下一层层高 5.500m，地上一层层高 6.000m，地上二~三层层高 4.500m，长为 32.0m，宽为 16.0m，高 19.6m，占地面积 541m²，建筑面积 2300m²。

4.1.1.6.7 控制区主出入口

控制区主出入口用于控制进入同位素园区的车辆及人员，布置有办证大厅，来宾等候区，卫生间、办公室等功能性区域。长 9.5m，宽 5.5m，高约 4.5m，占地面积 60m²，建筑面积 60m²。

4.1.2 辐射防护分区

对加速器工作场所及非密封放射性工作场所进行分区管理，做到使工作人员及公众受到的照射安全、合理、可行、并尽可能低。

4.1.2.1 超导直线加速器

超导直线加速器所在建筑主要涉及加速器隧道、低温厅及功率源厅。其划分

情况如下：

控制区：超重加速器低能隧道、25MeV 加速器低能隧道、25MeV 加速器高能隧道、加速器副隧道。

监督区：加速器防护门外及屋顶（低温厅及功率源厅）。

具体分区图见图 4-1 和图 4-2。

4.1.2.2 靶站、热室大厅及靶站准备厅

靶站、分离热室及靶站准备厅为一整体建筑，将该建筑划分为控制区和监督区，其中控制区进一步划分为控制一区、控制二区和控制三区。根据《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ-380-1989），本项目控制一区、二区和三区分别对应规范中的绿区、橙区和红区，各区域剂量率控制水平：控制一区的剂量率 $\leq 7.5\mu\text{Sv/h}$ ，控制二区的剂量率 $\leq 25\mu\text{Sv/h}$ 。

控制三区：主要为热室所在区域、中放废液及固体废物贮存区域，具体包括地下一层的靶件照射室、转运热室、过渡热室、通风过滤器间、固废暂存间中的固废贮存区域、中放废液暂存区，一层的接收热室、靶件进行分离的热室、加速器束线区（即 25MeV 加速器高能隧道），二层工作箱。

控制二区：主要为地下一层靶站后区、中放废液转运泵、低放废液暂存间及靶站辅助设备间、固废暂存间，一层热室后区及吊装大厅，二层吊装大厅、排风机房及后区。

控制一区：通过卫生通过间进入辐射工作场所中除控制一区、控制二区以外的区域。

监督区：一层、二层及地下一层除控制区外其他区域。

地下一层和一层、二层分区图分别见图 4-3、图 4-4 和图 4-5。

4.1.2.3 超重实验终端

超重实验终端设有 2 层，一层为充气反冲谱仪实验间及其配套设施，二层为非密封放射性工作场所、送风机房及相关设备房间。

控制区：充气反冲谱仪实验间及二层非密封放射性工作场所。

监督区：一层其他区域和二层卫生通过间。

其分区图见图 4-6 和图 4-7。

4.1.2.4 辐射管理中心

辐射管理中心为放射性废液转运暂存及处理、放射性固体废物暂存、排风机房所在场所，共有三层。将该建筑划分为控制区和监督区，其中控制区进一步划分为控制一区、控制二区。控制一区的剂量率 $\leq 7.5\mu\text{Sv/h}$ ，控制二区的剂量率 $\leq 25\mu\text{Sv/h}$ 。

控制二区：地下一层清洗废液暂存罐、低放废水暂存罐、蒸发设备间及紧邻的泵房、废物桶暂存区、计量槽间，一层的固化间、废物桶暂存区上空、二层排风机房。

控制一区：地下一层和二层除控制二区外的其他区域、一层通过卫生通过间进入的除控制二区外其他区域。

监督区：一层卫生通过间、控制室、大厅等。

辐射管理中心地下一层、一层及二层分区图如图 4-8 至 4-10 所示。

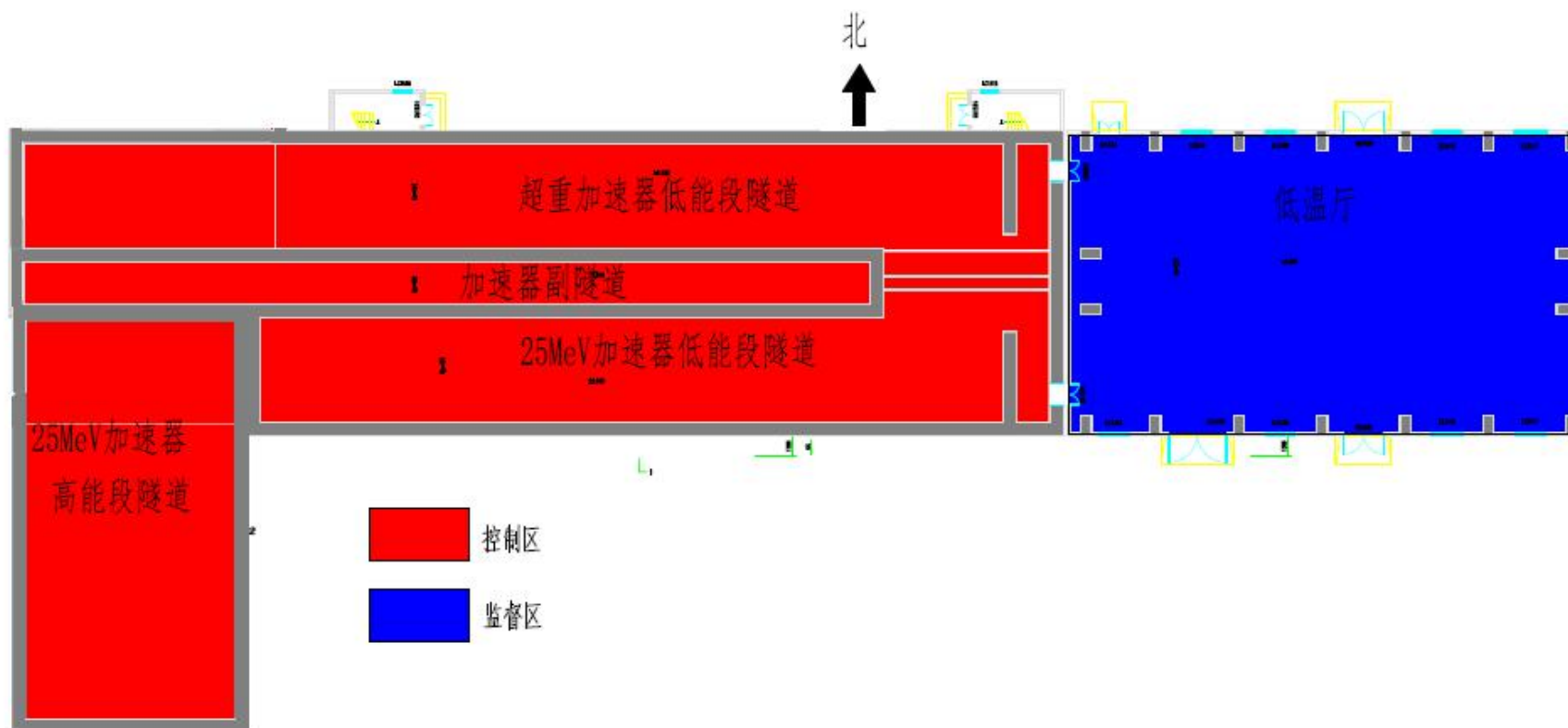


图 4-1 超导直线加速器所在建筑一层分区图

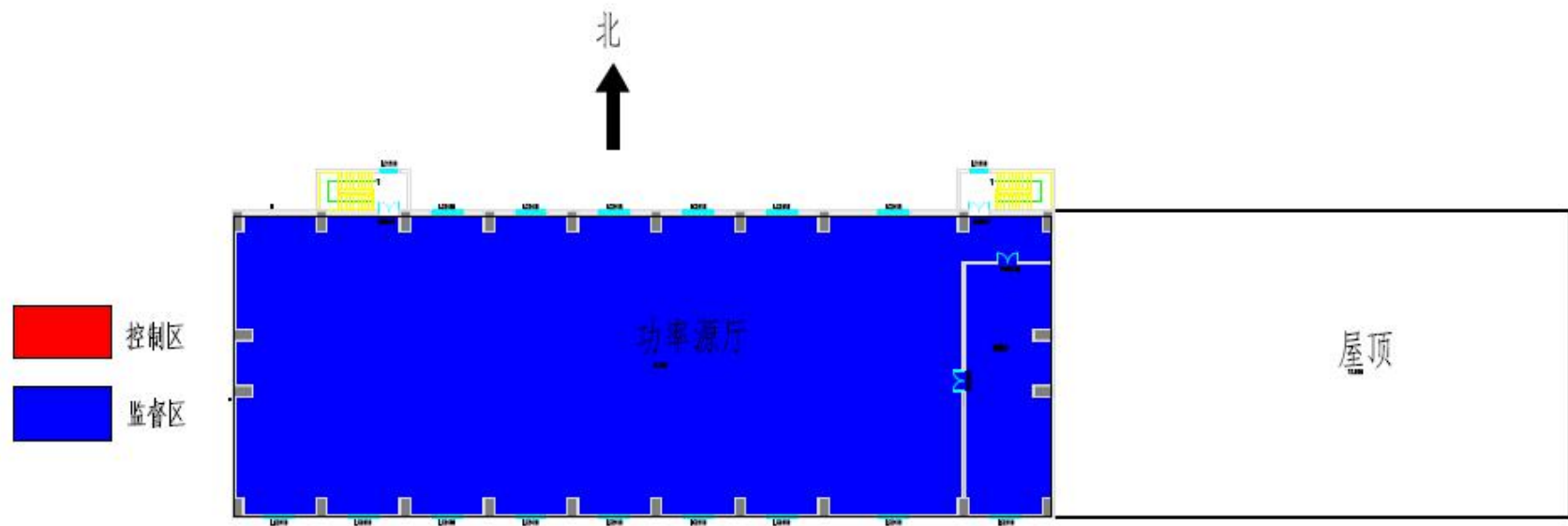


图 4-2 超导直线加速器所在二层分区图

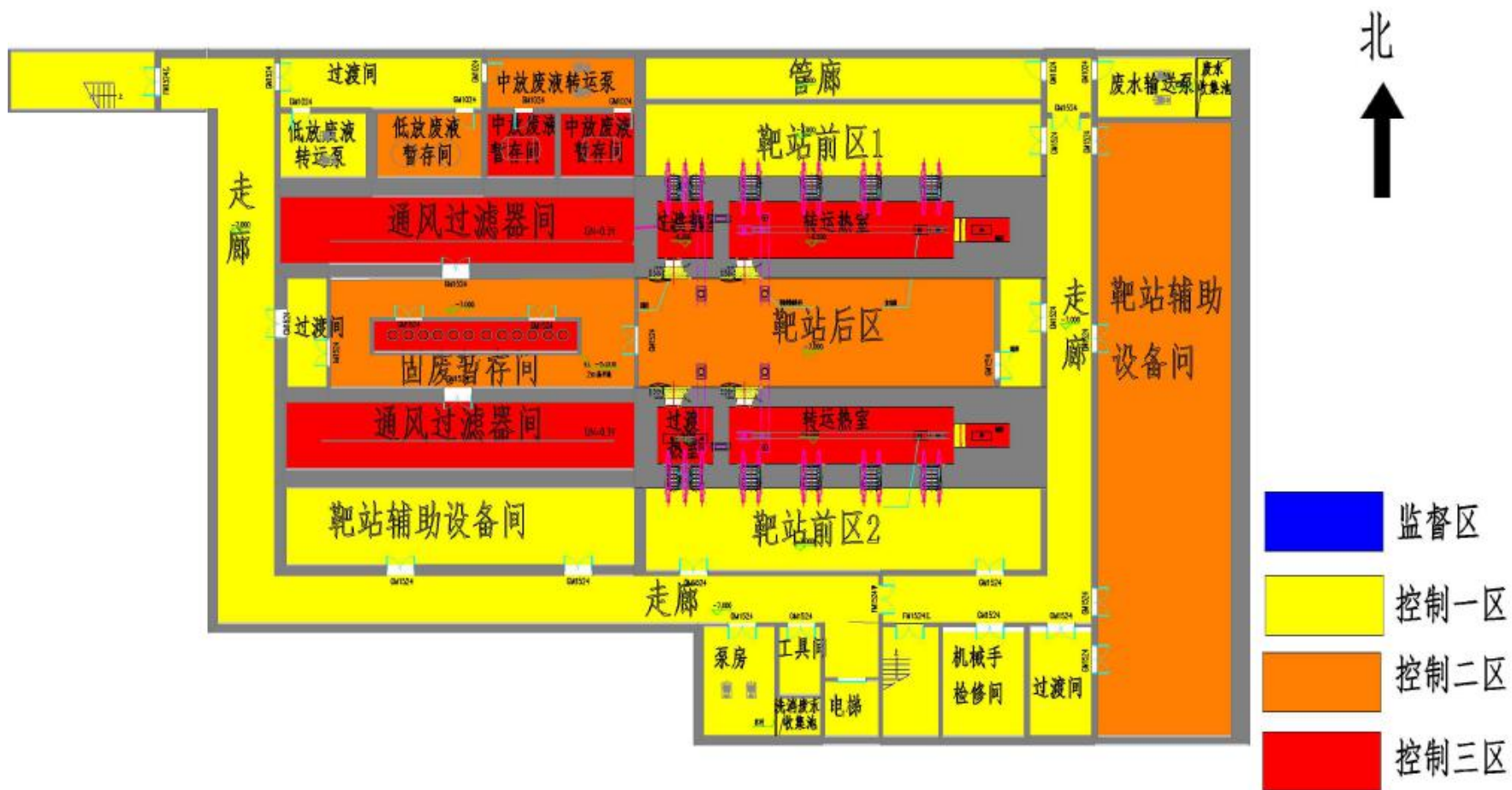


图 4-3 靶站、热室地下一层分区图



图 4-6 超重实验终端一层分区图

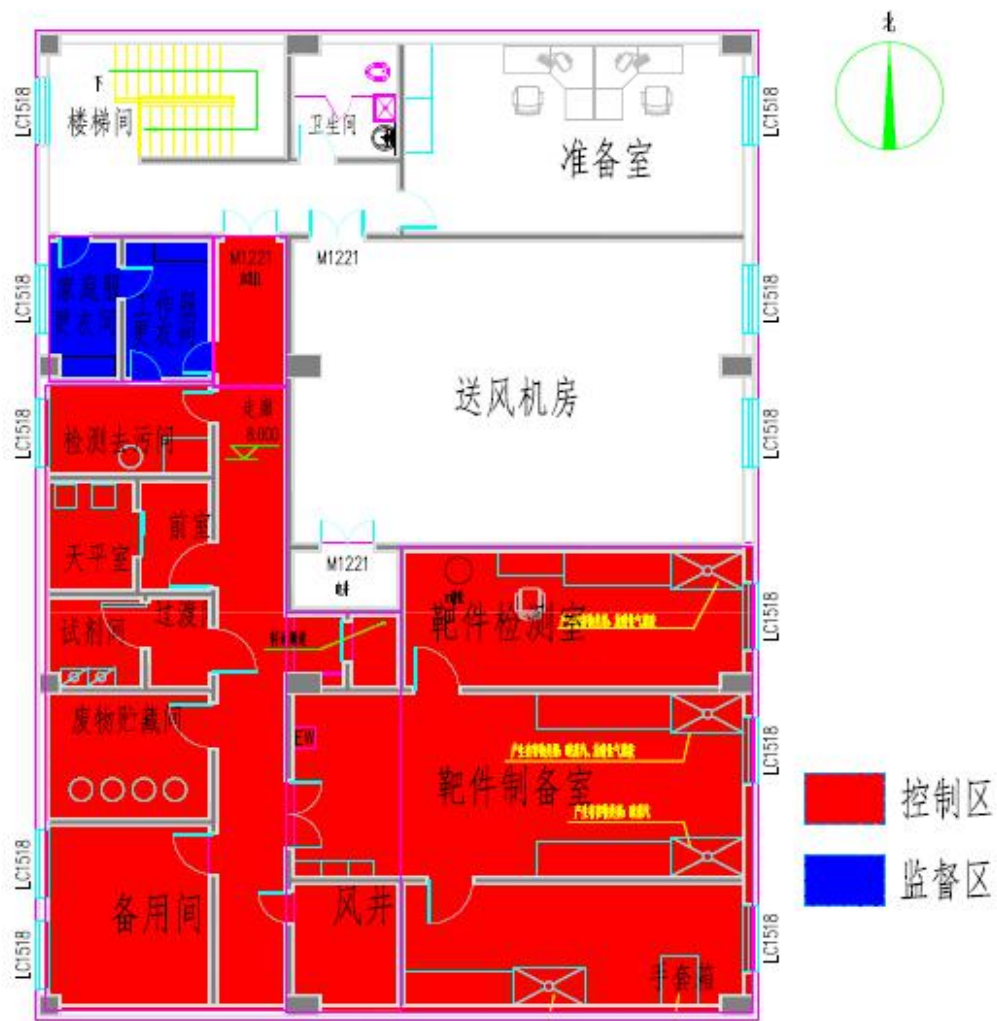


图 4-7 超重实验终端二层非密封放射性工作场所分区图

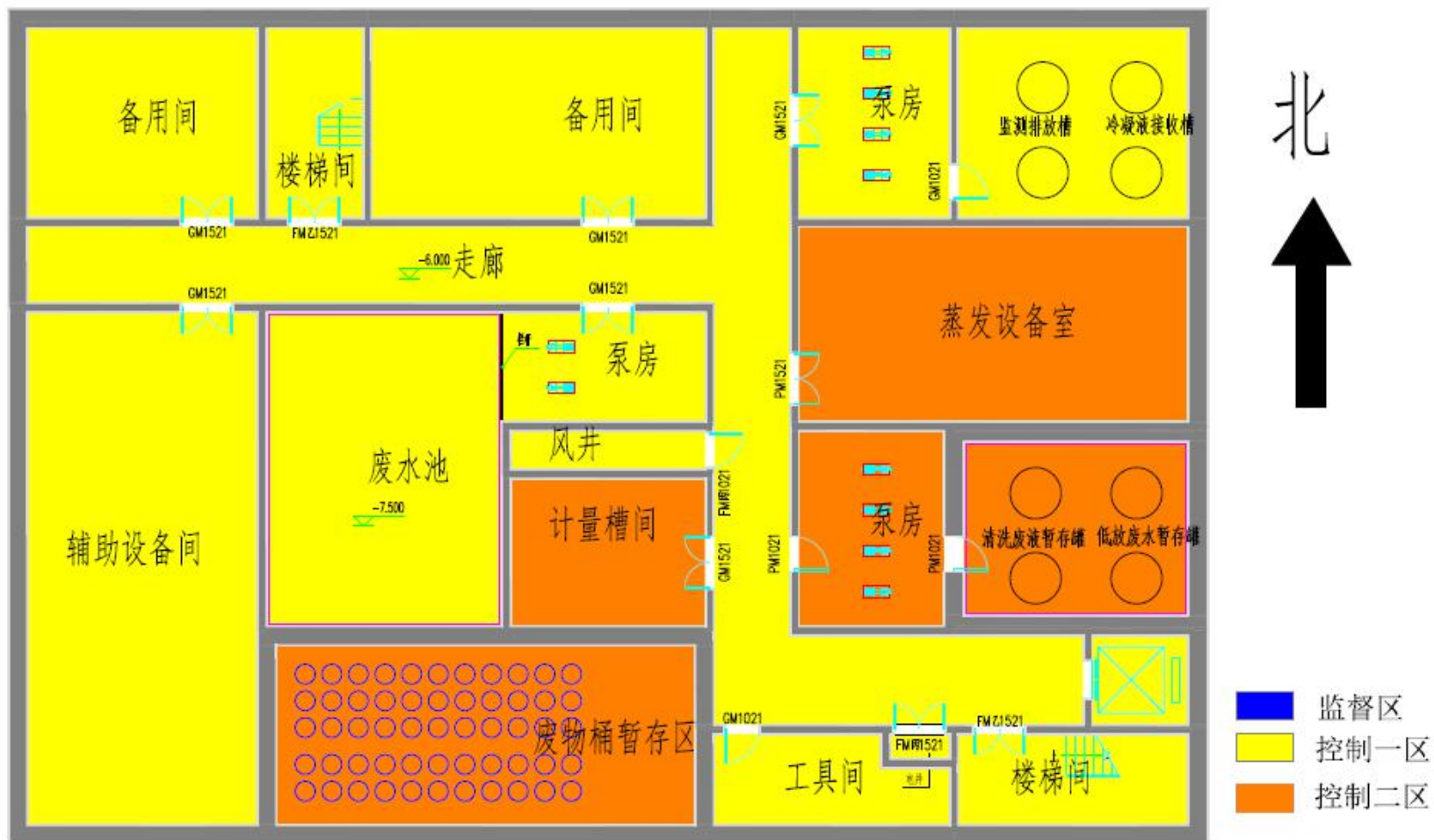


图 4-8 辐射管理中心地下一层分区图

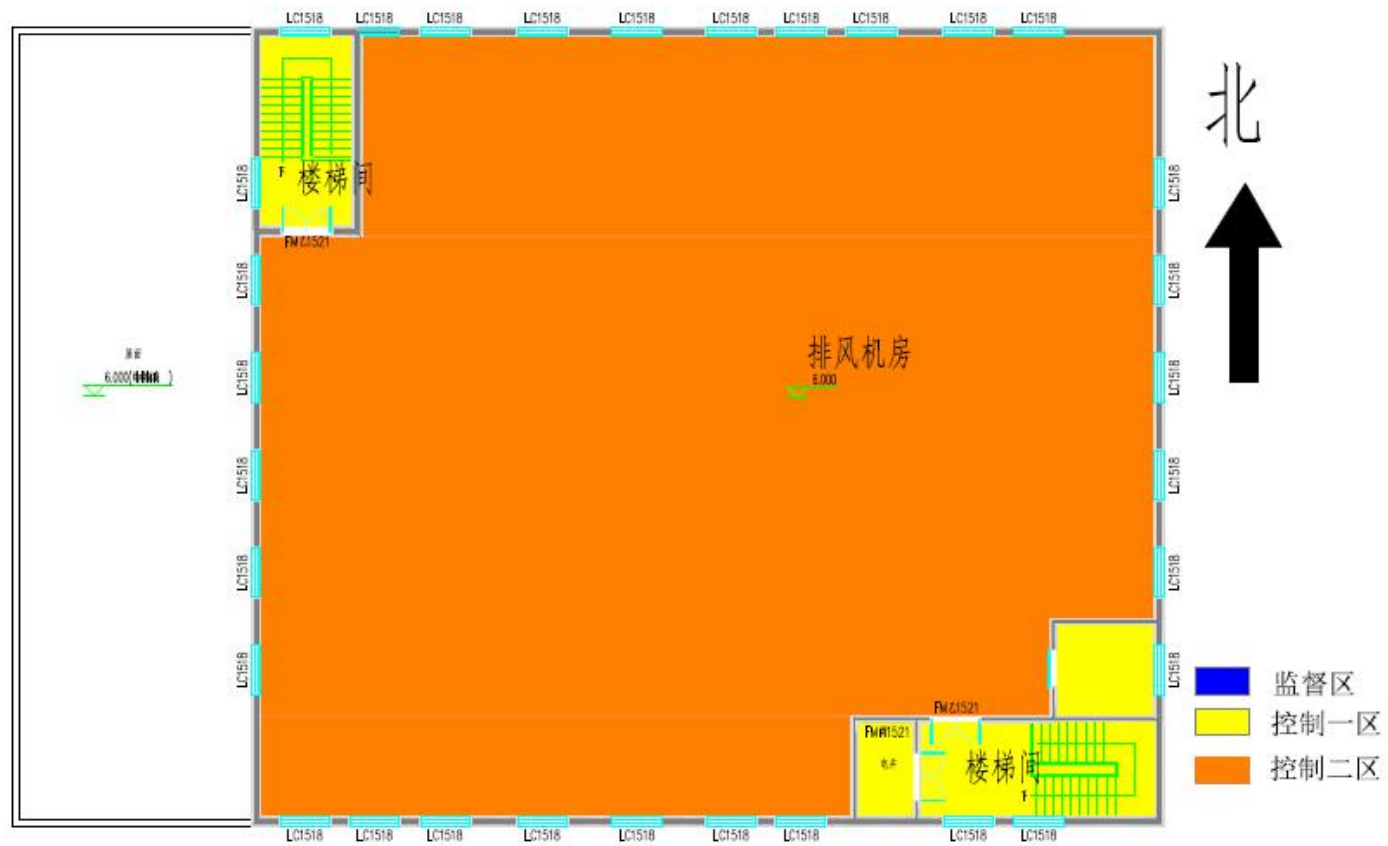


图 4-10 辐射管理中心二层分区图

4.1.3 屏蔽设计

本项目涉及的辐射屏蔽设计区域主要包括加速器区域、靶站、超重终端、热室。

4.1.3.1 加速器区域

加速区域超重加速器隧道、同位素加速器隧道、同位素加速器高能隧道。其屏蔽设计平面及剖面图分别见图 4-11 和图 4-12。

(1) 超重加速器低能隧道

超重加速器隧道净长 71m，宽 7m，高 7m，其隧道南北两侧、西侧和顶部为 1m 混凝土，底部为 30cm 混凝土，东侧迷道内墙为 1m 混凝土，迷道外墙为 1m 混凝土，防护门为联锁功能的普通门。

另外，束流调试阶段将束流打在该隧道终端废束桶上，该处设有局部屏蔽措施，采用 10cm 的铁和 80cm 的聚乙烯对其四周及屋顶进行局部屏蔽。

(2) 25MeV 加速器低能隧道

25MeV 加速器低能隧道净长 56m，宽 7m，高 7m，其隧道北侧、南侧和顶部为 1m 混凝土，底部为 30cm 混凝土，迷道内墙为 1m 混凝土，迷道外墙为 1m 混凝土，顶部防护门为联锁功能的普通门。

(3) 25MeV 加速器高能隧道

同位素加速器高能隧道净长 29m，宽 15m，高 7m，其隧道四周、顶部为 1m 混凝土，底部为 30cm 混凝土。

另外，该加速器束流调试阶段将束流打在该隧道废束桶上，该处设有局部屏蔽措施：废束桶四周内层 20cmPb，外层 40cm 聚乙烯，最外层 20cm Fe，另外，废束桶前端设置长度大于 300cm，厚度 60cm 的聚乙烯。局部屏蔽示意图见图 4-13。

4.1.3.2 靶站

靶站区的屏蔽设计主要是靶件照射室、转运热室及过渡热室，位于地下一层。屏蔽设计图见图 4-14。

(1) 靶件照射室

靶件照射室南北侧屏蔽为 2.8m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料），东侧为 2.8m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料），顶部为 3.375m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料）、底部为 30cm 混凝土。

(2) 转运热室

转运热室南北侧为 1.9m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料），西侧为 1.5m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料），顶部为 1m 混凝土，底部为 30cm 混凝土。

(3) 过渡热室

过渡热室南北侧为 1.9m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料），西侧为 1.5m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料），东侧为 1m 混凝土（或等同于该屏蔽效果的其他材料），底部为 30cm 混凝土。

4.1.3.3 超重实验终端

(1) 充气反冲谱仪实验间

充气反冲谱仪实验间为超重装置加速器实验束流终端，该实验室南宽北窄，实验室南边净长 18m，宽 13.5m，高 7m，东西两侧、南侧和顶部为 1m 混凝土，底部为 30cm 混凝土，在西侧墙设有大型设备进出口，采用活动墙设计；实验室北边其长 22m，宽 10.5m，高 7m，东西两侧、北侧及顶部为 1.0m 混凝土，迷道内墙和外墙均为 1m 混凝土，底部为 30cm 混凝土。其屏蔽设计平面图及剖面图分别见图 4-15 和图 4-16。

(2) 二层非密封放射性工作场所

超重终端二层设有一个非密封放射性工作场所，场所内设有一个手套箱和 2 个通风橱。手套箱的密封等级为 2 级，手套箱尺寸为长 1100mm，宽 850mm，内部净高 800mm，其屏蔽材料为 10cm 不锈钢。

4.1.3.4 热室大厅

由于本项目主要以研发性质为主，热室大厅一层分离热室箱体内壳长、宽、

高约为 2.5m×2m×3m，接收热室屏蔽为 320mm 铅当量，其他热室为 270mm 铅当量。各热室的屏蔽设计情况见表 4-5。

二层 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器研发区箱体前区采用的是 16cm 碳钢(密度为 7.8g/cm³)，后区采用 13cm 碳钢进行屏蔽，箱体内部长、宽约为 1.5m×0.8m。

二次核素质检、实验等实验室设有通风橱。

4.1.3.5 辐射管理中心

辐射管理中心为三层建筑，地下一层外墙采用 600mm 混凝土进行防护，一层和二层外墙采用 250mm 厚加气混凝土砌块，外贴 50 厚挤塑聚苯板，地下一层内墙采用 300mm 厚混凝土，二层、三层内墙采用 200mm 厚加气混凝土砌块。

表 4-4 各场所屏蔽设计

场所	具体设施	混凝土厚度, mm						防护门
		东墙	南墙	西墙	北墙	顶板	底板	
加速器	超重加速器低能隧道	迷道内墙: 1000 迷道外墙: 1000	1000	1000	1000	1000	300	普通防护门
	25MeV 加速器低能隧道	迷道内墙: 1000 迷道外墙: 1000	1000	1000	1000	1000	300	普通防护门
	25MeV 加速器高能隧道	1000	1000	1000	1000	1000	300	无
靶站*	靶件照射室	2800	2800	——	2800	3375	300	无
	转运热室	为靶件照射厅	1900	1500	1900	1000	300	无
	过渡热室	1500	1900	1000	1900	1000	300	无
超重实验 终端	充气反冲谱仪实验间	1000	1000	1000 迷道内墙: 1000 迷道外墙: 1000	1000	1000	300	普通防护门

注: *靶站的靶件照射室、转运及过渡热室由于工艺的要求, 可能采取其他屏蔽材料进行屏蔽, 采取其他屏蔽材料的屏蔽效果应等同于表格中普通混凝土厚度的屏蔽效果。

表 4-5 各热室屏蔽设计

热室名称		功能	窥视窗数量	机械手数量, 只	箱体外壳长, mm	箱壳外壳宽, mm	箱体外壳高,mm	四周, mmPb*	顶板、底板,mmPb*
靶接收室 1		靶的接收、转运、简单切割	1	2	3000	2500	3500	320	320
靶接收室 2		靶的接收、转运、简单切割	1	2	3000	2500	3500	320	320
At-211 研发线	高温分离室	靶的高温加热挥发,	1	2	3000	2500	3500	270	270
	分装室	核素的冷凝收集	1	2	3000	2500	3500	270	270
Cu-67 研发线	溶解室	靶的溶解	1	2	3000	2500	3500	270	270
	分离纯化室	核素与靶、杂质核素的分离, 核素的纯化	1	2	3000	2500	3500	270	270
	分装室	核素溶液的灌装、分装	1	2	3000	2500	3500	270	270
Ge-68 研发线	溶解室	靶的溶解	1	2	3000	2500	3500	270	270
	分离纯化室	核素与靶、杂质核素的分离, 核素的纯化	1	2	3000	2500	3500	270	270
	分装室	核素溶液的灌装、分装	1	2	3000	2500	3500	270	270
	发生器室	发生器的制备研究	1	2	3000	2500	3500	270	270
备用室		靶材料、发生器的回收等	1	2	3000	2500	3500	270	270

注: *分离热室, 可能采取其他屏蔽材料进行屏蔽, 采取其他屏蔽材料的屏蔽效果应等同于表格中铅当量。

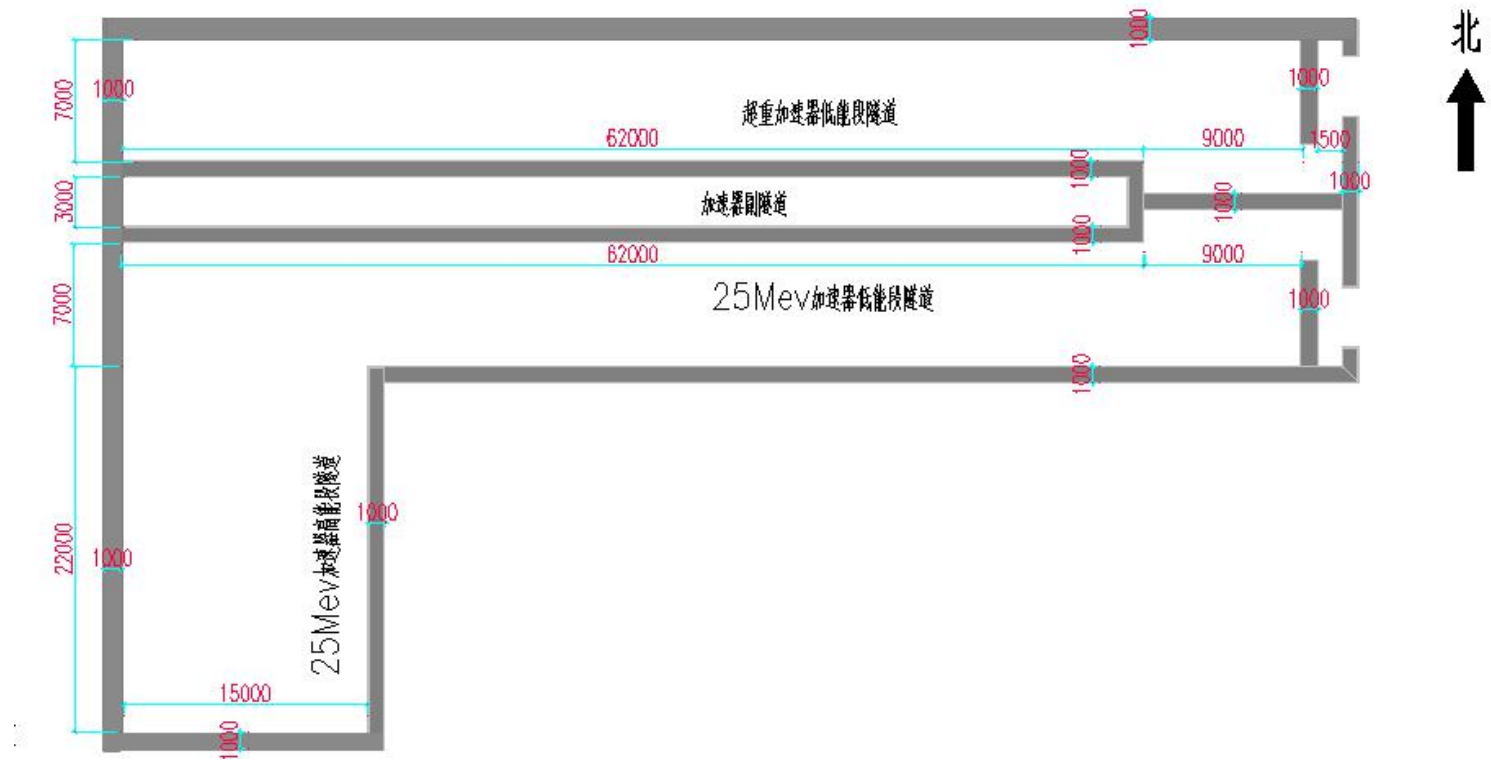


图 4-11 加速器隧道屏蔽设计平面图

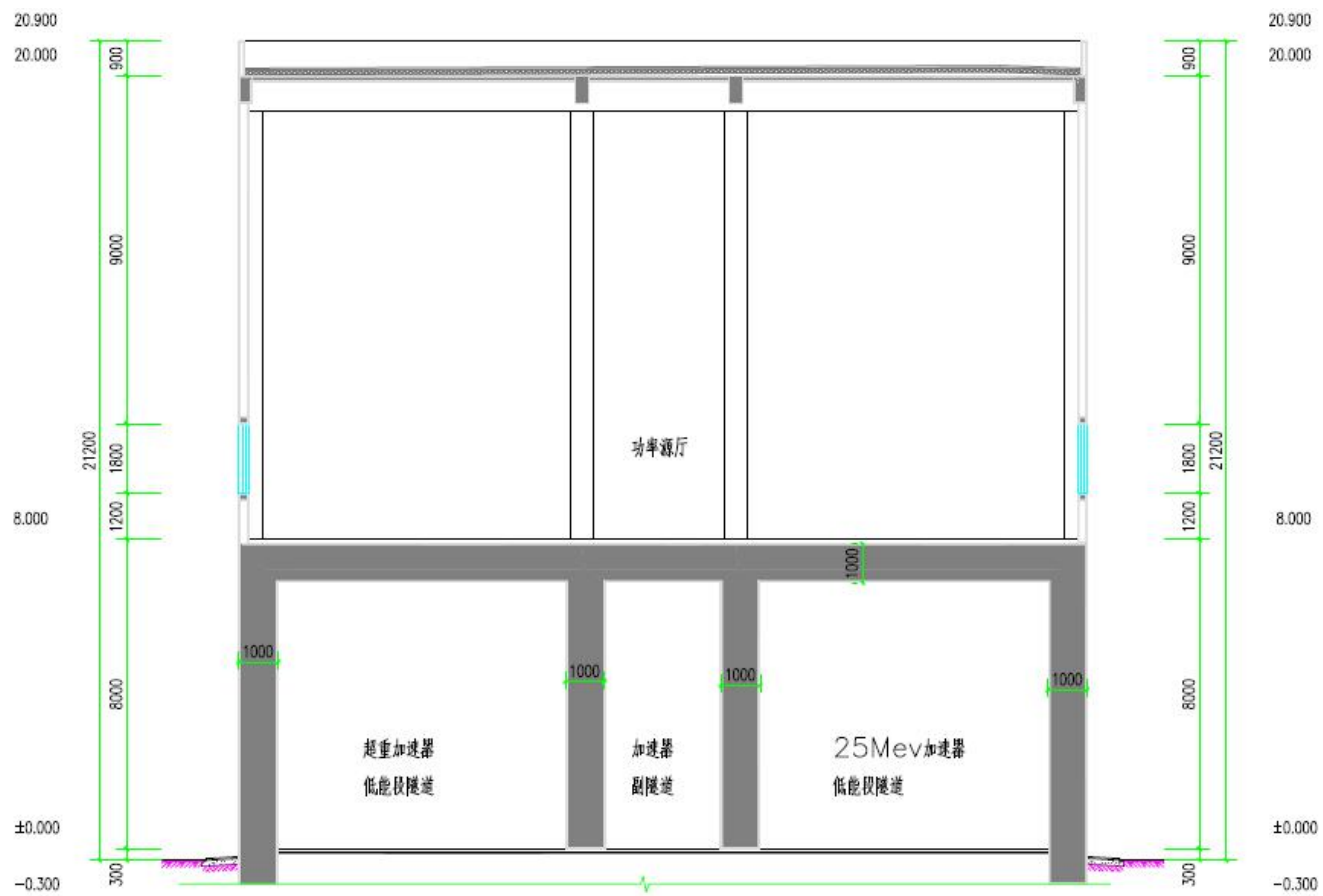


图 4-12 加速器隧道屏蔽设计剖面图

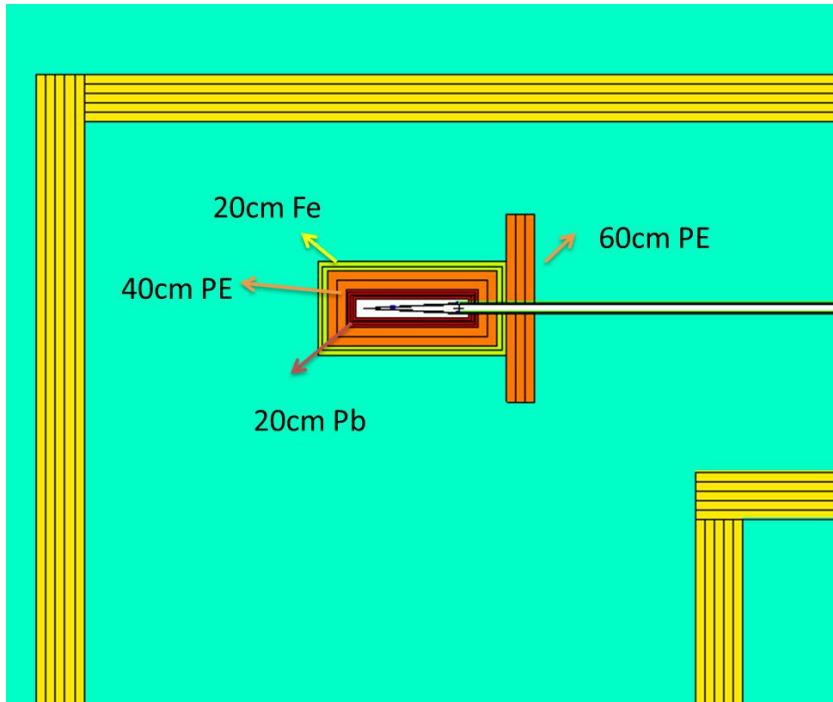


图 4-13 局部屏蔽示意图

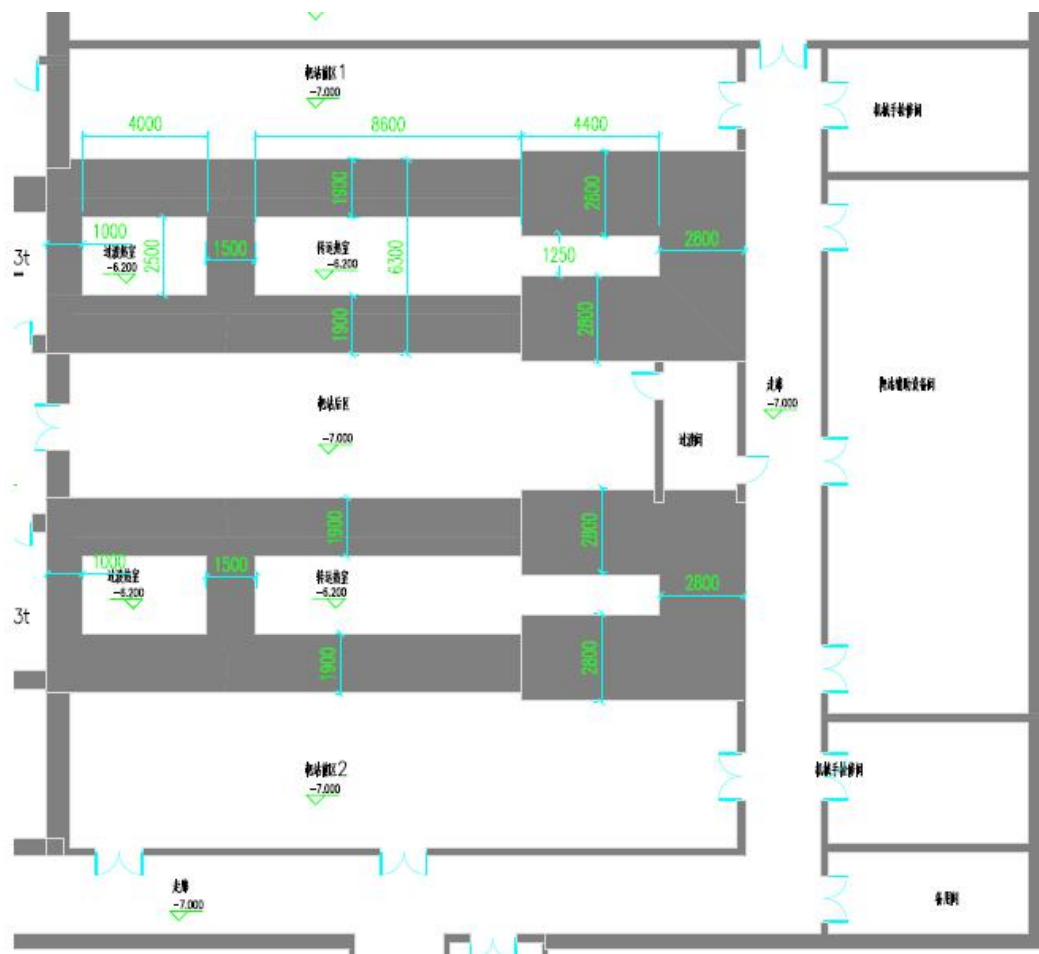


图 4-14 靶站地下一层屏蔽设计平面图

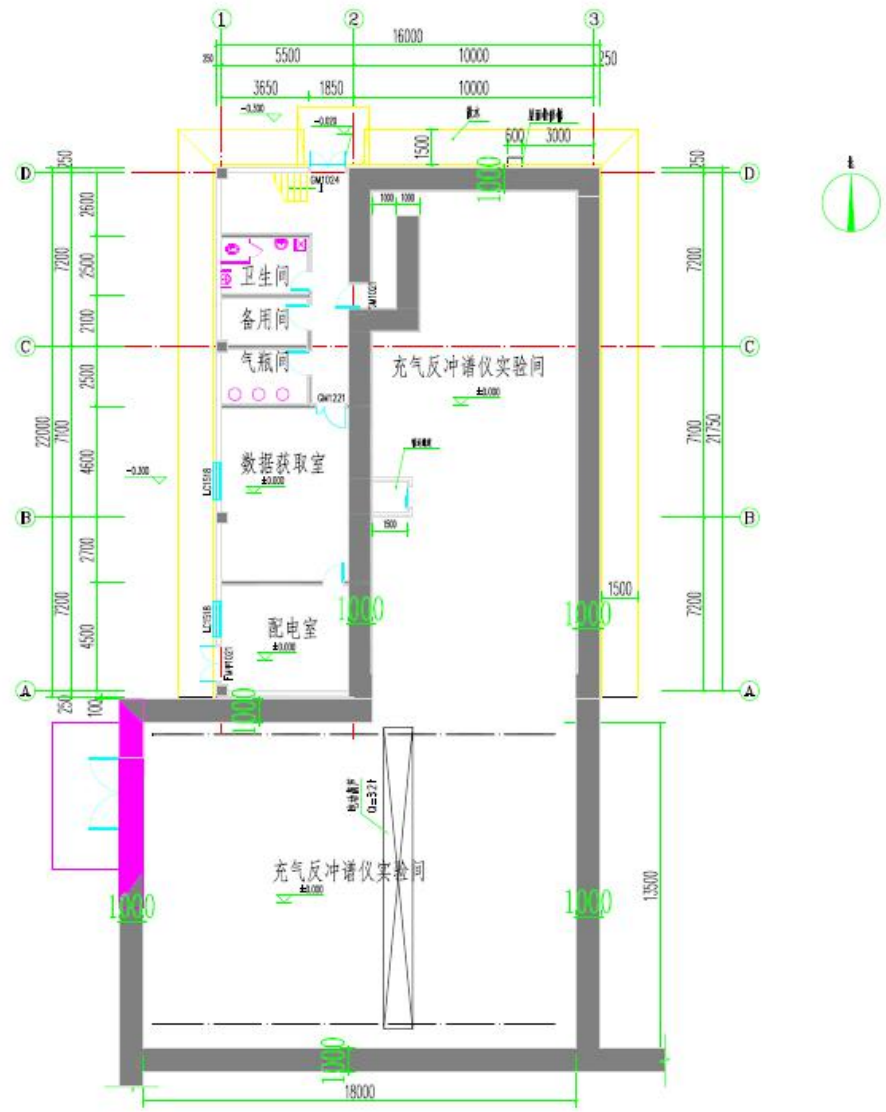


图 4-15 超重终端屏蔽设计平面图

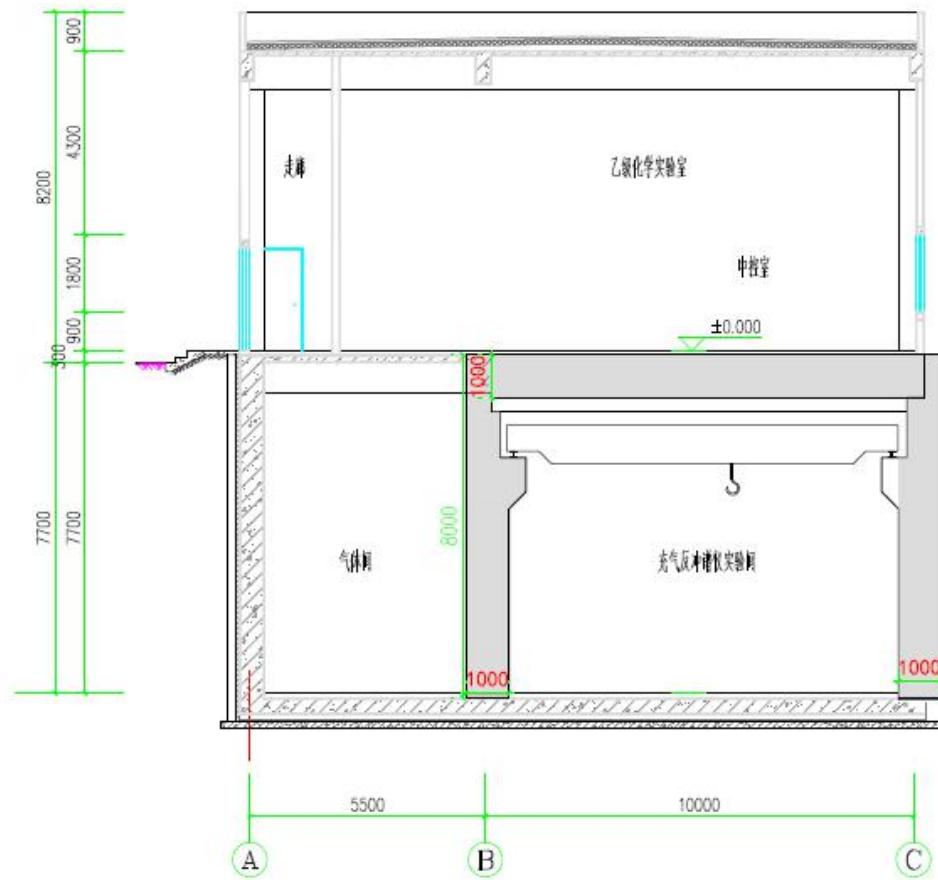


图 4-16 超重终端屏蔽设计剖面图

4.2 人流物流设计

本项目人流物流设计基本分开，在无法利用空间将人流、物流完全分开时，也采取相应的管理措施，从时间上将人流、物流分开。

4.2.1 靶站、热室大厅、准备间人流物流

(1) 人流

工作人员从一层门厅进入厂房，通过一层卫生出入口进入一层走廊，到达一层热室前区、取样间、原料准备间等，也可经过渡间进入一层热室后区、热室小车检修间、吊装大厅；工作人员进入一层走廊后经电梯或楼梯下到地下一层，通过走廊，到达靶站操作前区、机械手检修间、热室辅助设备间等；也可经过渡间进入靶站后区、中放废液转运泵间等；工作人员进入一层走廊后经电梯或楼梯上到二层，通过走廊，到达二层放射化学实验室、普通化学实验室、生物实验室等。离开时，人员离开操作区，通过楼梯或电梯抵达一层卫生通过间，进行表面污染监测、淋浴后更换服装离开。

