核技术利用建设项目

浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司
新建医用阿尔法核素等同位素药物生产项目
环境影响报告书
（公示稿）

浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司

2025 年 4 月

目　录

1　概述 1

1.1 项目名称、地点 1

1.2　项目概况 2

1.2.1 建设单位概况 2

1.2.2 项目背景与意义 2

1.2.3 项目用地 4

1.2.4 项目建设内容与规模 4

1.3　产业政策相符性 7

1.4　与规划相符性 8

1.5　项目周边环境条件 17

1.6　核技术利用现状 17

1.7　编制依据 20

1.7.1 法律、法规 21

1.7.2 部门规章 22

1.7.3 地方法规及政策 23

1.7.4 技术标准和技术导则 23

1.7.5 其它参考资料 25

1.7.6 与项目相关的文件、资料 25

1.8　评价标准 25

1.8.1 电离辐射标准 26

1.8.2 非放射性环境影响评价标准 31

1.9 评价范围和保护目标 34

1.9.1 评价范围 34

1.9.2 环境保护目标 37

2　自然环境与社会环境状况 41

2.1　自然环境状况 41

2.1.1 地理位置 41
2.1.2 地形、地貌、地质和地震 41
2.1.3 水文、气象 42
2.1.4 动植物资源和土壤 43
2.2 社会经济状况 43
2.3 环境质量和辐射现状 44
2.3.1 贯穿辐射环境现状 47
2.3.2 中子辐射环境现状 49
2.3.3 空气、土壤和水中等放射性核素环境现状 55
2.3.3 声环境质量现状 63
2.3.4 环境空气质量现状 64
2.3.5 地表水环境质量现状 66
2.3.6 小结 67
2.4 项目选址适宜性 67
3 工程分析与源项 68
3.1 项目规模与基本参数 68
3.1.1 项目规模 68
3.1.2 主要设备参数 77
3.1.3 主要原辅材料 77
3.1.4 放射性核素特征 78
3.2 工程设备 80
3.2.1 质子回旋加速器系统 80
3.2.2 α 粒子回旋加速器系统 83
3.2.3 回旋加速器靶材输送系统 85
3.2.4 热室车间装置 87
3.2.5 成品包装间 88
3.2.6 放射性核素质检 89
3.3 工艺流程 90

3.3.1 质子回旋加速器打靶制备核素工艺流程 90
3.3.2 α 粒子回旋加速器打靶制备核素工艺流程 90
3.3.3 热室内核素产品生产工艺流程 90
3.3.4 放化实验质检工艺流程 91
3.3.5 理化检验工艺流程 91
3.3.6 微生物检验质检工艺流程 92
3.3.7 放射性废物储存容器及其转移 96
3.3.8 放射性核素运输 97
3.3.9 回旋加速器运行负荷 97
3.3.10 人员工作负荷 98
3.4 污染源项 100
3.4.1 施工期污染源项 100
3.4.2 运行期辐射污染源 102
3.4.3 运行期非放射性污染源 112
3.5 废弃物 119
3.5.1 放射性废气 119
3.5.2 放射性废水 120
3.5.3 放射性固体废物 123
4 辐射安全与防护 130
4.1 场所布局与屏蔽 130
4.1.1 场所布局 130
4.1.2 辐射工作场所分区管理 130
4.1.3 人流物流路径分布和合理性分析 134
4.2 屏蔽防护 136
4.2.1 设计目标 136
4.2.2 屏蔽体设计 136
4.3 辐射安全与防护措施 142
4.3.1 加速器辐射安全与防护措施 142

4.3.2 非密封工作场所辐射安全与防护措施 147
4.3.3 辐射安全与防护措施要求对照分析 149
4.4 放射性三废的治理 158
4.4.1 放射性废气处理措施 158
4.4.2 放射性废水处理措施 160
4.4.3 放射性固废处理措施 164
4.5 服务期满后的环境保护措施 166
5 环境影响分析 167
5.1 建设阶段环境影响分析 167
5.1.1 大气环境影响 167
5.1.2 水环境影响 168
5.1.3 声环境影响 169
5.1.4 固体废物环境影响 171
5.1.5 生态环境影响 171
5.2 运行阶段辐射环境影响分析 172
5.2.1 加速器机房屏蔽体周围辐射剂量水平 172
5.2.2 靶材传输管线周围辐射剂量水平 188
5.2.3 热室周围辐射水平 193
5.2.4 成品包装间容器表面辐射水平 198
5.2.5 质检实验室辐射水平 200
5.2.6 放射性废物暂存库周围辐射水平 201
5.2.7 感生放射性估算 202
5.2.8 放射性表面污染分析 203
5.2.9 人员受照剂量估算 204
5.2.10 销售及运输辐射影响评价 225
5.2.11 辐射影响计算结果涨落统计与分析 225
5.2.12 放射性“三废”影响分析 226
5.3 运行阶段非放环境影响分析 228

5.3.1 废气环境影响评价 228
5.3.2 废水环境影响评价 229
5.3.3 噪声环境影响评价 235
5.3.4 固体废物环境影响评价 241
5.3.5 环境风险分析 243
5.3.6 排污口规范化及排污许可管理 249
5.4 事故影响分析 249
5.4.1 人员误入或滞留导致超剂量照射事故 250
5.4.2 放射性核素失控事故 251
5.4.3 过滤系统失效事故 254
5.4.4 冷却水泄漏事故 255
6 辐射安全管理 256
6.1 机构与人员 256
6.2 辐射安全管理规章制度 257
6.3 辐射监测 259
6.3.1 工作场所监测 259
6.3.2 辐射环境监测 261
6.3.3 流出物监测 261
6.3.4 个人剂量监测 262
6.3.5 事故监测 263
6.3.6 监测仪表 263
6.4 辐射事故应急 266
7 利益-代价分析 270
7.1 利益分析 270
7.1.1 产业发展前景 270
7.1.2 促进地区经济、社会发展 270
7.1.3 经济效益 271
7.2 代价分析 271

7.2.1 经济代价 271
7.2.2 社会和环境代价 271
7.2.3 资源代价 271
7.3 正当性分析 271
8 结论与建议 272
8.1 项目工程概况 272
8.2 辐射安全与防护 272
8.3 环境影响分析 274
8.4 辐射安全管理 275
8.5 公众参与 275
8.6 结论 275
8.7 建议和承诺 276
8.7.1 建议 276
8.7.2 承诺 276

附件

附件 1：环评委托书

附件 2：建设单位营业执照

附件 3：产业项目投资协议（含实施主体说明）

附件 4：同位素产业园标准厂房用地规划许可证（含一期工程用地红线图）

附件 5：项目立项备案文件

附件 6：环境现状检测报告（辐射环境、声和大气）

附件 7：项目设计参数等基本信息确认资料

附件 8：专家咨询会意见及修改清单

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司新建医用阿尔法核素等同位素药物生产项目

建设单位：浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司

项目性质：新建

项目地点：浙江省嘉兴市海盐县核技术应用（同位素）产业园标准化厂房一期2#厂房（东经：120°56'3.02"，北纬：30°24'59.79"）。图1-1给出了企业地理位置示意图。



图 1-1　企业地理位置示意图

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

（1）项目建设单位

浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司（以下简称“砹尔法公司”）成立于 2022 年 11 月，注册地位于浙江省嘉兴市海盐县秦山街道金禾路 1 号 1 幢 402-1 室（见附件 2）。公司具备完善的专业人才队伍，核心技术团队包括来自杜克大学、密苏里大学等名校海归人员。研发、生产及相关实验技术人员均具备核医学、放射化学、核技术应用等专业技术背景和经验。公司将致力于研发生产 ^{211}At、^{68}Ge、^{64}Cu、^{124}I 等治疗、诊断核素及诊疗一体化核素药物，以全球领先的阿尔法核素生产技术和标记技术为核心，将为肿瘤患者的精准诊疗及特异性靶向治疗提供强有力的支持，以及为华东地区乃至国内核药的发展带来新契机。

（2）项目投资

浙江省嘉兴市海盐县核技术应用（同位素）产业园标准化厂房一期（杨柳山）由产业园负责建设，公司拟购买其中一幢 2#厂房作为本项目使用（见附件 3），项目投资约 1.2 亿元人民币，其中环保投资约 1800 万元，占总投资的 15%。投资费用全部由企业自筹解决。

1.2.2 项目背景与意义

（1）项目背景

与发达国家相比较，国内放射性药物相关产业起步较晚，总体上与国际先进水平有巨大差距，临床用放射性药物品种少，缺乏原创新药。放射性核素及核素药物创新技术能力较弱，缺少自主知识产权的创新药物，新型放射性药物主要采用从国外购买授权许可国内上市模式，难于满足行业长期可持续的发展需求和人民日益增长的诊疗需求。

目前国内已上市放射性药物均是仿制药，数量少且品种较单一。随着放射性药物的快速发展和在核医学领域的临床需求不断增长，放射性药品的产值逐年增加。2020 年，国内放射性药品的市场规模约 44.56 亿元，但其市场占有率和渗透率都远低于成熟市场，放射性药物这个细分医药市场具有巨大的发展空间和容量。

放射性同位素作为放射性药物最重要的原料，在全球均存在生产供应紧张的问题，常用放射性同位素一般通过核反应堆中子照射、粒子加速器轰击靶件、核

废料分离提取方式产生。全球能够生产放射性同位素的核反应堆很少，这导致了反应堆生产同位素供应尤其紧张。利用回旋加速器，可以生产大多数医用同位素，但回旋加速器建造和运行需投入大量资金，并具有极高的技术壁垒。国内目前加速器生产核素仅限于 F-18 等正电子核素；对于治疗性核素，尤其是阿尔法核素，作为放射性药物行业最前沿的产品，目前国内在该领域处于空白状态。在该领域，国内外未来市场发展空间巨大。

2021 年 6 月 24 日，国家原子能机构、科技部、公安部、生态环境部、交通运输部、国家卫生健康委、国家医疗保障局、国家药品监督管理局等 8 部门联合发布《医用同位素中长期发展规划（2021-2035 年）》。这是我国首个针对核技术在医疗卫生应用领域发布的纲领性文件，《规划》明确了“十四五”时期和今后一段时期内我国医用同位素发展的指导思想、主要原则、发展目标、重点任务及保障措施，旨在推动医用同位素技术研发和产业发展，为建设健康中国、增进人民福祉贡献力量。

为推动核技术应用产业发展，海盐县在毗邻秦山二期位置规划了海盐核技术应用（同位素）产业园，鉴于此，砹尔法公司拟在浙江省嘉兴市海盐县核技术应用（同位素）产业园一期工程内 2#厂房拟开展多种新型诊疗核素药物的研发和临床转化研究，将为广大肿瘤患者提供安全、高效、稳定的核素诊疗药物，延长患者生命线，同时推动华东地区核医学健康发展。本项目主要产品为医用放射性同位素及其标记药物，包括肿瘤诊断及治疗两个大类产品研发、生产、销售。

（2）项目建设意义

随着国家在政策层面不断鼓励有临床优势创新药研发上市，与国际先进水平接轨的放射性药物将得到快速发展，逐渐弥补与国外的差距，进一步开拓国内放射性药物发展和临床应用。

砹尔法公司的母公司砹尔法纽克莱（宁波）医疗科技有限公司自 2020 年成立以来，已建成放射性药物研发生产车间约 1600 平方米，取得非密封放射性物质乙级场所辐射安全许可证，一直致力于创新型放射性诊断、治疗药物的研发和临床转化工作，与技术水平全球领先的放射性药物研发实验室和机构如美国杜克大学、华盛顿大学、加拿大 ACSI 回旋加速器公司建立紧密合作关系。砹尔法公司是在此基础上进一步发展新型放射性药物研发制造而成立，具有重大意义。

由于放射性核素可获得性较差，国内能生产的核素种类较少，大部分依赖进口。本项目建成投产运营后，将实现产品管线原料—放射性核素的国产化，自主生产供应，解决“卡脖子”问题。同时建立自主创新原料放射性药物研发转化平台，丰富国内核医学临床一线可用的创新型诊断、治疗放射性药物，成为中国α核素及α核素标记药物研发、生产销售的先驱者和技术引领者。

1.2.3 项目用地

企业所在的同位素产业园标准厂房用地规划许可证已取得海盐县自然资源和规划局的批准（2022 年 9 月 5 日），标准化厂房一期总占地面积 34578m^2，详见附件 4。本项目选址的产业园区标准化厂房 2#厂房占地面积为 1922.58m^2，土地性质为：工业用地。目前，企业正在办理项目不动产权证。

1.2.4 项目建设内容与规模

本项目 2#厂房地上总建筑面积为 6933.06m^2，厂房地上建筑共有四层，其中一层主要为回旋加速器机房、核药生产车间等，二层主要为质检区域，包括放射化学实验区、理化检验、微生物检验区以及预留生产场所等，三层为预留的理化实验仪器分析区等，四层为办公区及会议室。地下一层主要为产业园内汽车停车场，公共设备用房以及放射性废物暂存库用房和放射性废水衰变池间等，其中 2#厂房所在区域正下方西部主要为地下土层、东部有消防水池和停车场。

本项目主要建设内容具体如下：

（1）一层楼内

一层生产区总建筑面积 1922.58m^2，包括建设 1 台质子回旋加速器机房和 1 台α粒子回旋加速器机房，以及配套建设加速器设备间、加速器控制室、加速器配件间、水包装间等，另外建设锗镓核素生产、诊断核素生产、砹 ^{211}At 核素药物生产、核素标记车间以及配套的人员通过间、成品包装间、原辅料准备间、外购核素存放间、放射性药物成品库间和预留场所等，此外公用工程区域包括强电井、弱电井、水井兼冷媒井、取风井、排烟井、净化空调机组、配电间、电梯间等组成。

（2）二层楼内

二层区域总建筑面积 1670.16m^2，建设核素质检车间，主要包括放射化学实验区、理化检验和微生物检验区，具体包括放化实验室、高纯锗能谱室、理化检

验室、培养室、天平室、灭菌室、内毒素实验室、无菌检验室、微生物限度检查室、阳性对照室、人员通过间。另外建设易制毒和易制爆化学试剂存放间、危险废物暂存库、气瓶间、公用工程区域及预留场所等。

（3）三层楼内

三层区域总建筑面积1670.16m^2，预留建设理化实验仪器分析区等场所。

（4）四层楼内

四层区域总建筑面积1670.16m^2，规划建设办公室、会议室等人员日常办公及公用工程区域等。

本项目主要评价内容如下：

本项目评价对象主要为楼内一层和二层新增的辐射工作场所，开展医用放射性同位素生产、使用和销售项目，以及地下一层本项目的放射性废物暂存库和放射性废水衰变池间。其中一层加速器生产医用放射性核素工作场所、使用和销售医用放射性核素的非密封放射性物质工作场所以及二层使用医用放射性核素（非密封放射性物质）情况如下，具体情况详见3.1.1节。**评价要求楼内预留的辐射工作场所在启用前须另行环评。**

（1）加速器机房

加速器机房位于一层西部，南北共墙布置两个加速器机房，其中南部机房内购买使用加拿大ACSI公司生产的 1 台TR-FLEX型质子回旋加速器，并配套4座靶站（分别为T1和T2固体靶站、T3和T4液体靶站），质子最大能量为30MeV，最大束流强度为750μA， T1靶站专用生产^{68}Ge放射性核素，T2靶站拟生产^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac放射性核素（不同时生产，每次生产一种），T3靶站和T4靶站拟生产^{18}F核素，其中T1靶站和T2靶站可以同时生产，T3靶站和T4靶站可以同时生产，固体靶站和液体靶站不能同时生产，加速器年最大出束时间约5900h（根据最大产能计）；北部机房内购买使用加拿大ACSI公司生产的1台TR-Alpha型α粒子回旋加速器，共有2个内靶，最大α束流能量为30MeV，最大束流强度为100μA，年最大出束时间约1250h，专门用于生产医用α核素砹^{211}At。两台加速器均属于I类射线装置，对制备出的医用放射性同位素分别传输至热室车间进行后续操作。

（2）锗镓核素车间

锗镓核素车间位于一层中部，加速器机房相邻东侧。车间内拟配备1个靶接收热室模块箱、1个靶处理热室模块箱和1个通风橱组成的三联模块箱，用于核素^{68}Ge及锗镓发生器生产，先将质子回旋加速器T1靶站生产的^{68}Ge靶材在靶处理模块箱内溶解分离提取制备$^{68}GeCl_4$溶液，热室内核素^{68}Ge的日最大操作量为1.85E+11Bq，日等效最大操作量为1.85E+10Bq，年最多生产12批次，年最大操作量为2.22E+12Bq，再以$^{68}GeCl_4$溶液为原料，经上柱、淋洗后生产锗镓发生器，其中^{68}Ge-^{68}Ga的日最大操作量为1.83E+11Bq、日等效最大操作量为 1.83E+10Bq、年最大操作量为 2.20E+12Bq。上述产品在成品包装间完成打包并经质检合格后销售。

（3）诊断核素车间

诊断核素车间位于一层中部，锗镓核素车间相邻北侧。车间拟配备1个靶接收热室模块箱、1个靶处理热室模块箱共两联模块箱，质子回旋加速器T2靶站生产的^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac核素靶材在靶处理模块箱对其溶解分离提取，制备相应的放射性核素溶液的研发药，核素^{57}Co的日等效最大操作量为1.85E+10Bq，核素^{64}Cu的日等效最大操作量为2.22E+09Bq，核素^{67}Cu的日等效最大操作量为1.48E+10Bq，核素^{89}Zr的日等效最大操作量为3.52E+09Bq，核素^{99}Mo的日等效最大操作量为1.47E+10Bq，核素^{99m}Tc（钼锝发生器）的日等效最大操作量为1.16E+09Bq，核素^{123}I的日等效最大操作量为3.70E+09Bq，核素^{124}I的日等效最大操作量为7.40E+10Bq，核素^{203}Pb的日等效最大操作量为1.48E+09Bq，核素^{225}Ac的日等效最大操作量为4.07E+09Bq，其靶材回收核素^{226}Ra的日等效最大操作量为5.00E+09Bq。另外，T3或T4靶站生产的^{18}F核素的日等效最大操作量为1.48E+09Bq。上述产品在成品包装间完成打包并经质检合格后销售。

（4）砹^{211}At核素车间

砹^{211}At核素车间位于一层北部，诊断核素车间隔内部通道北侧。车间拟配备1个靶接收手套箱、1个标记分装手套箱共两联手套箱，该热室仅提供放射性药物砹^{211}At的生产，^{211}At的日最大操作量和日等效最大操作量均为7.40E+10Bq，年最大操作量为1.85E+13Bq。产品在成品包装间完成打包并经质检合格后销售。

（5）核素标记车间

核素标记车间位于一层东南部，锗镓核素车间隔内部通道东侧。车间拟配备1个热室模块箱，分别开展外购^{228}Th（用于制备^{212}Pb）、^{212}Pb、^{177}Lu、^{125}I、^{131}I和^{90}Y核素的标记、提纯、分装和包装等工作，并在取样质检合格后进行销售。生产过程中涉及的核素^{228}Th日等效最大操作量为3.7E+11Bq，^{125}I的日等效最大操作量为3.7E+09Bq，^{212}Pb、^{177}Lu、^{131}I和^{90}Y的日等效最大操作量均为3.70E+10Bq。

另外，一层车间东部设置1间外购核素存放室用于外购核素的存放，以及南部设置1间放射性药物产品库用于产品临时暂存。

（6）核素质检车间

核素质检车间位于二层北部，包括放化实验室、高纯锗能谱室、理化检验室和微生物检验区域等，对一层生产的上述核素进行质检，日等效最大操作量为4.50E+08Bq。

（7）放射性固废暂存库和放射性衰变池间

砹尔法公司在标准化厂房地下一层园区划定放射性固体废物暂存间区域内隔离一个独立区域，作为本项目存放放射性固废暂存库用房，在标准化厂房地下一层园区划定衰变池间用房内隔离一个独立区域，作为本项目衰变池间用房。

综上，公司在一层车间新建两座加速器机房，分别引进并使用1台质子回旋加速器和1台α粒子回旋加速器，同时在锗镓核素车间、诊断核素车间、砹^{211}At核素车间和核素标记车间均新建放射性同位素分离提纯装置（热室或手套箱），放射性核素日等效最大操作量7.70E+11Bq，由于本项目新建的一楼辐射工作场所物流、人流和废物运输等通道以及工艺流程、通风系统、防护设施等相对其它工作场所独立，且日等效最大操作量达到甲级非密封放射性物质工作场所水平，因此作为一个甲级非密封放射性工作场所管理。

企业二层车间建设质检实验室区域，放化实验室使用的放射性核素均在 1 楼生产场所分装好，通过专用核素传递货梯送达 2 楼，2 楼实验室区域不进行核素分装，人员不与 1 楼人员兼职。二层辐射工作场所物流、人流和废物运输等通道以及工艺流程、通风系统、防护设施等相对 1 层独立，2 层放射性核素日等效最大操作量为 4.50E+08Bq，属于乙级非密封放射性物质工作场所水平，因此作为乙级非密封放射性工作场所管理。

1.3 产业政策相符性

对照《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 7 号令，本项目属于第一类“鼓励类”项目第六款“核能”第 4 条核技术应用中的“同位素、加速器及辐照应用技术开发”类项目。

对照《核技术应用产业高质量发展三年行动方案（2024-2026 年）》（三）统筹同位素供应，实施供应保障能力提升行动中第 6 条加速器实现放射性同位素自主供应的相关内容，本项目属于推动钼-99 等规模化生产，保障医用同位素的稳定供给，提前布局锗-68、铜-64、锆-89、锕-225、碘 123/124 等前景好的医用同位素技术研发范畴。

根据嘉兴市政府的发展规划，海盐县创建省级核电关联高新技术产业园，海盐县人民政府发布了《海盐县发展核电关联产业扶持政策》，并在海盐县《海盐县核电关联及核技术应用产业发展“十四五”规划》提出核技术（同位素）等领域相关的产业是海盐县重点培育建设的产业链之一，到 2025 年，初步形成以核技术应用（同位素）产业、核电生产性服务业为主导产业。本项目符合《海盐县核电关联及核技术应用产业发展“十四五”规划》的相关要求，所述行业符合嘉兴市、海盐县重点发展的核电关联产业。

本项目属于《市场准入负面清单（2022 年版）》（发改体改规〔2022〕397 号）中规定的许可事项（按相关规定向生态环境部申请办理辐射安全许可证）。本项目属于海盐县《市场准入负面清单（2020 年版）》（盐发改〔2020〕552 号）中规定的许可准入类事项（许可准入主管部门为生态环境部）。

本项目已于 2024 年 1 月 25 日由海盐县发展和改革局进行了备案，项目代码 2401-330424-04-01-654503（见附件 5）

综合来看，本项目建设符合国家及地方产业政策。

1.4 与规划相符性

（1）与区域发展规划相符性分析

嘉兴市为了全市空间可持续发展，做好行政区内陆域与管辖海域保护、开发、利用、修复，根据中共中央、国务院《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》，特组织编制了《嘉兴市国土空间总体规划（ 2021-2035 年）》，该规划将本项目所在地定位为海盐核电关联及核技术应用全国性制造业集群（见图

1-2）。本项目为核技术用于放射性药物领域，符合嘉兴市国土空间总体规划中产业体系的定位。

根据浙江省政府《关于加快特色小镇规划建设的指导意见》（浙政发〔2015〕8 号）以及省级特色小镇验收命名办法，海盐核电小镇 2020 年 10 月被省政府列入第四批省级特色小镇名单。根据《海盐县国民经济和社会发展第十四个五年规划和二 O 三五年远景目标纲要》，在加快构建现代产业集群，打造现代化产业体系中提出“联动推进中国核电城平台建设”，以“扩大医学同位素的生产，打造世界级的同位素生产基地”为发展导向，重点建设“清洁能源示范基地、核工业大数据基地、同位素生产基地和核电人才培养基地”等四大基地。本项目属于医用放射性同位素及药物的生产，符合海盐县的发展规划。

为突破传统核产业发展的瓶颈、空间范围限制核电小镇发展、提升核电小镇创新能力，抓住国家“同位素产业发展规划”等政策提供的有利发展机遇，海盐县制定《海盐核电小镇高质量发展规划——着力打造海盐核电小镇升级版三年行动计划（2022-2024）》，把核技术同位素生产和应用作为核电小镇升级版三年行动计划的重要产业和主要任务，将东临秦山核电站、北接杨柳山二区、南至杭州湾面积约 0.9 平方公里的区域，即核技术应用（同位素）产业园作为核电小镇的扩容区之一，建设同位素产业园生产基地。《海盐核技术应用（同位素）产业园规划》于 2021 年 12 月获得海盐县人民政府的批复，产业园位于秦山街道杨柳山社区核电四号门处。其规划范围为：北邻杨柳村二区，南至杭州湾，东邻秦山核电站，西至水塘。按照海盐核技术应用（同位素）产业园规划的入园企业环境准入——鼓励发展的项目：“鼓励引入放射性同位素研发及生产、放射性药物研发及生产、核仪器仪表和放射医疗设备研发设计及制造、核技术服务等符合现行国家产业政策鼓励类行业，符合园区产业规划的项目”。 本项目属于放射性药物研发及生产项目，属于符合园区产业规划的项目，符合海盐核技术应用（同位素）产业园规划的准入门槛。

2023 年 7 月，母公司砹尔法宁波公司与海盐县人民政府秦山街道办事处签订产业项目投资协议，本项目场址与海盐核技术应用（同位素）产业园相对位置关系示意图见图 1-3，根据产业园用地布局规划图，本项目场址所属地块规划功能为三类工业用地，本项目用地性质符合产业园用地规划图的规划。

综上所述，本项目的建设符合嘉兴市和海盐县的规划要求。

（2）“三线一单”相符性分析

根据《关于印发<生态环境分区管控管理暂行规定 >的通知》（环环评〔 2024〕41 号），“三线一单”即“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单”，项目建设应强化“三线一单”约束作用。

1）与生态保护红线的相符性

根据《嘉兴市生态环境分区管控动态更新方案》、《海盐县生态环境分区管控动态更新方案》及《海盐县“三区三线”分布图》（见图 1-4），本项目位于城镇开发边界，不涉及基本农田和生态保护红线。

2）与环境质量底线的相符性

根据 2024 年 6 月 5 日嘉兴市生态环境局海盐分局发布的《2023 年海盐县环境状况白皮书》中相关数据，2023 年海盐县环境空气全年有效监测 363 天，空气质量综合指数（AQI）为 3.28，符合《环境空气质量标准》一级标准 114 天，符合二级标准 216 天，符合三级标准 28 天，符合四级标准 3 天。符合二级标准以上为 330 天，优良天数占总监测天数的 90.9%。同时，根据环境质量现状监测结果，本项目拟建场址及周围环境辐射环境质量现状属于正常本底范围，空气、地表水、土壤监测数据辐射剂量率均未见异常。在落实本环评提出的各项污染防治措施后，本项目运行不会对周围环境产生不良影响，能维持周边环境质量现状，满足该区域环境质量功能要求。因此，本项目符合环境质量底线要求。

3）与资源利用上线的相符性

本项目位于海盐核技术应用（同位素）产业园内，根据产业园对水资源利用、土地利用和能源利用的相关资料可知，产业园内万元 GDP 用水量为 0.95 立方米/万元，符合水资源利用上线的要求；产业园内建设用地面积占海盐县城乡建设用地控制总规划面积的比例为 0.79％，占比较小，不会超过海盐县土地资源利用上线；产业园内优化能源结构，主要以天然气、电等作为能源，年用电量和天然气折合标准煤量远低于嘉兴市 2023 年的要求，符合能源利用上线目标要求。因此，本项目符合资源利用上线的要求。

4）与生态环境准入清单的相符性

根据《海盐县生态环境分区管控动态更新方案》（2024 年 10 月），本项目

拟建场址位于海盐县秦山街道产业集聚重点管控单元（编码 ZH33042420002），详见图1-5。项目与海盐县生态环境分区管控动态更新方案的对照见表1-1所示，满足环境准入负面清单要求。

表 1-1 项目与海盐县生态环境分区管控动态更新方案的符合性

环境管控单元名称	管控要求		符合性分析
浙江省嘉兴市海盐县秦山街道产业集聚重点管控单元	空间布局约束	1、根据产业集聚区块的功能定位，实施分区差别化的产业准入条件。 2、优化产业布局和结构，合理规划布局三类工业项目，控制三类工业项目布局范围和总体规模，鼓励对现有三类工业项目进行淘汰和提升改造。 3、提高电力、化工、印染、造纸、化纤等重点行业环保准入门槛，控制新增污染物排放量。 4、新建涉 VOCs 排放的工业企业全部进入工业功能区，严格执行相关污染物排放量削减替代管理要求。 5、合理规划布局居住、医疗卫生、文化教育等功能区块，与工业区块、有污染和干扰的工业企业之间设置防护绿地、生态绿地等隔离带。	符合。本项目属于放射性药物生产项目，拟建场址位于产业集聚区块中的海盐核技术应用（同位素）产业园内，满足准入条件，不属于电力、化工、印染、造纸、化纤类项目。
	污染物排放管控	1、严格实施污染物总量控制制度，根据区域环境质量改善目标，削减污染物排放总量。 2.新建二类、三类工业项目污染物排放水平要达到同行业国内先进水平，推动企业绿色低碳技术改造。 3、新建、改建、扩建高耗能、高排放项目须符合生态环境保护法律法规和相关法定规划，强化“两高”行业排污许可证管理，推进减污降碳协同控制。 4、加快落实污水处理厂建设及提升改造项目，深化工业园区（工业企业）“污水零直排区”建设，所有企业实现雨污分流。 5、加强土壤和地下水污染防治与修复。 6、重点行业按照规范要求开展建设项目碳排放评价。	符合。本项目运行过程中产生的主要污染物为放射性“三废”，放射性气载流出物经设置的过滤装置处理后由屋顶排气口排放，经核算，外排气载流出物所致评价范围内公众剂量满足国家规定的公众剂量限值和本报告提出的公众剂量约束值要求；放射性废水排入地下一层放射性废水衰变池间，暂存衰变一段时间经检测满足要求后排入园区污水管网；放射性固体废物存入地下一层放射性固体废物暂存间，暂存衰变一定时间，经检测满足标准要求后做清洁解控处理，不能清洁解控拟依托产业园规划建设的放废收贮中心进行处理。 本项目产生的危险废物委托资质单位定期处理。
	环境风险防控	1、定期评估沿江河湖库工业企业、工业集聚区环境和健康风险。	符合。本项目建立企业辐射事故应急体系。运营期

		2.强化工业集聚区企业环境风险防范设施设备建设和正常运行监管，加强重点环境风险管控企业应急预案制定，建立常态化的企业隐患排查整治监管机制；加强风险防控体系建设。	间，加强环境监管。采取上述措施并加强管理的情况下，可避免辐射事故发生。
	资源开发效率要求	推进工业集聚区生态化改造，强化企业清洁生产改造，推进节水型企业、节水型工业园区建设，落实煤炭消费减量替代要求，提高资源能源利用效率。	符合。本项目不使用煤炭，在生产过程中使用节水模式。

综上，本项目的建设符合《关于印发<生态环境分区管控管理暂行规定 >的通知》（环环评〔2024〕41 号）及海盐县生态环境分区管控动态更新方案的要求。

（3）与国土空间规划相符性分析

海盐县国土空间总体规划中“三区三线”是指城镇空间、农业空间、生态空间三种类型空间所对应的区域，以及分别对应划定的城镇开发边界、永久基本农田保护红线、生态保护红线 三条控制线。根据浙江海盐县国土空间总体规划（2021-2035），海盐县规划期内全县耕地保有量不低于 30.79 万亩，永久基本农田保护面积不低于 28.40 万亩；全县划定生态保护红线面积不低于 355.04 平方千米；城镇开发边界扩展倍数控制在基于 2020 年城镇建设用地规模的 1.3136 倍以内。本项目拟建场址位于城镇开发边界内，不涉及海盐县耕地和永久基本农田保护红线、生态保护红线规划控制区域，符合海盐县“三区三线”规划的要求，本项目与海盐县国土空间总体规划中“三区三线”的位置关系图见图 1-3 所示。



图 1-2 嘉兴市重点领域产业规划图



图 1-3 本项目场址与海盐核技术应用（同位素）产业园位置关系示意图

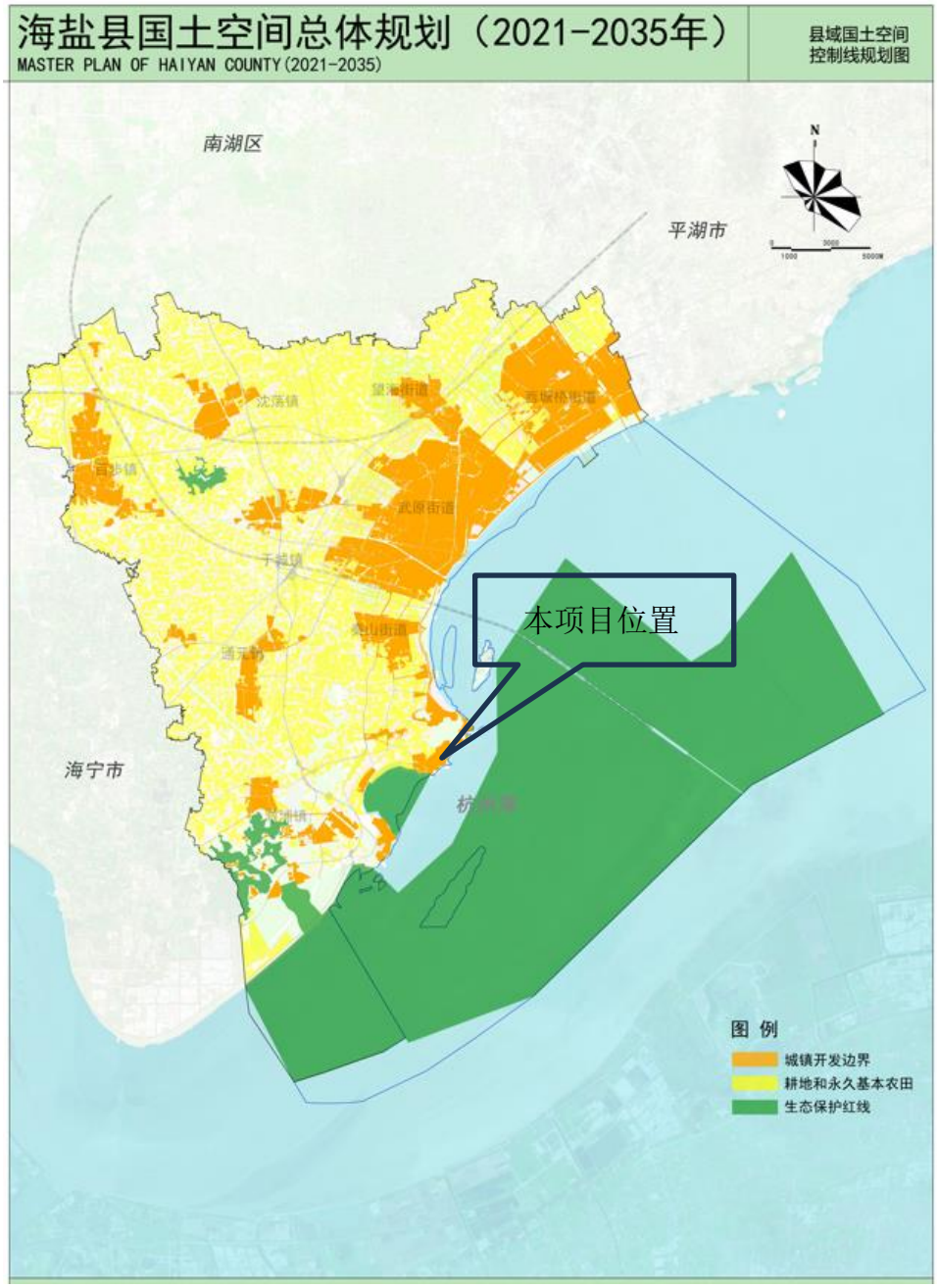


图 1-4 本项目与海盐县“三区三线”规划位置关系示意图

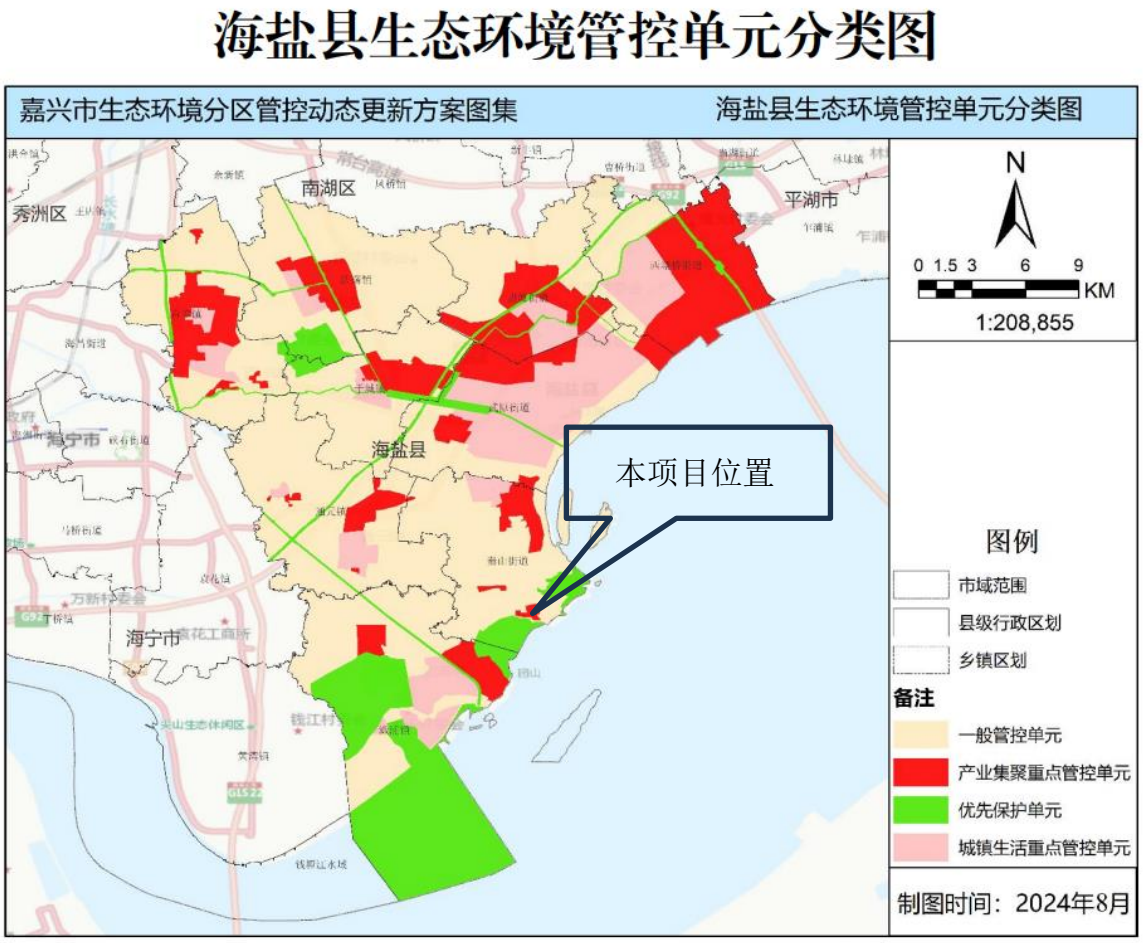


图 1-5 本项目与海盐县生态环境分区管控动态更新方案管控单元位置关系示意图

1.5 项目周边环境条件

本项目建设地点位于浙江省嘉兴市海盐县核技术应用（同位素）产业园标准化厂房一期内，行政隶属海盐县秦山街道，本项目地理位置示意图见图 1-1，本项目所在产业园一期厂房总平面布局图见图 1-6，核技术应用（同位素）产业园标准厂房一期包含 6 幢工业厂房楼及 1 个仓库，产业园北侧为同兴路，西侧为产业园大门入口，东侧隔同柳路为已建的中核秦山同位素生产基地，南侧为规划的同湾路。本项目砹尔法公司拟建址位于 2#厂房，2#厂房东侧为在建 5#厂房，西侧为园区道路，北侧为在建 1#厂房，东北侧为在建 6#厂房，南侧和东南侧为在建 3#和 4#厂房。本项目周围环境卫星图见图 1-7 所示。

厂址周围 500m 范围没有学校、医院等环境敏感目标，目前最近的居民点为杨柳山社区居民，位于厂址西北方向约 470m。

1.6 核技术利用现状

砹尔法公司在该厂址未从事过核技术利用相关活动，本次为首次申请环境影响评价审批。

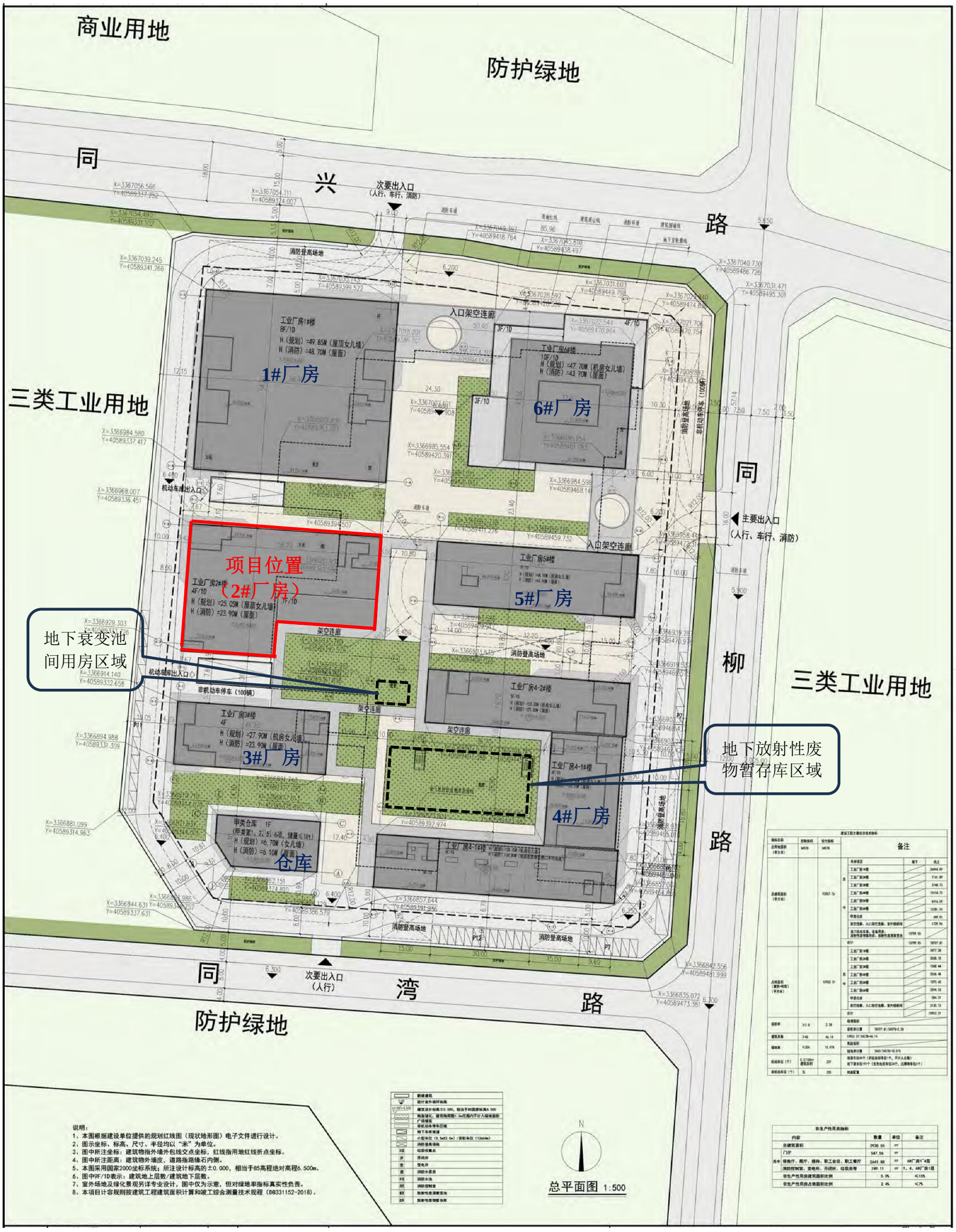


图 1-6 核技术应用（同位素）产业园标准厂房一期总平面布局图



图 1-7　项目周围环境关系示意图

1.7 编制依据

根据《中华人民共和国环境影响评价法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《建设项目环境影响评价分类管理名录》和《射线装置分类公告》等法律法规的要求，本项目 1 台质子回旋加速器最大能量为 30MeV，用于放射性医用核素 ^{68}Ge、^{123}I、^{124}I、^{89}Zr、^{64}Cu、^{67}Cu、^{57}Co、^{99}Mo、^{225}Ac、^{203}Pb 和 ^{18}F 生产；1 台 α 粒子回旋加速器最大能量为 30MeV，用于放射性医用核素砹 ^{211}At 药物生产，可见本项目所用加速器均划为生产放射性同位素用加速器（不含制备正电子发射计算机断层显像装置（PET）用放射性药物）类别，两台加速器均属于 I 类射线装置。

本项目涉及非密封放射性物质的工作场所在一层和二层，根据《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函〔2016〕430 号）的相关规定，本项目一层各生产车间物理空间相对连通，具有共同的人流物流通道，具有相对独立、明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，有相对独立的辐射防护措施。因此本项目公司一层车间整体按照 1 个独立工作场所进行日等效操作量核算，根据表 3-2 工作场所日等效操作量计算结果可知，一层放射性药物生产车间工作场所为甲级非密封放射性物质工作场所。

二层质检车间物理空间相对连通，具有共同的人流物流通道，具有相对独立、明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，有相对独立的辐射防护措施。因此本项目公司二层车间整体按照 1 个独立工作场所进行日等效操作量核算，根据表 3-3 工作场所日等效操作量计算结果可知，二层质检车间属于乙级非密封放射性物质工作场所。

因此根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 版）规定，本项目应该编制环境影响报告书。受砹尔法公司委托，苏州热工研究院有限公司承担了本次项目环境影响评价辐射类报告书的编制工作。接受委托后，环评单位组织技术人员对项目进行了实地踏勘、资料收集，并根据建设单位提供的资料和国家环保法律法规的有关规定，编制了《浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司新建医用阿尔法核素等同位素药物生产项目环境影响评价报告书》。

1.7.1 法律、法规

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

2）《中华人民共和国环境影响评价法》（2018 年第二次修正），中华人民共和国主席令第 48 号， 自 2018 年 12 月 29 日起施行；

3）《中华人民共和国放射性污染防治法》，中华人民共和国主席令第 6 号，自 2003 年 10 月 1 日起施行；

4）《中华人民共和国大气污染防治法》（第二次修正），第十三届全国人民代表大会常务委员会第六次会议，自 2018 年 10 月 26 日起施行；

5）《中华人民共和国水污染防治法》（修正），第十二届全国人民代表大会常务委员会第二十八次会议，自 2018 年 1 月 1 日起施行；

6）《中华人民共和国噪声污染防治法》（修正），第十三届全国人民代表大会常务委员会第三十二次会议通过，自 2022 年 6 月 5 日起施行；

7）《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（修订），自 2020 年 9 月 1 日起施行；

8）《中华人民共和国突发事件应对法》，2007 年 8 月 30 日第十届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议通过，自 2007 年 11 月 1 日起施行，第十四届全国人民代表大会常务委员会第十次会议修订通过，自 2024 年 11 月 1 日起施行；

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

10）《放射性废物安全管理条例》，国务院令第 612 号，自 2012 年 3 月 1 日起施行；

11）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（第二次修订），国务院令第 709 号，自 2019 年 3 月 2 日起施行；

12）《放射性物品运输安全管理条例》（国务院令第 562 号，自 2010 年 1 月 1 日起施行）。

1.7.2 部门规章

1）《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，自 2021 年 1 月 1 日起施行；

2）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2021 年修正本），生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日公布实施；

3）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环保部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起实施；

4）《关于建立放射性同位素与射线装置事故分级处理报告制度的通知》，环发（2006）145 号，2006 年 9 月 26 日；

5）《国家危险废物名录》（2025 年版），自 2025 年 1 月 1 日起施行；

6）《建设项目危险废物环境影响评价指南》，环保部公告 2017 年第 43 号，自 2017 年 10 月起施行；

7）关于发布《固体废物分类与代码目录》的公告，生态环境部公告 2024 年第 4 号，自 2024 年 1 月 22 起施行；

8）《关于发布射线装置分类的公告》，环境保护部、国家卫生和计划生育委员会，2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日起施行；

9）《环境影响评价公众参与办法》，生态环境部令第 4 号，自 2019 年 1 月 1 日起实行；

10）《放射性废物分类》，环保部公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月 1 日起实施；

11）《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》，国家核安全局，国核发〔2015〕40 号，2015 年 2 月 27 日；

12）《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》环办辐射函〔2016〕430 号；

13）《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；

14）《关于发布<建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法>配套文件的公告》生态环境部公告 2019 年第 38 号；

15）《关于启用环境影响评价信用平台的公告》生态环境部公告 2019 年第 39 号；

16）《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；

17）《关于核医学标准相关条款咨询的请示》（辐射函〔2023〕20 号，2023 年 9 月 13 日）；

18）《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（2024 年 2 月 1 日施行）。

1.7.3 地方法规及政策

1）《浙江省生态环境保护条例》（2022 年 5 月 27 日浙江省第十三届人民代表大会常务委员会第三十六次会议通过，自 2022 年 8 月 1 日起施行）；

2）《浙江省建设项目环境保护管理办法（2021 年修正）》（浙江省人民政府令第 388 号第三次修正，2021 年 2 月 10 日）；

3）《浙江省辐射环境管理办法（2021 年修正）》（浙江省人民政府令第 388 号修订，2021 年 2 月 10 日）；

4）《浙江省人民政府关于发布浙江省生态保护红线的通知》（浙政发〔2018〕30 号，2018 年 7 月 20 日）；

5）《海盐县人民政府办公室关于印发海盐县声环境功能区划分方案的通知》（盐政办发〔2021〕49 号，2021 年 12 月 8 日）；

6）《海盐县人民政府办公室关于印发海盐县生态环境分区管控动态更新方案的通知》盐政办发〔2024〕22 号，2024 年 10 月 22 日。

1.7.4 技术标准和技术导则

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

2）《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ2.1-2016）；

3）《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ2.2-2018）；

4）《环境影响评价技术导则 地表水环境》（HJT2.3-2018）；

5）《环境影响评价技术导则 声环境》（HJ2.4-2021）；

6）《环境影响评价技术导则 地下水环境》（HJ610-2016）；

7）《环境影响评价技术导则 土壤环境》（HJ964-2018）；

8）《环境影响评价技术导则 生态影响》（HJ19-2022）；

9）《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ169-2018）；

10）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

11）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）；

12）参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）；

13）参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）；

14）《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ380-1989）；

15）《放射性药物生产场所辐射安全设计要求》（T/CIRA5-2019）；

16）《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；

17）《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）；

18）《放射性物质运输包装质量保证》（GB/T15219-2009）；

19）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；

20）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；

21）《环境空气质量标准》（GB3095-2012）及修改单；

22）《声环境质量标准》（GB3096-2008）；

23）《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）；

24）《污水综合排放标准》（GB8978-1996）；

25）《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）；

26）《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）；

27）《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2023）；

28）《危险废物收集 贮存 运输技术规范》（HJ2025-2012）；

29）《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》（GB 18599-2020）；

30）《放射性药物生产场所辐射安全设计要求》（T/CIRA 5-2019）；

31）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）；

32）《职业性内照射个人监测规范》（GBZ129-2016）；

33）《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-1985）；

34）《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）；

35）《工业企业废水氮、磷污染物间接排放限值》（DB33/887-2013）；

36）《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》（ DB33/2169-2018）

36）《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T31962-2015）。

1.7.5 其它参考资料

1）NCRP-51 号报告（Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100MeV Particle Accelerator Facilities，NCRP Report No.51），美国国家辐射防护与测量委员会，1977-3-1 发布；

2）NCRP-144 号报告（Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities，NCRP Report No.144），美国国家辐射防护与测量委员会，2003-12-31 发布；

3）美国环保署文件《External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil》，EPA-402/R19/002，August.2019；

4）IAEA NO.19 报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》，国际原子能机构(IAEA)，2001 年；

5）《中国环境天然放射性水平，浙江省环境天然贯穿辐射水平调查研究》（原国家环境保护局出版，李洪昌等，1995 年 8 月）；

6）《辐射防护手册》，李德平、潘自强主编；

7）《2022 年全国辐射环境质量报告》，生态环境部 2023 年 7 月 13 日发布。

8）《2023 年全国辐射环境质量报告》，生态环境部 2024 年 7 月 18 日发布。

1.7.6 与项目相关的文件、资料

1） 本项目可行性研究报告；

2） 设备厂商提供的加速器、热室等设计文件；

3） 建设单位提供的场所布置图纸；

4） 《秦山同位素产业园标准厂房一期配套辐射环保设施建设项目环境影响分析报告》（2022 年 12 月）；

5）本项目环境影响评价技术服务委托书。

1.8 评价标准

根据本项目建设和运行的特点，施工期环境影响评价主要涉及本项目主体工程建造、设备和设施安装等造成水、大气和噪声等环境的影响；运行期间对环境的影响主要是对职业人员、公众和周围环境的辐射影响。

1.8.1 电离辐射标准

1.8.1.1 剂量限值

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

1）职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

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

（2）任何一年中的有效剂量，50mSv。

2）公众照射

实践使公众中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下述限值：

（1）年有效剂量，1mSv；

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

1.8.1.2 剂量约束值

（1）工作人员剂量约束值

根据《放射性药物生产场所辐射安全设计要求》（T/CIRA5-2019）4.1 条款，工作人员的剂量约束值宜取 5mSv/a。

（2）公众剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），剂量约束值通常应在公众照射剂量限值 10%～30%（即 0.1mSv/a～0.3mSv/a）的范围之内，结合本项目的特点及辐射防护最优化原则，本项目公众照射的剂量约束值取 0.1mSv/a。

1.8.1.3 环境辐射控制水平

根据《放射性药物生产场所辐射安全设计要求》（T/CIRA5-2019）、参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）、《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）以及《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）等相关标准要求，结合本项目工

艺特点，从辐射防护优化角度出发，确定本项目辐射工作场所辐射剂量率管理目标值如下：

1)回旋加速器机房大厅四周屏蔽体、防护门外 30cm 处辐射剂量率低于 2.5μSv/h，考虑加速器机房顶部上方二层有人员居留，顶部屏蔽体 30cm 处辐射剂量率应低于 2.5μSv/h。

2）放射性核素接收和处理屏蔽体（含热室、手套箱和通风柜）外 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h。

3）非密封放射性物质工作场所，如核素生产车间、二楼质检车间、放射性废物暂存库用房、外购核素存放间的门或墙体外表面 30cm 处的辐射剂量率小于 2.5μSv/h。

4）固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。

5）本项目产品按照《放射性物品安全运输规程》（GB18806-2019）规定的 II 级 A 类货包进行包装，按照相关规定，货包外表面辐射剂量率不超过 2mSv/h，β 表面污染不超过 4Bq/cm^2，α 表面污染不超过 0.4 Bq/cm^2 进行管理。

6）非密封放射性物质工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），非密封放射性物质工作场所按日等效最大操作量的大小进行分级如下，包括日等效最大操作量计算、放射性核素毒性修正因子、操作方式与放射源状态修正因子。