(2) 物流

靶材料从汽车门斗通过吊装孔经吊装大厅进入靶站过渡热室，利用水平转运孔转运至转运热室，再经货叉将靶盘送至靶件照射室辐照。辐照后靶件原路径返回至过渡热室，通过斜孔道拉至一层接收热室 1，对靶件进行简单切割；或通过侧壁运输小车运送至接收热室 2，对靶件进行简单切割。将切割后的靶件通过底部连通的运输小车传送至其它相关热室。对于不需切割的靶件，则由接收热室通过底部运输小车直接运至相关热室，一层分离热室形成的产品，经过渡间，存放至仓储区。待检样品通过货运电梯送至二楼质检区。

靶站产生的剩余靶盘等固废从靶件上拆除后，靶件装入废物桶，通过轨道车输送至靶站后区，从靶站后区运输至固废暂存区。各热室产生的废物装入废物桶通过底部的运输小车运至右侧的接收热室，通过接收热室底部的运输小车运至热室后区，通过吊装运至地下一层的固废暂存区。固废暂存区暂存的废物运至靶站

后区，通过吊装孔吊装至一层汽车斗篷的运输小车上，通过场内小车运至辐射管理中心的物流大厅，通过吊装进入固废桶暂存区。人流物流设计图见图 4-17、图 4-18 和图 4-19。

4.2.2 超重终端人流物流

人流：工作人员从一层门厅进入厂房，通过一层走廊进入各房间，如气瓶间、数据获取间等，也可经迷道进入充气反冲谱仪实验间；人员通过楼梯间上二层，在二层卫生出入口进入非密封放射性实验室。

充气反冲谱仪实验间在供束期间禁止人员进入。只有在该区域停止供束，且经辐射安全管理人员确认后，经授权的人员才能进入该区域。

物流：制靶在非密封放射性工作场所靶件制备室的手套箱和通风橱内完成，制靶完成后，靶件经转运通道送到一层充气反冲谱仪实验间进行辐照实验，辐照完的靶再经转运通道送回到二层靶件检测室进行检测分析。待回收靶可经溶解、分离、纯化转为储备液进行下一轮制靶。成品靶（采用铅罐包装）、固体废物以及液体废物可放到废物贮藏间进行暂存。该区域暂存的固体废物和液态废物通过物流通道定期转运至辐射管理中心。

一层、二层人流物流图见图 4-20、图 4-21。

4.2.3 辐射管理中心

人流：工作人员从一层门厅经男女卫生通过间进入一层走廊，通过走廊进入各房间，人员通过南侧楼梯间下至地下一层，通过地下一层走廊进入地下一层各房间，在二层卫生出入口进入非密封放射实验室。人员离开时，通过楼梯抵达一层卫生通过间，进行表面污染监测、淋浴后更换服装离开。

物流：产生的放射废液通过管道进入辐射管理中心，产生的放射性固体废物通过西侧物流大厅进入废物桶暂存区，固化产生的放射性固体废物由固化间转入废物桶暂存区。

辐射管理中心人流物流图见图 4-22、图 4-23 和图 4-24。

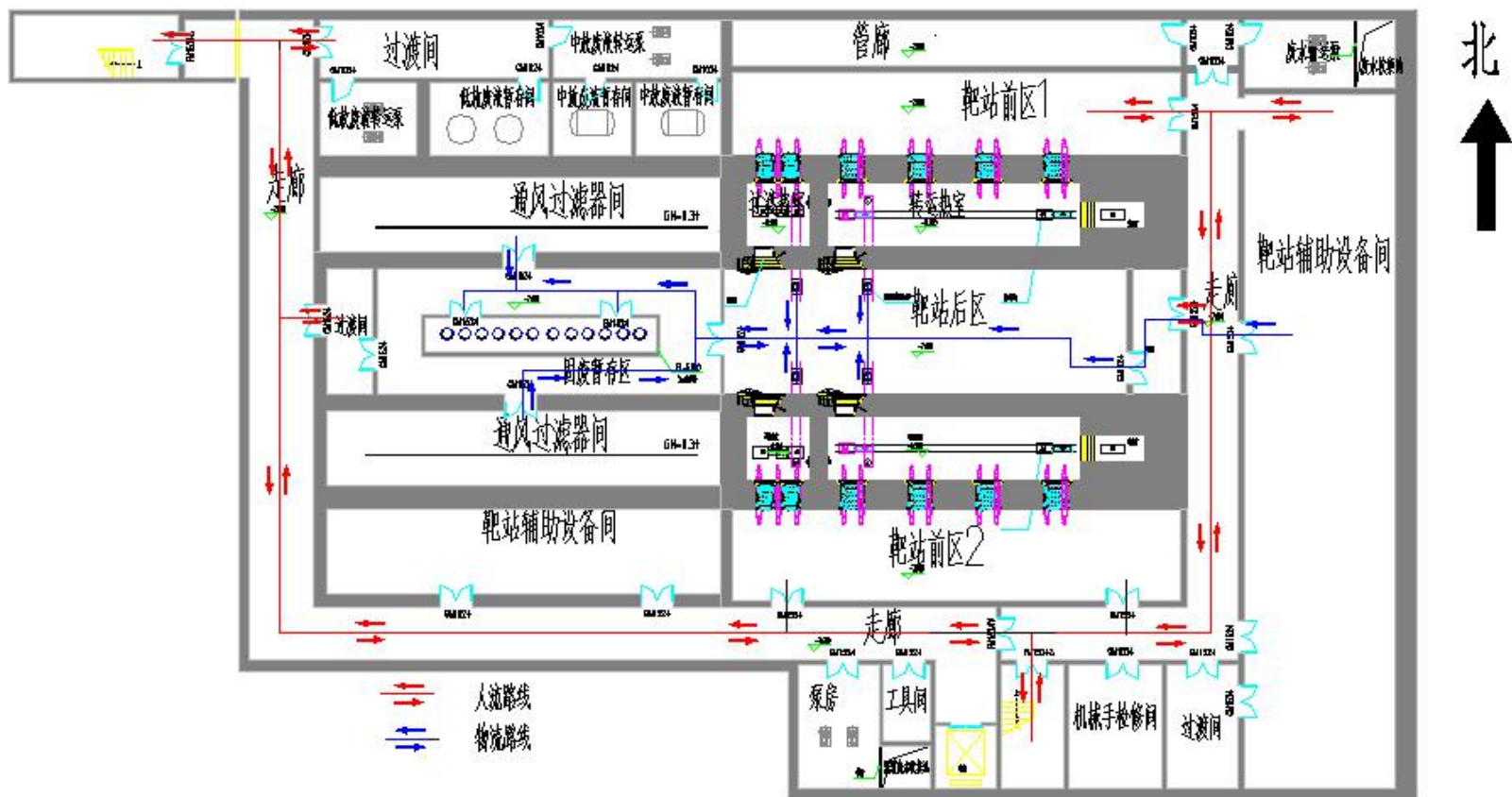


图 4-17 靶站、热室大厅地下一层人流物流图

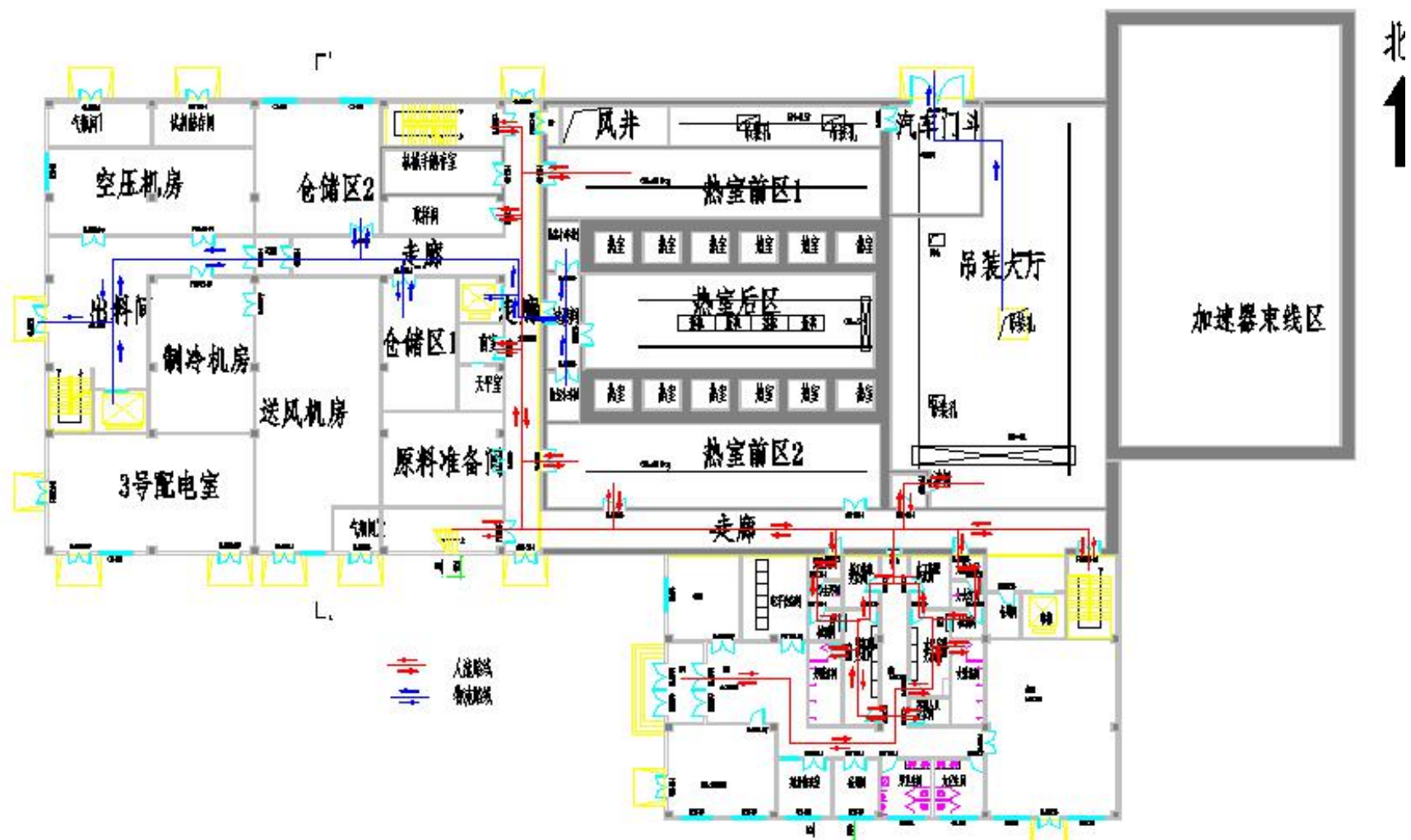


图 4-18 靶站、热室大厅一层人流物流图

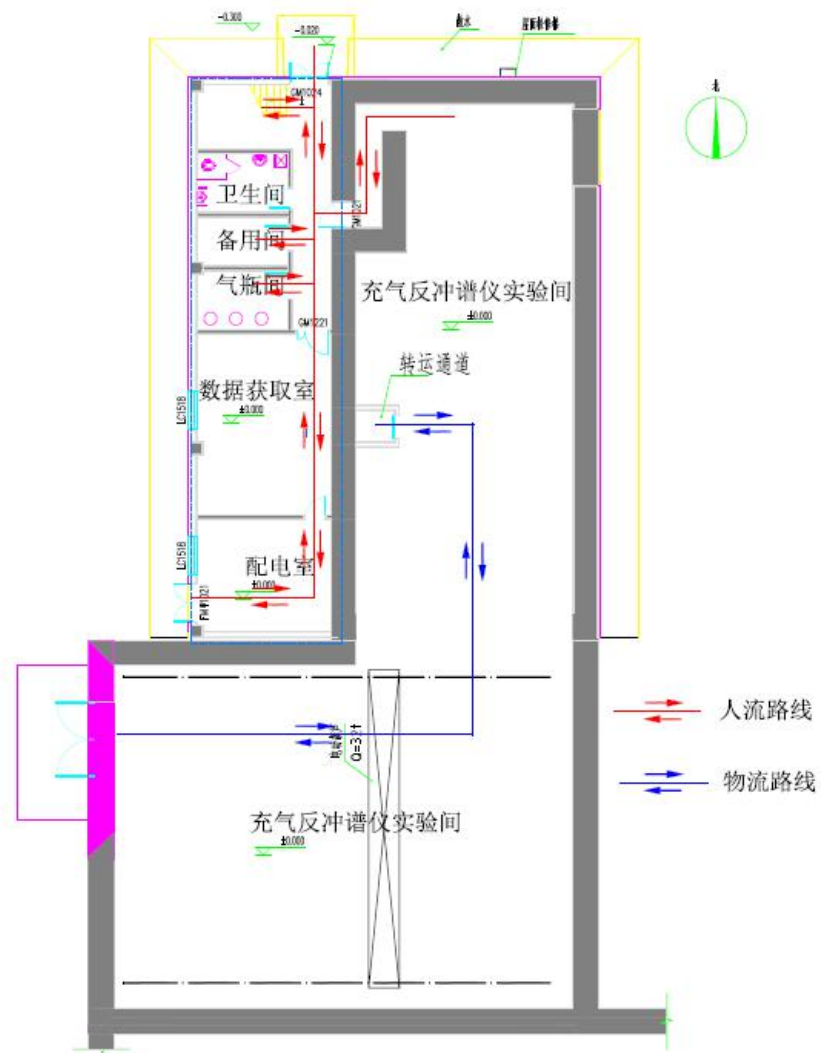


图 4-20 超重终端一层人流物流图

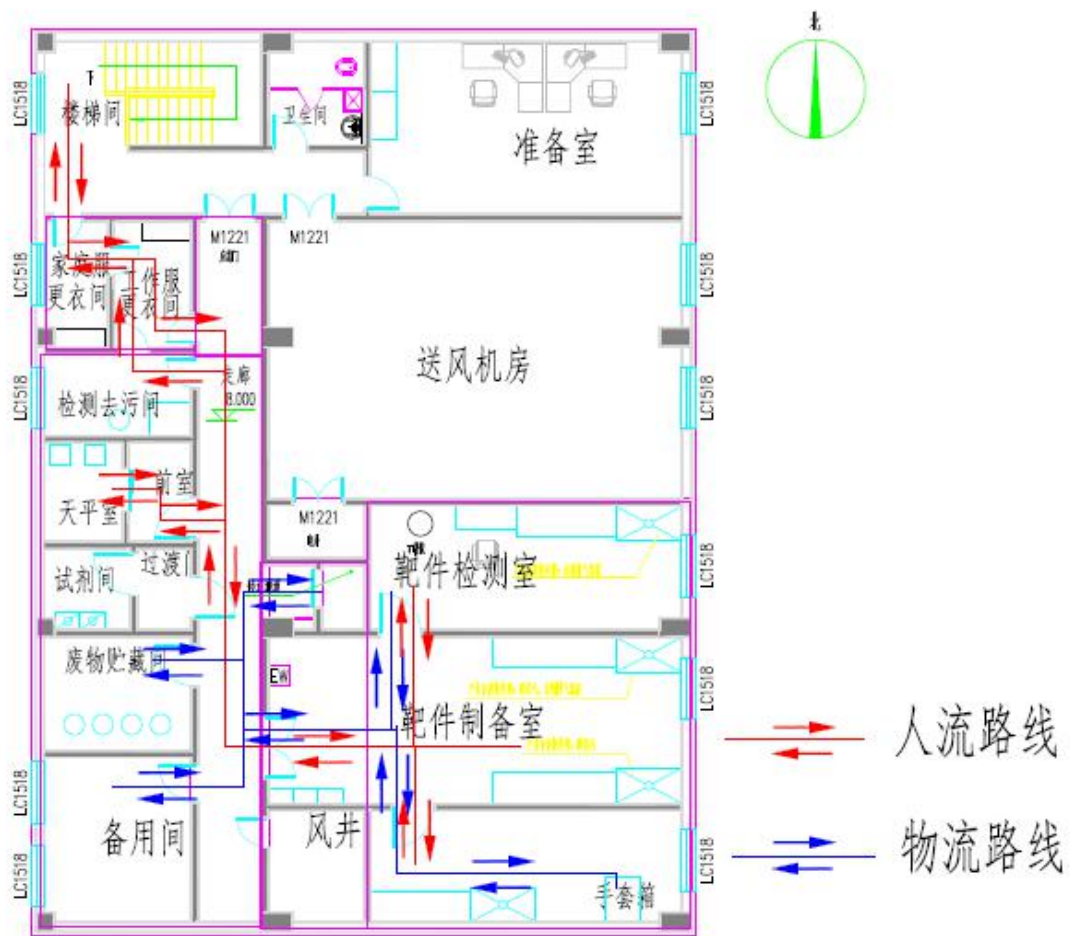


图 4-21 超重终端二层人流物流图

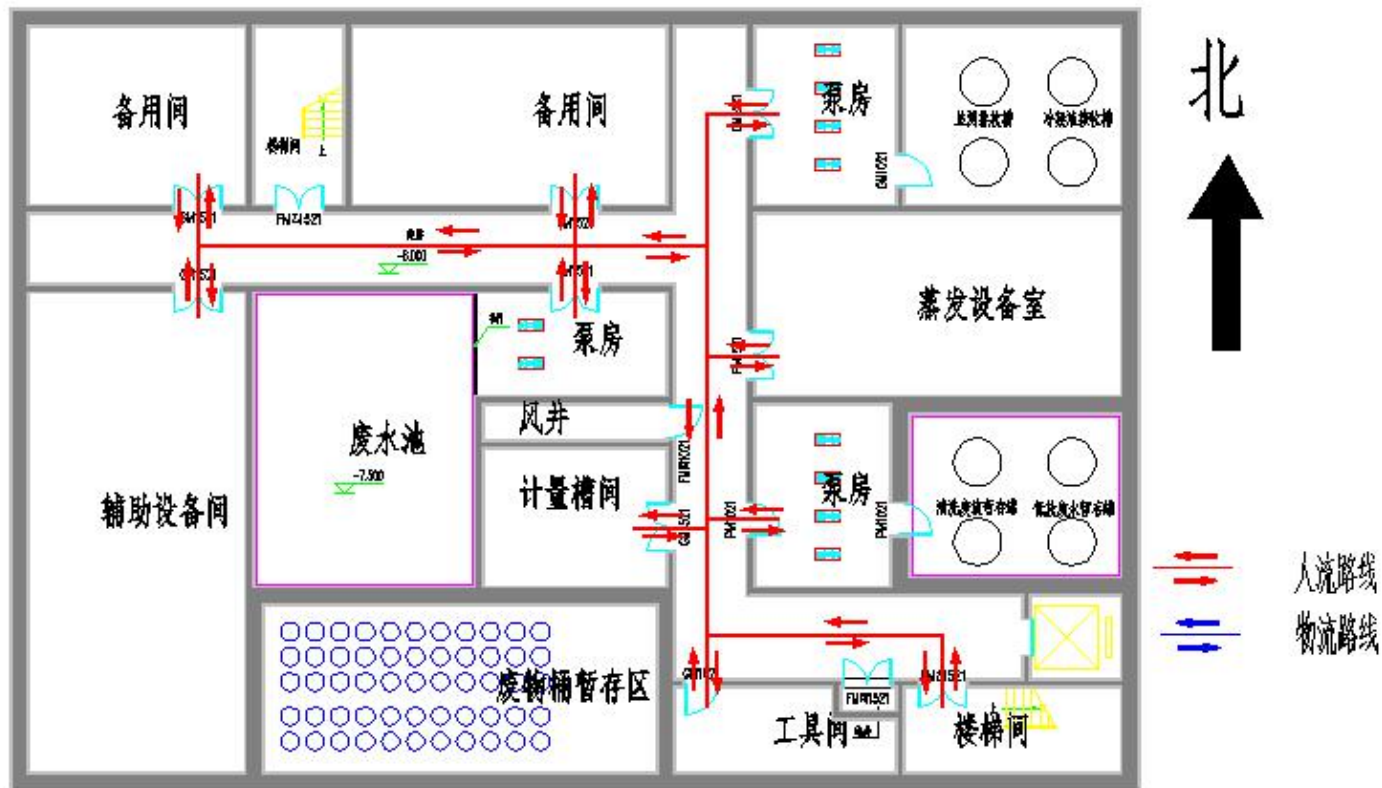


图 4-22 辐射管理中心地下一层人流物流示意图

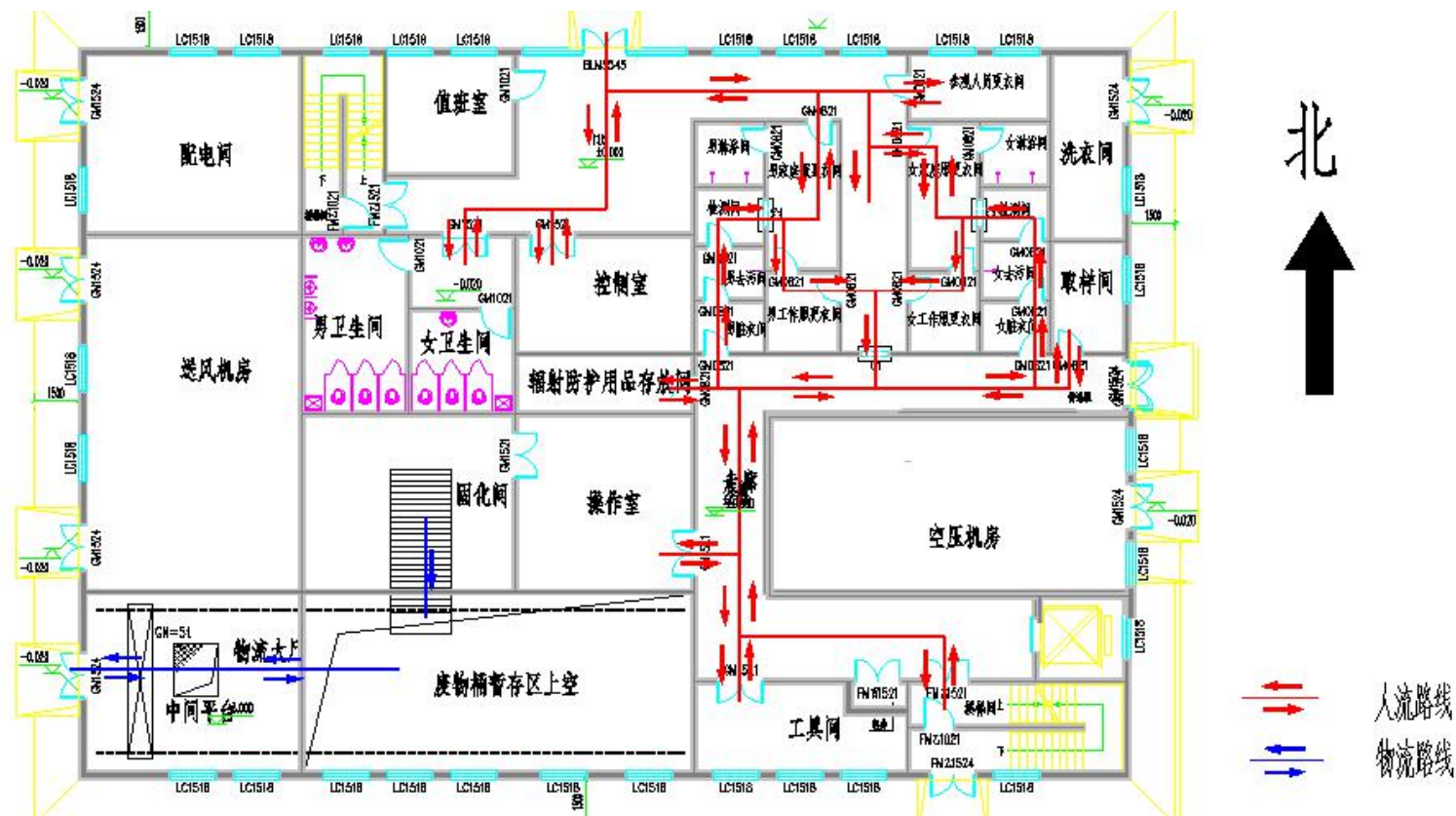


图 4-23 辐射管理中心一层人流物流示意图

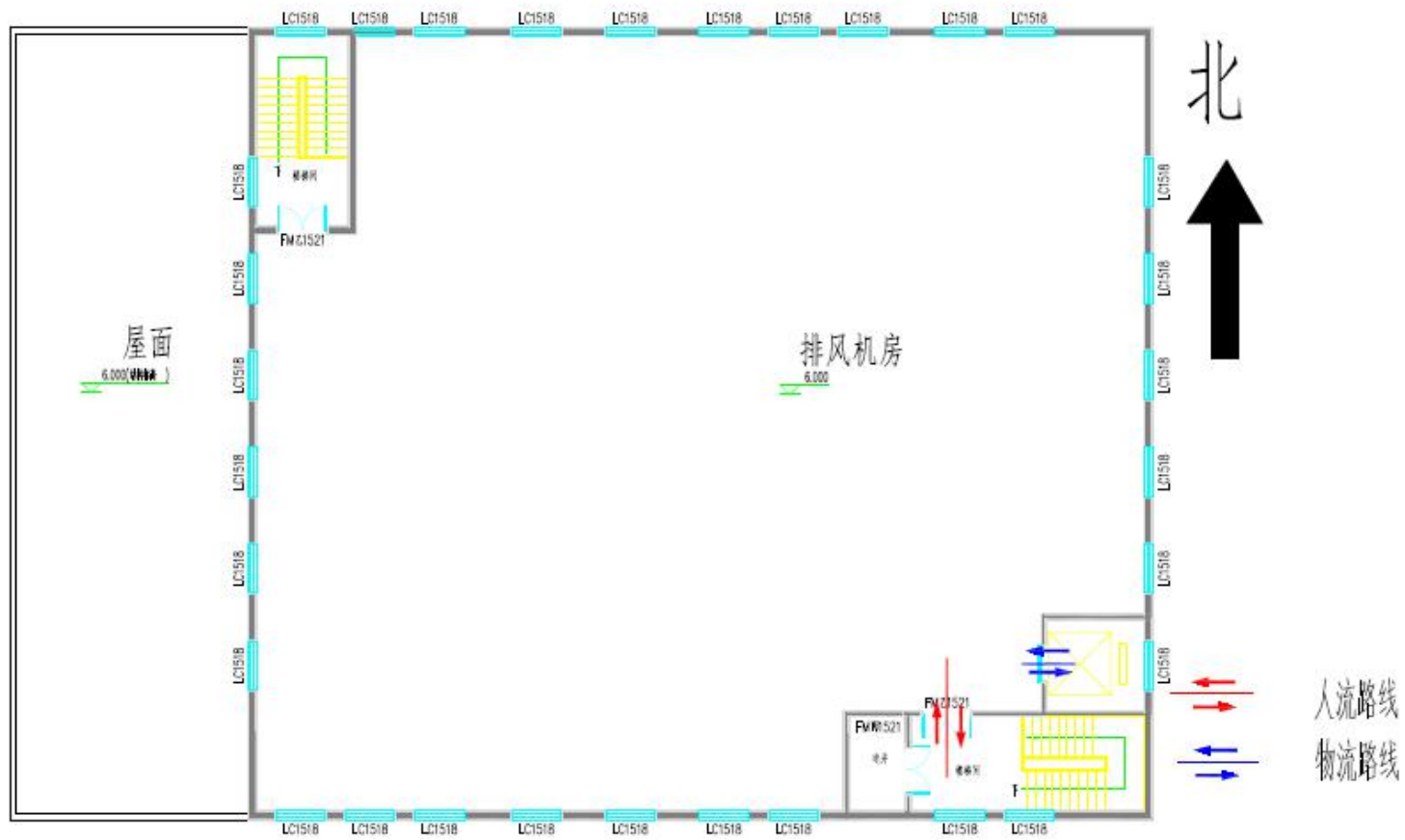


图 4-24 辐射管理中心二层人流物流示意图

4.3 安全联锁系统

4.3.1 设计原则

辐射安全联锁系统的目的是在系统运行期间，确保工作人员的人身安全。只有当各项安全系统都已启动并正常工作后，加速器才能开机供束，所有通往加速器隧道及其终端控制区的门都具有门机联锁功能，控制区内设立多个紧急停机按钮。安全联锁系统设计严格按“最优切断”、“失效保护”及“冗余设计”等设计原则，以达到逻辑严密、操作方便的目的。

4.3.2 组成及结构

系统将采用可编程控制技术、门禁控制技术、自动门禁技术、集散式控制技术、计算机网络与通讯技术、探测与数据处理技术、设备自诊断与自恢复技术等。在加速器、实验终端等控制区域，对各联锁部件进行实时监测，并将信号输入到安全联锁系统，只有在各系统均正常的条件下，束流的产生和加速才被允许。

本项目安全联锁系统设计严格按“最优切断”、“失效保护”及“冗余设计”等设计原则，以达到逻辑严密、操作方便的目的，保证人员在进入辐射区时辐射安全，保证工作及公众人员安全。

安全联锁系统主要包括用户界面、控制主站及子站，安全联锁系统结构示意图见图 4-25，安全联锁系统网络结构示意图见图 4-26。其中查询显示 PC 机是用专用软件来显示所有联锁部件的状态，控制主站及子站则主要用来控制系统不同区域的联锁部件。安全联锁系统通过硬线或总线 IO 将各辐射区域的联锁组件、传感器、执行部件及应用软件连接在一起，且其总线网络、传感器及执行部件都采用失效保护及冗余设计。针对单独控制区域，如废物暂存间等单独的控制区域需要配套单独的门禁剂量联锁部件。

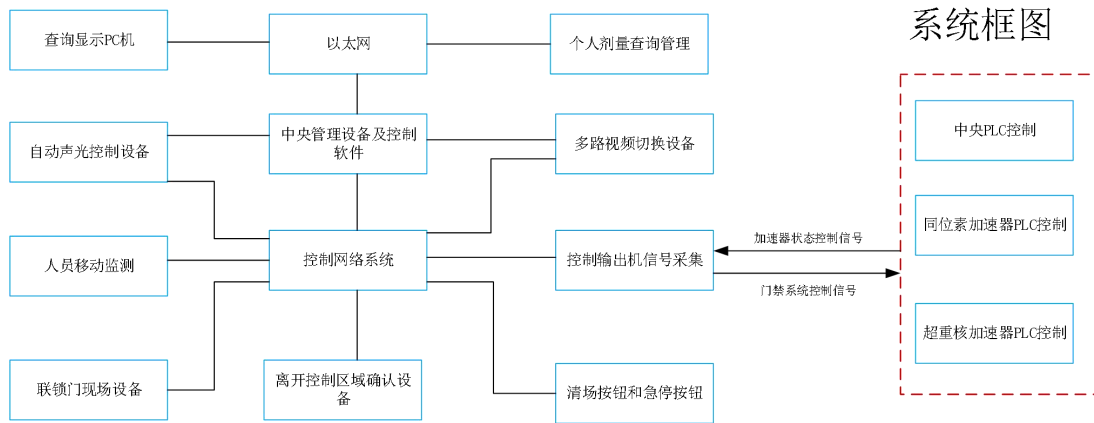


图 4-25 安全联锁系统框图结构示意图

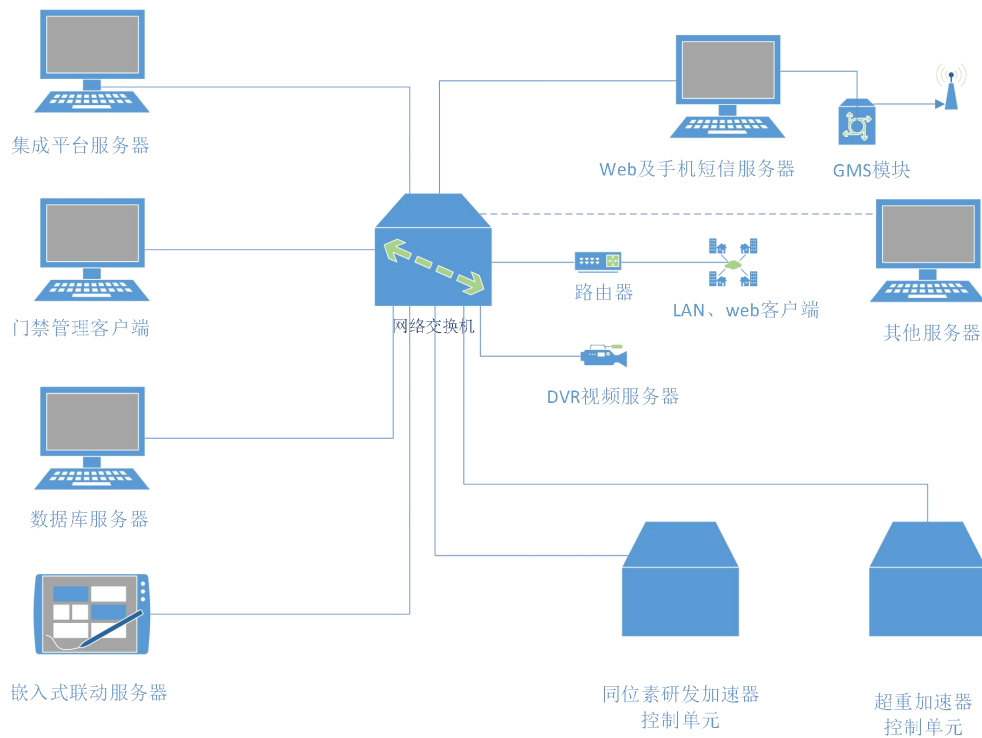


图 4-26 安全联锁系统网络控制结构示意图

4.3.3 安全联锁系统关键设备

本项目辐射安全联锁系统关键设备包括门禁控制、急停按钮、清场按钮、警铃警灯、红外摄像头、视频监控、紧急开门按钮等。关键设备示意图见图 4-27。

4.3.3.1 门禁控制系统

门禁控制系统主要由门禁控制器、门内/门外读卡器、紧急进门/出门按钮、防护门等组成。

门禁仅授权给加速器运行及维护的辐射工作人员使用，其他人员若需进入隧道等控制区内部工作，需由授权人员陪同并刷卡进入。

安全联锁系统对进入控制区的人员进行出入控制。出入控制的主要功能有：
(1) 人员授权：对出入人员进行监控，在进入辐射区隧道末端口时安装有红外感应摄像机，人员进出场时会抓拍，存储于服务器中，并形成记录日志；(2) 通道门开关为联锁防护门；(3) 声光报警装置和“清场”按钮；区域在安全的、不安全和故障状态间的过渡转换。当控制区联锁被触发时，操作员可进行如下操作：利用加速器中的安全制动器关闭束流、在相应区域开启报警灯、在用户界面显示报警信息等，以保障区域内人员的辐射安全。

在供束期间，任何人都不允许进入控制区内。只有在该区域停止供束，且值班长确认后，经授权的人员才能进入该区域。而当该区域准备供束时，由最后一名离开该区域的工作人员负责对该区域进行“清场”，“清场”时，工作人员须在规定的时间内，按照特定的顺序，按动分布在该区域不同位置处的“清场”确认按钮。而当“清场”确认按钮被按下时，区域内的报警装置发出声、光报警信号，提醒人员离开该区域。而只有当“清场”结束，并经值班长确认后，该区域通道门才最后关闭，该区域允许供束。与此同时，区域外的指示器和控制室里的用户界面会显示该区域的状态。

超重加速器（控制区）和超重实验终端（控制区）出入控制：超重加速器（控制区）供束时超重实验终端（控制区）不供束，其门由剂量联锁授权人员可根据剂量大小进入该区，BDS 偏转磁铁电源控制信号不能启用，超重加速器（控制区）门禁不能打开；超重实验终端（控制区）供束时，BDS 偏转磁铁电源控制信号启用，门禁不能开启；超重加速器（控制区）停束时，该处门禁可以打开，低能输运线入口法拉第筒不能提升，切断束流。

同位素生产加速器为单控制区，门打开时低能输运线入口法拉第筒不能提升，切断束流。

4.3.3.2 清场按钮

在超重装置加速器低能隧道、25MeV 加速器隧道各设置 2 个清场按钮，在超重终端充气反冲谱仪实验间设有 4 个清场按钮。

对于 25MeV 加速器隧道，在束束前巡更人员需按照图 4-27 中红线进行巡更清场 EC1 和 EC2，清场完毕后，D 门禁联锁将关闭，控制区域内人员清零，加速器将可调束，调束期间隧道外的任何人员不能进入该控制区。在束束期间如果隧道内有人滞留可通过急停键停止束流，或者通过联锁门内侧的开关直接出门。同样超重加速器隧道和超重实验终端也按照该巡更清场路线流程。清场按钮附有声光报警装置，清场后会在规定时间内声光报警，提升人员离开控制区域。

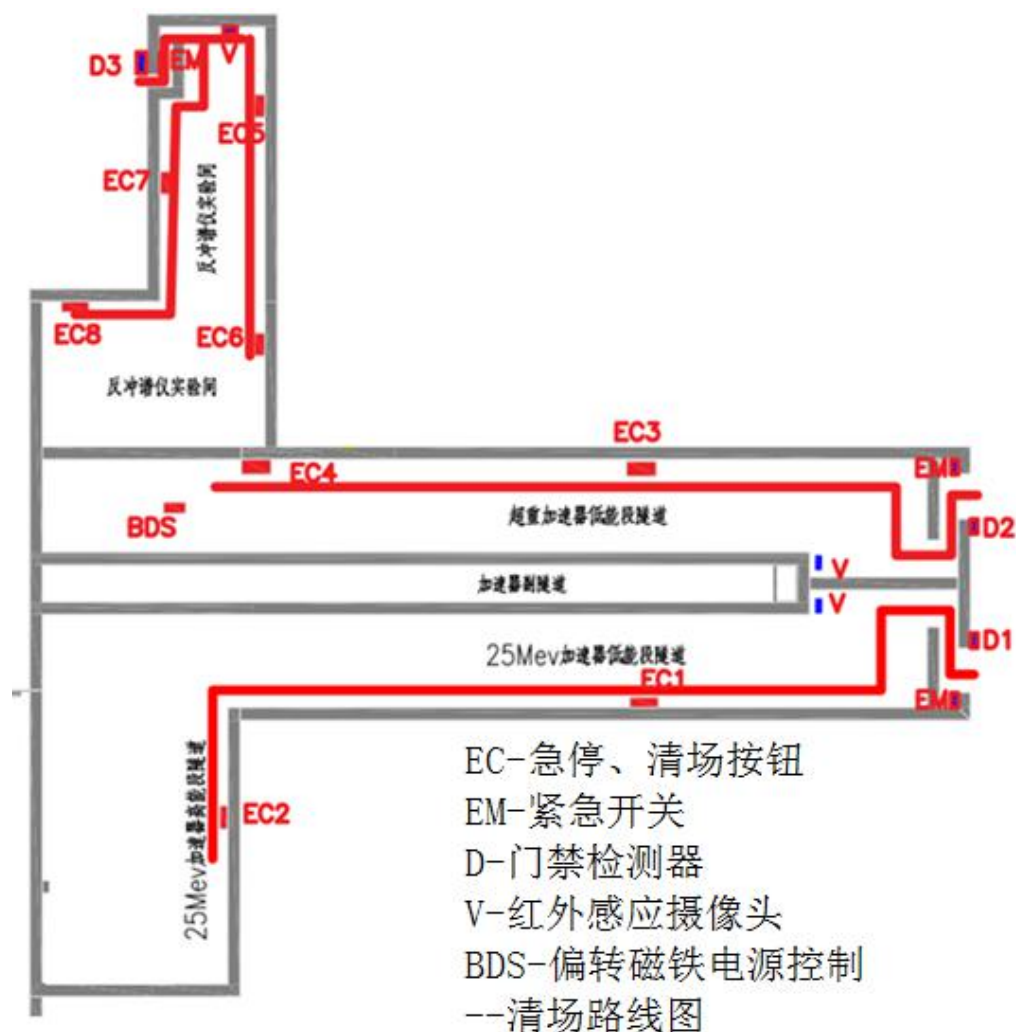


图 4-27 加速器隧道安全联锁关键设备布局示意图

4.3.3.3 急停按钮

超重加速器低能隧道、25MeV 加速器低能隧道及其高能隧道各设置 2 个急停按钮，在超重终端设 4 处急停按钮，若开机后仍有人员滞留在这些区域内，可按下该区域处的紧急停机按钮切断加速器运行。重新清场待确认该区域内没有工作人员并按下“清场”确认按钮，并将急停按钮复位后可重新进行开机操作。