表 1-1 非密封放射性物质工作场所分级

分级	日等效最大操作量，Bq
甲级	>4×10^9
乙级	2×10^7-4×10^9
丙级	豁免活度值以上-2×10^7

放射性核素的日等效最大操作量的计算：

$$\text{日等效最大操作量}=\frac{\text{放射性核素的日操作量}\times\text{核素毒性因子}}{\text{操作方式修正因子}}$$

放射性核素毒性组别修正因子见表 1-2 所示。

表 1-2　放射性核素毒性组别修正因子

毒性组别	毒性组别修正因子
极毒	10
高毒	1
中毒	0.1
低毒	0.01

注：本项目放射性核素的毒性分组见 GB18871-2002 附录 D。

操作方式与放射源状态修正因子见表 1-3 所示。操作方式的具体方式举例详见《辐射防护手册》（第三分册） 辐射安全 P143~144。

表 1-3 操作方式与放射源状态修正因子

操作方式	放射源状态			
	表面的污染水平较低的固体	液体、溶剂、悬浮液	表面有污染的固体	气体、蒸汽、粉末、压力很高的液体，固体
源的贮存	1000	100	10	1
很简单的操作	100	10	1	0.1
简单	10	1	0.1	0.01
特别危险的操作	1	0.1	0.01	0.001

7）放射性表面污染水平

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 1-4 控制。

表 1-4 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 1）	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）该区内的高污染子区除外。				

8）放射性废液排放管理要求

砹尔法公司在标准化厂房地下一层衰变池间用房内划出一个独立区域，作为本项目衰变池间，并配备三个不锈钢衰变池水箱（每个容积 3m^3）用于暂存本项目产生的

放射性废水，以及 1 个不锈钢专用储水箱（容积 1.5m^3）用于暂存事故情况下泄漏的循环冷却水。

参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）第 7.3.3 条规定，根据本项目实际情况，作如下管理：

a）所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液在地下一层槽式衰变池水箱暂存时间超过 30 天后可直接解控排放；

b）所含核素半衰期 24 小时至 59.4 天（包括 59.4 天）的放射性废液在地下一层槽式衰变池水箱暂存时间超过 10 倍最长半衰期（含碘-131 核素的暂存超过 180 天），监测结果经审管部门认可后，按照 GB 18871 中 8.6.2 规定方式进行排放至市政污水管网。放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10 Bq/L，碘-131 的放射性活度浓度不大于 10 Bq/L。

对于较长半衰期放射性核素（半衰期＞59.4 天）的废水，拟收集至装有塑料容器的屏蔽桶中，每个收集桶中装有吸水性极佳的高分子材料，密封盖紧后定期转移至地下一层放射性废物库进行贮存衰变，按照放射性固体废物方式进行处置。

对于加速器机房事故情况下发生泄漏的循环冷却水，拟经各机房地下预埋管道排放至放射性衰变池间内的储水箱（容积为 1.5m^3）中暂存，放置衰变经监测满足上述标准后排入园区污水管网。

不同衰变水箱应进行编号标记，衰变水箱显著位置应设置电离辐射警示标志，水箱底和壁应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性和具有防泄漏措施。

放射性废液的暂存和处理应安排专人负责，并建立废物暂存和处理台账，详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。

9）放射性固体废物管理要求

砹尔法公司在标准化厂房地下一层放射性固体废物暂存间用房内划出一个独立区域，作为本项目存放放射性固废用房。建设单位参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中的要求，做如下管理：

固体放射性废物应收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶。废物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物。放射性废物每袋重量不超过 20kg，密封袋口后转移

至废物桶中，并在塑料袋外表面注明废物类别、重量（或体积）、所含核素名称、暂存起始日期等信息。含尖刺及棱角的放射性废物，应预先进行包装处理，再装入废物桶，防止刺破废物袋。装满废物的塑料袋应密封后及时安排转送至放射性废物暂存间贮存。固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。

所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天，所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍，含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天后的固体放射性废物，经委托监测辐射剂量率满足所处环境本底水平，α 表面污染小于 0.08 Bq/cm^2、β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控处理。

不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整定，拟纳入规划建设的产业园放废收贮中心处置。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 4 Bq/ cm^2、其他 α 发射体应小于 0.4 Bq/ cm^2。

固体放射性废物的存储应安排专人负责，并建立放射性废物管理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生日期、责任人员、移交时间和监测结果等信息。

10） 放射性废气排放管理要求

参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）和《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）的要求执行：

放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置，风速应不小于 0.5 m/s。

制备放射性药物的回旋加速器工作区域、设有通风橱、手套箱等场所的通风系统排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。

产生气态放射性废物的工作场所应设置独立的通风系统，合理组织工作场所的气流，对排出工作场所的气体进行过滤净化，避免污染工作场所和环境。应定期检

查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集暂存，若经委托监测满足清洁解控要求的将作为危险废物处理。

1.8.2 非放射性环境影响评价标准

1.8.2.1 环境质量标准

1）大气质量标准

根据项目区域功能特点，SO_2、NO_2、CO、O_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$执行《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）中的二级标准，HCl 执行《环境影响评价技术导则大气环境》（HJ2.2-2018）表 D.1 其他污染物空气质量浓度参考限值，非甲烷总烃执行《大气污染物综合排放标准》详解中的限值，主要评价因子标准限值见下表 1-6 所示。

表 1-6 环境空气质量评价标准

污染物名称	取值时间	标准浓度限值	浓度单位	标准来源
SO_2	1 小时平均	500	$\mu g/m^3$	《环境空气质量标准》(GB3095-2012)及修改单中二级标准
	日平均	150		
	年均	60		
NO_2	1 小时平均	200		
	日平均	80		
	年均	40		
CO	1 小时平均	10	mg/m^3	
	24 小时平均	4		
O_3	1 小时平均	200	$\mu g/m^3$	
	日最大 8 小时平均	160		
PM_{10}	日平均	150		
	年均	70		
$PM_{2.5}$	日平均	75		
	平均	35		
TSP	24 小时平均	150	$\mu g/m^3$	

HCl	小时平均	50	μg/m^3	《环境影响评价技术导则大气环境》（HJ2.2-2018）表D.1
非甲烷总烃	/	2	mg/m^3	《大气污染物综合排放标准》详解

2）声环境质量标准

本项目位于海盐核技术应用（同位素）产业园内，按照《海盐县声环境功能区划分方案》（2021 年 12 月 8 日），所在区域属于独立于村庄、集镇之外的工业、仓储集中区，因此厂址所在区域声环境功能区为 3 类声环境功能区，执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）3 类声环境功能区标准。标准值详见表 1-7 所示。

表 1-7　本项目声环境执行标准值

环境要素	取值时间	标准值	单位	标准来源
声环境	昼间	65	dB（A）	《声环境质量》（GB3096-2008）3类标准
	夜间	55		

3）地表水

根据《杭嘉湖平原河网流域水功能区水环境功能区划分方案》，本项目附近河道属于长澉河支流，水功能区为长澉河海盐工业用水区（编号：F1203108603012），水环境功能区为工业用水区（编号 330424FM220243000140 水环境质量执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）Ⅲ类标准。主要指标限值见表 1-8 所示。

表 1-8 地表水环境质量评价标准

指标	标准值	依据
pH（无量纲）	6~9	《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）Ⅲ类标准
溶解氧	≥5mg/L	
BOD5	≤4mg/L	
COD	≤20mg/L	
氨氮（NH_3-N）	≤1.0mg/L	
总磷（以 P 计）	≤0.2mg/L	
石油类	≤0.05mg/L	

1.9.2.2 污染物排放标准

1）噪声排放标准

施工期施工场地厂界执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)，见表 1-9。运行期厂界噪声执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)中的 3 类标准，见表 1-10。

表 1-9　施工期施工场地厂界噪声排放标准

执行标准	昼间	夜间
建筑施工场界环境噪声排放标准(GB12523-2011)	70dB	55dB

表 1-10　运行期厂界噪声排放标准

执行标准	昼间	夜间
工业企业厂界环境噪声排放标准(GB12348-2008) 3 类标准	65dB	55dB

2）废水排放标准

本项目废水排入市政污水管网执行《污水综合排放标准》（GB8978 1996 ）表 1 及表 4 三级标准，其中氨氮和总磷执行《工业企业废水氮、磷污染物间接排放限值》（DB33/887-2013）相关标准（氨氮：35mg/L，总磷：8mg/L），TN 执行《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T31962-2015）相关标准（TN：45mg/L），最终由海盐县城乡污水处理厂处理达《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级 A 标准及《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》（ DB33/2169-2018）表 1 排放限值要求后排入杭州湾。

3）废气排放标准

本项目运行过程中热室每次使用少量的无机酸及有机溶剂，根据各场所化学试剂操作场所、使用量、使用方式及挥发特性，废气主要是热室和放化质检过程浓盐酸少量挥发产生的酸雾以及少量挥发性有机物（以非甲烷总烃计），排放参照执行《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）中表 2 氯化氢最高允许排放限值（10mg/m^3），表 1 非甲烷总烃最高允许排放限值（60 mg/m^3）。生产车间内热室（或手套箱）均为负压操作，放化质检房间为微负压环境，没有废气污染物的无组织排放。

4）固体废物排放

一般工业固体废物厂内暂存执行《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》

（GB18599-2020）；危险废物执行《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2023）、《危险废物收集 贮存 运输技术规范》（HJ2025-2012）有关规定。

1.9 评价范围和保护目标

1.9.1 评价范围

（1）辐射环境影响评价范围

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》（HJ 10.1-2016）规定：“以项目实体边界为中心，放射性同位素生产项目（放射性药物生产除外）的评价范围半径不小于 3km；放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目的评价范围，甲级取半径 500m 的范围，乙、丙级取半径 50m 的范围。放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围），对于I类放射源或I类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”。

本项目生产车间包含放射性药物生产，以及甲级、乙级非密封放射性物质工作场所，回旋加速器属于I类射线装置。上述设施和工作场所均位于同一座生产厂房内，综合考虑，本项目辐射环境影响评价范围为项目厂房实体边界外半径 500m。

本项目两座加速器机房内空气受照活化产生放射性气溶胶，以及热室内核素挥发产生放射性气溶胶，均设置独立的通风管道，经含有活性炭过滤器（或浸渍活性炭高效碘吸附器）和高效过滤器两级过滤后通过通风系统排放大气环境，经估算本项目废气中的放射性核素比活度较小，对周围公众造成的剂量很小，放射性废气的评价范围也考虑为厂房外 500m。

本项目辐射环境影响评价范围见图 1-8 所示。

（2）非放射性环境影响评价分级及范围

1）声环境

本项目运行时厂房内安装的空压机、风机、设备冷却系统水泵等公用辅助设备是主要的噪声源。通过选用低噪声设备、减振、隔墙、吸声和隔声箱等方式，对厂界外环境的噪声影响较小。厂界周围是其他工业企业、公共道路，200m 范围内没有居民住宅，受噪声影响的人员较少。本项目拟建厂址处于 3 类声环境功能区，按照《环境影响评价技术导则 声环境》（HJ2.4-2021）中的有关规定，声环境影响按照三级评价简

单分析和评价，声环境影响评价范围为项目厂界外 200m。本项目声环境影响评价范围示意图见图 1-8。

2）地表水环境

本项目生活污水经化粪池预处理后排入市政污水管网，非放操作使用器皿等清洗废水、工作服清洗废水、厂房清洁废水（地面拖布冲洗废水）等拟经过企业废水预处理设施后排入市政污水管网，废水最终进入海盐县城乡污水处理厂处理达标排海。按照《环境影响评价技术导则 地表水环境》（HJ 2.3-2018），项目废水排放方式为间接排放，评价等级为三级 B。因此，本次环评对用排水状况、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）地下水环境

本项目地下一层衰变池间的不锈钢水箱底板、侧板、顶板均采用耐酸耐碱腐蚀，无渗透性，有防止泄漏等措施，同时衰变池系统设置报警功能可以及时发现泄漏情况，另外本项目属于《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》中“五十五核与辐射”中“172 核技术利用建设项目”，不属于《环境影响评价技术导则 地下水环境》（HJ610-2016）附录 A 中提及行业，结合本项目工艺特点和废水排放特点，因此本项目不涉及地下水污染源项，不开展地下水环境影响评价。

4）生态影响

本项目位于海盐核技术应用（同位素）产业园内，规划用地性质为工业用地。本项目属于《环境影响评价技术导则 生态影响》（HJ19-2022）中规定，可不确定评价等级，直接进行生态影响简单分析。

5）土壤环境

由于《环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）》（HJ964-2018）不适用于核与辐射建设项目，因此，本项目按照《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目环境响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）中相关规定开展土壤现状评价与分析。

5）大气环境

本项目运行过程中非放废气主要来自热室及放化质检过程中的浓盐酸少量挥发产生的酸雾以及少量挥发性有机物（以 NMHC 计），均经独立通风系统管路并由离地 26.15m 高排放口屋顶外排。主要废气污染源参数见表 1-10 所示。

依据《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ2.2-2018）中 5.3 节工作等级的确定方法，结合项目源项分析结果，选择正常排放的主要污染物及排放参数，采用附录 A 推荐模型中的 AERSCREEN 模式计算项目污染源的最大浓度占标率 Pi，然后按评价工作分级判据进行分级。

最大浓度占标率的确定：

$$Pi=Ci/Coi\times100\%$$

式中：

Pi—第 i 个污染物的最大地面浓度占标率，%；

Ci—采用估算模式计算出的第 *i* 个污染物的污染物最大地面浓度，mg/m^3；

Coi—第 *i* 个污染物的环境空气质量标准，mg/m^3。

表 1-10 主要废气污染源参数一览表

排气筒	排气筒底部中心坐标/°		排气筒底部海拔高度（m）	排气筒高度（m）	排气筒出口内径（m）	烟气流量（m/s）	烟气温度（℃）	年排放小时数（h）	排放工况	污染物排放速率（kg/h）
	X（纬度）	Y（经度）								
锗镓核素车间 P3	30.416696	120.934078	36.15	26.15	0.4	10.41	环境气温	HCL：24	正常	0.005
								NMHC：24	正常	0.052
诊断核素车间 P4	30.416696	120.934081	36.15	26.15	0.4	10.11	环境气温	HCL：250	正常	8.8E-04
砹 ^{211}At 车间 P5	30.416696	120.934111	36.15	26.15	0.4	9.55	环境气温	NMHC：750	正常	0.002
放化质检实验 P8	30.416696	120.934100	36.15	26.15	0.4	3.82	环境气温	NMHC ：250	正常	0.002

备注：其余辐射工作场所内不涉及上述污染源，因此估算不做考虑。

根据 AERSCREEN 模式计算，上述排气筒中 HCL 的最大落地浓度为 $0.146\mu g/m^3$，最大占标率约为 0.29%，NMHC 最大落地浓度为 $1.672\mu g/m^3$，最大占标率约为 0.08%，

均小于 1%，本项目 HCL 和 NMHC 大气评价等级为三级，可不进行进一步对进行预测与评价，仅对环境质量现状进行调查和评价。本项目不需设置大气环境影响评价范围。

6）环境风险评价等级

根据本项目涉及的危险物质数量与临界量的比值（Q）为 $3.06\times10^{-2}<1$，则该项目环境风险潜势为Ⅰ。按照《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ/T169-2018）表 1 判定本项目环境风险评价等级为简单分析。

表 1-11　环境风险评价工作级别划分

环境风险潜势	Ⅳ、Ⅳ+	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
评价工作等级	一	二	三	简要分析[a]
a 是相对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说明。				

1.9.2 环境保护目标

本项目辐射环境影响评价范围内无自然保护区、风景名胜区、水源保护地以及重要文物单位等需要特殊保护区域，声环境影响评价范围内无住宅、学校、幼儿园等环境保护目标。根据工程性质及周围环境特征，确定辐射环境影响评价范围内的人群为除了本项目公司楼内辐射工作人员和公众以外，还有产业园区内其他企业公众，以及杨柳山社区居民，具体保护目标情况见表 1-12，保护目标分布情况图 1-8，现场情况见图 1-9~图 1-16。本项目评价范围内没有声环境保护目标。

表 1-12 本项目评价范围环境保护目标情况

序号	保护目标名称	场所方位	最近距离	规模	保护人员类别	年剂量约束值
1	2#厂房砹尔法公司辐射工作人员	公司 1 楼生产区、2 楼质检实验室以及地下一层衰变池间和废物间	/	32 人	职业人员（含辐射安全管理人员 2 名）	5mSv/a
2	2#厂房砹尔法公司非辐射工作人员	公司 1 楼大厅、3 楼和 4 楼内	约 5m	4 人	公众	0.1mSv/a
3	浙江爱索拓标记医药科技有限公司（一期在建 1#厂房）	北侧	约 20m	约 40 人		

4	深圳拉尔文生物工程技术有限公司（一期在建 3#厂房）	南侧	约 20m	约 25 人		
5	在建 4#厂房	东南侧	约 25m	待定		
6	在建 5#厂房	东侧	约 20m	待定		
7	上海华核药业股份有限公司（一期在建 6#厂房）	东北侧	约 25m	约 20 人		
8	中核秦山同位素有限公司（已建）	东侧	约 120m	约 30 人		
9	拟建企业（诺华医药科技（浙江）有限公司	东北侧	约 310m	约 100 人		
10	拟建企业（浙江颐核医疗科技有限公司）	东南侧	约 400m	约 20 人		
11	拟建企业（嘉兴法伯远恒科技发展有限公司）	东北侧	约 220m	约 20 人		
12	秦山核电二期西南门停车场	东侧	约 420m	流动人员		
13	杨柳山社区民房 1	北侧	约 470m	约 5 人		
14	杨柳山社区民房 2	北侧	约 490m	约 5 人		

备注：表中 3 号~14 号环境保护目标为本项目 2#厂房边界与其最近距离。

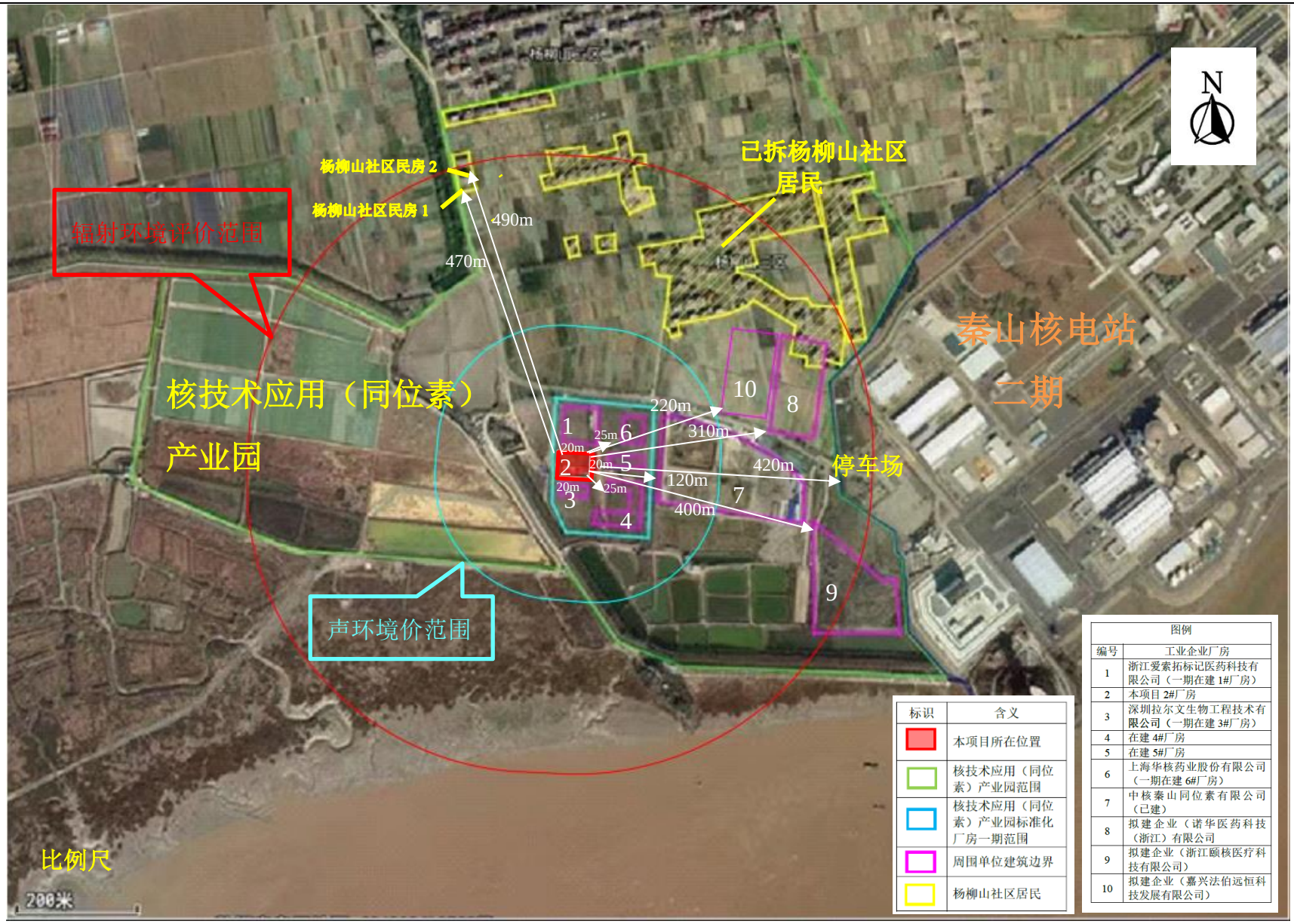


图 1-8 本项目评价范围及环境保护目标分布示意图



图 1-9 项目所在楼 2#厂房



图 1-10 项目所在楼东侧 5#厂房



图 1-11 项目所在楼北侧 1#厂房



图 1-12 项目所在楼西侧园区入口



图 1-13 项目所在楼南侧 3#厂房



图 1-14 中核秦山同位素有限公司（已建）



图 1-15 北侧杨柳山社区民房 1



图 1-16 北侧杨柳山社区民房 2

2 自然环境与社会环境状况

2.1 自然环境状况

2.1.1 地理位置

本项目所在浙江省嘉兴市海盐县地处浙江省北部杭嘉湖平原，东濒杭州湾，西南临海宁市，北连平湖市和嘉兴市南湖区、秀洲区。

本项目位于海盐县核技术应用（同位素）产业园，其规划范围为：北邻杨柳村二区，南至杭州湾，东邻秦山核电站。园区地理位置优越，距海盐城区 11.9km，距嘉兴高铁南站 40km，园区路网规划与周边交通干道相衔接，沿翁金线向南可通往海宁，沿嘉盐线、翁金线向北通往嘉兴，或通过杭浦高速公路连接杭州方向和上海。项目拟建址位于产业园内标准化厂房一期 2#厂房，地处中心坐标北纬 30°25′0.35″，东经 120°56′3.03″，厂房周围是园区其他在建的工业企业厂房和道路。

2.1.2 地形、地貌、地质和地震

（1）地形、地貌

海盐县地形似一个顶角朝南的等腰三角形，东西最宽处相距约 31 公里，南北最远处相距约 33 公里。海拔平均 3~4 米，整个地势从东南向西北倾斜，大致可分三个部分：南部为平原孤丘区，山丘高度大多在 100 米左右，与海宁市交界的高阳山为县境最高处，主峰高 251.6 米；东部为平原海涂区，地势稍高于西部平原；西部为平原水网区，面积约占全县 2/3。全县陆地土地总面积 584.96 平方公里，海湾面积 487.67 平方公里。境内陆地海岸自澉浦镇（南北湖风景区）永乐村起至海盐经济开发区（西塘桥街道）东港村止，全长 53.48 公里，是浙北海岸线最长的县（市）。本项目厂址地处杭州湾北岸，长江三角洲之南缘。附近除秦山、方家山和杨柳山山体外，其余均为平坦开阔的平原，属剥蚀残丘地貌。

（2）地质、地震

本项目厂址区域范围位于钱塘台裙带北东南的余杭—嘉兴台褶之东部。根据区域资料分析，包括近区域在内的浙北平原区，在印支运动之前处于相对隆起状态，印支运动之后则转为以拗陷为主形成北东向的复向斜。近区域地层属江南地

层杭州~嘉兴地层分区，其中第四系最为发育，广布于杭州湾两岸的平原地区，约占测区面积的 96.6%。近区域范围内岩浆岩主要有火山岩和侵入岩，区域范围内无第四纪火山活动。

区域断裂构造以北东向居主导地位，东西向和北西向次之。场址附近区域处于萧山—球川和江山—绍兴二大东西向断裂带之间，萧山—球川断裂带的北东延伸部门在本区西部的海宁一带通过：东西向断裂带在本区南部及北部外围通过，南侧为昌化—普陀断裂，北侧为湖州—嘉善断裂。本区域处于上述断裂所围的稳定地块，断裂构造不甚发育。除萧山—球川断裂带外其余均为低级别的断裂、劈理构造。萧山—球川断裂近区域绝大部分被第四系所覆盖，仅在海宁市东北侧大横山见到露头。

本项目场址附近范围内不存在区域性大断裂，线性地貌不发育，无第四纪火山活动，处于相对稳定的构造环境，周围没有发震断裂构造及地震诱因，也没有滑坡、崩塌、液化、泥石流等地震稳定性灾害产生的条件。

2.1.3 水文、气象

（1）水文

海盐县河流水量丰富，多年实测日平均水位 2.97 米，常水位时河湖总蓄积量约有 0.51 亿立方米，平均年径流量为 2.03 亿立方米。县境南部和东部濒临钱塘江和杭州湾。境内河道纵横，总长 1860.7 公里，骨干河流有盐平塘河、盐嘉塘河、长山河、白洋河等。

本项目所在产业园位于杭州湾海盐县的秦山—杨柳山一带，杭州湾在地理位置上属钱塘江入海河口区口外海滨部分，该区域海水起主导作用，江流作用微弱。杭州湾为世界上著名的强潮汐河口，同时由于涨落潮流量与流速大，具有良好的稀释和扩散条件。

（2）气象

海盐县地处北亚热带南缘，是典型的东亚季风气候。历史最低温度-3.7℃，最高温度40.8℃，全年平均气温15.9℃，年平均高温累计日数明显低于长江中下游同纬度城市。年平均雨量1189.7毫米，全年无霜期约为240天，全年日照时数平均为1919.7小时，年平均风速 2.6m/s，各月平均风速比较均匀，秋冬季节

的风速略小，夏季略大，8月台风的影响稍频繁，平均风速3.1 m/s，居各月首位。当地常年静风频率约3.2%，海盐盛行风向为偏东南风。

2.1.4 动植物资源和土壤

海盐县地处北亚热带常绿落叶混交林地带的南部，植物种类较丰富。按植被类型划分，有阔叶林和针阔叶混交林、针叶林、灌木草本植被和水生植被四种，人工植被有作物植被和防护林植被两种。植物群体主要以人工栽培的植物为主。树木有常绿、落叶乔灌木、针叶、阔叶混交林等共50科133种。全县森林面积68.49km^2，森林覆盖率约为11.7%。

海盐县境域内共有哺乳动物5科9属10种，两栖类和爬行类动物8科10属10种，鸟类14目45科154种，昆虫203种，周丛藻类69种，底栖动物71种，鱼类38种，潮间带底栖动物属21种，浮游动物101种。野生动物主要有泽陆蛙、黑斑侧褶蛙、饰纹姬蛙、中华蟾蜍、王锦蛇等。项目附近地区无珍稀濒危物种，仅有鸟类、鼠类、蛇类、蛙类及昆虫等小型动物。

全县土壤共划分4个土类8个亚类14和土属42个土种。其中黄斑田土属共有面积189976.05亩，占水稻田总面积的45.8%。主要分布在本县水网地区，系水网地区的当家土属之一。成土母质为河海相沉积物，质地均细，主要由粉砂和黏粒组成，以重壤为主。粉泥田土属全县共有面积46489.35亩，占水稻田总面积11.2%，主要分布在沿海稻棉轮作的海塘、西塘、武原、秦山等地。

2.2 社会经济状况

截至2023年底，全县户籍人口约38万人，海盐县辖4街道、5镇，武原街道、西塘桥街道、望海街道、秦山街道、沈荡镇、百步镇、于城镇、澉浦镇、通元镇。秦山街道区域总面积58.67平方公里,辖5个村、7个社区，常住人口3.43万。

截至 2023 年底，海盐县生产总值 668.31 亿元，比上年增长 6.0%。其中，第一产业增加值 20.10 亿元，比上年增长 4.8%；第二产业增加值 384.88 亿元，比上年增长 5.3%；第三产业增加值 263.33 亿元，比上年增长 7.0%。三次产业构成为 3.0∶57.6∶39.4。按户籍人口计算，人均生产总值为 174164 元。2023 年，

秦山街道实现地区生产总值 40 亿元，一般公共预算收入 2.7 亿元，增长 11%。

2.3 环境质量和辐射现状

为了解本项目所在地域环境质量现状，为新建项目环境现状评价提供基础数据，砹尔法公司委托苏州热工研究院有限公司环境检测中心（CMA 证书编号 231012341115）于 2023 年 7 月、9 月和 2024 年 8 月先后对项目区域及周围环境进行了环境质量现状检测，包括辐射环境现状监测和声环境现状监测，其中在 2023 年检测期间标准化厂房一期工程为空地，正在场地平整，2024 年检测期间标准化厂房一期工程已完成主体框架土建，室内均未装修，周围杨柳山社区居民大部分已拆迁。

（1）监测因子

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》（HJ10.1-2016）和《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）等环境监测要求，以及结合本项目所在环境及应用核素衰变特性等特点，本次监测包含拟建厂址及周围环境的 γ 辐射空气吸收剂量率、中子周围剂量当量率、空气中 γ 能谱、空气中碘-131、空气中总 α、空气中总 β、水中 γ 能谱、水中碘-131、水中总 α、水中总 β、土壤中 γ 能谱、土壤中总 α、土壤中总 β、生物中 γ 能谱以及环境噪声。

（2）监测方法

检测单位依据以下监测标准规定的监测和分析方法开展监测工作：

— 《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

— 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

— 《辐射防护仪器中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T14318-2019）；

— 《声环境质量标准》（GB 3096-2008）；

— 《水质 总 α 放射性的测定 厚源法》（HJ898-2017）；

— 《水质 总 β 放射性的测定 厚源法》（HJ899-2017）；

— 《环境空气 气溶胶中 γ 放射性核素的测定 滤膜压片 γ 能谱法》（HJ1149-2020）；

— 《空气中放射性核素的γ能谱分析方法》（WS/T 184-2017）；

— 《高纯锗γ能谱分析通用方法》（GB/T 11713-2015）；

— 《空气中碘-131 的取样与测定》（GB/T14584-1993）；

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

— 《水、牛奶、植物、动物甲状腺中碘-131 的分析方法》（HJ841-2017）；

— 《土壤中放射性核素测量-土壤-第六部分：总 α 和总 β 活度测量》ISO18589-2019。

（3）监测布点原则

根据《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）等标准要求及结合本项目实际建设内容，本项目监测布点原则如下：

2023 年开展环境 γ 辐射空气吸收剂量率和中子剂量率监测，监测点位主要布设在项目拟建厂房空地及产业园一期周围，2024 年在项目拟建厂房框架内及周围区域开展环境γ辐射空气吸收剂量率和中子剂量率监测，各测点位为单次测量，环境γ辐射空气吸收剂量率先后共布设 44 个检测点位，中子检测点位与部分环境γ辐射空气吸收剂量率同点布设，兼顾厂房内拟设置为辐射工作场所控制区、监督区和公众居留场所。

考虑产业园标准化厂房的场地建成后项目所在厂房四周地面将做硬化以及环境监测点位可复现性等原因，本项目在一期厂房边界四周环境土壤，以及周围代表性的生物样品取样，另外在一期北侧入口处及东侧边界外布设 2 个点进行气溶胶采样，分别开展土壤中γ核素、土壤中总 α、土壤中总 β、空气中总 α、总 β、空气中γ核素、空气中碘-131、土壤中γ核素、生物中γ核素项目实验室分析测量。

根据项目周围水体分布情况，在项目西北侧地表水体长丰河中进行地表水和底泥取样，以及北侧杨柳山社区内的地下水采样分析测量，检测水中总 α、总 β、水中γ核素、水中碘。

本项目评价范围内无声环境保护目标，检测单位对厂房边界四周的声环境质量现状进行了检测，检测频次为昼夜各 1 次。

（4）监测仪器

本次环境现状检测采用的仪器及设备主要技术参数见表 2-1。所有检测设备的性能指标均满足环境辐射本底水平检测要求。

表 2-1　环境现状监测及检测设备主要性能指标一览表

检测项目	检测设备名称（型号）	检测设备性能指标	设备检定有效期
环境γ辐射空气吸收剂量率	环境 X-γ 剂量率仪（BG9680）	能量响应范围：50keV~3.0MeV，剂量率测量范围：0.01μSv/h~40mSv/h	2022.10.25~2023.10.24
环境γ辐射空气吸收剂量率	环境 X-γ 剂量率仪（6150AD）	能量响应范围：20keV~7.0MeV，剂量率测量范围：5nSv/h~99.9μSv/h	2024.05.29~2025.05.28
中子周围剂量当量率	中子剂量当量率仪(FH40G/FHT762）	能量响应范围：25meV~5.0GeV，剂量率测量范围：10nSv/h~100mSv/h	2023.6.27~2024.6.26 2024.6.13~2025.6.12
土壤中γ核素	N 型高纯锗γ谱仪（GMX50P4-83)	能量范围 3.0keV~10MeV；本底计数率 2.9cps；能量分辨率 2.0keV，相对效率 50.0%	2022.8.17~2024.8.16
空气中γ核素 水中γ核素	高纯锗γ谱仪（GEM50P4-83)	能量范围 10keV~10MeV；本底计数率 2.9cps；能量分辨率 1.9keV，相对效率 50.00%	2022.8.17~2024.8.16
水中总α 水中总β 土壤中总α 土壤中总β 空气中总α 空气中总α	低本底 α、β 测量仪(MPC9604)	本底计数率：α<0.1 CPM，β<0.9CPM；探测效率：α>40%(Am-241)，β>55%(Sr-90/Y-90)	2022.1.10~2024.1.9
环境噪声	噪声仪 AWA6228+声校准仪 AWA6221A	声压级测量范围：低量程：（20～132）dBA，高量程：（30～142）dBA	2024.1.19~2025.1.18

（5）质量保证

检测单位均已通过 CMA 计量认证（CMA 证书编号 231012341115），具备相应的检测资质和检测能力。

检测单位制定有质量管理体系文件，所有检测活动均按照质量体系文件要求进行，实施检测全过程质量控制。

检测采用的监测设备均通过计量部门检定合格，并在检定有效期内。

所有检测人员均通过专业的技术培训和考核，并取得检测人员上岗资格。

检测报告经过编制、审核、批准三级审核。

2.3.1 贯穿辐射环境现状

2023 年 7 月和 2024 年 8 月对项目拟建区域及周围开展环境 γ 辐射空气吸收剂量率检测，检测点位见图 2-1~图 2-6，监测结果见表 2-2，检测报告见附件 6。

检测结果表明，本项目拟建区域室外空地及周围测点的环境 γ 辐射空气吸收剂量率范围为 62~91（nGy/h），2#厂房框架建筑室内的环境 γ 辐射空气吸收剂量率范围为 183~196（nGy/h），产业园一期其他厂房框架建筑室内的环境 γ 辐射空气吸收剂量率范围为 158~180（nGy/h），评价范围其他企业门口室外及环保目标居民点处的环境 γ 辐射空气吸收剂量率范围为 74~96（nGy/h）。参考《中国天然放射性水平》（1995）并结合《2022 年全国辐射环境质量报告》和《2023 年全国辐射环境质量报告》，本项目周围环境辐射水平处于浙江省环境 γ 辐射剂量率连续自动监测年均值正常波动范围，项目评价范围内环境 γ 辐射剂量率未见异常。

表 2-2　项目拟建区域及周围区域 γ 辐射剂量率现状检测结果

检测点序号	检测点位置	环境 γ 辐射空气吸收剂量率（μGy/h）	备注
2023 年检测点位			
1	厂房拟建区域西侧（北）	0.088	测点位于室外
2	厂房拟建区域西侧（中）	0.087	
3	厂房拟建区域西侧（南）	0.089	
4	厂房拟建区域中部（北）	0.087	

5	厂房拟建区域中部（中）	0.086	
6	厂房拟建区域中部（南）	0.089	
7	厂房拟建区域东侧（北）	0.089	
8	厂房拟建区域东侧（中）	0.088	
9	厂房拟建区域东侧（南）	0.089	
10	同位素产业园一期西侧边界	0.091	
11	同位素产业园一期北侧边界	0.088	
12	同位素产业园一期东侧边界	0.084	
13	同位素产业园一期南侧边界	0.087	
14	同位素产业园一期东北侧最近民房（现已拆）	0.062	
2024 年检测点位			
1	同位素产业园 1#厂房西南侧	0.163	测点位于框架建筑室内
2	同位素产业园 6#厂房西南侧	0.158	
3	同位素产业园 5#厂房西侧	0.180	
4	同位素产业园 4#厂房西北侧	0.180	
5	同位素产业园 3#厂房西北侧	0.182	
6	中核秦山同位素有限公司西大门	0.096	测点位于室外
7	产业园东北侧拟建企业厂区门口	0.078	
8	产业园东南侧拟建企业厂区门口	0.074	
9	产业园西北侧杨柳山社区民房 1	0.074	
10	产业园西北侧杨柳山社区民房 2	0.076	
11	本项目厂房一楼区域	0.194	

12	本项目厂房一楼区域	0.188	测点位于框架建筑物室内
13	本项目厂房一楼区域	0.195	
14	本项目厂房一楼区域	0.194	
15	本项目厂房一楼区域	0.188	
16	本项目厂房一楼区域	0.190	
17	本项目厂房一楼区域	0.193	
18	本项目厂房二楼区域	0.199	
19	本项目厂房二楼区域	0.196	
20	本项目厂房二楼区域	0.192	
21	本项目厂房二楼区域	0.197	
22	本项目厂房二楼区域	0.192	
23	本项目厂房三楼区域	0.190	
24	本项目厂房三楼区域	0.185	
25	本项目厂房三楼区域	0.184	
26	本项目厂房三楼区域	0.186	
27	本项目厂房四楼区域	0.187	
28	本项目厂房四楼区域	0.186	
29	本项目厂房四楼区域	0.185	
30	本项目厂房四楼区域	0.183	

注：1）建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子，楼房取0.8，平房取0.9，原野、道路取1；

2）单位换算：本项目使用的环境X-γ剂量率仪读数为周围剂量当量率nSv/h，该设备是在^{137}Cs辐射场中进行的检定，根据《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），空气比释动能和周围剂量当量的换算系数为1.20Sv/Gy。检测结果已扣除宇宙射线响应值，2023年采用的GB9550设备和2024年采用的6150AD设备宇宙射线响应值分别为：16.7 nGy/h和30nGy/h。

2.3.2 中子辐射环境现状

2023年9月和2024年8月对项目拟建区域及周围开展中子周围剂量当量率检测，检测点位见图2-1~图2-6，监测结果见表2-3，检测报告见附件6。监测结果表明，项目拟建区域及周围环境中子周围剂量当量率均小于0.010μSv/h（仪器

探测下限），属正常环境本底水平。

表 2-3　项目拟建区域及周围中子剂量率现状检测结果

检测点序号	检测点位置	周围剂量当量率(μSv/h)
2023 年检测点位		
1	项目拟建区域	＜0.010
2	同位素产业园西侧边界	＜0.010
3	同位素产业园北侧边界	＜0.010
4	同位素产业园东侧边界	＜0.010
5	同位素产业园南侧边界	＜0.010
6	同位素产业园一期东北侧最近民房（现已拆）	＜0.010
2024 年检测点位		
1	同位素产业园 1#厂房西南侧	<0.010
2	同位素产业园 6#厂房西南侧	<0.010
3	同位素产业园 5#厂房西侧	<0.010
4	同位素产业园 4#厂房西北侧	<0.010
5	同位素产业园 3#厂房西北侧	<0.010
6	中核秦山同位素有限公司西大门	<0.010
7	产业园东北侧拟建企业厂区门口	<0.010
8	产业园东南侧拟建企业厂区门口	<0.010
9	产业园西北侧杨柳山社区民房 1	<0.010
10	产业园西北侧杨柳山社区民房 2	<0.010
11	本项目厂房一楼区域	<0.010
12	本项目厂房一楼区域	<0.010
13	本项目厂房一楼区域	<0.010
14	本项目厂房一楼区域	<0.010

15	本项目厂房一楼区域	<0.010
16	本项目厂房一楼区域	<0.010
17	本项目厂房一楼区域	<0.010
18	本项目厂房二楼区域	<0.010
19	本项目厂房二楼区域	<0.010
20	本项目厂房二楼区域	<0.010
21	本项目厂房三楼区域	<0.010
22	本项目厂房三楼区域	<0.010
23	本项目厂房四楼区域	<0.010
24	本项目厂房四楼区域	<0.010

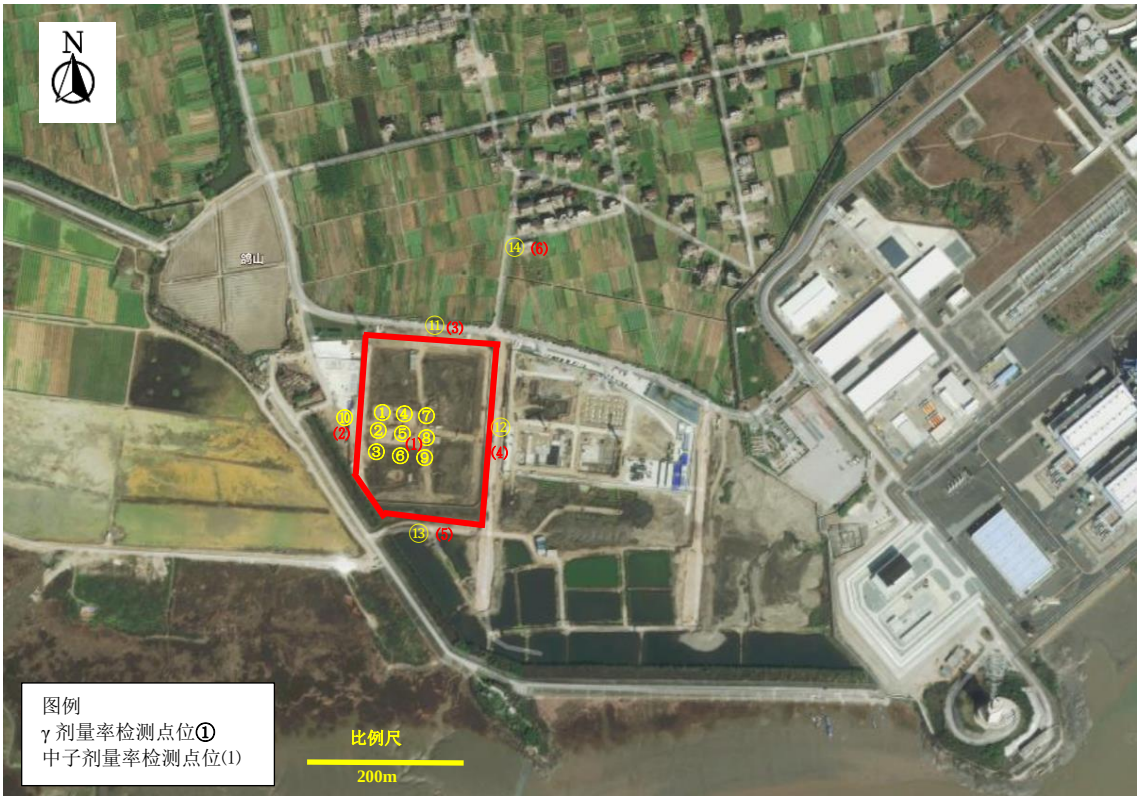


图 2-1　项目拟建区域及周围环境 γ 空气吸收剂量率和中子剂量率检测点位布设示意图（2023 年）

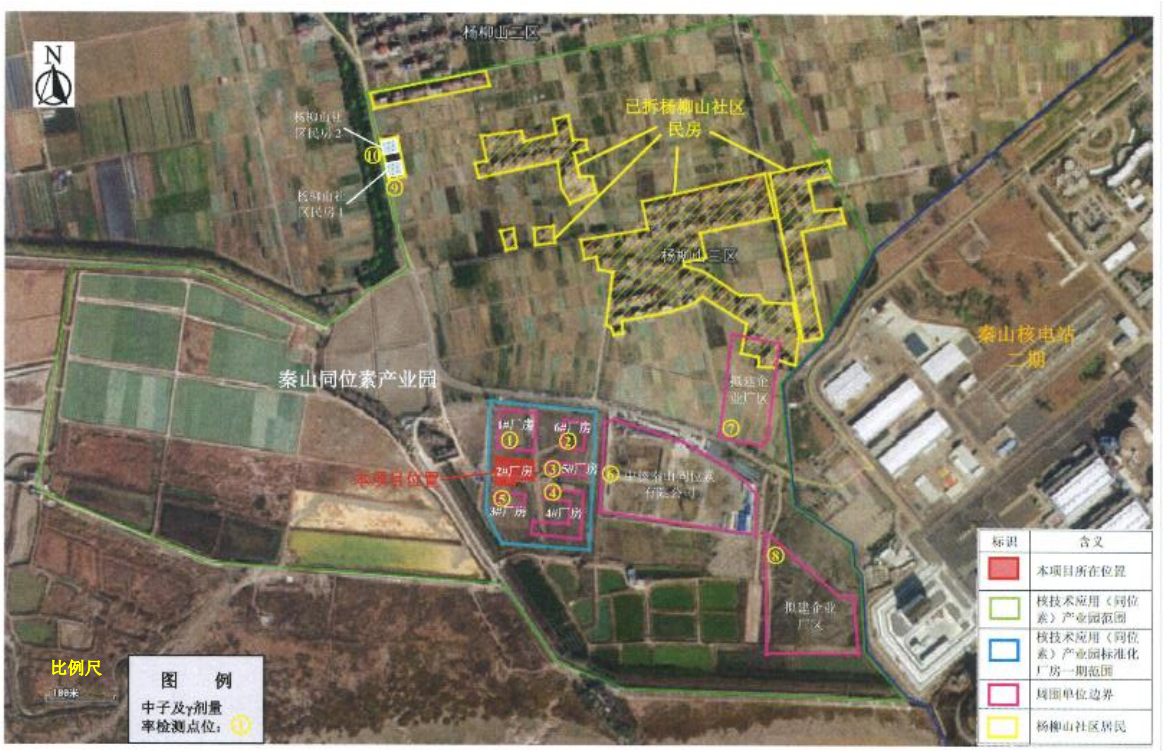


图 2-2　项目拟建区域及周围环境 γ 空气吸收剂量率和中子剂量率检测点位布设示意图（2024 年）

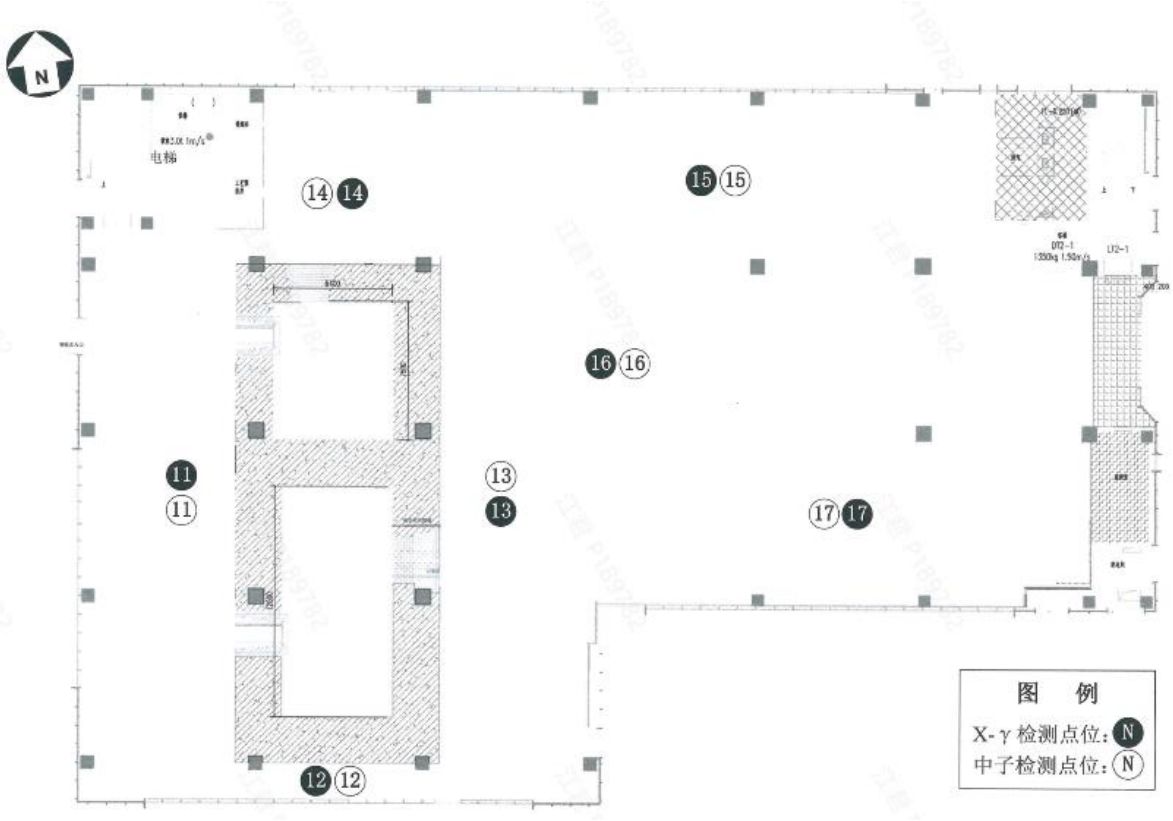


图 2-3　2#厂房一层环境 γ 空气吸收剂量率和中子剂量率检测点位布设示意图

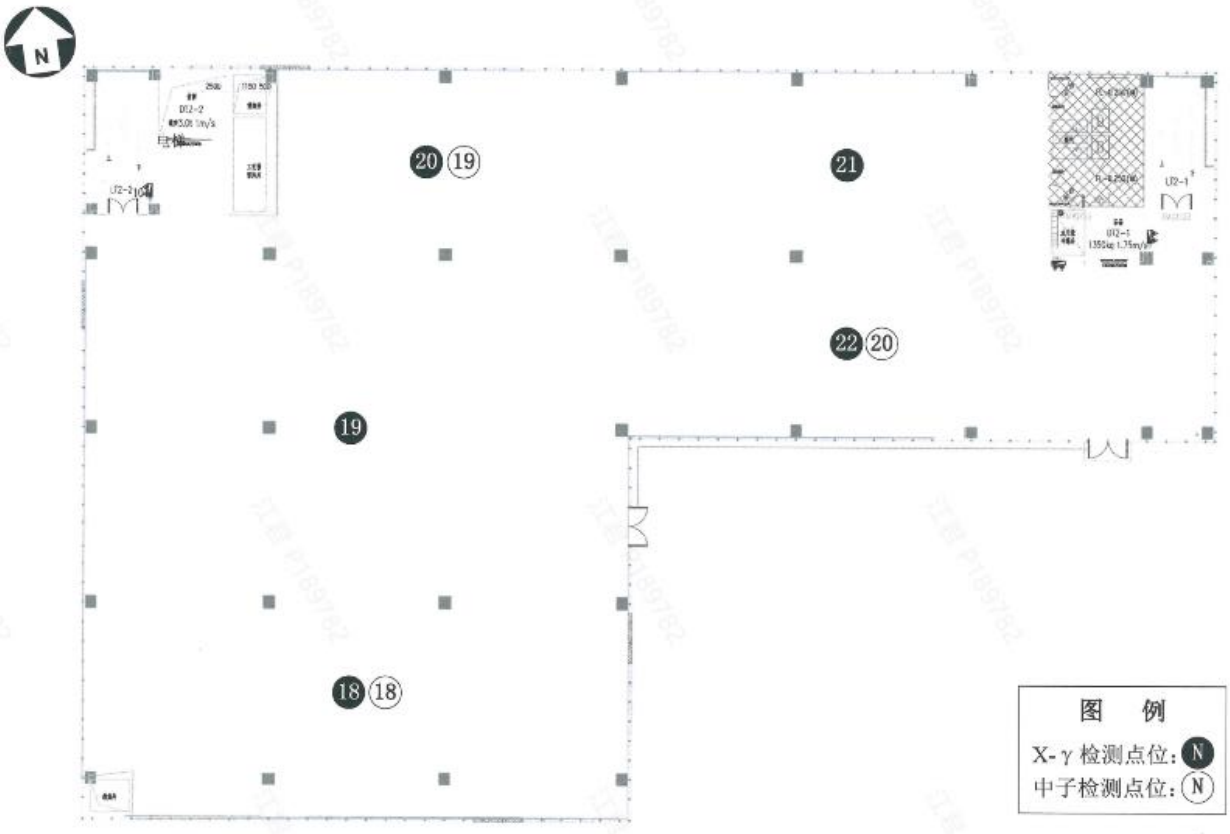


图 2-4　2#厂房二层环境 γ 空气吸收剂量率和中子剂量率检测点位布设示意图

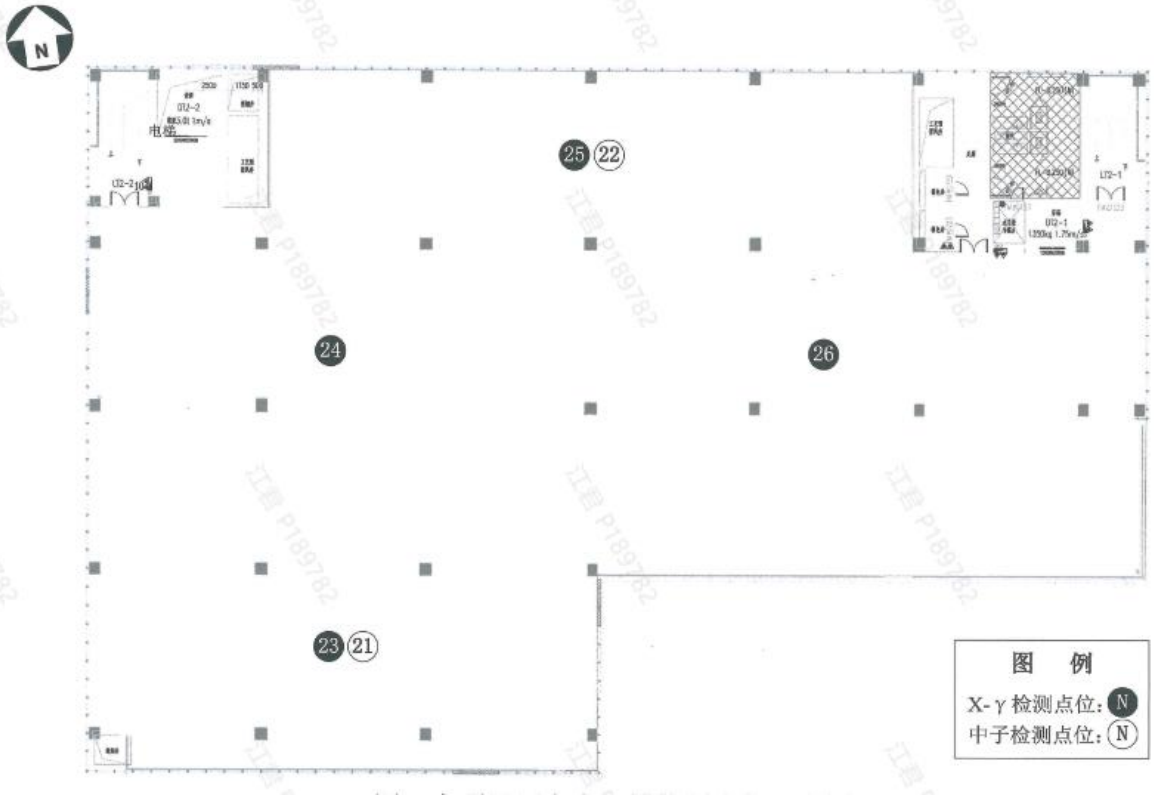


图 2-5　2#厂房三层环境γ空气吸收剂量率和中子剂量率检测点位布设示意图

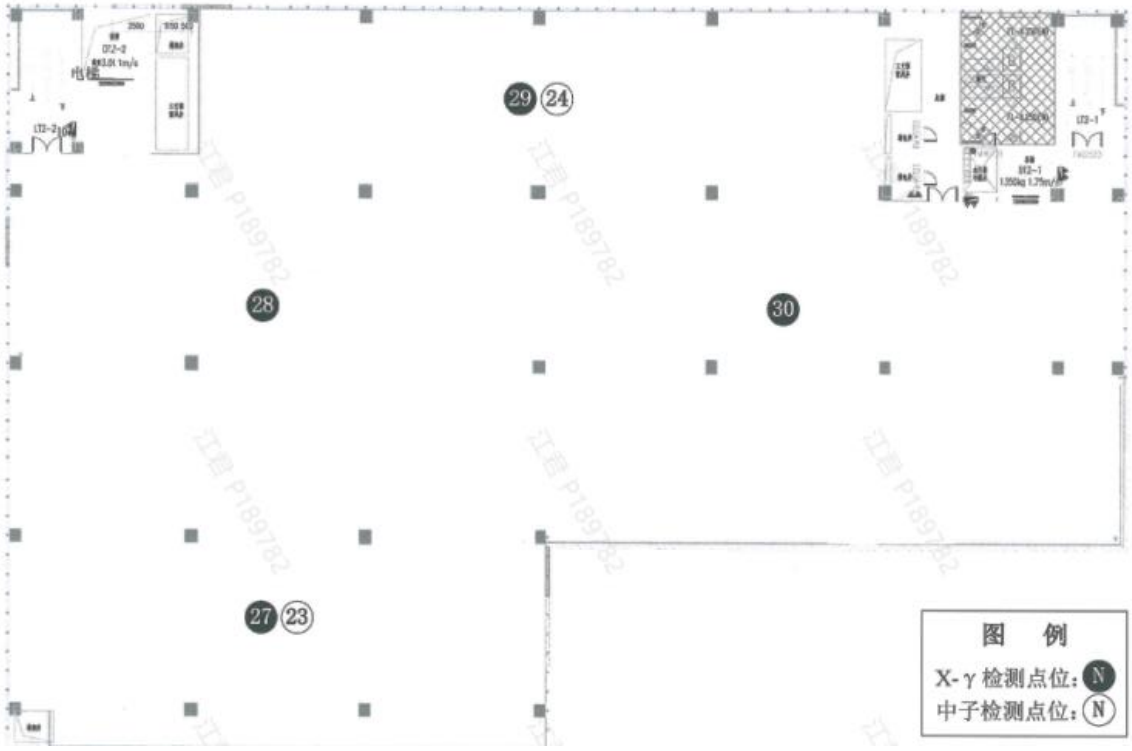


图 2-6　2#厂房四层环境γ空气吸收剂量率和中子剂量率检测点位布设示意图

2.3.3 空气、土壤和水中等放射性核素环境现状

（1）空气中放射性水平现状

2023 年 7 月对项目拟建区域及周围开展空气中总 α、总 β、空气中 γ 核素、空气中碘进行检测，检测测量结果见表 2-4~表 2-7，取样点位布设见图 2-7，检测报告见附件 6。