4.3.3.4 紧急开门按钮

在超重低能隧道迷道防护门内墙、25MeV 加速器隧道防护门内墙及超重终端充气反冲谱仪实验间迷道防护门内墙各设置 1 个紧急开门按钮，开机后仍有人员滞留在这些区域内，可按下该紧急开门按钮切断加速器运行并打开防护门。

4.3.3.5 红外感应摄像头

在超重低能隧道迷道防护门内墙、25MeV 加速器隧道防护门内墙及超重终端充气反冲谱仪实验间迷道内墙设有红外感应摄像头，工作人员进出隧道时，隧道内迷道口处的红外传感器通过人体红外线自动感应到人员，此时摄像头自动拍照，并存于服务器中，便于后期查询具体人员进入辐射区的时间等信息。

4.3.3.6 警铃警灯

在加速器隧道和超重终端充气反冲谱仪实验间的清场按钮、在线监测探头处以及出入口处安装有警铃警灯，分别对辐射工作场所的运行状态进行显示。不同状态分别用不同颜色的指示灯进行指示。执行清场按钮动作时每按下一个清场按钮，该分区内所有警铃鸣响。在联锁状态发生切换时，也会有不同时间的声音进行提示。

4.3.3.7 在线监测设备

加速器隧道、超重终端设有 γ 、中子在线监测设备，其具体设置情况见 4.4 节，在线监测设备能实时显示加速器运行时其场所内辐射剂量水平，正常情况下加速器停机后，束流终端在线监测设备剂量率水平降至 $20\mu\text{Sv/h}$ ，安全联锁防护门才能打开。

4.3.3.8 LED 显示屏

在加速器隧道、超重终端控制区的出入口处设有 LED 显示屏，实时显示辐射安全联锁状态及辐射区供束或停束的状态，工作人员可通过 LED 显示屏了解安全联锁和加速器运行状态。

4.3.4 安全联锁逻辑

安全联锁系统的总体设计逻辑为：如果在加速器运行时，加速器隧道、终端

或者中控室的急停按钮被按下，则加速器停止出束。

本项目安全联锁系统允许开机的逻辑如下：

- (1) 各控制区内清场按钮按一定顺序全部按下；
- (2) 各控制区内急停按钮全部复位；
- (3) 中控室钥匙面板上的主控钥匙归位并旋转至“ON”的状态。
- (4) 控制区出入口的门全部处于关闭状态。

当以上条件有一个不满足时，加速器停束。加速器安全联锁逻辑图如图 4-28 所示，安全联锁单位控制流程图见图 4-29。

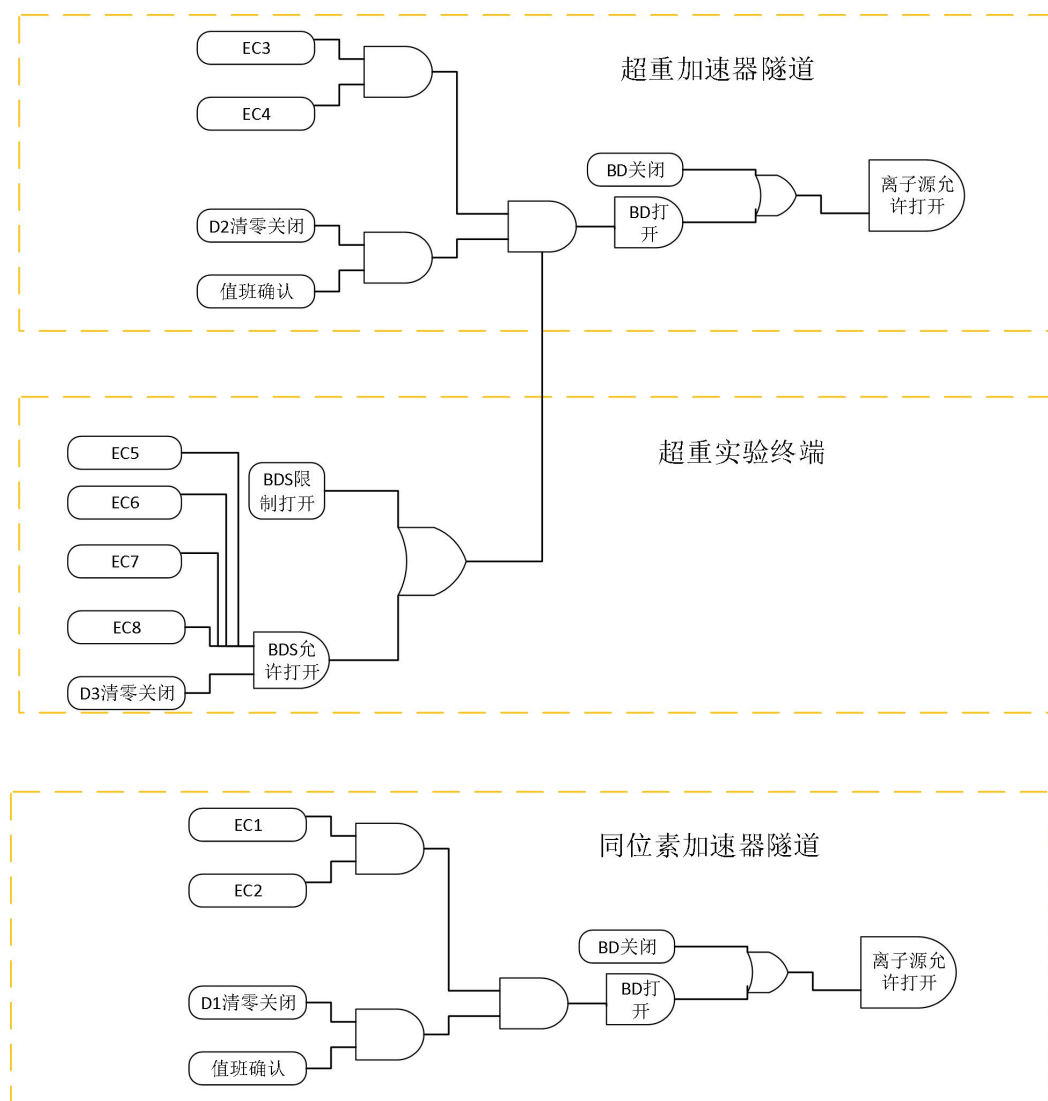


图 4-28 加速器逻辑示意图

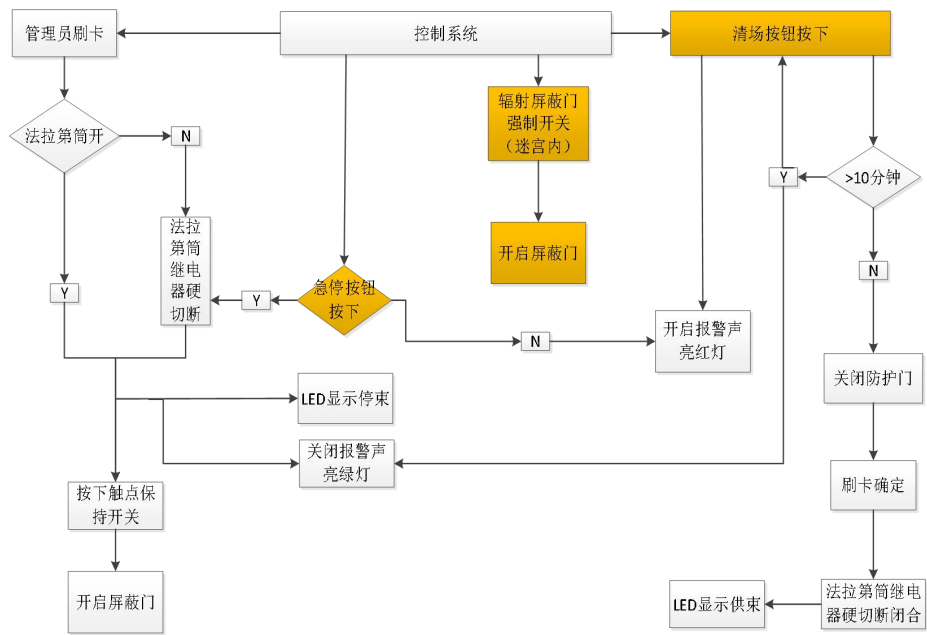


图 4-29 安全联锁单元控制流程图

4.4 在线辐射监测系统

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

4.4.1 监测布点

(1) 工作场所辐射监测布点

工作场所辐射监测系统按照平面布局，在加速器控制区和监督区共布置了 6 个中子、 γ 连续监测点，监测点位布设见图 4-30；靶站层设置 4 个中子、 γ 连续监测点，热室地下一层设置 4 个 γ 连续监测点，监测点位布设见图 4-31，分离热室设置 3 个 γ 连续监测点，监测点位布设图见图 4-32；超重实验终端设置 2 个中子、 γ 连续监测点，监测点位布设见图 4-33；辐射管理中心设置 3 个 γ 监测点，监测点位见图 4-34。总共设置 22 个监测点，其中 10 个为单独 γ 监测点。

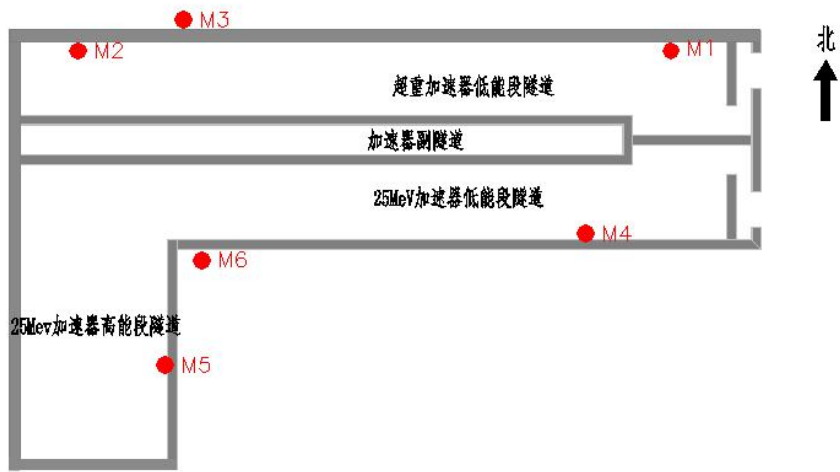


图 4-30 加速器隧道辐射监测布局图



图 4-31 靶站、热室地下一层区域辐射监测示意图



图 4-32 靶站、热室一层区域辐射监测示意图



图 4-33 超重实验终端区域辐射监测示意图

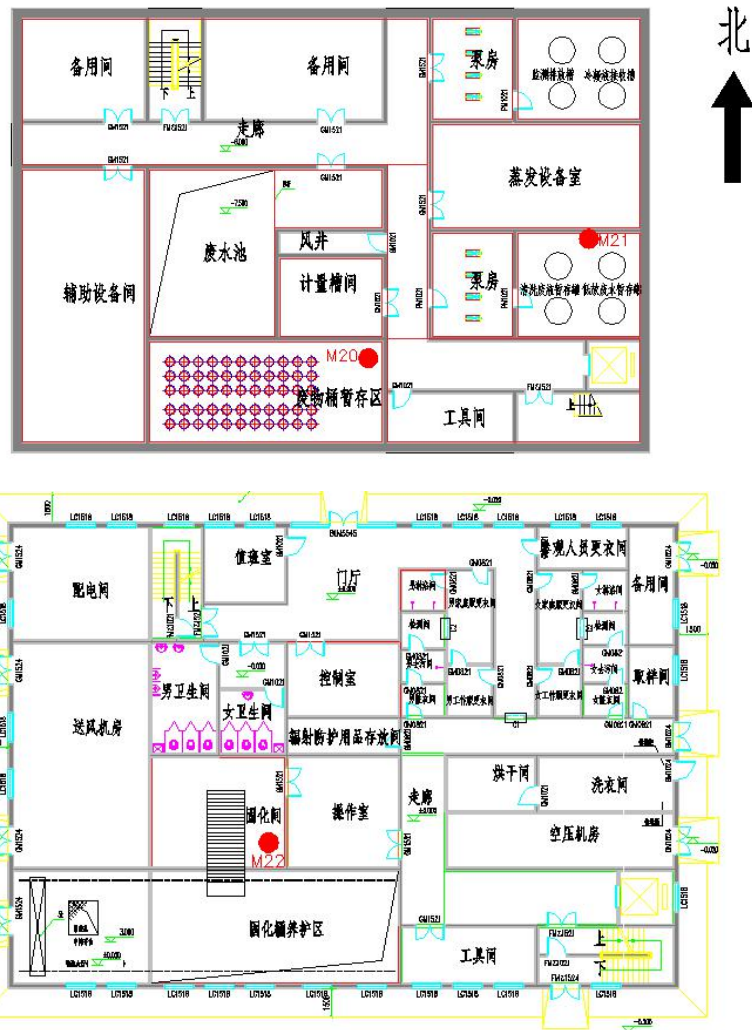


图 4-34 辐射管理中心域辐射监测示意图

(2) 周围环境监测布点

环境辐射监测系统由 4 个环境监测站组成,用于监测加速器运行时园区内加速器主体建筑以外的中子、伽马剂量剂量率,以验证屏蔽的有效性并保证加速器运行时射线不会泄漏至主体建筑以外。环境监测点的布局见图 4-35,每个监测点布置中子、 γ 、气溶胶连续监测。

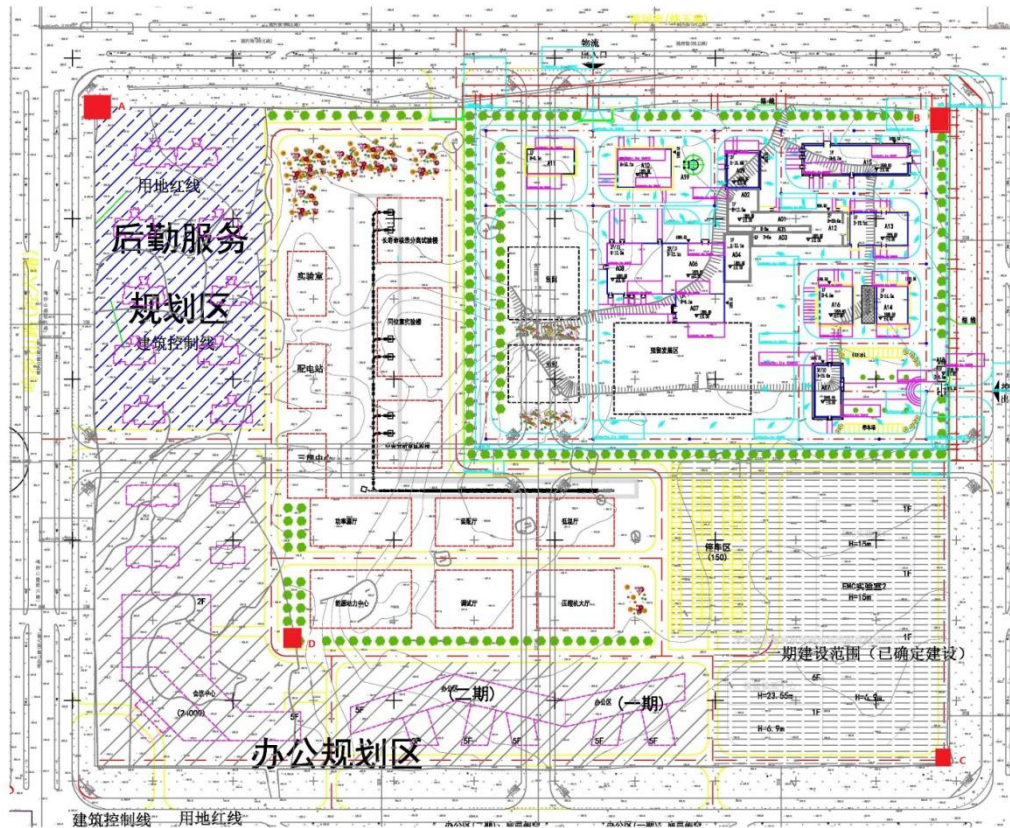


图 4-35 环境监测点布局图

4.4.2 探测器选择

探测器拟选用包有慢化体的 BF_3 正比计数管 (He-3 管) 和电离室分别用于中子、 γ 监测。能实时监测, 具有良好的中子、 γ 鉴别能力, 同时稳定可靠。工作场所辐射监测系统见图 4-36。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)。辐射监测系统将与安全连锁系统进行通信, 主要包括工作场所辐射监测系统及个人剂量监测系统与安全连锁系统数据通讯。相关的接口主要由软件完成, 包括通讯协议。信息的通信在内部控

制网上进行。

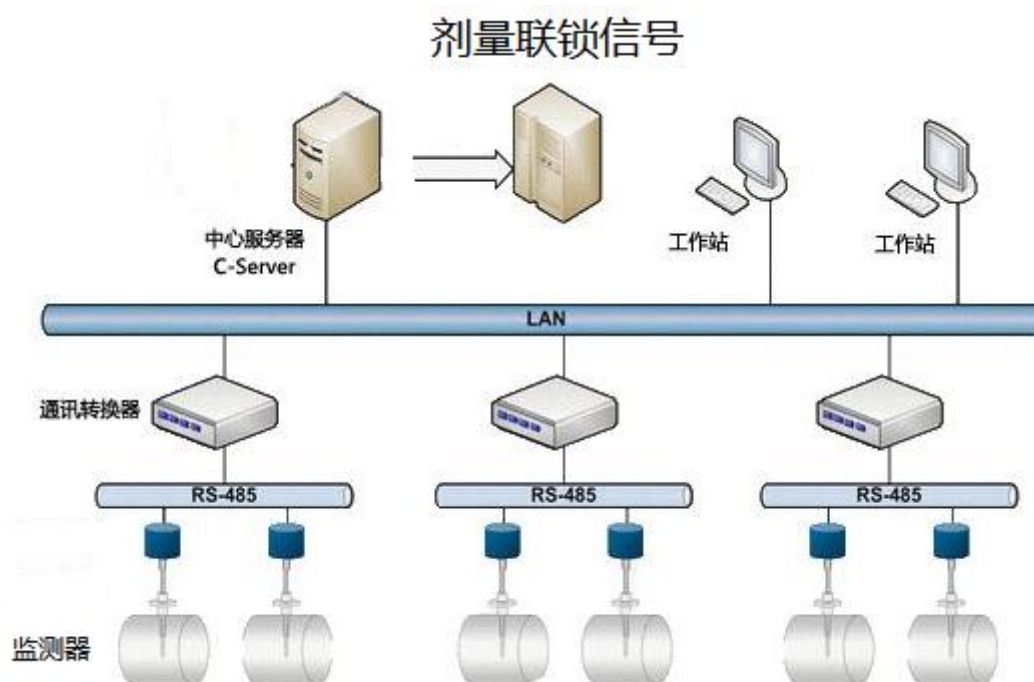


图 4-36 工作场所剂量监测系统结构示意图

4.4.2.1 中子探测器

(1) 工作场所中子探测器

W ENDI (Wide Energy Neutron Detection Instrument) 是美国 Los Alamos 国家实验室和 San Jose 大学等研发的能量范围从热中子到 5GeV 的宽能中子探测器, 符合 H*(10) ICRP74, 并在 1996 年获得了美国国家专利。FHT762 WENDI-2 是其更新的改进型, 具有优良的能量响应和角度响应, 而且极大地扩展了高能响应。使用了大体积 ^3He 管, 具有高灵敏度。具有很强的 γ 抑制能力, 即使对于高达 1Sv/h 水平的 γ 剂量率仍无需考虑串扰的影响, 对于加速器的中子场有着更精确的等效剂量响应。其主要技术参数:

探测器: ^3He 管

能量范围: 0.025eV -5GeV, 依照 ICRP74 (1996)

测量范围: 1 nSv/h -100 mSv/h, Cf-252

灵敏度: 0.84cps/($\mu\text{Sv/h}$) , ^{252}Cf

γ灵敏度：1 到 5μSv/h 对于 100mSv/h, (¹³⁷Cs, 662KeV)

角度依赖性：所有方向±20%

环境温度：-30°C~50°C

湿度：可达 90%（无冷凝）

大气压力：500 到 1500hPa

尺寸：直径 230mm, 高 320mm

重量：13.5kg

（2）环境中子探测器

环境中子探测器采用大尺寸 BF₃ 正比计数管（Φ 50mm，有效长度 310 mm，充气压力约 600mmHg，工作电压为 2000 伏），其主要参数：

测量范围：1.0×10⁻³~1000μSv/h

能量响应：0.025eV-16MeV

注量率灵敏度：12cps/n/cm²·s 或 15cps/(μSv/h)

总不确定度：小于 11%

温度范围：(-5°C-40°C)：小于 5%

相对湿度：(85%，30°C)：小于 10%

输出信号：RS485 数字信号

4.4.2.2 γ 探测器

（1）工作场所γ探测器

在工作场所监测中，测量 γ 剂量率经常需要快速而可靠地测出辐射水平的细小变化。本项目工作场所 γ 探测器选用 FHT191N 电离室探头，测量范围可宽达 9 个数量级，能量范围在 35keV 到 7 MeV 之间，保证有极好的能量响应。

技术参数：

工作电压：800V

测量范围：10 nSv/h - 10 Sv/h（对 Cs-137 全范围测量精度 10%）

70 nSv/h 处的统计精度：2%（10 分钟）；10%（50 秒）

能量范围：35keV-7 MeV（在全能范围，测量精度在 30%情况下）

角度响应：-45° - +90°

工作气体：带添加剂的 N₂

灵敏体积：4.7 升

充气压：0.7Mpa

电源：12 - 30V

电流：100 mA，12V 时；45 mA，30V 时

温度范围：-30°C - +60°C

防护级别：IP67

大气压：0-1500hPa

壁厚：2 mm 铝内衬

尺寸：Φ208x 518 mm

重量：3.5 kg

（2）环境 γ 探测器

环境γ探测器采用美国 GE 公司生产的 RSS-131 高压电离室，其主要参数：

探测器为高压电离室（球形），充氩气≥5L，≥22atm

相对固有误差：≤±8%

测量范围：≤10nSv/h ~ 1Sv/h

能量响应：≤60keV ~ 3.0MeV

角响应: 4π 范围内 $R_{aver}/R \geq 0.95$ (137Cs)

不确定度: $\leq \pm 10\%$ (100nSv/h ~ 1Sv/h)

重复性: $< 10\%$ (100nSv/h ~ 1Sv/h)

温度范围: $-25^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$

相对湿度: $\leq 95\%$

温度响应: $\leq \pm 3\%$ (100nSv/h ~ 1Sv/h)

4.4.3 数据处理与报警系统

数据处理与报警系统采用 FHT 6020 系统, 其主要特点: (1) 可连接多达 16 个探测器, 全面的测量信息显示; (2) 兼容多种探测器; (3) 具有 RS232 接口和 RS485 接口; (4) 模拟输入和输出, 对监测条件和报警的数字输入和输出; (5) 可容易地使用程序进行设置, 对使用者提供了几乎是无限的编制各种测量任务的自由; (6) 具有强大的数据存储能力; (7) 提供多重报警设置和分析, 本地和远程的声光报警及误操作报警; (8) 报警继电器可接入安全联锁系统; (9) 灵活方便的使用和安装方式。其主要技术参数:

电源: 9-36VDC

电流: 30mA-102mA(根据不同探测器)

电池寿命: 10 年

显示结果: 4 位/6 位

最大显示: 999 M/ 999,999

数字输出: 电压 $0 - \pm 36\text{VDC} / 0 - 26.4\text{VAC}, 50/60\text{Hz}$; 电流 $0 - \pm 400\text{mA}$; 阻抗 $0.8/1.5 \Omega$

数字输入: 电流 $\pm 3 - \pm 60\text{mA}$; 阻抗 1000Ω

模拟输出: 阻抗 250Ω ; 电流 $0 - 20\text{mA}$; 分辨率 $4.9 \mu\text{A}$, 12bits; 误差 $\pm 20\mu\text{A}$

4.4.4 辐射监测软件

辐射监测软件的主要功能见表 4-6。

表 4-6 辐射软件的详细功能

模块	功能
实时数据	实时接收数据； 实时存储数据； 实时发布数据； 实时统计数据；
数据多种展示功能	趋势曲线展示 柱状图标展示 图形界面展示 表格数据展示 定制站点展示；
数据查询与报表	历史数据自动数据补发功能； 支持最近一周、最近一月、最近一年及任意时间段数据查询功能，查询数据同步下载； 查询数据时域趋势曲线展示； 查询数据柱状分析图展示 数据报表功能； 数据下载功能；
报警管理	监测数据报警功能，数据超限预警、数据超限报警、温度（高、低）报警、打开报警、数据存储报警、探头故障报警等； 数据传输中断报警功能； 短信报警功能，报警信息支持实时下发到多个指定用户手机； 报警信息操作处理审核功能；
统计分析	支持查询任意站点、任意时间段统计场强功能； 支持重点区域内密集站点实时监测数据等值线图绘制；
站点管理	可以建立及管理多层次站点 站点日志功能，支持站点报警信息、站点操作日志查询； 支持站点现场照片上传及展示，支持站点位置地图展示及查询； 站点信息管理 无限量站点接入，满足海量监测需求；
设备管理	远程设置参数
用户管理	分层级用户权限设计； 用户可管理单一站点或区域站点
系统管理	特定权限用户操作； 监测目录层级管理功能； 系统参数管理； 系统日志管理功能； 系统资讯标准信息新闻管理。

4.5 通风系统

4.5.1 加速器

25MeV 加速器隧道、25MeV 加速器高能段隧道、超重低能隧道及束流终端等根据工艺要求，设置全面通风系统。通风空调系统分以下三种运行模式：

(1) 可进入模式：机器不运行时，人员可进入。

(2) 机器正常运行模式：隧道为禁入区，需密闭处理，通风空调系统处于封闭循环状态，并保持禁入区在一定的负压状态，以防止放射活化空气的泄漏。

(3) 过渡模式：从机器正常运行模式到可进入模式的过渡期，放射性气体经适当延时衰减后，采取大风量排风，置换隧道中的空气。

为满足以上三种运行模式，通风系统按照两种工况运行：即正常运行工况和大风量过渡通风工况。正常运行工况主要是在工艺设备正常运行时维持隧道内负压，并保证隧道内一定的温湿度要求；过渡运行工况是在加速器停机检修、换靶等人员进入前，对各隧道进行大风量通风换气，使各场所中的有害物浓度达到允许的标准，满足人员进入时的卫生要求。通风运行工况及工艺工作模式见表 4-7。

表 4-7 通风运行工况及工艺工作模式

工艺运行模式	机器运行	过渡期模式		人员进入
		停机时间 < 0.5h	停机时间 > 0.5h	
通风工况	正常运行	正常运行	过渡通风	正常运行或过渡通风

设备运行期间人员不进入，排风换气次数取 0.5 次/h。人员进入前，排风换气次数取 4~6 次/h，排风经辐射管理中心废气处理后排风塔外排。

为满足各加速器隧道在正常运行时隧道内的温湿度要求，各区域设置若干组循环通风系统组进行过滤、降温、除湿处理，循环通风处理过程如下：

隧道内空气→净化过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热器→循环送风机→送入隧道内。

各隧道正常正常运行情况及过渡阶段排风量情景见表 4-8。加速器隧道管道

穿墙示意图见图 4-37。超重加速器低能隧道、束流终端通风空调系统流程图见图 4-38，25MeV 加速器低能隧道、高能隧道通风空调系统流程图见图 4-39。

表 4-8 加速器正常及过滤阶段排风量

机器运行	排风量, m ³ /h		
	超重装置加速器隧道及束流终端	同位素装置加速器隧道及高能隧道	副隧道
正常运行	700	2600	—
过度模式	7000	26000	12000

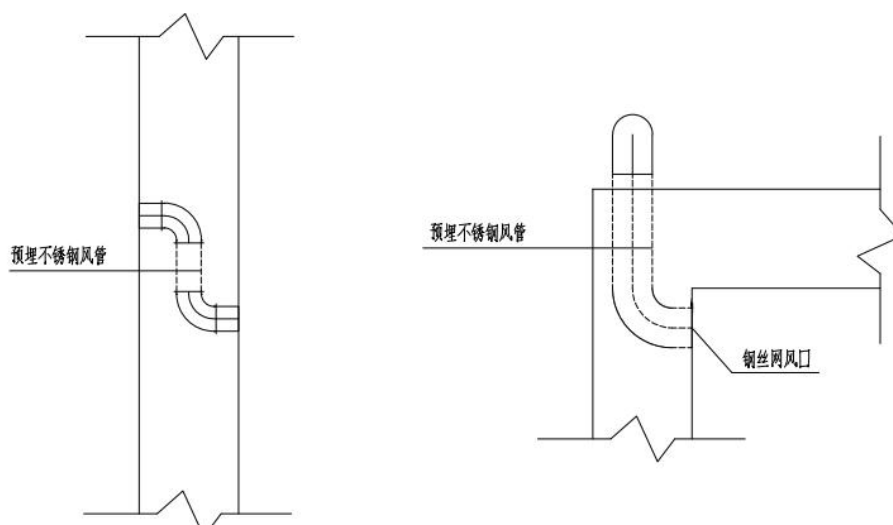


图 4-37 加速器隧道管道穿墙示意图

正常工况下当离子源出口处的法拉第筒打开时，加速器隧道通风自动切换到正常供束时的通风模式，当法拉第筒关闭半小时后自动切换到过渡通风，紧急工况下，可手动直接切换到过渡通风模式，本项目通风装置设有双电源。

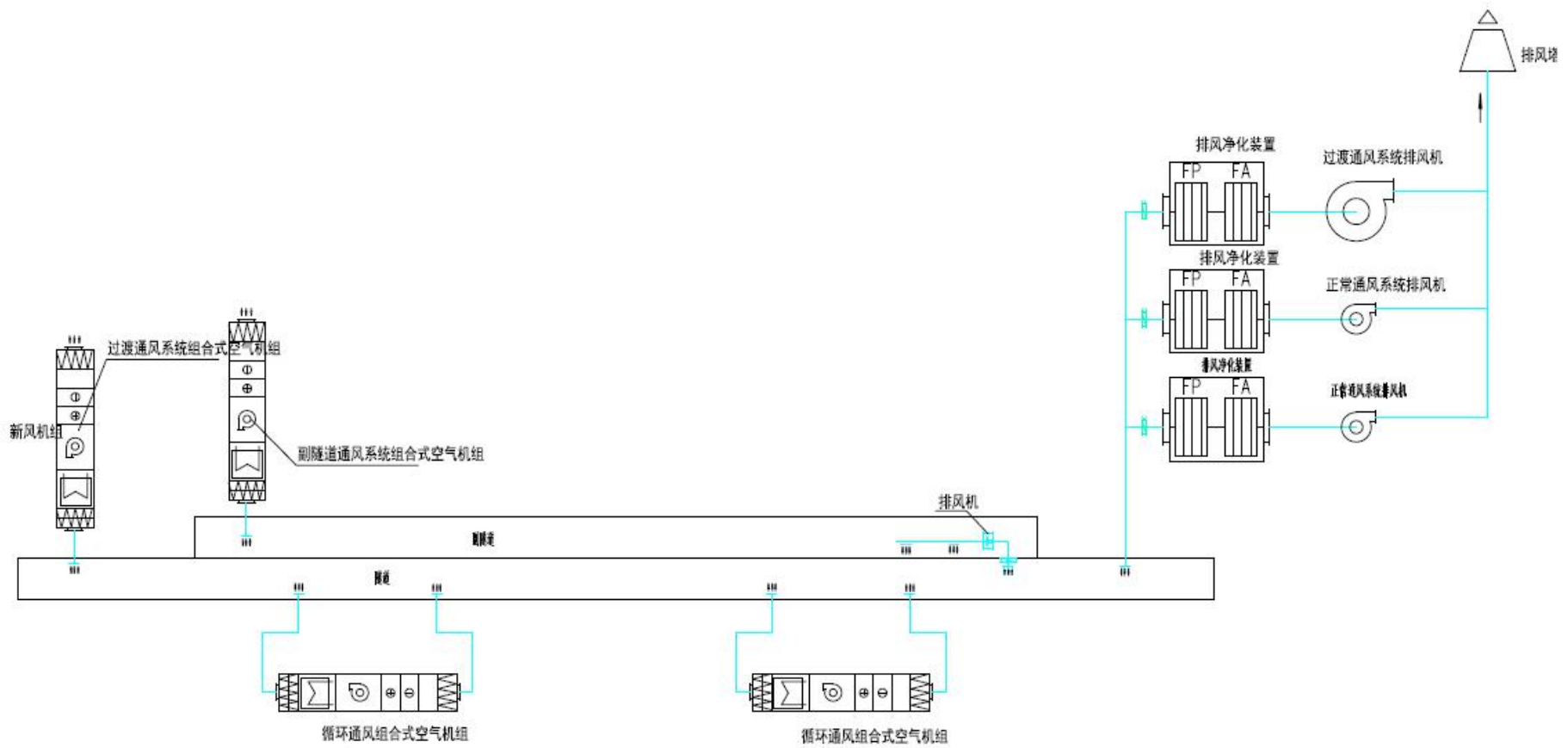


图 4-38 超重低能隧道、束流终端通风空调系统流程图

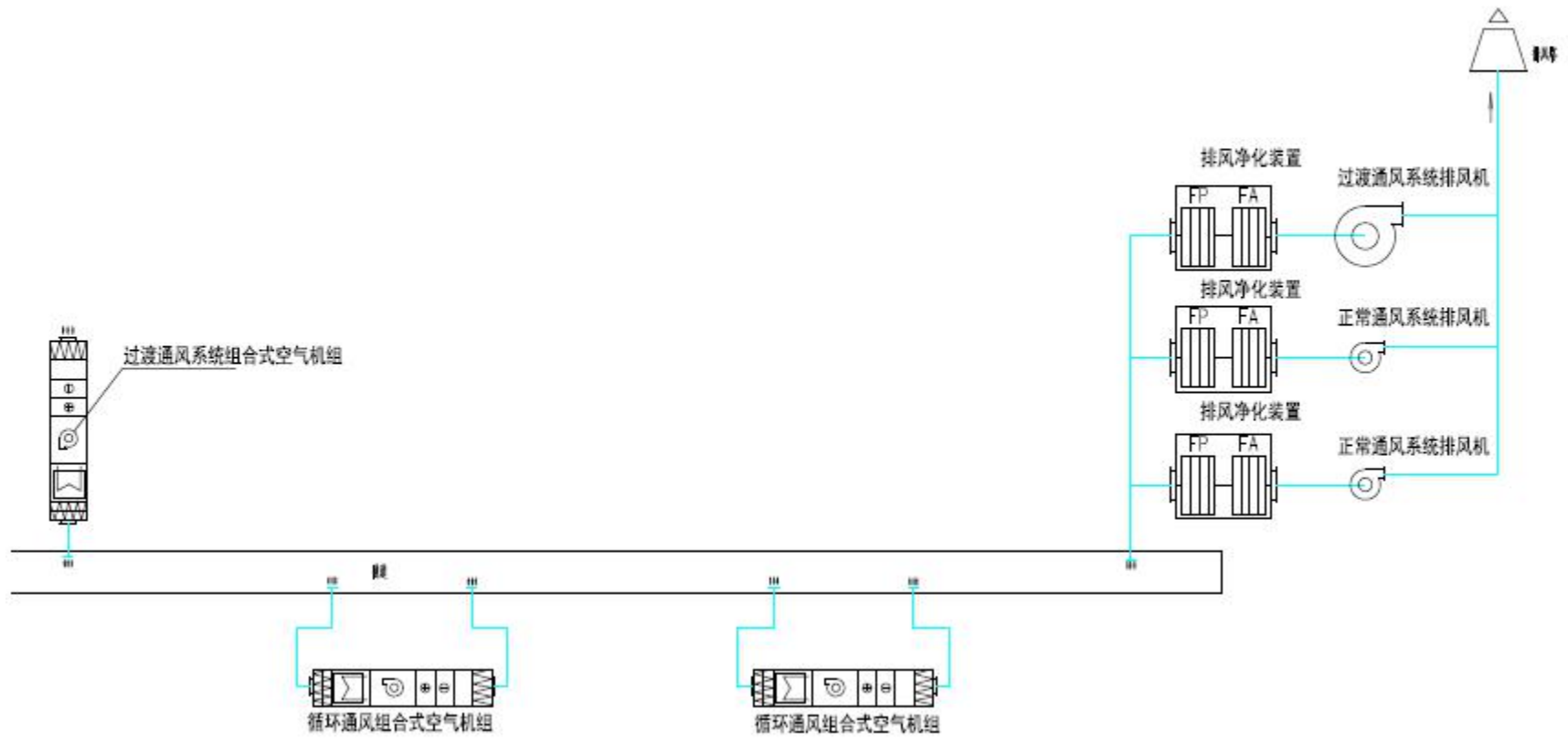


图 4-39 25MeV 低能隧道、高能隧道通风空调系统流程图

4.5.2 靶站

(1) 热室

为排除热室工作中产生的放射性气溶胶及有害物质，并保持热室负压要求，设通风系统，通风处理过程如下：

新风→净化过滤→热室→净化过滤→离心风机→高空排放。

排风换气次数取 25 次/h，排风量 12000m³/h，补风量 10000m³/h。

热室通风系统流程图见图 4-40。

(2) 操作区、后区通风空调系统

为排除房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→高空排放。

排风换气次数取 5 次/h，排风量 11000m³/h，补风量 10000m³/h。

(3) 热室大厅通风空调系统

为排除房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

新风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→高空排放。

排风换气次数取 1.5 次/h，排风量 30000m³/h，补风量 240000m³/h。

(4) 其它区域通风空调系统

为排除房间余热余湿，设排风系统，排风换气次数取 4~6 次/h，就地排放。

其他控制区通风系统流程图见图 4-41。

4.5.3 分离热室

4.5.3.1 全面排放系统

(1) 热室通风系统

为排除热室工作中产生的放射性气溶胶及有害物质，并保持热室负压要求，设通风系统，通风处理过程如下：

新风→净化过滤→热室→净化过滤→离心风机→高空排放。

排风换气次数取 25 次/h，排风量 3300m³/h，补风量 2700m³/h。

热室通风系统流程图见图 4-40。

(2) 操作区、工作区通风空调系统

为排除房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→高空排放。

排风换气次数取 5 次/h，排风量 16000m³/h，补风量 13000m³/h。

(3) 储存室、准备室通风空调系统

为排除房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

新风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→高空排放。

排风换气次数取 5 次/h，排风量 15000m³/h，补风量 12000m³/h。

(4) 办公室、检测室通风空调系统

为排除房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

新风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→高空排放。

排风换气次数取 5 次/h，排风量 16000m³/h，补风量 13000m³/h。

（5）洁净区通风空调系统

工作箱洁净度级别为 A 级洁净区，洁净度 5 级，气流采用单向流型，平均风速 0.2m/s，设洁净室风冷恒温恒湿全新风理机组送风，排风净化装置排风，满足房间内的温湿度要求。

B 级洁净区，洁净度 7 级，设洁净室风冷恒温恒湿全新风理机组送风，排风净化装置排风，最小换气次数为 25 次/h，满足房间内的温湿度要求。

C 级洁净区，洁净度 8 级，设洁净室风冷恒温恒湿全新风理机组送风，排风净化装置排风，最小换气次数为 15 次/h，满足房间内的温湿度要求。

（6）其它区域通风空调系统

为排除房间余热余湿，设排风系统，排风换气次数取 4~6 次/h，就地排放。

其他控制区通风系统流程图见图 4-41。

4.5.3.2 局部排风系统

（1）原料准备间通风柜

原料准备间通风柜设置排风系统，排风量按维持操作口风速不小于 1m/s，每台排风量为 2000 m³/h，总排风量 4000 m³/h。通风柜排风系统由 1 台离心式排风机、排风管道及阀门组成，排风机设置在排风机房。

（2）制样间通风柜

制样间通风柜设置排风系统，排风量按维持操作口风速不小于 1m/s，每台排风量为 2000 m³/h，总排风量 4000 m³/h。通风柜排风系统由 1 台离心式排风机、排风管道及阀门组成，排风机设置在排风机房。

（3）实验准备间、发生器固定相制备实验室通风柜

实验准备间、发生器固定相制备实验室通风柜设置排风系统，排风量按维持

操作口风速不小于 1m/s，每台排风量为 2000 m³/h，总排风量 4000 m³/h。通风柜排风系统由 1 台离心式排风机、排风管道及阀门组成，排风机设置在排风机房。

(4) 放射化学实验室 1、放射化学实验室 2 通风柜

放射化学实验室通风柜设置排风系统，排风量按维持操作口风速不小于 1m/s，每台排风量为 2000 m³/h，总排风量 4000m³/h。通风柜排风系统由 1 台离心式排风机、排风管道及阀门组成，排风机设置在排风机房。

(5) 普通化学实验室通风柜

普通化学实验室通风柜设置排风系统，排风量按维持操作口风速不小于 1m/s，每台排风量为 2000m³/h，总排风量 4000m³/h。通风柜排风系统由 1 台离心式排风机、排风管道及阀门组成，排风机设置在排风机房。

(6) 质谱仪间

质谱仪间设置排风系统，排风量为 1000m³/h。质谱仪间排风系统由 1 台离心式排风机、排风管道及阀门组成，排风机设置在排风机房。

(7) 光谱仪间

光谱仪间设置排风系统，排风量为 1000 m³/h。光谱仪间排风系统由 1 台离心式排风机、排风管道及阀门组成，排风机设置在排风机房。

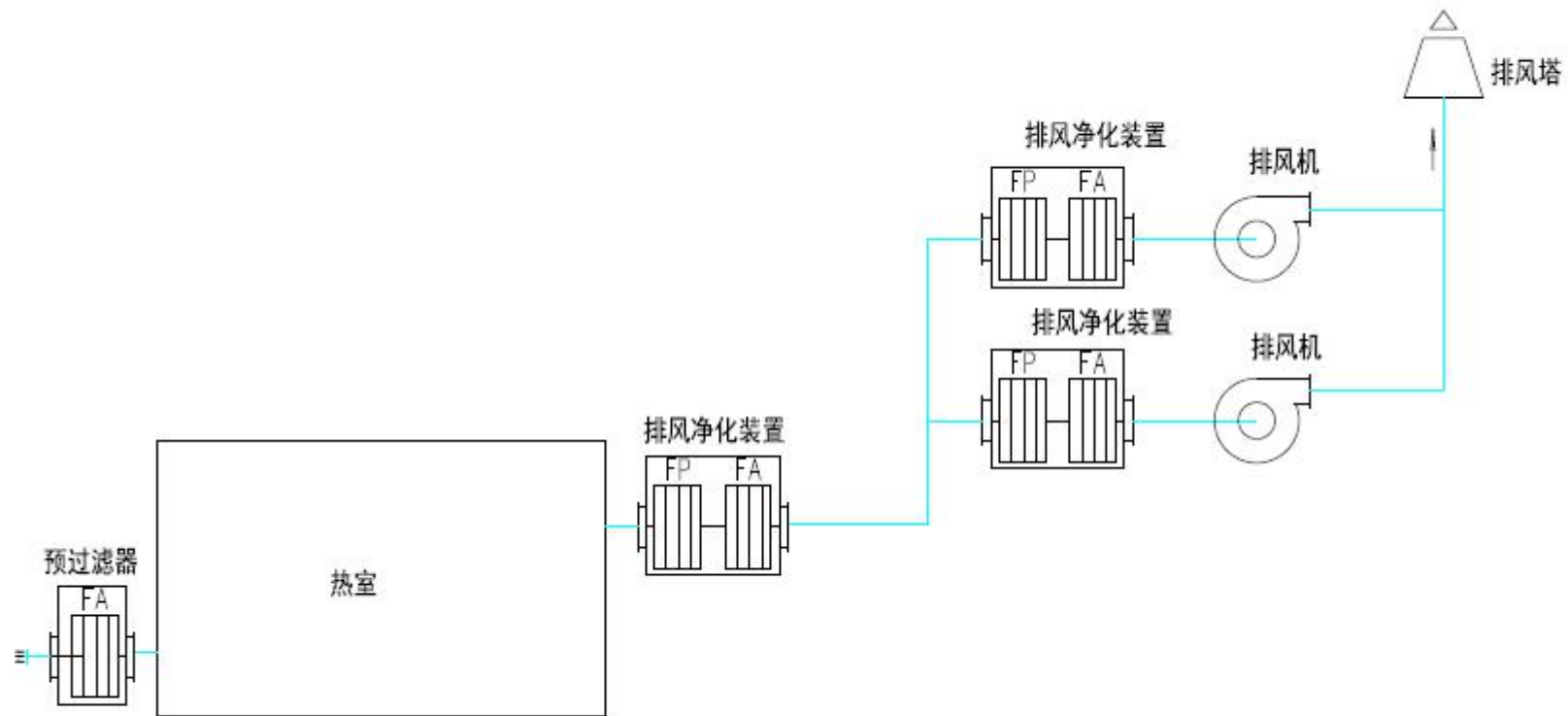


图 4-40 热室通风空调系统流程图

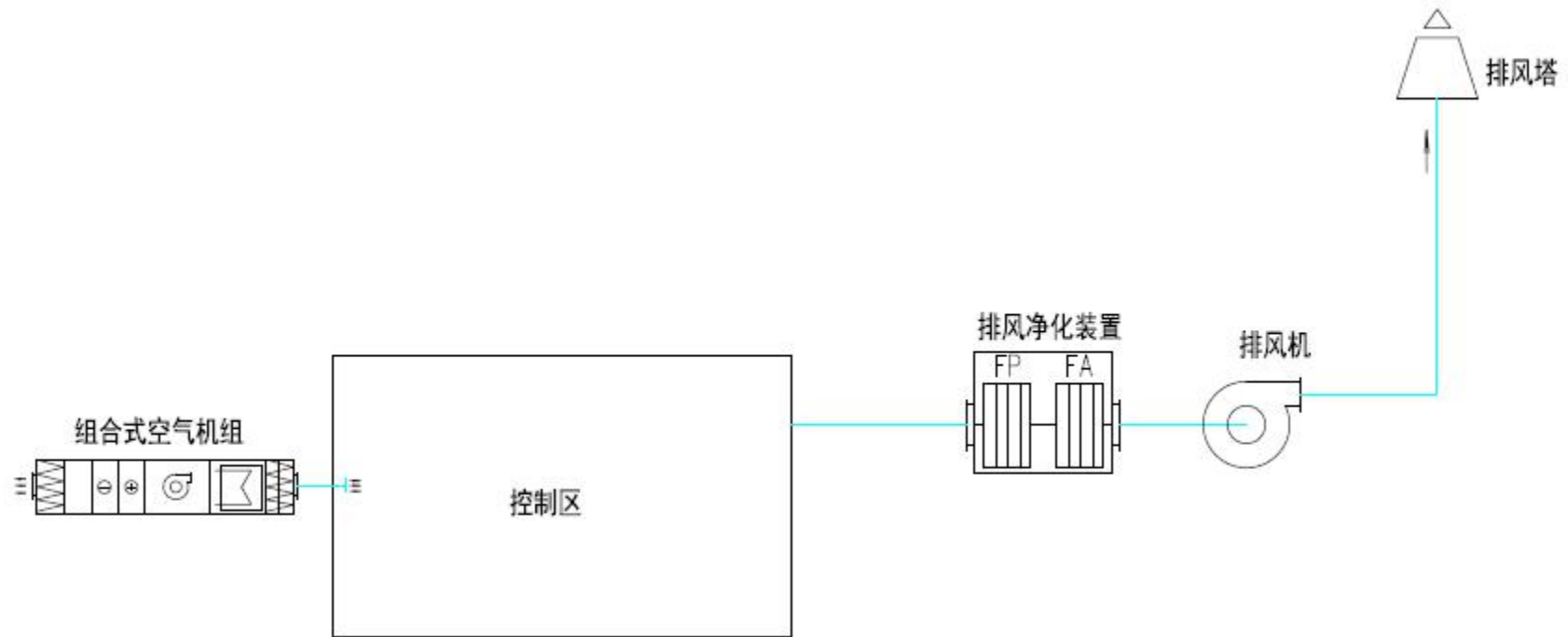


图 4-41 其他控制区通风空调系统流程图

4.5.4 超重终端二层非密封放射性实验室

(1) 靶件检测室、靶件制备室、试剂间、家庭服更衣间等房间排风系统

排风系统：靶件检测室、靶件制备室设 P-2 排风系统，排风换气次数取 5 次/h，风量 7500 m³/h，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