表 2-4　空气中总 α 检测结果

序号	样品名称	样品比活度(mBq/m^3)
1	一期厂房北侧大门口气溶胶	0.280±0.025
2	一期厂房东侧气溶胶	0.163±0.014

表 2-5　空气中总 β 检测结果

序号	样品名称	样品比活度(mBq/m^3)
1	一期厂房北侧大门口气溶胶	0.948±0.016
2	一期厂房东侧气溶胶	0.799±0.011

备注：±号后为测量结果两倍标准偏差。

表 2-6 空气中 γ 能谱检测结果

序号	样品名称	核素	活度浓度(mBq/m^3)	核素	活度浓度(mBq/m^3)
1	一期厂房北侧大门口气溶胶	Ac-225	＜1.7	Pb-212	5.01±0.08
		Co-57	＜0.020	Pb-203	＜0.039
		Tc-99m	＜0.021	I-131	＜0.032
		I-123	＜0.023	I-124	＜0.28
		Cu-67	＜0.049	Mo-99	＜0.24
		Ra-226	＜0.67	Zr-89	＜0.04
		Lu-177	＜0.20	Cu-64	＜7.0
		Th-228	＜9.0	/	
2		Ac-225	＜1.4	Pb-212	1.01±0.04

序号	样品名称	核素	活度浓度(mBq/m^3)	核素	活度浓度(mBq/m^3)
	一期厂房东侧气溶胶	Co-57	＜0.017	Pb-203	＜0.027
		Tc-99m	＜0.017	I-131	＜0.026
		I-123	＜0.019	I-124	＜0.24
		Cu-67	＜0.042	Mo-99	＜0.22
		Ra-226	＜0.58	Zr-89	＜0.036
		Lu-177	＜0.17	Cu-64	＜6.8
		Th-228	＜7.3	/	

表2-7　空气中碘-131检测结果

序号	样品名称	样品比活度(mBq/m^3)
1	一期厂房北侧大门口空气碘	<0.349
2	一期厂房东侧空气碘	<0.360

备注：＜号后的数值为最小可探测活度浓度（MDC）。

由表 2-4 可见，监测期间项目拟建区域周围气溶胶中总 α 活度浓度范围为 0.163~0.280（mBq/m^3），由表 2-5 可见，气溶胶中总 β 活度浓度范围为 0.799~0.948（mBq/m^3），由表 2-6 可见，项目拟建区域周围空气中 Pb-212 核素活度浓度在 1.01~5.01 （mBq/m^3），表 2-6 中其余核素活度浓度及表 2-7 中空气中碘的活度浓度均低于设备检测下限。

（2）土壤和底泥中放射性核素现状

2023 年 7 月对项目拟建区域周围开展土壤和底泥中总 α、总 β 和 γ 核素检测，由表 2-8 和表 2-9 可见，项目周围土壤和地表水长丰河底泥的总 α 含量为 0.451~0.655（Bq/g），总 β 含量为 0.755Bq/g~0.957Bq/g。由表 2-10 可见，土壤和底泥中 Pb-212 活度浓度在 39.9~53.8（Bq/g），其余放射性核素活度浓度均低于仪器探测下限。具体检测结果见表 2-8~表 2-10，采样点位布设见图 2-7，检测报告见附件 6。

表2-8　土壤中总α检测结果

序号	样品名称	样品比活度(Bq/g)
1	西北侧长丰河底泥	0.655±0.085
2	一期厂房西侧边界土壤	0.451±0.070
3	一期厂房北侧边界土壤	0.530±0.074
4	一期厂房东侧边界土壤	0.454±0.070
5	一期厂房南侧边界土壤	0.495±0.076
6	一期厂房东北侧民房土壤	0.640±0.081

表2-9　土壤中总β检测结果

序号	样品名称	样品比活度(Bq/g)
1	西北侧长丰河底泥	0.957±0.037
2	一期厂房西侧边界土壤	0.761±0.033
3	一期厂房北侧边界土壤	0.801±0.033
4	一期厂房东侧边界土壤	0.812±0.033
5	一期厂房南侧边界土壤	0.755±0.033
6	一期厂房东北侧民房土壤	0.838±0.034

备注：±号后为测量结果两倍标准偏差。

表2-10　土壤和底泥中γ能谱检测结果

序号	样品名称	核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)
1	西北侧长丰河底泥	Ac-225	＜26	Pb-212	53.8±1.9
		Co-57	＜0.30	Pb-203	＜0.57
		Tc-99m	＜0.32	I-131	＜0.50
		I-123	＜0.38	I-124	＜5.0
		Cu-67	＜0.96	Mo-99	＜4.0
		Ra-226	＜13	Zr-89	＜1.3
		Lu-177	＜4.2	Cu-64	＜116

序号	样品名称	核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)
		Th-228	＜168	/	
2	一期厂房西侧边界土壤	Ac-225	＜23	Pb-212	40.2±0.9
		Co-57	＜0.28	Pb-203	＜0.52
		Tc-99m	＜0.29	I-131	＜0.46
		I-123	＜0.35	I-124	＜4.4
		Cu-67	＜0.87	Mo-99	＜3.8
		Ra-226	＜11	Zr-89	＜1.2
		Lu-177	＜3.7	Cu-64	＜108
		Th-228	＜154	/	
3	一期厂房北侧边界土壤	Ac-225	＜26	Pb-212	51.5±1.1
		Co-57	＜0.30	Pb-203	＜0.58
		Tc-99m	＜0.32	I-131	＜0.49
		I-123	＜0.38	I-124	＜4.9
		Cu-67	＜0.97	Mo-99	＜4.0
		Ra-226	＜13	Zr-89	＜1.4
		Lu-177	＜4.2	Cu-64	＜120
		Th-228	＜170	/	
4	一期厂房东侧边界土壤	Ac-225	＜24	Pb-212	39.9±0.9
		Co-57	＜0.27	Pb-203	＜0.52
		Tc-99m	＜0.29	I-131	＜0.45
		I-123	＜0.34	I-124	＜4.3
		Cu-67	＜0.88	Mo-99	＜3.6
		Ra-226	＜12	Zr-89	＜1.2
		Lu-177	＜3.8	Cu-64	＜108

序号	样品名称	核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)
		Th-228	＜152	/	
5	一期厂房南侧边界土壤	Ac-225	＜24	Pb-212	40.6±0.9
		Co-57	＜0.28	Pb-203	＜0.53
		Tc-99m	＜0.29	I-131	＜0.46
		I-123	＜0.35	I-124	＜4.5
		Cu-67	＜0.89	Mo-99	＜3.7
		Ra-226	＜12	Zr-89	＜1.2
		Lu-177	＜3.9	Cu-64	＜112
		Th-228	＜156	/	
6	一期厂房边界外东北侧民房土壤	Ac-225	＜24	Pb-212	41.7±1.0
		Co-57	＜0.28	Pb-203	＜0.54
		Tc-99m	＜0.30	I-131	＜0.46
		I-123	＜0.35	I-124	＜4.6
		Cu-67	＜0.91	Mo-99	＜3.7
		Ra-226	＜12	Zr-89	＜1.2
		Lu-177	＜3.9	Cu-64	＜109
		Th-228	＜157	/	

备注：东北侧的民房目前已拆除。＜号后的数值为最小可探测活度浓度（MDC）。

（3）水中放射性核素现状

2023 年 8 月项目所在区域西北侧地表水长丰河水体以及附近居民地下水中的总 α、总 β、水中 γ 核素和水中碘测量进行检测，检测结果见表 2-11~表 2-13，取样点位布设见图 2-7，检测报告见附件 6。

表 2-11　水中总 α、总 β 检测结果

序号	样品名称	总 α 活度浓度(Bq/L)	总 β 活度浓度(Bq/L)
1	西北侧长丰河地表水	0.028±0.017	0.322±0.012
2	东北侧民房地下水	0.073±0.066	0.767±0.041

备注：±号后为测量结果两倍标准偏差。

表 2-12　水中 γ 核素检测结果

序号	样品名称	核素	活度浓度(mBg/L)	核素	活度浓度(mBg/L)
1	西北侧长丰河地表水	Ac-225	＜250	Pb-212	＜3.8
		Co-57	＜2.4	Pb-203	＜1.9
		Tc-99m	＜2.1	I-131	＜1.9
		I-123	＜2.1	I-124	＜15
		Cu-67	＜4.2	Mo-99	＜14
		Ra-226	＜57	Zr-89	＜2.4
		Lu-177	＜15	Cu-64	＜372
		Th-228	＜618	/	
2	东北侧民房地下水	Ac-225	＜205	Pb-212	＜4.8
		Co-57	＜2.3	Pb-203	＜1.9
		Tc-99m	＜2.2	I-131	＜1.7
		I-123	＜2.2	I-124	＜11
		Cu-67	＜4.3	Mo-99	＜15
		Ra-226	＜59	Zr-89	＜2.5
		Lu-177	＜14	Cu-64	＜296
		Th-228	＜685	/	

表2-13　水中碘-131检测结果

序号	样品名称	样品比活度(mBq/L)
1	西北侧长丰河地表水	<2.8
2	东北侧民房地下水	<2.8

备注：东北侧的民房目前已拆除。＜号后的数值为最小可探测活度浓度（MDC）。

由表2-11可见，西北侧长丰河地表水中总α、总β活度浓度分别为0.028Bq/L、0.322Bq/L，北侧居民处地下水的总α、总β活度浓度分别为0.073Bq/L、0.767Bq/L，对照《2022年全国辐射环境质量报告》中全国主要江河流域的水中放射性监测结果（总α：0.008~0.25Bq/L、总β：0.028～0.40Bq/L），地下水中放射性监测结果（总α：0.010~0.14Bq/L、总β：0.020～0.28Bq/L），地表水体和地下水体总α、总β的活度浓度未见明显异常。

由表2-12和表2-13可见，西北侧长丰河地表水和东北侧居民地下水中的γ核素活度浓度及碘-131活度浓度均低于仪器探测下限。

（4）生物中放射性核素现状

厂房一期工程北侧地块生物样品地蒲中的放射性核素活度浓度结果见表2-14。经检测，放射性核素活度浓度均低于仪器探测下限。取样点位布设见图2-7，检测报告见附件6。

表2-14　生物样品中γ核素检测结果

序号	样品名称	核素	活度浓度(Bq/kg鲜)	核素	活度浓度(Bq/kg鲜)
1	北侧地块生物—地蒲	Ac-225	＜205	Pb-212	＜8.3
		Co-57	＜2.4	Pb-203	＜3.8
		Tc-99m	＜2.4	I-131	＜4.0
		I-123	＜2.8	I-124	＜47
		Cu-67	＜5.6	Mo-99	＜40
		Ra-226	＜76	Zr-89	＜7.3
		Lu-177	＜25	Cu-64	＜1424
		Th-228	＜1167	/	

备注：＜号后的数值为最小可探测活度浓度（MDC）。



图 2-7 环境空气、土壤、底泥、水体和生物样现场采样点位布设示意图

2.3.3 声环境质量现状

2024 年 8 月对项目厂房四周声环境质量现状进行检测，检测结果见表 2-15，检测点位布设见图 2-8，检测报告见附件 6。

由表 2-15 可见，项目厂房四周声环境昼间噪声范围为（54~59）dB（A），夜间噪声范围为（44~47）dB（A）。项目厂址所在区域声环境功能区为《声环境质量标准》（GB 3096-2008）3 类声环境功能区，对照标准要求，本项目周围声环境质量满足标准中 3 类声环境功能区要求，即昼间噪声限值 65dB（A），夜间噪声限值 55dB（A）。

表 2-15 项目周围声环境现状检测结果

检测点序号	检测点位置	昼间噪声值 dB(A)	夜间噪声值 dB(A)	执行标准
1	厂房西侧厂界	59	47	GB 3096-2008 3 类声环境功能区
2	厂房北侧厂界	54	45	
3	厂房东侧厂界	54	46	
4	厂房南侧厂界	57	44	

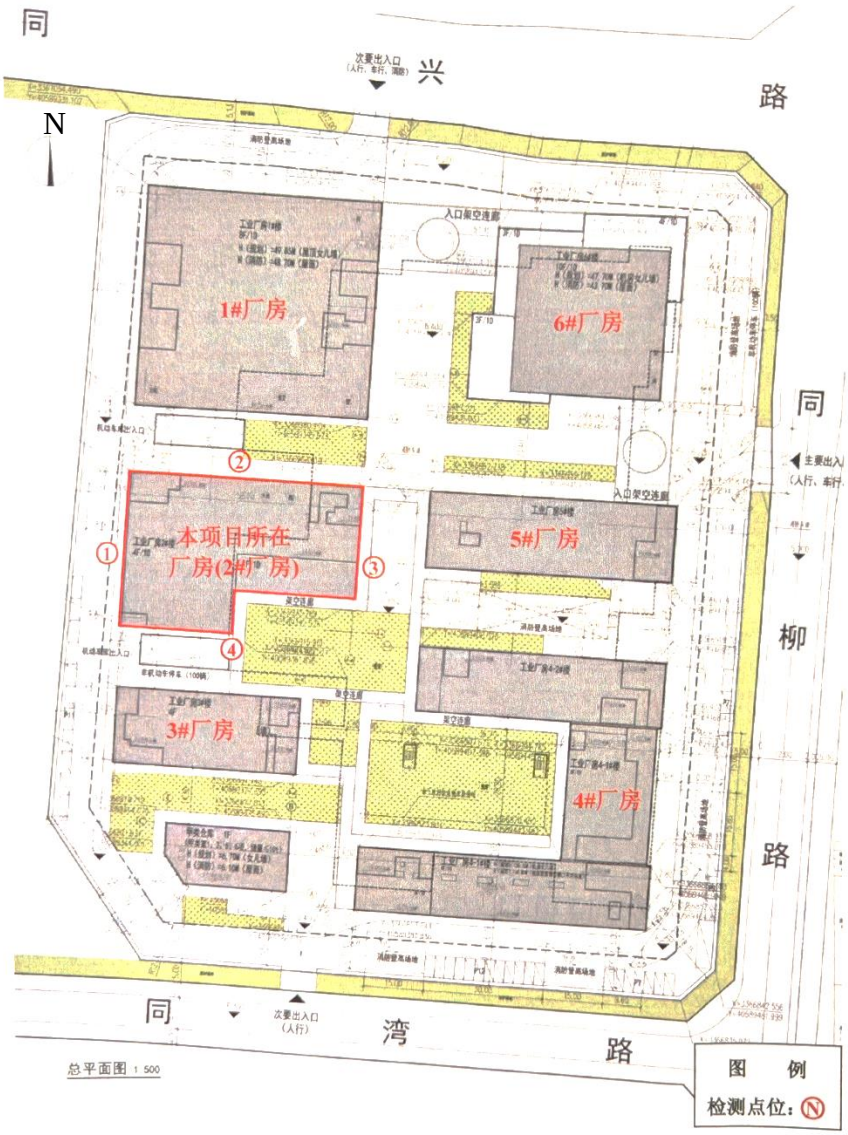


图 2-8　噪声监测点位布设示意图

2.3.4 环境空气质量现状

根据海盐县环境空气常规监测站 2023 年基本污染物的全年监测数据，见表 2-16 所示。海盐县 2023 年参与环境空气质量评价的六项指标 SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO、O_3 的年评价指标均可以达到环境空气质量二类功能区要求，全部符合《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）二级浓度限值。因此，海盐县 2023 年属于环境空气质量达标区。

表 2-16　海盐县环境空气质量状况表（2023 年）

污染物	年评价指标	评价标准（μg/m³）	现状浓度（μg/m³）	占标率（%）	达标情况
SO_2	年平均质量浓度	60	6	10	达标
	98%位数日平均质量浓度	150	10	6.7	
NO_2	年平均质量浓度	40	24	60	达标
	98%位数日平均质量浓度	80	64	80	
PM_{10}	年平均质量浓度	70	46	65.7	达标
	98%位数日平均质量浓度	150	104	69.3	
$PM_{2.5}$	年平均质量浓度	35	28	80	达标
	98%位数日平均质量浓度	75	61	81.3	
CO	98%位数日平均质量浓度	4000	800	20	达标
O_3	98%位数日平均质量浓度	160	148	92.5	达标

为评价本项目的特征污染物因子氯化氢和非甲烷总烃，委托资质单位嘉兴中一检测研究院有限公司（CMA：1811031111547）于 2025 年 2 月 8 日~14 日开展补充监测，监测点位分别位于 2#厂房项目所在地、杨柳山社区居民 1，监测布点图见图 2-9。具体监测结果见表 2-17 所示，监测报告见附件 6。

表 2-17 项目所在区域环境空气质量补充检测结果

点位	检测因子	最大检测值 mg/m³	标准值 mg/m³	达标情况
2#厂房项目所在地	氯化氢	0.042	0.050	是
	非甲烷总烃	1.33	2	是
杨柳山社区民房 1	氯化氢	0.043	0.050	是
	非甲烷总烃	1.24	2	是



图 2-9 项目拟建区域环境空气质量补充检测结果

2.3.5 地表水环境质量现状

本项目附近河道属于长澉河支流。为了解本项目所在地附近地表水水质现状，本报告引用 2023 年 1 月~12 月嘉兴市生态环境局海盐分局地表水水质监测数据，监测断面为长山河大桥。地表水环境质量现状监测结果见下表 2-18 所示。

表 2-18 地表水监测结果

采用日期	pH 值	溶解氧	高锰酸钾指数	化学需氧量	五日生化需氧量	氨氮	总磷
单位	无量纲	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
23.01.04	8	6.6	3.8	12	2.8	0.64	0.11
23.02.02	8	10	4.3	19	2.9	0.33	0.12
23.03.01	7	6.7	2.9	16	3.5	0.91	0.11
23.04.04	8	6.2	3.8	10	3.3	0.5	0.13
23.05.04	8	7	3.2	14	2.6	0.14	0.07
23.06.06	8	4.6	4	16	2.8	0.11	0.19
23.07.10	7	3.2	4.4	19	3.8	0.6	0.09
23.08.07	7	2.2	5.1	14	1.6	0.13	0.2

23.09.07	7	3.3	3.6	16	3.6	0.02	0.15
23.10.07	7	3.6	4.4	15	1.5	0.43	0.13
23.11.09	8	5.2	3.2	13	3.1	0.02	0.11
23.12.05	8	7.7	3.9	13	2.6	0.47	0.13
最小值	7	2.2	2.9	10	1.5	0.02	0.07
最大值	8	10	5.1	19	3.8	0.91	0.2
III类标准限值	6~9	≥5	≤6	≤20	≤4	≤1.0	≤0.2

由表 2-18 可知，监测断面各监测因子除了溶解氧在高温期间有所降低外，其余均能达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中的 III 类水体标准，水质总体情况良好。

2.3.6 小结

综上所述，本项目拟建场址及周围环境γ辐射空气吸收剂量率与浙江省环境本底处于同一水平，拟建场址周围的气溶胶、土壤、水体、底泥、生物样中放射性核素活度浓度均未见异常。本项目拟建场址处大气环境质量满足标准要求，周围地表水质总体情况良好。拟建场址区域声环境满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）中 3 类声环境功能区标准。

2.4 项目选址适宜性

本项目所在范围内不涉及自然保护区、风景名胜区等环境敏感目标，区内受人类活动影响深远，无珍稀动植物，不涉及压覆重要矿产资源。环境现状调查结果表明，项目区域的辐射环境质量良好，其中环境电离辐射水平处于天然本底涨落范围内。

本项目所在区域地质和地震条件良好，没有影响回旋加速器和热室安全稳定运行的颠覆性因素。

结合本项目特征污染因子和环境影响评价范围，厂址四周分布的主要是产业园在建和已建的工业企业和道路。

项目场址拟建区域周边社会环境相对简单，最近的集中式居民区位于项目西北侧，距离较远，约 470m。本项目运行产生的辐射影响较小，对周围公众影响很小，项目选址可行。

综上，本项目选址适宜开展放射性同位素药物生产核技术利用项目。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

3.1.1 项目规模

3.1.1.1 主体工程

本项目主体工程是砹尔法公司在产业园标准化厂房一期工程中的 2#厂房（共四层）内新建放射性同位素药物生产项目，2#厂房占地 1922.58m^2，总建筑面积 6933.06m^2，项目总投资约 1.2 亿元。其中在 2#厂房的一层建设 1 台质子回旋加速器机房，同时配套热室开展 ^{68}Ge（锗镓发生器）、^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo（钼锝发生器）、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac 和 ^{18}F 放射性核素产品生产工作，活动种类包括生产、使用和销售，另外建设 1 台 α 粒子回旋加速器机房，同时配套手套箱开展 ^{211}At 放射性核素生产等工作，活动种类包括生产、使用和销售，外购核素车间开展 ^{228}Th、^{212}Pb、^{177}Lu、^{125}I、^{131}I 和 ^{90}Y 核素的标记、提纯及分工作装等，活动种类为生产、使用和销售；二层开展生产的放射性核素放化质检实验、理化检验和微生物检验等工作，活动种类为使用；三层为预留区的理化实验仪器分析场所，四层为办公区和会议室，三层和四层不涉及放射性工作场所。地下一层主要为产业园内汽车停车场，公共设备用房以及放射性废物暂存库用房和放射性废水衰变池间等，本项目 2#厂房地下一层西部主要为土层、东部有消防水池和停车场等。

涉及辐射工作场所工程具体如下：

（1）加速器机房

本项目两座加速器机房均位于一层西部，南北共墙布置，其中南部为质子回旋加速器机房，建筑面积约192.5m^2，北部为α粒子回旋加速器机房，建筑面积约104.5 m^2。南部机房内拟配备1台TR-FLEX型质子回旋加速器，并配套4座靶站（分别为T1和T2为固体靶站、T3和T4为液体靶站），质子最大能量为30MeV，最大束流强度为750μA，年最大出束时间约5900h（根据最大产能计），T1靶站专用生产^{68}Ge放射性核素，T2靶站拟生产^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac 放射性核素（不同时生产），T3靶站和T4靶站拟生产^{18}F核素，其中T1靶站和T2靶站可以同时生产，T3靶站和T4靶站可以同时生产，固体靶和液体靶不能同时生产；

北部机房内拟配备1台TR-Alpha型α粒子回旋加速器，共有2个内靶，最大α束流能量为30MeV，最大束流强度为100μA，年最大出束时间约1250h，专门用于生产医用α核素^{211}At放射性药物。同时为加速器配套建设设备间、控制室、配件间、水包装间等辅房。

（2）锗镓核素车间

锗镓核素车间位于一层中部，建筑面积约79m^2，配套有卫生通过间（一更、二更、缓冲间、回更间等）、1个原辅料间、1个成品包装间等用房组成，车间内拟配备1个靶接收热室、1个靶处理热室和1个通风橱组成的三联铅屏蔽室，热室设置1套独立的放射性排风系统，专用于热室排风。质子回旋加速器生产^{68}Ge并由^{68}Ge进一步生产锗镓发生器，先将质子回旋加速器T1靶站生产的^{68}Ge靶材在靶处理热室内的模块箱中溶解分离提取制备$^{68}GeCl_4$溶液，热室内核素^{68}Ge的日最大操作量为1.85E+11Bq，日等效最大操作量为1.85E+10Bq，年最多生产12批次，年最大操作量为2.22E+12Bq，再以$^{68}GeCl_4$溶液为原料，经上柱、淋洗后生产锗镓发生器，其中^{68}Ge-^{68}Ga的日最大操作量为1.83E+11Bq、日等效最大操作量为1.83E+10Bq、年最大操作量为 2.20E+12Bq。锗镓发生器拟生产两种规格，活度分别为 50mCi和100mCi。

（3）诊断核素车间

诊断核素车间位于一层中部，建筑面积约67m^2，配套有卫生通过间（一更、二更、缓冲间、回更间等）、1个原辅料间、1个成品包装间等用房组成，车间内拟配备1个靶接收热室、1个靶处理热室共两联铅屏蔽室，热室设置1套独立的放射性排风系统，专用于热室排风。

T2固体靶站生产的^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac核素靶材分别在靶处理热室内模块箱中对其溶解分离提取，制备相应的放射性核素溶液研发药，核素^{57}Co的日等效最大操作量为1.85E+10Bq，核素^{64}Cu的日等效最大操作量为2.22E+09Bq，核素^{67}Cu的日等效最大操作量为1.48E+10Bq，核素^{89}Zr的日等效最大操作量为3.52E+09Bq，核素^{99}Mo的日等效最大操作量为1.48E+10Bq，核素^{99m}Tc（钼锝发生器）的日等效最大操作量为1.16E+09Bq，核素^{123}I的日等效最大操作量为3.70E+09Bq，核素^{124}I的日等效最大操作量为3.70E+10Bq，核素^{203}Pb的日等效最大操作量为1.48E+09Bq，核素^{225}Ac的日等效

最大操作量为4.07E+09Bq，其靶材回收核素^{226}Ra的日等效最大操作量为5.00E+09Bq。另外，T3和T4液体靶站生产的^{18}F核素的日等效最大操作量为1.48E+09Bq。

（4）砹^{211}At核素车间

砹^{211}At核素车间位于一层北部，建筑面积约48m^2，配套有卫生通过间（一更、二更、缓冲间、回更间等）、1个原辅料间、1个成品包装间等用房组成，车间内拟配备1个靶接收手套箱、1个标记分装手套箱共两联手套箱，热室设置1套独立的放射性排风系统，专用于手套箱排风。^{211}At的日最大操作量和日等效最大操作量均为7.40E+10Bq。

（5）核素标记车间

核素标记车间位于一层东南部，建筑面积约49m^2，配套有卫生通过间（一更、二更、缓冲间、回更间等）、1个原辅料间、1个成品包装间等用房组成，车间内拟配备1个分装标记热室，热室设置1套独立的放射性排风系统，专用于热室排风。

在热室内模块箱中分别开展外购^{228}Th、^{212}Pb、^{177}Lu、^{125}I、^{131}I和^{90}Y核素的标记、提纯及分装等工作，并在取样质检合格后，送至最终用户（医院或科研机构）。涉及的核素^{228}Th日等效最大操作量为3.7E+11Bq，^{125}I的日等效最大操作量为3.7E+09Bq，^{212}Pb、^{177}Lu、^{131}I和^{90}Y的日等效最大操作量均为3.70E+10Bq。

另外，一层车间东部设置1间外购核素存放室用于外购核素的存放，以及南部设置1间放射性药物产品库用于产品临时暂存。

（6）核素质检车间

核素质检车间位于二楼北部，总建筑面积约182m^2，包括放化实验室、高纯能谱测量实验室、理化检验和微生物检验区等，对一层生产的上述核素进行质检等相关实验。

本项目砹尔法公司拟使用射线装置情况见表3-1所示，一层生产、使用和销售放射性核素（非密封放射性物质）工作场所情况见表3-2所示，二层使用放射性核素（非密封放射性物质）情况见表3-3所示。本项目一层上述非密封工作场所的日等效最大操作量合计为7.70E+11Bq，属于甲级非密封放射性物质工作场所。本项目二层非密封工作场所的日等效最大操作量合计为4.50E+08Bq，属于乙级非密封放射性物质工作场所。

表 3-1 企业使用射线装置情况一览表

射线装置						
装置名称	设备型号	主要参数	数量	类别	活动种类	工作场所
质子回旋回旋加速器	TR-FLEX	最大能量30MeV 最大束流 750μA	1台	I类 射线装置	使用	生产厂房一楼质子加速器机房
α粒子回旋加速器	TR-Alpha	最大能量30MeV 最大束流 100μA	1台	I类 射线装置	使用	生产厂房一楼α加速器机房

表 3-2　一层生产、使用和销售放射性核素（非密封放射性物质）情况一览表

序号	场所	生产或标记的核素	对应产品	单批次最大产量（操作量）Bq	工作批次	日最大操作量 Bq	毒性因子	毒性组别	操作方式	操作因子	日等效最大操作量 Bq	年最大工作批次	年最大操作量 Bq	性质
1	锗镓核素车间	^{68}Ge	$^{68}GeCl_4$ 溶液	1.85E+11	1 次/月	1.85E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	1.85E+10	12	2.22E+12	生产、使用、销售
2		^{68}Ge	锗镓发生器	1.83E+11〔1〕	1 次/月	1.83E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	1.83E+10	12	2.20E+12	使用
		^{68}Ga		1.83E+11	1 次/月	1.83E+11	0.01	低毒	液体，简单操作	1	1.83E+09	12	2.20E+12	生产、使用、销售
3	诊断核素车间	^{57}Co	$^{57}CoCl_2$ 溶液	1.85E+11	1 次/月	1.85E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	1.85E+10	12	2.22E+12	生产、使用、销售
4		^{64}Cu	$^{64}CuCl_2$ 溶液	2.22E+11	1 次/周	2.22E+11	0.01	低毒	液体，简单操作	1	2.22E+09	50	1.11E+13	生产、使用、销售
5		^{67}Cu	$^{67}CuCl_2$ 溶液	1.48E+11	1 次/周	1.48E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	1.48E+10	50	7.40E+12	生产、使用、销售
6		^{89}Zr	$^{89}Zr(C_2O_4)_2$ 溶液	3.52E+10	1 次/周	3.52E+10	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.52E+09	50	1.76E+12	生产、使用、销售
8		^{99}Mo	$Na_2{}^{99}MoO_4$ 溶液	1.48E+11	1 次/周	1.48E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	1.48E+10	50	7.40E+12	生产、使用、销售
9		^{99}Mo	钼锝发生器	1.47E+11〔2〕	1 次/周	1.47E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	1.47E+10	50	7.35E+12	使用
		^{99m}Tc		1.16E+11〔2〕	1 次/周	1.16E+11	0.01	低毒	液体，简单操作	1	1.16E+09	50	5.80E+12	生产、使用、销售
10		^{123}I	$Na^{123}I$ 溶液	3.70E+11	1 次/周	3.70E+11	0.01	低毒	液体，简单操作	1	3.70E+09	50	1.85E+13	生产、使用、销售
11		^{124}I	$Na^{124}I$ 溶液	7.40E+10	1 次/周	7.40E+10	0.1	中毒	液体，简单操作	1	7.40E+09	50	3.70E+12	生产、使用、销售
12		^{203}Pb	$^{203}Pb(NO_3)_2$ 溶液	1.48E+11	1 次/周	1.48E+12	0.01	低毒	液体，简单操作	1	1.48E+09	50	7.40E+12	生产、使用、销售
13		^{225}Ac	$^{225}Ac(NO_3)_3$ 溶液	4.07E+08	1 次/月	4.07E+08	10	极毒	液体，简单操作	1	4.07E+09	12	4.88E+09	生产、使用、销售
14		^{226}Ra〔3〕	^{226}Ra 溶液	5.00E+08	1 次/月	5.00E+08	10	极毒	液体，简单操作	1	5.00E+09	12	6.00E+09	使用
13		^{18}F	^{18}F 溶液	1.48E+11	1 次/周	1.48E+11	0.01	低毒	液体，简单操作	1	1.48E+09	50	7.40E+12	生产、使用、销售
15	砹 ^{211}At 核素车间	砹 ^{211}At 溶液		3.70E+10	2 次/天	7.40E+10	1	高毒	液体，简单操作	1	7.40E+10	250	1.85E+13	生产、使用、销售
16	核素标记车间（含外购核素存放间）	$^{177}LuCl_3$ 溶液		/	/	3.70E+11	0.1	中毒	液体，贮存	100	3.70E+08	50	1.85E+13	外购存放
17		^{177}Lu-DOTATATE 标记物		3.70E+11	1 次/周	3.70E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+10	50	1.85E+13	生产、使用、销售
18		硫酸钇 ^{90}Y		/	/	3.70E+11	0.1	中毒	液体，贮存	100	3.70E+08	50	1.85E+13	外购存放
19		^{90}Y-树脂微球		3.70E+11	1 次/周	3.70E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+10	50	1.85E+13	生产、使用、销售
20		^{228}Th 溶液		/	/	3.70E+10	10	极毒	液体，贮存	100	3.70E+09	50	1.85E+12	外购存放

21		^{228}Th 溶液	3.70E+10	1 次/周	3.70E+10	10	极毒	液体，简单操作	1	3.70E+11	50	1.85E+12	使用
		^{212}Pb 溶液	3.70E+11	1 次/周	3.70E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+10	50	1.85E+13	生产、使用、销售
22		^{212}Pb 溶液	/	/	3.70E+11	0.1	中毒	液体，贮存	100	3.70E+08	50	1.85E+13	外购存放
24		^{212}Pb-DOTATATE 标记物	3.70E+11	1 次/周	3.70E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+10	50	1.85E+13	生产、使用、销售
25		Na ^{125}I 溶液	/	/	3.70E+10	0.1	中毒	液体，贮存	100	3.70E+08	50	1.85E+12	外购存放
26		^{125}I -MIBG 标记物	3.70E+10	1 次/周	3.70E+10	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+09	50	1.85E+12	生产、使用、销售
27		Na^{131}I 溶液	/	/	3.70E+11	0.1	中毒	液体，贮存	100	3.70E+08	50	1.85E+13	外购存放
28		^{131}I -MIBG 标记物	3.70E+11	1 次/周	3.70E+11	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+10	50	1.85E+13	生产、使用、销售
合计										日等效最大操作量 7.70E+11（甲级非密封工作场所）			

备注：（1）按照建设单位提供的资料，制备锗镓发生器时，所用 ^{68}Ge 的最大活度取单批次生产活度的 99%；根据 ^{68}Ge-^{69}Ga 的衰变曲线，两者 4 小时左右基本达到 Ge-68 和 Ga-68 活度的平衡；

（2）按照建设单位提供的资料，制备钼锝发生器时，所用 ^{99}Mo 的最大活度取单批次生产活度的 99%；根据 ^{99}Mo-^{99m}Tc 的衰变曲线，^{99m}Tc 最大操作活度约为 ^{99}Mo 的 78.6%。

（3）^{226}Ra（α 核素）为制备 ^{225}Ac 的靶材， ^{226}Ra 作为贵重靶材，按照建设单位提供的资料，拟采用循环闭环工艺流程回收。

表 3-3 二层使用放射性核素（非密封放射性物质）情况一览表

序号	场所	质检核素	日最大操作量 Bq	毒性因子	毒性组别	操作方式	操作因子	日等效最大操作量 Bq	年工作最大次数	年操作量 Bq	活动种类
1	质检实验车间	^{68}Ge	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	12	4.44E+08	使用
3		^{68}Ga	3.70E+07	0.01	低毒	液体，简单操作	1	3.70E+05	12	4.44E+08	使用
4		^{57}Co	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	12	4.44E+08	使用
5		^{64}Cu	3.70E+07	0.01	低毒	液体，简单操作	1	3.70E+05	50	1.85E+09	使用
6		^{67}Cu	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
7		^{89}Zr	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
8		^{99}Mo	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
9		^{99m}Tc	3.70E+07	0.01	低毒	液体，简单操作	1	3.70E+05	50	1.85E+09	使用
10		^{123}I	3.70E+07	0.01	低毒	液体，简单操作	1	3.70E+05	50	1.85E+09	使用
11		^{124}I	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
12		^{203}Pb	3.70E+07	0.01	低毒	液体，简单操作	1	3.70E+05	50	1.85E+09	使用
13		^{225}Ac	3.70E+07	10	极毒	液体，简单操作	1	3.70E+08	12	4.44E+08	使用
14		^{18}F	3.70E+07	0.01	低毒	液体，简单操作	1	3.70E+05	50	1.85E+09	使用
15		^{211}At	3.70E+07	1	高毒	液体，简单操作	1	3.70E+07	500	1.85E+10	使用
16		^{177}Lu	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
17		^{90}Y	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
18		^{212}Pb	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
19		^{125}I	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
20		^{131}I	3.70E+07	0.1	中毒	液体，简单操作	1	3.70E+06	50	1.85E+09	使用
合计								日等效最大操作量 4.50E+08（乙级非密封工作场所）			

3.1.1.2 公辅工程

（1）供电

本项目 2#厂房内所需用电来自产业园一期工程 1 号 10kV 变电所，1 号变电所兼高压配电室设置在 1#厂房一层，装机容量为 2*1600kVA。

（2）给排水

本项目给水水源采用市政自来水，进水压力为 0.20MPa。本项目生活生产用水均从室外引入，拟从北侧同兴路接一路 DN200 市政低压给水系统至园区后分两路，一路引入至形成 DN150 的环状低压生活生产给水系统（地下室内敷设），另外一路为 DN150 室外消防给水环管。

本项目排水同样依托产业园一期工程的管网，采用雨污废分流制，非放射性生产废水、生活污水以及放射性废水分系统设置，其中雨水排入产业园东侧市政雨水管网系统，非放射性生产废水经中和及沉淀等预处理后排至东侧市政管道，生活污水经过化粪池后汇总后重力埋地敷设，至市政污水管网，放含较短半衰期核素的放射性废水单独接管排入地下一层放射性废液衰变池内储存经委托检测并审管部门认可后排放入污水管网系统。

（3）通风与空调系统

通风与空调系统为控制区、监督区的工作人员提供新鲜空气并控制空气的温湿度，可实现空气净化、除湿、降温、供暖、新风量调节等多种功能。利用新风过滤器对入风进行净化，新风从一层和二层监督区走廊送入。加速器机房和热室区域内均保持负压环境。

（4）加速器循环冷却水系统

本项目回旋加速器配备冷却水循环系统。冷却水的冷源由制冷机组提供，经换热器热交换之后产生冷却水为加速器、电源柜、传输系统提供冷却。冷却水使用去离子水。

质子回旋加速器冷却水系统中冷却水约为 500L。α 粒子回旋加速器的冷却水系统中冷却水约为 400L。冷却水密闭循环使用，日常运行不外排，根据耗损情况会适当补充。

（4）易制毒试剂、易制爆试剂存放间

本项目在厂房二层西南部分别设置 1 间易制毒试剂存放间（面积约 17m^2）

和 1 间易制爆试剂存放间（面积约 17m^2），用于分别存放项目购买的易制毒、易制爆化学试剂，其余类型化学试剂存储在一层各热室所在房间相邻的原辅料间。

（5）气瓶间和空压机房

配套的气瓶间（总面积约 27m^2）位于二层南部，用于氢气瓶、氮气瓶和氦气瓶暂存，每种气体 1 用 1 备暂存，压力均为 16MPa 的 40L 气瓶；另外相邻的空压机房（面积约 19m^2）内空气压缩机配套一个储气罐气罐，压力为 1.6Mpa 的 4.2m^3 储罐。

3.1.1.3 配套环保工程

（1）放射性废水衰变池设施和固体废物暂存库

本项目产生的放射性废水排入位于2#厂房东南侧绿地的地下一层的衰变池池体间（面积约25m^2），衰变池设计为不锈钢水箱，共有三个衰变池水箱（单个水箱容积3m^3，总容积9m^3）。另外，应急情况下加速器机房内若发生冷却水泄漏，泄漏的冷却水经机房地下预埋管道排放至地下放射性衰变池间一个专用储水箱（1.5m^3）。

本项目产生的放射性固体废物暂存在放射性废物暂存库内，位于园区内4 #工业厂房南侧绿地的地下一层，本项目废物库占地面积约115m^2。

（2）废气排风系统

项目一层和二层共设置 8 套放射性废气排风系统，用于排放辐射工作场所内放射性气溶胶，分别是一层两个加速器机房各 1 套独立排风管道；锗镓核素车间、诊断核素车间、砹 ^{211}At 核素车间及核素标记分装车间所在区域分别设置 4 套排风系统，各热室内废气分别单独收集，收集后与车间内其他区域的排风汇总排入一根主排风管道，各排风支管在汇入主排风管道前均设有电动球阀；外购核素存放间 1 套独立排风管道；二层放化质检设置 1 套独立排风管道。

另外微生物检验阳性对照试验的通风柜由于涉及菌株操作（属于非放射性操作），单独设置 1 套排风系统，主要是生物安全要求。

各系统排风管道在楼顶的排放口高出屋面 3m（屋顶高度 23.15m，则距离一层室外地面高度约 26.15m）。排风管道内的废气过滤系统详细内容见 4.4.1。

（3）危险废物暂存库

本项目在厂房二层南部设置 1 间危废暂存库（存放本项目产生的非放射性废

物），面积约 21m^2，各危废分类收集存放，定期委托有资质单位安全处置。

3.1.2 主要设备参数

本项目使用 2 台回旋加速器，其中 1 台质子回旋加速器，生产 ^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac 和 ^{18}F 放射性核素，1 台 α 粒子回旋加速器，生产 ^{211} At 核素。2 台回旋加速器主要技术参数见表 3-4。

表3-4 加速器系统主要技术指标

指标	参数	参数
加速器类型	回旋加速器	回旋加速器
射线种类	质子	α粒子
最大能量	30MeV	30MeV
最大束流强度	750μA	100μA
束流是否需要引出	是（剥离引出）	否
束流引出效率	95%	/
靶站数量	4个（外部独立靶）	2个（内靶）
工作模式	2条束流可以同时照靶（同时照固体靶，或同时照液体靶）	单个内靶照射，两个内靶为交替照射
设备预期使用寿命	40年	40年

3.1.3 主要原辅材料

本项目使用的原料、辅助材料主要是回旋加速器使用的靶材、分离纯化热室中使用的化学试剂、核素包装用的西林瓶（配备铅罐和外包装）等，其中锗镓核素车间、诊断核素车间和砹 ^{211}At 核素车间的主要原辅材料使用情况（含损耗）见表 3-5 所示，放射性核素标记车间的主要原辅材料使用情况（含损耗）见表 3-6 所示。二层质检的主要原辅材料使用情况（含损耗）见表 3-7 所示。本项目工艺用主要包装材料消耗情况表 3-8 所示。

表 3-5 锗镓核素车间、诊断核素车间和砹 ^{211}At 车间主要原辅料使用情况一览表

略

表 3-6 放射性核素标记车间的主要原辅材料使用情况一览表

略

表 3-7 二层楼质检实验主要原辅材料使用情况一览表

略

表 3-8 本项目工艺用主要包装材料消耗情况

略

3.1.4 放射性核素特征

通过查阅《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）、《放射性同位素手册》、《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 I）》、《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 II）》以及 Nuclides1.0 软件，本项目涉及的主要放射性核素理化性质详见表 3-9。

表 3-9　放射性核素基本信息一览表

核素名称	半衰期	毒性分组	衰变方式	主要 α、β 辐射能量与强度（MeV）	主要伴随的 γ，X 射线的能量（MeV）	周围剂量当量率常数（μSv·m^2/MBq·h）
Ga-68	68.3min	低毒	β+（26%） EC（74%）	β^+ 1.899（87.7%） β^+ 0.822（1.22%）	γ 0.511（177.8%）	0.134
Ge-68	270.8d	中毒	EC（100%）	-	γ 0.0092	9.8E-05
F-18	109.8min	低毒	β^+（96.73%） EC（3.27%）	β^+ 0.63（96.73%）	γ0.511（194%）	0.143
Co-57	270.5d	中毒	EC（100%）	-	γ0.122（85.2%）	0.022
Cu-64	12.7h	低毒	EC（43.6%） β+（17.4%） β^-（39%）	β^-0.5787（39%）	γ0.511（34.79%） γ1.346（0.5%）	0.029
Cu-67	61.8h	中毒	β-（100%）	β-0.395（45%） β-0.484（35%） β-0.577（20%）	γ0.185（47%） γ0.091（7.3%）	0.014
I-123	13.2h	低毒	EC（100%）	-	γ0.159（83.4%）	0.061
I-124	4.17d	中毒	β+（22.9%） EC（77.1%）	β^+2.134（11.2%） β^+1.533（11.4%）	γ 0.511（45.2%） γ 0.603（61%）	0.185

核素名称	半衰期	毒性分组	衰变方式	主要 α、β 辐射能量与强度（MeV）	主要伴随的 γ，X 射线的能量（MeV）	周围剂量当量率常数（μSv·m²/MBq·h）
					γ 1.691（10.7%）	
I-125	59.4d	中毒	EC	-	γ 0.0275（73.2%）γ 0.0272（39.2%）γ 0.031（25.4%）	0.0165
I-131	8.02d	中毒	β^-（100%）	β^-0.334（7.2%）β^-0.606（89.7%）	γ 0.284（5.9%）γ 0.365（81.8%）γ 0.637（7.2%）	0.0595
Zr-89	78.5h	中毒	β+（22%）EC（78%）	β^+ 1.4951（22%）	γ0.91（99%）γ0.511（45.8%）	0.159
Mo-99	66.2h	中毒	β-（100%）	β-1.234（82%）β-0.448（17%）	γ 0.741（13.6%）γ 0.181（6.6%）γ 0.140（5.4%）	0.022
Tc-99m	6.02h	低毒	IT	-	γ0.140（100%）	0.030
Pb-203	52.1h	低毒	EC	100%	γ0.279（81%）γ0.401（5%）	0.096
Ac-225	10.0d	极毒	α（100%）	α5.829（52%）α5.793（28%）α5.732（10%）……	γ0.086（3.0%）γ0.074（1.2%）γ0.150（1.1%）……	0.006
Ra-226	1602a	极毒	α	α 4.782（94.6%）	γ0.186（3.4%）	0.0017

核素名称	半衰期	毒性分组	衰变方式	主要 α、β 辐射能量与强度（MeV）	主要伴随的 γ，X 射线的能量（MeV）	周围剂量当量率常数（μSv·m²/MBq·h）
				α 4.599（5.4%）	γ0.261（0.007%）	
At-211	7.214h	高毒	α EC	α 5.868（41%）	γ 弱	0.030
Lu-177	6.73d	中毒	β^-（100%）	β^-0.176（12.1%）β^-0.384（9.6%）β^-0.497（78.2%）	γ0.113（6.6%）γ0.208（11.0%）	0.006
Y-90	2.67d	中毒	β^-（100%）	β^-2.2801（99.99%）	-	6.4E-6
Th-228	1.913a	极毒	α	α 5.424（71%）α 5.341（28%）	γ 0.085（1.6%）γ 0.216（0.29%）	0.0096
Pb-212	10.64h	中毒	β-（100%）	β-0.589（39%）	γ0.113（6.6%）	0.039

3.2 工程设备

3.2.1 质子回旋加速器系统

3.2.1.1 质子回旋加速器工作原理和主要结构

质子回旋加速器使用高纯度 H_2 经过高压电离生成 H^-粒子束流，H^-受电场的引力在半圆形电极盒 D 形盒中有一个初始速度 V，受磁场作用粒子束流在真空腔中做圆周运动。H^-在一个 D 形盒运行半周后，需要通过两个 D 形盒之间的间隙（gap），由于 D 型盒与高频振荡电源相连，所以粒子在通过 gap 时会受到变频电场的拉力而提速，这样粒子就以高于以前的速度进入另外一个 D 形盒做圆周运动，粒子束流通过电场反复加速其运行速度越来越大，轨道半径也越来越大，在粒子达到最大能量处，粒子束将利用磁和电偏转的原理被束流提取装置提取引出，通过剥离器后成为 H^+粒子束，轰击靶物质。工作原理示意图见图 3-1 所示。

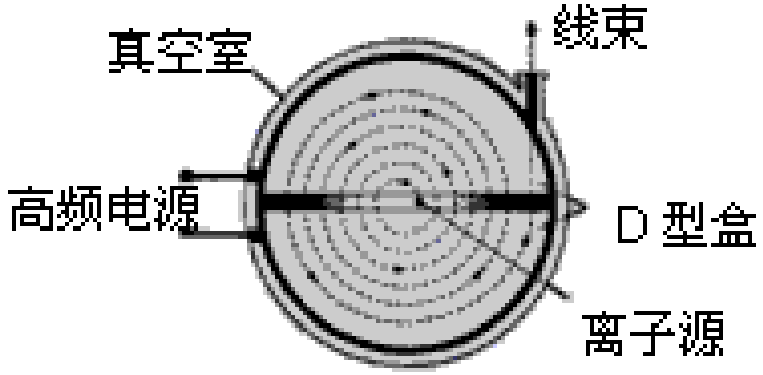


图 3-1　质子回旋加速器工作原理示意图

本项目拟使用 1 台 TR-FLEX 型回旋加速器系统，该加速器不带自屏蔽，需要放置在专门的加速器机房内进行屏蔽，并配有 4 个靶站，该系统由回旋加速器、束流传输系统、4 个靶站和控制系统组成。加速器主要由磁场系统、射频系统、真空系统、离子源系统、提取系统等主系统组成，TR-FLEX 型质子回旋

略

图 3-2　TR-FLEX 型质子回旋加速器外观示意图

加速器结构外观示意图见图 3-2 所示。质子回旋加速器系统的整体结构示意图见图 3-3 所示。

离子源系统：产生需要加速的负离子，由离子源、离子源电源配给器和气体控制系统组成。离子源的类型是多峰场负氢离子源，产生氢负离子；

射频系统：提供加速带电粒子所需的高频振荡加速电压，其频率与粒子多级轨道的旋转频率相等，由射频谐振腔、射频发生器和馈通电缆组成；

磁场系统：提供被加速的带电粒子在所控制的轨道中做圆周运动所需要的磁场强度，由磁铁、线圈、磁场电源配给系统等组成；

束流提取系统：直接将加速的带电负离子从真空腔中引出，该系统的基础是剥离膜。被加速的负离子在通过剥离膜时被脱去 2 个电子而转变为阳离子，并能够调整引出的束流进入所选定的核素生产靶；

靶系统：是完成特定核反应而产生核素的装置，各种类型的靶系统主要由靶站及专门的靶传输系统、真空绝缘箔、冷却系统组成；

真空系统：建立离子加速所需要的真空压力水平，降低束流的丢失，为高电压射频场提供绝缘；

冷却系统：包括水冷却系统。水冷却系统主要用于从不同系统中将热量带出，带出的热量在二级冷却系统中进行热交换，并将热量传送到初级冷却系统。

控制系统：监控各个系统，并发出各种指令使加速器正常运行，以完成用户的相应任务。

略

图 3-3 质子回旋加速器系统的整体结构示意图

3.2.1.2 质子回旋加速器系统靶站

本项目质子回旋加速器设有 4 条束流传输线，每条传输线穿过加速器机房内屏蔽墙，进入 4 个靶站，分别为 T1 和 T2 固体靶，T3 和 T4 液体靶。从质子回旋加速器的束流传输线上引出质子束流，轰击靶站，其中 T1 靶仅用于生产放射性同位素 ^{68}Ge 、T2 靶用于生产放射性同位素 ^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac（不同时生产），T3 或 T4 靶用于生产放射性同位素 ^{18}F，T1 靶和 T2 固体靶站可以同时生产，T3 和 T4 液体靶站可以同时生产，固体靶和液体靶站不能同时生产。所有核素经热室内放射化学提纯和分装后，最终得到相应的放射性同位素。四个靶站在加速器机房内的分布示意图见图 3-4 所示。T1 和 T2 固体靶站的结构分别见图 3-5 和图 3-6 所示。

需要说明的是，本项目生产核素所用的固体靶材全部为国外制作进口，砹尔法公司在厂区内不进行相关靶材的制作和加工。

略

图 3-4 四个靶站在质子回旋加速器机房内的分布示意图

略

图 3-5 T1 固体靶站的外观结构图

略

图 3-6 T2 固体靶站的外观结构图

准直器的结构示意图见图 3-10 所示。

略

图 3-7 T1 靶站相关组成结构示意图　　图 3-8 T2 靶站相关组成结构示意图

略

图 3-9 T3 或 T4 靶站相关组成结构示意图　　图 3-10 准直器的结构示意图

3.2.2 α 粒子回旋加速器系统

3.2.2.1 α 粒子回旋加速器工作原理

α 粒子回旋加速器离子源使引入的氦气电离发射出粒子束流，该粒子束流在 Dees 半圆形电极盒(简称 D 型盒)中运动。D 型盒与高频振荡电源相联，提供交变的电场，氦离子在交变电场中被加速。在磁场和电场的作用下被加速的粒子在近似于螺旋的轨道中被循环加速，氦离子速度不断增大；经过非常短的时间后，粒子经 Dee 电极盒间的 gap 进入另一个 Dee 电极盒，其轨道半径将比前一次的轨道半径大。粒子运动的瞬时轨道半径将随时间 t 的增加而增大，粒子运动速度的平方与粒子旋转的圈数成比例。被加速粒子运动的螺旋轨道半径 r 与运行时间 t 的平方根成正比。带电粒子经多次加速后，圆周轨道半径达到最大并获得最大的能量；在圆周轨道半径最大处，设置靶位置，靶件伸入到氦离子运动路径上某个点，高速氦离子轰击靶件，产生核反应，生成目标核素。工作原理示意图见图 3-11 所示。