送风系统：设 S-2 送风系统，送风量取排风量 85%，送风量 12300m³/h，其中 6500m³/h 送至通风柜及手套箱区域，送风机房内设置 1 台 ZK15 型组合式送风机组，内配初效过滤段、风机段、中效过滤段，送风机组设在送风机房。

(2) 靶件检测室通风柜排风系统

靶件检测室通风柜设置排风系统，操作口风速不小于 1m/s，排风量为 1800 m³/h。在排风机房设 1 台空气净化装置，排风经过滤后通过排风塔高空排

(3) 靶件制备室通风柜排风系统

靶件制备室通风柜设置排风系统，操作口风速不小于 1m/s，每台排风量为 1800 m³/h，共三台，总排风量 5400 m³/h。在排风机房设置排风净化装置，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

(4) 靶件制备室手套箱排风系统

靶件制备室手套箱设置排风系统，排风换气次数取 20 次/h，风量为 40m³/h，在备用间手套箱就地设置第 1 级过滤器，在备用间手套箱内部配置 1 台预过滤器，备用间手套箱通风出口管道上设置电动隔离阀，在手套箱配置 1 台高效粒子过滤器；在排风机房设置第 2 级过滤器，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

4.5.5 辐射管理中心

(1) 控制区

放射性区域的通风系统根据建筑物内的辐射防护分区进行设计，本设计将保证通风系统的气流方向从“净区”到“脏区”、从低污染区到高污染区。将控制区划分为控制一区和控制二区，控制一区保持相对负压 10~30Pa，控制二区保

持相对负压 30~50Pa。

控制二区通风处理过程如下：

室外新风→过滤→冷却盘管（冷却加湿）→电加热器→送风机→房间→净化过滤→离心风机→烟囱。

控制一区通风处理过程如下：

室外新风→过滤→冷却盘管（冷却加湿）→电加热器→送风机→房间→离心风机→烟囱。

（2）监督区通风空调系统

监督区排风系统功能为排除设备散发的热量，排除实验室房间异味，排除房间爆炸性气体等。当服务区域发生火灾时，停止运行。设气体灭火系统房间的排风系统，平时运行，火灾时系统关闭，气体灭火后开启。

排烟系统平时关闭，当火灾探测系统发出火灾报警信号时，报警信号连锁开启排烟风机和相应的送风机。

为排除设备室、疏水器等房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

新风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→排风塔排放。

排风换气次数取 6 次/h，排风量 4500m³/h，补风量 3600m³/h。

为排除卫生出入区、取样间等房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

新风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→排风塔排放。

排风换气次数取 5 次/h，排风量 4000m³/h，补风量 3200m³/h。

为排除压空机房、送风机房等房间内产生的放射性气溶胶及有害物质，满足

房间内的温湿度要求，并保持房间一定负压要求，设置通风系统，通风处理过程如下：

新风→过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热→送风机→房间→净化过滤→离心风机→排风塔排放。

排风换气次数取 5 次/h，排风量 4500m³/h，补风量 3600m³/h。

4.6 其他防护措施

（1）电离辐射警告标志：在加速器隧道入口处、功率源厅入口处、超重终端入口处及靶站入口处、非密封放射性工作场所入口处设置电离辐射警告标志；

（2）工作指示灯：加速器隧道入口处、功率源厅入口处、超重终端入口处及靶站地下一层入口处设置安装红绿黄三色灯，分别为照射灯、安全灯、联锁灯；

（3）表面污染监测：在靶站、分离热室和超重终端二层非密封放射性工作场所的人员出口处设置表面污染监测仪，检测从放射性工作人员出来时的表面污染情况；

（4）非密封放射性工作场所放射性核素贮存场所设有保险柜，装有放射性核素容器将放置在 5cm 铅当量防护罐中，并贮存在保险柜。

4.7 三废治理

放射性废物管理包括在废物产生子项内的就地废物管理和在辐射管理中心的废物管理。热室、靶站、超重终端等废物产生子项的放射性废物，首先暂存在其子项内部的废物暂存区，定期检测后，固体废物通过其内部物流转运通道转运至相应的废物转运出口，再经过场内废物运输车转运至辐射管理中心，废液经过泵输送至辐射管理中心。

本项目运行期间，三废具体产生情况及处理如下：

4.7.1 废气及处理措施

4.7.1.1 来源

本项目运行期间产生的废气主要来源于：①超重元素合成装置及同位素研发装置在运行过程中产生的少量感生放射性气体；②非密封放射性物质工作场所操作过程中少量逸出的放射性核素。

4.7.1.2 处理措施

①超重元素合成装置及同位素研发装置：装置运行时，排风的换气次数不超过 0.5 次/h。装置停机人员进入前通风量为 4-6 次/h，运行期间产生的少量感生放射性废气将通过通风系统进入辐射管理中心排风机房过滤后由排风塔外排。

②靶站、分离热室等运行过程中逸出的少量放射性废气将经过滤后进入辐射管理中心排风机房过滤后排风塔外排。热室换气次数为 25 次/h，在热室就地设置第 1 级过滤器，在热室内部配置 1 台预过滤器，热室通风出口管道上设置电动隔离阀，在通风过滤器间配置 1 台高效粒子过滤器；在排风机房设置第 2 级过滤器，配置排风净化装置（2 台，1 用 1 备），配预过滤器、高效粒子过滤器，在排风机房设置 2 台离心风机（1 用 1 备），排风经过滤后通过排风塔高空排放。

依据 NB/T 20039.7-2013《核空气和气体处理规范通风、空调与空气净化第 7 部分：低效空气过滤器》中低效空气过滤器计重效率 $\geq 85\%$ ，本项目热室预过滤器计重效率为 85%；依据 NB/T 20039.19-2013《核空气和气体处理规范通风、空调与空气净化第 19 部分：特殊类型的高效空气过滤器》中高效过滤器效率 $\geq 99.99\%$ （钠焰法），本工程高效空气粒子过滤器效率为 99.99%（钠焰法）。各区域排风情况见 4.5 节

排风塔排放高度为 35m，塔顶出口内径为 1.6m。

4.7.2 放射性废液及处理措施

4.7.2.1 来源

本项目正常运行期间加速器装置冷却水、靶站冷却水循环使用，不外排；正常运行过程中产生的放射性废液主要是非密封放射性工作场所实验过程中产生，其具体产生情况见表 4-9。

表 4-9 本项目运行过程中放射性废液产生量

类别		年产生量	备注
At-211 生产研发过程	尾气吸收液	0.6L	放射性废液中主要核素 ^{211}At 、 ^{211}Po 、 ^{209}Po 、 ^{208}Po 、 ^{207}Bi 、 ^{208}Bi 等
	清洗液	20L	
Ge-68 生产研发过程	浓酸中和废液	80L	萃取和纯化过程中产生的放射性废液中主要核素 ^{69}Ge 、 ^{71}Ge 、 ^{68}Ge 、 ^{70}Ga 、 ^{74}As 、 ^{65}Zn 、 ^{64}Cu 、 $^{69\text{m}}\text{Zn}$ 、 ^{72}Ga 及 ^{63}Ni 等
	有机废液	6.2 L	萃取过程中，有机废液以 CCl_4 /甲苯为主，主要核素 ^{69}Ge 、 ^{71}Ge 、 ^{68}Ge 、 ^{70}Ga 、 ^{74}As 、 ^{65}Zn 、 ^{64}Cu 、 $^{69\text{m}}\text{Zn}$ 、 ^{72}Ga 及 ^{63}Ni 等，
Cu-67 生产研发过程浓酸中和液		120L	分离纯化过程中产生放射性废液，主要核素 ^{69}Ge 、 ^{71}Ge 、 ^{67}Ga 、 ^{65}Zn 、 ^{63}Ni 、 ^{62}Zn 、 ^{60}Co 、 ^{59}Ni 、 ^{58}Co 及 ^{57}Co 等
^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器研制过程盐酸废液		3L	主要核素为 ^{68}Ge 、 ^{68}Ga
超重终端二层实验产生废液		1L	主要核素为 ^{243}Am 、 ^{182}Ta 、 ^{179}Ta 、 ^{95}Nb
合计		230.8L	其中有机废液 6.2L,其他放射性废液 224.6L

4.7.2.2 放射性废液收集、暂存

热室大厅一层分离热室产生的浓酸中和液、尾气吸收液收集到地下一层的中放废液贮存罐（容积为 2m^3 ，）中，材质为不锈钢，暂存一段时间使其衰变成低放废水后通过泵，经室外地下管沟输送至辐射管理中心的清洗液暂存罐（容积为 2m^3 ，设有 2 个，一备一用）。

热室大厅分离热室产生的清洗液根据其核素情况分别收集到地下一层的低放废液贮存罐或中放废液贮存罐（设有 2 个，一备一用）中，该贮存罐的容积为 2m^3 ，材质为不锈钢，暂存一段时间后通过泵，经室外地下管沟输送至辐射管理中心的清洗液暂存罐（容积为 2m^3 ，设有 2 个，一备一用）。

热室大厅分离热室产生的有机废液将收集到 10L 不锈钢桶中，暂存在分离热室中，定期通过转运小车运送至热室外部，转运至辐射管理中心。

^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器研制过程的废液采用 5L 聚乙烯桶收集，暂存在工作箱的底部，定期通过人工转运至辐射管理中心暂存。

热室大厅地下一层中放废液和低放废液贮存罐为独立的暂存区，贮存场所设有防渗措施，自上而下防水层：（1）地面采用环氧涂层；（2）防水混凝土（结构层）；（3）双层不小于 1.5mm 厚自粘型高分子防水卷材（地下室室外防水层：一级防水）。

超重终端二层实验产生的废液收集暂存在 5L 的聚乙烯桶中，送至超重终端二层的废物储藏间中暂存，定期人工转至辐射管理中心。

辐射管理中心设置的废水暂存罐和清洗废液暂存罐，分别设置独立的暂存间，暂存间地面、墙面、顶棚采用环氧涂层装修，废水池地面、墙面采用钢覆面，顶棚采用环氧涂层装修；废水暂存罐贮存场所设有防渗措施，自上而下防水层：（1）地面采用环氧涂层；（2）防水混凝土（结构层）；（3）双层不小于 1.5mm 厚自粘型高分子防水卷材（地下室室外防水层：一级防水）。地下管沟内采用钢覆面，设置漏液监测点。

本项目分离热室产生的清洗液和浓酸中和液收集系统图见图 4-42。

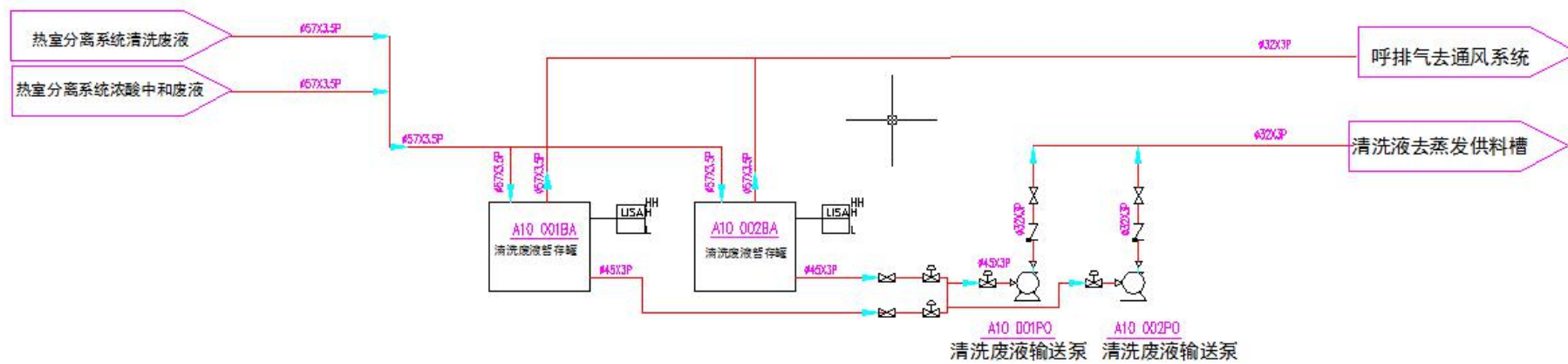


图 4-42 工艺废水中清洗液、浓酸中和液收集系统流程图

4.7.2.3 废水处理

(1) 有机废液

本项目产生的含放射性核素的有机废液，暂存在废液桶内。建设单位将根据有机废液成分，选取合适的固化剂将其送入固体废物处理单元进行固化处理。

(2) 其他放射性废液

转运至辐射管理中心的放射性废液，除有机废液外，其他放射性废液暂存一段时间后，取样分析，用泵送至蒸发设备室进行处理，该设备放射性废水的处理能量为 $0.5\text{m}^3/\text{h}$ ，净化能力为 10^4 。送入的放射性废水经预热器加热后送至由蒸发器和加热器组成的外加热式自循环蒸发器。二次蒸汽经过旋风分离器和泡罩塔（去除夹带的雾沫以提高蒸发净化系数）。经过泡罩塔的二次蒸汽排至冷凝器中冷凝，不凝气体排往通风系统。冷凝后的冷凝液经冷却器进一步冷却。冷却后的冷凝液重力排向冷凝液接收槽，取样检测总 α 和总 β 是否满足排放标准，合格后排至监测排放槽，总 α 和总 β 不能满足排放要求则进入混床除盐器，进行离子交换处理，经过处理的冷凝液排至监测排放槽暂存和检测，总 α 和总 β 合格后排。蒸残液靠重力自流至蒸残液储槽，并通过蒸残液泵送至固体废物处理单元选取合适的固化剂进行固化处理。本项目废水处理工艺主要设备参数见表 4-10。废水处理工艺见图 4-43 和图 4-44。

表 4-10 放射性废水处理设备参数一览表

序号	设备名称	主要参数及技术特性	单位	数量
1	废水暂存罐	$\phi 1520 \times 2550$ ， $V=2\text{m}^3$ ， 设计温度：常温；设计压力：常压	台	2
2	清洗废液暂存罐	$\phi 1520 \times 2550$ ， $V=2\text{m}^3$ ， 设计温度：常温；设计压力：常压	台	2
3	蒸发供料槽	$\phi 1520 \times 2550$ ， $V=2\text{m}^3$ ， 设计温度：常温；设计压力：常压	台	2
4	冷凝液接收槽	$\phi 1520 \times 2550$ ， $V=2\text{m}^3$ ， 设计温度：常温；设计压力：常压	台	2
5	冷凝液监测槽	$\phi 1520 \times 2550$ ， $V=2\text{m}^3$ ， 设计温度：常温；设计压力：常压	台	2
6	蒸残液冷却槽	$\phi 1520 \times 2550$ ， $V=2\text{m}^3$ ， 设计温度： 100°C ；设计压力：常压	台	2
7	废树脂接收槽	$\phi 1600 \times 3550$ ， 设计温度：常温；设计压力：常压	台	1

序号	设备名称	主要参数及技术特性	单位	数量
8	废树脂计量槽	Ø500X1000, V=100L 设计温度: 常温; 设计压力: 常压	台	1
9	预热器	F=4m ² , D=300mm,H=1500mm, 设计温度: 60℃; 设计压力: 常压	台	1
10	加热器	F=100m ² , D=1200mm,H=2000mm 设计温度: 133℃; 设计压力: -3kPa	台	1
11	蒸发器	处理能力: 0.5m ³ /h 设计温度: 133℃; 设计压力: -3kPa	台	1
12	冷凝器	F=12m ² , D=400mm,L=2000mm 设计温度: 100℃; 设计压力: -3kPa	台	1
13	冷却器	F=4m ² , D=300mm,L=1500mm 设计温度: 60kPa; 设计压力: -3kPa	台	1
14	板式换热器	F=15m ² , Q=25m ³ /h 设计温度: 133℃; 设计压力: 0.3MPa	台	1
15	空气预热器	N=1.0kw	台	2
16	旋风分离器	H=1.0m, D=0.5m 设计温度: 80℃; 设计压力: -3kPa	台	1
17	捕集器	H=1.0m, D=0.5m 设计温度: 80℃; 设计压力: -3kPa	台	1
18	捕集器	H=1.0m, D=0.5m 设计温度: 80℃; 设计压力: -3kPa	台	1
19	气体过滤器	H=1.0m, D=0.5m 设计温度: 80℃; 设计压力: -3kPa	台	1
20	气体过滤器	H=1.0m, D=0.5m 设计温度: 80℃; 设计压力: -3kPa	台	1
21	泡罩塔	Ø1000×2500 mm 设计温度: 133℃; 设计压力: -3kPa	台	1
22	混床除盐器	Ø512×2193 mm 设计温度: 常温; 设计压力: 0.5MPa	台	2
23	电蒸汽发生器	0.4MPa, 24kW	台	1
24	清洗废液输送泵	Q=6.3m ³ /h; H=32m; P=3.0kW;	台	2
25	低放废水输送泵	Q=6.3m ³ /h; H=32m; P=3.0kW;	台	2
26	蒸发供料泵	Q=3.6m ³ /h; H=20m; P=1.1kW;	台	2
27	达标排放泵	Q=6.3m ³ /h; H=32m; P=3.0kW;	台	2

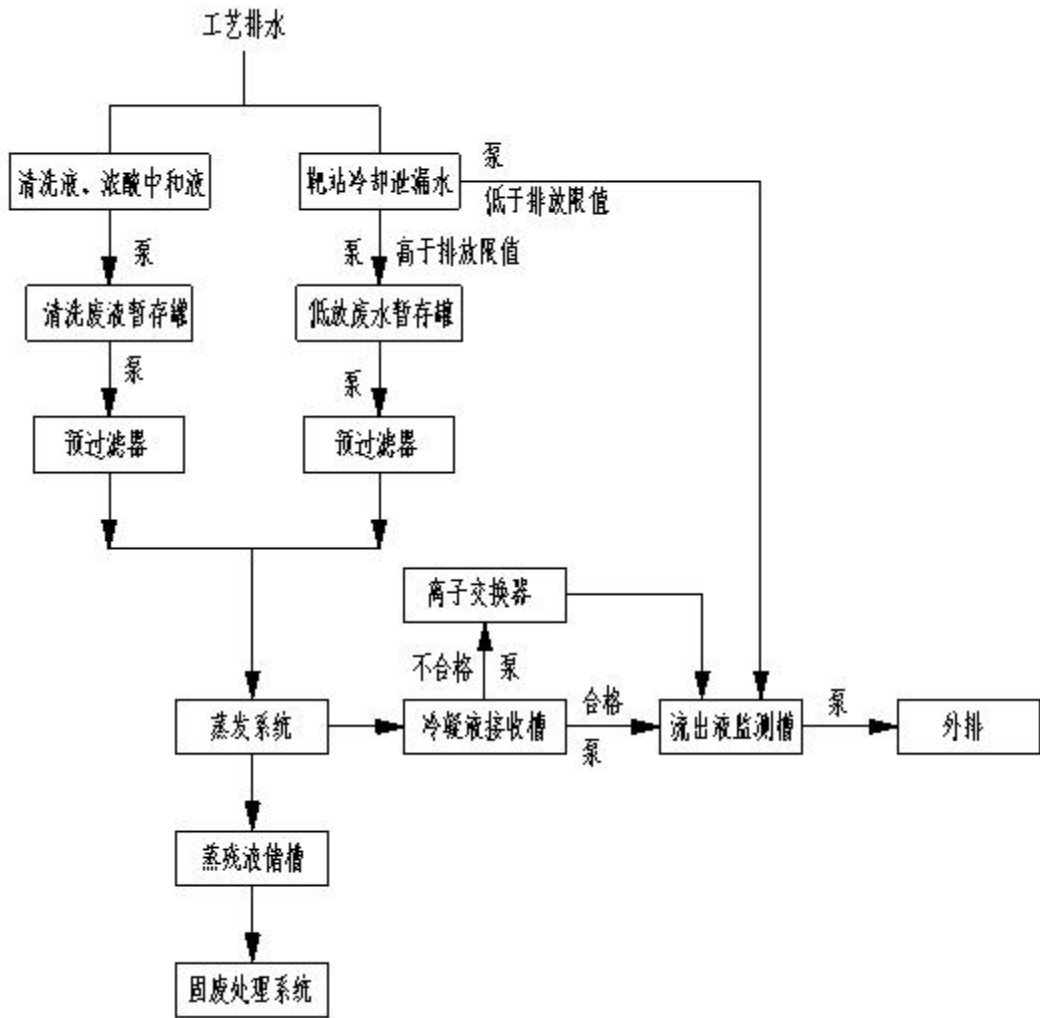


图 4-43 工艺废水处理工艺流程图

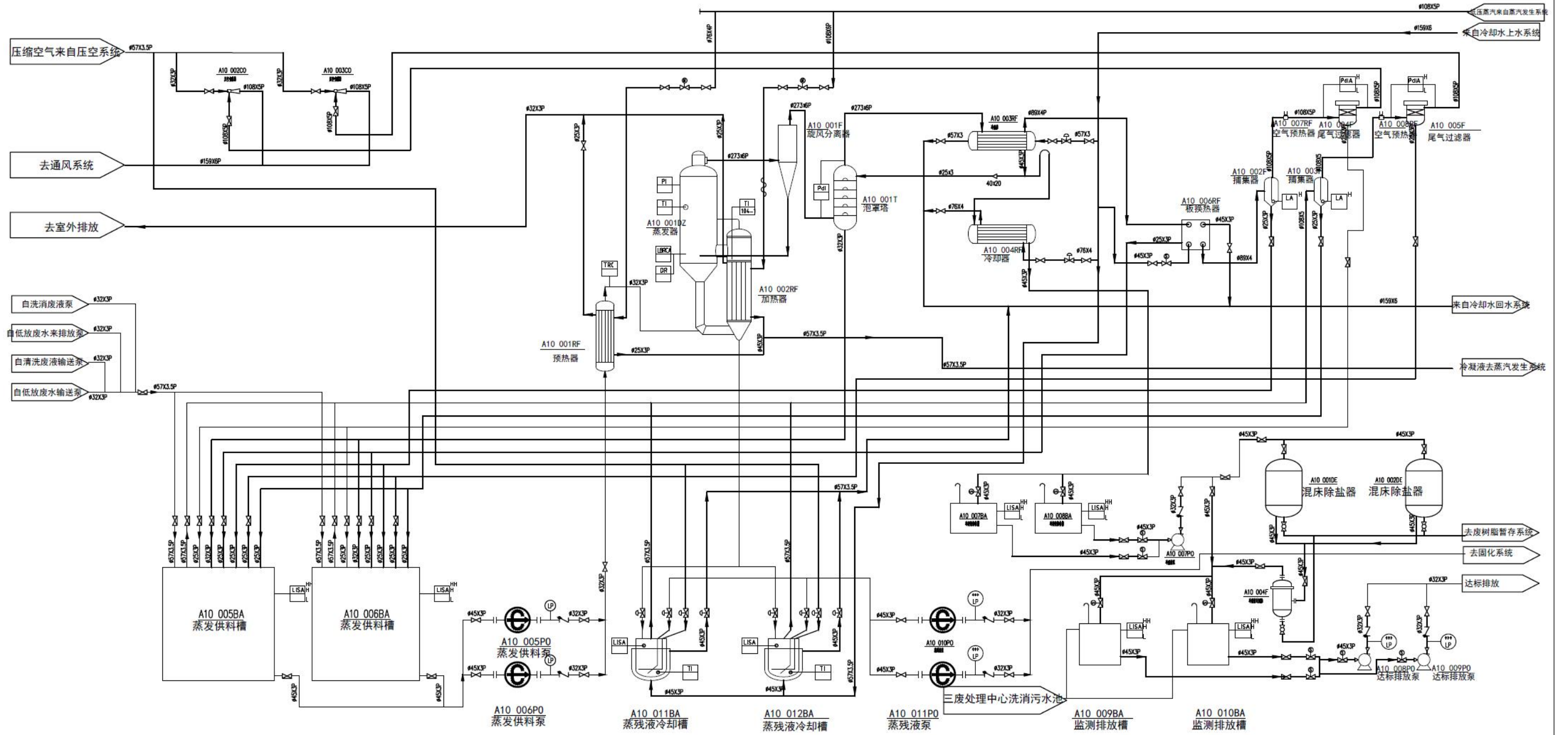


图 4-44 废水处理工艺流程图

4.7.2.4 去向

放射性废水经处理后，蒸残浓缩液以外的冷凝液经混匀、取样分析后满足污水综合排放标准总 α 、总 β 要求后排至城市污水管网。

蒸残浓缩液靠重力自流至蒸残液储槽，并通过蒸残液泵送至固体废物处理单元进行固化处理。

4.7.3 放射性固体废物及处理措施

4.7.3.1 来源

本项目运行期间，产生的放射性固体废物主要包括：（1）工艺过程产生的放射性废物，主要包括 ① ^{211}At 的生产研发过程中溶解热室中产生的封装靶件的废石墨碳管、分离热室中的废石英管/不锈钢管；② ^{68}Ge 的生产研发过程中溶解热室中产生的封装靶件的废石墨碳管、分离热室中的产生的废交换柱；③ ^{67}Cu 的生产研发过程中溶解热室中产生的封装靶件的废石墨碳管、分离纯化过程中的废交换柱；④非密封放射性实验室实验过程中产生的一次性手套、烧杯和移液枪头等；⑤辐射工作人员实验过程中的操作手套、口罩等防护用品；⑥靶站打靶过程中产生的废靶托及废靶、靶车密封件、冷却水系统中离子交换树脂和通风管道气体过滤设备；（2）实验过程中工作人员产生的劳保用品；（3）放射性废水处理过程中产生的废树脂、蒸残液等。本项目运行过程中固体废物产生量见表 4-11。

表 4-11 本项目运行过程中放射性固体废物产生量

废物流	年产生量	处理方式	废物包装 200L 桶	备注
废树脂/浓缩液固化废物	50kg	装 200L 桶	4	
废过滤器芯	50kg	装 200L 桶	30	
废靶体托盘	2400kg	装 200L 桶	15	
废靶车密封件	100kg	装 200L 桶	2	
碳管、石英管	66kg	装 200L 桶	3	
交换柱	120 个	装 200L 桶	2	
杂项干废物（软废物）	劳保服 120 套， 口罩 8400 个，鞋 套 8400 个等	装 200L 桶	23	劳保用品等
杂项干废物（不可压）		装 200L 桶	5	试剂瓶等

靶站产生的固体废物将收集暂存在固体废物暂存间，分离热室实验过程中产

生的工艺废物将收集运至地下一层的暂存室暂存，定期检测后，固体废物通过靶站热室后区顶部吊装孔调运至汽车门斗内，再经过场内废物运输车转运至辐射管理中心物流大厅。产生的劳保用品等其他废物将打包进行预压处理后，装入 200L 金属桶内，封盖，送往辐射管理中心暂存。

4.7.3.2 处理措施

固体废物处理系统包括：废物收集和贮存部分（包括废树脂容器、废过滤器芯、金属废物、水泥固化桶、杂项废物桶）、废物处理部分（包括固化装置、混合配料装置、固化桶养护）。

（1）废物收集和贮存部分

废物收集和贮存部分包括接收本子项产生的废树脂及其他子项转运来的废树脂储存容器，废过滤器芯、金属废物、劳保废物等废物桶。为便于统一管理和吊运，用于固体废物收集的废物桶统一规格为 200L 钢桶。

在辐射管理中心地下一层设有固废暂存区，根据所贮存废物包特性不同分为：金属废物贮存区、蒸残液固化体暂存区、废树脂固化体暂存区和杂项废物暂存区、备用贮存区。不同贮存区分隔处设置标志物区分。备用贮存区用于贮存可能出现的表面剂量率比较高的废物桶。

废物桶暂存区设有 1 台数控悬挂起重机，起重量为 5t，用于对 200L 废物桶的接收、暂存和转运。

为使操作人员受到的放射性照射尽可能小，废物桶所有的运输和堆码均在吊车控制室进行远距离遥控操作，并可由监视器系统进行监督。

（2）废物处理部分

蒸残液储槽内的浓缩液经暂存后排入固化操作单元浓缩液计量槽，计量后送入固化热室的钢桶内，通过桶内搅拌器与合适的固化剂混合均匀后，进行固化。固化后固化体通过轨道输送至养护区静置、养护，养护时间结束由废物收集和暂存部分的吊车转运至废物桶暂存区暂存。蒸残液处理工艺流程方框图见图 4-45。

废树脂暂存衰变后，取样检测，对符合清洁解控条件的树脂及时申请解控，

对不满足解控条件的废树脂选取合适的固化剂固化处理，在固化热室进行固化。固化体通过轨道输送至养护区静置、养护，养护结束由废物收集和暂存部分的吊车转运至废物桶暂存区暂存。废树脂处理工艺流程方框图见图 4-46。

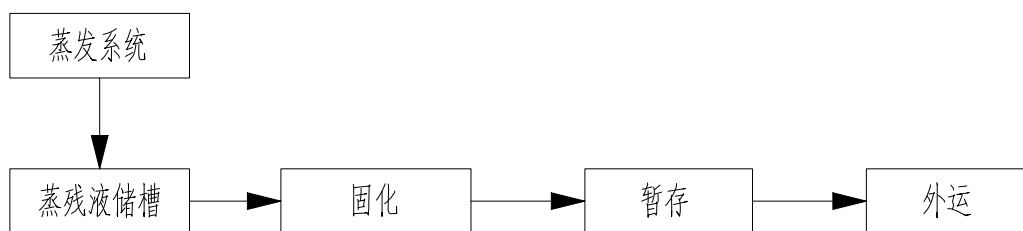


图 4-45 蒸残液处理工艺流程方框图



图 4-46 废树脂处理工艺流程方框图

固体废物处理流程图见图 4-47。

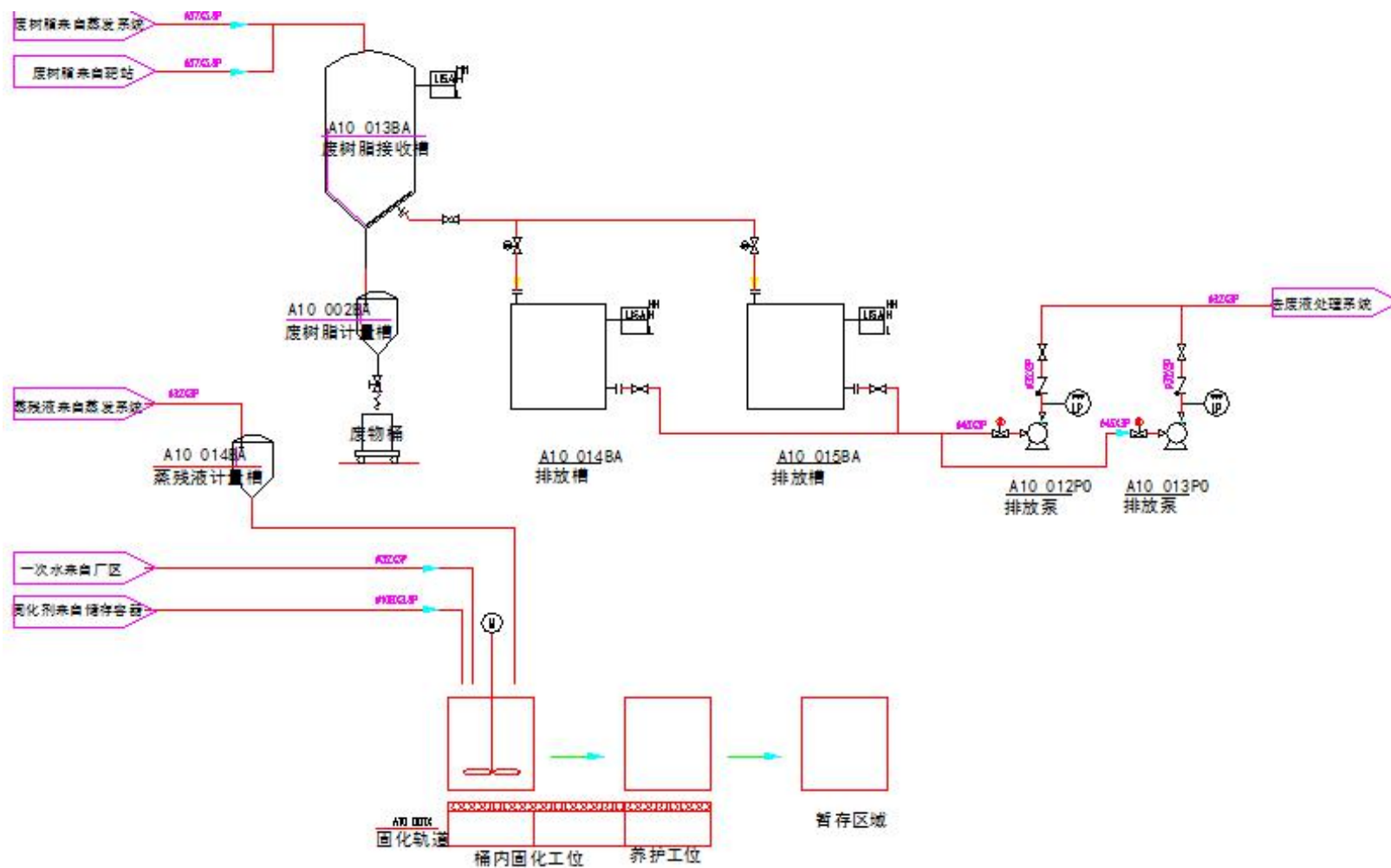


图 4-47 固体废物处理流程图

4.7.3.3 最终去向

对其中放射性活度比较低的干废物（如废过滤器芯），一般经贮存衰变后，可申请清洁解控处理。而对无法实施解控的放射性废物（如废靶体托盘、废靶车密封件等），当其包装容器符合要求且满足接收方的接收标准后送有资质单位贮存。

本项目废物桶为 200L 钢桶，装有放射性废物的废物桶满足以下条件：

（1）产生的放射性废物分类收集，并在废物桶表面贴上标签，标注该废物桶表面辐射水平、重量、生产工艺、主要核素、废物产生日期。

（2） α 废物先用 200L 缩口碳钢桶包装，再用 200L 不锈钢桶封焊包装。容积不超过 85%，质量不超过 400Kg。

（3）废物桶外表面完整，无破损。废物桶外表面辐射水平：废物桶外表面任意一点处 γ 剂量率必须 $\leq 2\text{mSv/h}$ ，1m 外任意一点的 γ 剂量率 $< 0.1\text{mSv/h}$ ，表面污染水平： $\alpha < 0.4\text{Bq/cm}^2$ ， $\beta < 4\text{Bq/cm}^2$ 。

（3）含氚废物使用专用包装容器。

（4）直接操作进行装卸、搬用、贮存和处置的底/中水平放射性固体废物包，其中外表面上任意一点的剂量率 $\leq 2.0\text{mSv/h}$ ；包装表面污染限制 β 、 γ 发射体、底毒性 α 发射体 4Bq/cm^2 ，其它 α 发射体 0.4Bq/cm^2 ；废物中易裂变物质含量必须小于 15g；废物包中游离液体的重量应小于 1%。

4.8 服务期满后的环境保护措施

本项目运行期结束后，建设单位将编制相应的退役方案、制定退役目标，确保放射性废物得到安全、妥善处理，并按照国家相关法律法规及标准完成该放射性工作场所服务期满后的退役工作。

5 环境影响分析

5.1 建设阶段环境影响分析

5.1.1 施工期大气环境影响分析

施工期产生的废气主要包括土建施工过程产生的扬尘、车辆机械运行产生的尾气。

根据有关研究资料，施工扬尘的起尘量与许多因素有关，挖土机等在工作时的起尘量与挖坑深度、挖土机抓斗与地面的相对高度、风速、土壤的颗粒度、土壤含水量等因素有关。对于渣土堆场而言，起尘量还与堆放方式、启动风速及堆场有无防护措施等有关。国内研究结果和类比调查表明，在启动风速以上，影响起尘量的主要因素分别为：防护措施、风速、土壤湿度、挖土方式或土堆的堆放方式等。在不同的风速和稳定度下，挖土的扬尘对环境的浓度贡献都较大。但随着距离的增加，浓度贡献衰减很快。在土壤湿度较大的情况下，其浓度贡献大的区域一般在施工现场 100 米以内。建议采取以下施工期大气污染防治措施：

(1) 工程施工产生扬尘污染活动的相关责任主体，应当采取扬尘污染防治措施，并做到方案完善、措施有效、手续齐全、人员落实、监控到位和资源配置齐全。

(2) 工程施工现场扬尘污染防治应当做到工地周边围挡、物料堆放覆盖、路面硬化、土方开挖湿法作业、出入车辆清洗、渣土车辆密闭运输。

(3) 施工期间，应在物料、渣土、垃圾运输车辆的出口内侧设置洗车平台，车辆驶离工地前，应在洗车平台清洗轮胎及车身，不得带泥上路。

(4) 施工期间，应当对工地建筑结构脚手架外侧设置密目防尘网或防尘布。

(5) 施工现场建筑材料实行集中、分类堆放。施工现场禁止焚烧沥青、油毡、橡胶、垃圾等易产生有毒有害烟尘和恶臭气体的物质。

(6) 物料、渣土、垃圾运输车辆，应采用密闭车斗，保证物料不遗撒外漏。建筑垃圾、工程渣土等应当及时清运，在 48 小时内未能清运的，应当在施工工地内设

置临时堆放场内临时堆放，临时堆放场应采取围挡、遮盖等有效防尘措施。

(7) 施工过程中使用水泥、石灰、砂石、涂料、铺装材料等易产生扬尘的材料，应当密闭存储。若工地内堆放，应当采用防尘布苫盖，或采取其他有效的防尘措施。需使用混凝土的，应当使用预拌商品混凝土，或者进行密闭搅拌并采取相应的扬尘防治措施，不得现场露天搅拌混凝土、消化石灰及拌石灰土等。

(8) 施工工地内及工地出口至铺装道路间的车行道路应铺设钢板、混凝土、细石等材料，并辅以洒水、喷洒抑尘剂等措施。施工工地道路积尘可采用吸尘或水冲洗的方法清洁路面。

项目施工期会增加施工现场的起尘量，但是施工期相对较短，施工活动引起粉尘、扬尘增加仅在施工区内和周围地区，对项目周边环境空气质量影响较小。

5.1.2 施工期水环境影响分析

施工过程中产生的废水主要为施工人员排放的生活污水和施工作业产生的废水。

施工废水主要产生于施工机械清洗等，废水中主要污染物为泥沙、悬浮物等。施工期可在场区设置简易沉淀池，施工废水经沉淀池处理后回用，不外排。

本项目施工人员排放的生活污水和城市居民生活污水水质相似，污水中主要污染物为 pH、SS、COD、BOD 等。污水经化粪池初步处理后排入市政污水管网。

采取这些措施以后，施工期产生的污水对环境的影响会降到最低水平，施工期产生的废水其对环境的影响是短暂的，一旦施工结束，其影响随之消失。

5.1.3 施工期噪声环境影响分析

施工期的噪声包括施工现场的各类机械设备噪声及物料运输时运输车辆产生的交通噪声，本项目施工期的主要噪声源以施工机械噪声为主，运输车辆辐射噪声为辅。

施工机械噪声可近似视为点声源处理，根据点声源噪声衰减模式，估计距离声源不同距离处的噪声值，预测模式如下：

$$L_p(r) = L_p(r_0) - 20 \lg(r / r_0)$$

式中： $L_P(r)$ —距声源 r 处的 A 声级，dB(A)；

$L_P(r_0)$ —参考位置 r_0 处（声源）的 A 声级，dB(A)；

根据上述计算模式，得出施工期距施工机械不同距离处的噪声值见表 5-1。

表 5-1 施工期距施工机械不同距离处的噪声值 单位：dB(A)

施工设备名称	5m	10m	20m	50m	100m	150m	200m
液压挖掘机	86	80	74	66	60	56	54
轮式装载机	93	87	81	73	67	63	61
推土机	86	80	74	66	60	56	54
重型运输车	86	80	74	66	60	56	54
静力压桩机	73	67	61	53	47	43	41
混凝土输送泵	92	86	80	72	66	62	60
风镐	90	84	78	70	64	60	58
压路机	85	79	73	65	59	55	53
木工电锯	96	90	84	76	70	66	64
商砼搅拌车	88	82	76	68	62	58	56
云石机、角磨机	93	87	81	73	67	63	61

根据《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）的规定，施工场界昼间的噪声值为 70dB(A)，夜间限值为 55 dB(A)，从表 5-1 可知，昼间施工机械在距施工机械 100m 外可以达到标准限值。

由于施工机械噪音强度较大，对周边环境有一定影响，本工程在施工期间应采取如下降噪措施：

（1）合理安排施工时间

制定施工计划，避免大量高噪音设备同时施工，严禁夜间施工。

（2）降低设备噪音

设备选型上尽量采用低噪声设备；对动力机械设备进行定期的维修、养护，防止松动部件的振动或消声器的损坏而增加其工作时声级；闲置不用的设备应及时关闭，运输车辆进入现场应减速，并减少鸣笛。

（3）合理布局施工场地

施工时应在工程条件允许的前提下，尽量避免将高噪声设备布置在施工工地临近敏感点的区域。

（4）降低人为噪音

按规定操作机械设备；模板、支架拆卸过程中，遵守作业规定，减少碰撞噪音。

5.1.4 施工期固废环境影响分析

施工现场的固体废物主要来源于施工过程中产生的建筑垃圾及生活垃圾等。建筑废料其数量比较多，包括施工中砖、水泥、钢材等废料，将其中可回收的部分回收作为建筑材料进行再利用，其余的运送至渣土堆放场统一处理，以免造成环境污染和物质浪费。

施工人员将产生的少量生活垃圾，平均每人每天 0.5kg 左右。施工场地临时宿营地应自建垃圾箱，定时清运。

项目施工期较短，采取如上措施后，施工期产生的建筑垃圾及生活垃圾对环境的影响较小。

5.1.5 生态环境影响分析

本项目位于兰州新区规划的科研用地范围内，其项目的建设对场所内现有地表植物造成一定的破坏，不会造成当地生物量大量减少和生物多样性的破坏。另外，随着施工建设结束，场所内将进行人工绿化，因此，本项目建设对当地的生态影响是可以接受的。

5.2 正常运行阶段影响分析

5.2.1 非放射性环境影响分析

5.2.1.1 大气环境影响分析

加速器运行会产生少量 O_3 和 NO_2 ，其是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。对质子和超重离子加速器而言，其辐射场主要为中子辐射，光子产额很小。且质子和重离子的质量比电子的质量高几个量级。因此，对质子和重离子加速器，其 O_3 和 NO_2 很小，对环境影响可忽略不计。