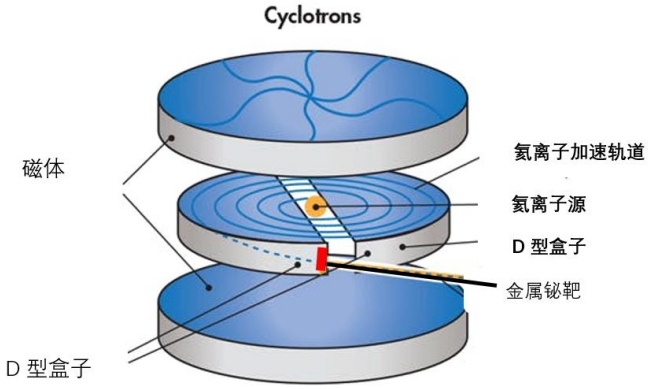


图 3-11 本项目阿尔法回旋加速器工作原理示意图

3.2.2.2α 粒子回旋加速器主要结构

本项目 α 粒子回旋加速器的主体结构包括主磁体、射频系统、真空系统、D 型盒、靶站系统、靶传输系统、电源，冷却水、PLC 控制系统。

略

图 3-12 α 粒子回旋加速器系统的整体结构示意图

1）离子源：氦气通过等离子透镜中管道进入离子源腔体，钽丝灯丝和离子源主体之间形成电弧，加热气体并产生等离子体。加热以热离子方式发射电子，使氦气电离。注入系统使用两组转向磁铁组件对氦离子束进行对准和聚焦。聚束

器将氢离子束聚焦，以匹配射频 RF 频率，以高传输率和更大束流进入加速区后被加速；

2）主磁体由低碳钢制成磁轭、两个低碳钢镀镍极和两个磁线圈组件组成，每个组件都安装在磁轭中，磁轭靠冷却水冷却。主磁体主要技术参数见表 3-10 所示。

表 3-10 主磁体主要技术参数

组成部分	技术参数
主磁体	1600mm*1200mm*1100mm
磁极半径	610mm
峰谷间距	30/20mm
平均磁场强度	1.2Tesla
电源	28kW 稳定性优于 0.001%

3）射频 （RF） 系统

射频（RF） 系统由谐振器、功率放大器、从功率放大器到回旋加速器的同轴传输线、实时 RF 控制系统和 RF 频率合成器组成。80 MHz 标称频率产生共振， RF 系统非常稳定，设计易于操作和维护。氢离子在阿尔法回旋加速器中以其频率的第四谐波加速，控制系统旨在让控制系统自动运行，无需任何操作员干预；回旋加速器内有两个 D 型盒，其角度 40°-45°；D 型盒几何形状经过优化，具有高品质因数和低功耗。标称 D 型盒电压为 40 kV。

4）真空系统

阿尔法回旋加速器真空系统采用模块化设计，允许回旋加速器上的不同子系统与主真空腔隔离，可以在主罐保持高真空的同时对靶系统等进行维护。为减少束流衰减、最大限度地减少回旋加速器内的中子活化和衍生辐射产生，真空系统采用高效低温泵和涡轮分子泵。主真空腔低温泵直接安装在磁体上，主真空腔由两个镀镍磁极和真空壁铝环组成。真空系统主要技术参数见表 3-11 所示。

表 3-11 真空系统主要技术参数

真空系统	参数特征描述
高真空泵	两个 200 毫米内径低温泵、一个 200 毫米内径涡轮泵和一个 100 毫米内径涡轮泵
真空水平	真空度优于 6.7×10^{-5} Pa
优点	低束流损失；低水平放射性活化
模块化	子系统独立于主真空腔

5）靶站系统

阿尔法回旋加速器采用内靶站（靶位于加速器区内），设置两个对称位置的靶站，两个靶站完全相同，两个靶站轮流交替照射，在氦离子加速路径上以一定角度入射角轰击靶材，束流不引出中心区，产生核反应，生成目标核素 ^{211}At。内靶站位置示意图见图 3-13 所示。

略

图 3-13 α 回旋加速器内靶站位置示意图

生产放射性核素 ^{211}At 靶材相关结构示意图见图 3-14 所示。

略

图 3-14 生产放射性核素 ^{211}At 靶材相关结构示意图

3.2.3 回旋加速器靶材输送系统

回旋加速器靶材输送系统的过程原理是：工作人员在确定待生产核素所需的靶材后，将新靶材（未被照射）放置在热室中，首先靶站端的泵进行抽气，热室端保持正常气压，运输盒会在气压作用下向靶站移动。当运输盒接近靶站时，靶站端的气阀会自动调节气压，使得运输盒减速，保证运输盒能够顺利到达靶站的预定位置。

同样，当靶材内完成打靶后，从靶站向热室输送靶材，热室内接收靶材，靶材运输盒在管道中通过气压差向热室移动，通过管道进入热室。靶材在管线中传输的过程为全自动进行，无需人工再操作。

本项目各靶材在照射结束后，均自动通过传输管线传输至相应热室或手套箱内，传输管线设置方式根据靶材材质分别空中传输（固体靶材）和地下传输（液体靶材）两种方式，本项目靶材传输系统的介绍如下：

（1）质子回旋加速器靶材输送系统

固体靶件：在完成束流照射后，靶件自动装入材质为铝，厚度为 6mm 靶材传输盒，靶材盒通过样品传输系统（俗称“跑兔系统”）通过气动方式进入传输管线，传输管线采用内径 100mm，厚度 2.2mm 的铝合金；靶件及靶材传输盒通过该系统传输至屏蔽室外的热室，在热室内进行靶件处理操作。该系统的传输管线最高离地高度为 3.25m，传输管线穿出加速器屏蔽室（屏蔽室墙体厚度 2500mm）后进入热室前这一段距离，传输管线外做铅屏蔽补偿，T1 和 T2 靶材传输管线外的铅屏蔽厚度均为 5cm。固体靶材传输盒的外观见图 3-15 所示。

略

图 3-15 固体靶材传输盒的外观

液体靶件：^{18}F 的液体靶和热室之间的传输管道水平铺设在地下，传输通道截面宽 20cm、深 60cm。传输通道由下至上（地面）依次为厚度 2mm 不锈钢传输管、2cm 铅屏蔽层、传输设备层和 35cm 厚的混凝土盖板，盖板与一层地面平齐。

（2）α 粒子回旋加速器靶材输送系统

在完成束流照射后，固体靶件自动装入材质为铝，厚度为 6mm 靶传输盒，靶传输盒通过跑兔系统气动进入传输管线，传输管线采用内径 100mm，厚度 2.2mm 的铝合金；靶件及传输盒通过该跑兔系统传输至屏蔽室外 ^{211}At 车间的手套箱，在手套箱内进行靶件处理操作。该系统的传输管线最高离地高度为 3.25m，传输管线穿过加速器屏蔽体（屏蔽体墙体厚度 2000mm），穿出屏蔽体进入手套箱前这一段距离，传输管线外另增加 4mm 铅包裹屏蔽。

根据建设单位提供的资料，本项目样品传输系统的设计技术参数详见表 3-12 所示。质子回旋加速器样品传输系统路径示意图见图 3-16 所示，α 粒子回旋加速器的样品传输系统路径示意图见图 3-17 所示。

表 3-12 传输系统的设计技术参数

略

略

图 3-16 质子回旋加速器样品传输系统路径示意图

略

图 3-17 α 粒子回旋加速器样品传输系统路径示意图

（3）热室内靶材接收装置设计

打靶后的靶材，向接收热室传输，热室接收单元内安装有靶材接收装置，结构示意图如图 3-18 中所示，靶材接收分三步实现。

一、靶材盒进入接收装置的垂直管道内，被管道上方出口处的套子阻挡；

二、靶材盒下落，被机械臂接住；

三、套子自动上升，打开出口，操作机械杆将靶材盒抬升取出靶材。

略

图 3-18 接收热室内靶材接收装置示意图

3.2.4 热室车间装置

靶站上经照射后的靶材，经靶材输送系统传输至相应的热室区域。其中质子回旋加速器 T1 靶生产的 ^{68}Ge 核素进入锗镓核素车间，该区域内安装有 1 套热室，共有 3 个自屏蔽铅室连接而成，按照生产流程依次有 3 个单元，分别是接收热室、处理热室（主要功能分离纯化，活度测量和分装）、通风橱热室（作用是处理热室与外界传递的缓冲区），并为接收热室和处理热室各配备 2 支关节式机械手和铅玻璃观察窗。热室结构示意图见图 3-19。

T2 靶生产的 ^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac，以及 T3 或 T4 靶生产的 ^{18}F 核素进入诊断核素车间，该区域内安装有 1 套热室，共有 2 个自屏蔽铅室连接而成，按照生产流程依次有 2 个单元，分别是接收热室、处理热室（主要功能分离纯化、活度测量和分装），两个热室操作面前各配置 2 支关节式机械手和铅玻璃窥视窗，外观与图 3-19 的热室类似。

需要说明的是，本项目质子回旋加速器四个靶位四条束流线，具备生产几十种常用的医用核素的能力，除了 ^{68}Ge 核素因生产规模的问题拟单独配套锗镓核素热室外，其余诊断核素没有单独配套热室车间，但是为了避免生产过程中交叉污染的情况，公司在诊断核素热室中同一时间只进行一种核素生产操作，不同时操作两种核素。当一种核素生产操作完成后，对热室进行清场工作，对核素生产

过程中使用的试剂，色谱分离柱进行整理归置，放入热室内各个核素对应的铅盒子；产生的废物进入热室下方铅废物桶，清场完毕后，才进行另外一个核素处理操作。

α 粒子回旋加速器生产的砹 ^{211}At 核素进入热室车间，该区域内安装有 1 套热室，共有 2 个自屏蔽手套箱连接而成，按照生产流程依次有 2 个单元，分别是接收手套箱、分装标记手套箱。操作为全自动按钮控制配合人手操作，设置铅玻璃窥视窗。手套箱外观结构见图 3-20 所示。

放射性核素标记车间中设置单个热室自屏蔽铅箱，外购各个核素通过铅箱外部的 1 支剑式机械手进行操作，利用蠕动泵半自动化进行核素和试剂抽取、标记、转移和活度测量等操作。

略

图 3-19　锗镓核素车间热室屏蔽铅房外观示意图

略

图 3-20　砹 ^{211}At 核素生产车间手套箱外观结构示意图

3.2.5 成品包装间

核素分装过程采用计算机全自动控制，自动分装，不需要人手接触操作。根据预先设计的程序，将核素按体积分装到各个西林瓶中，分装程序结束后，工作人员使用机械手或手套箱操作将分装完成的西林瓶装转移至专用的铅罐中，装入铅罐这个过程中在热室（或手套箱）中完成。装有西林瓶的铅罐从热室内部，通过一个类似抽屉的传递装置传出。每个西林瓶对应一个铅罐，本项目铅罐根据核素类型及活度大小分别采用40mm、20mm及2mm铅当量屏蔽，盖子为旋转式卡扣盖子，保证装入货包后不易松动。分装结束后工作人员将铅罐经热室传递窗口转至成品包装间内，在铅罐外包装贴好标签，每个铅罐外部采用海绵填充，防止运输途中因碰撞和跌落，贴好标签的铅罐装入运输箱完成货包包装，并搬运到运输车上。本项目一层四个核素车间内分别设有1个成品包装间。货包外包装及铅罐外观见图3-21。

需要说明的是，由于放射性药品具有时效性，本项目液体放射性药物和发生器生产执行以销定产的生产制度，正常情况下，公司生产的液体放射性药物和发生器打包后直接销售，通常不需要在公司内暂存，特殊情况下（如生产后中途订

单临时取消等小概率事件）将在一层南侧放射性药物成品库短时暂存，正常情况下该库处于空置状态，若暂存的产品确定不具备使用条件后将作为放射性固废进行处置。



货包外观　　内部铅罐

图 3-21 货包外包装及铅罐外观图

3.2.6 放射性核素质检

3.2.6.1 实验室放射性核素来源和运输

二楼质检实验所需的放射性核素，均来自于一楼核素生产区域的处理热室和标记分装手套箱单元。每批次核素生产后，在热室或手套箱内取不超过 1mCi 活度的核素至西林瓶中，并放入质检铅罐，铅罐通过热室传递窗后放入运输小车，由一层辐射工作人员用运输小车经西北侧通道送达专用货梯，样品可到达二楼进行质检实验，二楼由专人接收，一楼人员不进入专用货梯。辐射工作人员在运输前填写相关记录便于交接。

3.2.6.2 样品接收

二层实验室人员收到核素铅罐后，放置于放化实验室通风柜，清点铅罐数量、核对样品，做好样品登记和台账。

3.2.6.3 样品分样

样品登记完毕后，样品接收工作人员在通风柜里将放化质检样品、理化检验、微生物样品以及需要留样的样品等贴上标签，工作人员每次从铅罐中抽取几 μCi

（一般不大于 20μCi）的样品进行放化质检，对送往理化检验室和微生物检验的样品是在放化通风柜进行衰变并经检测处于本底水平后进行，另外留样的样品放在通风柜内暂存。实验室有专人负责领取样品，领用人需签字。

3.2.6.4 实验室检验

放化实验室内主要开展样品外观检查、放射性核素纯度检测、核素比活度检测、pH 值等多项检测工作，各项检测前，在通风柜内稀释操作。高纯锗能谱室的γ谱仪通过测量样品中γ射线的能谱，可以准确识别和定量分析样品中的放射性同位素。

理化检验室主要对标记样品的残留溶剂等进行检验，检验设备室高效气相色谱仪 GC。微生物检验主要对无菌、热原（细菌内毒素）、阳性对照等微生物学进行检验，其中无菌检测期间将样品稀释后接种到培养基上检验产品是否无菌，内毒素检测是在生物安全柜中进行，判断细菌内毒素含量，阳性对照实验在洁净工作台中进行，用于证明实验方法和检测系统的有效性。对于理化检验和微生物检验，需先将待检验药物样品在车间通风柜内存放至少 10 个半衰期或经测核素衰变基本无放射性后再进行实验，因此理化检验和微生物检验过程基本无辐射影响。

3.2.6.5 实验室废物和废液

涉及核素操作的质检实验拟设置专用铅废物桶，分别用于存放放射性固体废物和应急情况下含长半衰期核素的放射性废水，铅废物桶中装有塑料容器，塑料容器中放入吸水性极佳的高分子材料，防止液体在贮罐中晃动溢出。

3.3 工艺流程

3.3.1 质子回旋加速器打靶制备核素工艺流程

略

3.3.2 α粒子回旋加速器打靶制备核素工艺流程

略

3.3.3 热室内核素产品生产工艺流程

3.3.3.1 锗镓核素车间和诊断核素车间热室

略

3.3.3.2 砹 ^{211}At 车间热室

略

3.3.3.3 放射性核素标记车间热室

略

3.3.4 放化实验质检工艺流程

放化检验包括放射化学纯度检验和核纯度检验，分别在放化实验室和能谱实验室内开展。工艺流程及产污环节图见图 3-31 所示。

每班 2 名辐射工作人员每天完成生产核素的放化质检操作共需 2h，年工作 250 天。

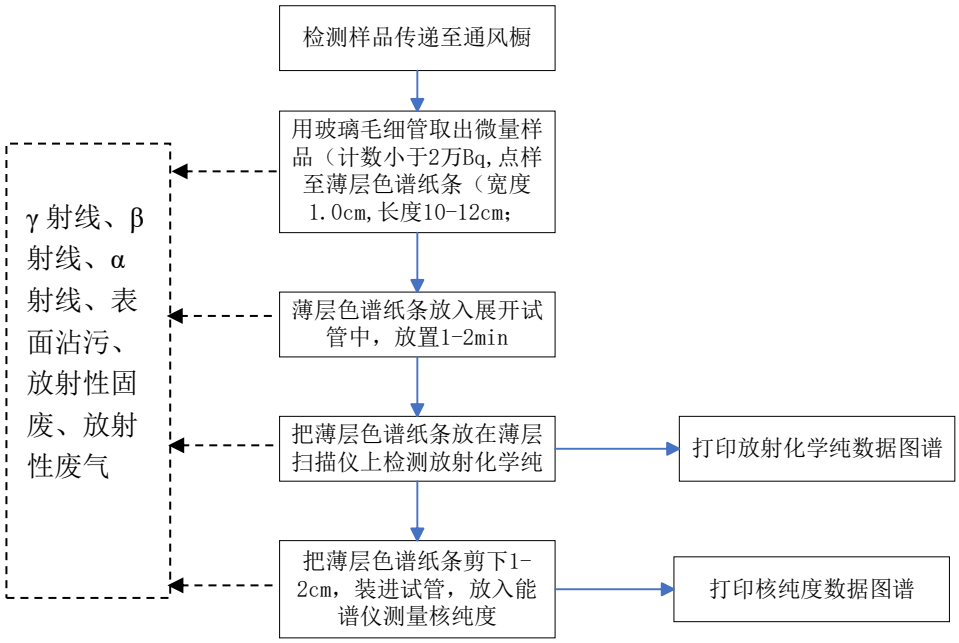


图 3-31　放化检验工艺流程及产污环节图

3.3.5 理化检验工艺流程

理化检验室主要是采用高效气相色谱仪 GC 对标记样品的残留溶剂等进行检验。所测样品均放置至少放置 10 个半衰期后，放射性活度降至本底水平后进行工艺流程图见图 3-32 所示。

每班 2 名辐射工作人员每天完成样品理化检测操作约 1h，年工作 250 天。

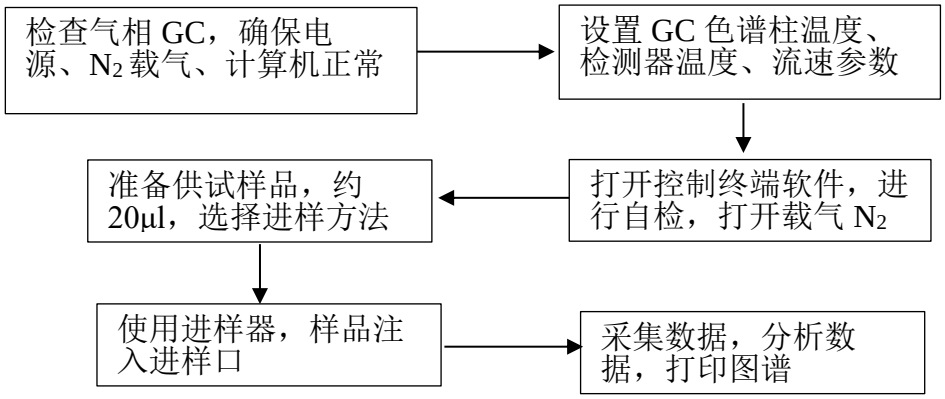


图 3-32　理化检验工艺流程图

3.3.6 微生物检验质检工艺流程

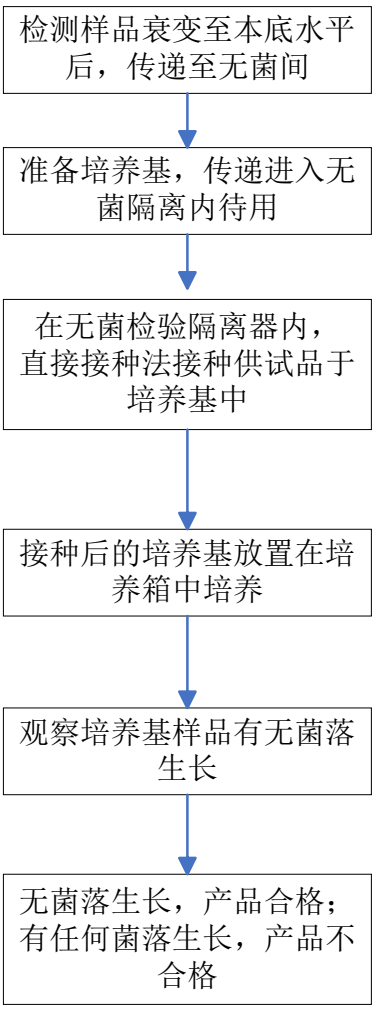
无菌检验、细菌内毒素、微生物检验以及阳性对照等微生物实验不需要每天开展，一般一个月左右开展一次。具体流程如下：

3.3.6.1 无菌检验流程

无菌检查主要检验产品是否无菌的一种方法，检验程序和要求依照药典中有关无菌检查的规定。无菌检查在洁净度 A 级单向流无菌隔离器内进行，无菌隔离器放置在无菌间内。无菌检验全过程应严格遵守无菌操作，防止微生物污染。

无菌检验使用的样品在放置至少 10 个半衰期后，放射性活度降至本底水平后进行。

检验工艺流程如下图 3-33 所示。





无菌隔离器

图 3-33 无菌检验工艺流程示意图

3.3.6.2 细菌内毒素检验流程

当产品中的细菌死亡后，会释放出内毒素。内毒素大量进入血液就会引起发热反应，即“热原反应”。因此，根据药典要求，经检查、控制产品中的细菌内毒素含量，使其符合药典标准要求。

细菌内毒素检验使用的样品在放置至少 10 个半衰期后，放射性活度降至本底水平后进行。

内毒素检验工艺流程如 3-34 所示。

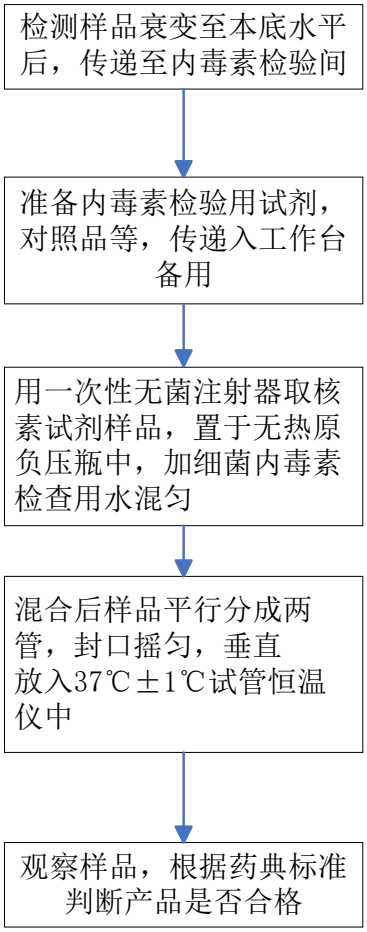


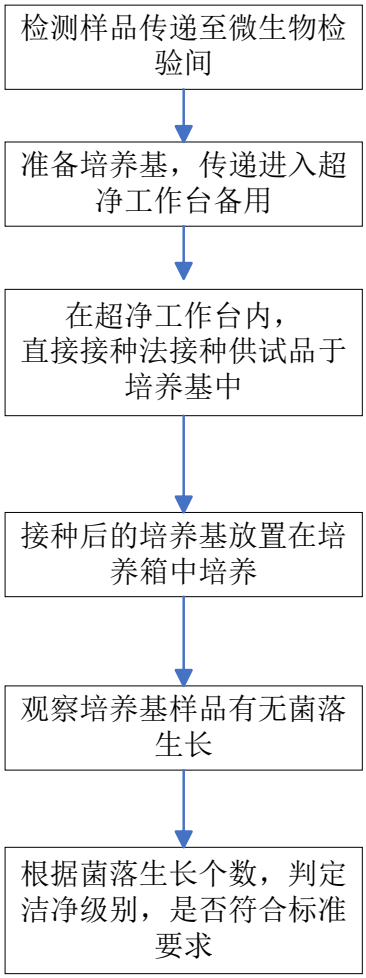
图 3-34 细菌内毒素检验工艺流程示意图

3.3.6.3 微生物限度检验

微生物检验主要是检查 GMP 洁净间环境微生物水平是否符合洁净级别要求。检验程序和要求依照药典中有关无菌检查的规定。微生物检查在洁净度 A 级单向流无超净工作台内进行，超净工作台放置在微生物检验间。微生物检验全过程应严格遵守无菌操作。

微生物检验所使用的样品是车间洁净间环境中采集的空气样品，不具有放射性。

检验工艺流程如 3-35 所示。



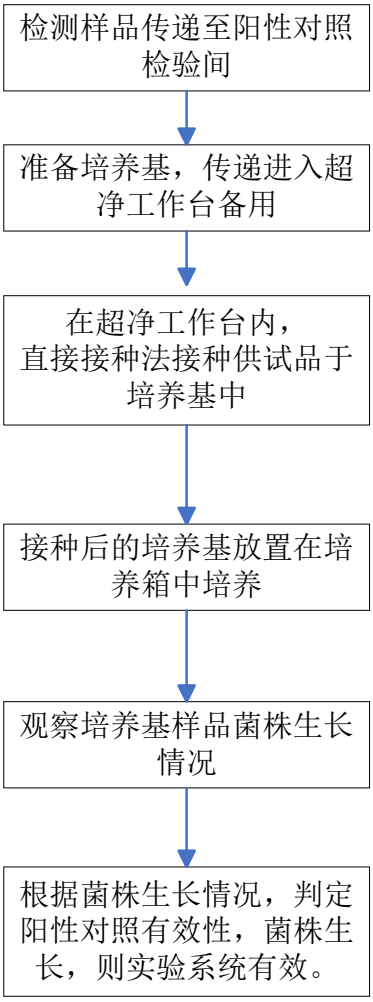


超净工作台

图 3-35 微生物检验工艺流程示意图

3.3.6.4 阳性对照实验

阳性对照应根据供试品特性选择阳性对照菌，用于证明实验方法和检测系统是有效的，能够检测到预期的效果。检测用样品是阳性菌，不具有放射性。检验工艺流程如下图 3-36 所示。





超净工作台

图 3-36　阳性对照实验工艺流程示意图

3.3.7 放射性废物储存容器及其转移

本项目辐射工作人员定期将各场所产生的放射性废物铅桶放置在推车上，通过厂房一层楼西侧的物流门转运至地下一层放射性废物暂存库，并进行统一登记、称重及入库。

一层两个加速器机房内拟分别设置 1 个铅废物桶，铅当量为 30mmPb，一层各热室或手套箱下方分别设有 1 个铅废物桶，铅当量为 30mmPb，二层质检实验区在放化实验室及能谱实验室拟分别设置 1 个铅废物桶，铅当量为 10mmPb。

本项目生产过程中产生含有较长半衰期（＞59.4d）的放射性核素应急冲洗废水拟在车间内被收集在装有塑料容器的屏蔽桶中。根据应急冲洗废水产生量和频

次，拟在锗镓核素车间、诊断核素车间、核素标记车间和二层放化实验室拟各放置 2 个 20L 铅废物桶，铅桶的防护当量不低于 5mmPb。

3.3.8 放射性核素运输

放射性同位素生产后的产品运输，砹尔法公司拟委托有资质单位运输，运输期间的辐射安全管理由运输单位负责。

砹尔法公司生产和销售的放射性物品，按照《放射性物品安全运输规程》（GB18806-2019）规定的 II 级 A 类货包进行包装，按照相关规定，货包外表面辐射剂量率不超过 2mSv/h，β 表面污染不超过 4Bq/cm^2，α 表面污染不超过 0.4 Bq/cm^2，货包在运输前，企业对货包表面辐射水平和表面沾污水平监测，确保满足相关要求。

运输工作由建设单位委托有资质的专业公司，遵守《放射性物品运输安全管理条例》、《放射性物品运输安全监督管理办法》和《放射性物品安全运输规程》等法律法规的要求，确保放射性物品运输安全，货运单位做好货包数量的核实和记录。

3.3.9 回旋加速器运行负荷

回旋加速器系统的运行负荷是决定辐射工作场所感生辐射水平的主要因素，质子回旋加速器全年最大运行时间约为 250 天，每年最多停机检修一次。其中 T1 靶站的最大连续打靶时间约为 20 天，即约 20 天完成 1 个靶的照射，则 T1 靶站单独工作时年最大照射时间约为 5760h；T2 靶站的单个固体靶连续打靶时间不超过 6h，大部分核素 1 周开展 1 个靶的照射（除了 ^{57}Co 和 ^{225}AC 每个月一次），则 T2 靶站单独工作时年最大照射时间不超 1500h，根据加速器使用情况，T1 靶站和 T2 靶站可以同时开展打靶照射；T3 或 T4 靶站的单个液体靶连续出束时间约 2h，目前 1 周最多开展 1 次靶的照射，则 T3 或 T4 靶站每年单独最多出束时间不超过 100h，T3 或 T4 靶站照射期间，T1 和 T2 靶站不工作。

α 粒子回旋加速器全年最大运行时间约为 250 天，每年最多停机检修一次。单个靶站的连续打靶时间不超过 2.5h，2 个靶站轮流使用，1 个靶照射结束后交替照射另外 1 个靶，每天最多照射 2 次，则加速器年最大连续出束时间为 1250h。

回旋加速器首次安装后，由设备生产单位负责调试，安装调试的时间约 2 个月，期间累计出束时间不超过 100h，期间本项目辐射工作人员不参与调试出束。

回旋加速器系统正式投入运行后，每年定期停机后的检修维修时间约 7 天，检修期间不出束，这部分工作砹尔法公司委托设备生产单位负责，检维修期间本项目辐射工作人员不参与。

3.3.10 人员工作负荷

砹尔法公司拟配备人员 36 名，其中从事行政管理和后勤等工作人员 4 人，其余 32 人为辐射工作人员，包括 2 名辐射管理人员和 30 名辐射操作人员。

辐射工作人员从事的工作岗位固定，各工种之间不交叉作业，各工作人员数量按具体分工配备如下：辐射安全主管（2 人）、质子加速器操作人员（6 人）、α 粒子加速器操作人员（2 人），锗镓核素车间操作人员（3 人）、诊断核素车间操作人员（6 人）、砹 ^{211}At 核素车间操作人员（4 人）、核素药物标记车间操作人员（3 人）、实验室操作人员（4 人），设备巡视维保人员（2 人）。

各类人员工作负荷描述如下：

（1）辐射工作场所安全管理人员

配备 2 名辐射安全主管，共同负责一层生产区和二层实验室辐射工作场所管理。管理人员每个工作日在辐射工作场所内逗留的时间不超过 2.5 小时，其中一层加速器区和热室区域各 1h，二层实验室 0.5h。年总共工作时间 625 小时。

（2）加速器操作人员

两台加速器操作人员共配备 8 名，其中质子回旋加速器 6 人，按每班 2 人，每天 3 班运行，α 粒子回旋加速器 2 人，按每班 2 人，每天 1 班运行，均在加速器控制室内工作，保守按照每台加速器每班人员开机时间 8h 计，年工作时间按 250 天计，每班人员年开机工作时间均为 2000 小时。

（3）核素车间工作人员

锗镓核素车间共配备 3 人，根据锗镓核素生产计划，热室内年生产 12 批次（工作时间为 12 天），按照每班 3 人，每天 1 班运行，人员负责在打靶结束后确认接收锗镓靶、靶处理、锗镓发生器生产、分装、产品活度测量、质检送样和包装，以及场所废物收集转运工作等，其中锗镓靶接收和处理、分装、活度测量及质检送样的操作时间约 2h/批次，包装时间（包括从热室传递至产品包装间打

包、货包表面检测及送至物流出入口，下同）约 0.5h/批次，锗镓发生器生产组装和活度测量操作时间约 3h/批次，包装时间约 1h/批次，另外场所产生的放射性废物由该车间人员负责转运至地下一层放射性废物暂存库，每半年集中清理一次，每次操作时间约 30min，一年两次。

诊断核素车间共配备 6 人，根据诊断核素生产计划，热室内不同核素均实现量产的情况下，按照每班 3 人，每天 2 班运行，年工作时间为 250 天，人员负责在打靶结束后确认接收靶材和靶材处理、钼锝发生器生产、分装、产品活度测量、质检送样和包装，以及场所废物收集转运工作等，其中不同靶接收和处理、分装、活度测量及质检送样的最长操作时间约 4h/批次，包装时间约 0.5h/批次，钼锝发生器生产组装和活度测量操作时间约 1.5h/批次，包装时间约 0.5h/批次，另外场所产生的放射性废物由该车间人员转运至地下一层放射性废物暂存库，每周集中清理一次，每次操作时间约 30min，每年 50 次。

砹 ^{211}At 核素车间共配备 4 人，根据 ^{211}At 核素生产计划，按每班 2 人，每天 2 班运行，在手套箱内年生产 500 批次（工作时间为 250 天，每天 2 批次），人员负责在打靶结束后接收确认靶、靶处理、分装、产品活度测量、质检送样和包装，以及场所废物收集转运工作等，其中靶接收和处理、活度测量、分装和质检送样的操作时间约 1.5h/批次，包装时间约 0.5h/批次，另外场所产生的放射性废物由该车间人员转运至物地下一层放射性废物暂存库，每周集中清理一次，每次操作时间约 30min，每年 50 次。

核素标记车间共配备 3 人，根据核素标记生产计划，热室内不同核素标记均实现量产的情况下，即每天最多开展两种不同核素标记工作，每种核素一批次，每班 3 人，每天 1 班运行，年工作时间为 250 天，人员负责外购核素内部转运存取、核素标记分装、产品活度测量、质检送样和包装，以及场所放射性废物收集转运等工作，其中每种核素标记、分装、测量和质检送样时间约 3h/批次，包装时间约 0.5h/批次，另外场所产生的放射性废物由该车间人员转运至地下一层放射性废物暂存库，每周集中清理一次，每次操作时间约 30min，每年 50 次。

（4）实验室工作人员

质检实验检验共有 4 人操作，按照 2 人/班，2 班/天运行，对一楼生产的产品开展质检实验和检测工作，其中每天开展放化实验及能谱分析实验的时间约

2h，每班人员年操作时间约 500h，理化检验分析时间约 1h，每班人员年操作时间约 250h。每一个月开展一批次微生物检验分析操作，每次约 2h，每班年操作时间约 24h。另外场所产生的放射性废物由上述人员转运至地下一层放射性废物暂存库，每周集中清理一次，每次操作时间约 30min，每年 50 次。

（5）场所设备巡检维保人员

场所设备巡检维保工作配备 2 名，每班 1 人，双班运行，其中每班每名人员在一层和二层辐射工作场所的设备巡检维保时间各 0.5 小时，需要说明的是，本项目加速器停机检修时间，这部分人员不进入加速器机房内工作，检维修工作由设备生产厂家负责，则每名设备维保人员在辐射工作场所的年工作时间是 250 小时。

3.4 污染源项

3.4.1 施工期污染源项

本项目位于海盐县核技术应用（同位素）产业园内标准化一期工程 2#厂房，产业园负责标准化厂房建设，施工主要环节包括：土建施工、厂房装修、设备设施安装、场地清理等，期间的污染源项主要包括废气、废水、固体废物和噪声等污染物。其中废气主要包括施工期间的扬尘、汽车尾气及少量装修废气，废水主要包括施工废水和施工人员生活污水，固体废物主要包括施工产生的建筑垃圾及施工人员产生的生活垃圾，噪声主要为施工机械噪声、施工作业噪声和施工车辆噪声。施工期工艺流程及产污环节示意图见图 3-37 所示。

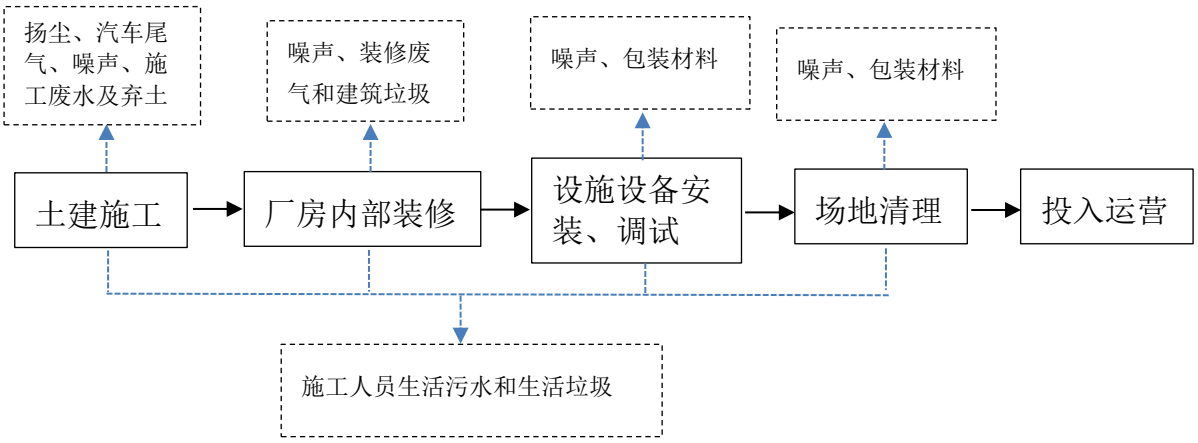


图 3-37 施工期工艺流程及产污环节示意图

（1）废气

施工废气主要来源于土建施工阶段产生的施工扬尘，汽车尾气以及装修过程产生的少量有机废气。

（2）废水

施工期要废水包括施工废水及施工人员生活废水。

施工废水包括土方阶段排水、结构阶段混凝土养护排水及各种机械冲洗、地面和墙面冲洗废水等。类比同类工程，施工废水排放量约 $10m^3/d$。废水主要含油石油类污染物和大量悬浮物。本项目施工高峰期工人人数可达 50 人左右，生活用水量按每人 $0.1m^3/d$ 计算，产生量为 $5m^3/d$，以排放系数为 0.8 计，生活污水排放量为 $4.0m^3/d$。

（3）噪声

施工期噪声主要来源于施工现场的各类机械设备噪声，主要有挖掘机、载重汽车、振荡机、电锯、吊车等，这些机械的噪声一般在 80～110dB（A）之间。

根据《环境噪声与振动控制工程技术导则》（HJ 2034-2013）及类比相关资料，常规建筑施工机械及其噪声级见表 3-17。

表 3-17 常规建筑施工机械及其噪声级

施工阶段	声源	噪声级 dB(A)
土方阶段	推土机	110
	挖土机	100
	空压机	100
	发电机	95
	运输车辆	90-100
	大锤	85
结构阶段	混凝土运输泵	80-90
	振捣器	105
	电锯	100-110
	空压机	100
	发电机	95
	运输车辆	90-100
	人为哨声	90-100
装修阶段	电钻	100
	电锤	100-110
	电锯	100-110

	木工电刨	90-95
	云石机	100-105
	混凝土搅拌机	100
	磨光机	100-110

（4）固废废物

施工期固体废物包括基础开挖产生的弃土、施工建筑垃圾，以及施工人员的生活垃圾。

项目土建阶段土石方产生量约 20000m^3，大部分用于回填地基、地面平整和绿化，产生的弃土约 3000m^3。

建筑垃圾主要来自装修施工作业产生的废砂石、废建材等。根据施工行业经验估算，新建工程按每新建 100m^2 建筑产生 0.5t 建筑垃圾计算，本项目总建筑面积约 7000m^2，则建筑垃圾产生量约 35t。设备安装阶段废材料产生量约 300kg。

本项目施工高峰期工人人数为 50 人，生活垃圾产生量按 0.5kg/人.d 计，产生量为 25kg/d。

3.4.2 运行期辐射污染源

3.4.2.1 回旋加速器室污染源概述

本项目回旋加速器系统（包括回旋加速器和靶站）运行期间产生的主要污染物有质子、α 粒子、中子、γ 射线和感生放射性。

质子和 α 粒子：质子回旋加速器产生的质子穿透性较弱，在物质中射程很短（只有同能电子射程的几十分之一~百分之一），α 粒子回旋加速器产生的 α 粒子穿透能力更弱，因此它们都很容易被物质所阻挡，其外照射防护可以不作考虑。

中子：主要由两部分组成，一部分是加速器质子束流和准直器、磁铁等碰撞发生核反应产生中子；一部分为质子或 α 粒子轰击靶材料时发生核反应，在生成放射性核素的同时产生中子。

γ 射线：回旋加速器生产放射性核素反应释放出大量的中子，与靶周围部件、准直器、屏蔽体等物质相互作用，释放出 γ 射线。

感生放射性：回旋加速器系统生产放射性核素的过程中，次级辐射与空气相互作用，将室内空气活化产生放射性气溶胶，与室内金属部件、混凝土屏蔽设施作用使其活化，管道中循环冷却水长期照射产生感生放射性。

3.4.2.2 热室区域污染源

主要污染源包括：1、热室内生产放射性核素过程中，放射性核素衰变产生的γ射线；2、靶材溶解分离纯化过程中需要使用化学试剂，有少量挥发态化学试剂以及放射性气载流出物通过通风系统排放环境；3、放射性核素操作造成的表面沾污；4、沾染了放射性核素的固体废弃物；5、发生应急冲洗后产生的含放射性核素的废水；6、自热室或手套箱内泄漏的少量碘同位素及砹 ^{211}At。

本项目放射性核素衰变会产生α射线和β射线，均为带电粒子，α粒子在空气中射程很短，β粒子通过树脂等轻质材料防护可以避免产生高能的韧致辐射，本项目核素产生的两种粒子均无法穿透皮肤，因此无需考虑α粒子和β粒子的外照射影响。

3.4.2.3 实验室区域污染源

实验室使用放射性核素开展放化质检实验、理化检验和微生物检验等。其中主要辐射污染源来自放化质检实验过程，包括放射性核素发生衰变产生γ射线、α射线和β射线；放射性核素操作造成的α和β表面污染；沾染了放射性核素的固体废弃物；发生应急冲洗后产生的含放射性核素的废水。

3.4.2.4 放射性废物库污染源

企业在生产厂房开展放射性核素生产和放射性核素操作过程中产生的放射性固体废物，定期转移暂存于地下一层放射性废物库中。暂存的放射性废物含有放射性核素，产生α射线、γ射线和β射线。

3.4.2.5 源项数值模拟说明

本项目采用蒙特卡罗数值模拟的方式，给出质子回旋加速器机房、α粒子回旋加速器机房及其靶站周围的辐射剂量场。根据建设单位提供的设计资料，数值模拟的主要输入条件、源项情况说明如下：

1）束流损失参数，详见“束流损失参数表”（表 3-18）；

2）束流损失部件结构尺寸、材质详见 3.2.1.2 节和 3.2.2.2 节等内容，束流损失位置详见下方，束流损失部件材料信息见表 3-19 所示。

3.4.2.6 束流损失

回旋加速器运行时产生的辐射场主要包括两类，一类为加速器运行时由初级束和次级束产生的瞬发辐射，另一类为加速器停机后由感生放射性核素产生的缓发辐射。

质子或α粒子束流在运输过程中的损失引起瞬发辐射和缓发辐射，其大小均与损失束流的能量、强度、方向以及靶材料等相关。根据建设单位提供的资料，本项目质子回旋加速器束流损失位置主要有①加速器内束流剥离点C、②靶准直器、③终端靶（T1~T4）。α粒子回旋加速器束流损失位置主要有①加速器内束流剥离点C、②终端靶（T1和T2）。回旋加速器束流损失位置示意图分别见图3-38和图3-9所示，建设单位提供的束流损失参数见表3-18所示。

略

图3-38　质子回旋加速器束流损失位置图

略

图3-39　α粒子回旋加速器束流损失位置图

表3-18 束流损失参数表

略

- **质子回旋加速器系统束流损失**

（1）加速器内部束流损失

质子在回旋加速器真空腔体中加速时，束流经过剥离点，束流离开中心区。两个完全相同的裂解碳剥离膜剥离点。膜材质：高温裂解碳（裂解碳密度2.20g/cm^3，剥离膜厚度400μg/cm^2），束流经过剥离裂解碳薄膜，束流损失不大于5%。

（2）准直器束流损失

从剥离点到达靶，经过磁体，准直器2，靶前面的挡板（也称作准直器1），束流损失点主要为准直器，本项目4个靶站前面的准直器结构，成分相同，束流损失一样。束流出剥离膜后，在轰击靶之前，束流损失不大于10%。

（3）终端靶体

束流轰击相应的靶件，产生新的核素，束流完全损失。

- **α粒子回旋加速器系统束流损失**

氢离子束流在 D 盒区加速后到设定能量后轰击内靶件 ^{209}Bi 产生核反应，生产新的核素，束流在加速器靶件处完全损失。

表 3-19 束流损失部件材料信息表

略

3.4.2.7 瞬发辐射源项

瞬发辐射一般远高于缓发辐射，它决定了屏蔽体的设计厚度。缓发辐射是检维修工作人员进入加速器机房受照剂量的主要来源之一。

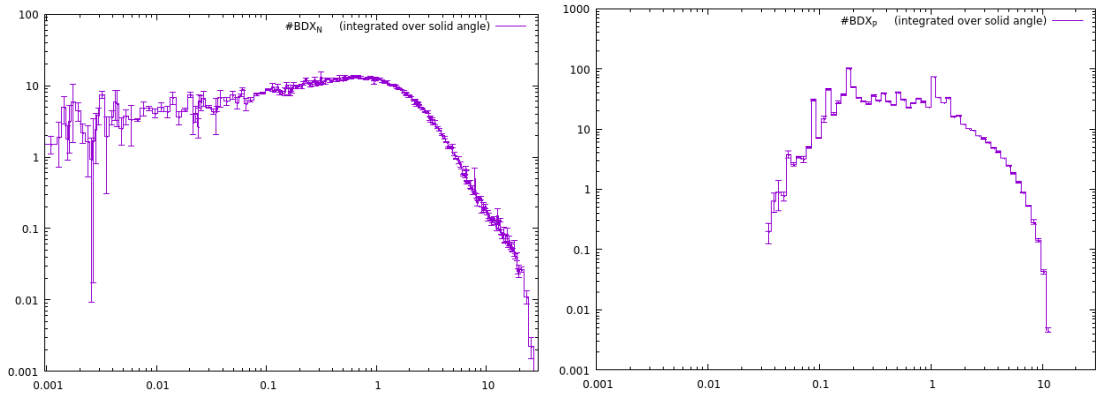
瞬发辐射由加速器运行时损失束流与加速器部件、靶材和屏蔽墙等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但随着加速器的停机而完全消失。

粒子与靶发生核反应得到的中子产额、能谱和角分布与入射粒子种类、能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。中子产额与能量都随粒子单核能量的提高而上升。在单核能量相同的情况下，中子产额随入射粒子质量数的增加而上升。

以质子回旋加速器生产^{68}Ge为例，图3-40给出了质子加速器按照可达最大能量30MeV质子束轰击Ga-Ni靶材产生的中子能谱和光子能谱。从图中可知，中子能量分布较宽，能量范围从热中子到入射质子能量（即30MeV），且低能中子通量较高；光子产额相对较低，能量分布主要位于50keV到10MeV范围。

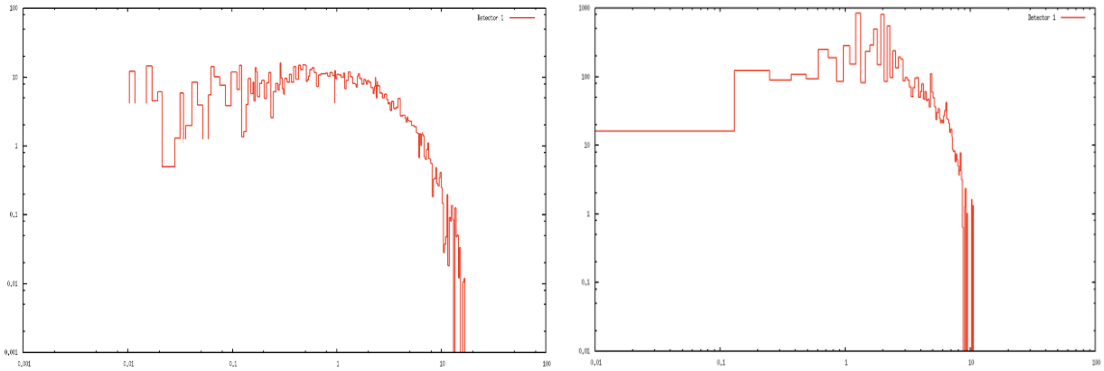
以α粒子回旋加速器生产^{211}At为例，图3-41给出了α粒子加速器按照可达最大能量30MeV轰击Bi靶材产生的中子能谱和光子能谱。从图中可知，中子能量分布相对较宽，能量范围从热中子到15MeV，且低能中子通量较高；光子产额较高的能量段主要位于1MeV到3MeV范围，其余能量段相对较低。

瞬发辐射场是以中子和光子（γ射线）为主的辐射场，瞬发辐射的强度决定了加速器机房四周墙体的屏蔽厚度，本报告书将在第5章中对不同工况下瞬发辐射水平进行估算和评价。



（单位：横坐标能量 MeV，纵坐标产额 $P^{-1}GeV^{-1}$）

图 3-40　30MeV 质子轰击 Ga-Ni 靶材后的中子能谱（左）和光子能谱（右）



（单位：横坐标能量 MeV，纵坐标产额 $P^{-1}GeV^{-1}$）

图 3- 41　30MeVα 粒子轰击 Bi 靶材中子能谱（左）和光子能谱（右）

3.4.2.8 缓发辐射（感生放射性）

缓发辐射是进入机房人员受照剂量的主要来源之一，主要由质子束、α 粒子、次级中子、γ 光子与加速器部件、冷却水及机房内空气、混凝土墙体等相互作用引起。其辐射水平取决于加速粒子的能量、种类、流强、加速器运行时间、冷却时间和被照材料性质等诸多因素。

1）空气感生放射性

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

空气中活化的放射性核素主要通过热中子俘获、(p，n)、(α，2n)反应和散裂反应而产生。产生的活化核素主要有 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等短半衰期核素，　对人体的危害途径主要为空气浸没外照射和吸入内照射。

根据质子回旋加速器的质子束打靶时间和频次，保守选择 T1 靶和 T2 靶同时运行，且按照 T1 靶站 1 年实际照射时间连续进行照射，T2 靶站将所有核素 1 年打靶时间累计后全部用于生产 Mo-99 核素（原因是根据 T2 靶站各核素生产工况采用蒙特卡洛程序筛选出生产 Mo-99 时靶周围感生放射性最强，见表 3-20 所示）计；按照 α 粒子回旋加速器的 1 年实际照射时间连续进行照射计，然后两个加速器均停止出束，所有靶材在靶站放置约 30min。两个机房通风换气频率均大于每小时 8 次，可认为在停止出束的 30min 时间内，机房内空气已完成更新。

表 3-20　T2 各靶材周围感生放射性计算结果

核素名称	实际照射能量 MeV/流强 μA	停止照射后靶周围 10cm 处剂量率（uSv/h）
^{89}Zr	18 / 60	5.34E+06
^{64}Cu	18 / 200	1.63E+07
^{124}I	13 / 30	2.00E+05
^{99}Mo	22 / 100	1.75E+07
^{123}I	24 / 60	4.00E+06
^{67}Cu	30 / 20	7.62E+06
^{57}Co	29 / 100	1.42E+07
^{225}Ac	17 / 20	2.85E+03
^{203}Pb	13 / 10	1.71E+05

采用蒙特卡洛程序计算无通风条件下按照上述出束工况后质子及 α 加速器室内空气最大活度浓度（A_{max}）。本项目加速器室设有通风换气系统，根据 NCRP144 号报告给出的计算方法，在通风条件下空气活化核素活度浓度计算方法见式 3.1、3.2。

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

式中：

A_r— 考虑了通风换气后室内空气活度浓度，Bq/m^3；

A_{max}—无通风条件下 1 年照射时间连续运行后的活度浓度，Bq/m^3；

λ_{dec}—核素的衰减系数，s^{-1}；

λ_{eff-r}—核素的有效衰减系数，计算方法见式 3.2；

$$\lambda_{eff-r} = \lambda_{dec} + R_r/V \quad \text{……（3.2）}$$

式中：

R_r— 运行时排风量，见表 3-21；

V— 室内空间体积，见表 3-21。

根据上述分析，本项目质子加速器和 α 粒子加速器排放的活化空气放射性核素活度浓度计算结果分别见表 3-22 和 3-23 所示。从计算结果可知，半衰期长的核素，其通风条件下的活度浓度下降比半衰期短的核素多。项目质子加速器运行期间向环境排放的放射性核素主要为短半衰期核素 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 、^{7}Be、^{37}Ar 和 ^{41}Ar。α 粒子加速器运行期间向环境排放的放射性核素主要为短半衰期核素 ^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar。

表 3-21　加速器机房体积和排风参数

序号	区域	室内体积（m^3）	每小时换气次数	排风量（m^3/h）
1	质子加速器机房	235.5	＞8	3210
2	α 粒子加速器机房	170.6	＞8	2276

表 3-22　本项目质子加速器排放的活化空气活度浓度和排放速率计算结果

序号	核素	半衰期（s）	无通风条件下最大活度浓度（Bq/m^3）	通风条件下最大活度浓度（Bq/m3）	排放速率（Bq/s）
1	H-3	3.88E+08	1.58E+06	2.07E-04	1.85E-04
2	Be-7	4.62E+06	1.10E+07	1.21E-01	1.08E-01
3	C-11	1.23E+03	4.50E+07	1.86E+03	1.66E+03
4	N-13	5.98E+02	1.13E+07	9.61E+02	8.57E+02
5	O-15	1.22E+02	1.11E+07	4.62E+03	4.12E+03
6	Ar-37	3.03E+06	1.10E+07	1.85E-01	1.65E-01
7	Ar-41	6.57E+03	2.02E+08	1.56E+03	1.39E+03

表 3-23 本项目 α 粒子加速器排放的活化空气活度浓度和排放速率计算结果

序号	核素	半衰期（s）	无通风条件下最大活度浓度（Bq/m^3）	通风条件下最大活度浓度（Bq/m^3）	排放速率（Bq/s）
1	N-13	5.98E+02	4.50E+07	3.91E+03	2.47E+03
2	O-15	1.22E+02	1.12E+07	4.77E+03	3.01E+03
3	Ar-41	6.56E+03	1.42E+07	1.12E+02	7.11E+01

备注：表 3-22 和表 3-23 中各活化核素均为气体形态存在，因此通风条件下从机房产生的放射性气体将直接通过顶部排放口排入环境中，排放口活度浓度计算结果不考虑高效过滤吸附处理。虽然半衰期较短，但第 5 章正常运行期间仍从保守角度计算给出各核素对公众的剂量贡献值。

2） 冷却水中感生放射性

加速器部件和靶件使用去离子水冷却，冷却水长期在高辐射场照射因活化而产生放射性，质子加速器系统中冷却水总水量为 500L，α 粒子加速器系统中冷却水总水量为 400L，大部分位于加速器机房外的管路和热交换机房内。

冷却水中活化核素的主要来源是束流集中损失区域内的冷却水，即靶件处和加速器内部。质子束流轰击靶体产生的次级射线（主要是中子）穿过冷却水管使冷却水受照活化。

本项目冷却水闭式循环，正常运行期间和检维修期间均不排放。

若事故情况下发生冷却水泄漏，机房内设置地漏，预埋管道将泄漏的冷却水引至地下衰变池间内存放冷却水的专用储水箱，体积约 $1.5m^3$，可以确保本项目冷却水泄漏时能盛放系统内所有水量。

使用蒙特卡罗程序计算冷却水的活化，由于本项目加速器运行产生的中子能量较低，去离子水中易被活化的核素总量小，主要有 ^{11}C（半衰期 20.3min）、^{13}N（半衰期 9.96min）、^{15}O（半衰期 2min）等放射性核素，活化产物的半衰期短，因此通过程序计算本项目冷却水的活化程度基本上都低于其统计的阈值，放置一定时间可衰变至较低水平。

3） 加速器相关部件感生放射性

本项目质子加速器的活化部件包括是加速器引出剥离膜、准直器、终端靶体（含液体靶 Havar 膜和基座等）。α 粒子加速器的活化部件包括设备腔体壁和靶材基座。

部件活化计算工况保守取与空气感生放射性计算工况相同，另外质子加速器液体靶同样按照 1 年实际照射时间连续进行照射计，分别计算对加速器相关部件活化累积影响，并考虑两个加速器使用寿期内（40 年）的放射性核素累积影响。

根据计算结果分析得到相关部件主要感生放射性核素活度结果分别见表 3-24 和表 3-25 所示。从表 3-24 计算结果可知，除了液体靶 Havar 膜及内胆外，质子加速器的束流损失点的部件大部分采用碳、铝等材料制成，感生放射性核素种类相对较少，通过对照 GB18871 和《国际辐射防护和辐射源安全的基本安全标准（暂行版）》中放射核素豁免值比较，可以看到，在质子加速器寿期 40 年后，除了液体靶 Havar 膜外，其余束流损失点处活化部件中大部分感生放射性核素水平处于豁免值以下。

从表 3-25 计算结果可知，α 粒子加速器不锈钢腔体处部件的主要感生放射性核素放射性水平均高于豁免值水平。靶基座处的活化产物大部分为短半衰期核素，Na-24 高于豁免值水平。

表 3-24　质子回旋加速器相关部件活化主要核素活度水平

序号	活化部件（材质）	核素	半衰期	1 年实际照射时间连续照射后放射性活度，Bq	寿期 40 年后放射性活度，Bq	豁免活度 Bq
1	剥离膜（碳）	N-13	9.965min	1.89E+07	1.89E+07	1.0E+09
2		C-11	20.34min	4.34E+08	4.34E+08	1.0E+06
3		H-3	12.33 y	4.98E+06	8.13E+07	1.0E+09
4	固体靶准直器（碳）	N-13	9.965min	1.01E+06	1.01E+06	1.0E+09
5		C-11	20.34min	3.29E+06	3.29E+06	1.0E+06
6		H-3	12.33 y	1.19E+05	1.94E+06	1.0E+09
7	固体靶准直器（铝）	Al-26	7.17E+5y	2.04E+03	2.17E+04	1.0E+05
8		Na-24	15h	1.43E+07	1.43E+07	1.0E+05
9	液体靶 Havar 膜	Ni-63	100.1 y	4.22E+03	1.48E+05	1.0E+08
10		Cu-64	12.7 h	1.50E+07	1.50E+07	1.0E+06
11		Cu-61	3.333 h	4.95E+08	4.95E+08	1.0E+06
12		Co-61	1.65h	9.37E+06	9.37E+06	1.0E+06
13		Co-60	5.271y	1.31E+04	1.06E+05	1.0E+05
14		Ni-59	76000 y	1.42E+03	5.68E+04	1.0E+08
15		Co-58	70.86 d	1.08E+09	1.11E+09	1.0E+06
16		Co-57	271.79 d	2.14E+08	3.53E+08	1.0E+06
17		Ni-57	36.08h	1.89E+09	1.89E+09	1.0E+06
18		Co-56	78.76h	1.43E+06	1.43E+06	1.0E+05
19		Fe-55	2.73 y	1.15E+07	5.13E+07	1.0E+06
20		Mn-54	312.3 d	7.23E+05	1.30E+06	1.0E+06

序号	活化部件（材质）	核素	半衰期	1 年实际照射时间连续照射后放射性活度，Bq	寿期 40 年后放射性活度，Bq	豁免活度 Bq
21		Mn-53	3.7E+06y	1.95E+00	7.80E+01	1.0E+09
22		Mn-52	5.591d	3.35E+09	3.35E+09	1.0E+05
23		Cr-51	27.704d	1.37E+09	1.37E+09	1.0E+07
24		Cr-49	42.09min	1.29E+08	1.29E+08	1.0E+06
25		V-49	330d	1.23E+09	2.30E+09	1.0E+07
26	液体靶准直器（碳）	N-13	9.965min	2.16E+07	2.16E+07	1.0E+09
27		C-11	20.34min	2.34E+08	2.34E+08	1.0E+06
28		H-3	12.33 y	3.70E+05	6.04E+06	1.0E+09
29	液体靶基座（铝）	Al-28	2.24min	3.73E+05	3.73E+05	-
30		Mg-27	9.458min	1.74E+06	1.74E+06	-
31		Na-24	15h	2.07E+06	2.07E+06	1.0E+05
32	液体靶内胆（铌）	Nb-94	20400y	1.65E+01	6.66E+02	1.0E+06

表 3-25　α 粒子回旋加速器部件活化主要核素活度水平

序号	活化部件（材质）	核素	半衰期	1 年实际照射时间连续照射后放射性活度，Bq	寿期 40 年后放射性活度，Bq	豁免活度 Bq
1	腔体不锈钢壁	Mn-56	2.578h	2.74E+08	2.74E+08	1.0E+05
2		Fe-55	2.7y	1.24E+07	5.48E+07	1.0E+06
3		Mn-54	312.3 d	5.57E+07	1.00E+08	1.0E+06
4		Cr-51	27.70d	1.55E+07	1.55E+07	1.0E+07
5	靶材基座（铝）	P-30	2.498min	1.48E+11	1.48E+11	-
6		Al-29	6.56min	5.38E+09	5.38E+09	-
7		Al-28	2.24min	5.13E+08	5.13E+08	-
8		Mg-27	9.458min	5.83E+08	5.83E+08	
9		Na-24	15h	2.26E+08	2.26E+08	1.0E+05
10		H-3	12.33y	8.16E+08	1.33E+10	1.0E+09

4）混凝土屏蔽墙和土壤感生放射性

混凝土和土壤活化计算工况与空气感生放射性计算工况相同，并考虑加速器适用寿期内（40 年）的放射性核素累积影响。混凝土密度为 2.35g/cm^3，化学组分为：H:1%、C:0.1%、O:52.9%、Na:1.6%、Mg:0.2%、Al:3.4%、Si:33.8%、K:1.3%、Ca:4.4%、Fe:1.4%（与混凝土屏蔽墙屏蔽计算参数取值相同），给出本项目两个加速器机房屏蔽墙（含内隔墙）活化放射性水平计算总结果见表 3-26。

由表可见，在 1 年实际照射时间连续照射后，混凝土中放射性核素中除了 Na-22、C-14 及 H-3 外，其余核素的放射性活度均已超过 GB18871-2002 中可申

报豁免的核素活度值。因此，在加速器机房退役时应考虑混凝土屏蔽墙作为放射性废物进行处置。

另外，本项目加速器机房地板混凝土厚度为 1m，经计算，地板下土壤中未产生活化核素。

表 3-26　混凝土屏蔽体中放射性核素活度浓度计算结果

序号	核素	半衰期	1 年实际照射时间连续照射后放射性活度，Bq	寿期 40 年后放射性活度，Bq	豁免活度，Bq
1	Fe-59	44.503d	6.57E+08	6.59E+08	1.0E+06
2	Fe-55	2.73y	1.07E+09	4.77E+09	1.0E+06
3	Mn-56	2.578h	1.27E+05	1.27E+05	1.0E+05
4	Mn-54	312.3d	6.06E+07	1.09E+08	1.0E+06
5	Ca-47	4.536d	2.50E+07	2.50E+07	1.0E+06
6	Sc-47	3.349d	2.87E+07	2.87E+07	1.0E+06
7	Ca-45	162.67d	2.48E+09	3.14E+09	1.0E+07
8	K-42	12.355h	1.54E+09	1.54E+09	1.0E+06
9	Ar-37	35.04d	5.88E+09	5.88E+09	1.0E+08
10	Si-31	157.3min	1.47E+07	1.47E+07	1.0E+06
11	Na-24	14.959h	2.11E+10	2.11E+10	1.0E+05
12	Na-22	2.6019y	1.88E+05	8.04E+05	1.0E+06
13	C-14	5730y	5.92E+04	2.36E+06	1.0E+07
14	H-3	12.33y	3.45E+05	5.64E+06	1.0E+09

3.4.3 运行期非放射性污染源

3.4.3.1 电磁辐射

回旋加速器运行可能产生电磁辐射的区域主要有离子源系统、加速腔、高压电源等。整个加速器均位于金属外壳内。高压电源金属外壳能有效的屏蔽电磁辐射，且机房均采用钢筋混凝土结构，因此电磁辐射不会对周围环境造成影响。

3.4.3.2 噪声

本项目噪声源位于建筑内声源主要包括：一层的加速器冷却水循环泵，一层夹层的空调箱和新风箱，二层空气压缩机。位于室外声源主要是四楼屋顶的排风机和方形横流式冷却塔。

本项目的噪声源情况见表 3-27~表 3-28。

表 3-27 建设项目噪声源强调查清单（室外声源）

序号	声源名称	型号	空间相对位置（m）[1]			声功率级(dB(A))[2]	声源控制措施	运行时段
			X	Y	Z			
1	排风机 1（质子加速器机房）	待定	8	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
2	排风机 2（α 加速器机房）	待定	9	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
3	排风机 3（锗镓核素车间）	待定	10	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
4	排风机 4（诊断核素车间）	待定	11	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
5	排风机 5（^{211}At 核素车间）	待定	14	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
6	排风机 6（标记核素车间）	待定	15	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
7	排风机 7（外购核素车间）	待定	16	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
8	排风机 8（质检放化实验室）	待定	12	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
9	排风机 9（阳性对照实验室）	待定	13	25	24	75	选用低噪声设备、基础减振，并设置隔声箱	0：00~24：00
10	方形横流式冷却塔	待定	10	10	25	85	选用低噪声设备、基础减振	0：00~24：00
11	方形横流式冷却塔	待定	10	12	25	85	选用低噪声设备、基础减振	0：00~24：00

备注：（1）按照 2#厂房所在厂界计算，坐标原点设在厂房西南角地面，X 轴正向为厂房向东方向，Y 轴正向为向北方向，Z 轴为离地垂向高度。

（2）1~9 号声源采取控制措施后，降噪量约 10 dB(A)；10~11 声源采取控制措施后，降噪量约 5 dB(A)。

表 3-28 建设项目噪声源强调查清单（室内声源）

序号	建筑物名称	声源名称		型号	声功率级/dB(A)	声源控制措施	空间相对位置〔1〕			距室内边界距离/m	室内边界声级/dB(A)	运行时段	建筑物插入损失/dB(A)〔2〕	建筑物外噪声	
		编号	名称				X	Y	Z					声压级/dB(A)	建筑物外距离/m
1	一层楼	1#	加速器冷却水循环泵	待定	65	减振、隔声门窗、墙体隔声等	7	4	0.5	3.5	46.3	0：00~24：00	25	23.4	1
2		2#	加速器冷却水循环泵	待定	65		7	18	0.5	7	44.4	0：00~24：00			
3	二层楼	3#	空气压缩机	待定	65		3	1	8	1	54.4	0：00~24：00	25	29.4	1
4	一层夹层内	4#	加速器厅新风箱风机	待定	60		10	30	3.5	7.5	39.3	0：00~24：00	25	29.3	1
5		5#	加速器厅新风箱风机	待定	60		13	30	3.5	7.5	39.3	0：00~24：00			
6		6#	热室车间空调箱风机	待定	60		18	36	3.5	1	49.4	0：00~24：00			
7		7#	热室车间空调箱风机	待定	60		23	36	3.5	1	49.4	0：00~24：00			
8		8#	热室车间空调箱风机	待定	60		22	31	3.5	5.5	39.8	0：00~24：00			
9		9#	热室车间空调箱风机	待定	60		25	31	3.5	4.5	40.4	0：00~24：00			
10		10#	放化质检实验室空调箱风机	待定	60		15	34	3.5	3	42.0	0：00~24：00			

11		11#	微生物检验空调箱风机	待定	60		10	33	3.5	3	42.0	0：00~24：00			
12		12#	微生物检验空调箱风机	待定	60		12	33	3.5	3	42.0	0：00~24：00			
13		13#	微生物检验空调箱风机	待定	60		12	32	3.5	4	40.8	0：00~24：00			

备注：（1）按照 2#厂房所在厂界计算，坐标原点设在厂房西南角地面，X 轴正向为厂房向东方向，Y 轴正向为向北方向，Z 轴为离地垂向高度。

（2）根据《噪声与振动控制技术手册》（化学工业出版社，2019 年），结合本项目墙体和门窗建设情况取值。

3.4.3.2 废气

（1）臭氧和氮氧化物

本项目回旋加速器的质子（或α粒子）加速和打靶束流的路径均位于真空环境，打靶后产生中子束流和γ射线。中子束流和γ射线为非带电粒子，对空气的电离能力较弱。查询文献 NCRP 51 号报告和 NCRP 144 号技术报告，上述技术文件中描述的臭氧问题都是针对电子加速器和大型正负电子对撞机，并未提到质子加速器臭氧对环境的影响问题。综合考虑，本项目质子加速器臭氧的产生量和产生浓度均较低，对环境影响很小，不作为主要的环境污染因子。

（2）生产工艺挥发性废气

本项目生产工艺挥发性废气主要来自热室的浓盐酸少量挥发产生的酸雾以及少量挥发性有机物（以 NMHC 计），其中：

锗镓核素车间热室内浓盐酸（37%）消耗量约为 5L/a，大部分转移到产品溶液里面，根据热室内的操作环境可知，所有化学试剂均由泵从顶部通过软管抽取注入各模块箱（非开口方式倾倒），保守考虑 5%挥发，则 HCL 挥发量约 0.110kg/a，按照年生产 12 天，每天用时 2h，风机排风量 5998m^3/h，保守不虑吸附效率情况下，则 HCL 排放浓度为 0.765mg/m^3，排放速率约 0.005kg/h，另外 NMHC 消耗量约为 25L/a，保守考虑 5%挥发，则挥发量约 1.25kg/a，排放浓度为 8.68mg/m^3，排放速率约 0.052kg/h，均由 1 根 26.15m 高排放口外排。

诊断核素热室内浓盐酸（37%）消耗量约为 10L/a，保守考虑 5%挥发，则 HCL 挥发量约 0.220kg/a，按照年使用 250h，风机排风量 5828m^3/h，保守不虑吸附效率情况下，则 HCL 排放浓度为 0.151mg/m^3，排放速率约 8.8E-04kg/h，由 1 根 26.15m 高排放口外排。

砹 ^{211}At 车间内 NMHC 消耗量约为 25L/a，保守考虑 5%挥发，则挥发量约 1.25kg/a，按照年使用 750h，风机排风量 5503m^3/h，保守不虑吸附效率情况下，则排放浓度为 0.303mg/m^3，排放速率约 0.002kg/h，由 1 根 26.15m 高排放口外排。

放化质检实验中 NMHC 消耗量约 10L/a 计算，保守考虑 5%挥发，则挥发量 0.50kg/a，按照年用时 250h，风机排风量 2200m^3/h，保守不虑吸附效率情况下，

则排放浓度为 0.909mg/m^3，排放速率约 0.002kg/h，由 1 根 26.15m 高排放口外排。

3.4.3.3 废水

本项目非放射性废水包括生活污水、清洗废水和非放射性工艺废水。

生活污水：按照企业工作人员 36 人考虑，每人每天生活用水约 60L 计，排放量约为消耗量的 80%，每日产生量约 1.73m^3/d，250 个工作日/年工况下，企业年排放生活污水约 432m^3/a。

清洗废水：实验室非放操作使用器皿等清洗废水约 50L/d（12.5m^3/a），未污染的工作服清洗废水约 2m^3/d（500m^3/a），厂房清洁废水（地面拖布冲洗废水）约 2m^3/d（500m^3/a）等。

本项目水平衡图见图 3-42 所示。

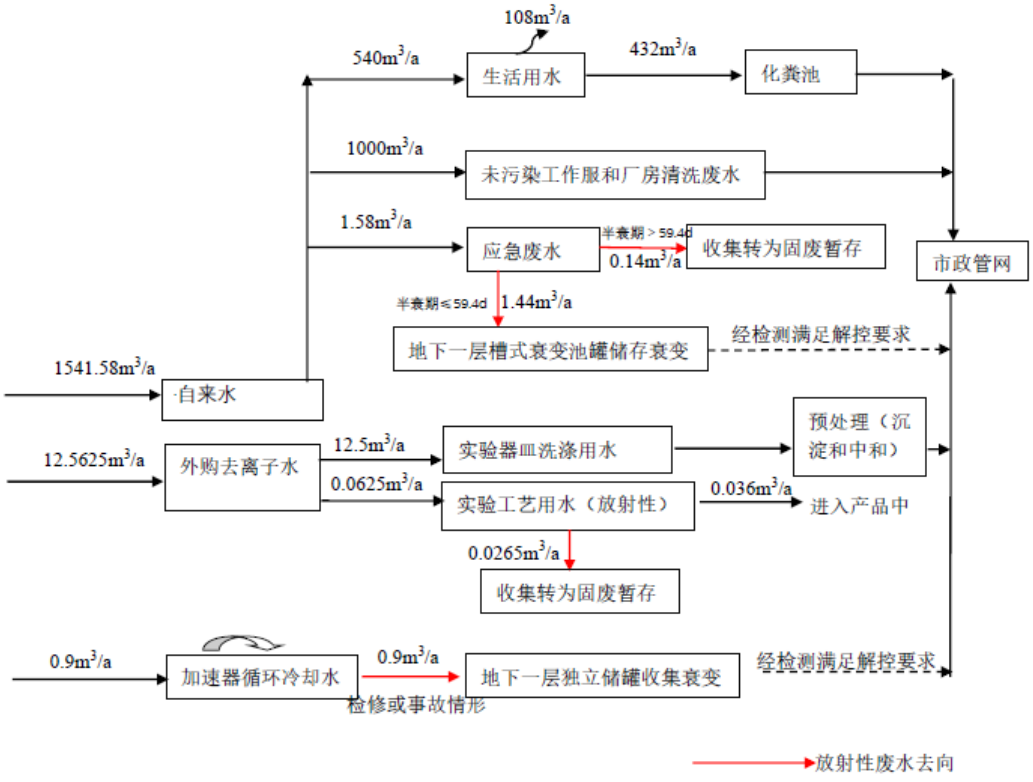


图 3-42　本项目水平衡图

3.4.3.4 固体废物

本项目非放射性固体废物主要包括生活垃圾、一般工业固体废物和危险废物。

生活垃圾：按照企业工作人员 36 人考虑，按照每人每天产生 0.5kg 生活垃圾，250 个工作日来计算，企业年产生生活垃圾约 4.5t/年。

一般工业固体废物：企业生产过程中产生的一般工业固体废弃物包括废西林瓶（未沾污放射性核素）、废包装材料、新风系统及循环冷却水净化废滤芯等，年产生量约 2t/年。其中废西林瓶（未沾污放射性核素）、废包装材料属于《固体废物分类与代码目录》（公告 2024 年第 4 号）中 SW92 实验室固体废物非特定行业，废物代码为 900-001-S92；废滤芯属于 SW59 其他工业固体废物非特定行业，废物代码为 900-009-S59。

危险废物：本项目非放操作过程中产生的实验废液产生量为 0.7t/a，主要包括：使用过酸碱等试剂的容器前三次清洗废液约 0.5t/a，实验产生的检测废液约 0.2t/a。质检实验过程产生的废物包括：沾染废酸碱等一次性实验用品、微生物质检产生的灭活培养基等，每次产生量约 0.5kg，年产生量约 12.5kg。另外还有达到清洁解控的废活性炭及废高效滤芯，年产生量约 0.4t。

根据《国家危险废物名录》（2025 年版），上述废物均属于危险废物中 HW49 其他废物类别，实验废液及实验废物的危险废物代码 900-047-49，解控的废活性炭及废高效滤芯的危险废物代码 900-041-49，均暂存在危险废物暂存库内。

3.4.3.5 其它非放射性污染物

本项目楼内未规划食堂，餐食委托周围餐饮企业加工后送至厂区内，厨余垃圾、餐盘容器等也一并委托餐饮企业处置和外包清洗，因此厂区内没有食堂油烟和餐饮废水排放。

企业未规划安装锅炉，生产场所和办公取暖来自于空调或者区域热力管网。

3.5 废弃物

3.5.1 放射性废气

放射性废气来源于加速器运行期间在加速器机房内产生的初级粒子或次级粒子与空气相互作用产生放射性气溶胶，以及热室内具体挥发性的放射性气溶胶。

回旋加速器运行时，室内空气通过热中子俘获、(p，n)、(α，2n)反应和散裂反应而被活化，产生的核素主要包括 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和和少量的 ^{7}Be、^{37}Ar 和 ^{41}Ar，表 3-22 和表 3-23 给出了两个加速器机房内活化气体排放活度浓度情况。

本项目除 ^{123}I、^{124}I、^{125}I、^{131}I、^{211}At 等核素具有一定挥发性外，其余生产的核素及其化合物均不易挥发，正常操作环境为热室（或手套箱）负压环境下，可以不考虑工作场所或排放口的活度浓度。表 3-29 给出了运行期间碘相关核素的废气产生量和排放量。

表 3-29 运行期间碘相关核素的废气产生量和排放量

产生位置	核素名称	日最大操作量（Bq/d）	日挥发产生量[1]（Bq/d）	年工作时间（d）	年产生量（Bq/a）	年排放量[2]（Bq/a）
诊断核素车间热室	^{123}I	3.70E+11	3.70E+08	50	1.85E+10	9.25E+07
	^{124}I	7.40E+10	7.40E+07	50	3.70E+09	1.85E+07
砹 ^{211}At 车间手套箱	^{211}At	7.40E+10	7.40E+07	250	1.85E+10	9.25E+07
核素标记车间热室	^{125}I	3.70E+10	3.70E+07	50	1.85E+09	9.25E+06
	^{131}I	3.70E+11	3.70E+08	50	1.85E+10	9.25E+07
放化质检实验通风柜	^{123}I	3.70E+07	3.70E+04	50	1.85E+06	9.25E+03
	^{124}I	3.70E+07	3.70E+04	50	1.85E+06	9.25E+03
	^{125}I	3.70E+07	3.70E+04	50	1.85E+06	9.25E+03
	^{131}I	3.70E+07	3.70E+04	50	1.85E+06	9.25E+03
	^{211}At	3.70E+07	3.70E+04	250	9.25E+06	4.63E+04

备注：1）保守取挥发核素转移到空气中的份额为 1‰；

2） 废气经热室或通风柜上方，在楼层夹层内排风管道路径上设置一套高效过滤器（过滤效率≥97%）和高效碘吸附器（为浸渍活性炭，吸附过滤效率≥99.5%），处理后引至四楼楼顶排放，上述计算主要考虑高效碘吸附器的过滤作用；

3） 外购核素存放间因不涉及非密封源操作，不考虑该场所内碘的挥发排放。

5.2.9 节“空气浸没外照射和吸入内照射剂量评估”对放射性气溶胶的辐射剂量贡献进行了详细计算和评价。

3.5.2 放射性废水

本项目正常生产过程中的放射性废水主要来自热室和二楼核素质检操作实验室，年产生量约 26.54L，其中热室产生的放射性废水主要是靶溶解及分离提纯处理过程中使用后含放射性核素的各种化学试剂，约 25.24L。另外二楼实验室正常质检放射性样品过程产生的废水量约 1.296L，每种核素每次操作产生的废水不超过 1mL。表 3-30 给出了热室内正常操作期间放射性废水产生量，表 3-31 质检操作放射性废水产生量。

根据本项目特点，工作人员进入锗镓车间、诊断核素车间、砹 ^{211}At 车间、标记核素车间、放射化学实验室进行任何操作时，均穿戴连体洁净服，口罩，手部戴乳胶手套，身体无裸露皮肤暴露，非密封放射性物质操作过程均通过机械手

臂在热室，或通过手套箱、通风柜相对密闭空间中进行。每个车间出口设置处，设置污染监测，如果洁净服，手套被放射性污染，则脱弃被污染穿戴物，作放射性固废处理，因此正常情况下人员不会发生大面积放射性沾污，在生产结束后，转移废物或者触碰到用户返回的铅罐时，在极端情况下手套破损造成手部被放射性污染，则应急情形下需要采用清水进行冲洗手部，产生应急废水，根据核素生产情况，保守分析本项目应急情况下含较长半衰期核素（半衰期＞59.4d，主要是^{68}Ge、^{57}Co、^{228}Th 和 ^{226}Ra）的年最大产生量约 144L；其它短半衰期放射性核素（半衰期≤59.4d）的清洗废水年最大产量约 1440L，表 3-32 给出了应急清洗放射性废水产生量。

表 3-30 热室内正常操作期间放射性废水产生量

产生位置	目标核素名称	单批次每种核素废水体积 mL	每种核素年操作次数	年总废水产生量 ml
锗镓核素生产车间	^{68}Ge、 ^{68}Ga	200	12	4800
诊断核素车间	^{18}F、^{123}I、^{124}I、^{89}Zr、^{64}Cu、^{203}Pb、^{99}Mo、^{99m}Tc、^{67}Cu	20	50	9000
	^{57}Co	20	10	200
	^{225}Ac、^{226}Ra	10	12	240
砹 ^{211}At 车间	^{211}At	10	500	5000
核素标记车间	^{212}Pb、^{125}I、^{228}Th、^{177}Lu、^{131}I、^{90}Y	20	50	6000
合计				25.24L

备注：根据建设单位提供的资料，正常操作期间工艺废水量较少且有杂质核素，建设单位拟将每个场所的废水在每次生产结束后全部通过吸水性极佳的高分子材料吸附后转成放射性固体废物进行分类收集，不进入衰变池。详见 3.5.1.3.放射性固体废物小节。

表 3-31 质检操作放射性废水产生量

产生位置	目标核素名称	每种核素单次质检废水最大产生量 ml	每种核素年操作次数	年总废水产生量 ml
放化实验室	^{68}Ge 、^{68}Ga、^{225}Ac	1	12	36

	^{18}F、^{123}I、^{124}I、^{89}Zr、^{64}Cu、^{203}Pb、^{99}Mo、^{99m}Tc、^{67}Cu、^{212}Pb、^{125}I、^{228}Th、^{177}Lu、^{131}I、^{90}Y	1	50	750
	^{57}Co	1	10	10
	^{211}At	1	500	500
合计				1.296L

备注：根据正常操作期间质检废水实际情况，因废水量很少，建设单位拟将其全部通过纸巾擦拭后作为放射性固体废物进行分类收集，不进入衰变池。详见 3.5.1.3.放射性固体废物小节。

表 3-32 应急清洗放射性废水产生量

产生位置	目标核素名称	单次废水最大量		每月最大发生次数	年总废水产生量		去向
		最大活度 Bq/批次	体积 L/批次		最大活度 Bq/批次	体积 L/批次	
锗镓核素生产车间	^{68}Ge 、^{68}Ga	3.70E+07	3	1	4.44E+08	36	作为放射性固体废物收集
诊断核素车间	^{18}F、^{123}I、^{124}I、^{89}Zr、^{64}Cu、^{203}Pb、^{99}Mo、^{99m}Tc、^{67}Cu、^{225}Ac	3.70E+07	3	10	4.44E+09	360	经过车间放射性管道收集进入放射性衰变池
	^{57}Co、^{226}Ra	3.70E+07	3	1	4.44E+08	36	作为放射性固体废物收集
砹 ^{211}At 核素车间	^{211}At	3.70E+07	3	10	4.44E+09	360	经过车间放射性管道收集进入放射性衰变池
核素标记车间	^{212}Pb、^{125}I、^{177}Lu、^{131}I、^{90}Y	3.70E+07	3	10	4.44E+09	360	经过车间放射性管道收集进入放射性衰变池
	^{228}Th	3.70E+07	3	1	4.44E+08	36	作为放射性固体废物收集
放化实验室	^{68}Ge、^{228}Th、^{57}Co、^{226}Ra	3.70E+05	3	1	4.44E+06	36	作为放射性固体废物收集

	项目其余核素	3.70E+05	3	10	4.44E+07	360	经过车间放射性管道收集进入放射性衰变池
合计						1584L	

备注：根据建设单位提供的行业生产经验，热室车间内放射性沾污水平最大为 3.70E+07Bq 计，放化实验室的放射性沾污水平取上述值的 1%。

较长半衰期核素（半衰期＞59.4d，主要是 ^{68}Ge、^{57}Co、^{228}Th 和 ^{226}Ra）的废水建设单位拟将其全部通过吸水性极佳的高分子材料吸附后转成放射性固体废物进行收集，不进入衰变池。详见 3.5.1.3.放射性固体废物小节。

3.5.3 放射性固体废物

放射性固体废物主要来自热室的工艺环节，其中大部分是废固体靶金属背板，体积较小，但重量较大，其它放射性废物包括废离子交换色谱柱、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、废过滤器以及上述 3.5.1.2 节放射性废水吸附转成放射性固体管理的废弃物等，最大合计约 2743kg/a。主要包括如下：

（1） 活化部件

两台加速器定期维护保养、维修过程中更换少量废碳膜和废靶膜等部件，每年共产生放射性固废估计约 10g，这部分不能再利用而成为放射性固体废物。

（2）实验操作废弃物

包括固体靶接收热室内的靶材溶解过程会产生废固体靶背板，靶材处理热室内不满足分离纯化核素要求的废离子色谱柱，废固体靶背板和废离子色谱柱不重复利用，以及一层热室车间和二楼实验室操作放射性核素时产生的废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管以及工艺中少量吸附转成放射性固体废物管理的废液等，合计约 2107kg。

（3）废过滤器

加速器机房、热室通风排放系统在排放前，通风管路中安装过滤装置，包括高效过滤器、活性炭过滤器（或浸渍活性炭高效碘吸附器），含有放射性核素的空气在排放前经过空气过滤装置的过滤后排放，过滤器可以有效吸附部分空气气溶胶中的放射性核素，过滤定期需要更换。

废活性炭及废高效滤芯不能重复利用，计划每年更换 1 次，总废物量约 442kg，包括约 420kg 废活性炭，废高效滤芯约 22kg。

（4）工作场所沾污易耗品

主要包括辐射工作场所日常工作中沾污的工作服、口罩、手套、抹布等，该类物品的产生量每年约 50kg，大部分放射性水平较低。表 3-33 给出了项目运行过程中放射性固体废物产生来源、种类及产生量等源项一览表情况。

表 3-33 放射性固体废物源项一览表

产生位置	核素名称	固废种类	单次产生量		年最大操作次数	年固废最大产生量		比活度 Bq/g
			最大活度 Bq/批次	重量 kg/批次		最大活度 Bq	重量 kg	
加速器大厅	^{24}Na	废碳膜、废靶膜等更换部件	3.87E+08	0.01	1	3.87E+08	0.01	3.87E+07
锗镓生产车间	^{68}Ge	废离子交换树脂和离子色谱柱、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	3.70E+09	1	12	4.44E+10	12	3.70E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	2.59E+08	2	12	3.11E+09	24	1.30E+05
	^{68}Ga	废离子色谱柱、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	3.66E+09	1	12	4.39E+10	12	3.66E+06
诊断核素生产车间	^{57}Co	废离子色谱柱、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	3.70E+09	0.5	12	4.44E+10	6	7.40E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	3.42E+08	1.5	12	4.10E+09	18	2.28E+05
	^{64}Cu	废离子色谱柱、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	4.44E+09	0.5	50	2.22E+11	25	8.88E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	1.15E+09	1.5	50	5.75E+10	75	7.67E+05

	^{67}Cu	废离子色谱柱、废PVC管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	2.96E+09	0.5	50	1.48E+11	25	5.92E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	1.79E+08	1.5	50	8.95E+09	75	1.19E+05
	^{89}Zr	废离子色谱柱、废PVC管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	7.04E+08	0.5	50	3.52E+10	25	1.41E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	1.92E+08	1.5	50	9.60E+09	75	1.28E+05
	^{99}Mo	废离子色谱柱、废PVC管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	2.96E+09	0.5	50	1.48E+11	25	5.92E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	1.40E+10	1.5	50	7.00E+11	75	9.33E+06
	^{99m}Tc	废离子色谱柱、废PVC管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	2.32E+09	0.5	50	1.16E+11	25	4.64E+06
	^{123}I	废离子色谱柱、废PVC管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	7.40E+09	0.5	50	3.70E+11	25	1.48E+07
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	3.75E+08	1.5	50	1.88E+10	75	2.51E+05
	^{124}I	废离子色谱柱、废PVC管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	1.48E+09	0.5	50	7.40E+10	25	2.96E+06
		废固体靶背、吸收废液的高分子材料	2.5E+08	1.5	50	1.25E+10	75	1.67E+05

	^{203}Pb	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	2.96E+09	0.5	50	1.48E+11	25	5.92E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	7.70E+09	1.5	50	3.85E+11	75	5.13E+06
	^{225}Ac	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	8.14E+06	0.5	12	9.77E+07	6	1.63E+04
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	7.25E+08	1.5	12	8.70E+09	18	4.83E+05
	^{226}Ra	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	5.00E+04	0.5	12	6.00E+05	6	1.00E+02
	^{18}F	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	2.96E+04	0.5	12	3.55E+05	6	5.92E+01
砹 ^{211}At 车间	^{211}At	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管等	7.40E+08	0.5	500	3.70E+11	250	1.48E+06
		废固体靶背板、吸收废液的高分子材料	3.71E+07	1.5	500	1.86E+10	750	2.48E+04
标记核素车间	^{177}Lu	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、吸收废液的高分子材料等	7.40E+09	0.5	50	3.70E+11	25	1.48E+07
	^{90}Y	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、吸收废液的高分子材料等	7.40E+09	0.5	50	3.70E+11	25	1.48E+07

	^{228}Th	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、吸收废	7.40E+08	0.5	50	3.70E+10	25	1.48E+06
	^{212}Pb	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、吸收废液的高分子材料等	7.40E+09	0.5	50	3.70E+11	25	1.48E+07
	^{125}I	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、吸收废液的高分子材料等	7.40E+08	0.5	50	3.70E+10	25	1.48E+06
	^{131}I	废离子色谱柱、废PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、吸收废液的高分子材料等	7.40E+09	0.5	50	3.70E+11	25	1.48E+07
二质检放化实验室	^{68}Ge	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	12	4.44E+08	1.2	3.70E+05
	^{68}Ga	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	12	4.44E+08	1.2	3.70E+05
	^{57}Co	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	12	4.44E+08	1.2	3.70E+05
	^{64}Cu	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{67}Cu	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{89}Zr	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{99}Mo	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{99m}Tc	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05

	^{123}I	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{124}I	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{203}Pb	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{225}Ac	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	12	4.44E+08	1.2	3.70E+05
	^{18}F	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{211}At	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	500	1.85E+10	50	3.70E+05
	^{177}Lu	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{90}Y	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{212}Pb	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{125}I	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
	^{131}I	废移液枪头、废试纸、废试管等	3.70E+07	0.1	50	1.85E+09	5	3.70E+05
通风系统废气排放口	各辐射工作场所涉及的核素	废过滤器	3.70E+08	442	1	3.70E+08	442	8.37E+02
各热室车间及实验室	各辐射工作场所涉及的核素	沾污的工作服、口罩、手套、抹布等	3.70E+07	1	50	1.85E+09	50	3.70E+04
各热室车间及实验室	含 ^{68}Ge、^{228}Th、^{57}Co、^{226}Ra 长半衰期核素	每次应急洗手废水采用吸水性极佳的高分子材料吸附收集	1.11E+08	12	12	1.33E+09	144	9.24E+03

备注：根据建设单位提供的资料，表中核素活度依据生产分离纯化工艺行业经验，且放射固废中核素按不衰变，热室车间内目标核素最多约有操作活度的 2%进入固体废物（废离

子色谱柱、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管中）考虑，另外废固体靶背板、转成固废的废液的活度保守考虑目标核素操作活度的 1‰以及表 3-14 生产目标核素副反应各杂质核素的总活度。^{226}Ra 回收工艺采用全流程密闭特有工艺操作，约 0.01%损耗进入固废。质检放化实验进入固废的核素活度保守取最大操作活度计。较短半衰期（≤59.4d）的固体废物体积约 3m^3/a，较长半衰期（＞59.4d）的固体废物体积约 1m^3/a。

4 辐射安全与防护

4.1 场所布局与屏蔽

4.1.1 场所布局

砹尔法公司厂址位于海盐县核技术应用（同位素）产业园内标准化一期工程2#厂房，建筑长58.8m（东西方向），宽39.4m（南北方向），屋顶高度23.15m，总占地面积1922.58m^2。2#厂房的入口位于一层东侧，2#厂房建筑共计地上四层，地厂房各楼层按功能分区，地面一层是生产区，包括回旋加速器机房、热室等主要的核素生产及成品包装区域；地面二层主要是放射性核素质检区，包括放化质检实验室、理化检验和微生物检验区等；地面三层预留的理化实验室仪器分析区，地面四层为办公区及会议室。另外，地下一层为园区停车场、消防水池和放射性废液衰变池间、放射性固体废物暂存库用房等，上述区域除了三侧和四层均涉及辐射工作场所。各层厂区平面布置示意图见图4-1~图4-5，立面图见图4-6。放射性废液衰变池间、放射性固体废物暂存库用房平面布置示意图见图4-10和图4-11。

4.1.2 辐射工作场所分区管理

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，将本项目辐射工作场所划分为监督区和控制区，具体分区原则如下：

控制区划分原则：应把需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射。确定控制区的边界时，应考虑预计的正常照射的水平、潜在照射的可能性和大小，以及所需要的防护手段与安全措施的性质和范围。对于范围比较大的控制区，如果其中的照射或污染水平在不同的局部变化较大，需要实施不同的专门防护手段或安全措施，则可根据需要再划分出不同的子区，以方便管理。

监督区划分原则：通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域定为监督区。在项目正常运行状态下，在此区工作的人员受到的照射剂量较低，能满足本项目对职业工作人员照射剂量的控制要求。

企业对本项目辐射工作场所分区图见图 4-7~4-8、图 4-10~图 4-11，本项目根据平面布置及放射性核素操作情况，企业将项目工作场所的控制区设置如下：一层两台回旋加速器机房内（含靶站）、热室操作车间（包括锗镓核素车间、诊断核素车间、砹 ^{211}At 核素车间及外购核素标记间）、成品包装间、外购核素存放间、放射性药物成品库；二层实验室区域，包括放化实验室、高纯锗能谱室、理化检验室和微生物检验区；地下一层本项目衰变池间用房和放射性废物暂存库用房。

企业将工作场所的监督区设置如下：一层两台回旋加速器机房的控制室及其他配套房间（包括配件间、设备间、水包装间），热室车间配套的卫生通过间（一更、二更、缓冲间、回更间等）、原辅料间，大厅进入后更衣室，仓库间及内部通道；二层出入口更衣室、卫生通过间（一更、二更）以及内部走廊等，地下一层本项目衰变池间用房和放射性废物暂存间用房四周通道。

其它区域：电井、水井和排烟井等公共设施，一层大厅（含电梯等），二层易制爆（制毒）试剂存放间、气瓶间、空压机房和危险废物暂存库等，三层预留理化实验室和四层办公、会议室区域等，以及厂房内其它非辐射工作场所，均不作为辐射工作场所管理。

控制区管理要求：各场所经授权的辐射工作人员在工作期间才能进入该控制区。控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标识，加速器防护门入口有工作状态指示灯，并安装安全联锁系统。辐射工作场所设有视频监控，进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人报警仪。热室非密封放射性物质工作场所进出口设置卫生通过间，开展污染监测并配备清洁和去污用品。

监督区管理要求：监督区入口处明显位置设置标识，监督区边界设置门禁系统，根据辐射工作人员的不同工种和管理权限才能进入相应的区域，进入监督区的人员要佩戴个人剂量计和个人报警仪。

综上，本项目辐射工作场所控制区和监督区分区合理，便于辐射防护管理和对职业照射控制。控制区和监督区都以实体边界划分，分区清晰。

图 4-1　2#厂房一层平面布置示意图

略

图 4-2　2#厂房二层平面布置示意图

略

图 4-3　2#厂房三层平面布置示意图

略

图 4-5　地下一层平面布置图（南部区域）

略

图 4-6　2#厂房剖面布置图（1-1）

略

图 4-7　2#厂房一层辐射工作场所分区及人员、物流路径示意图

略

图 4-8　2#厂房二层辐射工作场所分区及人流、物流路径示意图

略

略

图 4-9　地下一层放射性废水接管和放射性固体废物转移路径示意图

略

图 4-10　地下一层衰变池间布置及分区示意图

略

图 4-11　地下一层放射性固废暂存间布置及分区示意图

4.1.3 人流物流路径分布和合理性分析

本项目各场所中人流、物流路径规划如下，具体如下：

（一）2#厂房一层人流、物流路径规划

图 4-7 给出了 2#厂房一层人流、物流路径规划，由图可见，

辐射工作人员（加速器控制室操作）进入路线：一层东侧大厅监督区门禁→进入生产车间→男（女）更衣室→质子加速器控制室（或 α 粒子加速器控制室）。

辐射工作人员（加速器控制室操作）退出路线：质子加速器控制室（或 α 粒子加速器控制室）→沿通道至男（女）更衣室→一层东侧大厅离开。

辐射工作人员（热室）进入路线：一层监督区门禁→一层东侧大厅进入生产车间→男（女）更衣室→沿北侧人员通道分别进入不同车间热室→卫生通过间（一更）门禁→热室卫生通过间（二更）→热室卫生通过间（缓冲间）→热室操作区。

辐射工作人员（热室）退出路线：工作结束后辐射工作人员从热室操作区离开→热室卫生通过间（缓冲间）→热室卫生通过间（回更）→卫生通过间（一更）门禁→沿人员通道至大厅西侧男（女）更衣室→一层监督区人员进出门禁→进入大厅离开生产厂房。

外购放射性核素进入路线：热室工作人员从物流出入口取下外购核素包装箱→2#厂房西侧一层物流门门禁→沿南侧物流通道→运至外购核素存放车间。

放射性核素（成品）包装运出路线：热室工作人员从处理热室铅箱中取出放射性核素成品（铅罐）→热室核素传递窗口至成品包装间→剂量率和表面污染检测、清点、贴标签→工作人员将铅罐包装放入运输小车→沿车间南或北侧物流通道→物流出入口门禁→外部专业运输车运至客户。

放射性废物运出路线：热室产生的放射性废物和废弃样品→热室传递窗→沿车间南或北侧物流通道→2#厂房西侧一层物流出入口门禁→运往地下一层本项目放射性废物暂存库。

（二）2#厂房二层人流、物流路径规划

图 4-8 给出了 2#厂房二层人流、物流路径规划，由图可见：

辐射工作人员（实验室）进入路线：辐射工作人员至一层东侧大厅→坐客梯进入二层→二层监督区人员进出门禁→男（女）更衣室→沿二层北侧人员通道进

入卫生通过间（一更）→卫生通过间（二更）→进入微生物检验区域，或者沿二层北侧人员通道进入放化实验室区和理化检验室。

辐射工作人员（实验室）退出路线：辐射工作人员从微生物检验区→卫生通过间→沿北侧通道至男（女）更衣室→经门禁离开辐射工作场所→做客梯至一层离开，或者从放化实验区和理化检验室沿北侧通道至男（女）更衣室→经门禁离开辐射工作场所→做客梯至一层离开。

放射性核素质检路线：热室中生产的放射性核素质检样品在一层的路径与包装车间产品运输相同，其中将装有少量质检样品的装罐→通过包装车间传递窗口→送至一层西北侧货梯→货梯将核素（铅罐）传递至二层（人员不进入货梯）→二层实验室辐射工作人员从货梯取出铅罐→送至放化实验室→在通风柜内进行分装、稀释和留样等操作→质检实验室样品测量→样品在车间内存放至少 10 个半衰期或经检测基本无放射性→理化检验和微生物检验区样品分析。

放射性废物运出路线：二层实验室产生的放射性废物和废弃样品→南侧通道→二层货物电梯→2#厂房一层西侧物流出入口门禁→运往地下一层本项目放射性废物暂存库。

（三）2#厂房地下一层人流、物流路径规划

图 4-9 给出了地下一层放射性固体废物转移入库路径，由图可见，

放射性废物转移入库路线：人员将废物桶装运输小车出 2#厂房西侧物流门→往南运至地下一层入口→向东进入地下室→往南直走至规划放射性废物暂存库区域南侧→从南入口进入至本项目放射性废物库暂存内。

人流物流路径合理性分析

根据上述人流、放射性核素运输、放射性废物路径规划分析，本项目一层各核素生产场所的辐射工作人员通过门禁系统管理，加速器操作人员和热室操作人员之间人员不交叉。一层放射性废物和核素（成品）都是在热室内产生的，成品和废物在通过热室传递口进入通道运输路径虽有重叠，但通过错开运输时间，可以实现不同时段对成品和放射性废物的运输。

二层辐射工作场所，辐射工作人员是从东侧带门禁通道进出，放射性核素从场所西北部货物电梯运至二层。放射性核素在场所内的流动路径是先在放化实验室通风橱清点、核对，并在通风橱进行质检实验，以及开展后续理化检验和定期

微生物检验。实验结束后，由实验室辐射工作人员将放射性废物在各实验室内统一收集后，通过送至货梯至一层。放射性核素运输和放射性废物的运输由同一批辐射工作人员开展，通过时间错开，实现放射性核素流动的路径与放射性废物运输路径不交叉。

放射性固体废物转移入库路径虽为园区地下室其中一个入口，但转移期间会选择下班后园区内无高峰期人员时间开展，另外本项目不是每天进行转移，同时路径相对较短，入库时间不长，通过有效管控可以实现废物安全转移入库。

综上所述，涉放工作场所相对独立，可实现人流、物流互不干扰，既便于生产操作需求，又便于辐射分区管理和辐射安全防护。因此，从辐射防护和环境保护的角度而言，本项目生产厂房的平面布置合理。

4.2 屏蔽防护

4.2.1 设计目标

本项目辐射工作场所辐射水平限值设置如下：回旋加速器机房的屏蔽墙、防护门外剂量率不超过 2.5μSv/h。加速器机房顶部上方二层有人员居留，顶部屏蔽体 30cm 处辐射剂量率应低于 2.5μSv/h。

放射性核素接收和处理屏蔽体（含热室、手套箱和质检通风柜）外 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h。

非密封放射性物质工作场所，如核素生产车间、二楼质检车间、放射性废物暂存库用房、外购核素存放间的门或墙体外表面 30cm 处的辐射剂量率小于 2.5μSv/h。

4.2.2 屏蔽体设计

— 质子回旋加速器机房屏蔽设计

本项目建有 1 座质子回旋加速器机房，内部配套 4 个靶站，为整体浇筑的混凝土屏蔽体。4 个靶站分布在加速器机房的东北（T1 靶)、东南（T2 靶）、西北（T3 靶）、西南（T4 靶）四个方向，由束流传输系统与加速器相连。4 个靶站与加速器一同建设。

质子回旋加速器机房四侧屏蔽墙厚度均为 2.5m（混凝土密度 2.35g/cm^3，下同），顶部屏蔽墙厚度为 2.5m，底板厚度为 2.6m。防护门位于西侧墙，采用与西侧墙相同厚度的 2.5m 混凝土建造。

加速器产生的束流在靶站中打靶，设备开机时可以实现 2 个固体靶站 T1 和 T2 同时运行，也可以实现 T3 和 T3 液体靶站同时运行。四个靶站均设计为半包围混凝土墙隔间，墙体厚度均为 60cm，无独立防护门；T1 靶站和 T2 靶站的东侧墙体距离加速器机房东内墙 75cm，T1 靶站北侧墙和 T2 靶站南侧墙距离加速器机房北、南内墙均为 100cm，T3 靶站和 T4 靶站的西侧墙体距离加速器机房西内墙 100cm，T3 靶站北侧墙和 T4 靶站南侧墙距离加速器机房北、南内墙均为 120cm，靶站混凝土墙体高度 300cm，距离加速器机房内顶为 50cm。

另外，本项目 α 回旋加速器为内靶设置，无独立靶站，机房为整体浇筑的混凝土屏蔽体。机房北侧和西侧屏蔽墙厚度均为 2.0m（混凝土密度 2.35g/cm^3，下同），东侧和南侧屏蔽墙厚度均为 2.5m，且南墙与质子回旋加速器北墙共墙设置，顶部屏蔽墙厚度为 2.5m，底板厚度为 2.6m。防护门位于西侧墙，采用与西侧墙相同厚度的 2.0m 混凝土建造。

两个回旋加速器机房（含靶站）屏蔽设计参数见表 4-1，两个回旋加速器机房（含靶站）平面设计见图 4-12，立面设计见图 4-13。

每个回旋加速器机房设置 1 扇人员进出的防护门，防护门均采用与侧墙相同密度和厚度混凝土。防护门采用混凝土活塞式电动门，为了尽量降低射线在防护门门缝处泄漏，防护门与两侧墙体、顶部墙体为 3 层台阶式互相契合，间隙小于 5mm。防护门底部轨道铺设在地平面上，门与地面间隙小于 5mm，防护门内侧设置一道门槛（混凝土高度约 5cm），进一步降低底部门缝处的泄漏。

表 4-1　加速器屏蔽体参数一览表

机房	屏蔽体	材质、厚度	室内尺寸
质子回旋加速器机房	东侧墙体	250cm 混凝土	室内长×宽×高：1250×600×350（cm）
	西侧墙体	250cm 混凝土	
	北侧墙体（与 α 回旋加速器南墙共墙）	250cm 混凝土	

	南侧墙体		250cm 混凝土	
	顶部屏蔽体		250cm 混凝土	
	底部屏蔽体		260cm 混凝土	
	防护门		250cm 混凝土	
	T1 和 T3 靶站	隔墙	60cm 混凝土	高度 300cm
	T2 和 T4 靶站	隔墙	60cm 混凝土	高度 300cm
α 粒子回旋加速器	东侧墙体		250cm 混凝土	室内长×宽×高：750×650×350（cm）
	西侧墙体		200cm 混凝土	
	南侧墙体		250cm 混凝土	
	（与质子回旋加速器北墙共墙）		250cm 混凝土	
	北侧墙体		200cm 混凝土	
	顶部屏蔽体		250cm 混凝土	
	底部屏蔽体		260cm 混凝土	
	防护门		200cm 混凝土	

略

图 4-12　回旋加速器机房（含靶站）平面图　（尺寸单位：mm）

略

图 4-13 回旋加速器机房剖面结构图 （尺寸单位：mm）

一 加速器机房穿墙管道设计

本项目供电电缆、水管、通风、靶材传输等管线穿过屏蔽墙进出机房，主要采用斜穿、“Z”形、“S”形以及地埋管道“U”形穿过屏蔽墙，混凝土屏蔽墙中的射线经过 3 次及以上转折，防止射线在管道直穿屏蔽设施导致在管道开孔处发生泄漏。

两个加速器机房主要穿墙管线走向的示意图见图 4-14~图 4-25。

略

图 4-14　质子回旋加速器机房预埋管道立面示意图

略

图 4-15 质子回旋加速器机房电缆管道穿墙路径示意图

略

图 4-16　质子回旋加速器机房通风管道穿墙路径示意图

略

图 4-17 质子回旋加速器机房消防泄压管道穿墙路径示意图

略

图 4-18 质子回旋加速器设备供回水管道穿墙路径示意图

略

图 4-19　质子回旋加速器靶传输管线穿墙路径示意图

略

图 4-20　α 粒子回旋加速器机房预埋管道立面示意图

略

图 4-21　α 粒子回旋加速器电缆管道穿墙路径示意图

略

图 4-22　α 粒子回旋加速器通风管道穿墙路径示意图

略

图 4-23　α 粒子回旋加速器消防泄压管道穿墙路径示意图

略

图 4-24　α 粒子回旋加速器设备供回水管道穿墙路径示意图

略

图 4-25　α 粒子回旋加速器靶传输管线穿墙路径示意图

— 热室（或手套箱）屏蔽设计

本项目涉及放射性核素生产及分装工作在相应的热室（或手套箱）内进行，其中质子回旋加速器 T1 固体靶站生产的 ^{68}Ge 通过空中输送管线自动进入锗镓核素生产热室，根据工程分析，热室内生产线由 3 个相连的铅屏蔽体组成。T2 固体靶站生产的诊断核素通过空中输送管线自动进入诊断核素生产热室，T3 或 T4 液体靶站生产的 ^{18}F 通过地下管道自动传输至诊断核素热室，根据工程分析，热室内生产线由 2 个相连的铅屏蔽体组成。

α 粒子回旋加速器内靶生产的 ^{211}At 通过空中输送管线自动进入 ^{211}At 核素接收手套箱，根据工程分析，生产线由 2 个相连的手套箱屏蔽体组成。

放射性药物标记车间内设置单个铅屏蔽结构热室，操作面前区设置铅玻璃窥视窗。

热室/手套箱各主要屏蔽设计参数见表 4-2。

表 4-2 热室/手套箱的主要屏蔽设计参数

场所	箱体编号	尺寸：长×宽×高（cm)	屏蔽厚度（mmPb）					
			前面（含视窗铅当量）	背面	左侧壁	右侧壁	顶部	底部
锗镓核素车间	靶接收热室	160×222×310	150	150	150	150	150	150
	靶处理热室	160×222×310	150	150	150	150	150	150
	通风橱	155×65×310	50	50	50	50	50	50
诊断核素车间	靶接收热室	160×222×310	150	150	150	150	150	150
	靶处理热室	160×222×310	150	150	150	150	150	150
砹 ^{211}At 核素车间	靶接收手套箱	190×90×180（含 90 支撑高）	30	30	30	30	30	30
	标记分装手套箱	190×90×180（含 90 支撑高）	25	25	25	25	25	25

放射性药物标记车间	标记分装热室	160 × 222 × 310	60	60	60	60	60	60

备注：上述屏蔽体内外表面均包裹 2mm 不锈钢，其中锗镓生产车间、诊断核素车间和标记生产车间内热室内部净尺寸均为 130×130×130cm。

本项目一层热室或手套箱所在非密封工作场所的各房间四周墙体和门采用 50mm 彩钢板，顶棚和地面为 120mm 混凝土楼板。

— 放射性核素操作实验室屏蔽设计

二层实验室区域将本项目生产的各放射性核素送至各实验室内分别开展放化质检实验、理化检验和微生物检验。

其中放化实验室中设置 1 个通风柜，核素操作在通风柜内进行。通风柜外尺寸：长 1250mm×宽 900mm×高 2700mm，净空间：1050mm×850mm×800mm，通风橱设置为单个 2mm 不锈钢屏蔽体，柜内正面配备 20mmPb 当量铅玻璃屏。

实验室内各房间四周墙体和门采用 50mm 彩钢板，顶棚和地面为 120mm 混凝土楼板。

— 放射性产品包装屏蔽设计

砹尔法公司生产的放射性同位素产品，其产品货包按照《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）规定的 II 级 A 型货包（货包外表面任一点的辐射水平不超过 2mSv/h，β 表面污染不超过 4Bq/cm^2，α 发射体为 0.4 Bq/cm^2）进行包装和管理。货包内铅罐容器的屏蔽防护及产品规格见表 4-3。

表 4-3 放射性药品包装屏蔽设计

产品名称	物理性状	产品规格	防护设计
锗镓核素产品	液体	3.7×10^{9}Bq（每罐最大 100mCi）	40mm 铅当量圆柱体罐
诊断核素产品	液体	3.7×10^{9}Bq（每罐最大 100mCi）	40mm 铅当量圆柱体罐
^{211}At 核素产品	液体	3.7×10^{9}Bq（每罐 100mCi 和 50mCi）	2mm 铅当量 +2mm 不锈钢圆柱体罐
外购核素标记产品	液体	3.7×10^{9}Bq（每罐最大 100mCi）	40mm 铅当量和 20mm 铅当量圆柱体罐
锗镓发生器	固体	规格 1：3.7×10^{9}Bq（每柱 100mCi）	40mm 铅当量屏蔽体

		规格 2：1.85×10^{9}Bq（每柱 50mCi）	
钼锝发生器	固体	3.7×10^{10}Bq（每柱 1Ci）	20mm 铅当量屏蔽体

— 放射性废物暂存库屏蔽设计

本项目放射性废物暂存库房间面积约 115m^2，库墙体采用 12cm 钢筋混凝土加 5mmPb 当量硫酸钡涂料防护，入口防护门为 8mm 铅当量。房间内设置 4 个独立的带盖废物贮存箱（1#、2#、3#和 4#），每个箱体容积约 6m^3，箱体屏蔽采用不锈钢夹 2mm 铅板。