5.2.1.2 水环境影响分析

营运期间水污染源主要是工作人员日常生活。产生的污水主要为职工沐浴、冲厕等盥洗废水，废水水质较简单，项目建成后约有工作人员 200 人，按每人每天给水量 80L，排水系数 0.85，年工作 250 天计，共产生生活污水 13.6m³/d，生活污水排入化粪池处理，达到《污水排入城镇下水水质标准》（GB/T31962-2015）表 1 中 B 等级要求后，排入兰州新区市政污水管网，接新区污水处理厂。

兰州新区现有第一污水处理厂，位于兰州新区规划用地的西南侧，已于 2015 年初投产运行，主要收集兰州新区工业废水和生活污水。工程设计近期(2020 年)日处理污水 20 万 m³/d。

以上分析可知，本项目营运期排放污水 13.6m³/d，仅占其处理能力的 0.007%，本项目产生非放射性废水由新区水处理厂处理是可行的，且不会对水环境产生明显影响。

5.2.1.3 噪声环境影响分析

本项目噪声主要来源于风机、水泵、空调机组、冷却塔等设备运行产生的噪音，为减少项目噪声对环境的影响，建设单位拟采取以下措施：

(1) 选用低噪声设备，降低设备噪声源强；

(2) 设备安装时采取基础减振、部分风机安装消音箱等；

(3) 风机设置消声器、水泵进出管设可曲绕橡胶接头，出水管等采用消声止回阀，防止共振等噪声；

(4) 加强设备管理和维修、确保设备正常运行。

(二) 噪声预测

根据《环境评价技术导则 声环境》（HJ2.4—2009）推荐的方法，可以把上述声源当作点声源处理，等效点声源位置在声源本身的中心。

(1) 点声源几何发散在预测点（厂界处）产生的 A 声级的计算：

$$L_p(r) = L_p(r_0) - 20 \lg(r/r_0) - A_{bar}$$

式中： $L_P(r)$ —距声源 r 处（厂界处）的 A 声级，dB(A)；

$L_P(r_0)$ —参考位置 r_0 处（声源）的 A 声级，dB(A)；

A_{bar} —声屏障引起的倍频带衰减（建筑隔声），dB；

(2) 预测点的预测等效声级 (L_{eq}) 计算公式：

$$L_{eq} = 10 \lg(10^{0.1L_{eqa}} + 10^{0.1L_{eqb}})$$

项目噪声预测结果详见表 5-2。

表 5-2 项目厂界及敏感目标噪声预测结果

序号	预测点位	贡献值 dB (A)		
1	项目厂界东侧 1m 处	35.9		
2	项目厂界南侧 1m 处	22.4		
3	项目厂界西侧 1m 处	20.5		
4	项目厂界北侧 1m 处	40.5		
序号	预测敏感点位	贡献值 dB (A)	预测值 dB (A)	
			昼间	夜间
1	项目厂界东北侧 130m 外在建小区	24.3	48.2	33.9
2	厂界东侧 70m 外在建会展中心	28.8	49.8	32.2
3	厂界南侧 90m 外朱雀湖别墅区	20.7	42.6	35.8

由以上分析可知，经过各种降噪措施，项目厂界噪声排放符合《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348—2008)中的 4 类标准（昼间：70dB (A)，夜间 55dB (A)）的要求。通过预测，本项目运营期北侧在建小区和东侧在建会展中心的预测值符合《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 2 类标准（昼间：60 dB (A)，夜间 50dB (A)）的要求；项目运营期南侧朱雀湖别墅区的预测值符合《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 1 类标准（昼间：55dB (A)，夜间 45dB (A)）的要求；另外，本项目与敏感点之间为城市主要交通道路，其道路运输车辆噪声产生影响远远高于本项目造成的影响。

5.2.1.4 固体废物环境影响分析

项目运营期产生的固体废物主要为工作人员日常生活产生的生活垃圾。建成后员工人数约 200 人，生活垃圾产量按 0.5kg/人·d，年工作时间按 250 天计，则工作人员生活垃圾排放量 25t/a。生活垃圾通过场所内设置的垃圾桶集中收集后，由环卫部

门统一拉运至生活垃圾填埋场处置。因此，固体废物对项目及环境的影响较小。

5.2.1.5 环境风险分析

本项目运营期使用的风险物质远远小于其临界量，发生灾难性事故很小；另外，为减少风险事故发生可能性，应采取以下措施：

(1) 化学品贮存场所应配备专业技术人员负责管理，做好化学品入库、出库、取用登记台账。同时配备必要的个人防护用品。

(2) 应制定化学品泄漏物和包装物的废弃处理程序，加强对废弃物的管理。凡有化学危险物品存放、使用场所，都应在醒目位置张贴《安全须知卡》。

(3) 化学品贮存场所应建立检查制度，定期进行全面检查，检查是否有泄漏现象。

(4) 库内物质应分类存放，禁忌混合存放。易燃物与毒害物应分隔存放。库房内加强通风。

对于盐酸、硝酸等腐蚀性化学品，应放置于有通风的阴凉地方，远离禁忌物工作场所，贮存地区设有防腐蚀地板，进行重点防渗处理，设有防渗漏收集装置，当液体原料发生泄漏时，及时收集处置必要时迅速撤离泄漏污染区人员至安全区。人员操作时，应穿戴防护服、手套、和眼镜等防护措施。

对于丙酮、甲苯等等有毒有害、易燃易爆危险物品，将分别储存于密封的容器内，放置于有通风的阴凉地方，防止阳光直射，远离火源，照明装置和通风装置应采用防爆型。人员操作时，应穿戴防护服、手套，工作现场禁止吸烟。

(5) 设灭火设备及警示标语，区域内禁止烟火，配备一定数量的灭火器材；应配备专业管理人员及技术人员，并建立完善的安全生产规章制度和操作规程，严格按照操作规程操作。

5.2.2 辐射环境影响分析

5.2.2.1 屏蔽体外剂量率水平

本项目屏蔽体外剂量率主要为加速器隧道屏蔽体外、超重终端充气反冲谱仪实

验间屏蔽体外、靶站靶件照射室、转运热室和过渡热室屏蔽体外，分离热室、 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备工作箱体外以及超重终端手套箱屏蔽体外剂量率水平。

5.2.2.1.1 超重装置加速器隧道和充气反冲谱仪实验间

(1) 源项

① 束流调试阶段

为保障束流的稳定，在实验开始前需要对束流进行调试，超重加速器废束桶束流损失 $10\mu\text{A}$ ，离子为 Fe，能量 7MeV/u 。超重调试阶段束流将打到低能传输隧道终端的废束桶上，废束桶体材料为 Al6061，厚度为 3mm，局部屏蔽体外为 1 米混凝土墙隧道。

② 正常运行阶段

离子源引出束流能量 10keV/u ，束流经过 LEBT 匹配到常温 RFQ 入口，被 RFQ 加速到 1.33MeV/u ，然后接超导 HWR 腔将束流继续加速到 7MeV/u 。屏蔽计算选取离子为 Fe，能量 7MeV/u ，加速器隧道内离子均匀损失在管壁，最大损失流强 1w/m ，管壁材料为 316 不锈钢，束流终端靶材料为 Ta 靶，厚度 5mm，终端损失流强为 $10\mu\text{A}$ 。

(2) 场所辐射水平

采用 FLUKA 模拟计算束流调试阶段和正常运行时超重加速器隧道及充气反冲谱仪实验间剂量率水平。

① 束流调试阶段

模型设置：束流调试阶段加速器隧道及其周围、屋顶及地面混凝土厚度 1m，废束桶外围为 10cm 的铁和 80cm 的聚乙烯做局部屏蔽体，铁离子： 7MeV/u ，束流损失 $10\mu\text{A}$ ，废束桶体材料为 Al6061，模拟计算结果见图 5-1。

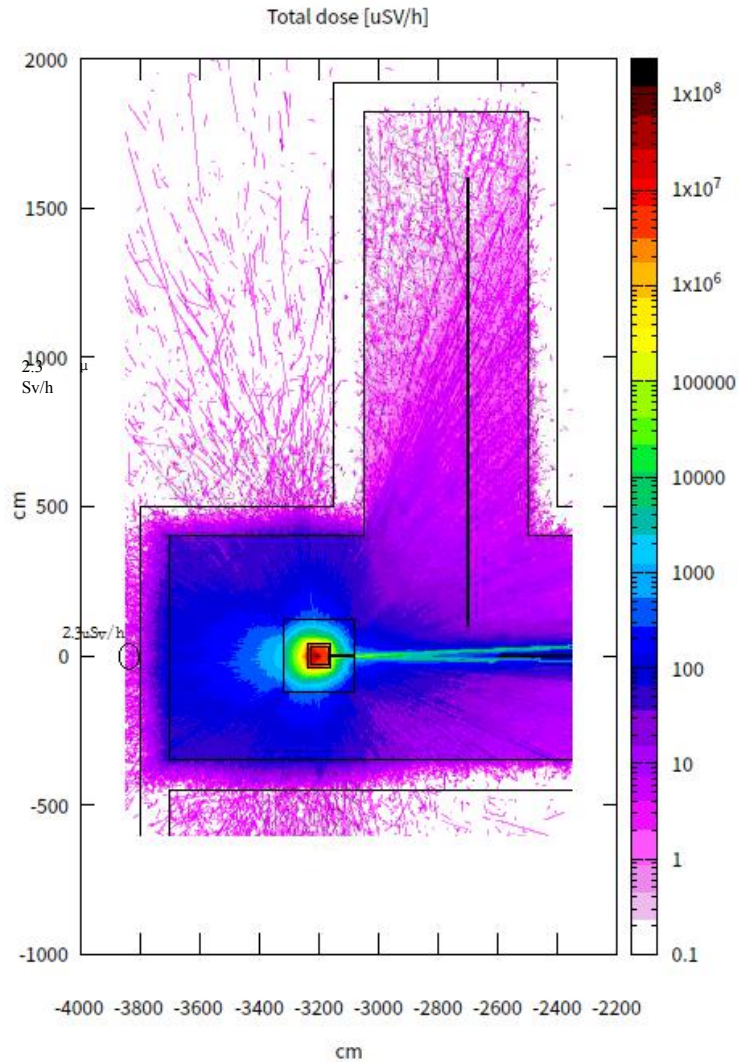


图 5-1 调束阶段周围剂量分布

从计算结果可知，超重装置调试阶段其周围屏蔽体外 30cm 处剂量率最大值为 $2.3\mu\text{Sv/h}$ ，小于剂量率控制值 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

② 正常运行阶段

模型设置：超重装置使用的加速器其隧道周围混凝土厚 1m，层高 8m，顶板为 1m，铁离子：7MeV/u，加速器隧道内离子均匀损失在管壁，最大损失流强 1w/m ，管壁材料为 316 不锈钢，束流终端靶材料为 Ta 靶，厚度 5mm，终端损失流强为 $10\text{p}\mu\text{A}$ 。

超重加速器隧道剂量率水平模拟计算结果见图 5-2 和图 5-3。

从图 5-2 和图 5-3 可知，超重装置加速器隧道四周屏蔽体外 30cm 处、迷道门外

30cm 处、屋顶剂量率水平不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ ，小于剂量率控制值 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

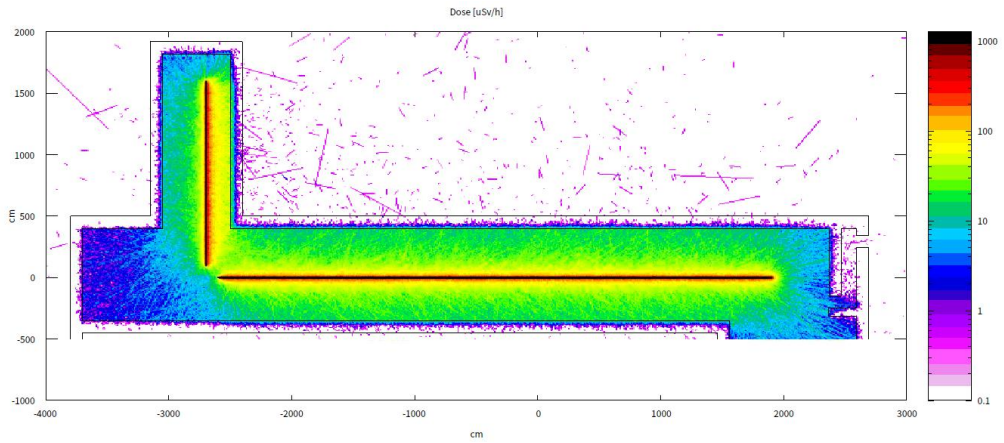


图 5-2 超重装置加速器隧道四周剂量率水平模拟计算结果

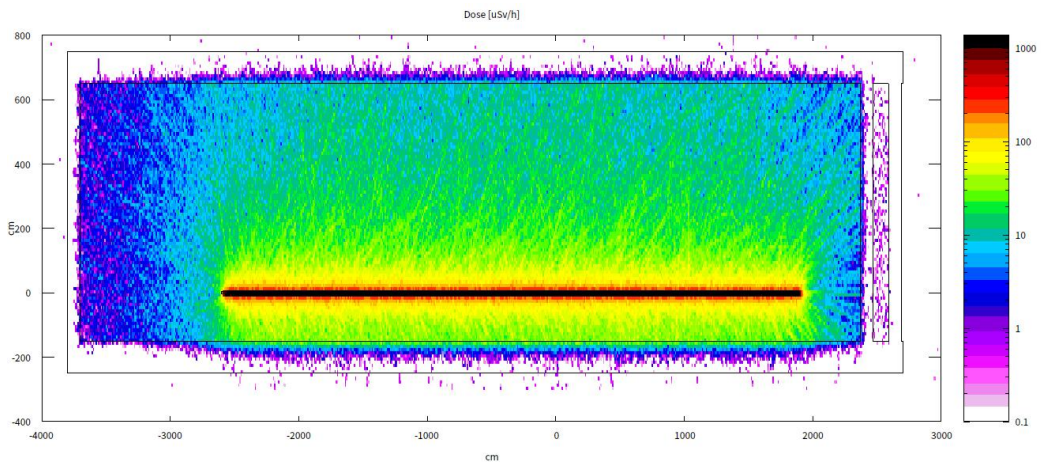


图 5-3 超重装置加速器隧道屋顶及底部剂量率水平模拟计算结果

充气反冲谱仪实验间模拟计算结果见图 5-4 和图 5-5。从图中可知，超重终端四周屏蔽体外 30cm 处剂量率水平不超过 $2.3\mu\text{Sv/h}$ ，防护门外 30cm 处剂量率水平不超过 $0.5\mu\text{Sv/h}$ ，A-A 剖面屋顶剂量率最大值为 $2.3\mu\text{Sv/h}$ ，B-B 剖面屋顶剂量率最大为 $0.4\mu\text{Sv/h}$ ，满足屏蔽体外剂量率控制值 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

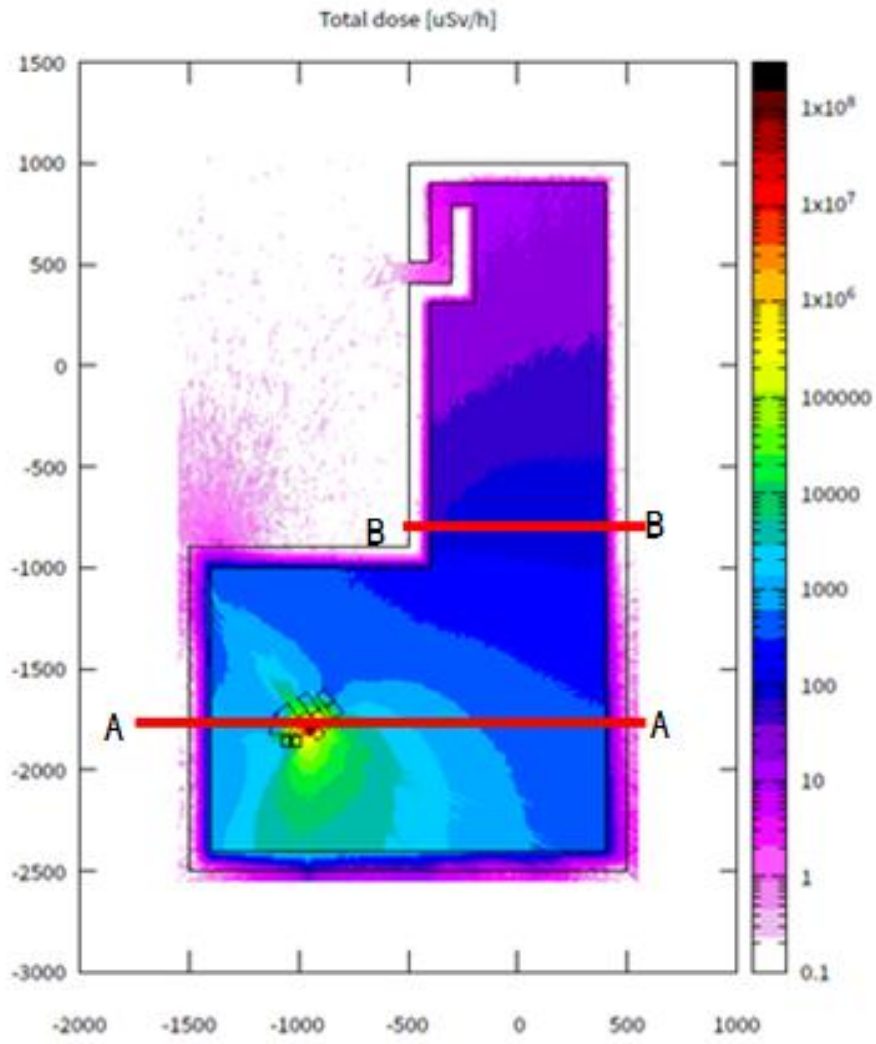
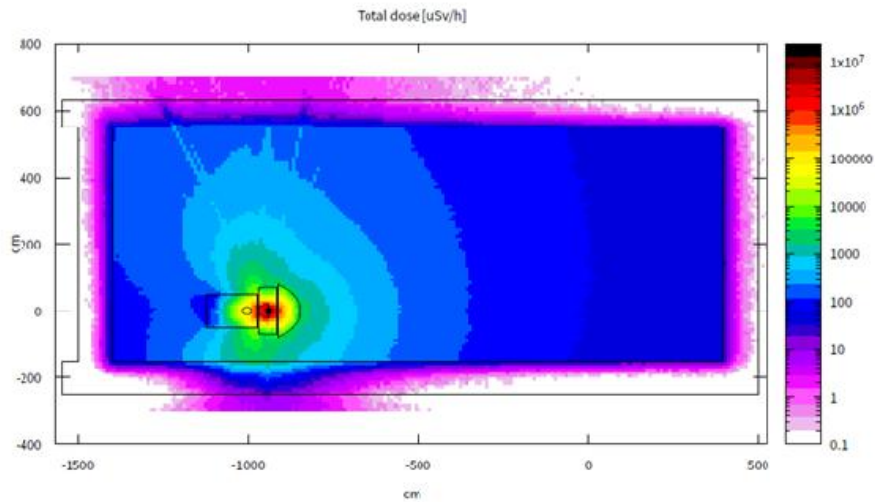
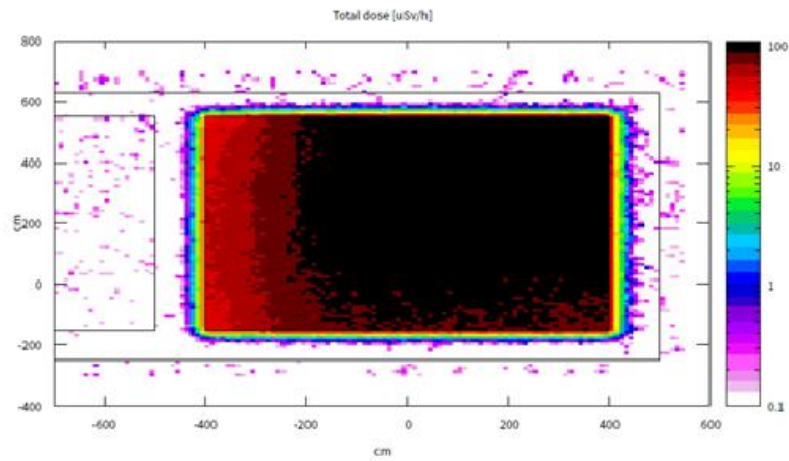


图 5-4 超重束流终端四周剂量率模拟计算结果



A-A束流剖面



B-B束流剖面

图 5-5 超重束流终端顶部剂量率模拟计算结果

5.2.2.1.2 同位素生产装置加速器隧道及靶站

(1) 辐射源项介绍

① 束流调试阶段

同位素生产时，束流调试分两种情景：①调试期间，需要长时间大功率运行，75kW 满功率调试 10 小时，束流调试稳定后再没有大流强打靶。②正常运行时；在换靶期间小功率运行，束流为 1 μ A 打在废束桶，约几十分钟~1 小时，换靶结束后束流直接调到靶上打靶。保守采用第①种进行计算。

该束流调试阶段，其废束桶体材料为 Al6061，厚度为 3mm，局部屏蔽：废束桶四周内层 20cmPb，外层 40cm 聚乙烯，最外层 20cm Fe，废束桶入口处设有 60cm 的聚乙烯。

② 正常运行阶段

同位素应用研发装置加速器的离子源引出束流能量 20keV，最大流强质子 10mA， α 离子 1mA。束流经过 LEBT 匹配到常温 RFQ 入口，被 RFQ 加速到 1.5MeV/u，然后接超导 HWR 腔将束流继续加速到质子最大能为 25MeV、氦离子最大能量为 29MeV。

根据靶件辐照能量的需求，本项目运行期间对三个靶件进行辐照，其单次辐照时间和能量情况见表 5-3。根据质子和氦离子打不同靶中子产额及能量情况，保守选取 25MeV 质子，加速器隧道内离子均匀损失在管壁，管壁材料为不锈钢，靶站取 Ga 靶，厚度为 2mm，流强为 2mA。

表 5-3 各靶件辐照情况

靶件	离子	最大能量	最大束流	单次辐照时间
^{209}Bi 靶	氦离子	29MeV	2mA	20h
天然 Ga 靶	质子	25 MeV	2mA	10 天
天然 Zn 靶	质子	25 MeV	2mA	5 天

(2) 场所辐射水平

采用 MCNP 和 FLUKA 模拟计算加速器隧道及靶站剂量率水平。

① 束流调试阶段

模型设置：25MeV 加速器，废束桶功率为 75kW，Al6061 的废束桶，厚度为 3mm，废束桶四周内层 20cmPb，外层 40cm 聚乙烯，最外层 20cmFe，废束桶入口处设置了 60cm 的聚乙烯，局部屏蔽体外为混凝土墙。屏蔽模拟计算结果见图 5-6。

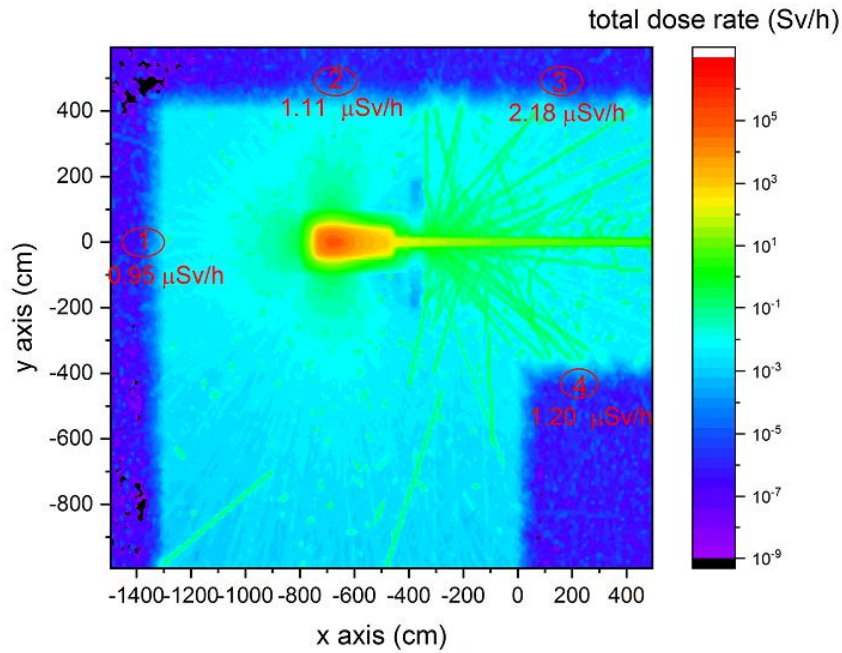


图 5-6 束流调试阶段剂量率模拟计算结果

从图 5-6 可知，25MeV 加速器在调试阶段，人员可能出现位置屏蔽体外剂量率水平平均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

② 正常运行阶段

模型设置：同位素研发装置使用的加速器其隧道周围混凝土厚 1m，净高 7m，顶板为 1m 混凝土，靶件照射室四周、屋顶为 2.8m 混凝土，底部为 30cm 混凝土，25MeV 质子，束流均匀损失，加速器隧道为均匀损失在管壁，损失流强 1w/m ，管壁材料为不锈钢，靶站靶材料为 Ga 靶，厚度为 2mm，流强为 2mA。

加速器隧道四周屏蔽体外剂量率水平模拟计算结果见图 5-7 和图 5-8。

从图中可以看出，同位素研发装置加速器四周墙体外 30cm 处、迷道门外 30cm 处、屋顶剂量率水平平均低于 $2.0\mu\text{Sv/h}$ ，满足剂量率控制值 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 要求。

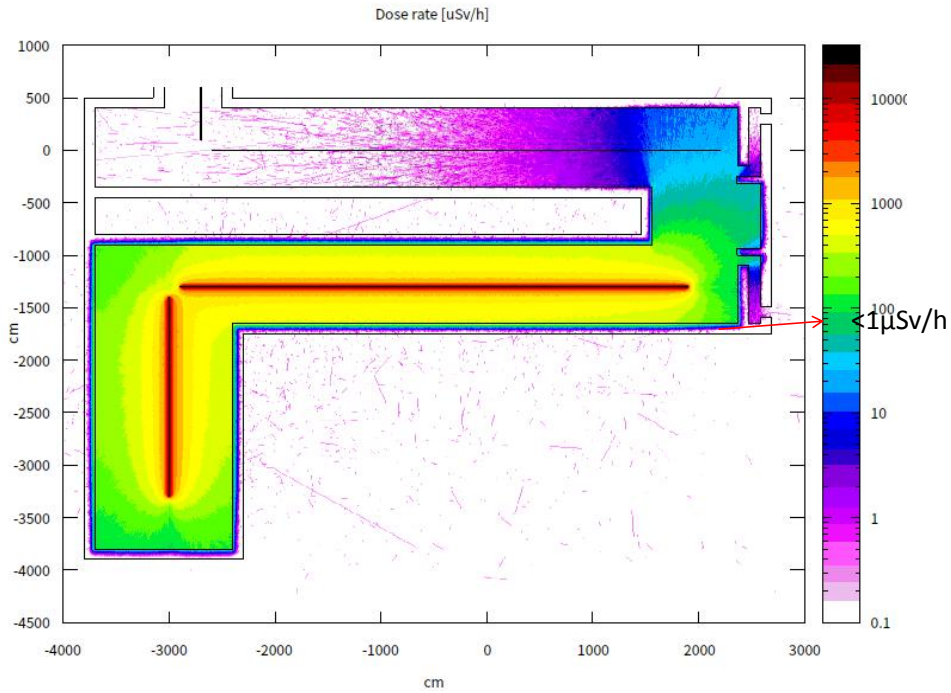


图 5-7 同位素研发装置加速器隧道剂量率水平模拟计算结果

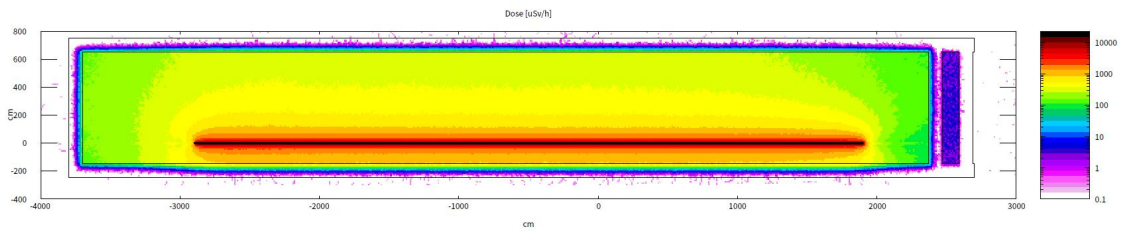


图 5-8 同位素研发装置加速器隧道顶部剂量率水平模拟计算结果

靶件照射室模拟计算结果见图 5-9 和图 5-10。从图中可以看出，其四周屏蔽体外 30cm 处剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，满足剂量率控制值 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 要求。

靶站转运热室模拟计算结果见图 5-11，从图中可以看出，其四周屏蔽体外 30cm 处剂量率不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ ，满足剂量率控制值 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 要求。

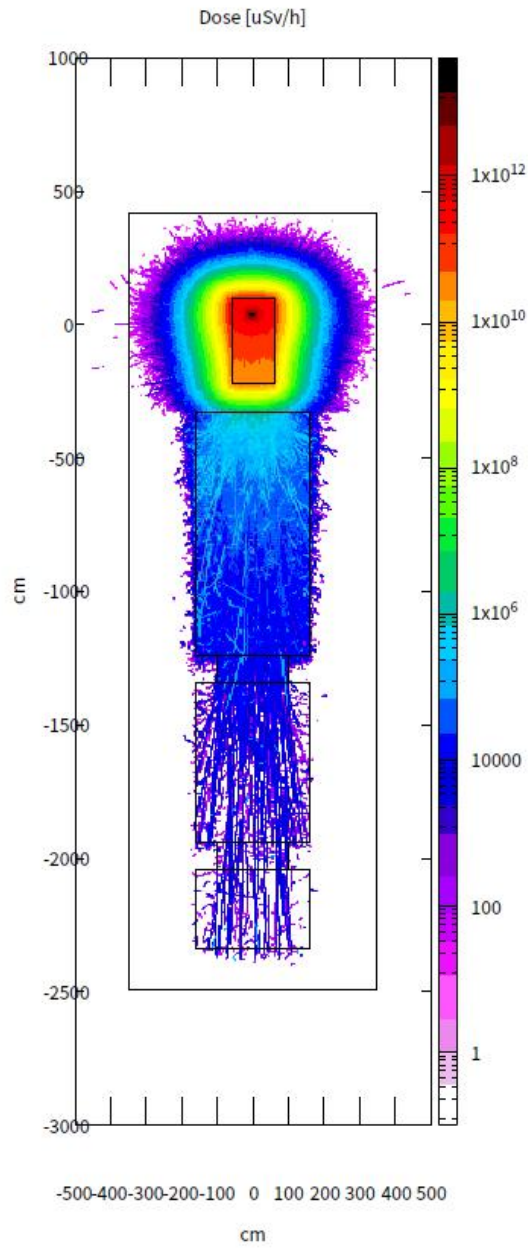


图 5-9 靶站靶件照射室四周模拟计算结果

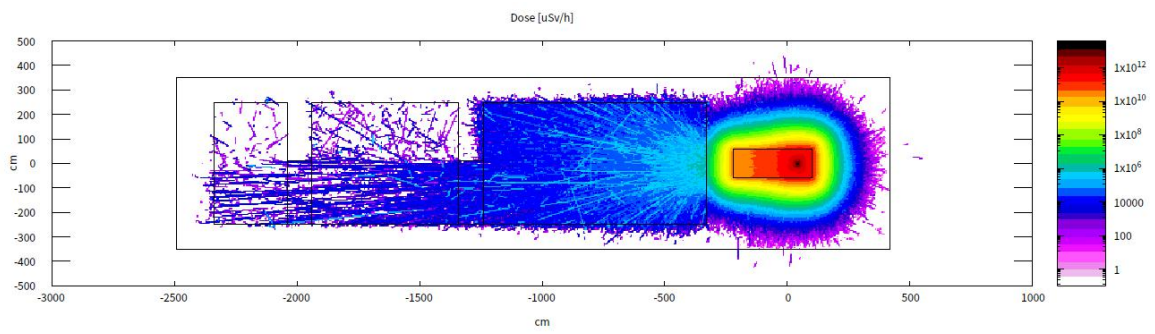


图 5-10 靶站靶件顶部及底部模拟计算结果

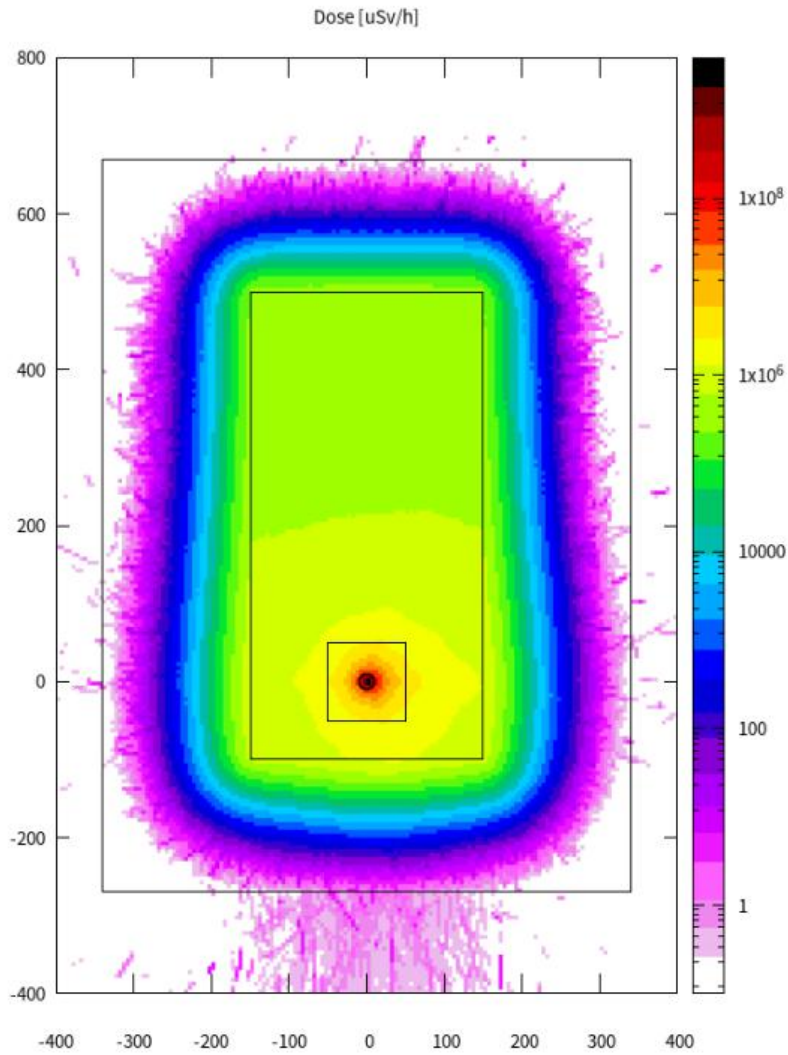


图 5-11 转运热室模拟计算结果

5.2.2.1.3 热室大厅

该场所屏蔽体外剂量率主要为一层分离热室屏蔽体外和二层 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究工作箱体剂量率水平。

(1) 源项

本项目热室主要有一层分离热室和二层 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备的工作箱

① 分离热室

分离热室将操作 3 种靶件，各种靶件及碳管的操作活度见表 5-4、表 5-5、表 5-6 和表 5-7。

表 5-4 石墨碳管中的核素活度及其特征

核素	20 个石墨碳管; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线; keV
^{13}N	2.71E+08	9.96min	ec/ β +	511
^{11}C	2.40E+09	20.36min	ec/ β +	511
^7Be	3.40E+05	53.3d	ec	477
^3H	1.72E+05	12.32a	β -	/

表 5-5 ^{209}Bi 靶中的核素活度及其特征

核素	20 个靶活度; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线; keV
^{211}At	7.37E+11	7.2h	ec	669.78
^{209}Po	241.3	102a	ec/ β +	260.5
^{208}Bi	1537	368000a	ec/ β +	74.69
^{208}Po	3870	2.98a	ec/ β +	291.81
^{207}Bi	1.39E+07	30.2a	ec/ β +	569.69
^{14}C	5366	5700a	β -	/
^{13}N	2.10E+08	9.96min	ec/ β +	511
^{11}C	3.26E+08	20.36min	ec/ β +	511
^3H	1.43E+07	12.32a	β -	/

表 5-6 天然 Ga 靶中的核素活度及其特征

核素	20 个靶活度; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线; keV
^{74}As	1.11E+07	17.77d	ec/ β +	595.83
^{72}Ga	1.13E+10	14.1h	β -	834.13
^{72}As	6.71E+07	26h	ec/ β +	833.99
^{71}Ge	2.69E+12	11.42d	ec	9.25
^{70}Ga	4.50E+11	21.14min	β -	1039.2
^{69}Zn	2.48E+09	56.4min	β -	318.4
^{69}Ge	1.31E+13	39.05h	ec/ β +	1106.77
^{68}Ga	8.90E+12	67.71min	ec/ β +	1077.34
^{68}Ge	5.14E+11	270.93d	ec	9.25
^{67}Cu	1.08E+10	61.83h	β -	184.57
^{67}Ga	4.34E+11	3.26d	ec	93.3
^{67}Ge	3.44E+07	18.9min	ec/ β +	167.01
^{65}Zn	2.08E+11	243.93d	ec/ β +	1115.539
^{64}Cu	2.66E+10	12.701h	ec/ β +	1345.77
^{63}Ni	2.62E+05	101.2a	β -	/
^{60}Fe	0.4372	2.62a	β -	58.6
^{60}Co	7.90E-04	1925.28d	β -	1332.49
^3H	1.48E+07	12.32a	β -	/
$^{60\text{m}}\text{Co}$	0.4372	10.46min	IT	58.6
$^{69\text{m}}\text{Zn}$	1.61E+09	13.756h	IT	438.63
$^{71\text{m}}\text{Zn}$	2.61E+08	3.96h	β -	386.28

表 5-7 天然 Zn 靶中的核素活度及其特征

核素	20 个靶件活度; Bq	半衰期	衰变类型	γ 特征射线; keV
^{71}Ge	8.15E+06	11.42d	ec	9.25
^{70}Ga	1.91E+10	21.14min	β^-	1039.2
^{69}Zn	2.99E+10	56.4min	β^-	318.4
^{69}Ge	1.35E+07	39.05h	ec/ β^+	1106.77
^{68}Ga	3.36E+12	67.71min	ec/ β^+	1077.34
^{67}Cu	7.96E+09	61.83h	β^-	184.57
^{67}Ga	7.13E+12	3.26d	ec	93.3
^{66}Ga	7.55E+12	9.49h	ec/ β^+	1039.2
^{65}Ni	1.19E+07	2.51h	β^-	1481.84
^{65}Zn	1.56E+11	243.93d	ec/ β^+	1115.539
^{65}Ga	1.55E+11	15.2min	ec/ β^+	115.09
^{64}Cu	1.98E+12	12.7h	ec/ β^+	1345.7
^{63}Ni	1.54E+06	101.2a	β^-	/
^{63}Zn	3.42E+12	38.47min	ec/ β^+	669.62
^{62}Zn	1.12E+10	9.19h	ec/ β^+	596.56
^{61}Co	1.19E+09	1.65h	β^-	68.41
^{61}Cu	3.49E+12	3.33h	ec/ β^+	282.95
^{60}Co	4.38E+06	1925.28d	β^-	1332.49
^{60}Cu	2.57E+11	23.7min	ec/ β^+	1332.5
^{59}Ni	2.01E+03	7.6e4a	ec/ β^+	6.9
^{58}Co	7.09E+05	70.86d	ec/ β^+	810.75
^{57}Co	3.82E+09	271.74d	ec	122.06
^3H	2.95E+06	12.32a	β^-	/
$^{46\text{m}}\text{Sc}$	3.62E+06	18.75s	IT	142.58
$^{52\text{m}}\text{Mn}$	476.8	21.1min	ec/ β^+	1424.6

② ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备工作箱

该工作箱主要进行 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究, ^{68}Ge 日最大操作量为 $3.7\text{E}+09\text{Bq}$ 。

(2) 屏蔽体外辐射水平

分离热室或箱体操作的放射性同位素大部分都产生 γ 射线, 其屏蔽体外 30cm 处剂量率水平采用下式计算得出:

$$H_0 = 3600 \times \frac{A \times \Gamma}{R^2} \times K$$

H_0 — 热室屏蔽体外 30cm 处的剂量率, Sv/h;

A — 操作放射性核素的活度, Bq;

Γ — 空气比释动能率常数, $Gy \cdot m^2 / (Bq \cdot s)$; 取值来自“李士俊《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数》。”

R — 热室屏蔽体外 30cm 处距离, m;

K 为屏蔽材料的衰减系数, 无量纲, 利用下式计算:

$$K^{-1} = 10^{-\frac{d}{TVL}}$$

式中,

d 为屏蔽体厚度;

TVL 为十分之一值层厚度, cm。取值来自《RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATE HANDBOOK 2002》或《高等电离辐射防护教程》。

根据本项目工艺流程可知, 本项目热室设有干湿两条操作线, 干法主要进行 ^{209}Bi 靶中目标核素的分析, 湿法主要进行天然 Ga 靶和天然 Zn 靶中目标核素的分析。干法和湿法操作各靶件时热室屏蔽体外剂量率水平分别见表 5-8、表 5-9 及表 5-10。

^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究工作箱体外剂量率水平见表 5-11。

表 5-8 干法操作热室操作 ^{209}Bi 靶时屏蔽体外剂量率水平

核素	单次操作活度, Bq	空气比释动能率常数, $(Gy \cdot m^2) / (Bq \cdot s)$	屏蔽		TVL, mm	R,m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
			材料	厚度,mm			
^{13}N	4.81E+08	3.87E-17	铅	270	17	1.57	3.56E-15
^{11}C	2.73E+09	3.87E-17	铅	270	17	1.57	2.02E-14
^7Be	1.70E+04	1.86E-18	铅	270	17	1.57	6.05E-21
^3H	1.45E+07	—	铅	270	—	1.57	—
^{211}At	7.35E+11	8.20E-18	铅	270	23.4	1.57	2.55E-08
^{207}Bi	1.39E+07	6.83E-17	铅	270	36	1.57	4.38E-08
^{14}C	5.35E+03	—	铅	270	—	1.57	—
合计							6.93E-08

表 5-9 湿法操作热室操作天然 Ga 靶时屏蔽体外剂量率水平

核素	单次操作活度, Bq	空气比释动能率常数, (Gy·m ²) / (Bq·s)	屏蔽		TVL, mm	R,m	剂量率, μSv/h
			材料	厚度,mm			
¹³ N	2.71E+08	3.87E-17	铅	270	17	1.57	2.01E-15
¹¹ C	2.40E+09	3.87E-17	铅	270	17	1.57	1.78E-14
⁷ Be	3.40E+05	1.86E-18	铅	270	17	1.57	1.21E-19
³ H	1.50E+07	—	铅	270	—	1.57	—
⁷⁴ As	1.11E+07	2.85E-17	铅	270	21	1.57	6.42E-14
⁷² Ga	1.13E+10	8.73E-17	铅	270	63.2	1.57	7.70E-02
⁷² As	6.70E+07	6.50E-17	铅	270	36	1.57	2.01E-07
⁷¹ Ge	2.69E+12	3.16E-18	铅	270	3.7	1.57	1.32E-69
⁷⁰ Ga	4.50E+11	2.66E-19	铅	270	34.5	1.57	2.61E-06
⁶⁹ Zn	2.48E+09	2.20E-22	铅	270	15.4	1.57	2.34E-21
⁶⁹ Ge	1.31E+13	5.15E-17	铅	270	34.5	1.57	1.47E-02
⁶⁸ Ga	8.90E+12	3.58E-17	铅	270	17	1.57	6.10E-11
⁶⁸ Ge	5.15E+11	3.12E-18	铅	270	3.7	1.57	2.50E-70
⁶⁷ Cu	1.08E+10	3.77E-18	铅	270	2	1.57	5.95E-134
⁶⁷ Ga	4.34E+11	5.22E-18	铅	270	6	1.57	3.31E-42
⁶⁷ Ge	3.44E+07	5.08E-17	铅	270	15.4	1.57	7.49E-18
⁶⁵ Zn	2.08E+11	2.03E-17	铅	270	42	1.57	2.30E-03
⁶⁴ Cu	2.66E+10	7.15E-18	铅	270	17	1.57	3.64E-14
⁶³ Ni	2.62E+05	—	铅	270	—	1.57	—
^{69m} Zn	1.61E+09	1.57E-17	铅	270	15.4	1.57	1.08E-16
^{71m} Zn	2.61E+08	5.73E-17	铅	270	15.4	1.57	6.41E-17
合计							9.40E-02

表 5-10 湿法操作热室操作天然 Zn 靶时屏蔽体外剂量率水平

核素	单次操作活度, Bq	空气比释动能率常数, (Gy·m ²) / (Bq·s)	屏蔽		TVL, mm	R,m	剂量率, μSv/h
			材料	厚度,mm			
¹³ N	2.71E+08	3.87E-17	铅	270	17	1.57	2.01E-15
¹¹ C	2.40E+09	3.87E-17	铅	270	17	1.57	1.78E-14
⁷ Be	3.40E+05	1.86E-18	铅	270	17	1.57	1.21E-19
³ H	3.12E+06	0.00E+00	铅	270	-	1.57	—
⁷¹ Ge	8.15E+06	3.16E-18	铅	270	3.7	1.57	4.00E-75
⁷⁰ Ga	1.91E+10	2.66E-19	铅	270	34.5	1.57	1.11E-07
⁶⁹ Zn	2.99E+10	2.20E-22	铅	270	15.4	1.57	2.82E-20