4.3 辐射安全与防护措施

4.3.1 加速器辐射安全与防护措施

4.3.1.1 安全联锁设计原则

安全联锁系统的设计，用于保护辐射工作人员的人身安全，避免加速器开机出束时人员受到意外照射。安全联锁的设计主要遵循以下原则。

（1）简单可靠：系统设计应在简洁基础上保证运行可靠性及稳定性。

（2）最优切断：当加速器处于“准备”或“运行”状态时，安全联锁系统在加速器中央控制系统联锁逻辑中具有最优先的权力切断加速器束流。

（3）失效保护：当安全联锁系统关键设备失效时，系统有相应的应急保护措施来保障工作人员的人身安全。

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

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

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

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

4.3.1.2 安全联锁设计

两座回旋加速器的安全联锁系统设计相似，均由门机联锁、急停开关、巡检开关、剂量联锁、声光报警、工作状态指示灯、光电联锁装置、控制系统开关等设备构成。逻辑控制系统实现对这些系统信号和设备的联锁控制，保障人员在控制区时加速器无法开机。安全联锁设计满足多元性、独立性、冗余性等原则。本项目两个加速器机房设计的安全联锁独立运行。

（1）急停开关

两个回旋加速器机房内侧四周墙面均设置 1 个按钮式急停开关，两个控制室操作台上均设置 1 个按钮式急停开关。按下急停开关后加速器立即停止出束。任何一处急停被触发，加速器都无法运行。急停开关不会自动复位，需要工作人员现场复位后才能再次开机。

（2）巡检开关

回旋加速器机房根据机房大小结构、人员清场巡逻路线设置巡检开关，质子加速器内侧四周墙面各设置 1 个，α 粒子加速器南北内墙各设置 1 个。辐射工作人员在开机前需要根据规定的路线，在规定时间内依次触发加速器机房内的开关后，才能开启加速器。防护门打开后，相应机房的巡检开关被复位，需重新巡检后才能开机，巡检后若没有在设定的时间内启动加速器，则需要重新巡检才能启动加速器。

回旋加速器开机出束前若无防护门开启记录则不需要巡检。巡检路径从室内至机房外口依次按下，未按规定的次序巡检，则设备也不能出束。

（3）门机联锁

每个回旋加速器机房的防护门与加速器束流同时联锁，防护门处于打开状态时，设备无法供束。每个回旋加速器在正常生产运行情况下，加速器不开启屏蔽门，只有在加速器例行维修、或者加速器出现故障，需要进行故障排除等情况下，需要开启加速器屏蔽门。

在设备开机状态突然打开任何防护门，则加速器立即停止供束并断高压。设备停机后，各防护门设置了延时安全联锁，延时的目的是使得通过通风和时间衰减，降低机房内的感生放射性及臭氧浓度。另外，按住开关开门按钮的同时，确保在关门过程中没有人员进入，以防夹伤人员。

（4）剂量联锁

每个回旋加速器机房内安装 1 套固定式剂量监测系统，配套 1 个固定式γ剂量和 1 个中子剂量探头。辐射剂量率测量结果可以实时显示在控制台上和机房外显示屏上，当加速器启动，室内剂量率高于预设阈值时（通常取 2.5μSv/h），加速器处于运行状态，防护门不能从外面打开，可以通过机房出口内侧开门开关打开（触发急停）或其它触发加速器急停的措施、控制室内操作停机后打开防护门。

（5）开门开关

每个回旋加速器防护门出口内侧设置 1 个开门开关，按下开门开关后防护门可以自动打开。

（6）工作状态指示灯

每个回旋加速器机房防护门外口侧墙上均设置工作状态指示灯，并与加速器出束联锁，加速器运行过程中，红灯闪烁；加速器停机，绿灯闪烁，待机过程黄灯闪烁。

（7）声光报警

每个回旋加速器机房内均安装声光报警，并与加速器出束联锁。在加速器开启出束前，警示灯亮起并伴随警报声（预备信号）提醒控制区内的人员尽快撤离，预备信号持续一段时间。

（8）光电联锁

每个回旋加速器机房内侧入口处各安装两道光电装置，并与加速器出束联锁，装置在活塞防护门关闭到位后被触发开启，当装置感应到有人移动时，自动停止加速器出束。需要辐射工作人员重新完成加速器机房内的巡检工作后，加速器方可再次出束。

（9）警告标志

在监督区入口处设置电离辐射警告标志和进入辐射工作场所的中文警示说明，每个回旋加速器防护门正面和附近侧墙醒目设置电离辐射警告标志。

（10）控制系统开关钥匙控制

本项目两台加速器系统将设置登陆页面，所有进行加速器操作的人员均将设置不同的登录名和密码，加速器对不同的用户开放不同的权限等级，当操作人员下达没有使用权限的加速器指令时，加速器将不会执行相应的指令。当登录加速

器主控制系统界面后才能进入出束参数设定程序。上述权限等级的防护效果，优于开关钥匙控制的防护效果。

根据上述安全联锁设计，每个回旋加速器安全联锁装置均正常有效时设备才能出束，若其中任意一项安全联锁装置无法工作或者旁路，设备均不能出束。当防护门打开后，在开机前，加速器工作人员需对现场进行巡检，依次按下巡检清场按钮后，方可关闭加速器防护门，防护门设有门机联锁，需关闭到位后方满足出束条件（该防护门一旦打开，再次开启加速器时需要再次进入机房开展巡检）。此时人员返回控制室，加速器操作人员通过其账号密码登陆控制系统后控制加速器出束。在加速器正常运行时，当急停按钮被按下、加速器门被意外打开、红外联锁被触动后，加速器停止出束。在加速器机房外部，只有机房内的剂量率低于设定的阈值，加速器机房的防护门才允许打开。出现异常情况时，可通过急停按钮、门机联锁或开门开关触发紧急停机动作，待异常情况解除后才可重新复位开机。加速辐射安全联锁遵循图 4-26 中的逻辑控制，安全联锁装置布设位置示意图见图 4-27 所示。

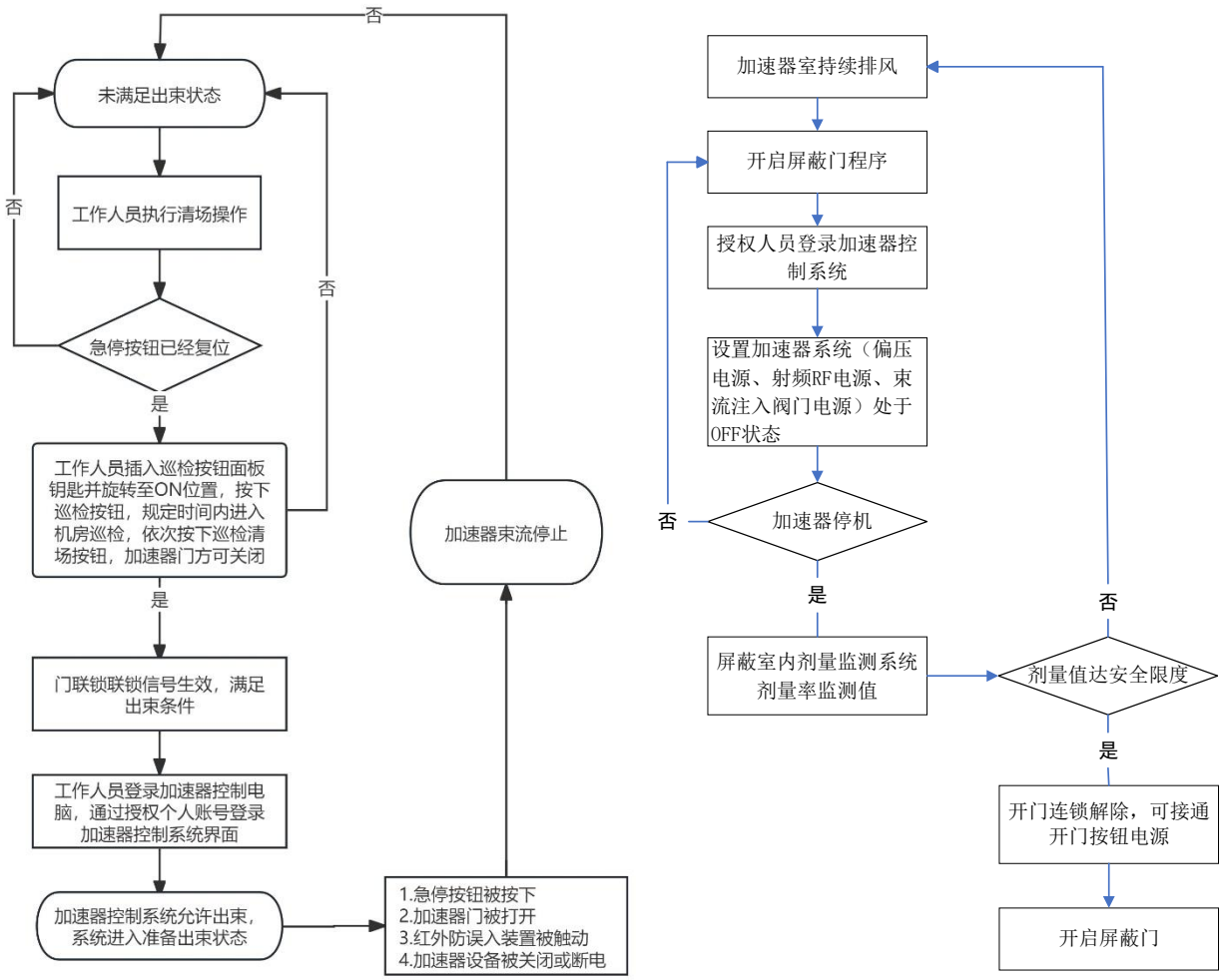


图 4-26　加速器安全联锁控制逻辑图

图 4-27　加速器机房辐射安全设施布设示意图

略

4.3.2 非密封工作场所辐射安全与防护措施

4.3.2.1 操作过程中的辐射安全与防护措施

本项目在操作非密封医用放射性同位素过程中，主要采取屏蔽以及合理的工作场所气流组织等辐射安全与防护措施。

（1）屏蔽措施

①非密封放射性物质接收、处理（含标记、分装等）操作均在屏蔽热室或手套箱内进行。其中热室均设计有机械手，通过窥视窗用机械手操作放射性物质。热室或手套箱的屏蔽设计（包括观察窗）可使操作人员所在的操作位的辐射水平满足辐射防护设计要求。

②生产的产品采用专用铅罐包装，产品铅罐的屏蔽设计在额定装载量情况下，铅罐外面的辐射水平满足《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）的相关要求。铅罐的屏蔽设计使放射性物质在转运过程中，对转运工作人员及涉及的公众的辐射水平满足辐射防护要求。

（2）气流组织

本项目两个回旋加速器机房内设计微负压（压差-5Pa），机房内气流采用 35%新风，65%循环风设计。

锗镓生产车间、诊断核素车间、砹 ^{211}At 车间以及核素标记车间的卫生通过间和热室操作区中设计气体压力最大房间为缓冲间（压差+25Pa），通过缓冲间往两边降低，即气流从缓冲间流向热室操作区，从缓冲间流向洁净走廊，确保热室操作区与外界保持负压，确保空气洁净度，二层放化质检实验室和高纯锗能谱实验室均设计微负压（压差-5Pa），上述车间均不设计回风，气体不循环，全部外排。

本项目车间气流走向和压差设计详见 4.4.1 节图 4-28 和图 4-29 通风路径示意图。

（3）辐射工作人员辐射防护措施

操作过程中辐射工作人员穿有洁净服、橡皮手套和防护口罩等个人防护用品，以减少放射性表面沾污和吸入途径照射。

本项目放射性核素使用过程拟在热室/手套箱/通风柜内进行，通风速率均不低于 0.5m/s，内部设置为负压环境，且设置了二级过滤系统吸附处理，可有效降

低工作场所空气中的放射性物质浓度，降低内照射对辐射工作人员的影响。人员在离开辐射工作场所前应洗手和进行表面污染检测，从控制区取出的物品应进行表面污染检测若污染水平，若沾污则采取相应去污措施，确保满足本报告表 1-4 中的要求。核素生产期间定期采用便携式气溶胶/碘取样装置对场所进行室内气溶胶/碘采样，并通过 γ 谱仪进行分析，若出现气溶胶异常应及时进行场所热室/手套箱密闭性或通排风系统排查，当发生过滤装置失效、通风系统失效或工作箱泄漏时候时，应及时组织人员对设备进行检修，并对室内放射性气溶胶/碘进行采样并监测，待维修正常且室内放射性气溶胶降低至本底水平后再开展工作。

当发生放射性物质泄漏、散落事故时，应根据公司制定的辐射事故应急方案，及时控制和消除放射性污染；当人员皮肤、伤口被污染时，应迅速去污并给予医学处理。

4.3.2.2 其他辐射安全与防护措施

（1）工作场所门禁管理

本项目与室外相连的大门均设有门禁报警系统和监控系统。

从一楼大厅进入放射性核素生产区域，从二楼进入核素质检区域，以及人员进入各热室卫生通过间一更入口处均安装门禁开关，有相应权限的辐射工作人员通过门禁权限进入工作区域。从辐射工作场所离开时，也要通过门禁记录相关信息。

门禁有专人授权管理，其他人员如有必要确需进入，则由辐射安全管理人员陪同。加强对进出人员进行管理，同时确保夜间照明并将监视报警系统与 24 小时值班的门卫联网。

（2）建设单位拟对外购放射性核素存放间、放射性药物成品库及放射性废物暂存间采取如下防护措施：

- 房间均设置防盗门，房间无窗设计；
- 房间均拟设置 24 小时持续有效的视频监控，并与监控室联网，录像可保存 30 天；
- 房间门均实施双人双锁管理，门外显著位置张贴电离辐射警告标志；
- 房间内均严禁贮存易燃、易爆、腐蚀性和其他危险废物，并配备干粉灭火器等；

- 建设放射性核素出入库登记制度，贮存、领取、使用和归还应及时登记、检查，做到账物相符，确保放射性核素安全保管；
- 建立放射性核素管理台账（外购核素、成品及废物），并由专人进行管理。对于放射性核素的来源和去向都有完整记录并长期保存，详细记录放射性核素的名称、重量、产生日期、责任人员、移交时间和监测结果等信息。

（3）运输过程的辐射安全与防护措施

本项目产品采用 A 型货包屏蔽容器，一般出厂货包分为三层包装结构，第一层为与放射性物料直接接触的储液瓶（罐），储液瓶（罐）口有密封胶塞并压有铝盖，在搬运过程中不会发生液体倾洒，第二层包装结构为屏蔽辐射照射的屏蔽铅罐，第三层包装结构为缓冲材料和外包装桶，起到保护屏蔽铅罐不受外力破坏的作用。货包准备好以后在装车前需对每个货包表面 γ 辐射剂量率和 α、β 表面沾污进行监测，并经监测达标后才进行装车，同时根据货包分级在外包装张贴标识。运输过程委托第三方有资质单位进行，并由第三方单位负责运输过程中的辐射安全。

4.3.3 辐射安全与防护措施要求对照分析

根据前述分析内容，并参考《加速器生产放射性同位素场所监督检查技术程序》（NNSA/HQ-08-JD-IP-008）、《放射性药物生产线监督检查技术程序》（NNSA/HQ-08-JD-IP-003）、《甲级非密封放射性物质工作场所监督检查技术程序》（NNSA/HQ-08-JD-IP-005）、《乙级非密封放射性物质操作场所监督检查技术程序》NNSA/HQ-08-JD-IP-006）和《操作非密封源的辐射防护规定》GB11930-2010）中关于非密封放射性物质工作场所的辐射安全防护设施监督要求，建设单位拟采取的辐射安全防护措施对照见表 4-4~表 4-6 所示。

表 4-4 加速器大厅（含靶站）辐射安全与防护措施要求对照表

序号	辐射安全防护设施检查项目		项目情况	备注
1*	A 工作指示和警示	入口处电离辐射警告标志	已设计	/
2*		入口有加速器工作状态显示	已设计	/
3*		灯光和声音报警指示装置	已设计	/
4*		门内紧急开门按钮（指示、说明）	已设计	/
5*		紧急出口标志及应急照明	已设计	/
6*		控制台和大厅门钥匙控制	已设计	/

7*	B 安全联锁	门与加速器束流联锁	已设计	/
8*		门与加速器高压触发联锁	已设计	/
9		辐射报警灯与加速器出束状态联锁	已设计	/
10*		辐射剂量与门联锁	已设计	/
11*		清场巡更系统与门连锁	已设计	/
12*		束流阻挡器位置与束流联锁	已设计	/
13		靶厅门与束流阻挡器位置联锁	已设计	/
14*	C 场所设施	控制台上有复位确认按钮	已设计	/
15		大厅内有清场巡更系统	已设计	/
16*		大厅内有紧急停机按钮	已设计	/
17*		按钮位置醒目及文字说明	已设计	/
18*		控制台有紧急停机按钮	已设计	/
19*		紧急停机按钮能自锁及复位	已设计	/
20*	D 监测设备	控制区内固定式辐射剂量监测仪	拟配备	/
21		气溶胶监测仪或采样装置	拟配备	/
.22		放射性气体监测仪或采样装置	拟配备	/
23*		个人剂量报警仪（γ）	拟配备	/
24*		个人剂量计（γ、中子）	拟配备	/
25*		便携式γ 剂量测量仪	拟配备	/
26		便携式表面污染仪	拟配备	/
27*	E 其他	强活化部件应有专门贮存容器和存放地点，容器表面应有电离辐射标志	已设计	加速器大厅内
28*		排风过滤净化系统	已设计	/
29		灭火器材	拟配备	/

注意：加*的项目是重点项。

表 4-5 甲级、乙级非密封放射性物质操作场所的辐射安全与防护措施要求落实对照表

序号	辐射安全防护设施检查项目		项目情况	备注
1*	场所设施	工作场所功能、设置及分区	已设计	/
2*		场所分区的管控措施及标识	已设计	/
3*		入口处电离辐射警示标志	已设计	/
4*		卫生通过间	已设计	
5*		通风系统完整性及效能	已设计	/
6*		工作箱或热室、密封箱室	已设计	/
7*		屏蔽防护设施	已设计	/
8		防过热或超压保护	已设计	/
9*		防止放射性液体操作造成污染的措施	已设计	/
10*		机械手或其它远离操作工具	已设计	/
11*		火灾报警仪	已设计	/
12*		放射性废水处理系统及标识	已设计	/
13*		放射性物料与成品暂存场所设施	已设计	/
14*		放射性固体废物暂存场所或设施	已设计	/
15*		安保设施	已设计	/
16		防火设备、应急出口	已设计	/
17*		人员出口污染监测仪	拟配备	/

18*	监测设备	固定式场所辐射探测报警装置	拟配备	/
19*		固定式或移动式气溶胶取样监测设备	拟配备	/
20		放射性液态流出物取样监测设备	拟配备	
21*		气载放射性流出物取样监测设备	拟配备	/
22*		便携式辐射监测仪	拟配备	/
23*		个人剂量计	拟配备	/
24		个人剂量报警仪	拟配备	/
25*	防护用品	个人辐射防护用品	拟配备	/
26*	应急物资	去污用品和应急物资	拟配备	/
27		合适的灭火器材	拟配备	/
28*		放射性同位素应急包装容器	已设计	/

注意：加*的项目是重点项。

表 4-6　与《操作非密封源的辐射防护规定》（ GB11930-2010）符合性分析

项目	标准要求	本项目执行情况	符合性分析
安全操作一般要求	为开展辐射防护管理工作并对职业照射进行控制非密封源工作场所应实行严格的分区、分级管理，分区、分级管理的措施，应遵循GB18871-2002的要求。	本项目各非密封放射性物质工作场所进行了控制区和监督区划分，具体见4.1.2章节。	符合
	宜在辐射工作场所的醒目位置悬挂（张贴）辐射警告标志,人员通行和放射性物质传递的路线应严格执行相关规定，防止发生交叉污染。应制定严格的辐射防护规程和操作程序。	项目拟在控制区和监督区出入口张贴辐射警告标志；项目设计合理的人流和物流线路，确保不交叉；项目拟制定辐射防护规程和操作程序。	符合
	操作非密封源的单位应制定辐射防护大纲并对其实施和评价负全面责任。单位应设立相应的安全与防护机构(或专兼职安全与防护人员),并用文件的形式明确规定其职责。	建设单位拟成立辐射防护与安全管理小组并拟成立专门的辐射安全部，设置专职辐射安全管理人员，明确辐射单位辐射安全管理责任，并拟制定辐射防护管理规程。	符合
	应建立安全与防护培训制度培植和保持工作人员良好的安全文化素养，自觉遵守规章制度，掌握辐射防护基本原则、防护基本知识及辐射防护技能。	建设单位拟制定辐射安全管理规章制度，承诺所有辐射工作人员均在进行辐射安全与防护学习考核合格后上岗，上岗前还将进行岗位培训，熟悉掌握辐射防护基本原则、防护基本知识及辐射防护技能。	符合
	辐射工作人员对某些操作程序必要时应事先进行模拟试验、冷试验、热试验，当熟练掌握操作技能后方可正式开展工作。	在进行高活度放射性物质操作时，建设单位将先进行模拟冷试验，以熟悉基本操作流程后再进行低活度放射性物质操作热试验，并验证各项操作参数正常后才进行最终的生产操作。	符合

	如果操作过程中发现异常情况，应及时报告，并分析原因，采取措施，防止重复发生类似事件。	后期运行过程若出现异常情况，建设单位将及时报告、分析原因、采取措施，防止重复发生类似事件。	符合
	应定期检查工作场所各项防护与安全措施的有效性，针对不安全因素制定相应的补救措施，并认真落实，确保工作场所处在良好的运行状态。	建设单位拟制定各项辐射安全设施设备的维护保养制度，定期对各辐射工作场所的辐射安全设施设备进行检查，发现问题及时整改，确保辐射安全设施设备的正常安全运行。	符合
安全操作条件	非密封源的操作应根据所操作的放射性物质的量和特性，选择符合安全和防护要求的条件，尽可能在通风橱、工作箱或手套箱内进行。	本项目生产线均设计了热室（或手套箱），质检实验室配备了通风橱，根据计算分析，各屏蔽设施满足防护要求，屏蔽体外辐射剂量率小于2.5μSv/h	符合
	操作过程中所用的设备、仪器、仪表、器械和传输管道等应符合安全和防护要求。吸取液体的操作应使用合适的负压吸液器械，防止放射性液体溅出、溢出，造成污染。储存放射性溶液的容器应由不易破裂的材料制成。	本项目拟采购符合安全和防护要求的设备、仪器、仪表、器械和传输管道；采用合适的负压吸液器械吸取液体；采用不易破裂的材料制成的容器储存放射性溶液。	符合
	有可能造成污染的操作步骤应在铺有塑料或不锈钢等易于去污的工作台面上或搪瓷盘内进行。	本项目热室或手套箱均为不锈钢工作台面，通风柜内设置有吸水垫纸和搪瓷盘。	符合
	操作中使用的容器，必要时应在其外面加一个能足以容纳其全部放射性溶液的不易破裂的套桶。	本项目放射性原料和放射性产品均外包有屏蔽铅罐，防止放射性溶液的破裂。	符合
	操作易燃易爆物质，或操作中使用高温、高电压和高气压设备时，应有可靠的防止过热或超压的保护措施，并遵守国家有关安全规定。	本项目核素操作过程中设置有屏蔽箱体（热室），防止事故状态下的放射性物质扩散。	符合
	伴有强外照射的操作,应尽可能缩短操作时间,利用合适的屏蔽或使用长柄操作机械等防护措施。	本项目放射性药物生产热室设置有长柄操作机械手，同时在操作过程中，辐射工作人员提前熟	符合

		悉操作工艺，并定期对操作规程进行优化，尽量缩短操作时间。	
	若需要进行开启密闭工作箱门放入或取出物品及其他危险性较大的操作时，应采取安全与防护措施，并在防护人员监督下进行。	产品从热室转移或废物转移时，安排1名辐射工作人员进行监督操作，操作人员和监督人员将配备个人剂量报警仪、便携式辐射监测仪对放射性物品或废物容器表面进行监测，同时在还安装有固定式场所辐射探测报警装置对该高剂量操作实时进行监测，当出现超标情况将进行声光报警。	符合
	进行污染设备检修时，应当事先拟出计划。主要的工作内容及采取的防护措施,经现场防护人员审查同意并落实辐射防护措施后方可进行。	建设单位拟制定设备检修规程，在进行污染设备检修时，建设单位专职辐射安全管理人员将进行现场监督，并进行辐射监测。	符合
安全操作 个人防护	辐射工作人员应熟练掌握安全与防护技能，取得相应资质。	建设单位拟制定辐射安全管理规章制度，承诺所有辐射工作人员均在进行辐射安全与防护学习考核合格后上岗，上岗前还将进行岗位培训，熟悉掌握辐射防护基本原则、防护基本知识及辐射防护技能。	符合
	辐射工作人员应根据实际需要配备适用、足够和符合标准的个人防护用具(器械、衣具)，并掌握其性能和使用方法。个人防护用具应有备份，均应妥善保管，并应对其性能进行定期检验。	本项目配备的个人防护用品包括：铅服、口罩、手套、洁净服、个人剂量报警仪、个人剂量计、便携式辐射监测仪和表面沾污仪等，同时建设单位还另行配备有备份防护用品，其中个人剂量报警仪、个人剂量计、便携式辐射监测仪和表面沾污仪等还将定期进行检验，确保其有效性。	符合
	在任何情况下均不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物件的操作。	本项目核素操作在热室或手套箱内，质检实验室使用通风橱操作，因此工作人员不直接接触	符合

		放射性物质或进行污染物件的操作。	
	辐射工作场所应根据所操作非密封源的特点配备适当的医学防护用品和急救药品箱，供处理事故时使用。严重污染事件的医学处理应在医学防护人员的指导下进行。	建设单位拟根据要求配备医学防护用品和急救药品箱，拟制定辐射事故应急预案，并明确提出医学处理的操作指南。	符合
放射性废物管理一般要求	放射性废物的管理应遵循GB18871-2002，GB14500-2002的相关规定，进行优化管理。应从源头控制、减少放射性废物的产生，防止污染扩散。应分类收储废物，采取有效方法尽可能进行减容或再利用,努力实现废物最小化。应做好废物产生、处理、处置(包括排放)的记录，建档保存。	建设单位拟制定操作规程，在操作过程中将尽量减少放射性废物产生，尽量实现废物最小化，同时建设单位拟制定放射性三废处理管理规程，建设放射性废物的管理台账，详细记录放射性废物的产生、处理和处置情况。	符合
放射性废水管理	操作非密封源的单位，一般应建立放射性废水处理系统，确保产生的废液得到妥善处理。不得将放射性废水排入普通下水道，相关控制应遵循GB18871-2002的要求，不允许利用生活污水下水系统洗涤被放射性污染的物品；不允许用渗井排放废液。	本项目已设计有独立放射性废水下水系统，项目运行过程中应急情形产生较短半衰期的放射性废水将通过管道后排入衰变水箱中进行衰变贮存。	符合
	废液应妥善地收集在密闭的容器内。盛装废液的容器除了其材质应不易吸附放射性物质外，还应采取适当措施保证在容器万一破损时其中的废液仍能收集处理。遇有强外照射时，废液收集地点应有外照射防护措施。	放射性废液暂存间内均采用不锈钢容器进行放射性废水收集，同时衰变水箱下方设置防渗收集池，以保证容器破裂时进行放射性废水的二次收集，同时放射性废水间四周及防护门均采取实体屏蔽措施以防止外照射。	符合

	经过处理的废液在向环境排放前，应先送往监测槽逐槽分析，符合排放标准后方可排放。	本项目收集的放射性废水贮存衰变一定时间后均将通过监测槽取样分析检测达标后进行排放。	符合
放射性固体废物管理	产生放射性固体废物较多的单位应当建立周体废物暂存库，确保储存的废物可回取。	本项目地下一层有放射性废物暂存库，用于放射性固废收集暂存，贮存衰变一定时间后经监测达到清洁解控水平后作为一般工业固体废物或危险废物进行处理，可以实现放射性废物减量化要求。	符合
	操作非密封源的单位产生的废物(包括废弃的放射源)，应按要求送指定的废物库暂存。送贮的废物应符合送贮条件。		符合
	对于半衰期短的废物可用放置衰变的办法，待放射性物质衰变到清洁解控水平后作普通废物处理，以尽可能减少放射性废物的数量。		符合
放射性废气管理	对工作场所放射性废气或气溶胶的排放系统，应经常检查其净化过滤装置的有效性	本项目热室车间和质检实验室均设置有独立排风系统，运行过程中产生的放射性气溶胶均在过滤后引至屋面的排气筒排放，同时建设单位拟制定设备维护维修制定，确保其运行有效性，同时拟配备移动气溶胶采样设备，定期对辐射工作场所内进行气溶胶监测，各废气排放口还设置气溶胶采样口，每年进行一次放射性气溶胶监测。同时在气载流出物排放口设置在线监测系统。	符合
	凡预计会产生大量放射性废气或气溶胶而可能污染环境的一次性操作，亦应采取有效的防护与安全措施和监测手段。		符合
非密封放射性物质的管理	操作非密封源的单位应配备专(兼)职人员负责放射性物质的管理，应建立非密封放射源的账目(如交收账、库存账、消耗账)，并建立登记保管、领用、注销和定期检查制度。	外购同位素进厂后将先进行台账登记，同时还应建立成品的台账制度，建设单位还将定期对台账进行核查。	符合

	非密封放射源应存放在具备防火、防盗等安全防范措施的专用贮存场所妥善保管,不得将其与易燃，易爆及其他危险物品放在一起。	本项目设置有独立的成品包装间及药物成品库，不存放易燃、易爆及其他危险物品。	符合
	辐射工作场所贮存的非密封放射源数量应符合防护与安全的要求，对于不使用的非密封放射源应及时贮存在专用贮存场所。	使用剩余的放射性原料在每日生产结束后及时返回至外购核素存放间，不在热室内暂存。同时放射性原料的领取、返回均将进行台账记录。	符合
	贮存非密封放射源的保险橱和容器在使用前应经过检漏。容器外应贴有明显的标签(注明元素名称、理化状态、射线类型、活度水平、存放起始时间和存放负责人等)。	所有存放放射性核素的容器明显位置标注有名称、理化状态、射线类型、活度水平、存放起始时间和存放负责人等信息。	符合
	存放非密封放射源的库房应采取安保措施严防被盗、丢失。	外购核素存放间、成品包装间及药物成品库设置有监控摄像头和防盗报警装置。	符合
	应定期清点非密封放射源的种类、数量、做到账物相符。工作人员如发现异常情况应按相关规定及时报告。	建设单位将每月进行一次放射性物料清点，并进行核算，做到账物相符，发现异常将及时报告。	符合
	应做好非密封放射源的领用和注销工作领用人一般应做到：①掌握辐射防护基本知识；②履行登记手续、按期归还；③不允许擅自转借；④用毕办理注销手续	建设单位拟制定非密封放射性物质管理规程，明确管理要求，落实专人（辐射工作人员）进行放射性物料的管理，并在实际工作中落实台账管理管理要求。	符合

4.4 放射性三废的治理

4.4.1 放射性废气处理措施

回旋加速器运行时，室内空气通过热中子俘获、(p，n)、(α，2n)反应和散裂反应而被活化，产生的核素主要包括 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和少量的 ^{7}Be、^{37}Ar 和 ^{41}Ar 。

本项目估算了加速器运行时机房内空气活化产生的主要放射性核素活度浓度，具体见第 3 章。质子加速器机房通风换气率不低于 8 次/h（排风量 3210m^3/h），α 加速器机房通风换气率不低于 8 次/h（排风量 2276m^3/h），采取较高的通风换气频率、提高空气流通速度，保持室内负压，降低空气中感生放射性活度。

为了减少放射性气溶胶排放环境后对周围公众的辐射影响，砹尔法公司委托专业单位设计和安装高效过滤装置。

加速器机房内的废气经两个独立的排风管路分别引至四楼楼顶，同时为防止打靶期间可能产生极少量放射性气溶胶，排风管道经过一层楼层夹层（设备层）处设有废气过滤净化系统，包括 1 套高效过滤器（过滤效率≥97%）和活性炭过滤器（过滤效率≥99.9%）组合系统，2 个排放口均高出屋面 3 米，排风口处设置取样检测口。日常运行期间厂内辐射工作人员不进入加速器机房内，定期检维修工作委托设备生产单位的专业技术人员开展工作，尽量减少因进入高辐射剂量场所受到加速器长期运行后室内感生放射性气溶胶的吸入内照射和空气浸没外照射。

本项目锗镓核素车间、诊断核素车间、砹 ^{211}At 核素车间以及核素标记车间的热室（或手套箱）内废气单独收集，收集后与各自车间场所其他区域的排风汇总排入一根主排风管道，各排风支管在汇入主排风管道前均设有电动球阀，当热室（或手套箱）不启用时，各电动球阀均处于关闭状态，确保各热室间以及热室与其他区域不会造成交叉污染，汇总的 4 根主排风管道分别引至四楼楼顶，四个车间分别设置 1 根主排风管道，在各主排风管道经过一层楼层夹层（设备层）处设有废气过滤净化系统，其中锗镓生产车间排放的废气设置 1 套高效过滤器（过滤效率≥97%）和活性炭过滤器（过滤效率≥99.9%）组合系统，其余诊断核素车间、砹 ^{211}At 车间以及核素标记车间生产的核素中由于有 ^{123}I、^{124}I、^{125}I、^{131}I、^{211}At 等核素，具有一定挥发性，因此在过滤系统中设置 1 套高效过滤器（过滤效率≥97%）和高效碘吸附器（为浸渍活性炭，吸附过滤效率≥99.5%）组合系统进行处理后排入环境中，4 个排放口均高出屋面 3 米，排

风口处的风机风量分别约为 5998m^3/h、5828 m^3/h、5503 m^3/h 和 5805 m^3/h，排风口处均设置取样检测口。

本项目外购核素存放间设计为微负压环境（压差-5Pa），该存放间内不涉及核素实验操作，但建设单位从辐射安全考虑，顶部同样设置 1 根独立排风管道独立引至四楼楼顶，排风管道经过一层楼层夹层（设备层）设有 1 套高效过滤器（过滤效率≥97%）和活性炭过滤器（过滤效率≥99.9%）组合系统，排放口均高出屋面 3 米，排风口处风机风量为 980m^3/h，排风口处设置取样检测口。

二楼放化实验室通风柜与能谱室的排风汇总后排入 1 根主管管道，排风管道在汇入主排风管道前均设有电动球阀，主排放管道经过一层楼层夹层（设备层）设置 1 套高效过滤器（过滤效率≥97%）和高效碘吸附器（为浸渍活性炭，吸附过滤效率≥99.5%）组合系统，排放口高出屋面 3 米，排风口处风机风量为 2200m^3/h，排风口处设置取样检测口。

需要说明的是，阳性对照实验由于涉及到菌株操作（属于非放射性操作），从生物安全及防止交叉污染方面，需要对阳性对照实验进行独立排风，管路经过一层楼层夹层（设备层）高效过滤器和活性炭过滤器后引至屋顶，排放口均高出屋面 3 米，排风口处风机风量为 860m^3/h。

综上，本项目在楼顶西部共设置 9 个独立排放口，其中 8 个排放口对应的场所涉及放射性物质，每个排风口东西两两相邻布置，排风路径及排放口位置示意图见图 4-28~图 4-30。

放射性废气经上述处理后，可有效减少本项目辐射工作场所排放的放射性气溶胶。经预测计算，因此本项目通风系统的设计和废气排放的方式是可行的，少量放射性核素排放对周围公众的辐射影响较小。

另外，建设单位需定期对通排风系统管道及净化系统设施设备进行检修和维护，并建立设施设备维护台账，定期安排厂家进行过滤效率检定和更换（至少 1 年 1 次），并将更换下的滤芯收集暂存至废物暂存库；为尽量减小公众不必要的照射，建设单位应对各排放口进行信息标识，并对废气排放口楼顶进行封闭管理，除监测采样、设备维护、检修等特殊情况外，禁止人员在楼顶长期居留。

4.4.2 放射性废水处理措施

（1）加速器冷却水

本项目质子加速器系统中冷却水总水量为 500L，α 粒子加速器系统中冷却水总水量为 400L，合计共有 0.9m^3 的去离子水，闭式循环不排放。

冷却水系统设有流量监控系统，发现流量异常应立即停止加速器工作。在每个加速器机房内泄漏的冷却水经地面预埋管道排放至放射性衰变池间本项目预留的 1 个专用储水箱（容积 1.5m^3）中。根据 3.4.2 章节的分析，经预测本项目两台加速器长时间运行，冷却水活化程度均较低，且活化产物大多数为短半衰期核素，经委托监测若满足排放要求后可以作为普通废水排放至园区管网。

（2）生产工艺放射性废水

根据 3.5.2 节可知，本项目收集的放射性废水一是来自一层热室（或手套箱）靶溶解及分离提纯处理过程中使用后的各种化学试剂，含各种放射性核素，合计约年产生量 25.24L，二是来自二层实验室质检放射性样品分析过程年产生废水 1.296L，三是来自于沾污事故情况下应急冲洗的废水，包括较长半衰期核素（半衰期＞59.4d，主要是 ^{68}Ge、^{57}Co、^{228}Th 和 ^{226}Ra）的放射性废水年最大产生量约 144L 以及其余短半衰期核素（半衰期≤59.4d）的冲洗废水年最大产生量约 1440L。

上述废水中一层热室内含放射性核素的废水因量相对较小，但成分较为复杂，建设单位拟将其作为放射性固体废物收集，即将每个热室（手套箱）内实验期间产生的放射性废水通过装有吸水性极佳的高分子材料吸附后放入相应的铅废物桶内，定期转移至地下一层放射性废物库进行衰变贮存，具体要求详见 4.4.3 节固废处置措施。

二层实验室质检放射性样品分析过程年产生废水水量很小，建设单位拟采用吸水试纸吸收擦拭后转化成放射性固废置于铅废物桶中，定期通过铅桶转移至地下一层放射性废物库进行衰变贮存，具体要求详见 4.4.3 节固废处置措施。

在一层每个车间回更间设置两套洗手池：其中应急冲洗时含较长半衰期核素（不同种类核素，不同时生产）的放射性废水通过回更间独立的一套专用洗手池下方水管收集至两级包容专用容器，第一层为防渗、防酸碱的塑料桶，每次收集时桶内装有吸水性极佳的高分子材料，第二层为铅屏蔽桶，待废水装入后采用密封条进行二次密封，定期转移至地下一层放射性废物库进行衰变贮存，具体要求详见 4.4.3 节固废处置措

施。另外一套洗手池专用于其它较短半衰期核素应急冲洗废水，通过回更间洗手池下方管道拟直接排入地下一层放射性废水衰变池间的水箱；二层在放化实验室内同样设置两套洗手池，按照上述一层车间的方式分别收集较长和较短半衰期的核素。两套洗手池安装在不同位置，并标识明显区分，以防误用混淆；当手部去污操作时，辐射管理安全员在一旁履行监测、监督责任，确保去误操作符合管理制度要求。

本项目地下一层衰变池间内每个衰变池水箱设计容积为 3m^3，为三个并联设计的衰变池水箱（4mm 组合式不锈钢，并采用 1mm 铅板防护层），共 9m^3。该衰变池系统设计如下功能：配置一台人机界面全面人机触摸屏实现对设备所有工况监视及控制，控制放射性废液入池、衰变、取样、监测、排放的全过程，设置辐射剂量监测装置、废液取样测量系统，可控制取样或每次排放取样测量。系统可自动保存排放剂量、取样记录、异常记录、操作记录等。可切换手动排放模式，同时配置人工取样口，方便监管部门取样分析。

当放射性废水从降解槽首先进入一号池，此时，另两个水箱进水口和三个水箱的出水口全部处于关闭状态。当第一个衰变池液面达到设定液位时，关闭一进水阀，第二个池的进水阀门开启，污水进入二号池。当二号池液面达到设定液位时，关闭二号进水阀，开启三号池进水阀，当三号池水液面达到设定液位时，一号池排水阀开，排水泵工作。当液位传感器感知到一号池液位排空后，关闭三号池进水阀，同时打开一号池进水阀；当一号池第二次感知到液位达到设定液位时，二号排水阀开启，同时排水泵工作；当感知到液体已排空后，二号排水阀关闭，一号进水阀关闭，二号进水阀打开；如此循环，确保每次排放的槽体内废水都是贮存时间最长的。

当需要对指定放射性废液暂存箱内废液进行取样分析时，开启对应的取样阀，启动排放泵，通过设置在排放泵出口管上的取样阀取样。取样结束后关闭取样阀。若监测结果满足排放标准限值要求（总 α 排放标准：1Bq/L；总 β 排放标准 10Bq/L），启动排放泵将废液排放。当衰变水箱的液位下降至低限时系统自动连锁停泵，关闭出口阀。

以保守每年产生 1440L 较短半衰期核素（半衰期≤59.4d）的应急废水量估算，10 个半衰期后（即 594 天）放射性废水衰变池内废水量约 2.3m^3，不超过单个衰变池容积 3m^3，衰变池设计有充分的余量，可以满足各水箱交替使用的容积需求；同时，

按照全部进入衰变池核素为 ^{125}I（半衰期 59.4d）计，经计算其排放时总 α 和总 β 均小于 0.001Bq/L，满足分别 1Bq/L 和 10Bq/L 排放限值要求，在放射性废水在排放前委托有资质单位进行监测，并在监测达标后（总 α≤1Bq/L，总 β≤10Bq/L）接入园区污水管网外排。因此，本项目衰变池的设计满足排放要求。

实际运行过程中，根据进入衰变池的应急废水核素半衰期长短进行管理，参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）第 7.3.3 条规定，若均为半衰期均小于 24 小时的核素，则在衰变池水箱暂存时间超过 30 天后可直接解控排放；若半衰期在 24 小时至 59.4 天的核素，则在衰变池水箱暂存时间超过 10 倍最长半衰期后，监测结果（满足总 α≤1Bq/L，总 β≤10Bq/L）且经审管部门认可后，按照 GB 18871 中 8.6.2 规定方式进行排放至市政污水管网。

建设单位应严格建立放射性废水管理台账，安排专职人员进行管理，同步记录每次排放时间、排放量及监测结果情况，并妥善保管。

本项目一层和二层辐射工作场所放射性废水排放管道路径图见图 4-31、图 4-32，本项目衰变池间废水排放管道路径示意图见图 4-33 所示。

略

图 4-28 一层核素生产区域排风管道路径示意图（含气流走向）

略

图 4-29 二层核素生产区域排风管道路径示意图（含气流走向）

略

图 4-30 楼顶排风管道路径及排放口位置示意图

略

图 4-31 一层放射性废水管道路径置示意图

略

图 4-32 二层放射性废水管道路径置示意图

4.4.3 放射性固废处理措施

根据 3.5.3 节，本项目放射性固体废物主要来自废固体靶金属背板、废分离色谱柱、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管以及废滤材，以及放射性废水吸附转成放射性固体管理的废弃物等。

加速器每次维护产生的活化部件，由厂家工作人员直接放入机房内铅罐；废固体靶件、废分离纯化树脂、废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管在每次生产结束后收集至各自热室内下沉式铅桶，不同核素废物先按分类装塑料袋，再放入铅桶中；废高效滤芯和废活性炭等滤过材料在塑料袋密封后放入专用转移铅箱；少量放射性核素工艺废水和质检过程中产生的废水通过吸附、擦拭等方式转为放射性固体废物收集，再密封盖紧，防止运输和贮存过程中发生泄漏。

根据《放射性废物分类》和《核技术利用放射性废物最小化》（ HAD4011-2020），本项目产生的放射性固固体废物均属于可压缩、非感染性废物，根据项目实际产生核素种类按核素半衰期可分为：A 类放射性固废（半衰期≤24h）、B 类放射性固废（半衰期＞24h 且≤59.4d）和 C 类固废（半衰期（含子体核素）＞59.4d）。本项目场所产生的放射性固体废物，分别收集进入专用的铅废物桶后定期通过专用运输小车推送至放射性固体废物暂存库存放。

建设单位拟将 A 类固废和 B 类固废分别存放在 1#和 2#贮存箱，A 类固废暂存衰变 30 天，经委托资质单位监测达到清洁解控水平（辐射剂量率满足所处环境本底水平，α 表面污染小于 0.08 Bq/cm^2、β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2），根据其特性分别作为一般固废或危险废物处置；B 类固废如 ^{124}I、^{89}Zr，碘 ^{124}I 等，暂存衰变 10 倍半衰期（固体废物包中所含最长半衰期核素），经资质单位监测达到清洁解控水平，根据其特性分别作为一般固废或危险废物处置；本项目较短半衰期（≤59.4d）的固体废物体积约 3m^3/a，在 10 个半衰期后贮存体积约 6m^3，2 个贮存箱共 12 m^3 能满足较短半衰期固体废物存贮使用要求；C 类固废存放在 3#、4#贮存箱，主要存放包括 ^{228}Th、^{68}Ge、^{226}Ra、^{57}Co 核素废物，固体废物体积约 1m^3/a，2 个贮存箱共 12 m^3 能满足较长半衰期固体废物约 12 年存贮使用要求。

其中上述固废中达到清洁解控的废高效滤芯、废活性炭属于危险废物中 HW49 其他废物，危险废物代码 900-041-49，交由有资质单位处置。解控的质检环节放射性固

体废物中沾染试剂的实验废物（废 PVC 管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、废手套、质检工序微生物实验产生的实验组灭活培养基等）和检测废液，均属于危险废物中 HW49 其他废物，危险废物代码 900-047-49，交由有资质单位处置。

另外为了满足入驻产业园内各企业生产过程中产生的放射性废物的处理要求，产业园目前已完成“海盐核技术应用产业园放废收贮中心项目”的立项申请（项目代码：2404-330424-04-01-615016），建设地点位于秦山街道同核路东侧，建筑面积 5070m^2，预计 2026 年 12 月建成，目前正在办理环评手续。当产业园放废收贮中心项目建成后，可满足全省核技术利用单位每年产生约 10t 长半衰期放射性废物收贮暂存。由于产业园放废收贮中心距本项目场址较近，且设计收贮量远大于本项目需送贮的放射性废物产生量，当本项目产生的放射性废物中较长半衰期核素因衰变达不到清洁解控要求且达到一定量后，建设单位根据需要与产业园放废收贮中心的运营单位签订放射性废物收贮协议，将在地下一层废物库贮存衰变达不到清洁解控要求的放射性废物委托运营单位送至产业园放废收贮中心进行处理。

需要说明的是，在项目运行前期由于使用核素种类和废物量较少，为缩短短半衰期放射性固废的衰变、解控周期，建设单位拟将按不同核素种类进行分类收集贮存，贮存箱数量完全满足贮存、衰变需求，后期运行期若使用的核素种类数量及废物量较多时，A 类和 B 类废物可以统一收集后在一个贮存箱内存放衰变，对于 C 类废物仍然按核素种类进行分类收集贮存。

本项目放射性废物暂存库统一由建设单位辐射工作人员负责登记和安全保卫工作，设置放射性废物进出库台账、处置台帐，做好日常记录。明确放射性废物的来源、去向及监测结果，安排专职部门或人员进行管理，放射性固体废物在封存衰变过程应注明固废的废物类型、核素种类、比活度水平和存放日期等信息。建设单位应定期对放射性废物产生环节进行审查，制定废物最小化大纲，采取工艺、设备、产品方案优化方案，从源头减少放射性废物产生量。

建设单位应参考《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 88-2021）相关要求，对上述废物贮存时采取以下措施：

①放射性固废暂存间不得存放其他易燃、易爆、易腐蚀危险物品，对于含尖刺及棱角的放射性废物，应预先进行包装处理，再装入废物桶，防止刺破废物袋。

②放射性废物每袋重量不超过 20kg，装满废物的塑料袋应密封后及时安排转送至放射性废物暂存库贮存。

③固体放射性废物收集桶通过增加相应屏蔽措施以保证其外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。

④暂存过程，不能解控的放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 4 Bq/ cm^2、以及其他 α 发射体应小于 0.4 Bq/ cm^2。

综上，采取上述处理措施后，本项目放射性固体废物处置措施满足相关标准要求。

4.5 服务期满后的环境保护措施

砹尔法公司现有的辐射安全管理机构负责本项目退役前、退役过程中以及退役后的辐射安全管理工作。

退役前，砹尔法公司将按照相关法律法规要求编制项目退役环境影响评价文件，送有关部门审批；退役过程中，按照相应程序和要求办理退役手续，经审管部门批准后实施退役。辐射工作场所中各类设施和设备经检测满足相关标准，经审管部门批准后工作场所才可清洁解控。对无法达到解控水平的设施、设备需先进行去污工作，对无法去污可以就近送至海盐核技术应用产业园放废收贮中心暂存。

退役期间，做好安全保卫工作，禁止与退役无关的人员进入机房辐射工作场所，通过划定区域、安排人员值守、实施放射性废物管控等环境保护措施，确保退役人员和周围公众安全。

5 环境影响分析

5.1 建设阶段环境影响分析

本项目所在场所为海盐县核技术应用（同位素）产业园标准化厂房一期工程 2#厂房，由产业园统一建设，目前基本完成大楼框架结构的土建施工，本项目厂房内部装修、加速器安装调试、辐射工作场所及配套设施的建设和装修尚未进行，预计历时半年完成，施工期对周围的大气环境、水环境、声环境等产生一定的影响。

5.1.1大气环境影响

施工过程产生的废气主要为土方开挖、土方运输、施工材料装卸过程中产生扬尘，各类施工机械运行排放的尾气等。

（1）施工期扬尘

根据施工期工程特点，该建设项目施工期的土方开挖、土方回填、土方运输、施工材料装卸、混凝土水泥砂浆的配置等施工过程都会产生大量的粉尘，施工场地道路与砂石堆场遇风亦会产生扬尘，搅拌车辆和运输车辆往来也会造成道路扬尘，因此会对周围大气环境产生影响，主要污染因子为 TSP。

建筑物主体结构施工期和装修工程期间，主要是装卸建筑材料和搅拌水泥灰浆的过程中易产生粉尘，此外，在大风天气下，建筑材料的堆积也会产生扬尘。但与施工前期的土石方工程相比，这个过程中产生的粉尘较少，主要集中在施工场区范围内，在同样路面清洁情况下，车速越快，扬尘量越大，而在同样车速情况下，路面清洁度越差，则扬尘量越大。根据类比调查，一般情况下，施工场地、施工道路在自然通风作用下产生的扬尘所影响的范围在 200m 以内。

建设单位在施工过程中，应严格按照相关环境保护法律法规、标准规范要求进行，主要做好以下防护措施：

①施工工地做到六个百分百，即：实现施工现场 100%围挡、工地场路 100%硬化、工地砂土 100%覆盖、运输车辆 100%冲净密闭、外脚手架密目式安全网 100%安装、拆除工程 100%洒水作业。

②施工工地按照规定设置围挡，严禁敞开式作业，围挡、场内主要道路等区域设置降尘系统，抑制施工扬尘；

③施工现场出入口、场内主要道路、主要材料加工和堆放区域、现场办公区等必须采用混凝土硬化或硬质材料铺设，每天进行洒水降尘，保持路面湿润、清洁。）施工现场出入口配备车辆冲洗设施，设置排水、泥浆沉淀池等设施，建立冲洗制度并设专人管理，严禁车辆带泥上路；

④容易产生扬尘的建筑材料，采取密闭存储、设置围挡或堆砌围墙、覆盖防尘网或者采用防尘布等，配合定期洒水等其他防尘措施；

⑤在建建筑物正常施工阶段采取密目网进行封闭，减少主体作业产生的扬尘飘散，主体结构施工产生的建筑垃圾严禁高空抛物和焚烧；

⑥在施工现场设置独立的建筑垃圾（工程渣土）收集场所，建筑垃圾在 48 小时内不能完成清运的，采取覆盖或洒水等措施，工地建筑垃圾（工程渣土）运输单位的车辆密闭不严、土石方高度超过车厢挡板、冲洗不净的，一律不得驶离施工现场；

⑦使用预搅拌混凝土，减少扬尘的产生，尽量避免在大风天气下进行施工作业。

该建设项目施工期的扬尘污染属于局部和短期的影响，建设单位在施工期间采取有效的防尘、降尘措施，及时开展处理措施，扬尘污染对所在地大气环境影响较小。

（2）机械设备尾气

机械设备尾气主要来自于施工机械和交通运输车辆，排放的主要污染物为 NO_X、CO 和碳氢化合物等，会对当地的空气环境产生一定的负面影响。施工机械废气属于间断性无组织排放，特点是排放量小，废气产生量和施工机械的选用、机械性能和维护水平有关。建设单位应定期检修机械设备，使其能够正常运行，提高设备利用率，同时机械设备尽量采用环保型的能源，由于使用期相对较短，在室外施工场地稍有风速扩散条件良好的情况下，尾气中的污染物扩散较快，对所在地的空气环境影响较小。

5.1.2水环境影响

项目施工期的废水主要来源两个部分：一是施工人员产生的生活污水；二是建筑施工产生的生产废水。

（1）生活污水

施工人员将产生少量生活污水，本项目施工人员不在场地内临时居住，施工场地设工地临时移动厕所，定期委托专业清掏公司清理；施工人员少量洗手盥洗废水直接泼洒抑尘。

（2）施工废水

施工期水污染主要来源于桩基基础施工中排出的泥浆、机械冲洗，地面和墙面冲洗、材料的冲刷等，该部分废水中的主要污染物为 pH、SS、COD、石油类等。为防止施工废水对项目所在区域地表水环境造成影响，企业应采取以下污染防治措施：

① 施工场地附近设置临时沉淀池，施工废水经沉淀后用于工地洒水和车辆冲洗。

②施工机械和车辆冲洗废水含有少量油污，修建简易隔油池及配套排水沟，污水经隔油处理后经排水沟引入沉淀池处理后回用，废油委托有资质单位处置。

本评价报告要求在项目施工过程中产生的废水严禁以任何形式直接排入周边河道及海湾。在采取以上防治措施后，本项目施工期废水可实现循环利用，对地表水和地下水环境影响较小，且随着施工期的结束，污染情况随之结束。

5.1.3声环境影响

施工噪声主要来源于施工机械噪声、施工作业噪声和运输车辆噪声、施工机械，如挖土机械、打桩机械等多为点声源，施工作业噪声主要是一些零星的敲打声、装卸车辆的撞击声等，多为瞬时噪声；运输车辆的噪声属于交通噪声。在这些施工噪声中，对声环境影响最大的是施工机械噪声。

建筑施工期的机械噪声源主要来自各种施工机械，其特点是间歇或阵发性的，并具备流动性、噪声较高的特征。施工过程使用的施工机械产生的主要为中低频噪声，将施工机械作为点声源进行预测，露天施工机械只考虑扩散衰减。预测采用《环境影响评价技术导则-声环境》（HJ2.4-2021）的模式进行：

$$L_A(r) = L_A(r_0) - 20\lg(r/r_0) \qquad （5\text{-}1）$$

式中：$L_A(r)$、$L_A(r_0)$分别为预测点 r 和参考点 r_0 的等效 A 声级（dB(A)）；

r、r_0 分别为预测点、参考点距声源的距离（m）。

主要施工机械在不同距离处噪声影响值估算结果见表 5-1。

表 5-1 本项目主要施工机械在不同距离处的噪声影响值

工程及施工机械		距离施工机械不同距离处的噪声影响值（dB(A)）										
		5	10	20	40	60	80	100	200	300	400	450
土方阶段	挖掘机	86	80	74	68	64	62	60	54	50	—	—
	重型运输车	86	80	74	68	64	62	60	54	50	—	—
	叠加影响值	89	83	77	71	67	65	63	57	53	—	—
结构阶段	空压机	86	80	74	68	64	62	60	54	50	—	—
	混凝土输送泵	76	70	64	58	54	52	50	—	—	—	—
	振捣器	91	85	79	73	70	67	65	59	55	53	52
	叠加影响值	92	86	80	74	71	68	66	60	56	54	52
装修工程	木工电刨	81	75	69	63	59	57	—	—	—	—	—
	电锯	91	85	79	73	70	67	65	59	55	53	52
	云石机、角磨机	91	85	79	73	70	67	65	59	55	53	52
	叠加影响值	94	88	82	76	73	70	68	62	58	56	55

由分析结果可知：施工阶段噪声影响相对较大，各阶段主要施工机械若同时开展工作时候，昼间达标距离约 80m（建筑施工场界噪声排放限值：昼间不超过 70dB(A)），夜间在 450m 处才能够达标。

本项目所在园区厂房框架结构已建成，施工地点周围 450m 范围内没有居民、学校等声环境保护目标，项目施工噪声对区域声环境影响较小。结合该项目实际情况，须采取的具体措施如下：

1）选用低噪声施工设备，并在施工中应有专人对其进行保养维护，施工单位应对现场使用设备的人员进行培训，严格按操作规范使用各类机械。

2）施工场界建设围墙或彩钢板围栏，减轻噪声对周围环境的影响。

3）合理安排施工工序及施工时间，将强噪声作业尽量安排在白天进行。

4）加强对运输车辆的管理，运输车辆进场安排专人指挥，场内禁止运输车辆鸣笛。

5）文明施工，装卸、搬运钢管、模板等施工物件时严禁抛掷。

在采取上述污染防治措施后，施工期噪声是临时的、阶段性的和不固定的，随着施工的结束，项目施工期噪声对周围声环境的影响就会停止，因此施工期产生的噪声对周围环境影响是可以接受的。

5.1.4固体废物环境影响

项目在建设过程中产生的固废有：施工人员生活垃圾、开挖出的土石方、建筑垃圾和装修垃圾等。

（1）生活垃圾收集后由市政环卫部门统一进行清运处理。

（2）本项目开挖产生的土石方，大部分用于场地回填、调整场平和绿化，其余弃方交由有资质的渣土清运公司外运至当地政府指定的堆土场规范堆放。

（3）施工单位在施工现场设置建筑废弃物临时堆场，并进行防雨、防渗漏等处理。施工产生的废料优先考虑回收利用，如钢筋、木制品、金属、塑料、玻璃、包装材料等；对于不能回收利用的建筑垃圾，如混凝土废料、含砖、石、砂等杂土，及时清运到管理部门指定的建筑垃圾倾倒点，不在施工场地长期随意堆积，严禁随意倾倒、填埋；而对于装修过程产生的废油漆包装桶、废漆料等危险废物，设置单独的收集点进行收集，集中储存，做好防雨、放渗、放漏等措施，并交由有资质的单位进行处置，落实危废管理制度。

由上可见，施工期固废能得到综合利用和合理处置，对周围环境影响较小。

5.1.5生态环境影响

本项目位于嘉兴市海盐核技术应用（同位素）产业园内，占地为工业用地，2#厂房厂区占地面积 1922.58m^2 ，无临时占地。经前期现场踏勘，场地内植被稀疏，均为杂草，未发现需要特殊保护的野生动植物。

工程施工中将进行挖方或填方作业，会对现有地表结构造成破坏，改变土壤结构。因此，地表植被将受到一定破坏。对开挖的土壤，应有计划的分层开挖，并尽量利用表层沃土绿化。对于被破坏的植被，待施工完成后，尽快按绿化方案恢复植被。只要在施工期注意规划，施工后期及时绿化，对土壤及植被的不利影响将得到有效控制。

另外，若施工期处理不当，会造成较为严重的水土流失现象。特别在施工期挖掘的土方堆积过程遇到大的降水，由于雨水浸湿软化，在施工扰动地表的情况下因地势造成水土流失。本项目对于地下区域的设计施工方案中须有严格的防止水土流失的措

施。建议合理安排施工计划，尽量避开雨季施工。雨季施工不可避免情况，场地内设置导流渠对雨水进行引导和收集，渣土、垃圾堆放区域设置防雨棚和围堰，防止被雨水冲刷随雨水外流加重水土流失问题。

本项目所在位置较为平坦，建议项目采取内部分片的方式进行开挖建设，土层为淤泥、淤泥质土层时，施工时应注意对基槽底面原状土层的保护，减少扰动。土方开挖完成后应立即对基坑进行封闭，防止水浸和暴露，验槽合格后，应及时进行地下结构施工。由此可减少的水土流失，对周边环境影响不大。

综上，由于本项目施工期不长，对当地大气环境、水环境、声环境、生态环境等影响时间较短，只要施工单位认真制定和落实施工期采取的环保对策措施，委托有资质的单位开展环境监理，工程施工的环境影响可以得到有效控制，不会降低当地环境质量现状。

5.2 运行阶段辐射环境影响分析

5.2.1 加速器机房屏蔽体周围辐射剂量水平

5.2.1.1 加速器主屏蔽体外辐射剂量率

本项目建设两座回旋加速器机房，每个机房配备 1 台加速器，分别是 α 粒子回旋加速器和质子回旋加速器，其中 α 粒子加速器最大能量是 30MeV，最大流强 100μA，有两个内靶站，轮流交替照射；质子加速器最大能量 30MeV，最大流强 750 μA，有四个靶站，主要用于放射性同位素生产，涉及的同位素种类较多。各个靶站相对位置关系示意图见图 5-1 所示。

为了分析评价本项目回旋加速器运行期间机房主屏蔽体外的最大辐射剂量水平，从保守角度出发，应考虑两台回旋加速器同时运行的情况，具体工况筛选分析如下：

（1）α 粒子加速器生产核素参数

α粒子加速器仅用于生产 ^{211}At 核素，生产时 α 粒子最大能量 28MeV，流强 100μA，两个内插靶站完全相同，轮流交替照射使用。

（2）质子加速器生产核素参数

质子加速器有四个靶站，其中 T1、T2 为固体靶站，可同时照射运行，T3、T4 为液体靶站，可同时照射运行，但固体靶站和液体靶站不能同时运行。本项目生产

核素中所用质子最大能量 30MeV，靶站处最大束流强度 200 μA。表 5-2 列出了质子回旋加速器各个靶站生产的核素种类及工况。

图 5-1 各靶站相对位置关系示意图

略

表 5-2 质子回旋加速器生产核素

编号	靶站	生产核素名称	实际照射能量 MeV/流强 μA
1	T1 固体靶	^{68}Ge	19 / 70
2	T2 固体靶	^{89}Zr	18 / 60
3		^{64}Cu	18 / 200
4		^{124}I	13 / 30
5		^{99}Mo	22 / 100
6		^{123}I	24 / 60
7		^{67}Cu	30 / 20
8		^{57}Co	29 / 100
9		^{225}Ac	17 / 20
10		^{203}Pb	13 / 10
11	T3 或 T4 液体靶	^{18}F	18 / 60

由于 T1、T3、T4 靶站生产的核素种类固定不变，而 T2 靶站可生产 9 不同核素，根据生产 9 种核素的质子打靶能量和束流强度，分别计算质子轰击不同靶材时在 T2 靶站周围的瞬发辐射剂量率水平，靶材为加速器束流损失最大处，其周围辐射剂量率反应运行期间机房内最高水平，筛选出周围瞬发辐射剂量率水平最大的目标核素进行保守分析。

采用蒙特卡洛程序模拟生产 9 种核素的质子轰击靶材情况，经过计算，靶材附近的辐射剂量率变化趋势见图 5-2 所示，查图可得靶前 10cm 处的瞬发辐射剂量率水平见表 5-3 所示。

由此可见，生产 ^{64}Cu 核素时靶前端 10cm 处的瞬发辐射剂量率最大，为 4.82E+09μSv/h。

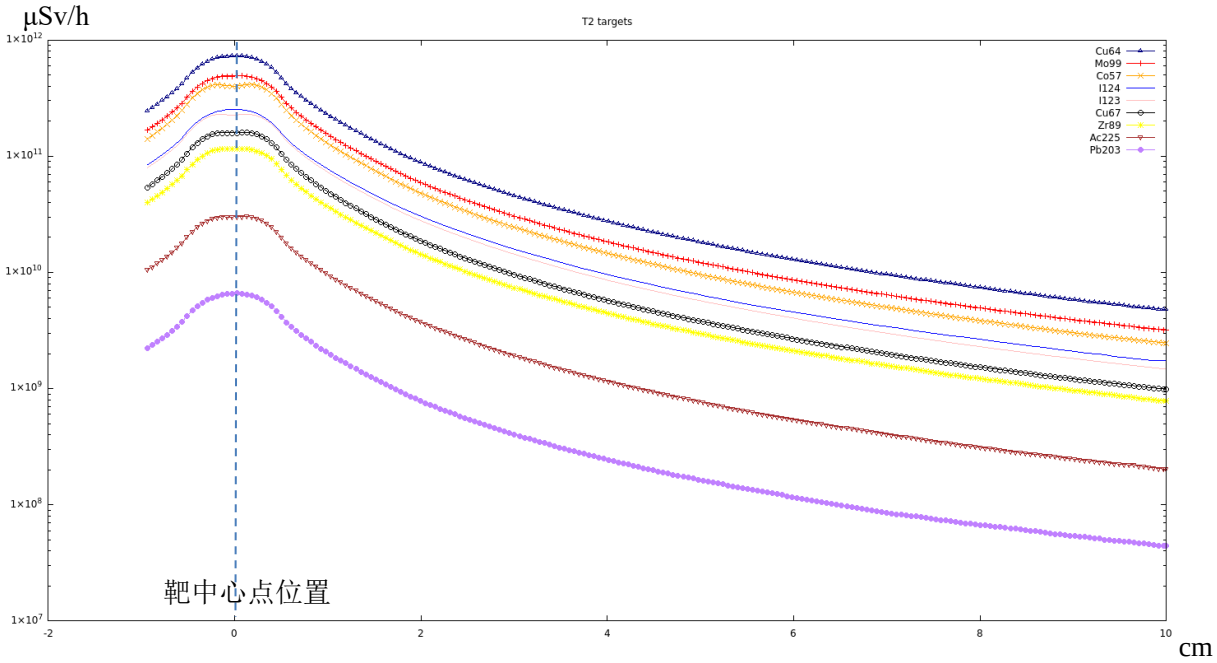


图 5-2　T2 靶站生产 9 种核素时靶材附近的辐射剂量率变化趋势

表 5-3　靶前 10cm 处的瞬发辐射剂量率水平

编号	生产核素名称	运行中靶前端 10cm 处瞬发辐射剂量率（μSv/h）
1	^{89}Zr	7.73E+08
2	^{64}Cu	4.82E+09
3	^{124}I	1.73E+09
4	^{99}Mo	3.26E+09
5	^{123}I	1.49E+09
6	^{67}Cu	9.93E+08
7	^{57}Co	2.47E+09
8	^{225}Ac	2.04E+08
9	^{203}Pb	4.48E+07

结合上述分析，以本项目两台回旋加速器同时运行时对周围辐射影响为较大工况，包括以下两种工况进行分析：

1）工况 1：α 粒子回旋加速器生产 ^{211}At 核素，质子回旋加速器 T1 靶生产 ^{68}Ge 核素和 T2 靶生产 ^{64}Cu 核素三种核素同时生产的情况；

2）工况 2：α 粒子回旋加速器生产 ^{211}At 核素，质子回旋加速器 T3、T4 靶生产 ^{18}F 核素同时运行的情况。

采用蒙特卡洛程序模拟计算加速器机房主屏蔽体周围辐射水平，机房建模结构见图 5-3 所示。

略

图 5-3（a） 两个回旋加速器机房建模平面示意图

略

图 5-3（b） 两个回旋加速器机房建模剖面示意图

依据上述截面选取情形，通过计算软件分析，分别给出上述两种工况下两个机房的水平剖面和截面（截面 6 和截面 7）辐射剂量率场分布计算结果示意图，分别见图 5-4 和图 5-5 所示，其中图 5-4（a）和图 5-4（b）为工况 1 和工况 2 下两个加速器机房水平剖面辐射剂量率场分布示意图，图 5-5（a）和图 5-5（b）为工况 1 和工况 2 下两个加速器机房截面辐射剂量率场分布示意图。工况 1 下截面 1 和 2、工况 2 下截面 3 和 4、两个工况下截面 5、以及截面 8 在东西方向的辐射剂量率变化曲线分别见图 5-6（a）、图 5-6（b）、图 5-6（c）、图 5-6（d）、图 5-6（e）和图 5-6（f）所示。截面 6、7 和 9 在南北方向辐射剂量率变化曲线分别见图 5-7（a）、图 5-7（b）和图 5-7（c）所示。截面 1、2、4、5 和 8 在上下方向（即机房顶部和底部方向）辐射剂量率变化曲线分别见 5-8（a）、图 5-8（b）、图 5-8（c）、图 5-8（d）和图 5-8（e）所示。

根据上述各图可知，在工况 1 下，质子回旋加速器机房东侧墙外 30cm 处点①、③和⑩的辐射剂量率分别为 0.046μSv/h、0.48μSv/h 和＜0.001μSv/h，西墙外 30cm 处点②、④和⑨的辐射剂量率分别为＜0.001μSv/h、0.003μSv/h 和 0.002μSv/h，南墙外 30cm 处点⑬的辐射剂量率为 0.53μSv/h，顶部屏蔽体外 30cm 点⑯、⑰和⑱的辐射剂量率分别为 0.005μSv/h、＜0.001μSv/h 和＜0.001μSv/h。

在工况 2 下，质子回旋加速器机房东侧墙外 30cm 处点⑤、⑦和⑩的辐射剂量率均＜0.001μSv/h，西墙外 30cm 处点⑥、⑧和⑨的辐射剂量率均＜0.001μSv/h，南墙

外 30cm 处点⑭的辐射剂量率为 0.43μSv/h，顶部屏蔽体外 30cm 点⑲的辐射剂量率为＜0.001μSv/h。

两个工况中 α 粒子加速器机房西侧外 30cm 处点⑪和东侧屏蔽墙外 30cm 处点⑫的辐射剂量率最大值分别为 0.02μSv/h 和 0.002μSv/h，北侧外 30cm 处点⑮的辐射剂量率最大值为 0.008μSv/h，顶部屏蔽体外 30cm 处点⑳的辐射剂量率最大值＜0.001μSv/h。

综上分析，两个机房辐射剂量率在上述两种工况下运行时，工况 1 下质子回旋加速器对主屏蔽墙外 30cm 辐射剂量率总体上比工况 2 稍大，且 α 粒子回旋加速器对主屏蔽墙外 30cm 辐射剂量率受质子回旋加速器运行影响较小，上述计算结果表明两个加速器屏蔽体外 30cm 处均可满足本项目控制值 2.5μSv/h 的要求。当质子加速器机房生产 ^{64}Cu 之外其他核素时，根据分析也能满足本项目控制值 2.5μSv/h 的要求。

两个加速器机房底部屏蔽体外均为地下土壤，底板下方与土壤交接处的㉑~㉕点位辐射剂量率分别为 0.004mSv/h、0.607mSv/h、3.103mSv/h、0.001mSv/h 和 3.236mSv/h，参考文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期，同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计），当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5.5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本项目加速器机房底部屏蔽设计满足要求，不考虑土壤活化影响。

汇总上述计算结果，本项目两个加速器机房主屏蔽体周围最大辐射剂量率结果见表 5-4 所示。

表 5-4　两个加速器机房主屏蔽体运行期间周围最大辐射剂量率

序号	点位名称	场所	最大辐射剂量率（μSv/h）
1	质子回旋加速器室东侧屏蔽墙外 30cm	内部通道	0.48
2	质子回旋加速器室南侧屏蔽墙外 30cm	内部通道	0.53
3	质子回旋加速器室西侧屏蔽墙外 30cm	配件间	0.003
4	质子回旋加速器室顶部屏蔽体外 30cm	屋顶	0.005

序号	点位名称	场所	最大辐射剂量率（μSv/h）
5	α粒子回旋加速器室北侧屏蔽墙外 30cm	内部通道和加速器控制室	0.008
6	α粒子回旋加速器室东侧屏蔽墙外 30cm	诊断核素车间	0.002
7	α粒子回旋加速器室西侧屏蔽墙外 30cm	配件间	0.020
8	α粒子回旋加速器室顶部屏蔽体外 30cm	屋顶	＜0.001

备注：根据上述结果及机房屏蔽结构设计可知，当任意一个加速器运行期间，其对共墙区域墙体外 30cm 处的辐射剂量率贡献值也满足 2.5μSv/h 的要求。

略

（a） 工况 1 两个机房水平剖面辐射剂量率场分布示意图

略

（b） 工况 2 两个机房水平剖面辐射剂量率场分布示意图

图 5-4 两个工况下两个机房水平剖面辐射剂量率场分布示意图

略

（c） 工况 1 截面 6 两个机房辐射剂量率场分布示意图

略

（d） 工况 2 截面 7 两个机房辐射剂量率场分布示意图

图 5-5 两个工况下两个机房截面辐射剂量率场分布示意图

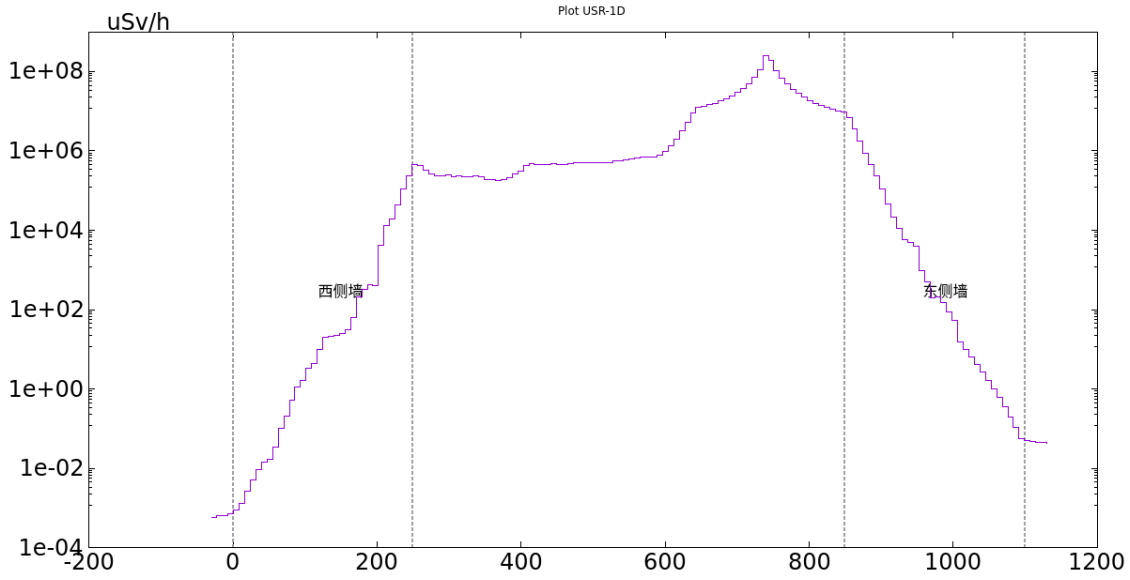


图 5-6（a） 工况 1 质子加速器机房截面 1 东西方向辐射剂量率变化曲线

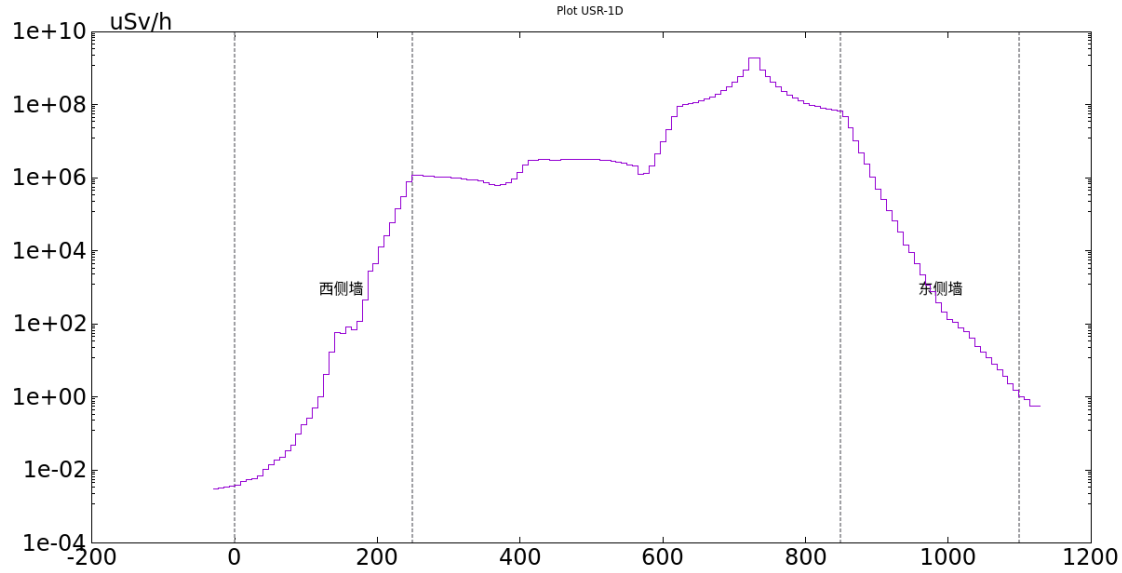


图 5-6（b）工况 1 质子加速器机房截面 2 东西方向辐射剂量率变化曲线

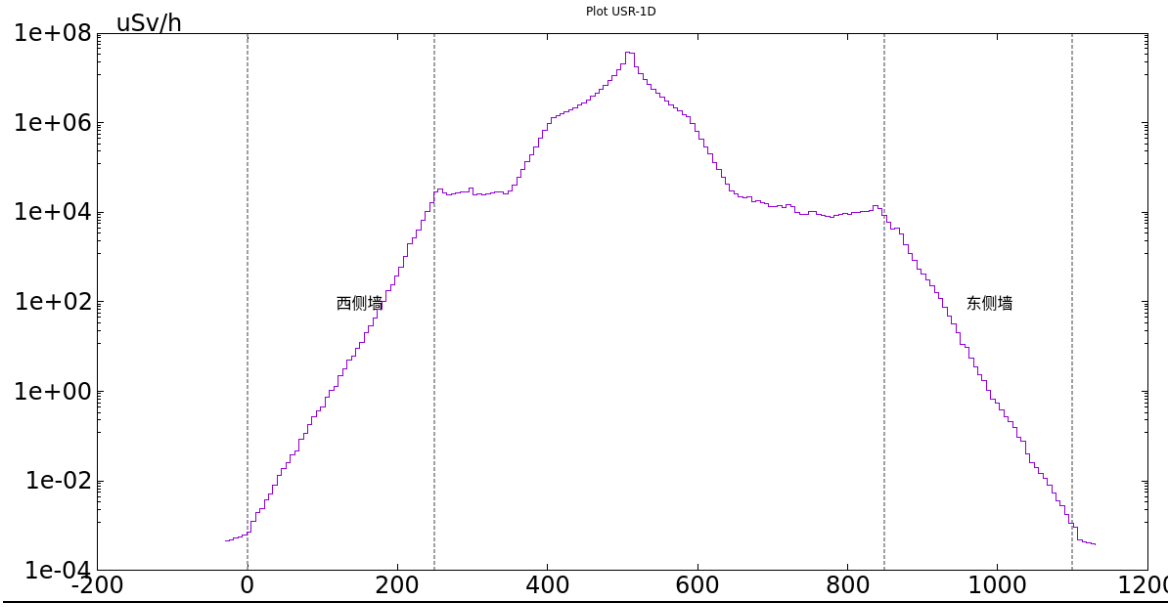


图 5-6（c）工况 2 质子加速器机房截面 3 东西方向辐射剂量率变化曲线

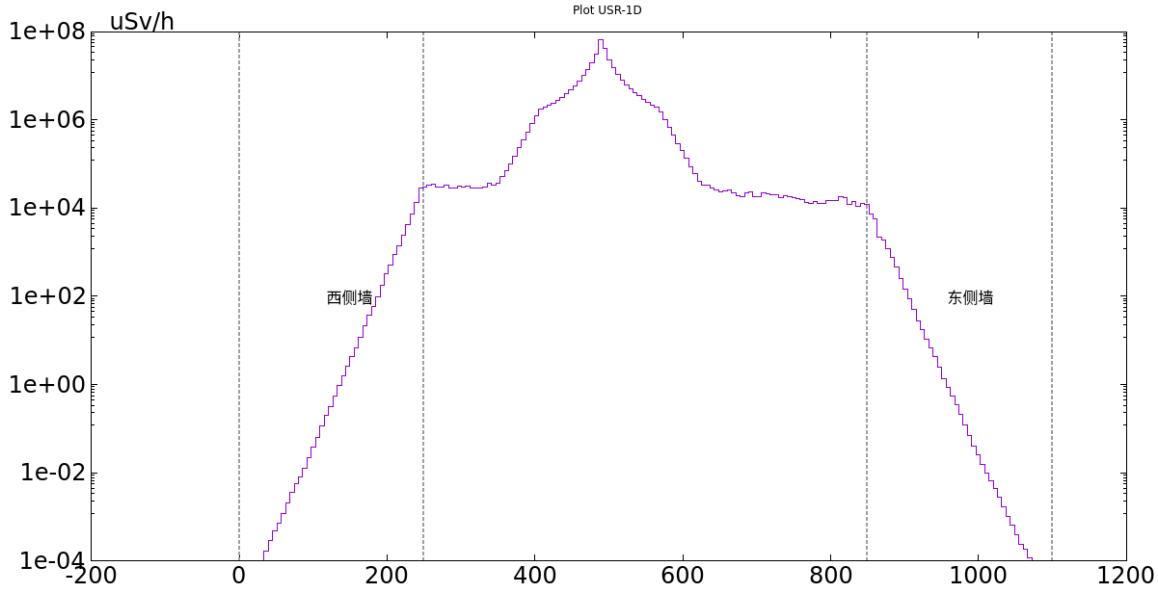


图 5-6（d）工况 2 质子加速器机房截面 4 东西方向辐射剂量率变化曲线

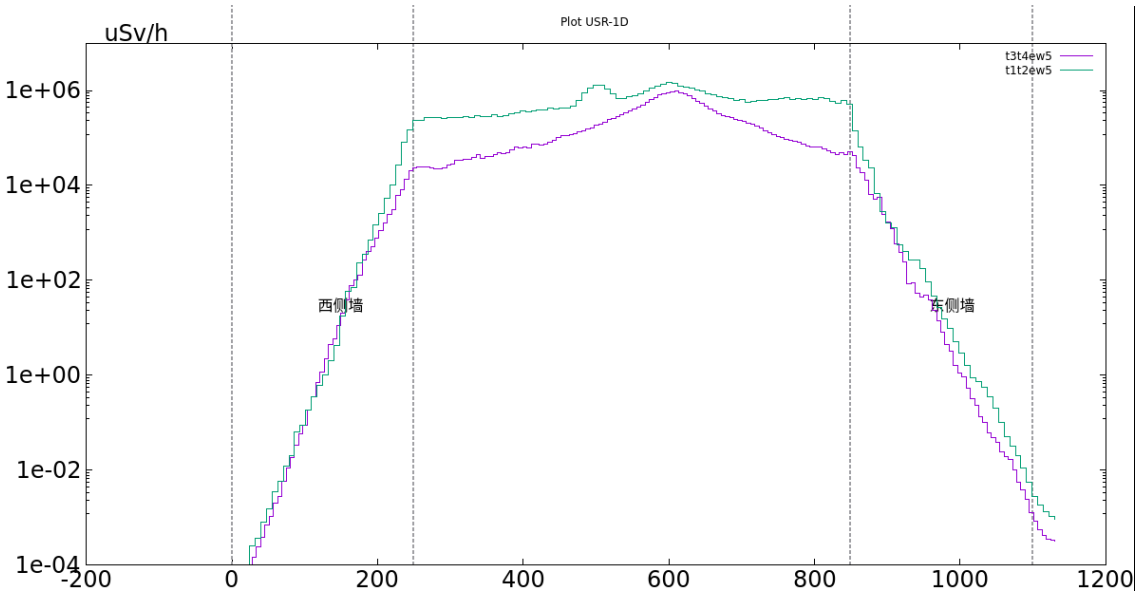


图 5-6（e）质子加速器机房截面 5 东西向辐射剂量率变化曲线（两个工况）

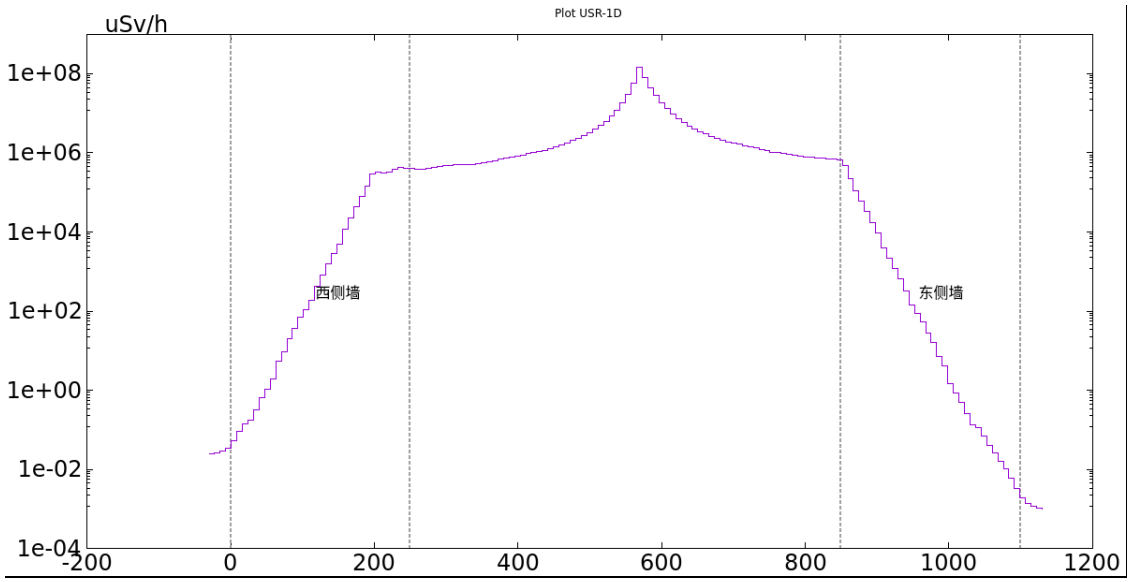


图 5-6（f） α 粒子加速器机房截面 8 东西方向辐射剂量率变化曲线

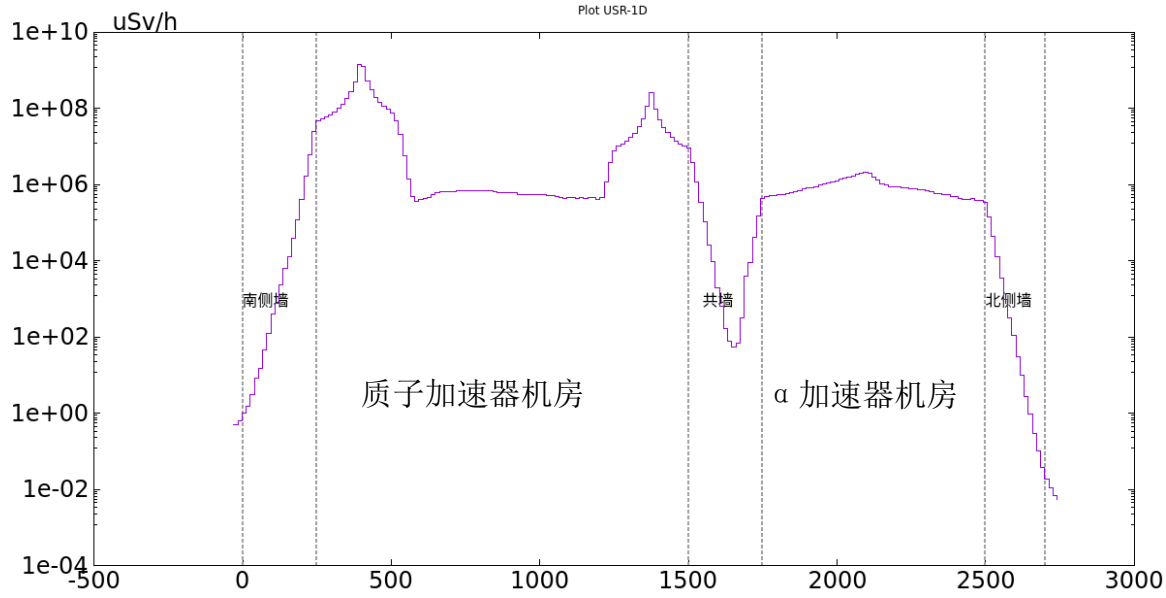


图 5-7（a） 工况 1 两个加速器机房截面 6 南北方向辐射剂量率变化曲线

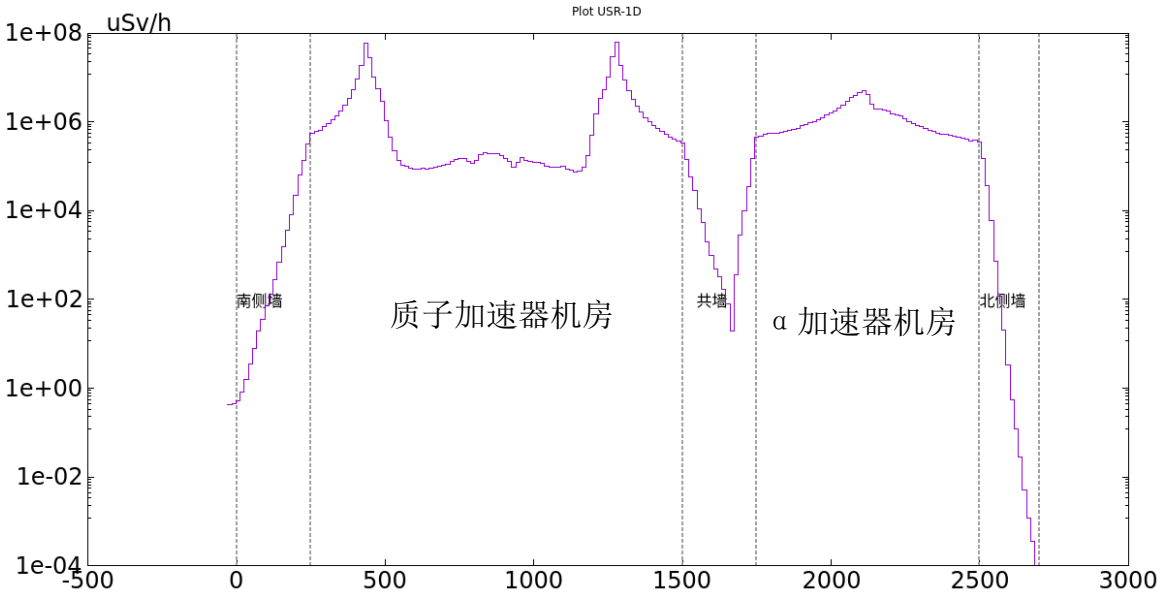


图 5-7（b）工况 2 两个加速器机房截面 7 南北方向辐射剂量率变化曲线

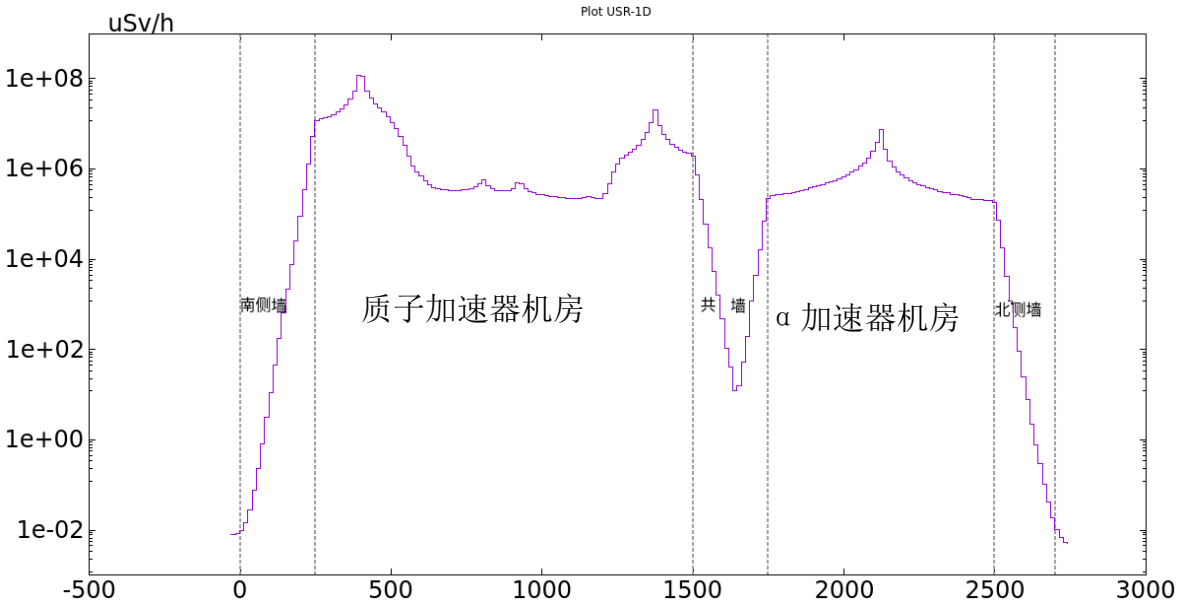


图 5-7（c） 两个加速器机房截面 9 南北方向辐射剂量率变化曲线

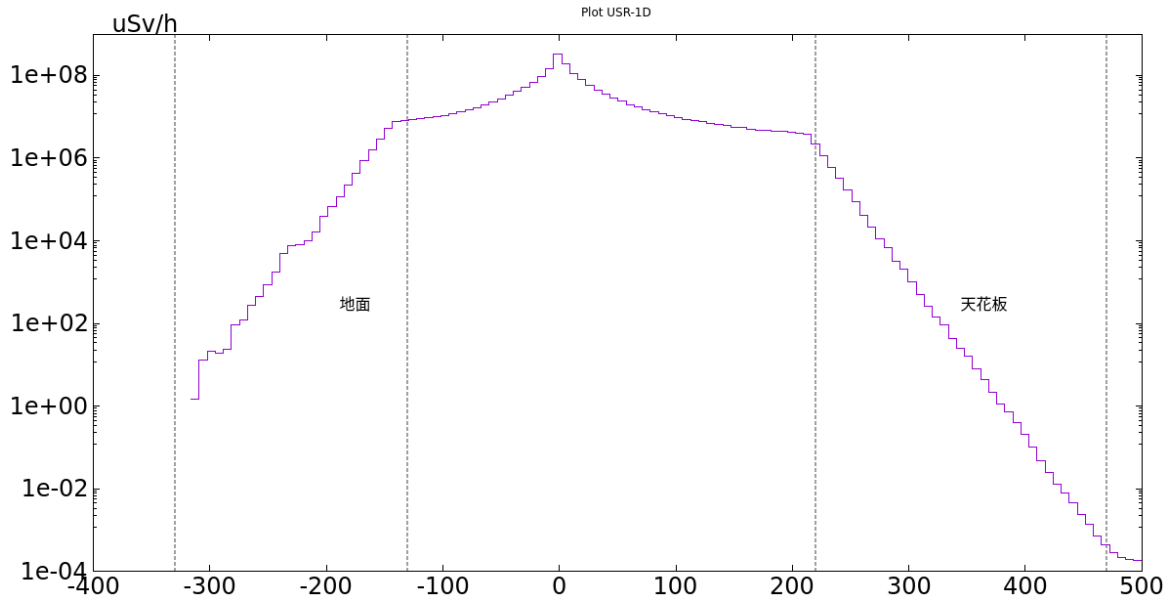


图 5-8（a）工况 1 质子加速器机房截面 1 上下方向辐射剂量率变化曲线

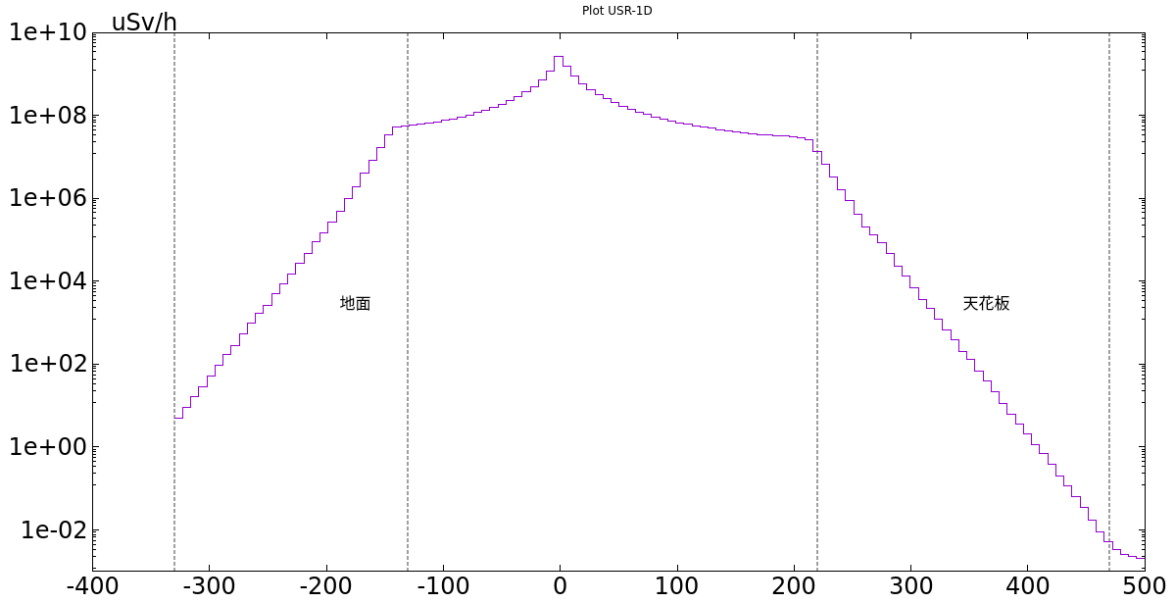


图 5-8（b）质子加速器机房截面 2 上下方向辐射剂量率变化曲线

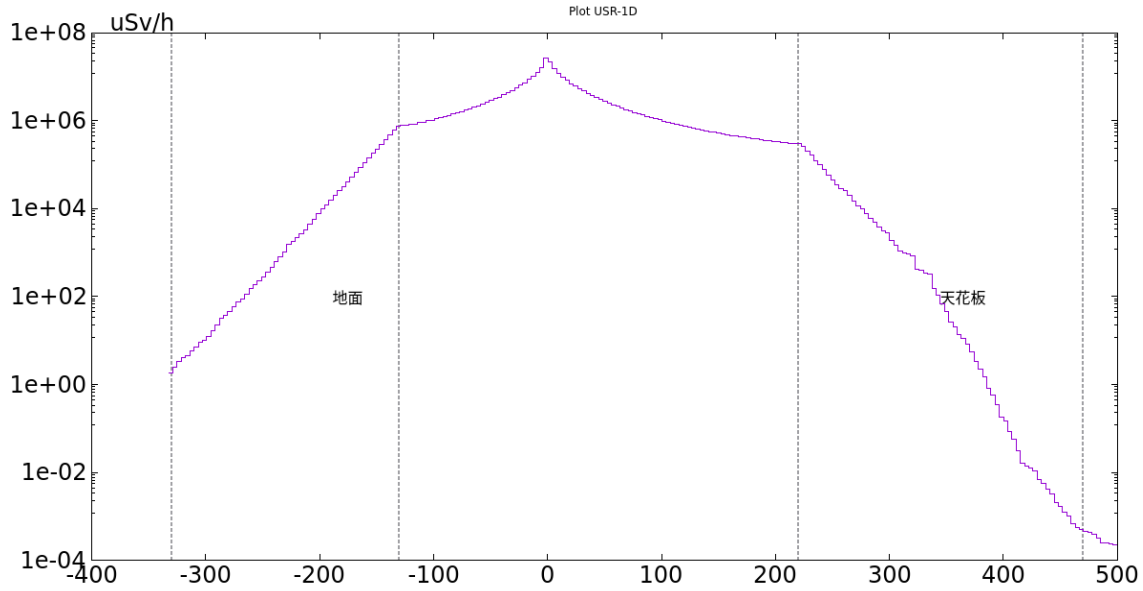


图 5-8（c）质子加速器机房截面 4 上下方向辐射剂量率变化曲线

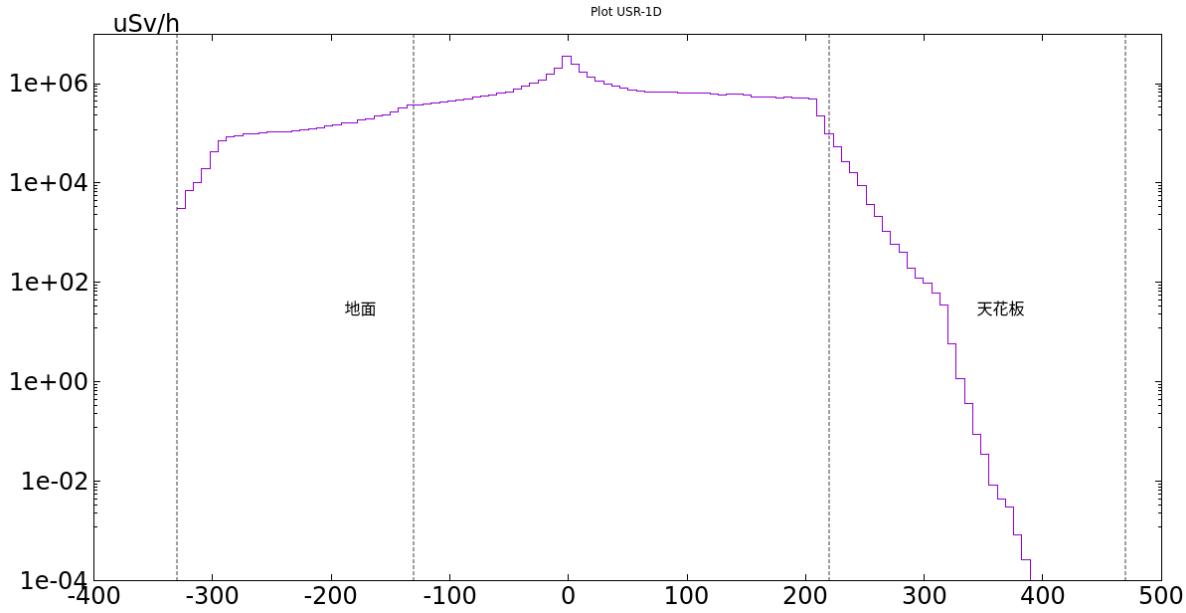


图 5-8（d）质子加速器机房截面 5 上下方向辐射剂量率变化曲线

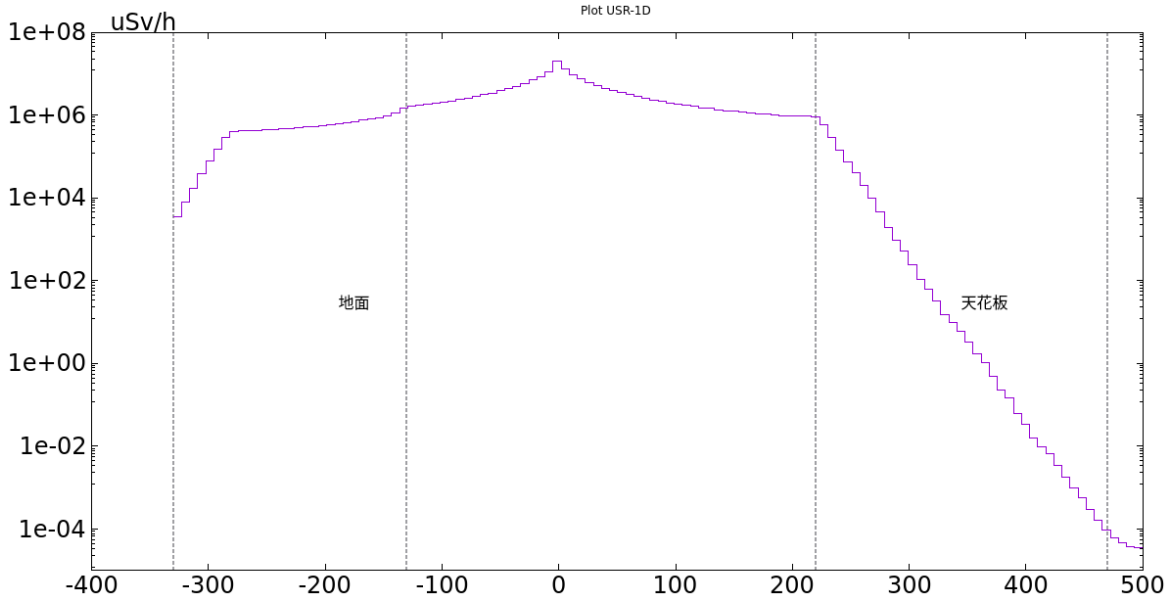


图 5-8（e）α 加速器机房截面 8 上下方向辐射剂量率变化曲线

5.2.1.2 加速器机房周围天空反散射辐射影响

为进一步估算天空反散射在加速器机房周围地面造成的辐射影响，参考 NCRP51 号报告中的以下公式进行计算。

$$H=（2.5\times10^{-2}\cdot H_O\cdot\Omega^{1.3}）/r_s^2 \qquad （5.1）$$

其中： H：天空散射在机房外引起的附加剂量率，μSv/h；

H_O：屋顶上方 2 m 处的当量剂量率，μSv/h；

Ω：辐射源与屋顶之间包含的立体角，Sr；

r_s：辐射源与计算点之间的距离，m。

射线源与屋顶之间包含的立体角Ω可由下式进行计算：

$$\Omega=4\arctan（a\cdot b/c\cdot d） \qquad （5.2）$$

式中 a：机房屋顶长度的一半，m；

b：机房屋顶宽度的一半，m；

c：辐射源到屋顶表面中心的距离，m；

d：辐射源到屋顶边缘的距离，m。

加速器机房顶部辐射剂量率最大值为 0.005μSv/h，经计算在加速器机房两侧地面造成的天空散射剂量率远低于 0.001μSv/h，因此瞬发辐射穿过机房顶部在地面造成的辐射影响可忽略。

5.2.1.3 加速器机房穿墙部分辐射剂量率

对比上述两种工况的计算结果可见，在工况 1 情况下，设备运行周围的辐射剂量率水平相对较高。

因此，对加速器机房屏蔽结构的薄弱区，即线缆地沟、通风或水管孔洞等穿墙区域，本项目按照在工况 1 情况下，分别计算机房穿墙区域孔洞外的辐射剂量率大小。计算穿墙区域结构示意见图 4-9~图 4-20 所示，对应的计算结果见表 5-5 所示。

根据计算结果可见，质子回旋加速器机房穿墙区域处辐射剂量率最大值位于 U 形电缆线地沟洞口外 30cm 处，为 1.2μSv/h，α 粒子回旋加速器穿墙区域处辐射剂量率最大值位于消防泄压管道洞口外 30cm 处，为 1.8μSv/h，均能够满足屏蔽体外控制值 2.5μSv/h 的要求，需要说明的是，上述计算保守未考虑洞口处的屏蔽补偿，实际建成

后洞口处辐射剂量率水平比理论计算更小。本报告以上述较大值为例，给出α粒子回旋加速器机房消防泄压管道穿墙处的计算模型图和管道内外剂量率水平变化趋势示意图 5-9。

表 5-5 回旋加速器机房穿墙区域孔洞外 30cm 处辐射剂量率

序号	穿墙区域机房外计算点位置	剂量率/μSv/h
1	质子加速器机房 U 形电缆线地沟洞口外 30cm	1.2
2	质子加速器机房通风管洞口外 30cm	1.1
3	质子加速器机房消防泄压管道洞口外 30cm	0.3
4	质子加速器机房设备供回水管道洞口外 30cm	0.15
5	质子加速器机房固体靶传输线洞口外 30cm	0.1
6	质子加速器机房液态靶传输线洞口外 30cm	0.07
7	α加速器机房 U 形电缆沟洞口外 30cm	1.5
8	α加速器机房通风管洞口外 30cm	0.1
9	α加速器机房消防泄压管道洞口外 30cm	1.8
10	α加速器机房设备供回水管道洞口外 30cm	0.1
11	α加速器机房固体靶传输线洞口外 30cm	0.08

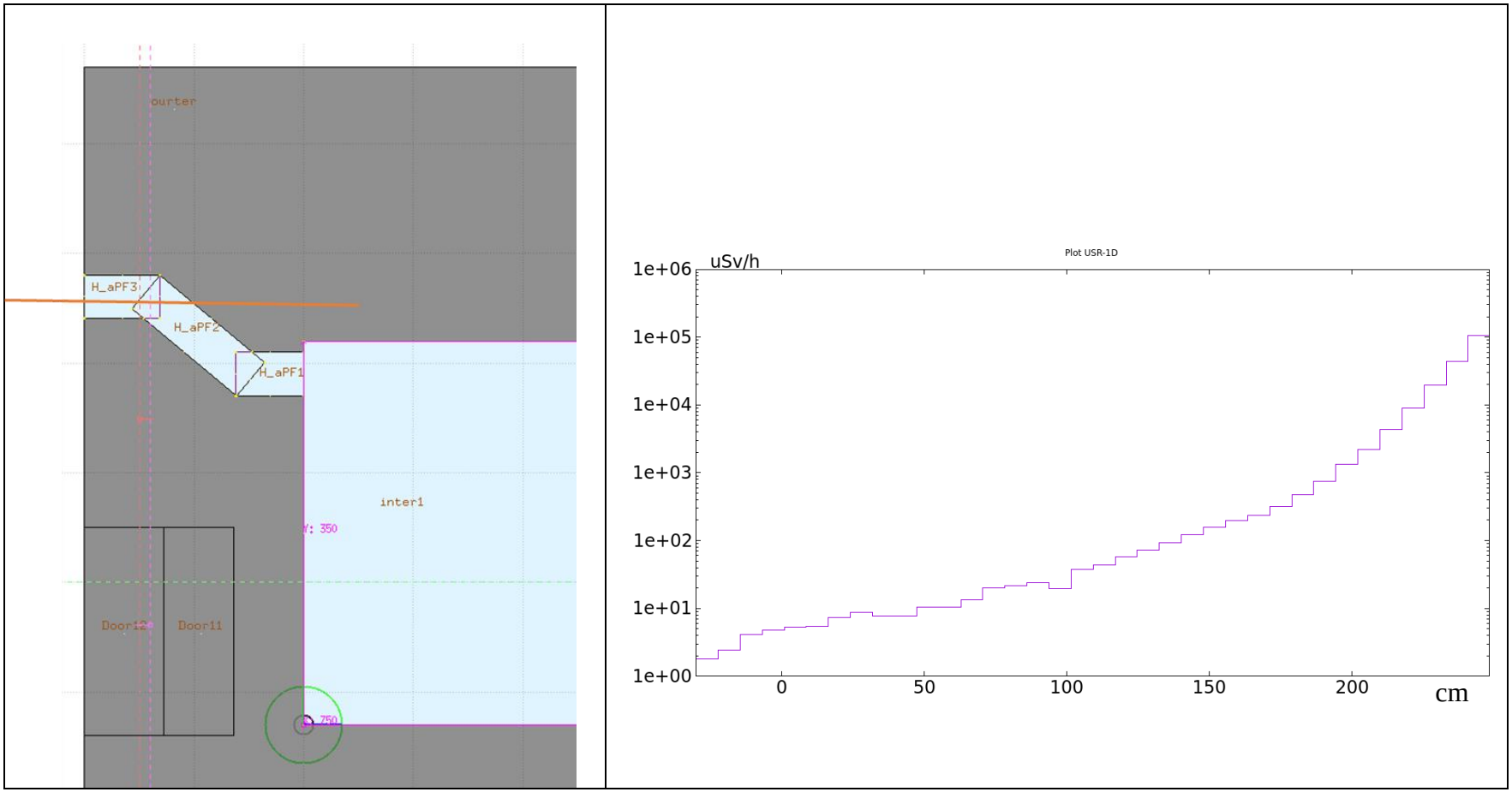


图 5-9　α 回旋加速器消防泄压管道穿墙处辐射剂量率变化趋势

5.2.2 靶材传输管线周围辐射剂量水平

5.2.2.1 固体靶传输线周围辐射剂量水平

（1）计算方法分析

打靶完成的靶材根据工艺流程将从回旋加速器机房内传输至相应热室，根据本项目靶材特点，其中各固体靶材在轰击后除了项目需要的目标核素外，还会同时产生较多其他杂质核素，因此从辐射防护角度，需要保守考虑各核素的叠加辐射影响。