核素	单次操	空气比释动能率常	屏蔽		TVL, mm	R,m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
^{69}Ge	1.35E+07	5.15E-17	铅	270	34.5	1.57	1.52E-08
^{68}Ga	3.36E+12	3.58E-17	铅	270	17	1.57	2.30E-11
^{67}Cu	7.95E+09	3.77E-18	铅	270	2	1.57	4.38E-134
^{67}Ga	7.15E+12	5.22E-18	铅	270	6	1.57	5.45E-41
^{66}Ga	7.55E+12	7.54E-17	铅	270	48	1.57	1.97E+00
^{65}Ni	1.19E+07	1.83E-17	铅	270	57.8	1.57	6.78E-06
^{65}Zn	1.56E+11	2.03E-17	铅	270	42	1.57	1.72E-03
^{65}Ga	1.55E+11	4.29E-17	铅	270	3.7	1.57	1.03E-69
^{64}Cu	1.98E+12	7.15E-18	铅	270	17	1.57	2.71E-12
^{63}Ni	1.54E+06	—	铅	270	—	1.57	—
^{63}Zn	3.42E+12	4.09E-17	铅	270	37.8	1.57	1.47E-02
^{62}Zn	1.12E+10	1.68E-17	铅	270	37.8	1.57	1.98E-05
^{61}Co	1.19E+09	3.15E-18	铅	270	37.8	1.57	3.94E-07
^{61}Cu	3.49E+12	3.07E-17	铅	270	15.4	1.57	4.59E-13
^{60}Co	4.38E+06	8.50E-17	铅	270	46	1.57	7.34E-07
^{60}Cu	2.57E+11	1.28E-16	铅	270	52.9	1.57	3.78E-01
^{59}Ni	2.01E+03	—	铅	270	—	1.57	—
^{58}Co	7.10E+05	3.58E-17	铅	270	29	1.57	1.82E-11
^{57}Co	3.82E+09	6.24E-18	铅	270	1	1.57	3.48E-269
合计							2.37

表 5-11 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究箱体外剂量率水平

核素	单次操作 活度, Bq	空气比释动能率 常数, ($\text{Gy}\cdot\text{m}^2$) / ($\text{Bq}\cdot\text{s}$)	屏蔽(碳钢, 密度 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$), mm	TVL, mm	R,m	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
^{68}Ge	3.80E+09	3.58E-17	160	65	0.86	2.29

5.2.2.1.4 超重终端二层手套箱

(1) 源项

本项目进行制靶、靶材料回取及微流体溶剂萃取等实验过程在超重终端二层非密封工作场所的手套箱中进行, 源项情况见表 5-12。

表 5-12 超重二层非密封放射性工作场所源项

核素	物理、化学性状	日最大操作量,Bq	年操作量, Bq	空气比释动能率常数, (Gy·m ²) / (Bq·s)
²⁴³ Am	液体	2.66E+07	2.66E+09	5.92E-18
⁹⁵ Nb	粉末	3.70E+06	3.70E+08	2.83E-17
¹⁸² Ta	粉末	3.70E+06	3.70E+08	4.43E-17
¹⁷⁹ Ta	粉末	3.70E+06	3.70E+08	3.74E-17

(2) 屏蔽体外剂量率水平

该手套箱屏蔽体外剂量率计算公式见 5.2.2.1.3 节。计算结果见表表 5-13。

表 5-13 手套箱屏蔽体外剂量率水平

序号	核素	日最大操作量,Bq	T, (Gy·m ²) / (Bq·s)	屏蔽(碳钢, 密度 7.8g/cm ³), mm	TVL,m	R, m	剂量率, μSv/h
1	²⁴³ Am	2.66E+07	5.92E-18	100	1	0.5	2.27E-100
2	⁹⁵ Nb	3.70E+06	2.83E-17	100	76	0.5	7.29E-02
3	¹⁸² Ta	3.70E+06	4.43E-17	100	71.8	0.5	9.55E-02
4	¹⁷⁹ Ta	3.70E+06	1.76E-18	100	1	0.5	9.38E-102
小计(每次操作一种核素, 取最大值)							9.55E-02

5.2.2.1.5 关注点处剂量率水平

(1) 加速器隧道及超重终端屏蔽体外关注点

本项目关注点主要为加速器隧道屏蔽体外 30cm 处, 靶站热室、手套箱屏蔽体外 30cm 处, 加速器隧道四周及屋顶关注点示意图分别见图 5-12 和 5-13。

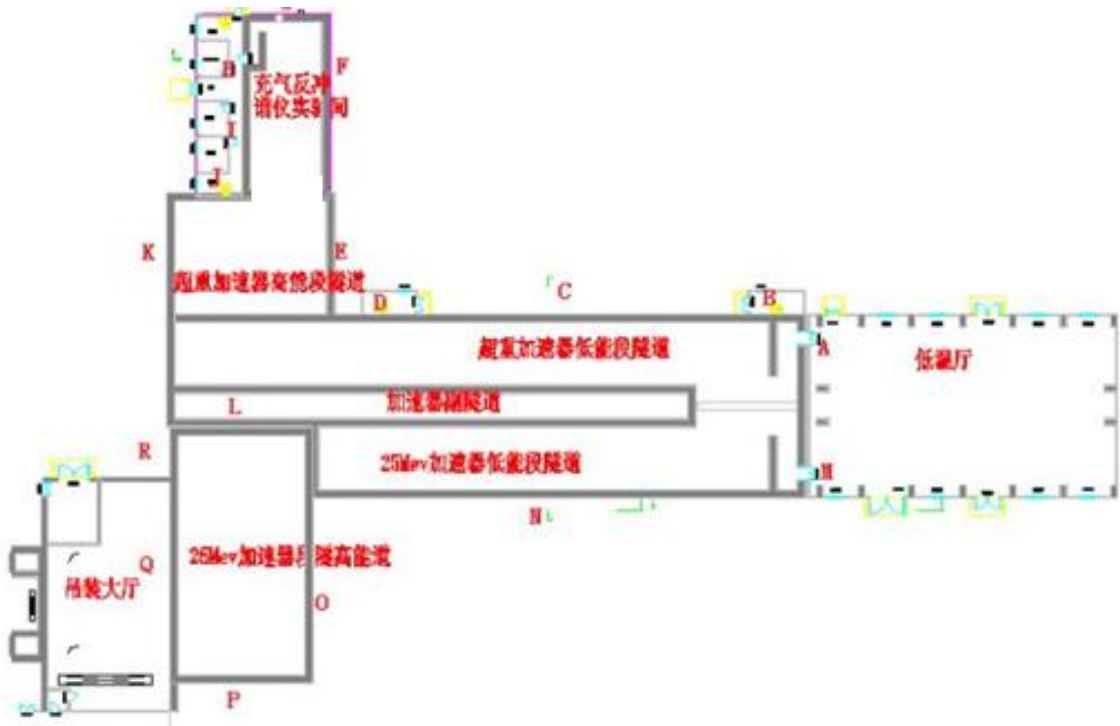


图 5-12 加速器隧道四周屏蔽体外关注点

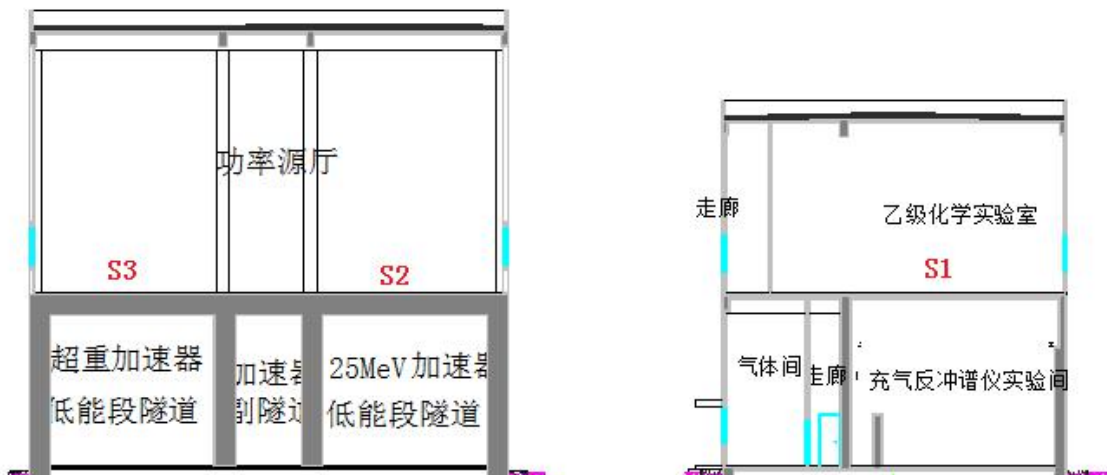


图 5-13 加速器隧道屋顶关注点

关注点处剂量率计算结果见表 5-14。

表 5-14 关注点剂量率水平

场所	点位	点位描述	剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$
加速器 隧道及 超重终 端	A	超重防护门外 30cm	0.2
	B	超重低能隧道北墙外楼梯	0.3
	C	超重低能隧道北墙外 30cm	0.3
	D	超重低能隧道北墙外楼梯	0.3
	E	超重束流终端东墙外 30cm	2.3
	F	超重束流终端东墙外 30cm	0.1

图 5-14 靶站四周屏蔽体外关注点

表 5-15 关注点剂量率水平

场所	点位	点位描述	剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$
靶站	A	靶件照射室东屏蔽体外 30cm	2.1
	B1	靶件照射室北屏蔽体外 30cm	2.0
	B2	靶件照射室南屏蔽体外 30cm	2.0
	C1	转运热室北屏蔽体外 30cm	0.7
	C2	转运热室南屏蔽体外 30cm	0.7
	D1	过渡热室北屏蔽体外 30cm	0.7
	D2	过渡热室南屏蔽体外 30cm	0.7
	E	过渡热室西屏蔽体外 30cm	0.7

根据 5.2.2.1.3 和 5.2.2.1.4 节可知, 分离热室进行靶件核素分离实验时, 其屏蔽体外 30cm 处剂量率最大值为 $2.37\mu\text{Sv/h}$, ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究箱体外 30cm 处剂量率最大值为 $2.29\mu\text{Sv/h}$, 超重终端二层靶件制备、回取等实验使用的手套箱屏蔽体外 30cm 处剂量率最大值为 $9.55\text{E-}02\mu\text{Sv/h}$, 从计算结果可知, 本项目运行时, 各箱体外剂量率小于其控制目标 $7.5\mu\text{Sv/h}$ 。

5.2.2.2 工作人员受照剂量

本项目运行期间涉及的辐射工作人员主要包括加速器正常运行及维护操作人员、靶站操作人员、热室大厅操作人员、超重终端操作人员及三废处理人员。

5.2.2.2.1 加速器正常运行及设备维修维护操作人员

(1) 正常运行受照剂量

本项目超重装置加速器和 25MeV 加速器在运行过程中, 加速器操作人员位于运行维护楼的中控室, 运行维护楼距离加速器隧道 70m 以上, 从 5.2.1.5 节可知, 2 台加速器四周屏蔽体外剂量率最大为 $2.4\mu\text{Sv/h}$, 在运行维护楼屏蔽和距离衰减下, 中控室剂量率为本底水平, 因此加速器运行对中控室操作人员受照剂量可忽略不计, 另外, 加速器运行时, 中控室工作人员偶尔去功率源厅进行设备的检查维护, 每年工作时间不会超过 1000h, 根据模拟结果, 功率源厅剂量率最大值为 $0.6\mu\text{Sv/h}$, 则工作人员受照剂量为 0.6mSv/a , 远远小于工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

(2) 加速器设备维修维护人员

加速器设备维修维护人员进入加速器隧道或终端进行设备维修维护时，主要受到结构部件活化感生放射性的影响。根据本项目特点，设备维修维护人员主要进入加速器隧道及超重终端进行设备的维修维护，保守假设每次停机 1h 后设备维修维护人员才能进入，每次维修维护时间最长 10min，每年最多操作 100 次，根据 3.3.1.1.3 节可知，加速器停机 1h 后超重终端距靶 1 米处剂量率为 $95\mu\text{Sv/h}$ ，则每年超重装置设备维修维护年受照剂量最大为 1.583mSv/a 。

(3) 小计

由以上计算结果可知，加速器运行及维护工作岗位年受照剂量为 2.183mSv/a ，根据加速器运行及维护岗位设置，该工作岗位设有三班，则每班工作人员年受照剂量 0.73mSv/a ，其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/h 。

5.2.2.2.2 靶站操作人员受照剂量

根据设计资料，靶站操作人员受照剂量主要是在靶件进行拆解、转运过程或发生故障时工作人员通过机械手操作受的照射。

根据项目情况，同位素研发装置加速器年运行时间为 6460h ，在靶件照射期间，工作人员位于靶站前区时间不超过加速器总运行时间的 $1/5$ ，其剂量率最大值为 $2.0\mu\text{Sv/h}$ ，根据人员配备情况，该工作岗位设有三班，每班工作时间为 431h ，则工作人员受照剂量最大为 0.862mSv/a ，其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

5.2.2.2.3 热室大厅操作人员受照剂量

根据项目工艺流程可知，热室大厅工作人员主要包括一层目标核素分离过程中受照剂量、二层进行核素质检、实验及 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究受照剂量。

(1) 靶件分离受照剂量

^{211}At 生产研发年操作时间为 408h ， ^{68}Ge 的生产研发操作时间为 833h ， ^{67}Cu 的生产研发操作时间为 816h 。工作人员在操作过程中可能会受到外照射和内照射影响。

① 外照射

根据热室屏蔽体外剂量率水平计算分离不同靶件时工作人员外照射剂量，计算结果见表 5-16。

表 5-16 工作人员外照射剂量计算结果

操作流程	热室箱体外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	操作时间, h	受照剂量, mSv/a
^{209}Bi 靶分离	6.93E-08	408	4.37E-09
天然 Ga 靶分离	9.40E-02	833	7.83E-02
天然 Zn 靶分离	2.37E+00	816	1.93E+00
合计			2.01E+00

② 内照射

在实验过程中，工作人员所受内照射途径主要为吸入实验过程中由热室弥散到实验室房间内的气体和放射性气溶胶。保守假设该过程中产生的气体和放射性气溶胶由热室释放到热室操作区房间内的泄漏率为 $2.5\text{E-}03$ ，热室前区体积为 450m^3 ，放射工作人员呼吸率为 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ ，则弥散到实验室内的气体 and 放射性气溶胶的量和其对工作人员所致的吸入内照射剂量计算公式如下：

$$D_{inh,i} = C \cdot DF_{inh,i} \cdot R \cdot t \cdot \eta$$

式中， $D_{inh,i}$ ：为吸入放射性核素 i 造成的吸入内照射；

C：空气中核素的浓度， Bq/m^3 ；

$DF_{inh,i}$ ：为核素 i 的吸入内照射剂量转换因子（工作人员）， Sv/Bq ，取自 GB18871-2002；

R：为工作人员的呼吸率，取 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ ；

t：操作时间，h；

η ：口罩过滤效率。计算结果见表 5-17。

表 5-17 工作人员内照射受照剂量计算结果

工艺	核素	单次操作活度, Bq	进入热室中的量,Bq	进入操作区的 量, Bq	操作区核素浓 度, Bq/m ³	吸入内照射剂 量转化因子, Sv/Bq	口罩过 滤效率	吸入内照射 mSv/a
209Bi 靶分 离	¹³ N	4.81E+08	4.81E+08	1.20E+06	2.67E+03		0.95	0.00E+00
	¹¹ C	2.73E+09	2.73E+09	6.82E+06	1.51E+04		0.95	0.00E+00
	⁷ Be	1.70E+04	1.70E+04	4.25E+01	9.44E-02	5.20E-11	0.95	1.97E-08
	³ H	1.45E+07	1.45E+07	3.62E+04	8.04E+01		0.95	0.00E+00
	²¹¹ At	7.35E+11	7.35E+09	1.84E+07	4.08E+04		0.95	0.00E+00
	²⁰⁷ Bi	1.39E+07	1.39E+03	3.48E+00	7.72E-03	5.20E-09	0.95	1.61E-07
	¹⁴ C	5.35E+03	5.35E+03	1.34E+01	2.97E-02		0.95	0.00E+00
小计								1.81E-07
天然 Ga 靶分离	¹³ N	2.71E+08	2.71E+08	6.78E+05	1.51E+03		0.95	0.00E+00
	¹¹ C	2.40E+09	2.40E+09	6.00E+06	1.33E+04		0.95	0.00E+00
	⁷ Be	3.40E+05	3.40E+01	8.50E-02	1.89E-04	5.20E-11	0.95	4.91E-10
	³ H	1.50E+07	1.50E+07	3.74E+04	8.32E+01		0.95	0.00E+00
	⁷⁴ As	1.11E+07	1.11E+03	2.78E+00	6.17E-03	2.10E-09	0.95	6.47E-07
	⁷² Ga	1.13E+10	1.13E+06	2.83E+03	6.28E+00	8.40E-10	0.95	2.64E-04
	⁷² As	6.70E+07	6.70E+03	1.68E+01	3.72E-02	1.30E-09	0.95	2.42E-06
	⁷¹ Ge	2.69E+12	2.69E+08	6.73E+05	1.49E+03	1.10E-11	0.95	8.22E-04
	⁷⁰ Ga	4.50E+11	4.50E+07	1.13E+05	2.50E+02	2.60E-11	0.95	3.25E-04
	⁶⁹ Zn	2.48E+09	2.48E+05	6.20E+02	1.38E+00	4.30E-11	0.95	2.96E-06
⁶⁹ Ge	1.31E+13	1.31E+09	3.28E+06	7.28E+03	3.70E-10	0.95	1.35E-01	
⁶⁸ Ga	8.90E+12	8.90E+08	2.23E+06	4.94E+03	8.10E-11	0.95	2.00E-02	

工艺	核素 ⁶⁸ Ge	单次操作活度, 5.15E+11	进入热室中的量,Bq 5.15E+07	进入操作区的 1.29E+05	操作区核素浓 2.86E+02	吸入内照射剂 1.30E-08	口罩过 0.95	吸入内照射 1.86E-01
	⁶⁷ Cu	1.08E+10	1.08E+06	2.70E+03	6.00E+00	5.80E-10	0.95	1.74E-04
	⁶⁷ Ga	4.34E+11	4.34E+07	1.09E+05	2.41E+02	2.80E-10	0.95	3.37E-03
	⁶⁷ Ge	3.44E+07	3.44E+03	8.60E+00	1.91E-02	4.20E-11	0.95	4.01E-08
	⁶⁵ Zn	2.08E+11	2.08E+07	5.20E+04	1.16E+02	2.90E-09	0.95	1.67E-02
	⁶⁴ Cu	2.66E+10	2.66E+06	6.65E+03	1.48E+01	1.50E-10	0.95	1.11E-04
	⁶³ Ni	2.62E+05	2.62E+05	6.55E+02	1.46E+00	5.20E-10	0.95	3.78E-05
	^{69m} Zn	1.61E+09	1.61E+05	4.03E+02	8.94E-01	3.30E-10	0.95	1.48E-05
	^{71m} Zn	2.61E+08	2.61E+04	6.53E+01	1.45E-01	2.40E-10	0.95	1.74E-06
	小计							
天然 Zn 靶分离	¹³ N	2.71E+08	2.71E+08	6.78E+05	1.51E+03		0.95	0.00E+00
	¹¹ C	2.40E+09	2.40E+09	6.00E+06	1.33E+04		0.95	0.00E+00
	⁷ Be	3.40E+05	3.40E+01	8.50E-02	1.89E-04	5.20E-11	0.95	4.81E-10
	³ H	3.12E+06	3.12E+06	7.81E+03	1.73E+01		0.95	0.00E+00
	⁷¹ Ge	8.15E+06	8.15E+02	2.04E+00	4.53E-03	1.10E-11	0.95	2.44E-09
	⁷⁰ Ga	1.91E+10	1.91E+06	4.78E+03	1.06E+01	2.60E-11	0.95	1.35E-05
	⁶⁹ Zn	2.99E+10	2.99E+06	7.48E+03	1.66E+01	4.30E-11	0.95	3.50E-05
	⁶⁹ Ge	1.35E+07	1.35E+03	3.38E+00	7.50E-03	3.70E-10	0.95	1.36E-07
	⁶⁸ Ga	3.36E+12	3.36E+08	8.40E+05	1.87E+03	8.10E-11	0.95	7.40E-03
	⁶⁷ Cu	7.95E+09	7.95E+05	1.99E+03	4.42E+00	5.80E-10	0.95	1.25E-04
⁶⁷ Ga	7.15E+12	7.15E+08	1.79E+06	3.97E+03	2.80E-10	0.95	5.45E-02	
⁶⁶ Ga	7.55E+12	7.55E+08	1.89E+06	4.19E+03	7.10E-10	0.95	1.46E-01	

工艺	核素 ⁶⁵ Ni	单次操作活度, 1.19E+07	进入热室中的量,Bq 1.19E+07	进入操作区的 2.98E+04	操作区核素浓 6.61E+01	吸入内照射剂 1.30E-10	口罩过 0.95	吸入内照射 4.21E-04
	⁶⁵ Zn	1.56E+11	1.56E+07	3.90E+04	8.67E+01	2.90E-09	0.95	1.23E-02
	⁶⁵ Ga	1.55E+11	1.55E+07	3.88E+04	8.61E+01	2.90E-11	0.95	1.22E-04
	⁶⁴ Cu	1.98E+12	1.98E+08	4.95E+05	1.10E+03	1.50E-10	0.95	8.08E-03
	⁶³ Ni	1.54E+06	1.54E+06	3.85E+03	8.56E+00	5.20E-10	0.95	2.18E-04
	⁶³ Zn	3.42E+12	3.42E+08	8.55E+05	1.90E+03	6.10E-11	0.95	5.67E-03
	⁶² Zn	1.12E+10	1.12E+06	2.80E+03	6.22E+00	6.60E-10	0.95	2.01E-04
	⁶¹ Co	1.19E+09	1.19E+05	2.98E+02	6.61E-01	7.50E-11	0.95	2.43E-06
	⁶¹ Cu	3.49E+12	3.49E+08	8.73E+05	1.94E+03	1.20E-10	0.95	1.14E-02
	⁶⁰ Co	4.38E+06	4.38E+02	1.10E+00	2.43E-03	2.90E-08	0.95	3.45E-06
	⁶⁰ Cu	2.57E+11	2.57E+07	6.43E+04	1.43E+02	6.20E-11	0.95	4.33E-04
	⁵⁹ Ni	2.01E+03	2.01E+03	5.03E+00	1.12E-02	2.20E-10	0.95	1.20E-07
	⁵⁸ Co	7.10E+05	7.10E+01	1.78E-01	3.94E-04	2.00E-09	0.95	3.86E-08
	⁵⁷ Co	3.82E+09	3.82E+05	9.55E+02	2.12E+00	9.40E-10	0.95	9.77E-05
小计								2.47E-01
合计								6.09E-01

(2) 核素质检及 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究受照剂量

根据设计资料，核素质检过程中每种核素最大操作量为 $1.0\text{E}+07\text{Bq}$ ，每种核素质检每次操作时间最多 0.5h，每种核素每年最多操作 100 次，则核素质检过程中工作人员受照剂量见表 5-18；该过程中 ^{68}Ge 操作量为 $3.7\text{E}+09\text{Bq}$ ，人员采用机械手操作，操作时间为 816h，经屏蔽后，工作人员年受照剂量计算见表 5-19。

表 5-18 核素质检工作人员受照剂量

核素	单次操作活度, Bq	空气比释动能率常数, ($\text{Gy}\cdot\text{m}^2$) / ($\text{Bq}\cdot\text{s}$)	R,m	操作时间	剂量, mSv/a
^{211}At	$1.0\text{E}+7$	$8.20\text{E}-18$	0.5	50	$2.25\text{E}-02$
^{68}Ge	$1.0\text{E}+7$	$3.12\text{E}-18$	0.5	50	$2.58\text{E}-01$
^{68}Ga	$1.0\text{E}+07$	$3.58\text{E}-17$	0.5	50	$2.71\text{E}-02$
^{64}Cu	$1.0\text{E}+7$	$3.77\text{E}-18$	0.5	50	$5.15\text{E}-02$
^{67}Cu	$1.0\text{E}+7$	$7.15\text{E}-18$	0.5	50	$2.25\text{E}-02$
小计					$3.82\text{E}-01$

表 5-19 发生器制备研究工作人员受照剂量

核素	单次操作活度, Bq	空气比释动能率常数, ($\text{Gy}\cdot\text{m}^2$) / ($\text{Bq}\cdot\text{s}$)	屏蔽 (碳钢, 密度 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$), mm	TVL, mm	R,m	操作时间	剂量, mSv/a
^{68}Ge	$3.80\text{E}+09$	$3.58\text{E}-17$	160	65	0.86	816	1.87

(3) 小计

从表 5-16、表 5-17、表 5-18 和表 5-19 中可知，该项目核素分离、核素质检及 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究时工作人员年受照剂量分别为 2.62mSv/a 、 0.382mSv/a 和 1.87mSv/a ，根据人员配备情况，该工作岗位设有三班，则核素分离、核素质检及 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究时每班工作人员受照剂量分别为 0.873mSv/a 、 0.127mSv/a 和 0.623mSv/a ，其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

5.2.2.2.4 超重终端操作人员受照剂量

本项目超重终端操作人员主要是在制靶、靶材料回收及微流体溶剂萃取实验过程中受到外照射和吸入内照射。

(1) 外照射受照剂量

超重终端二层非密封放射性物质工作场所每年操作时间不超过 800h，其工作人员外照射剂量计算结果见表 5-20。

表 5-20 制靶、靶材料回收及微流体溶剂萃取实验过程工作人员外照射剂量

序号	核素	手套箱外剂量率最大值,	T , (Gy·m ²) / (Bq·s)	屏蔽材料, mm	TVL,mm	R, m	操作时间, h	年受照剂量,mSv/a
1	²⁴³ Am	2.66E+07	5.92E-18	100	1	0.5	800	9.07E-101
2	⁹⁵ Nb	3.70E+06	2.83E-17	100	76	0.5	800	2.91E-02
3	¹⁸² Ta	3.70E+06	4.43E-17	100	71.8	0.5	800	3.82E-02
4	¹⁷⁹ Ta	3.70E+06	1.76E-18	100	1	0.5	800	3.75E-102

另外，超重终端二层非密封放射性工作场所位于超重终端充气反冲谱仪实验间屋顶，根据该场所屋顶剂量率模拟计算结果可知，其屋顶剂量率为 0.4 μSv/h，则超重终端二层非密封放射性工作场所在实验过程中受到超重终端辐射影响的年剂量为 0.32mSv。

(2) 吸入内照射

在实验过程中，工作人员所受内照射途径主要实验过程中由于吸入弥散到实验室房间内放射性气溶胶而造成的内照射。

假设实验过程中固体粉末或液体放射性核素弥散成气溶胶的量为 0.1%，本项目手套箱为二级，假设泄漏率为 2.5E-03，假设口罩过滤效果为 50%，不考虑通风的情况下则工作人员吸入放射性气溶胶而产生的内照射计算公示如下：

$$D_{inh,i} = C \cdot DF_{inh,i} \cdot R \cdot t \cdot \eta$$

式中， $D_{inh,i}$ ：为吸入放射性核素 i 造成的吸入内照射；

C：空气中核素的浓度，Bq/m³；

$DF_{inh,i}$ ：为核素 i 的吸入内照射剂量转换因子（工作人员），Sv/Bq，取自 GB18871-2002；

R：为工作人员的呼吸率，取 1.2m³/h；

t: 操作时间, 取 800h;

η : 口罩过滤效率。

计算结果见表 5-21。

表 5-21 工作人员内照射受照剂量计算结果

序号	核素	日最大操作量, Bq	内照射剂量转换因子, Sv/Bq	进入实验室的核素活度, Bq	实验室体积, m ³	实验室核素活度浓度, Bq/m ³	操作时间, h	人员受照剂量, mSv
1	²⁴³ Am	2.66E+07	3.90E-05	6.65E+01	780	8.53E-02	800	1.60E+00
2	⁹⁵ Nb	3.70E+06	1.40E-09	9.25E+00	780	1.19E-02	800	7.97E-06
3	¹⁸² Ta	3.70E+06	7.20E-09	9.25E+00	780	1.19E-02	800	4.10E-05
4	¹⁷⁹ Ta	3.70E+06	2.00E-10	9.25E+00	780	1.19E-02	800	1.14E-06

(3) 小计

通过以上计算, 超重终端二层非密封放射性工作场所实验过程中工作人员操作放射性核素过程中受照剂量见表 5-22。

表 5-22 工作人员受照剂量

序号	核素	外照射量, mSv/a	内照射, mSv/a	超重终端影响, mSv/a	合计, mSv/a
1	²⁴³ Am	9.07E-101	1.60E+00	0.32	1.92E+00
2	⁹⁵ Nb	2.91E-02	7.97E-06	0.32	3.49E-01
3	¹⁸² Ta	3.82E-02	4.10E-05	0.32	3.58E-01
4	¹⁷⁹ Ta	3.75E-102	1.14E-06	0.32	3.20E-01

根据本项目岗位设置情况, 每次只操作一种核素, 且放射性靶制备、靶材料回收、微流体溶剂萃取实验均为不同的工作人员, 其中 ²⁴³Am 主要进行靶材料的制备和回收, 其他核素为微流体溶剂萃取实验, 因此该非密封放射性工作场所受照剂量最大为 ²⁴³Am 核素, 根据岗位设置, 该核素制靶和靶材料回收为不同工作人员, 因此平均分配后则每种操作受照剂量为 0.96mSv/a, 则超重终端二层非密封放射性实验过程中, 工作人员受照剂量最大为 0.96mSv/a, 其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

5.2.2.2.5 三废处理操作人员

由本项目设计资料可知, 三废中的废气经过滤后通过管道直接由排风塔排放, 产生的放射性废液由泵直接转运至辐射管理中心通过自动化控制进行废液的处理,

放射性固体废物包装后通过吊装至场内转运小车，通过小车运至辐射管理中心。

因此，三废转运操作人员受照剂量主要是在废物转运过程中受照剂量，根据固体废物包装要求可知，包装后废物桶表面 1m 处的剂量率 $<0.1\text{mSv/h}$ ，保守假设运输人员距离废物桶 1m，每次固体废物转运时间为 20min，每年最多转运 20 次，每次最多转运 5 个桶，则操作人员受照剂量为 3.34 mSv/a，根据岗位设置情况，该工作设有 3 名工作人员，则每名工作人员受照剂量为 1.11 mSv/a，其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

5.2.2.2.6 小计

本项目运行过程中，各岗位工作人员受照剂量情况见表 5-23。

表 5-23 各岗位工作人员年受照剂量

序号	工作岗位		受照剂量, mSv/a
1	加速器运行及维护		0.73
2	靶站操作		0.862
3	热室大厅	核素分离	0.873
		质检	0.127
		^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器制备研究	0.623
4	超重终端	制靶和靶材料回收	0.96
		微流体溶剂萃取实验	0.358
5	三废处理操作人员		1.11

从表 5-23 可知，本项目运行过程中各岗位工作人员年受照剂量均小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

5.2.2.3 公众受照剂量

本项目运行过程中公众主要包括两部分：（1）从拟建辐射工作场所周围偶尔经过的公众；（2）受排风塔排放的放射性气载流出物影响的周围公众。

5.2.2.3.1 外照射

由项目总平面布局图可知，2 台加速器装置运行过程中，公众可能会从其附近的道路经过，根据设计资料，超重终端东墙外 30cm 处剂量率最大为 $2.3\mu\text{Sv/h}$ ，该装置附近最近的道路距离束流终端不小于 20m，保守按照 20m 计算，则推出屏蔽体外公众可能出现道路的剂量率水平为 $0.373\mu\text{Sv/h}$ ，根据项目特点，超重装置年运行时

间不超过 10 个月，同位素研发装置加速器年运行时间为 6460h，由于该两台加速器会同时运行，因此加速器隧道内加速器年运行时间最多不超过 7200h，且属于昼夜连续运行，公众主要为进入该场地的后勤服务人员，居留因子取 1/32，则公众受照剂量为 0.084mSv/a。

5.2.2.3.2 气载放射性流出物导致的照射剂量

气载放射性流出物将通过排风塔排放，其排放源项主要为超重装置加速器空气活化产物、热室大厅及超重终端二层非密封放射性实验室排放的气载流出物。

5.2.2.3.3 排放源项

(1) 超重装置加速器

超重装置加速器空气活化产物年排放量见表 5-24。

表 5-24 超重装置终端每年排入环境的空气感生放射性核素

核素	年排放量, Bq
^3H	7.01E+03
^7Be	1.91E+04
^{11}C	3.26E+04
^{13}N	5.03E+04
^{14}C	1.00E+04
^{15}O	2.86E+04
^{41}Ar	3.53E+05

(2) 超重终端二层非密封放射性实验室

该实验室手套箱产生的放射性气载流出物经过滤后经排风塔排放，过滤效率为 99.9%，最终排入外环境的量见表 5-25。

表 5-25 超重终端二层非密封放射性工作场所气载流出物排放量

核素	年废气产生量, Bq	年排放量, Bq
^{243}Am	2.66E+06	2.66E+03
^{95}Nb	3.70E+05	3.70E+02
^{182}Ta	3.70E+05	3.70E+02
^{179}Ta	3.70E+05	3.70E+02

(3) 热室大厅

热室大厅一层分离热室在操作过程中产生的放射性废气量经过滤后由排风塔口外排，过滤器的过滤效率为 99.9%，最终排入外环境的量见表 5-26。

表 5-26 分离热室废气产生量及最终排放量

核素	操作量,Bq	放射性废气, Bq	
		年产生量	释放量
¹³ N	1.74E+10	1.74E+10	1.74E+07
¹¹ C	1.28E+11	1.28E+11	1.28E+08
⁷ Be	1.73E+07	1.73E+03	1.73E+00
³ H	5.54E+08	5.54E+08	5.54E+05
²¹¹ At	1.25E+13	1.25E+09	1.25E+06
²⁰⁹ Po	4.11E+03	4.11E-01	4.11E-04
²⁰⁸ Bi	2.61E+04	2.61E+00	2.61E-03
²⁰⁸ Po	6.58E+04	6.58E+00	6.58E-03
²⁰⁷ Bi	2.36E+08	2.36E+04	2.36E+01
¹⁴ C	9.10E+04	9.10E+04	9.10E+01
⁷⁴ As	1.89E+08	1.89E+04	1.89E+01
⁷² Ga	1.92E+11	1.92E+07	1.92E+04
⁷² As	1.14E+09	1.14E+05	1.14E+02
⁷¹ Ge	4.57E+13	4.57E+09	4.57E+06
⁷⁰ Ga	7.97E+12	7.97E+08	7.97E+05
⁶⁹ Zn	5.50E+11	5.50E+07	5.50E+04
⁶⁹ Ge	2.23E+14	2.23E+10	2.23E+07
⁶⁸ Ga	2.08E+14	2.08E+10	2.08E+07
⁶⁸ Ge	8.74E+12	8.74E+08	8.74E+05
⁶⁷ Cu	3.19E+11	3.19E+07	3.19E+04
⁶⁷ Ga	1.29E+14	1.29E+10	1.29E+07
⁶⁷ Ge	5.85E+08	5.85E+04	5.85E+01
⁶⁶ Ga	1.28E+14	1.28E+10	1.28E+07
⁶⁵ Ni	2.02E+08	2.02E+04	2.02E+01
⁶⁵ Zn	3.54E+12	3.54E+08	3.54E+05
⁶⁵ Ga	2.64E+12	2.64E+08	2.64E+05
⁶⁴ Cu	3.41E+13	3.41E+09	3.41E+06
⁶³ Ni	3.06E+07	3.06E+03	3.06E+00
⁶³ Zn	5.81E+13	5.81E+09	5.81E+06
⁶² Zn	2.18E+11	2.18E+07	2.18E+04
⁶¹ Co	2.02E+10	2.02E+06	2.02E+03
⁶¹ Cu	5.93E+13	5.93E+09	5.93E+06
⁶⁰ Co	7.45E+07	7.45E+03	7.45E+00
⁶⁰ Cu	4.37E+12	4.37E+08	4.37E+05
⁵⁹ Ni	3.42E+04	3.42E+00	3.42E-03

核素	操作量,Bq	放射性废气, Bq	
		年产生量	释放量
⁵⁸ Co	1.21E+07	1.21E+03	1.21E+00
⁵⁷ Co	6.49E+10	6.49E+06	6.49E+03
⁶⁹ Zn (激发态)	2.74E+10	2.74E+06	2.74E+03
⁷¹ Zn (激发态)	4.44E+09	4.44E+05	4.44E+02

(4) 小计

本项目通过排风塔排入外环境的气载流出物情况见表 5-27。

表 5-27 排风塔气载流出物年排放量情况

核素	释放量,Bq	核素	释放量,Bq	核素	释放量,Bq
¹³ N	1.74E+07	⁶⁸ Ga	2.08E+07	⁶¹ Cu	5.93E+06
¹¹ C	1.28E+08	⁶⁸ Ge	8.74E+05	⁶⁰ Co	7.45E+00
⁷ Be	1.91E+04	⁶⁷ Cu	3.19E+04	⁶⁰ Cu	4.37E+05
³ H	5.61E+05	⁶⁷ Ga	1.29E+07	⁵⁸ Co	1.21E+00
²¹¹ At	1.25E+06	⁶⁷ Ge	5.85E+01	⁵⁷ Co	6.49E+03
²⁰⁷ Bi	2.36E+01	⁶⁶ Ga	1.28E+07	^{69m} Zn	2.74E+03
¹⁴ C	1.01E+04	⁶⁵ Ni	2.02E+01	^{71m} Zn	4.44E+02
⁷⁴ As	1.89E+01	⁶⁵ Zn	3.54E+05	¹⁵ O	2.86E+04
⁷² Ga	1.92E+04	⁶⁵ Ga	2.64E+05	⁴¹ Ar	3.53E+05
⁷² As	1.14E+02	⁶⁴ Cu	3.41E+06	²⁴³ Am	2.66E+03
⁷¹ Ge	4.57E+06	⁶³ Ni	3.06E+00	⁹⁵ Nb	3.70E+02
⁷⁰ Ga	7.97E+05	⁶³ Zn	5.81E+06	¹⁸² Ta	3.70E+02
⁶⁹ Zn	5.50E+04	⁶² Zn	2.18E+04	¹⁷⁹ Ta	3.70E+02
⁶⁹ Ge	2.23E+07	⁶¹ Co	2.02E+03		

5.2.2.3.4 照射途径

本次评价范围内主要有道路、小区、企业公司及公园等，无农业种植基地，因此其对公众的照射途径主要是：空气浸没外照射、地表沉积物外照射、吸入内照射。

5.2.2.3.5 评价方法及计算结果

本评价将采用 IAEA NO.19 号报告推荐的筛选模式进行评价。评价指标为年最大个人有效剂量。

1) 大气弥散模式

大气弥散模式采用筛选模式，不考虑烟羽的抬升。根据 IAEA NO.19 号报告，具体估算公式如下：

$$\left(\frac{x}{Q}\right)_i = \frac{P_p F}{u_a}$$

式中： $\left(\frac{x}{Q}\right)_i$ —为不同距离处的大气弥散因子，s/m³；

P_p —一年中风吹向接收点所在扇区方位 p 的时间份额，取 0.25；

u_a —为排放口处的平均风速，取当地平均风速 1.9m/s。

F —在下风距离 x 处高度 H 的高斯扩散因子；

$$F = \frac{16}{\sqrt{2} p^3} \frac{\exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)}{x \sigma_z}$$

式中， H —排放源高度，本项目排风塔高度为 35m

σ_z —垂直扩散参数，m

排放高度为 0~45m 的范围，因此根据下式计算 σ_z

$$\sigma_z = \frac{(0.06)(x)}{\sqrt{1 + (0.0015)(x)}}$$

根据 IAEA NO.19 号报告，计算其不同距离处的 F 值和大气扩散因子见表 5-28。

表 5-28 不同距离处的 F 值和扩散因子

距离, m	F	扩散因子
50	2.37E-34	3.12E-35
100	1.16E-11	1.52E-12
150	1.58E-07	2.08E-08
200	3.83E-06	5.04E-07
250	1.51E-05	1.98E-06
300	2.92E-05	3.85E-06
350	4.11E-05	5.41E-06

距离, m	F	扩散因子
400	4.89E-05	6.43E-06
450	5.30E-05	6.98E-06
500	5.45E-05	7.17E-06

2) 空气浸没外照射

空气浸没外照射剂量由下式计算:

$$H_{g,i} = 3.15E + 7 \cdot GF_i \cdot \frac{x}{Q} \cdot Q_i$$

其中: $H_{g,i}$ ---核素 i 的空气浸没外照射造成的有效剂量, Sv/a;

GF_i ---核素 i 的空气浸没外照射有效剂量转换因子, (Sv/s) / (Bq/m³).

$\frac{x}{Q}$ ---大气扩散因子, s/m³;

Q_i ---放射性核素 i 的释放率。Bq/s.

通过烟囱排放的放射性核素对生活区造成的空气浸没外照射计算结果见表 5-29。

3) 地面沉积外照射

地面沉积外照射计算公式如下:

$$H_{b,i} = 3.15E + 7 \cdot G_{g,i} \cdot C_i$$

$$C_i = \frac{\overline{W_{Di}}}{\lambda_e^s} (1 - \exp(-\lambda_e^s \times t_b))$$

$$W_{Di} = \left(\frac{x}{Q}\right) \cdot Q_i \cdot V_d$$

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;

W_{Di} ---放射性核素 i 在地面上的全年平均干沉积率, Bq/m².s

Q_i ---核素 i 的释放率, Bq/s;

$\left(\frac{x}{Q}\right)$ ---为大气扩散因子, s/m^3

V_d ---放射性核素 i 的沉降速度, m/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, $(\text{Sv/s})/(\text{Bq/m}^2)$.

λ_e^s ---核素 i 的地表清除有效速率常数, $1/a$, $\lambda_e^s = \lambda + \lambda_e$;

t_b ---核素在地面上的累积时间, h.取 $t_b=30a$ 。

通过烟囱排放的放射性核素对生活区造成地面沉积外照射计算结果见表 5-30。

4) 吸入内照射

吸入放射性核素 i 产生的内照射有效剂量由下式计算:

$$H_{h,i} = \left(\frac{x}{Q}\right) \times Q_i \times GF_{h,i}$$

式中: $H_{h,i}$ ---核素 i 产生的吸入内照射有效剂量, Sv/a;

$\left(\frac{x}{Q}\right)$ ---大气扩散因子, S/m^3 ;

Q_i ---为放射性核素释放率, Bq/s

V ---公众个人正常情况下的呼吸率, 成人的呼吸率为 $V=1.2\text{m}^3/\text{h}$;

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

计算结果见表 5-31。

5) 小计

通过排风塔排放气载流出物对公众造成的辐射剂量见表 5-32。从表中可以看出, 排风塔排放的放射性气载流出物对评价范围内公众造成的剂量最大值为

1.66E-06mSv/a，小于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

5.2.2.3.6 小节

从以上计算结果可知，周围公众年受照剂量最大值为 0.084mSv，小于公众剂量约束值 0.1mSv/a。

5.2.2.4 电磁辐射影响分析

本项目运行期间可能产生的电磁辐射主要来自加速器射频系统、磁铁以及电源机柜等。这些设备其外边均设有金属外壳等自屏蔽体，能够有效地屏蔽电磁辐射，另外，这些设备均位于用混凝土屏蔽的建筑内，经过设备自身和建筑屏蔽后，使其对周围环境所致的电场强度能够满足控制目标值要求，此外，其对周围环境的影响是很小的。

表 5-29 空气浸没外照射计算结果

核素	释放量,Bq	空气浸没外照射有效剂量转换因子, (Sv/s)/(Bq/m ³)	空气浸没外照射不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
			50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
¹³ N	1.74E+07	8.68E-14	4.72E-38	2.30E-15	3.15E-11	7.64E-10	3.00E-09	5.83E-09	8.18E-09	9.74E-09	1.06E-08	1.09E-08
¹¹ C	1.28E+08	7.91E-14	3.16E-37	1.54E-14	2.11E-10	5.11E-09	2.01E-08	3.90E-08	5.47E-08	6.51E-08	7.06E-08	7.26E-08
⁷ Be	1.91E+04	2.74E-15	1.63E-42	7.96E-20	1.09E-15	2.64E-14	1.04E-13	2.01E-13	2.83E-13	3.37E-13	3.65E-13	3.75E-13
³ H	5.61E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
²¹¹ At	1.25E+06	1.96E-15	7.64E-41	3.73E-18	5.10E-14	1.24E-12	4.85E-12	9.42E-12	1.32E-11	1.57E-11	1.71E-11	1.76E-11
²⁰⁷ Bi	2.36E+01	9.31E-14	6.86E-44	3.35E-21	4.58E-17	1.11E-15	4.36E-15	8.47E-15	1.19E-14	1.41E-14	1.53E-14	1.58E-14
¹⁴ C	1.01E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
⁷⁴ As	1.89E+01	5.80E-14	3.41E-44	1.66E-21	2.28E-17	5.52E-16	2.17E-15	4.21E-15	5.92E-15	7.04E-15	7.64E-15	7.85E-15
⁷² Ga	1.92E+04	1.86E-13	1.11E-40	5.44E-18	7.43E-14	1.80E-12	7.08E-12	1.37E-11	1.93E-11	2.30E-11	2.49E-11	2.56E-11
⁷² As	1.14E+02	1.70E-13	6.05E-43	2.95E-20	4.03E-16	9.78E-15	3.84E-14	7.46E-14	1.05E-13	1.25E-13	1.35E-13	1.39E-13
⁷¹ Ge	4.57E+06	6.71E-18	9.57E-43	4.67E-20	6.38E-16	1.55E-14	6.08E-14	1.18E-13	1.66E-13	1.97E-13	2.14E-13	2.20E-13
⁷⁰ Ga	7.97E+05	4.17E-14	1.04E-39	5.06E-17	6.92E-13	1.68E-11	6.59E-11	1.28E-10	1.80E-10	2.14E-10	2.32E-10	2.38E-10
⁶⁹ Zn	5.50E+04	1.81E-14	3.11E-41	1.52E-18	2.07E-14	5.02E-13	1.97E-12	3.83E-12	5.39E-12	6.41E-12	6.95E-12	7.14E-12
⁶⁹ Ge	2.23E+07	5.96E-14	4.14E-38	2.02E-15	2.76E-11	6.69E-10	2.63E-09	5.11E-09	7.18E-09	8.54E-09	9.26E-09	9.52E-09
⁶⁸ Ga	2.08E+07	1.01E-13	6.57E-38	3.20E-15	4.38E-11	1.06E-09	4.17E-09	8.10E-09	1.14E-08	1.35E-08	1.47E-08	1.51E-08
⁶⁸ Ge	8.74E+05	6.62E-18	1.80E-43	8.80E-21	1.20E-16	2.92E-15	1.15E-14	2.23E-14	3.13E-14	3.72E-14	4.04E-14	4.15E-14
⁶⁷ Cu	3.19E+04	1.18E-14	1.17E-41	5.72E-19	7.83E-15	1.90E-13	7.46E-13	1.45E-12	2.03E-12	2.42E-12	2.63E-12	2.70E-12
⁶⁷ Ga	1.29E+07	8.50E-15	3.41E-39	1.66E-16	2.27E-12	5.51E-11	2.17E-10	4.21E-10	5.91E-10	7.03E-10	7.63E-10	7.84E-10
⁶⁷ Ge	5.85E+01	1.68E-13	3.07E-43	1.49E-20	2.04E-16	4.95E-15	1.95E-14	3.78E-14	5.31E-14	6.32E-14	6.85E-14	7.05E-14
⁶⁶ Ga	1.28E+07	2.11E-13	8.45E-38	4.12E-15	5.63E-11	1.37E-09	5.37E-09	1.04E-08	1.46E-08	1.74E-08	1.89E-08	1.94E-08
⁶⁵ Ni	2.02E+01	7.18E-14	4.53E-44	2.21E-21	3.02E-17	7.33E-16	2.88E-15	5.59E-15	7.85E-15	9.34E-15	1.01E-14	1.04E-14
⁶⁵ Zn	3.54E+05	3.29E-14	3.63E-40	1.77E-17	2.42E-13	5.87E-12	2.30E-11	4.48E-11	6.29E-11	7.48E-11	8.12E-11	8.34E-11
⁶⁵ Ga	2.64E+05	1.19E-13	9.78E-40	4.77E-17	6.52E-13	1.58E-11	6.21E-11	1.21E-10	1.70E-10	2.02E-10	2.19E-10	2.25E-10
⁶⁴ Cu	3.41E+06	1.64E-14	1.75E-39	8.51E-17	1.16E-12	2.82E-11	1.11E-10	2.15E-10	3.02E-10	3.60E-10	3.90E-10	4.01E-10

核素	释放量,Bq	空气浸没外照射有效剂量转换因子, (Sv/s)/(Bq/m ³)	空气浸没外照射不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
			50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
⁶³ Ni	3.06E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
⁶³ Zn	5.81E+06	1.23E-13	2.23E-38	1.09E-15	1.49E-11	3.61E-10	1.42E-09	2.75E-09	3.87E-09	4.60E-09	4.99E-09	5.13E-09
⁶² Zn	2.18E+04	2.52E-14	1.71E-41	8.35E-19	1.14E-14	2.77E-13	1.09E-12	2.11E-12	2.97E-12	3.53E-12	3.83E-12	3.94E-12
⁶¹ Co	2.02E+03	3.24E-14	2.04E-42	9.97E-20	1.36E-15	3.31E-14	1.30E-13	2.52E-13	3.54E-13	4.22E-13	4.57E-13	4.70E-13
⁶¹ Cu	5.93E+06	6.50E-14	1.20E-38	5.87E-16	8.02E-12	1.94E-10	7.64E-10	1.48E-09	2.08E-09	2.48E-09	2.69E-09	2.77E-09
⁶⁰ Co	7.45E+00	1.11E-13	2.58E-44	1.26E-21	1.72E-17	4.17E-16	1.64E-15	3.18E-15	4.47E-15	5.32E-15	5.77E-15	5.93E-15
⁶⁰ Cu	4.37E+05	2.82E-13	3.84E-39	1.87E-16	2.56E-12	6.21E-11	2.44E-10	4.74E-10	6.66E-10	7.92E-10	8.60E-10	8.84E-10
⁵⁸ Co	1.21E+00	4.30E-14	1.62E-45	7.88E-23	1.08E-18	2.61E-17	1.03E-16	1.99E-16	2.80E-16	3.33E-16	3.62E-16	3.72E-16
⁵⁷ Co	6.49E+03	6.63E-15	1.34E-42	6.55E-20	8.96E-16	2.17E-14	8.53E-14	1.66E-13	2.33E-13	2.77E-13	3.00E-13	3.09E-13
^{69m} Zn	2.74E+03	2.44E-14	2.08E-42	1.02E-19	1.39E-15	3.37E-14	1.32E-13	2.57E-13	3.61E-13	4.29E-13	4.66E-13	4.79E-13
^{71m} Zn	4.44E+02	1.21E-13	1.68E-42	8.17E-20	1.12E-15	2.71E-14	1.06E-13	2.07E-13	2.90E-13	3.45E-13	3.75E-13	3.85E-13
¹⁵ O	2.86E+04	1.04E-13	9.28E-41	4.52E-18	6.19E-14	1.50E-12	5.89E-12	1.14E-11	1.61E-11	1.91E-11	2.08E-11	2.13E-11
⁴¹ Ar	3.53E+05	6.13E-14	6.75E-40	3.29E-17	4.50E-13	1.09E-11	4.29E-11	8.33E-11	1.17E-10	1.39E-10	1.51E-10	1.55E-10
²⁴³ Am	2.66E+03	2.75E-15	2.28E-43	1.11E-20	1.52E-16	3.69E-15	1.45E-14	2.81E-14	3.95E-14	4.70E-14	5.10E-14	5.25E-14
⁹⁵ Nb	3.70E+02	3.39E-14	3.91E-43	1.91E-20	2.61E-16	6.33E-15	2.49E-14	4.83E-14	6.78E-14	8.07E-14	8.75E-14	8.99E-14
¹⁸² Ta	3.70E+02	7.85E-14	9.06E-43	4.42E-20	6.04E-16	1.46E-14	5.75E-14	1.12E-13	1.57E-13	1.87E-13	2.03E-13	2.08E-13
¹⁷⁹ Ta	3.70E+02	1.45E-14	1.67E-43	8.16E-21	1.12E-16	2.71E-15	1.06E-14	2.06E-14	2.90E-14	3.45E-14	3.74E-14	3.85E-14
合计			6.02E-37	2.93E-14	4.01E-10	9.73E-09	3.82E-08	7.42E-08	1.04E-07	1.24E-07	1.35E-07	1.38E-07

表 5-30 地面沉积外照射计算结果

核素	释放量,Bq	地面沉积外照射剂量转化因子, (Sv/s)/(Bq/m ³)	地面沉积外照射不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
			50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m
¹³ N	1.74E+07	6.26E-15	1.23E-42	5.97E-20	8.17E-16	1.98E-14	7.78E-14	1.51E-13	2.12E-13	2.53E-13	2.74E-13	2.82E-13
¹¹ C	1.28E+08	4.15E-15	1.22E-41	5.97E-19	8.16E-15	1.98E-13	7.77E-13	1.51E-12	2.12E-12	2.52E-12	2.74E-12	2.81E-12
⁷ Be	1.91E+04	5.83E-17	9.61E-44	4.68E-21	6.41E-17	1.55E-15	6.10E-15	1.18E-14	1.66E-14	1.98E-14	2.15E-14	2.21E-14
³ H	5.61E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
²¹¹ At	1.25E+06	5.47E-17	3.32E-44	1.62E-21	2.22E-17	5.37E-16	2.11E-15	4.10E-15	5.76E-15	6.85E-15	7.43E-15	7.64E-15
²⁰⁷ Bi	2.36E+01	3.18E-15	1.34E-42	6.55E-20	8.95E-16	2.17E-14	8.52E-14	1.66E-13	2.33E-13	2.77E-13	3.00E-13	3.09E-13
¹⁴ C	1.01E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
⁷⁴ As	1.89E+01	3.23E-15	1.76E-45	8.56E-23	1.17E-18	2.84E-17	1.11E-16	2.17E-16	3.04E-16	3.62E-16	3.93E-16	4.03E-16
⁷² Ga	1.92E+04	7.19E-15	1.32E-43	6.41E-21	8.77E-17	2.13E-15	8.35E-15	1.62E-14	2.28E-14	2.71E-14	2.94E-14	3.02E-14
⁷² As	1.14E+02	1.33E-14	2.66E-45	1.30E-22	1.78E-18	4.31E-17	1.69E-16	3.29E-16	4.62E-16	5.49E-16	5.96E-16	6.12E-16
⁷¹ Ge	4.57E+06	2.93E-18	2.48E-43	1.21E-20	1.65E-16	4.01E-15	1.57E-14	3.06E-14	4.30E-14	5.11E-14	5.55E-14	5.70E-14
⁷⁰ Ga	7.97E+05	7.55E-15	1.43E-43	6.99E-21	9.55E-17	2.32E-15	9.10E-15	1.77E-14	2.48E-14	2.95E-14	3.20E-14	3.29E-14
⁶⁹ Zn	5.50E+04	2.02E-15	7.06E-45	3.44E-22	4.71E-18	1.14E-16	4.48E-16	8.71E-16	1.22E-15	1.45E-15	1.58E-15	1.62E-15
⁶⁹ Ge	2.23E+07	2.82E-15	1.66E-40	8.08E-18	1.10E-13	2.68E-12	1.05E-11	2.04E-11	2.87E-11	3.41E-11	3.70E-11	3.81E-11
⁶⁸ Ga	2.08E+07	1.00E-14	1.59E-41	7.74E-19	1.06E-14	2.57E-13	1.01E-12	1.96E-12	2.75E-12	3.27E-12	3.55E-12	3.65E-12
⁶⁸ Ge	8.74E+05	2.90E-18	1.11E-42	5.43E-20	7.42E-16	1.80E-14	7.07E-14	1.37E-13	1.93E-13	2.29E-13	2.49E-13	2.56E-13
⁶⁷ Cu	3.19E+04	1.61E-16	2.14E-44	1.05E-21	1.43E-17	3.47E-16	1.36E-15	2.64E-15	3.71E-15	4.42E-15	4.79E-15	4.93E-15
⁶⁷ Ga	1.29E+07	1.74E-16	1.18E-41	5.76E-19	7.88E-15	1.91E-13	7.51E-13	1.46E-12	2.05E-12	2.44E-12	2.64E-12	2.72E-12
⁶⁷ Ge	5.85E+01	1.48E-14	1.84E-47	8.98E-25	1.23E-20	2.98E-19	1.17E-18	2.27E-18	3.19E-18	3.80E-18	4.12E-18	4.23E-18

核素	释放量,Bq	地面沉积外照射剂量转化因子, (Sv/s)/(Bq/m ³)	地面沉积外照射不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
			50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m
⁶⁶ Ga	1.28E+07	1.09E-14	8.97E-41	4.37E-18	5.98E-14	1.45E-12	5.69E-12	1.11E-11	1.55E-11	1.85E-11	2.00E-11	2.06E-11
⁶⁵ Ni	2.02E+01	7.23E-15	5.04E-46	2.46E-23	3.36E-19	8.14E-18	3.20E-17	6.21E-17	8.73E-17	1.04E-16	1.13E-16	1.16E-16
⁶⁵ Zn	3.54E+05	6.52E-16	9.11E-41	4.44E-18	6.08E-14	1.47E-12	5.79E-12	1.12E-11	1.58E-11	1.88E-11	2.04E-11	2.10E-11
⁶⁵ Ga	2.64E+05	1.09E-14	4.91E-44	2.40E-21	3.28E-17	7.94E-16	3.12E-15	6.06E-15	8.51E-15	1.01E-14	1.10E-14	1.13E-14
⁶⁴ Cu	3.41E+06	3.93E-16	1.15E-42	5.61E-20	7.67E-16	1.86E-14	7.30E-14	1.42E-13	1.99E-13	2.37E-13	2.57E-13	2.64E-13
⁶³ Ni	3.06E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
⁶³ Zn	5.81E+06	1.19E-14	3.00E-42	1.46E-19	2.00E-15	4.84E-14	1.90E-13	3.69E-13	5.19E-13	6.17E-13	6.70E-13	6.89E-13
⁶² Zn	2.18E+04	5.52E-16	7.46E-45	3.64E-22	4.98E-18	1.21E-16	4.74E-16	9.20E-16	1.29E-15	1.54E-15	1.67E-15	1.71E-15
⁶¹ Co	2.02E+03	4.69E-15	1.06E-45	5.15E-23	7.05E-19	1.71E-17	6.71E-17	1.30E-16	1.83E-16	2.18E-16	2.36E-16	2.43E-16
⁶¹ Cu	5.93E+06	4.15E-15	5.54E-42	2.70E-19	3.69E-15	8.95E-14	3.52E-13	6.83E-13	9.59E-13	1.14E-12	1.24E-12	1.27E-12
⁶⁰ Co	7.45E+00	1.94E-15	4.51E-44	2.20E-21	3.01E-17	7.29E-16	2.86E-15	5.56E-15	7.81E-15	9.29E-15	1.01E-14	1.04E-14
⁶⁰ Cu	4.37E+05	1.44E-14	1.68E-43	8.18E-21	1.12E-16	2.71E-15	1.07E-14	2.07E-14	2.91E-14	3.46E-14	3.75E-14	3.86E-14
⁵⁸ Co	1.21E+00	8.40E-16	1.16E-46	5.67E-24	7.75E-20	1.88E-18	7.38E-18	1.43E-17	2.01E-17	2.40E-17	2.60E-17	2.67E-17
⁵⁷ Co	6.49E+03	1.38E-16	3.95E-43	1.92E-20	2.63E-16	6.38E-15	2.51E-14	4.87E-14	6.84E-14	8.14E-14	8.83E-14	9.07E-14
^{69m} Zn	2.74E+03	5.64E-16	1.43E-45	6.99E-23	9.56E-19	2.32E-17	9.11E-17	1.77E-16	2.48E-16	2.96E-16	3.21E-16	3.30E-16
^{71m} Zn	4.44E+02	7.85E-15	9.31E-46	4.54E-23	6.21E-19	1.51E-17	5.91E-17	1.15E-16	1.61E-16	1.92E-16	2.08E-16	2.14E-16
¹⁵ O	2.86E+04	1.00E-14	6.76E-46	3.30E-23	4.51E-19	1.09E-17	4.29E-17	8.34E-17	1.17E-16	1.39E-16	1.51E-16	1.55E-16
⁴¹ Ar	3.53E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
²⁴³ Am	2.66E+03	7.60E-17	6.77E-41	3.30E-18	4.52E-14	1.10E-12	4.30E-12	8.36E-12	1.17E-11	1.40E-11	1.51E-11	1.56E-11
⁹⁵ Nb	3.70E+02	6.61E-16	1.38E-44	6.75E-22	9.23E-18	2.24E-16	8.78E-16	1.71E-15	2.40E-15	2.85E-15	3.09E-15	3.18E-15

核素	释放量,Bq	地面沉积外照射剂量转化因子, (Sv/s)/(Bq/m ³)	地面沉积外照射不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
			50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m
¹⁸² Ta	3.70E+02	1.63E-15	1.11E-43	5.43E-21	7.43E-17	1.80E-15	7.08E-15	1.37E-14	1.93E-14	2.30E-14	2.49E-14	2.56E-14
¹⁷⁹ Ta	3.70E+02	3.91E-17	1.56E-44	7.59E-22	1.04E-17	2.52E-16	9.89E-16	1.92E-15	2.70E-15	3.21E-15	3.48E-15	3.58E-15
合计			8.46E-40	4.13E-17	5.64E-13	1.37E-11	5.37E-11	1.04E-10	1.47E-10	1.74E-10	1.89E-10	1.95E-10

表 5-31 吸入内照射计算结果

核素	释放量,Bq	吸入内照射剂 量转换因子, Sv/Bq	吸入内照射不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
			50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m
¹³ N	1.74E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
¹¹ C	1.28E+08	1.80E-11	2.40E-38	1.17E-15	1.60E-11	3.87E-10	1.52E-09	2.95E-09	4.15E-09	4.94E-09	5.36E-09	5.51E-09
⁷ Be	1.91E+04	5.00E-11	9.93E-42	4.84E-19	6.62E-15	1.61E-13	6.31E-13	1.23E-12	1.72E-12	2.05E-12	2.22E-12	2.28E-12
³ H	5.61E+05	4.50E-11	2.62E-40	1.28E-17	1.75E-13	4.24E-12	1.67E-11	3.24E-11	4.55E-11	5.41E-11	5.87E-11	6.03E-11
²¹¹ At	1.25E+06	1.10E-07	1.43E-36	6.97E-14	9.53E-10	2.31E-08	9.08E-08	1.76E-07	2.48E-07	2.95E-07	3.20E-07	3.29E-07
²⁰⁷ Bi	2.36E+01	5.60E-09	1.38E-42	6.71E-20	9.18E-16	2.22E-14	8.74E-14	1.70E-13	2.38E-13	2.84E-13	3.08E-13	3.16E-13
¹⁴ C	1.01E+04	2.90E-10	3.04E-41	1.48E-18	2.03E-14	4.92E-13	1.93E-12	3.75E-12	5.27E-12	6.27E-12	6.81E-12	7.00E-12
⁷⁴ As	1.89E+01	2.10E-09	4.12E-43	2.01E-20	2.75E-16	6.66E-15	2.62E-14	5.08E-14	7.14E-14	8.49E-14	9.22E-14	9.47E-14
⁷² Ga	1.92E+04	5.30E-10	1.06E-40	5.16E-18	7.06E-14	1.71E-12	6.72E-12	1.31E-11	1.83E-11	2.18E-11	2.37E-11	2.43E-11
⁷² As	1.14E+02	9.00E-10	1.07E-42	5.21E-20	7.12E-16	1.73E-14	6.78E-14	1.32E-13	1.85E-13	2.20E-13	2.39E-13	2.45E-13
⁷¹ Ge	4.57E+06	1.10E-11	5.23E-40	2.55E-17	3.49E-13	8.46E-12	3.32E-11	6.45E-11	9.06E-11	1.08E-10	1.17E-10	1.20E-10
⁷⁰ Ga	7.97E+05	1.60E-11	1.33E-40	6.47E-18	8.85E-14	2.15E-12	8.43E-12	1.64E-11	2.30E-11	2.74E-11	2.97E-11	3.05E-11
⁶⁹ Zn	5.50E+04	2.60E-11	1.49E-41	7.26E-19	9.93E-15	2.41E-13	9.45E-13	1.84E-12	2.58E-12	3.07E-12	3.33E-12	3.42E-12
⁶⁹ Ge	2.23E+07	2.90E-10	6.72E-38	3.27E-15	4.48E-11	1.09E-09	4.27E-09	8.28E-09	1.16E-08	1.38E-08	1.50E-08	1.54E-08
⁶⁸ Ga	2.08E+07	4.90E-11	1.06E-38	5.18E-16	7.08E-12	1.72E-10	6.74E-10	1.31E-09	1.84E-09	2.19E-09	2.37E-09	2.44E-09
⁶⁸ Ge	8.74E+05	1.40E-08	1.27E-37	6.20E-15	8.48E-11	2.06E-09	8.08E-09	1.57E-08	2.20E-08	2.62E-08	2.84E-08	2.92E-08
⁶⁷ Cu	3.19E+04	5.50E-10	1.82E-40	8.89E-18	1.22E-13	2.95E-12	1.16E-11	2.25E-11	3.16E-11	3.76E-11	4.08E-11	4.19E-11
⁶⁷ Ga	1.29E+07	2.40E-10	3.21E-38	1.56E-15	2.14E-11	5.19E-10	2.04E-09	3.96E-09	5.56E-09	6.62E-09	7.18E-09	7.38E-09
⁶⁷ Ge	5.85E+01	2.50E-11	1.52E-44	7.41E-22	1.01E-17	2.46E-16	9.66E-16	1.88E-15	2.63E-15	3.13E-15	3.40E-15	3.49E-15
⁶⁶ Ga	1.28E+07	4.40E-10	5.87E-38	2.86E-15	3.92E-11	9.49E-10	3.73E-09	7.24E-09	1.02E-08	1.21E-08	1.31E-08	1.35E-08
⁶⁵ Ni	2.02E+01	8.50E-11	1.79E-44	8.72E-22	1.19E-17	2.89E-16	1.14E-15	2.21E-15	3.10E-15	3.69E-15	4.00E-15	4.11E-15
⁶⁵ Zn	3.54E+05	1.60E-09	5.88E-39	2.87E-16	3.92E-12	9.51E-11	3.74E-10	7.26E-10	1.02E-09	1.21E-09	1.32E-09	1.35E-09

核素	释放量,Bq	吸入内照射剂 量转换因子, Sv/Bq	吸入内照射不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
			50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m
⁶⁵ Ga	2.64E+05	1.70E-11	4.66E-41	2.27E-18	3.11E-14	7.53E-13	2.96E-12	5.75E-12	8.07E-12	9.60E-12	1.04E-11	1.07E-11
⁶⁴ Cu	3.41E+06	1.10E-10	3.90E-39	1.90E-16	2.60E-12	6.31E-11	2.48E-10	4.81E-10	6.76E-10	8.04E-10	8.73E-10	8.97E-10
⁶³ Ni	3.06E+00	4.80E-10	1.53E-44	7.46E-22	1.02E-17	2.47E-16	9.71E-16	1.89E-15	2.65E-15	3.15E-15	3.42E-15	3.51E-15
⁶³ Zn	5.81E+06	3.50E-11	2.12E-39	1.03E-16	1.41E-12	3.42E-11	1.34E-10	2.61E-10	3.67E-10	4.36E-10	4.73E-10	4.86E-10
⁶² Zn	2.18E+04	5.00E-10	1.13E-40	5.52E-18	7.55E-14	1.83E-12	7.19E-12	1.40E-11	1.96E-11	2.33E-11	2.53E-11	2.60E-11
⁶¹ Co	2.02E+03	4.70E-11	9.89E-43	4.82E-20	6.59E-16	1.60E-14	6.28E-14	1.22E-13	1.71E-13	2.04E-13	2.21E-13	2.27E-13
⁶¹ Cu	5.93E+06	7.40E-11	4.57E-39	2.23E-16	3.05E-12	7.38E-11	2.90E-10	5.63E-10	7.91E-10	9.41E-10	1.02E-09	1.05E-09
⁶⁰ Co	7.45E+00	1.00E-08	7.74E-43	3.78E-20	5.16E-16	1.25E-14	4.92E-14	9.55E-14	1.34E-13	1.60E-13	1.73E-13	1.78E-13
⁶⁰ Cu	4.37E+05	3.30E-11	1.50E-40	7.31E-18	1.00E-13	2.42E-12	9.52E-12	1.85E-11	2.60E-11	3.09E-11	3.35E-11	3.45E-11
⁵⁸ Co	1.21E+00	3.10E-09	3.89E-44	1.89E-21	2.59E-17	6.28E-16	2.47E-15	4.79E-15	6.73E-15	8.01E-15	8.69E-15	8.93E-15
⁵⁷ Co	6.49E+03	5.50E-10	3.71E-41	1.81E-18	2.48E-14	6.00E-13	2.36E-12	4.58E-12	6.44E-12	7.66E-12	8.31E-12	8.54E-12
^{69m} Zn	2.74E+03	2.40E-10	6.83E-42	3.33E-19	4.56E-15	1.10E-13	4.34E-13	8.43E-13	1.18E-12	1.41E-12	1.53E-12	1.57E-12
^{71m} Zn	4.44E+02	1.50E-10	6.92E-43	3.37E-20	4.62E-16	1.12E-14	4.40E-14	8.54E-14	1.20E-13	1.43E-13	1.55E-13	1.59E-13
¹⁵ O	2.86E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
⁴¹ Ar	3.53E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
²⁴³ Am	2.66E+03	4.10E-05	1.13E-36	5.53E-14	7.56E-10	1.83E-08	7.20E-08	1.40E-07	1.97E-07	2.34E-07	2.54E-07	2.61E-07
⁹⁵ Nb	3.70E+02	1.50E-09	5.77E-42	2.81E-19	3.85E-15	9.33E-14	3.67E-13	7.12E-13	1.00E-12	1.19E-12	1.29E-12	1.33E-12
¹⁸² Ta	3.70E+02	7.60E-09	2.92E-41	1.43E-18	1.95E-14	4.73E-13	1.86E-12	3.61E-12	5.07E-12	6.03E-12	6.54E-12	6.72E-12
¹⁷⁹ Ta	3.70E+02	2.20E-10	8.47E-43	4.13E-20	5.65E-16	1.37E-14	5.38E-14	1.04E-13	1.47E-13	1.74E-13	1.89E-13	1.95E-13
合计			2.90E-36	1.41E-13	1.94E-09	4.69E-08	1.84E-07	3.58E-07	5.03E-07	5.98E-07	6.49E-07	6.67E-07

表 5-32 不同距离处公众受照总剂量

核素	不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
	50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m
¹³ N	4.72E-38	2.30E-15	3.15E-11	7.64E-10	3.00E-09	5.83E-09	8.18E-09	9.74E-09	1.06E-08	1.09E-08
¹¹ C	3.40E-37	1.66E-14	2.27E-10	5.49E-09	2.16E-08	4.19E-08	5.89E-08	7.00E-08	7.60E-08	7.81E-08
⁷ Be	1.17E-41	5.69E-19	7.78E-15	1.89E-13	7.41E-13	1.44E-12	2.02E-12	2.40E-12	2.61E-12	2.68E-12
³ H	2.62E-40	1.28E-17	1.75E-13	4.24E-12	1.67E-11	3.24E-11	4.55E-11	5.41E-11	5.87E-11	6.03E-11
²¹¹ At	1.43E-36	6.97E-14	9.53E-10	2.31E-08	9.08E-08	1.76E-07	2.48E-07	2.95E-07	3.20E-07	3.29E-07
²⁰⁷ Bi	2.79E-42	1.36E-19	1.86E-15	4.51E-14	1.77E-13	3.44E-13	4.83E-13	5.75E-13	6.23E-13	6.41E-13
¹⁴ C	3.04E-41	1.48E-18	2.03E-14	4.92E-13	1.93E-12	3.75E-12	5.27E-12	6.27E-12	6.81E-12	7.00E-12
⁷⁴ As	4.48E-43	2.18E-20	2.99E-16	7.24E-15	2.84E-14	5.53E-14	7.76E-14	9.23E-14	1.00E-13	1.03E-13
⁷² Ga	2.17E-40	1.06E-17	1.45E-13	3.52E-12	1.38E-11	2.68E-11	3.77E-11	4.48E-11	4.86E-11	5.00E-11
⁷² As	1.68E-42	8.17E-20	1.12E-15	2.71E-14	1.06E-13	2.07E-13	2.90E-13	3.45E-13	3.75E-13	3.85E-13
⁷¹ Ge	5.24E-40	2.56E-17	3.50E-13	8.48E-12	3.33E-11	6.47E-11	9.09E-11	1.08E-10	1.17E-10	1.21E-10
⁷⁰ Ga	1.17E-39	5.71E-17	7.81E-13	1.89E-11	7.43E-11	1.44E-10	2.03E-10	2.41E-10	2.62E-10	2.69E-10
⁶⁹ Zn	4.60E-41	2.24E-18	3.07E-14	7.43E-13	2.92E-12	5.67E-12	7.97E-12	9.48E-12	1.03E-11	1.06E-11
⁶⁹ Ge	1.09E-37	5.30E-15	7.25E-11	1.76E-09	6.91E-09	1.34E-08	1.88E-08	2.24E-08	2.43E-08	2.50E-08
⁶⁸ Ga	7.63E-38	3.72E-15	5.09E-11	1.23E-09	4.85E-09	9.41E-09	1.32E-08	1.57E-08	1.71E-08	1.75E-08
⁶⁸ Ge	1.27E-37	6.20E-15	8.48E-11	2.06E-09	8.08E-09	1.57E-08	2.20E-08	2.62E-08	2.84E-08	2.92E-08
⁶⁷ Cu	1.94E-40	9.47E-18	1.30E-13	3.14E-12	1.23E-11	2.39E-11	3.36E-11	4.00E-11	4.34E-11	4.46E-11
⁶⁷ Ga	3.55E-38	1.73E-15	2.37E-11	5.74E-10	2.26E-09	4.38E-09	6.15E-09	7.32E-09	7.94E-09	8.16E-09
⁶⁷ Ge	3.22E-43	1.57E-20	2.15E-16	5.20E-15	2.04E-14	3.97E-14	5.58E-14	6.63E-14	7.19E-14	7.40E-14
⁶⁶ Ga	1.43E-37	6.99E-15	9.56E-11	2.32E-09	9.10E-09	1.77E-08	2.48E-08	2.95E-08	3.20E-08	3.29E-08
⁶⁵ Ni	6.37E-44	3.11E-21	4.25E-17	1.03E-15	4.05E-15	7.86E-15	1.10E-14	1.31E-14	1.42E-14	1.46E-14

核素	不同距离处公众受照剂量, mSv/a									
	50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m
⁶⁵ Zn	6.34E-39	3.09E-16	4.23E-12	1.02E-10	4.02E-10	7.82E-10	1.10E-09	1.31E-09	1.42E-09	1.46E-09
⁶⁵ Ga	1.02E-39	5.00E-17	6.84E-13	1.66E-11	6.51E-11	1.26E-10	1.78E-10	2.11E-10	2.29E-10	2.36E-10
⁶⁴ Cu	5.65E-39	2.75E-16	3.77E-12	9.13E-11	3.59E-10	6.97E-10	9.79E-10	1.16E-09	1.26E-09	1.30E-09
⁶³ Ni	1.53E-44	7.46E-22	1.02E-17	2.47E-16	9.71E-16	1.89E-15	2.65E-15	3.15E-15	3.42E-15	3.51E-15
⁶³ Zn	2.44E-38	1.19E-15	1.63E-11	3.95E-10	1.55E-09	3.01E-09	4.23E-09	5.04E-09	5.46E-09	5.62E-09
⁶² Zn	1.30E-40	6.36E-18	8.69E-14	2.11E-12	8.28E-12	1.61E-11	2.26E-11	2.69E-11	2.92E-11	3.00E-11
⁶¹ Co	3.03E-42	1.48E-19	2.02E-15	4.91E-14	1.93E-13	3.74E-13	5.26E-13	6.26E-13	6.79E-13	6.98E-13
⁶¹ Cu	1.66E-38	8.10E-16	1.11E-11	2.68E-10	1.05E-09	2.05E-09	2.88E-09	3.42E-09	3.71E-09	3.82E-09
⁶⁰ Co	8.45E-43	4.12E-20	5.64E-16	1.37E-14	5.37E-14	1.04E-13	1.46E-13	1.74E-13	1.89E-13	1.94E-13
⁶⁰ Cu	3.99E-39	1.95E-16	2.66E-12	6.46E-11	2.54E-10	4.93E-10	6.92E-10	8.23E-10	8.93E-10	9.18E-10
⁵⁸ Co	4.06E-44	1.98E-21	2.71E-17	6.56E-16	2.58E-15	5.01E-15	7.03E-15	8.37E-15	9.08E-15	9.33E-15
⁵⁷ Co	3.89E-41	1.90E-18	2.59E-14	6.29E-13	2.47E-12	4.80E-12	6.74E-12	8.01E-12	8.69E-12	8.94E-12
^{69m} Zn	8.92E-42	4.35E-19	5.95E-15	1.44E-13	5.66E-13	1.10E-12	1.55E-12	1.84E-12	1.99E-12	2.05E-12
^{71m} Zn	2.37E-42	1.15E-19	1.58E-15	3.83E-14	1.50E-13	2.92E-13	4.10E-13	4.88E-13	5.30E-13	5.44E-13
¹⁵ O	9.28E-41	4.52E-18	6.19E-14	1.50E-12	5.89E-12	1.14E-11	1.61E-11	1.91E-11	2.08E-11	2.13E-11
⁴¹ Ar	2.43E-36	1.18E-13	1.62E-09	3.93E-08	1.54E-07	3.00E-07	4.21E-07	5.01E-07	5.43E-07	5.58E-07
²⁴³ Am	1.13E-36	5.53E-14	7.56E-10	1.83E-08	7.20E-08	1.40E-07	1.97E-07	2.34E-07	2.54E-07	2.61E-07
⁹⁵ Nb	6.18E-42	3.01E-19	4.12E-15	9.99E-14	3.92E-13	7.62E-13	1.07E-12	1.27E-12	1.38E-12	1.42E-12
¹⁸² Ta	3.03E-41	1.48E-18	2.02E-14	4.89E-13	1.92E-12	3.73E-12	5.24E-12	6.24E-12	6.77E-12	6.96E-12
¹⁷⁹ Ta	1.03E-42	5.02E-20	6.87E-16	1.66E-14	6.54E-14	1.27E-13	1.78E-13	2.12E-13	2.30E-13	2.37E-13
合计	7.23E-36	3.53E-13	4.82E-09	1.17E-07	4.59E-07	8.92E-07	1.25E-06	1.49E-06	1.62E-06	1.66E-06

5.3 事故情况下环境影响分析

5.3.1 事故分析及措施

(1) 安全联锁失效事故

事故分析：超重元素合成装置及同位素应用研发装置加速器运行时，由于安全联锁装置失灵，运行期间工作人员或公众可能误入加速器隧道或束流终端内，造成工作人员或公众误照。

防范及应对措施：本项目加速器安全联锁系统设计严格按“最优切断”、“失效保护”及“冗余设计”原则，其发生安全联锁失效的概率很小。另外，加速器所在机房设有视频监控系统，一旦人员误入情况，位于控制室的工作人员通过视频监控及时发现，立即停止出束。

(2) 人员滞留事故

事故分析：加速器开机但加速器隧道或束流终端有人员滞留的情况，导致滞留人员受照到意外照射。

防范及应对措施：加速器所在房间设有视频监控，在加速器运行前工作人员需进行清场，因此，在辐射防护联锁系统的保护下，人员在加速器待开机前还滞留在隧道或束流终端的可能性很小；一旦发生这种极端情况，人员也可以通过安装在隧道或束流终端的紧急开门按钮（同时具有急停按钮功能）和紧急报警按钮（同时具有急停按钮功能）打开防护门离开隧道或束流终端。射线装置的辐射场性质为瞬发场，极端事故情况时加速器会立即停止，切断辐射源。

(3) 加速器冷却水泄露事故

事故分析：加速器运行过程中发生冷却水管故障或破裂事故，导致冷却水泄露。

防范及应对措施：加速器运行维护人员定期对冷却水管道进行维护检查，减少事故发生概率；另外，若发生该事故时，应立即停止出束，对冷却水系统进行检查、维修；若发生破裂，立即维修或更换。另外，在靶站、热室大厅地下一层设有一个

6m³的废水收集池，一旦发生冷却水泄露事故，将其泄露的冷却水收集到该废水收集池中暂存一段时间，经检测符合要求后外排，其造成的环境影响很小。

(4) 物料掉落

事故分析：放射性物料在转运过程中，由于人员操作不慎，物料掉出转运容器。本项目操作的放射性物料均自带包装容器，且转运时有转运容器，转运过程中有剂量员全程跟踪或视频监控。

防范及应对措施：放射性物料放置在专用容器中，转运过程中专人负责，且有剂量员全程跟踪或视频监控，减少物料掉落发生概率。另外，当发生物料掉落出转运容器的情况时，若包装容器不破损，则不会产生污染。若包装容器破损，剂量员利用表面污染仪对可能沾污的区域进行检测，并进行去污处理，多次擦拭去污后，直至利用表面污染仪检测达到环境本底水平。

(5) 溶液洒漏

事故分析：本项目大部分工艺过程操作对象为溶液，实验过程中由于操作不慎，导致溶液洒漏造成表面沾污或人员沾污。

防范及应急措施：本项目工艺过程大多在热室或手套箱中由专业人员操作，其发生溶液撒漏的可能性很小；当由于意外导致溶液洒漏时，采用去污材料进行擦拭，对可能沾污的区域多次擦拭后进行表面污染测量，直至达到环境本底水平。人员沾污将在去污间首选擦拭去污，然后根据情况在去污间选择淋浴去污，淋浴去污过程中产生的污水将进入洗消废水收集池暂存，洗消废水收集池设在靶站、热室大厅地下一层，其容积为2m³，一旦发生人员沾污事故，将去污产生的废水收集暂存一段时间，经检测符合要求后外排，不满足要求将送辐射管理中心处理。

(6) 过滤器失效事故

事故分析：在实验过程中可能发生过滤器失效事故，使得排放气体未经过滤直接外排。

防范及应对措施：本项目放射性废气处理系统采用“冗余”设计原则，设置两道以上的过滤设备，其发生过滤器失效事故的可能性很小；另外，项目运行期间配

备必要的放射性监测仪器，定期进行放射性水平的监测，一旦发生异常将停止实验。

(7) 机械手皮老虎脱落、窥视窗玻璃破裂

事故分析：机械手和窥视窗在使用过程中，会出现裂纹、脱落等情况，外界空气进入热室，破坏热室的负压环境，导致热室内实验过程中产生的放射性气溶胶泄漏到操作区。

防范及应对措施：每次实验前，工作人员对其机械手皮老虎和窥视窗进行检查，一旦发现机械手破裂、窥视窗玻璃破裂，应及时更换。实验过程中，随时观察热室负压计的变化，当发现负压计的负压降低，立刻检查热室各密封部位。如突然出现机械手、窥视窗玻璃破裂现象，应马上停止活动。

(8) ^{211}At 冷凝回收装置发生故障

事故分析： ^{211}At 采用干馏法分离，其原理是利用高温将易挥发的 ^{211}At 从 Bi 靶中分离，沉积在后端冷凝管上；当外部冷凝水失效、管路破损、载气异常、分离温度异常等将导致冷凝回收装置发生故障。冷凝回收装置发生故障将导致 ^{211}At 未经冷凝回收扩散到空气中，对外环境造成辐射影响。

防范及应急措施：在实验过程中，加强前区的监测，一旦发生异常，立即停止实验，另外，本项目排风系统过滤装置可减少其对外环境造成的辐射影响。

(9) 超重终端靶室酒精泄露事故

事故分析：由于意外致使超重终端靶室酒精泄露，可能导致火灾等事故。

防范及应急措施：本项目靶室内部为真空，如靶室内部发生酒精泄露因无氧气环境，不会引起燃烧；靶室外部无火源，也无法引起燃烧，另外，靶室附近放置配置灭火器。

(10) 靶窗破裂事故

事故分析：由于束流、靶工艺等方面的影响，有可能会发生靶窗破裂事故，靶窗破裂可能会导致靶体内放射性气体泄露，致使靶真空腔体真空度发生变化，其对加速器和靶室抽真空的真空泵造成污染。

防范及应对措施：在加速器段设置快保护，监测到真空度有较大的变化，快速切断束流，并关闭与靶连接的闸板阀；另外，在抽真空时增加两道高效过滤装置以防靶内的放射性物质对真空泵组的污染。

5.3.2 假想事故后果估算

根据以上分析，本项目运行时，假想最严重事故为过滤器失效以及热室机械手皮老虎或窥视窗破裂事故。发生该事故时主要对周围公众及工作人员造成辐射影响。

5.3.2.1 过滤器失效事故

(1) 事故源项

假设热室过滤器和三废处理中心过滤器同时失效，则正在实验过程中产生的气溶胶将直接通过排风管道排入外环境。其过滤器失效情况下通过排风口排入外环境的源项见表 5-33。

表 5-33 过滤器失效时释放源项

材料	石墨包壳		气体及气溶胶产生量, Bq	气体及气溶胶排放量,Bq
	核素	活度 Bq		
石墨碳管	¹³ N	2.71E+08	2.71E+08	2.71E+08
	¹¹ C	2.40E+09	2.40E+09	2.40E+09
	⁷ Be	3.40E+05	3.40E+01	3.40E+01
	³ H	1.72E+05	1.72E+05	1.72E+05
²⁰⁹ Bi 靶	²¹¹ At	7.37E+11	7.37E+07	7.37E+07
	²⁰⁷ Bi	1.39E+07	1.39E+03	1.39E+03
	¹⁴ C	5.37E+03	5.37E+03	5.37E+03
	¹³ N	2.10E+08	2.10E+08	2.10E+08
	¹¹ C	3.26E+08	3.26E+08	3.26E+08
	³ H	1.43E+07	1.43E+07	1.43E+07
天然 Ga 靶	⁷⁴ As	1.11E+07	1.11E+03	1.11E+03
	⁷² Ga	1.13E+10	1.13E+06	1.13E+06
	⁷² As	6.71E+07	6.71E+03	6.71E+03
	⁷¹ Ge	2.69E+12	2.69E+08	2.69E+08
	⁷⁰ Ga	4.50E+11	4.50E+07	4.50E+07
	⁶⁹ Zn	2.48E+09	2.48E+05	2.48E+05
	⁶⁹ Ge	1.31E+13	1.31E+09	1.31E+09
	⁶⁸ Ga	8.90E+12	8.90E+08	8.90E+08
⁶⁸ Ge	5.14E+11	5.14E+07	5.14E+07	

材料	石墨包壳		气体及气溶胶产	气体及气溶胶排
	⁶⁷ Cu	1.08E+10	1.08E+06	1.08E+06
⁶⁷ Ga	4.34E+11	4.34E+07	4.34E+07	
⁶⁷ Ge	3.44E+07	3.44E+03	3.44E+03	
⁶⁵ Zn	2.08E+11	2.08E+07	2.08E+07	
⁶⁴ Cu	2.66E+10	2.66E+06	2.66E+06	
⁶³ Ni	2.62E+05	2.62E+01	2.62E+01	
³ H	1.48E+07	1.48E+07	1.48E+07	
^{69m} Zn	1.61E+09	1.61E+05	1.61E+05	
^{71m} Zn	2.61E+08	2.61E+04	2.61E+04	
天然 Zn 靶	⁷¹ Ge	8.15E+06	8.15E+02	8.15E+02
	⁷⁰ Ga	1.91E+10	1.91E+06	1.91E+06
	⁶⁹ Zn	2.99E+10	2.99E+06	2.99E+06
	⁶⁹ Ge	1.35E+07	1.35E+03	1.35E+03
	⁶⁸ Ga	3.36E+12	3.36E+08	3.36E+08
	⁶⁷ Cu	7.96E+09	7.96E+05	7.96E+05
	⁶⁷ Ga	7.13E+12	7.13E+08	7.13E+08
	⁶⁶ Ga	7.55E+12	7.55E+08	7.55E+08
	⁶⁵ Ni	1.19E+07	1.19E+03	1.19E+03
	⁶⁵ Zn	1.56E+11	1.56E+07	1.56E+07
	⁶⁵ Ga	1.55E+11	1.55E+07	1.55E+07
	⁶⁴ Cu	1.98E+12	1.98E+08	1.98E+08
	⁶³ Ni	1.54E+06	1.54E+02	1.54E+02
	⁶³ Zn	3.42E+12	3.42E+08	3.42E+08
	⁶² Zn	1.12E+10	1.12E+06	1.12E+06
	⁶¹ Co	1.19E+09	1.19E+05	1.19E+05
	⁶¹ Cu	3.49E+12	3.49E+08	3.49E+08
	⁶⁰ Co	4.38E+06	4.38E+02	4.38E+02
	⁶⁰ Cu	2.57E+11	2.57E+07	2.57E+07
	⁵⁹ Ni	2.01E+03	2.01E-01	2.01E-01
⁵⁸ Co	7.09E+05	7.09E+01	7.09E+01	
⁵⁷ Co	3.82E+09	3.82E+05	3.82E+05	
³ H	2.95E+06	2.95E+06	2.95E+06	

(2) 事故时公众剂量估算模式

事故释放短期扩散因子采用 USNRC 管理导则 RG1.145 推荐的模式和方法进行计算。经通风口释放，其短期扩散因子由下列方程组确定：

$$\left(\frac{X}{Q}\right) = \frac{1}{u_{10}(\pi\sigma_y\sigma_z + 0.5A)} \quad (5-1)$$

$$\left(\frac{X}{Q}\right) = \frac{1}{u_{10}(3\pi\sigma_y\sigma_z)} \quad (5-2)$$

$$\left(\frac{X}{Q}\right) = \frac{1}{u_{10}\pi\sum_y\sigma_z} \quad (5-3)$$

式中,

X/Q 是短期扩散因子, $s\cdot m^{-3}$;

σ_y 是横向扩散参数, m;

σ_z 是垂向扩散参数, $\sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}}$, m;

Σ_y 是考虑了建筑物尾流效应的横向扩散参数, m ($\Sigma_y = M\sigma_y$, 当 $x \leq 800m$; 此处的 M 由图 5-15 确定);

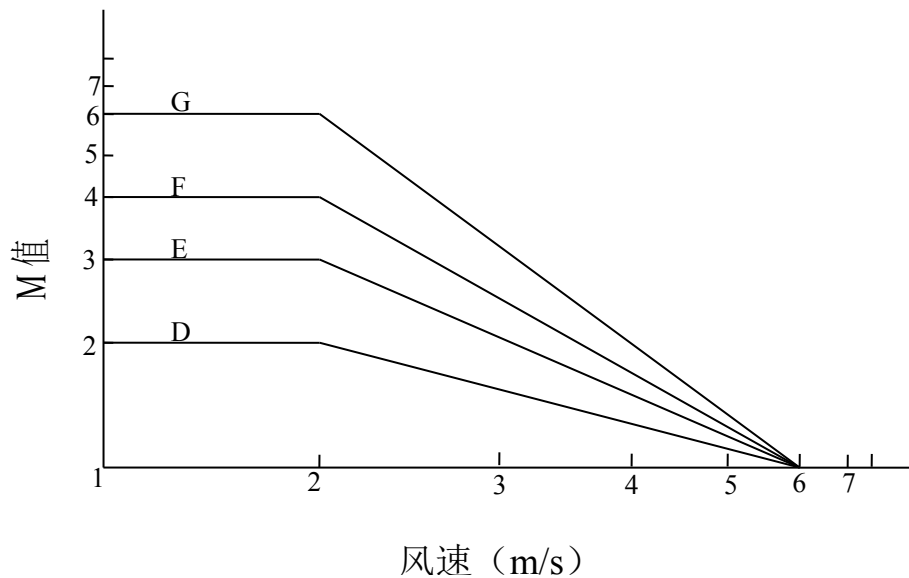


图 5-15 Σ_y 修正因子 M

u_{10} 是地面 10m 高度处的风速, m/s;

当大气稳定度为 D、E 和 F 时, 以及 $u_{10} < 6m/s$ 时, 将考虑烟羽横截方向的弯曲,

采用上式计算 (X/Q) 值, 选取方程 (5-1) 和方程 (5-2) 计算的 (X/Q) 值的大者, 然后将该值与方程 (5-3) 计算的 (X/Q) 进行比较, 取其小者为释放短期扩散因子。

当大气稳定度为 A、B 和 C 时, 及 $u_{10} \geq 6\text{m/s}$ 时, 将不考虑烟羽横截方向的弯曲, 取方程 (5-1) 和方程 (5-2) 计算的 (X/Q) 值的大者为地面释放短期扩散因子。

① 放射性烟云浸没外照射

放射性烟云浸没外照射剂量由下式计算:

$$D_{A,r,e} = \sum_i Q_{i,e} \cdot (\chi/Q)_{r,e} \cdot F_{A,i} \quad (5-4)$$

式中,

$D_{A,r,e}$ —事故发生后第 e 释放时间段内在距离 r 处的烟云浸没剂量, Sv;

$Q_{i,e}$ —事故发生后第 e 释放时间段内放射性核素 i 的释放活度, Bq;

$(\chi/Q)_{r,e}$ —事故发生后第 e 释放时间段、在距离 r 处的事故大气弥散因子, s/m^3 ;

$F_{A,i}$ —放射性核素 i 的空气浸没剂量转换因子, $(\text{Sv} \cdot \text{m}^3) / (\text{Bq} \cdot \text{s})$;

② 吸入放射性物质引起的内照射

吸入放射性物质引起的内照射的待积有效剂量由下式计算:

$$D_{I,r,e} = \sum_i Q_{i,e} \cdot (\chi/Q)_{r,e} \cdot B_{R,e} \cdot F_{I,i} \quad (5-5)$$

式中, $D_{I,r,e}$ —事故发生后第 e 释放时间段内在距离 r 处由于吸入烟云中放射性物质而产生的剂量, Sv;

$B_{R,e}$ —公众在第 e 释放时间段内、在距离 r 处的 R 是成人的呼吸率, m^3/s ;

$F_{I,i}$ —放射性核素 i 的吸入剂量转换因子, Sv/Bq。

③ 事故个人剂量

事故释放时，公众个人受到的事故剂量（Sv）由下式计算：

$$D_{acc} = D_{A,r,e} + D_{I,r,e} \quad (5-6)$$

式中各符号意义同上。

（3）事故后果计算

本项目保守估算：按照通风口排放、F类稳定度、风速2m/s的气象条件进行计算。计算出不同距离处的扩散因子见表5-34，不同距离处公众受照剂量见表5-35。

表 5-34 经通风口释放短期扩散因子

下风向距离, m	扩散因子, s·m ⁻³
20	0.001048
50	0.000159
100	3.81E-05
200	9.13E-06
300	3.96E-06
400	2.19E-06
500	1.38E-06

从表5-35可知，在发生过滤器失效事故时，公众收到的最大剂量为3.79E-02mSv。

表 5-35 过滤器失效事故公众受照剂量

材料	核素	气体及气溶胶排放量, Bq	空气浸没, (Sv m ³)/(s Bq)	全身等效地面沉积 (Sv m ²)/(s Bq)	内照射, Sv/Bq	公众受照剂量, mSv						
						20m	50m	100m	200m	300m	400m	500m
石墨碳管	¹³ N	2.71E+08	4.9E-14	1.01E-15	0.00E+00	1.35E-07	2.70E-08	8.13E-09	2.52E-09	1.29E-09	8.13E-10	5.72E-10
	¹¹ C	2.40E+09	4.89E-14	1.01E-15	1.80E-11	1.34E-06	2.68E-07	8.07E-08	2.50E-08	1.28E-08	8.07E-09	5.67E-09
	⁷ Be	3.40E+01	2.36E-15	4.89E-17	5.50E-11	7.15E-15	1.43E-15	4.31E-16	1.33E-16	6.85E-17	4.31E-17	3.03E-17
	³ H	1.72E+05	3.31E-19	0.00E+00	2.60E-10	1.52E-10	3.03E-11	9.13E-12	2.83E-12	1.45E-12	9.13E-13	6.42E-13
²⁰⁹ Bi 靶	²¹¹ At	7.37E+07	1.59E-15	3.62E-17	1.10E-07	2.75E-05	5.50E-06	1.65E-06	5.12E-07	2.63E-07	1.66E-07	1.16E-07
	²⁰⁷ Bi	1.39E+03	7.54E-14	1.48E-15	5.60E-09	2.75E-11	5.49E-12	1.65E-12	5.12E-13	2.63E-13	1.65E-13	1.16E-13
	¹⁴ C	5.37E+03	2.24E-19	1.61E-20	5.80E-09	1.05E-10	2.11E-11	6.35E-12	1.97E-12	1.01E-12	6.35E-13	4.47E-13
	¹³ N	2.10E+08	4.9E-14	1.01E-15	0.00E+00	1.05E-07	2.09E-08	6.30E-09	1.95E-09	1.00E-09	6.30E-10	4.43E-10
	¹¹ C	3.26E+08	4.89E-14	1.01E-15	1.80E-11	1.82E-07	3.64E-08	1.10E-08	3.39E-09	1.74E-09	1.10E-09	7.71E-10
	³ H	1.43E+07	3.31E-19	0.00E+00	2.60E-10	1.26E-08	2.52E-09	7.59E-10	2.35E-10	1.21E-10	7.59E-11	5.34E-11
天然 Ga 靶	⁷⁴ As	1.11E+03	3.65E-14	7.47E-16	2.10E-09	8.31E-12	1.66E-12	5.01E-13	1.55E-13	7.95E-14	5.01E-14	3.52E-14
	⁷² Ga	1.13E+06	1.39E-13	2.5E-15	5.30E-10	3.63E-09	7.25E-10	2.18E-10	6.76E-11	3.47E-11	2.18E-11	1.54E-11
	⁷² As	6.71E+03	8.78E-14	1.75E-15	9.00E-10	2.65E-11	5.29E-12	1.59E-12	4.93E-13	2.53E-13	1.59E-13	1.12E-13
	⁷¹ Ge	2.69E+08	7.47E-20	2.18E-20	1.10E-11	1.00E-08	2.01E-09	6.04E-10	1.87E-10	9.60E-11	6.04E-11	4.25E-11
	⁷⁰ Ga	4.50E+07	4.62E-16	9.82E-18	1.60E-11	2.65E-09	5.30E-10	1.60E-10	4.94E-11	2.54E-11	1.60E-11	1.12E-11
	⁶⁹ Zn	2.48E+05	2.16E-17	7.18E-19	2.80E-11	2.36E-11	4.72E-12	1.42E-12	4.40E-13	2.26E-13	1.42E-13	9.99E-14
	⁶⁹ Ge	1.31E+09	4.27E-14	8.44E-16	2.90E-10	1.86E-06	3.71E-07	1.12E-07	3.46E-08	1.78E-08	1.12E-08	7.86E-09
	⁶⁸ Ga	8.90E+08	4.58E-14	9.41E-16	4.90E-11	5.62E-07	1.12E-07	3.39E-08	1.05E-08	5.38E-09	3.39E-09	2.38E-09

材料	核素	气体及气溶胶排放量,Bq	空气浸没, (Sv m ³)/(s Bq)	全身等效地面沉积 (Sv m ²)/(s Bq)	内照射, Sv/Bq	公众受照剂量, mSv						
						20m	50m	100m	200m	300m	400m	500m
	⁶⁸ Ge	5.14E+07	7.37E-20	2.16E-20	1.40E-08	2.44E-06	4.88E-07	1.47E-07	4.55E-08	2.33E-08	1.47E-08	1.03E-08
	⁶⁷ Cu	1.08E+06	5.41E-15	1.11E-16	6.10E-10	2.29E-09	4.58E-10	1.38E-10	4.27E-11	2.19E-11	1.38E-11	9.71E-12
	⁶⁷ Ga	4.34E+07	7.2E-15	1.49E-16	2.40E-10	3.85E-08	7.70E-09	2.32E-09	7.18E-10	3.68E-10	2.32E-10	1.63E-10
	⁶⁷ Ge	3.44E+03	6.86E-14	1.38E-15	2.50E-11	2.69E-12	5.38E-13	1.62E-13	5.02E-14	2.57E-14	1.62E-14	1.14E-14
	⁶⁵ Zn	2.08E+07	2.9E-14	5.53E-16	2.20E-09	1.61E-07	3.22E-08	9.71E-09	3.01E-09	1.54E-09	9.71E-10	6.83E-10
	⁶⁴ Cu	2.66E+06	9.1E-15	1.87E-16	1.20E-10	1.33E-09	2.66E-10	8.00E-11	2.48E-11	1.27E-11	8.00E-12	5.62E-12
	⁶³ Ni	2.62E+01	0.00E+00	0.00E+00	1.30E-09	1.15E-13	2.31E-14	6.95E-15	2.15E-15	1.10E-15	6.95E-16	4.89E-16
	³ H	1.48E+07	3.31E-19	0.00E+00	2.60E-10	1.30E-08	2.61E-09	7.85E-10	2.43E-10	1.25E-10	7.86E-11	5.52E-11
	^{69m} Zn	1.61E+05	1.99E-14	4.12E-16	2.70E-10	1.80E-10	3.60E-11	1.08E-11	3.35E-12	1.72E-12	1.08E-12	7.62E-13
	^{71m} Zn	2.61E+04	7.5E-14	1.53E-15	1.60E-10	3.41E-11	6.81E-12	2.05E-12	6.35E-13	3.26E-13	2.05E-13	1.44E-13
天然 Zn 靶	⁷¹ Ge	8.15E+02	7.47E-20	2.18E-20	1.10E-11	3.04E-14	6.08E-15	1.83E-15	5.67E-16	2.91E-16	1.83E-16	1.29E-16
	⁷⁰ Ga	1.91E+06	4.62E-16	9.82E-18	1.60E-11	1.13E-10	2.25E-11	6.78E-12	2.10E-12	1.08E-12	6.78E-13	4.77E-13
	⁶⁹ Zn	2.99E+06	2.16E-17	7.18E-19	2.80E-11	2.84E-10	5.69E-11	1.71E-11	5.30E-12	2.72E-12	1.71E-12	1.20E-12
	⁶⁹ Ge	1.35E+03	4.27E-14	8.44E-16	2.90E-10	1.91E-12	3.83E-13	1.15E-13	3.57E-14	1.83E-14	1.15E-14	8.10E-15
	⁶⁸ Ga	3.36E+08	4.58E-14	9.41E-16	4.90E-11	2.12E-07	4.25E-08	1.28E-08	3.96E-09	2.03E-09	1.28E-09	8.99E-10
	⁶⁷ Cu	7.96E+05	5.41E-15	1.11E-16	6.10E-10	1.69E-09	3.38E-10	1.02E-10	3.15E-11	1.62E-11	1.02E-11	7.15E-12
	⁶⁷ Ga	7.13E+08	7.2E-15	1.49E-16	2.40E-10	6.32E-07	1.26E-07	3.81E-08	1.18E-08	6.05E-09	3.81E-09	2.68E-09
	⁶⁶ Ga	7.55E+08	1.29E-13	2.22E-15	4.40E-10	2.12E-06	4.23E-07	1.27E-07	3.95E-08	2.02E-08	1.27E-08	8.96E-09

材料	核素	气体及气溶胶排放量,Bq	空气浸没, (Sv m ³)/(s Bq)	全身等效地面沉积 (Sv m ²)/(s Bq)	内照射, Sv/Bq	公众受照剂量, mSv						
						20m	50m	100m	200m	300m	400m	500m
	⁶⁵ Ni	1.19E+03	2.79E-14	5.15E-16	9.00E-11	7.01E-13	1.40E-13	4.22E-14	1.31E-14	6.70E-15	4.22E-15	2.97E-15
	⁶⁵ Zn	1.56E+07	2.9E-14	5.53E-16	2.20E-09	1.21E-07	2.42E-08	7.28E-09	2.25E-09	1.16E-09	7.28E-10	5.12E-10
	⁶⁵ Ga	1.55E+07	5.65E-14	1.16E-15	1.70E-11	9.80E-09	1.96E-09	5.90E-10	1.83E-10	9.38E-11	5.90E-11	4.15E-11
	⁶⁴ Cu	1.98E+08	9.1E-15	1.87E-16	1.20E-10	9.89E-08	1.98E-08	5.95E-09	1.84E-09	9.46E-10	5.95E-10	4.19E-10
	⁶³ Ni	1.54E+02	0.00E+00	0.00E+00	1.30E-09	6.79E-13	1.36E-13	4.09E-14	1.27E-14	6.49E-15	4.09E-15	2.87E-15
	⁶³ Zn	3.42E+08	5.32E-14	1.09E-15	3.70E-11	2.28E-07	4.56E-08	1.37E-08	4.25E-09	2.18E-09	1.37E-09	9.65E-10
	⁶² Zn	1.12E+06	2.07E-14	4.3E-16	5.50E-10	2.32E-09	4.65E-10	1.40E-10	4.33E-11	2.22E-11	1.40E-11	9.84E-12
	⁶¹ Co	1.19E+05	3.94E-15	9.02E-17	5.10E-11	2.53E-11	5.07E-12	1.53E-12	4.72E-13	2.42E-13	1.53E-13	1.07E-13
	⁶¹ Cu	3.49E+08	3.99E-14	8.15E-16	7.80E-11	2.34E-07	4.68E-08	1.41E-08	4.36E-09	2.24E-09	1.41E-09	9.90E-10
	⁶⁰ Co	4.38E+02	1.26E-13	2.35E-15	3.10E-08	4.66E-11	9.32E-12	2.81E-12	8.69E-13	4.46E-13	2.81E-13	1.97E-13
	⁶⁰ Cu	2.57E+07	1.98E-13	3.63E-15	3.40E-11	5.47E-08	1.09E-08	3.29E-09	1.02E-09	5.23E-10	3.29E-10	2.32E-10
	⁵⁹ Ni	2.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	4.40E-10	3.00E-16	5.99E-17	1.81E-17	5.59E-18	2.87E-18	1.81E-18	1.27E-18
	⁵⁸ Co	7.09E+01	4.76E-14	9.5E-16	2.10E-09	5.39E-13	1.08E-13	3.25E-14	1.00E-14	5.16E-15	3.25E-15	2.28E-15
	⁵⁷ Co	3.82E+05	5.61E-15	1.15E-16	1.00E-09	1.32E-09	2.63E-10	7.93E-11	2.45E-11	1.26E-11	7.93E-12	5.57E-12
	³ H	2.95E+06	3.31E-19	0.00E+00	2.60E-10	2.60E-09	5.20E-10	1.57E-10	4.85E-11	2.49E-11	1.57E-11	1.10E-11
合计						3.79E-05	7.58E-06	2.28E-06	7.07E-07	3.63E-07	2.28E-07	1.61E-07

5.3.2.2 热室机械手皮老虎或窥视窗破裂事故

假设热室机械手皮老虎或窥视窗破裂事故时，热室的负压控制装置失效，导致热室内由负压变为正压，箱内放射性气溶胶向操作区泄漏，泄漏到房间内的放射性气溶胶经房间排风排入环境。

当发生热室机械手皮老虎或窥视窗破裂时其密封性降到近似三级密封，约为 $10^{-2}/h$ 。实验过程中监测仪实时报警与专职剂量员现场监测，5min内可发现放射性气溶胶泄漏。一旦发生监测警报，出现放射性气溶胶泄漏事故，剂量员根据应急预案进行现场紧急处置。因此，从事故发生到应急人员采取措施开启热室排风和房间排风，该过程约需0.1h，操作前区体积为450m³。根据工艺源项，假设分离天然Zn靶时则发生事故时，由热室释放到房间内的放射性气溶胶的量见表5-36。

表 5-36 发生机械手皮老虎或窥视窗破裂事故时泄漏到房间内的放射性气溶胶的量

工艺	核素	单次操作活度, Bq	热室中气溶胶的量, Bq	泄漏量, h ⁻¹	时间, h	释放到实验室的量, Bq
天然 Zn 靶分离	¹³ N	2.71E+08	2.71E+08	1.00E-02	0.10	2.71E+05
	¹¹ C	2.40E+09	2.40E+09	1.00E-02	0.10	2.40E+06
	⁷ Be	3.40E+05	3.40E+01	1.00E-02	0.10	3.40E-02
	³ H	3.12E+06	3.12E+06	1.00E-02	0.10	3.12E+03
	⁷¹ Ge	8.15E+06	8.15E+02	1.00E-02	0.10	8.15E-01
	⁷⁰ Ga	1.91E+10	1.91E+06	1.00E-02	0.10	1.91E+03
	⁶⁹ Zn	2.99E+10	2.99E+06	1.00E-02	0.10	2.99E+03
	⁶⁹ Ge	1.35E+07	1.35E+03	1.00E-02	0.10	1.35E+00
	⁶⁸ Ga	3.36E+12	3.36E+08	1.00E-02	0.10	3.36E+05
	⁶⁷ Cu	7.95E+09	7.95E+05	1.00E-02	0.10	7.95E+02
	⁶⁷ Ga	7.15E+12	7.15E+08	1.00E-02	0.10	7.15E+05
	⁶⁶ Ga	7.55E+12	7.55E+08	1.00E-02	0.10	7.55E+05
	⁶⁵ Ni	1.19E+07	1.19E+03	1.00E-02	0.10	1.19E+00
	⁶⁵ Zn	1.56E+11	1.56E+07	1.00E-02	0.10	1.56E+04
	⁶⁵ Ga	1.55E+11	1.55E+07	1.00E-02	0.10	1.55E+04
	⁶⁴ Cu	1.98E+12	1.98E+08	1.00E-02	0.10	1.98E+05
	⁶³ Ni	1.54E+06	1.54E+02	1.00E-02	0.10	1.54E-01
	⁶³ Zn	3.42E+12	3.42E+08	1.00E-02	0.10	3.42E+05
⁶² Zn	1.12E+10	1.12E+06	1.00E-02	0.10	1.12E+03	
⁶¹ Co	1.19E+09	1.19E+05	1.00E-02	0.10	1.19E+02	

工艺	核素	单次操作	热室中气溶	泄漏量, h ⁻¹	时间, h	释放到实验
	⁶¹ Cu	3.49E+12	3.49E+08	1.00E-02	0.10	3.49E+05
	⁶⁰ Co	4.38E+06	4.38E+02	1.00E-02	0.10	4.38E-01
	⁶⁰ Cu	2.57E+11	2.57E+07	1.00E-02	0.10	2.57E+04
	⁵⁹ Ni	2.01E+03	2.01E-01	1.00E-02	0.10	2.01E-04
	⁵⁸ Co	7.10E+05	7.10E+01	1.00E-02	0.10	7.10E-02
	⁵⁷ Co	3.82E+09	3.82E+05	1.00E-02	0.10	3.82E+02

保守假设泄漏到房间内的放射性气溶胶全部被工作人员吸入，则可计算得出工作人员由于吸入放射性气溶胶所受的照射剂量，具体见表 5-37。

表 5-37 发生机械手皮老虎或者窥视窗破裂事故时工作人员所受的吸入内照射剂量

工艺	核素	释放到实验室的 量, Bq	吸入内照射剂量 转化因子, Sv/Bq	口罩过 滤效率	吸入内照射 mSv
天然 Zn 靶分离	¹³ N	2.71E+05		0.95	0.00E+00
	¹¹ C	2.40E+06		0.95	0.00E+00
	⁷ Be	3.40E-02	5.20E-11	0.95	8.84E-11
	³ H	3.12E+03		0.95	0.00E+00
	⁷¹ Ge	8.15E-01	1.10E-11	0.95	4.48E-10
	⁷⁰ Ga	1.91E+03	2.60E-11	0.95	2.48E-06
	⁶⁹ Zn	2.99E+03	4.30E-11	0.95	6.43E-06
	⁶⁹ Ge	1.35E+00	3.70E-10	0.95	2.50E-08
	⁶⁸ Ga	3.36E+05	8.10E-11	0.95	1.36E-03
	⁶⁷ Cu	7.95E+02	5.80E-10	0.95	2.31E-05
	⁶⁷ Ga	7.15E+05	2.80E-10	0.95	1.00E-02
	⁶⁶ Ga	7.55E+05	7.10E-10	0.95	2.68E-02
	⁶⁵ Ni	1.19E+00	1.30E-10	0.95	7.74E-09
	⁶⁵ Zn	1.56E+04	2.90E-09	0.95	2.26E-03
	⁶⁵ Ga	1.55E+04	2.90E-11	0.95	2.25E-05
	⁶⁴ Cu	1.98E+05	1.50E-10	0.95	1.49E-03
	⁶³ Ni	1.54E-03	5.20E-10	0.95	4.00E-09
	⁶³ Zn	3.42E+05	6.10E-11	0.95	1.04E-03
	⁶² Zn	1.12E+03	6.60E-10	0.95	3.70E-05
	⁶¹ Co	1.19E+02	7.50E-11	0.95	4.46E-07
⁶¹ Cu	3.49E+05	1.20E-10	0.95	2.09E-03	
⁶⁰ Co	4.38E-01	2.90E-08	0.95	6.35E-07	
⁶⁰ Cu	2.57E+04	6.20E-11	0.95	7.97E-05	
⁵⁹ Ni	2.01E-04	2.20E-10	0.95	2.21E-12	

工艺	核素 ^{58}Co	释放到实验室的 7.10E-02	吸入内照射剂量 2.00E-09	口罩过 0.95	吸入内照射 7.10E-09
	^{57}Co	3.82E+02	9.40E-10	0.95	1.80E-05
	小计				4.54E-02

由表 5-37 可知，发生机械手皮老虎或窥视窗破裂事故时，工作人员由于吸入泄漏到房间内的放射性气溶胶所造成的受照剂量为 0.0454mSv。

6 辐射安全管理

6.1 辐射安全与环境保护管理机构

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、非密封放射性物质的单位申请辐射安全许可证，应有专门的辐射安全和防护管理机构或者专职/兼职辐射安全管理人员，并配备必要的防护用品和监测仪器。

甘肃省同位素实验室运行后，为保障项目工作人员与公众的健康和安全，保护项目所在区域周围环境，结合项目辐射安全与防护工作的实际情况，拟设置辐射安全管理委员会作为辐射安全工作的最高管理机构，主要成员为单位法人代表、同位素实验室项目分管领导以及各相关部门负责人等。

辐射安全管理委员会的主要职责是对以下事宜进行调查、协调、审议、建议和决策：

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

在辐射安全管理委员会领导下拟设置专门的辐射安全管理部门负责本项目运行期间的安全和防护工作的统一监督管理，其主要职责是：

- (1) 贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，建立辐射安全规章制度；

- (2) 辐射安全系统的运行和维护，辐射安全措施的实施；
- (3) 辐射监测与评价；
- (4) 放射性废物的监测处理；
- (5) 放射性废物的辐射安全管理；
- (6) 辐射工作人员的健康管理；
- (7) 辐射安全教育和培训；
- (8) 参与辐射事故应急处置，以及其他与辐射安全相关的工作。

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

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

为保证辐射安全工作的开展，根据《《注册核安全工程师执业资格关键岗位名录》（第一批）》的相关要求，业主单位将配备必要的辐射安全工作人员，以及至少两名注册核安全工程师，执业范围涵盖核安全综合管理和辐射防护两个专业。

6.2 辐射工作人员

中国科学院近代物理研究所现有 636 人辐射工作人员，均已取得生态环境部门认可的辐射安全与防护培训合格证书。

中国科学院近代物理研究所制定了辐射工作人员培训和考核计划，单位承

诺新上岗及调入人员，在上岗前参加生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，考核合格者方可从事辐射工作，以后每五年接受一次再考核，现有辐射工作人员在现有培训合格证书过期前参与考核，不再考核的人员或者考核不合格的人员，不得从事辐射工作。

单位定期安排辐射工作人员进行职业健康体检，并建立健康体检档案。

本项目拟配备辐射工作人员 113 人，本项目拟配备的辐射工作人员在从事辐射工作前需通过生态环境部门组织的考核方可上岗。

6.3 辐射安全管理制度

为保障本项目运行时候的辐射安全，保护工作人员、公众和环境，根据本项目特点，参考近代物理研究所现有管理制度，拟建立本项目的相关规章制度，主要包括：

(1)《辐射安全管理规定》，给出辐射防护原则、辐射安全组织体系及职责、剂量管理体系、辐射控制原则和措施、辐射监测要求和计划、放射性废物的收集和贮存、放射工作人员健康管理、教育和考核等内容。

(2)《加速器运行及维修维护辐射安全规定》，规定加速器开机、运行、维修和维护等阶段的辐射安全管理要求和实施措施，包括安全联锁、保卫、事故操作等。

(3)《三废中心及放射性废物暂存库安全管理规定》，明确三废中心安全运行管理、放射性废物暂存库的安全管理要求，包括收储、暂存、出库等方面。

(4)《靶站、转运热室安全运行管理规程》，规定靶站、转运热室的操作规定。

(5)《分离热室和放化实验室管理规定及操作规程》，规定核素操作安全管理、放射性三废的分类收集、运行工作流程和防护要求。

(6)《射线装置及放射性物品台账管理规定》，规定对射线装置和放射性物

品建立台账，对放射性废物产生量、处理方法、排放量进行统计、记录。

(7)《辐射环境监测大纲》，明确本项目日常辐射环境监测的目的、项目、布点、频次、设备要求、质量保证和结果报送等内容，以及含放射性废水排放和固体废物解控和外运时的监测要求。

(8)《个人剂量监测管理规定》，明确工作人员个人剂量监测和管理方面的要求；

(9)《放射性废液固化安全管理制度》，明确放射性废液、有机废液等处理流程及防护要求；

(10)《放射性废气过滤装置和滤材安全管理制度》，规定放射性废气过滤装置的安装、使用及更换要求。

拟建立的相关辐射安全管理规定可较全面地覆盖辐射防护制度、操作规程、岗位职责、安全保卫、设备维护和检修、人员培训及考核、三废处理等方面，在结合项目特点建立和健全上述辐射安全相关的规章制度后，可以满足法律法规要求，确保甘肃省同位素实验室项目运行后的辐射安全管理，业主单位承诺在申请辐射安全许可证前建立和完善相应的管理制度并发布生效。

6.4 辐射监测

本项目辐射监测主要包括场所监测、个人剂量监测、环境监测及流出物监测。

6.4.1 场所监测

本项目运行过程中，其工作场所监测包括外照射监测、表面污染监测及气溶胶监测。

(1) 外照射监测

外照射监测主要包括便携式巡测和固定式在线监测，监测项目主要为中子、

γ 剂量率，辐射工作场所中子和伽马贯穿辐射在线监测具体见 4.4 节。建设单位应将在线监测系统监测结果每月整理后编制成监测报告存档。

根据项目情况，便携式巡检将根据监测计划及加速器运行功率利用便携式仪器对加速器装置周边进行中子、 γ 剂量率进行监测，每年至少监测 1 次，运行功率增加时全面监测 1 次，对其他非密封放射性工作场所采用便携式仪器对其场所进行 γ 剂量率进行监测，每年至少监测 1 次。

另外，每年建设单位将委托有资质单位对本项目辐射工作场所进行一次年度监测，并将其监测报告存档。

(2) 表面污染监测

用表面污染仪对辐射工作场所的地面、墙壁、设备及人员进行表面污染监测。监测频度为每次实验后监测一次。

此外，在靶站、热室大厅及准备间的卫生出入口处、超重终端二层非密封放射性工作场所卫生出入口、辐射管理中心的卫生出入口设置 α 、 β 手脚污染检测仪，以加强对进出人员的表面污染水平进行监测。

(3) 气溶胶监测

在热室大厅分离热室进行核素分离实验过程中，采用气溶胶监测仪在实验室前区进行在线监测，监测实验过程中空气中气溶胶浓度水平。

6.4.2 个人剂量监测

本项目个人剂量监测包括外照射剂量监测和内照射剂量监测。

(1) 外照射剂量监测

甘肃省同位素实验室从事辐射工作人员均配备个人剂量计，工作人员工作时严格按照要求佩戴个人剂量计，每季度委托有资质的单位负责测定一次。

(2) 内照射剂量监测

对从事非密封放射性物质工作的辐射工作人员进行内照射剂量监测，每半年委托有资质单位监测一次。

建设单位对本项目辐射工作人员建立个人健康档案。

6.4.3 环境监测

根据《辐射环境监测技术规范》(HJ/T61-2001)对场所周围环境进行监测，环境监测包括在线监测、便携式巡测和取样监测。本项目在场所周围环境设有在线监测系统，具体情况见 4.4 节。

另外每年委托有资质单位对评价范围内的 γ 剂量率水平、中子剂量率、土壤、空气及周围水体中总 α 、总 β 及特征核素情况进行监测，监测频次为每年一次，监测方案见表 6-1。特征核素的选取主要考虑拟操作核素种类、操作量、衰变周期等，本项目特征核素主要为 ^{211}At ， ^{68}Ge ， ^{67}Cu ， ^{60}Co ， ^{57}Co ， ^{65}Zn ， ^{67}Ga 等。

6.4.4 流出物监测

本项目运行期间流出物主要是通过排风塔排入外环境的气态流出物和排入污水管道的液态流出物。在排风塔设有取样装置，每年取样一次，委托有资质单位进行监测，液态流出物在排放前委托有资质单位进行检测。监测方案见表 6-1。

表 6-1 甘肃省同位素实验室项目（一期）周围环境监测及流出物监测方案

监测对象	监测项目	监测点位	监测频次	监测方式
贯穿辐射	中子、 γ 剂量率	园区及评价范围内外环境	1次/年	便携式剂量率仪巡测
环境土壤生物样品	总 α 、总 β 、特征核素	园区边界 4 个方位	1次/年	可委托监测/自测
地表水	总 α 、总 β 、特征核素	最近的地表水体	1次/年	可委托监测/自测
空气	总 α 、总 β 、特征核素	园区排风塔下风向及上风向	4次/年	可移动式监测

气溶胶	总 α 、总 β 、特征核素	排风口	1次/年	委托监测/自测
液态流出物	总 α 、总 β	废水排放处	每次排放前	委托监测/自测

6.4.5 辐射监测设备

本项目拟配备监测设备见表 6-2。

表 6-2 本项目配备监测设备

设备名称	数量
α - γ 剂量率仪	至少 2 台
中子剂量率仪	至少 2 台
表面污染测量仪	至少 2 台
手脚污染仪	3 台
气溶胶监测仪	1 台
个人报警仪	每个辐射工作场所配备 2 个
个人剂量计	每人一个
固定式监测仪器	26 个 γ 探头、16 个中子探头

6.5 辐射事故应急

根据相关的法律法规，建设单位已经制定了《中科院近代物理研究所辐射事故应急预案》，该预案的部分内容也同样适用于甘肃省同位素实验室，另外，结合本项目特点，建设单位将建立本项目的《辐射事故应急预案》，其主要内容将包括：

(1) 总则

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

本预案适用于本单位所辖范围内射线装置、放化及分离热室运行时发生的

辐射事故。

(2) 辐射事故分级

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

特别重大辐射事故，是指射线装置失控导致3人以上（含3人）急性死亡。

重大辐射事故，是指射线装置失控导致2人以下（含2人）急性死亡或者10人以上（含10人）急性重度放射病、局部器官残疾。

较大辐射事故，是指射线装置失控导致9人以下（含9人）急性重度放射病、局部器官残疾。

一般辐射事故，是指射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射。

(3) 应急组织体系与职责分工

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

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

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

安全保卫组：负责维护现场秩序、人员出入控制等。

后勤保障组：负责应急响应物资的准备，应急期间的通讯、交通、水电等的保障。

医疗救助与善后处置组：负责事故人员的初步救治、安抚；设施的恢复等

善后工作；对事故的基本情况定性定量描述，对整个事故进行评估，进行工作总结。

(4) 辐射事故应急响应措施

辐射事故应急响应流程如下图所示：

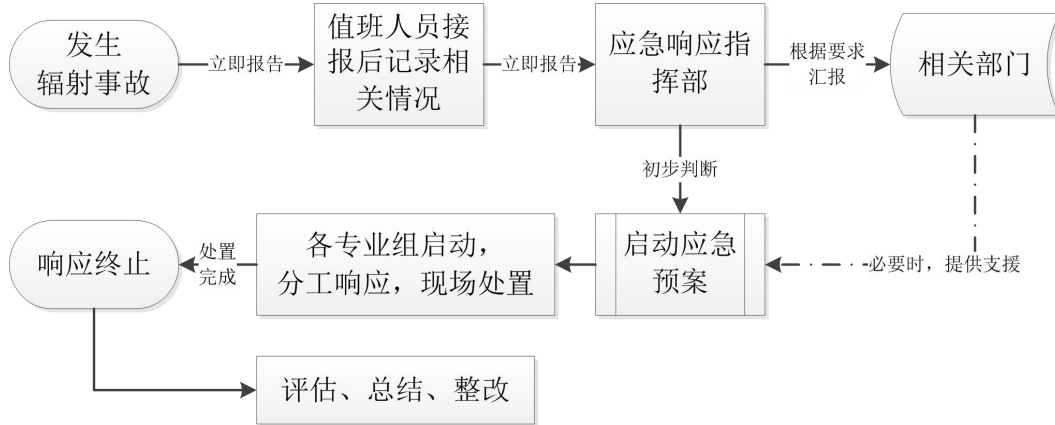


图 6-1 辐射事故应急响应流程图

当发生辐射事故时，有关单位和现场人员应立即通过电话等各种方式报告安全与防护部门值班人员，值班人员记录相关情况（事故发生地点、时间、事故影响等）后，立即报告应急响应指挥部值班领导；

应急指挥部值班领导初步判断后立即启动辐射应急预案，通知应急响应指挥部其他成员和专业组启动，并根据要求向地方生态环境、公安等部门汇报，同时汇报上级主管部门，必要时请求外部支援；

各专业组到现场后根据事故现场实际情况提出事故处置方案，并按照制定的应急响应程序实施现场处置工作，并随时向应急响应指挥部汇报，发生较大及以上辐射事故时，应急响应指挥部相关成员到现场指挥；

事故处置期间的事故汇报工作按照地方生态环境部门辐射应急预案的要求严格实施，事故处置完成后响应终止；

善后处置组人员负责收集、整理所有应急日志、记录和相关书面信息，在应急响应指挥部的指导下编制应急总结报告，按规定提交相关部门；并提出相应的整改措施，并根据应急响应的实践修定应急预案。

（5）应急响应能力的维持

①培训

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

②演习

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

培训和演习应有计划、方案和程序，以及总结和报告。

（6）附则

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

6.6 环保竣工验收“一览表”

根据《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评【2017】4号）要求，建设单位是建设项目竣工环境保护验收的责任主体，建设单位应当按照规定的程序、标准和规范，组织对配套建设的环境保护设施进行验收，编制验收报告；验收报告编制完成后 5 个工作日内，公开验收报告，公示的期限不得少于 20 个工作日。验收报告公示期满后 5 个工作日内，建设单位应当登录全国建设项目竣工环境保护验收信息平台，填报建设项目基本信息、环境保护设施验收情况等相关信息，生态环境主管部门对上述信息予以公开。

除需要取得排污许可证的水和大气污染防治设施外，其他环境保护设施的验收期限一般不超过 3 个月；需要对该类环境保护设施进行调试或者整改的，

验收期限可以适当延期，但最长不超过 12 个月。本项目环保竣工验收一览表见表 6-3。

表 6-3 环保竣工验收一览表

验收项目	验收标准
辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立的辐射安全管理机构满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中的相关要求。 辐射安全管理制度：环评要求制定相关制度，内容全面，具有可操作性，并根据情况不断更新完善，严格落实并进行记录
人员考核	所有辐射工作人员按照要求参加生态环境部门认可的考核，考核合格才能从事辐射工作
监测仪器	监测仪器：辐射工作场所在线监测系统、中子巡检仪、 γ 巡测仪、个人剂量报警仪、气溶胶监测仪、表面污染仪和个人剂量计等，建立个人剂量档案和职业病健康档案
辐射工作场所屏蔽和屏蔽体外剂量率水平及电场强度	加速器隧道及靶站设置混凝土屏蔽层，各墙体及防护门外、屋顶剂量率限值 $\leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；热室屏蔽体外剂量率限值 $\leq 7.5 \mu\text{Sv/h}$ ；本项目屏蔽体外电场强度低于表 1-10 所列的控制目标值
辐射防护分区及人流物流	对辐射工作场所实行分区管理，设置明显的控制区、监督区标识；对非密封放射性工作人员设置人流物流线路，严格按照人流物流图进出
安全连锁	设有安全连锁系统，通过门-机连锁、急停按钮、声光报警、巡检、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止人员受到意外照射
三废	设有三废暂存及处理设施并确保其正常运行
其他防护措施	设置电离警示标示、按照环评要求设置通风管道及排风口、人员配戴个人防护用品
人员年受照剂量	辐射工作人员年受照剂量不超过 5mSv
周围环境敏感点	对周围环境敏感点进行辐射监测，确保其年受照剂量不超过 0.1mSv

7 代价-利益简要分析

7.1 利益分析

本项目为非盈利性社会公益项目，项目效益主要体现在社会效益方面。

中国科学院近代物理研究所自成立以来，面向重离子科学国际前沿、面向国家重大战略需求、面向国民经济发展，开展跨学科、跨领域协同创新，取得了一批重大原创性基础研究成果，催生了一批具有变革性、能带动国家产业升级和保障国家安全的高新技术。本项目是中国科学院近代物理研究所着力打造的具有国际领先地位的同位素实验室，对探索合成超重新元素，积极开展同位素分解、收集及应用，努力实现中国在新元素合成领域零的突破，加快推进超重稳定岛同位素性质和应用的研究具有重要支撑作用。项目建成后将使甘肃在超重元素探索及同位素应用方面处于国际前列，同时，随着多个稳定同位素和放射性同位素产生及分离试验装置的建成，同位素产生、高效分离和收集等关键核心技术的不断深入研究，多种同位素量产核心技术、新产品和装备实现集成示范，甘肃将成为世界知名超重元素研究基地、世界知名同位素核心技术、新产品及其装备研发基地。此外，随着放射性同位素靶向治疗肿瘤药物及其产生试验装置的研发，甘肃将成为肿瘤治疗用放射性同位素靶向药物国际知名研发基地，并通过该实验室的建设和运行，在甘肃省形成同位素相关人才绿洲。因此，该项目是发挥我省科研优势和加速科技成果转化的现实要求，也是落实党的十九大报告提出的加快建设创新型国家的需要。

7.2 代价分析

7.2.1 社会代价

社会代价主要考虑两个方面，一是资源，二是能源。

资源方面，本项目位于中国科学院近代物理研究所大科学装置科技创新创

业园内，拟建同位素实验室及其配套设施占用一定的土地资源。

能源方面，项目运行期间需要用水、电等能源。

7.2.2 经济代价

经济代价主要包括以下三个方面的成本：

(1) 建筑场地成本；

(2) 设备投资成本；

(3) 环保投资：包含环保设施、环境管理、环境监测及事故防范措施等费用。

7.2.3 环境代价

本项目环境代价主要为项目运行期间向环境排放的废气及对周围公众造成辐射环境影响。

7.2.4 正当性分析

本项目建成后，对探索合成超重新元素，积极开展同位素分离、收集及应用，努力实现中国在新元素合成领域零的突破，加快推进超重稳定岛同位素性质和应用的研究具有重要支撑作用。

本项目运行时，对工作人员和周围公众造成一定的辐射影响，在采取防护措施后，工作人员和公众辐射影响在可控范围内。

综上所述，本项目建成后获得的社会效应远大于辐射所造成的危害，具有很好的社会效益，扣除一定的环境负面影响成本后，项目的综合效益是正的，因此本项目的实施是正当的。

8 结论与建议

8.1 项目工程概况

本项目属于甘肃省同位素实验室一期项目，规划用地面积约 97740m²，其中建设用地面积 66440m²，本次新建总建（构）筑物面积为 19224m²，其用地性质为科研用地。

本项目拟在甘肃省兰州市兰州新区中科院近代物理所大科学装置科技创新创业园内建同位素实验室，主要涉及使用 I 类直线加速器及甲级、乙级非密封放射性工作场所，项目建成后，将从事新元素合成基础研究和同位素生产核心技术研发。

8.2 辐射安全与防护

- (1) 本项目辐射工作场所进行了辐射防护分区，分区合理；
- (2) 放射性工作场所采取了辐射屏蔽措施，屏蔽效果满足要求；
- (3) 非密封放射性工作场所为工作人员和放射性物质设置了专用通道，采取人流、物流分开；人流物流设置合理。
- (4) 设置安全连锁、视频监控、在线监测等防护措施，能够保障实验室的安全运行；
- (5) 本项目运行过程中产生的放射性三废，经辐射管理中心处理后外排或处置，满足相关要求。

8.3 环境影响分析

8.3.1 施工期

本项目施工期间主要的污染源为废水、废气、噪声及建筑垃圾，其影响随

着施工期结束而结束，且在施工期合理安排施工时段，采取一定措施，做到文明施工，对其周围环境影响较小。

8.3.2 营运期

(1) 非放射性环境影响

经分析，本项目正常运行期间，产生的非放射性废水、废气、固体废物及噪声，采取一定措施后对周围环境影响很小。

(2) 辐射环境影响

现有场址及周围环境进行的辐射本底调查表明：新建辐射工作场所的辐射剂量率在甘肃省 γ 辐射剂量率本底范围内波动，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限，属于环境正常水平，样品中绝大部分放射性核素位于探测限以下。

正常工况下，各屏蔽体外剂量率水平满足要求，项目运行过程中对操作人员造成的年受照剂量小于其剂量约束值为 5mSv/a ；项目运行期间周围公众最大年剂量低于公众剂量约束值 0.1mSv/a 。

8.4 辐射安全管理

为满足本项目需求，近代物理研究所建立了本项目的辐射安全管理机构，并根据相关法律法规要求，拟建立符合本项目的辐射安全管理制度和应急预案，其相应的安全管理制度和应急预案制定完后，能满足本项目需求。

8.5 公众参与情况

本项目自2020年5月以来通过在建设单位网络平台、兰州晨报报纸、拟建项目现场及周围环境张贴公示形式共进行了2次公众意见收集和调查工作，在报批前在建设单位网站进行了该报告书和公众参与说明的全文公示。首次公众参与的调查结果表明，公示期间未收到与环境保护相关的反馈意见；二次公示期间，未收到公众与环境保护相关的反馈意见。

8.6 结论

本项目建设具有重要的社会效益。项目的辐射防护和环境保护措施是可行的，对环境和公众的安全是有保障的，影响是可以接受的，故从环保角度考虑，该项目是可行的。

综上所述，本项目建成后将为我国对探索合成超重新元素，积极开展同位素分离、收集及应用，努力实现中国在新元素合成领域零的突破，加快推进超重稳定岛同位素性质和应用的研究具有重要支撑作用，具有重要的社会意义；项目建成后采取的防护措施使得实验室运行时对周围环境的影响满足标准要求，获得的利益远大于所造成的危害，具有很好的社会效益，故该项目的是可行的。

8.7 建议与承诺

(1) 保证各项环保设施及辐射防护设施正常运行，严格按照国家有关规定要求进行操作，确保其安全可靠；

(2) 本项目投入试运行 3 个月后，建设单位应根据“关于发布《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》的公告（国环规环评【2017】4号）”及国家相关规定的要求及时组织该建设项目竣工环境保护验收，编制环境保护验收监测报告，并进行公示备案，接受生态环境部门的监督检查。