本项目传输线间周围环境瞬时辐射剂量率水平计算的输入源项保守取表 3-14 和表 3-16 中被照靶材中各主要放射性核素最大活度。

综合考虑表中源项核素种类多、衰变释放的射线能量及占比各不相同特点，本部分计算采用 MicroShield9.05 软件，该软件实行界面化操作，只需输入关键参数，省去了程序编写工作；该软件设有点、线、面、体等 16 种源项模型，用户可自行选择符合工程实际情况的模型；该软件自带一个含 12 种屏蔽材料的材料库以及一个含 497 种放射性核素的核素库，用户可以根据工程需要自行添加屏蔽材料。MicroShield9.05 除重视模型建立、核素参量输入等功能外，其最终结果是以 Microsoft Word 和 Microsoft Excel 方式进行输出的，方便了用户对计算结果的后续应用。

（2）计算模型建立

本项目对于传输管线在机房内的部分，被照后靶材中各核素释放的射线可以通过四周混凝土墙体进行屏蔽，因此本报告主要考虑对 3.2.3 节质子回旋加速器和 α 粒子回旋加速器外部的固体靶传输管线，以及管外补偿的铅屏蔽体进行建模。

质子回旋加速器 T1 固体靶材（含背板）的尺寸长 113mm×宽 53mm×厚 29mm，T2 固体靶材（含背板）的尺寸 φ36×24mm，α 粒子回旋加速器的 ^{211}At 靶材（含背板）尺寸长 110mm×宽 34mm×厚 13mm，T1 固体靶材通过锗镓靶材传输管线进入热室，T2 固体靶材通过核素诊断传输管线进入热室，^{211}At 靶材通过 ^{211}At 靶材传输线进入热室。所有固体靶材位于传输管线中心，且固体靶管线中心距离一层地面高度均为 3.25m，距离二层楼板均为 3.75m，楼板为 12cm 厚的混凝土。

根据 《辐射防护导论》，“对任何形状的辐射源，当考察点与源的距离比辐射源本身的最大尺寸大 5 倍以上时，可将该辐射源视为点源”，因此在计算传输线外关注点的剂量率时，传输线内的辐射源可视为点源，传输过程中靶材（含背板）位于传输管线中心，传输管线直径为 100 mm，厚度为 2.2mm 铝合金，传输管线外有 5cm 铅屏蔽补偿，计算离一层地面 30cm 高度处和二楼顶部地板 30cm 高度处的剂量率。以生产 ^{124}I 的靶材（含背板）为例，靶材中心点与计算点之间的距离设置示意图如图 5-10 所示，屏蔽材料及厚度密度设置示意图见图 5-11 所示，源项及能量分支设置示意图见图 5-12 所示。

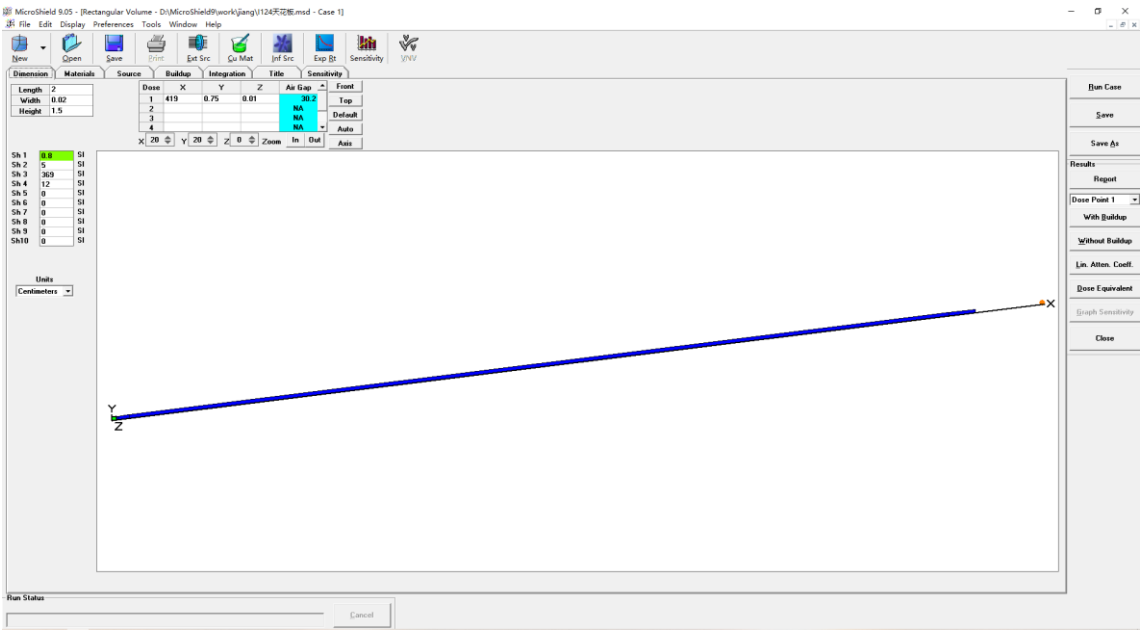


图 5-10 计算模型示意图

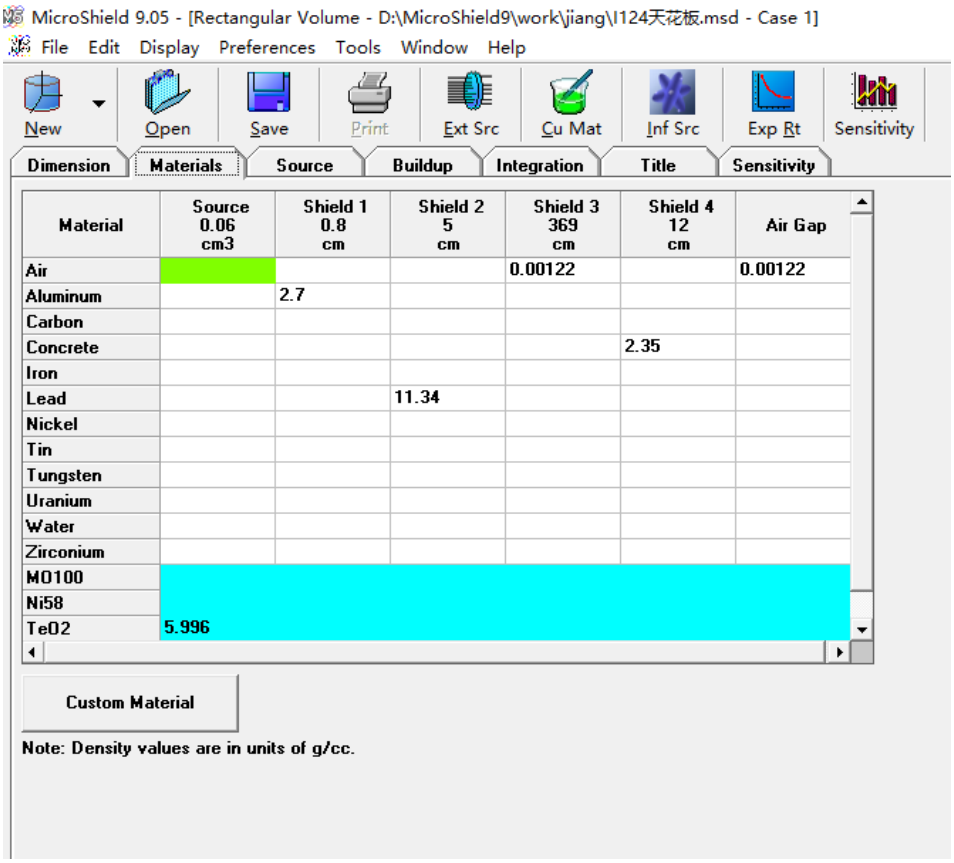


图 5-11 屏蔽材料及厚度密度示意图

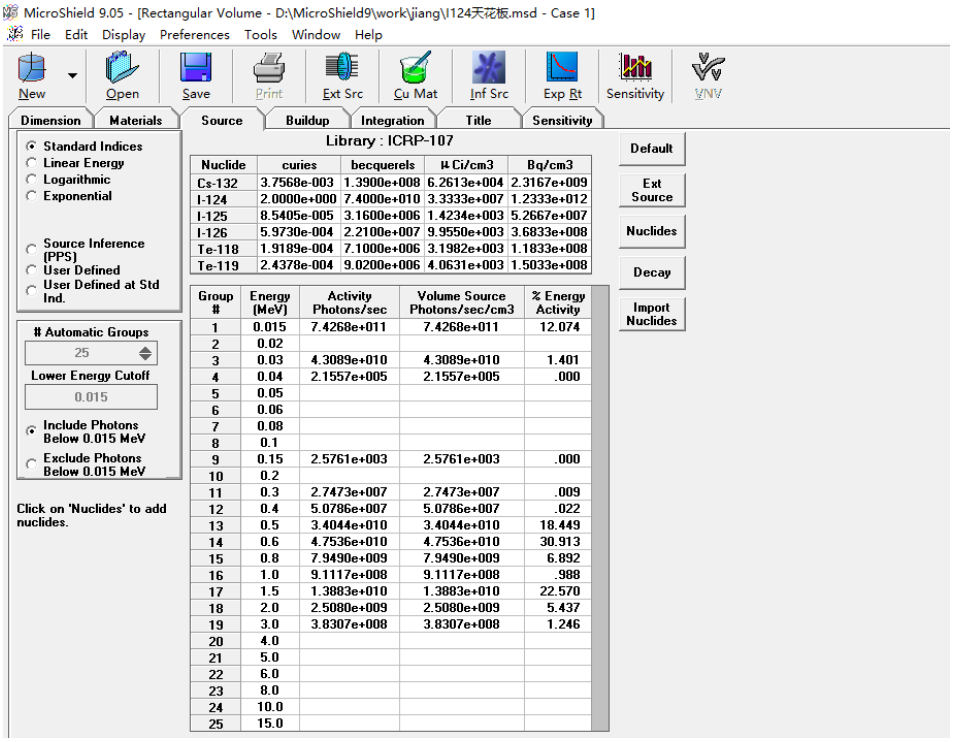


图 5-12 源项活度及能量分布示意图

（3） 计算结果

根据上述源强，采用软件计算各靶材在加速器机房外传输管线转运过程中对周围瞬时辐射剂量率水平。其中下方一层离地 30cm 高度和二层顶板离地坪 30cm 高度处的计算结果见表 5-7 所示。

表 5-7 固体靶传输管线周围瞬时辐射剂量率水平

目标核素名称	辐射剂量率水平（μSv/h）	
	一层离地 30cm 高度	二层顶板离地坪 30cm 高度
^{68}Ge	4.10	0.44
^{89}Zr	15.3	1.51
^{57}Co	0.14	0.018
^{64}Cu	6.18	0.78
^{67}Cu	0.05	0.01
^{123}I	3.78	0.55
^{124}I	15.7	1.9
^{99}Mo	12.6	1.8
^{225}Ac	＜0.001	＜0.001
^{203}Pb	4.1	0.44
^{211}At	0.59	0.09

根据表 5-7 计算结果表明，质子回旋加速器的所有固体靶材传输过程中 ^{124}I 核素的靶材对周围环境瞬时辐射剂量贡献值最大，在一层离地 30cm 高度处的辐射剂量率贡献值为 15.7μSv/h，在二层顶板离地坪 30cm 高度处的辐射剂量率贡献值为 1.9μSv/h。

α 粒子回旋加速器 ^{211}At 固体靶材传输过程中，在一层离地 30cm 高度处的辐射剂量率贡献值为 0.59μSv/h，在二层顶板离地坪 30cm 高度处的辐射剂量率贡献值为 0.09μSv/h。

根据平面布置图 4-1 和图 4-2 可知，质子回旋加速器机房外固体靶传输线经过的区域正下方主要为一层锗镓核素热室和诊断核素热室所在车间，且非人员操

作位，正上方二层为预留生产车间。α 粒子回旋加速器机房外固体靶传输线路径相对质子靶材路径较长，经过的区域正下方主要为一层诊断核素车间和内部走廊，且非人员操作位，正上方二层为预留生产车间。

由此可知，在受照靶材传输过程中，质子回旋加速器固体靶传输线下方一层热室车间人员可达区域辐射剂量率能满足本项目提出的热室屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求，同时也满足二层顶部辐射剂量率应低于 2.5μSv/h 的要求。

α 粒子回旋加速器固体靶传输线下方一层区域和二层顶部的辐射剂量率水平均满足 2.5μSv/h 的要求。

5.2.2.2 质子回旋加速器 T3 或 T4 液体靶传输管线周围辐射剂量水平

T3 或 T4 靶仅生产 ^{18}F，^{18}F 核素通过地下液体靶传输管线进入热室，通道截面宽 20cm、深 60cm。传输通道由下至上（地面）依次为厚度 2mm 不锈钢管、2cm 铅屏蔽层、传输设备层和 35cm 厚的混凝土盖板，盖板与一层地面平齐。

对于产物 ^{18}F 核素，在开展辐射环境影响预测时，参考《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 I 中的公式 I. 1 通过变形后估算预测点位的剂量率。计算公式如下：

$$H_p = \frac{A \times \Gamma}{r^2 \times 10^{(X/TVL)}} \qquad (5.3)$$

式中：H_p — 关注点空气吸收剂量率，μSv/h；

A — 放射性核素活度，MBq，对于 ^{18}F，本项目取 148000MBq；

Γ — 距离源 1m 处的周围剂量当量率常数，μSv·m^2/MBq·h；

r — 预测点距源的距离，操作人员在热室观察窗前操作，m。

x — 屏蔽厚度,单位为毫米（mm）

TVL—γ 射线的十分之一值层厚度，单位为毫米（mm），其中 $10^{x/TVL}$

^{18}F 核素传输管线周围辐射剂量率计算参数及结果见表 5-8 所示，可得传输线上方地面高度 30cm 处的辐射剂量率约为 16.7μSv/h，可以满足热室屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求。

表 5-8 ^{18}F 核素传输管线周围辐射剂量率

核素	距离（m）	源活度（MBq）	周围剂量当量率常数 Γ（μSv·m²/MBq·h）	屏蔽材料及厚度 mm	什值层厚度(mm)	离地 30cm 高处辐射剂量率(μSv/h)
^{18}F	0.9	148000	0.143	铅 20	16.6	16.7
				混凝土 350	176	

备注：保守不考虑 2mm 不锈钢的屏蔽作用。

5.2.3 热室周围辐射水平

（1）锗镓核素热室

根据工程分析，单个镓镍合金靶材经过 20 天（480h）连续辐照后，在机房内放置 30min 后传输至锗镓核素车间第一个靶接收热室，在靶接收热室内存放 7 天后传输至相邻的靶处理热室，在处理热室进行分离提纯处理，并在处理热室中进行活度测量后分装入铅罐。

根据 ^{68}Ge 生产计划，靶接收热室每次最多接收存放和处理 1 个靶材，靶处理热室外人员操作期间，靶接收热室内没有被照射后的靶材在贮存，为保守分析，将表 5-6 中进入传输管线的镓镍合金靶材各核素活度源项作为进入热室后周围环境辐射剂量率水平计算的输入源项，采用 MicroShield9.05 软件计算分析。

根据建设单位提供的资料，热室内部净宽度为 130cm，靶材位于接收热室中央位置，则距离内表面为 65cm，距热室外表面 30cm 处人员操作位为 140cm（考虑机械臂安装空间），距非人员操作位为 110cm，距顶部外表 30cm 处为 130cm，距四周墙体（或门）外 30cm 最近距离约 2m，热室下方为地下土层。利用 MicroShield9.05 软件进行建模计算，当接收热室铅厚度为 150mm 时，靶材在接收热室时周围辐射剂量率最大贡献值计算结果见表 5-9 所示。

由表 5-9 可见，热室屏蔽体外 30cm 处工作人员操作位置的辐射剂量率最大值为 0.06μSv/h，非人员操作位 30cm 处的辐射剂量率最大值为 0.1μSv/h，顶部辐射剂量率最大值为 0.07μSv/h，当靶材进入第二个处理热室时，根据源项计算可知随着靶材放射性核素的衰减，在相同的铅屏蔽当量情况下，对处理热室外的辐射剂量率小于上述值，因此锗镓核素车间的热室屏蔽设计可以满足人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h 和屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求。

热室上方是二层预留辐射工作场所，一楼顶部混凝土厚度为 12cm，该热室操作期间对二层工作场所的辐射剂量率最大贡献值小于 0.001μSv/h，处于很低的水平。

热室所在房间四周墙体（或门）外 30cm 处的最大辐射剂量率水平约 0.025μSv/h，可以满足 2.5μSv/h 的管理要求。

表 5-9 锗镓固体靶材在热室时周围辐射剂量率水平

靶材中目标核素名称	关注点位置	最大辐射剂量率贡献值（μSv/h）
$^{68}Ge/^{68}Ga$	接收热室外 30cm 正面人员操作位	0.06
	接收热室外 30cm 非人员操作位	0.10
	接收热室顶部外 30cm 处	0.07
	二层地板上方 30cm 处	＜0.001
	热室所在房间四周墙体（或门）外 30cm 处	0.025

（2）诊断核素热室

根据工程分析，T2 靶站上的 9 种固体靶材经过不同时间连续辐照后，在机房内均放置 30min 后传输至诊断核素车间第一个靶接收热室，在靶接收热室内根据不同核素半衰期特点分别存放 2~7h 后传输至相邻的靶处理热室，在处理热室进行分离提纯处理，并在处理热室中进行活度测量后分装入铅罐。T3（或 T4）靶站上的液体靶照射 2h 后进入诊断核素车间第一个热室即可开展分离纯化工作，并在热室中进行活度测量后分装入铅罐。

根据 T2 靶站的生产计划，靶接收热室每次最多接收存放和处理 1 个固体靶材，靶处理热室的人员操作期间，靶接收热室内没有被照射后的靶材在贮存，对于各固体靶材，不考虑其在传输管线中的衰变，保守将表 5-6 中诊断核素传输管线中各核素活度源项作为进入第一个接收热室后周围环境辐射剂量率水平计算的输入源项，固体靶核素采用 MicroShield9.05 软件计算分析。液体 ^{18}F 核素进入热室后的周围辐射剂量水平按照表 5-8 源项采用理论公式 5.3 计算。

根据建设单位提供的资料，热室内部净宽度为 130cm，靶材位于接收热室中央位置，则距离内表面为 65cm，距热室外表面 30cm 处人员操作位的距离为 140cm（考虑机械臂安装空间），非人员操作位的距离为 110cm，顶部外表 30cm 处的距离为 130cm，距四周墙体（或门）外 30cm 最近距离约 2m，热室下方为地下土层。当接收热室铅厚度为 150mm 时，屏蔽体外辐射剂量率最大贡献值计算

结果见表 5-10 所示。

表 5-10 诊断核素靶材在热室时周围辐射剂量率水平

靶材中目标核素名称	关注点位置	最大辐射剂量率贡献值（μSv/h）
^{89}Zr	热室外 30cm 正面人员操作位	0.07
	热室外 30cm 非人员操作位	0.12
	热室顶部外 30cm 处	0.09
^{64}Cu	热室外 30cm 正面人员操作位	0.16
	热室外 30cm 非人员操作位	0.25
	热室顶部外 30cm 处	0.18
^{67}Cu	热室外 30cm 正面人员操作位	0.003
	热室外 30cm 非人员操作位	0.005
	热室顶部外 30cm 处	0.004
^{123}I	热室外 30cm 正面人员操作位	0.14
	热室外 30cm 非人员操作位	0.23
	热室顶部外 30cm 处	0.16
^{124}I	热室外 30cm 正面人员操作位	1.17
	热室外 30cm 非人员操作位	1.91
	热室顶部外 30cm 处	1.37
^{99}Mo	热室外 30cm 正面人员操作位	0.03
	热室外 30cm 非人员操作位	0.05
	热室顶部外 30cm 处	0.03
^{57}Co	热室外 30cm 正面人员操作位	0.004
	热室外 30cm 非人员操作位	0.006
	热室顶部外 30cm 处	0.005
^{203}Pb	热室外 30cm 正面人员操作位	0.02
	热室外 30cm 非人员操作位	0.012
	热室顶部外 30cm 处	0.014
^{225}Ac	热室外 30cm 正面人员操作位	＜0.001
	热室外 30cm 非人员操作位	＜0.001
	热室顶部外 30cm 处	＜0.001
^{18}F	热室外 30cm 正面人员操作位	＜0.001
	热室外 30cm 非人员操作位	＜0.001
	热室顶部外 30cm 处	＜0.001
上述所有核素	二层地板上方 30cm 处	0.010
	热室所在房间四周墙体（或门）外 30cm 处	0.48

由表 5-10 可见，诊断核素接收热室外表面 30cm 处工作人员操作位置的辐射剂量率最大值为 1.17μSv/h，非人员操作位 30cm 处的辐射剂量率最大值为

1.91μSv/h，顶部辐射剂量率最大值为 1.37μSv/h，当靶材进入第二个处理热室时，根据计算可知随着靶材放射性核素的衰减，在处理热室外的辐射剂量率小于上述值，由于诊断核素车间内从加速器传输的核素不同时进入热室，即不同时开展不同核素的操作，因此不考虑不同核素在热室内剂量贡献叠加情形，因此诊断核素车间热室屏蔽设计可以满足人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h 和屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求。

热室上方是二层预留辐射工作场所，一楼顶部混凝土厚度为 12cm，热室操作期间对二层工作场所的辐射剂量率最大贡献值约 0.01μSv/h，处于较低的水平。

热室所在房间四周墙体（或门）外 30cm 处的最大辐射剂量率水平约 0.48μSv/h，可以满足 2.5μSv/h 的管理要求。

（3）砹 ^{211}At 核素热室

根据工程分析，单个 ^{209}Bi 靶材经过 2.5h 连续辐照后，在机房内放置 30min 后通过传输管线至砹 ^{211}At 核素生产车间第一个靶接收手套箱，在靶接收手套箱内完成活度确认，然后立即进入标记分装手套箱进行分离提纯、产品标记、活度测量，最后分装入铅罐。

根据 ^{211}At 生产计划，靶接收手套箱每次最多接收存放和处理 1 个靶材，标记分装手套箱外人员操作期间，靶接收手套箱内没有被照射后的靶材在贮存，将表 5-6 中进入传输管线的靶材核素活度源项作为进入接收手套箱后周围环境辐射剂量率水平计算的输入源项，采用 MicroShield9.05 软件计算分析。

根据建设单位提供的资料，手套箱内部净宽度为 90cm，靶材位于接收手套箱中央位置，则距离内表面为 45cm，距热室外表面 30cm 处人员操作位的距离约为 75cm，非人员操作位的距离约 125cm，顶部和底部外表 30cm 处的距离为 75cm，距四周墙体（或门）外 30cm 最近距离约 2.5m，当接收手套箱和标记分装手套箱的铅厚度分别 30mm 和 25mm 时，屏蔽体外辐射剂量率最大贡献值计算结果见表 5-11 所示。

表 5-11　砹 ^{211}At 核素靶材在热室时周围辐射剂量率水平

靶材中目标核素名称	关注点位置	最大辐射剂量率贡献值（μSv/h）
^{211}At	接收手套箱外 30cm 正面人员操作位	1.25

	接收手套箱外 30cm 非人员操作位	0.47
	接收手套箱顶部和底部外 30cm 处	1.25
	标记分装手套箱外 30cm 正面人员操作位	1.61
	标记分装手套箱外 30cm 非人员操作位	0.59
	标记分装手套箱顶部外 30cm 处	1.61
	二层离地 30cm 处	0.01
	热室所在房间四周墙体（或门）外 30cm 处	0.26

由表 5-11 可见，接收手套箱屏蔽体外 30cm 处工作人员操作位置的辐射剂量率最大值为 1.25μSv/h，非人员操作位 30cm 处的辐射剂量率最大值为 0.47μSv/h，顶部和底部外 30cm 辐射剂量率最大值为 1.25μSv/h，当靶材进入第二个标记分装手套箱操作，屏蔽体外 30cm 处工作人员操作位置的辐射剂量率最大值为 1.61μSv/h，非人员操作位 30cm 处的辐射剂量率最大值为 0.59μSv/h，顶部辐射剂量率最大值为 1.61μSv/h。因此砹 ^{211}At 核素车间手套箱屏蔽设计可以满足人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h 和屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求。

手套箱上方是二层微生物检验区域，一楼顶部混凝土厚度为 12cm，对二层工作场所的辐射剂量率贡献约 0.01μSv/h，处于较低的水平。

热室所在房间四周墙体（或门）外 30cm 处的最大辐射剂量率水平约 0.26μSv/h，可以满足 2.5μSv/h 的管理要求。

（4）核素标记车间热室

核素标记热室主要对外购 ^{228}Th、^{212}Pb、^{177}Lu、^{125}I、^{131}I 和 ^{90}Y 核素的标记、提纯及分装等工作，在热室模块箱内预留位置放置原液罐，通过机械手并利用蠕动泵半自动化进行操作。根据工作计划，每种核素不同时操作，操作完一种核素，在做好清理后才换另外一种核素。

根据理论公式 5.3 计算对热室周围的辐射剂量率水平，预测情况见表 5-12。

表 5-12　外购核素标记热室周围辐射剂量率预测情况

序号	核素	位置	距离（m）	周围剂量当量率常数 Γ(μSv·m^2/MBq·h)	单次最大操作量(MBq)	铅屏蔽厚度(mm)	什值层厚度(mm)	最大辐射剂量率(μSv/h)
1	^{131}I	热室屏蔽外 30cm 人员操作位	1.4	0.0595	370000	60	11	0.039

2		其余三侧屏蔽体外30cm 非正对操作位	1.1	0.0595	370000	60	11	0.064
3		东侧墙外成品仓库间	4.6	0.0595	370000	60	11	0.004
4		南侧墙外内部通道	3.5	0.0595	370000	60	11	0.006
5		西侧墙外内部通道	3.5	0.0595	370000	60	11	0.006
6		北侧墙外洁具间	4.6	0.0595	370000	60	11	0.004

备注：^{228}Th 为 α 核素，不考虑外照射剂量；^{90}Y 为纯 β 核素，其韧致辐射剂量率很低；^{212}Pb、^{177}Lu、^{125}I 及 ^{90}Y 四种核素在热室所致周围辐射剂量率计算结果远小于 0.001μSv/h，表格中未统计。

由表 5-12 可见，核素标记车间热室屏蔽体外人员操作位最大辐射剂量率为 0.039μSv/h，非正对人员操作位最大辐射剂量率为 0.064μSv/h，热室屏蔽设计可以满足人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h 和屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h 的要求。热室所在房间四周墙体（或门）外 30cm 处的最大辐射剂量率水平约 0.006μSv/h，可以满足 2.5μSv/h 的管理要求。

需要说明的是，本项目外购标记核素 ^{228}Th、^{212}Pb、^{177}Lu、^{125}I、^{131}I 和 ^{90}Y 一般不会同时到货到存放间内，根据客户订单提前安排进货，保守考虑外购存放间内为 ^{131}I 核素，依据上述计算预测，当铅罐采用 60mm 铅当量时，罐体表面 30cm 处辐射剂量率水平约 0.63μSv/h，罐体与周围墙体最近距离约 1.5m，不考虑墙体屏蔽情况下对存放间外相邻区域的最大剂量贡献值约 0.28μSv/h，可以满足本项目提出的 2.5μSv/h 要求，考虑到外购核素存放间东侧为相邻监控室，人员可能会长期居留，因此报告提出项目建设后根据实际监测结果拟采取辐射防护措施（如靠墙放置铅屏风等）进行补偿，实现墙外无明显附加剂量，确保人员辐射安全。

5.2.4 成品包装间容器表面辐射水平

一层四个生产车间内放射性核素成品在热室或手套箱中被注入到西林瓶，并贮存在密封铅罐中，转运至相应的成品包装车间销售。

根据建设单位生产的产品包装规格，质子回旋加速器 T1 靶生产的 ^{68}Ge 液体核素为每个铅罐内活度不大于 100mCi，锗镓发生器产品规格为 100mCi 和 50mCi 两种；T1 和 T2 靶不生产期间，T3 或 T4 生产 ^{18}F，T2、T3 和 T4 靶生产的液体核素产为每个铅罐内活度不大于 100mCi，钼锝发生器产品规格为 1000mCi。α 粒子回旋加速器生产的 ^{211}At 核素药物每个铅罐内活度分为 100mCi 和 50mCi 两种。

标记外购核素的药物产品，每个铅罐内活度不大于 100mCi。铅罐包装屏蔽设计见 4.2.2 节表 4-3 所示。

根据理论公式 5.3 计算，成品贮存容器表面 5cm 和 30cm 处辐射水平计算结果见表 5-13。

表 5-13　成品贮存容器表面辐射水平

成品包装间对应热室/手套箱	核素	距离[1)]（m）	单次最大操作量[2)]（MBq）	周围剂量当量率常数 Γ（μSv·m²/MBq·h）	铅屏蔽厚度 mm	什值层厚度 (mm)	操作人员所处位置剂量率 (μSv/h)
锗镓核素热室	^{68}Ga	0.1	3700	0.134	40	16.6	193.1
		0.35	3700	0.134	40	16.6	15.8
	锗镓发生器	0.1	3700	0.134	40	16.6	193.1
		0.35	3700	0.134	40	16.6	15.8
		0.1	1850	0.134	40	16.6	96.5
		0.35	1850	0.134	40	16.6	7.9
诊断核素热室	^{57}Co	0.1	3700	0.022	40	0.9	＜0.001
		0.35	3700	0.022	40	0.9	＜0.001
	^{64}Cu	0.1	3700	0.029	40	16.6	41.8
		0.35	3700	0.029	40	16.6	3.4
	^{67}Cu	0.1	3700	0.014	40	4	＜0.001
		0.35	3700	0.014	40	4	＜0.001
	^{89}Zr	0.1	740	0.159	40	35	846.8
		0.35	740	0.159	40	35	69.1
	^{99}Mo	0.1	3700	0.022	40	19	63.9
		0.35	3700	0.022	40	19	5.2
	钼锝发生器	0.1	37000	0.030	20	1	＜0.001
		0.35	37000	0.030	20	1	＜0.001
	^{123}I	0.1	3700	0.061	40	1.5	＜0.001
		0.35	3700	0.061	40	1.5	＜0.001
	^{124}I	0.1	1850	0.185	40	23.2	646.0
		0.35	1850	0.185	40	23.2	52.7
	^{203}Pb	0.1	3700	0.096	40	7.8	0.26
		0.35	3700	0.096	40	7.8	0.02
	^{18}F	0.1	1850	0.143	40	16.6	103.0
		0.35	1850	0.143	40	16.6	8.4
	^{211}At 子体 ^{207}Bi	0.1	3700	-	2mm 铅+2mm 不锈钢	-	104.4

砹 ^{211}At 核素手套箱		0.35	3700	-	2mm 铅+2mm 不锈钢	-	8.5
外购核素标记热室	^{177}Lu	0.1	3700	0.006	20	3	＜0.001
		0.35	3700	0.006	20	3	＜0.001
	^{212}Pb	0.1	3700	0.039	20	1.8	＜0.001
		0.35	3700	0.039	20	1.8	＜0.001
	^{125}I	0.1	3700	0.0165	20	0.11	＜0.001
		0.35	3700	0.0165	20	0.11	＜0.001
	^{131}I	0.1	3700	0.0595	40	11	5.1
		0.35	3700	0.0595	40	11	0.42

备注：1）铅罐表面至源中心点距离按 5cm 计；

2）考虑 ^{68}Ge 衰变子体 ^{68}Ga 产生的辐射影响；^{225}Ac 为 α 核素，不考虑外照射剂量；^{211}At 考虑生产过程中衰变子体 ^{207}Bi 的影响，通过 MicroShield9.05 软件计算；^{90}Y 为纯 β 核素，韧致辐射剂量率很低，本表格中不计入。^{89}Zr 由于能量较高，建设单位在铅罐中最大贮存量按 20mCi 计。

由表 5-13 可见，成品铅罐表面 5cm 处辐射剂量率最大为 846.8μSv/h，可以满足《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）第 5.3.1 条中“货包或集合包装的外表面上任一点的最高辐射水平应不超过 2mSv/h”的要求。

由于各成品包装间的核素按照订单需求生产，不暂存，打包期间在成品包装间以及特殊情况下需要暂存至放射性药物成品库时，在各房间内通过放入铅柜及铅屏风等措施进行防护，确保四周墙体（或门）外 30cm 处的最大辐射剂量率水平可以满足 2.5μSv/h 的管理要求。

5.2.5 质检实验室辐射水平

二楼质检实验室在通风柜中，将核素样品（最大活度 1mCi）从铅罐中抽取出抽取若干 μCi（一般不大于 20μCi），进行检测和分析，各种核素分时段使用，使用完成后及时清场，核素不交叉使用。通风柜内样品距离通风柜两侧内表面约 525mm，上下内表面 400mm，前后内表面约 425mm，通风柜外操作人员距离通风柜表面 30cm。通风柜正面为 20mm 铅玻璃屏，其余各面为 2mm 不锈钢，分析样品置于 40mm 铅罐内。

操作时周围辐射水平计算结果见表 5-14 所示。从计算结果可知，通风柜 30cm（操作位）最大辐射剂量率为 0.202μSv/h，其余侧屏蔽体外最大辐射剂量率为 0.753μSv/h。通风柜的屏蔽设计可以满足人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h 和屏蔽体外非正对人员操作位 30cm 处周围剂量当量率小于 25μSv/h 的

要求。通风柜所在车间四周墙体（或门）外 30cm 处的最大辐射剂量率水平约 0.147μSv/h，可以满足 2.5μSv/h 的管理要求。

表 5-14　放化质检实验周围辐射剂量水平

位置	核素	最近距离（m）	单次最大操作量（MBq）	周围剂量当量率常数 Γ（μSv·m²/MBq·h）	什值层厚度(mm)	正面铅屏蔽厚度 mm	其余面铅屏蔽厚度 mm	操作人员所处位置剂量率(μSv/h)	其余面屏蔽体外剂量率(μSv/h)
放化质检实验室通风柜外 30cm	^{68}Ga	0.75	37	0.134	16.6	60	40	0.002	0.034
	^{57}Co	0.75	37	0.022	0.9	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{64}Cu	0.75	37	0.029	16.6	60	40	＜0.001	0.007
	^{67}Cu	0.75	37	0.014	4	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{89}Zr	0.75	37	0.159	35	60	40	0.202	0.753
	^{99}Mo	0.75	37	0.022	19	60	40	0.001	0.011
	^{99m}Tc	0.75	37	0.020	1	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{123}I	0.75	37	0.061	1.5	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{124}I	0.75	37	0.185	23.2	60	40	0.031	0.230
	^{203}Pb	0.75	37	0.096	7.8	60	40	＜0.001	0.027
	^{18}F	0.75	37	0.143	16.6	60	40	0.002	0.037
	^{177}Lu	0.75	37	0.006	4.7	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{212}Pb	0.75	37	0.039	1.8	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{125}I	0.75	37	0.0165	0.11	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{131}I	0.75	37	0.0595	11	60	40	＜0.001	＜0.001
	^{211}At 子体 ^{207}Bi	0.75	37	-		60	40	＜0.001	＜0.001
放化质检实验室四周墙体（或门）外 30cm	^{89}Zr	1.70	37	0.159	35	60	40	0.147	

备注：考虑 ^{68}Ge 衰变子体 ^{68}Ga 产生的辐射影响；^{211}At 为 α 核素，不考虑外照射剂量，^{211}At 考虑生产过程中衰变子体 ^{207}Bi 的影响，通过 MicroShield9.05 软件计算；^{90}Y 为纯 β 核素，韧致辐射剂量率很低，本表格中不计入；不考虑热室不锈钢的屏蔽作用。

5.2.6 放射性废物暂存库周围辐射水平

放射性核素生产过程中产生的放射性废物，包括少量废液转固和放射性固废，企业转移废物收集铅桶的表面剂量率控制值设置为 2.5μSv/h，当废物转移至地下一层废物暂存库内的贮存箱后，箱体采用不锈钢夹铅板防护，废物暂存库四周为钢筋混凝土加硫酸钡涂料防护，若经监测废物暂存库墙体外辐射剂量率水平超过管理值 2.5μSv/h，则通过在贮存箱内部增加独立铅桶/箱等方式，通过上述屏蔽措

施后本项目放射性废物暂存库外（包括顶部）的辐射剂量率可以控制在 2.5μSv/h 以下，且放射性废物库周围无人员长期居留，对周围环境影响较小。

5.2.7 感生放射性估算

加速器停止运行后，由于加速器机房内部件、混凝土墙和室内空气活化导致在一定时间内机房（含靶站）处均有较强的辐射场。虽然缓发辐射场随停机时间慢慢衰减，但由于本项目束流强度较高，加速器停机数天后靶站依然处于较高辐射水平。

本项目加速器每年停机检维修工作委托设备生产单位 ACSI 公司负责，检维修期间企业辐射工作人员不进入加速器机房内部。因此检维修期间设备停机，对本项目建设单位的职业人员和公众不会有辐射影响。

考虑维修人员进入加速器机房内的工作时间，为评估检维修工作期间机房内辐射剂量场的辐射水平，本项目分别考虑从单次照射后停机和连续照射一年停机两种估算模式分别进行分析，第一种估算模式先按照质子加速器 T1 靶和 T2 靶（以打靶生产 ^{99}Mo 为例）同时照射，以及 α 粒子加速器单个内靶照射运行，均保守以 T1 靶最长单次照射时间计，给出打靶结束停机后不同时刻机房内缓发辐射场的变化情况，或者按照质子加速器 T3 靶和 T4 靶同时运行，以及 α 粒子加速器同时运行，并保守取单次照射 2.5h 时间计，也给出打靶结束停机后不同时刻机房内缓发辐射场的变化情况。

第二种估算模式保守按照质子加速器 T1、T2、T3 和 T4 靶连续一年照射时间以及照射流强进行蒙特卡洛程序计算概率分配，即某一个靶照射时间越长、流强越强，那么一个随机粒子轰击这个靶的概率就越大，以及 α 粒子加速器连续照射运行一年，基于上述假设进行机房内感生放射性水平评估。

图 5-13 给出了第一种估算模式下加速器机房内的缓发辐射场（T1 靶、T2 靶和 α 内靶运行），从图中可知，当质子回旋加速器停止出束 24h 后，机房入口处辐射剂量水平约 7.5μSv/h，除了靶站所在区域外，内部大部分空间辐射水平低于 100μSv/h。α 粒子回旋加速器停止出束 24h 后，机房入口处辐射剂量率水平降为本底水平，且内部空间辐射剂量率水平基本低于 10μSv/h。图 5-14 给出了第一种模式下加速器机房内的缓发辐射场（T3 靶、T4 靶和 α 内靶运行），从图中可知，

当质子回旋加速器停止出束 24h 后，机房入口处辐射剂量水平约 6μSv/h，除了靶站所在区域外，内部大部分空间辐射水平低于 10μSv/h。α 粒子回旋加速器停止出束 24h 后，机房入口处辐射剂量率水平降为本底水平，且内部空间辐射剂量率水平基本低于 2μSv/h。

图 5-15 给出了第二种估算模式下加速器机房内的缓发辐射场，从图中可以看出，当质子回旋加速器停止出束 24h 后，机房入口处辐射剂量水平约 20μSv/h，除了靶站区域外，内部大部分空间辐射剂量水平低于 100μSv/h。α 粒子回旋加速器停止出束 24h 后，机房入口处辐射剂量率水平约为 3μSv/h，且内部空间辐射剂量率水平基本低于 10μSv/h。

可见本项目质子加速器缓发辐射场较强且与加速器连续运行的时间有关，对于质子加速器停机后需要进入维修的厂家工作人员，根据上述剂量场保守估算，在停机 24h 后，人员进入质子回旋加速器机房大厅居留 1h，此时人员最大受照剂量水平约 0.1mSv，进入 α 粒子回旋加速器机房大厅距离 1h，此时人员最大受照剂量水平约 0.01mSv，此时。因此，当需进入加速器机房进行检维修时，从事检维修的设备生产单位应根据机房内固定式监测仪表的测量结果，制定详细的检维修工作方案，确定停机冷却时间、进入工作区域及安排人员工作时间等，控制检维修人员单次受照剂量。

略

图 5-13 第一种估算模式加速器机房内的缓发辐射场

（T1 靶、T2 靶和 α 内靶运行）

略

图 5-14 第一种估算模式加速器机房内的缓发辐射场

（T3 靶、T4 靶和 α 内靶运行）

略

图 5-15 第二种估算模式下加速器机房内的缓发辐射场

5.2.8 放射性表面污染分析

本项目部分核素会衰变发出 α 射线、β 射线，在生产、使用过程中不可避免产生少量的 α、β 放射性表面污染，只要采用相应的防护措施并配备相应的仪器

检测，对受污染的手、皮肤、衣服、工作袜、设备、墙壁和地面经采取适当的去污措施，及时清洗，其表面污染水平预计不会超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871- 2002）等标准中工作场所的放射性表面污染控制水平。

5.2.9 人员受照剂量估算

本项目职业人员包括辐射安全主管、质子加速器操作人员、α 粒子加速器操作人员，锗镓核素车间操作人员、诊断核素车间操作人员、砹 ^{211}At 车间操作人员、核素药物标记车间操作人员、实验室操作人员，设备巡视维保人员，职业人员的受照剂量途径包括：加速器机房（含靶站）、热室车间、质检等辐射场所产生的中子和 X-γ 外照射，以及工作场所可能的吸入内照射。

对于评价范围内的公众，其中厂房其他楼层公众主要考虑中子和 X-γ 外照射，厂房外周围公众考虑排气筒排出的气载流出物进入大气环境后造成的辐射影响，途径主要为：空气浸没外照射、地面沉积外照射、空气吸入内照射以及摄入陆生食品内照射等。由于本项目涉及的放射性核素大部分半衰期较短，且挥发性放射性气溶胶经高效过滤系统处理后排放量较小，在周边敏感目标处放射性气溶胶的地面浓度较低，加之本项目辐射评价范围内居民自行生产的食物种类单一，占其消耗食品份额较小，对公众的影响较小。因此本项目对厂房外周围公众受照剂量主要考虑空气吸入内照射、烟羽浸没外照射 2 种途径。

另外，加速器首次安装时调试工作由设备生产厂商负责，本项目建设单位的辐射工作人员不参与，在机房屏蔽设施完好的工况下开机调试，由于调试时间较短，可不考虑调试阶段对企业内职业人员和周围公众受照剂量。

加速器运行期间停机检维修工作委托设备厂商开展，本项目建设单位的辐射工作人员和公众均不进入停机后的机房，因此不考虑机房内感生放射性对本项目职业人员和楼内公众的辐射影响。

上述途径所致辐射剂量计算方法如下：

（1）外照射剂量计算方法

中子、X-γ 外照射按联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR)-2000 年报告中的公式计算，具体见公式 5.4：

$$\boldsymbol{H = D \times t \times T} \qquad (5.4)$$

式中：

$\boldsymbol{H}$—人员年受照剂量，mSv/a；

$\boldsymbol{D}$—人员所在场所辐射剂量率，mSv/h；

$\boldsymbol{t}$—人员年工作时间，h/a；

T—居留因子，无量纲。

（2）空气浸没外照射和吸入内照射计算方法

— 空气浸没外照射剂量计算公式见 5.5：

$$D_{EA} = t \times (\sum_i x_i \cdot DF_{EAi} \cdot F) \qquad (5.5)$$

式中：

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

x_i — 计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m^3；

DF_{EAi}— 浸没于半无限烟云中放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，(Sv/ a)/(Bq/m^3)，取自 2019 年美国环保署资料 EPA-402/R19/002；

F — 建筑物的屏蔽因子，无量纲，保守取 1；

t —加速器出束时间；热室（手套箱或通风柜）内核素操作时间 s/a。

— 空气吸入内照射剂量计算见公式 5.6：

$$D_{EI} = t \times B_r \times (\sum_i x_i \cdot DF_{EIi}) \qquad (5.6)$$

式中：

D_{EI} — 计算点处人员吸入污染空气造成的有效剂量，Sv/a；

x_i — 计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m^3；

DF_{EAI}— 吸入放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq；取自 GB18871-2002。

B_r — 人的呼吸率 m^3/h，取自 GBZ/T200.3-2014 中推荐的成年男性呼吸率 1.5m^3/h；

t — 加速器出束时间；热室（手套箱或通风柜）内核素操作时间 h/a。

5.2.9.1 职业人员外照射剂量估算

辐射工作人员工作负荷见 3.3.11 节，各辐射工作人员的工作岗位固定，不兼职其它辐射工作，可不考虑不同工种之间受照剂量叠加。本报告根据各辐射工作

场所屏蔽设施外关注点所处的最大环境辐射剂量水平和工作负荷保守估算辐射工作人员年外照射剂量，居留因子均取 1。

本项目辐射工作人员所受外照射剂量计算参数及结果见表 5-15。

表 5-15　辐射工作人员所受外照剂量计算参数及结果

序号	岗位性质	工作场所/操作	工作场所/操作过程最大辐射剂量率（表面 30cm 计）μSv/h	年工作负荷〔3〕	年受照剂量，mSv/a	
					小计	合计
1	辐射安全管理人员	一层加速器运行管理	0.53	250h	0.133	0.702
		一层热室运行管理	1.91	250h	0.475	
		二层实验室运行管理	0.753	125h	0.094	
2	加速器操作人员	质子回旋加速器控制室	0.008	6000h	0.048	三班运行，每班 0.016
		α 粒子回旋加速器控制室	0.008	单班 2000h	0.016	
3	锗镓核素车间工作人员	热室操作位（含 ^{68}Ge 核素靶处理、分装、锗镓发生器生产、活度测量等）	0.06	每批 ^{68}Ge 核素 2h，每批发生器 3h，合计年 60h	0.004	0.309
		传递成品 ^{68}Ge 核素铅罐至包装间打包并送至物流出入口	15.8	每批 0.5h，年 6h	0.095	
		传递锗镓发生器至包装间打包并送至物流出入口	15.8	每批 1h，年 12h	0.190	
		传递质检铅罐并送至一层货梯口	0.034	每批 2min，年 0.4h	＜0.001	
		清理放射性废物铅桶并转移至废物暂存库	2.5〔4〕	每次 30min，年 60min	0.003	
		诊断热室核素（固体靶和液体靶）在车间传输管线转移过程〔1〕	16.7	单次最长 8s，年累计约 1h	0.017	
4	诊断核素车间工作人员	热室操作位（10 种诊断核素靶处理、分装、钼锝发生器生产、活度测量等）〔2〕	^{124}I：1.17	单批次 3h，年 150h	0.379	两班运行，每班 1.957
			其余全部按 0.16	每种核素产品 3h/批，共 1272h		

		传递成品诊断核素铅罐至包装间打包并送至物流出入口〔2〕	考虑如下： ^{64}Cu：3.4 ^{89}Zr：69.1 ^{99}Mo：5.2 ^{124}I：52.7 ^{18}F:8.4 ^{203}Pb :0.02	按每种核素产品每批 0.5h，各产品每年 25h 计	3.471	
		传递钼锝发生器包装间打包并送至物流出入口	＜0.001	每批 0.5h，年 25h	＜0.001	
		传递质检铅罐并送至一层货梯口	0.753	每批 2min，年 0.4h	＜0.001	
		清理放射性废物铅桶并转移至废物暂存库	2.5〔4〕	每次 30min，年 25h	0.063	
		^{211}At 核素在车间上方传输管线转移过程〔1〕	0.59	每次 15s，年 2.08h	0.001	
5	砹 ^{211}At 核素车间工作人员	手套箱操作位（^{211}At 核素生产）	1.61	每批 1.5h，合计 750h	1.208	两班运行，每班 1.698
		传递 ^{211}At 核素铅罐至包装间打包并送至物流出入口	8.5	按每批 0.5h，每年 250h	2.125	
		传递质检铅罐并送至一层货梯口	＜0.001	每批 2min，年 16.7h	＜0.001	
		清理放射性废物铅桶并转移至废物暂存库	2.5〔4〕	每次 30min，年 25h	0.063	
6	核素标记车间工作人员	外购核素内部转运（含存取）〔5〕	0.63	每批 10min，年 500min	0.005	0.085
		热室操作位（核素标记、活度测量、分装等）	0.039	每批 3h，年 150h	0.006	
		传递质检铅罐并送至一层货梯口	＜0.001	每批 2min，年 1.67h	＜0.001	
		清理放射性废物铅桶并转移至废物暂存库	2.5〔4〕	每次 30min，年 25h	0.063	

		传递成品标记核素铅罐至包装间打包并送至物流出入口	0.42	每批 0.5h，年 25h	0.011	
7	实验室核素操作人员	放化质检通风柜操作位	0.202	1000h	0.202	两班运行，每班 0.139
		清理放射性废物铅桶并转移至废物暂存库	2.5〔4〕	每次 30min，每年 25h	0.063	
		一层热室操作运行对二层实验室操作人员的贡献	0.01	年 1250h	0.0125	
8	场所设备巡检维保人员	一层辐射工作场所设备维保	1.91	250h	0.478	两班运行，每班 0.333
		二层辐射工作场所设备维保	0.753	250h	0.188	

备注：（1）锗镓靶材在传输管线进入锗镓核素车间热室时，此时辐射工作人员不进入车间，但保守考虑锗镓核素辐射工作人员操作期间诊断核素正在车间上方传输管线内的过程，同理诊断核素车间辐射工作人员操作期间考虑 ^{211}At 核素正在车间上方传输管线内的过程；（2）根据表 5-11 由于诊断核素车间操作的核素较多，不同核素的剂量率贡献值差异较大，若选用最大值进行计算过于保守，因此该部分综合考虑核素使用种类及对应剂量率贡献值水平；（3）根据工程分析的各核素工作批次和工作时间计算；（4）本项目辐射工作场所固体废收集桶外或放射性废液收集罐外表面周围剂量当量率管理限值 2.5μSv/h 计；（5）根据表 5-12 备注分析，本项目外购核素内部转运（含存取）保守辐射影响最大的 ^{131}I 进行估算。

根据表 5-15 可知，本项目辐射工作相关人员受到外照射剂量如下：

（1）辐射安全管理人员

辐射安全管理人员在一楼生产车间和二层实验室管理巡视期间，最大年受照剂量为 0.702mSv/a。

（2）加速器操作人员

加速器操作人员的工作区域在加速器控制室内，每班质子回旋加速器操作人员年受照剂量为 0.016mSv/a，α 粒子回旋加速器操作人员年受照剂量为 0.016mSv/a。

（3）核素车间工作人员

锗镓核素车间每班工作人员的年受照剂量为 0.309mSv/a。诊断核素车间每班工作人员的年受照剂量为 1.957mSv/a。砹 ^{211}At 核素车间每班工作人员的年受照剂量为 1.698mSv/a。核素药物标记车间操作人员的年受照剂量为 0.085mSv/a。

（4）实验室核素操作人员

实验室辐射每班工作人员在操作核素期间及清理放射性废物期间受到的年受照剂量为 0.139 mSv/a。

（5）场所设备巡检维保人员

辐射工作场所设备巡检维保人员的年受照剂量为 0.333mSv/a。

由上可见，本项目辐射工作人员年受外照射剂量最大的是诊断核素操作人员（1.957mSv/a）。

5.2.9.2 职业人员内照射剂量估算

本项目 ^{123}I、^{124}I、^{125}I、^{131}I、^{211}At 等与碘有关的核素均具有一定挥发性，当辐射工作场所内工作人员吸入时容易引起内照射。参考《辐射防护手册——第三分册》（潘自强、李德平主编）P496，手套箱的泄漏率一般在 0.05~0.5%之间，本项目负压热室、手套箱和通风柜的泄漏率保守均取最大值 0.5%。根据表 3-19 诊断核素热室、砹 ^{211}At 核素手套箱、核素标记热室、放化质检实验通风柜上述核素日操作挥发量，以及相应核素日操作时间、工作场所房间设计排风量等参数，由公式 5.6 计算核素车间工作人员和实验室质检操作工作人员的吸入所致有效剂量，见表 5-16 所示。

表 5-16 辐射工作人员所受内照剂量计算参数及结果

序号	岗位性质	操作核素	日挥发产生量（Bq）	日最大操作时间	年工作时间	房间设计排风量（m^3/h）	剂量转换因子[1]（Sv/Bq）	空气中核素浓度（Bq/m^3）	吸入年有效剂量，mSv/a	
1	诊断核素操作人员	^{123}I	3.70E+08	2h	100h	2800	1.1E-10	330	0.005	每班人员 0.067
		^{124}I	7.40E+07	2h	100h	2800	6.3E-09	66.1	0.062	
2	砹 ^{211}At 核素操作人员	^{211}At	7.40E+07	3h	750h	2740	2.7E-08	45.1	1.37	每班人员 0.685
3	核素标记操作人员	^{125}I	3.70E+07	3h	150h	2810	7.3E-09	21.9	0.036	0.579
		^{131}I	3.70E+08	3h	150h	2810	1.1E-08	219	0.54	
4	实验室质检操作人员	^{123}I	3.70E+04	10min	500min	2200	1.1E-10	0.51	6.94E-07	每班人员＜0.001
		^{124}I	3.70E+04	10min	500min	2200	6.3E-09	0.51	3.97E-05	
		^{125}I	3.70E+04	10min	500min	2200	7.3E-09	0.51	4.60E-05	
		^{131}I	3.70E+04	10min	500min	2200	1.1E-08	0.51	6.94E-05	
		^{211}At	3.70E+04	20min	5000min	2200	2.7E-08	0.26	8.81E-04	

备注：（1）查自 GB18871-2002 表 B3，吸入的气溶胶粒子的活度中空气动力学直径通常取 5μm。

表 5-16 可知，诊断核素操作人员在热室操作 ^{123}I 核素和 ^{124}I 核素期间，每班人员年吸入核素所致有效剂量是 0.067mSv/a，砹 ^{211}At 核素操作期间，每班人员年吸入核素所致有限剂量是 0.685mSv/a，核素标记操作人员在热室操作 ^{125}I 核素和 ^{131}I 核素期间，人员年吸入核素所致有效剂量是 0.579mSv/a，放化实验室质检操作 ^{123}I、^{124}I、^{125}I 和 ^{131}I 核素期间，每班人员年吸入核素所致有效剂量小于 0.001 mSv/a。

叠加上节外照射剂量结果，本项目辐射工作人员年受照照射剂量汇总见表 5-17 所示。

表 5-17 本项目辐射工作人员年受照照射剂量汇总

序号	人员工作岗位	外照射最大剂量 mSv/a	内照射最大剂量 mSv/a	年受照剂量合计 mSv/a
1	辐射安全管理人员	0.702	-	0.702
2	质子回旋加速器操作人员	0.016	-	0.016
3	α 粒子回旋加速器操作人员	0.016	-	0.016
4	锗镓核素车间操作人员	0.309	-	0.309
5	诊断核素操作人员	1.957	0.067	2.024
6	砹 ^{211}At 核素操作人员	1.698	0.685	2.383
7	核素标记操作人员	0.085	0.579	0.664
8	实验室质检操作人员	0.139	< 0.001	0.139
9	场所设备巡检维保人员	0.333	-	0.333

由表 5-17 可见，本项目辐射工作人员年受照剂量最大的是砹 ^{211}At 核素操作人员（2.383mSv/a），所有辐射工作人员的年有效剂量均低于本项目剂量管理目标值（即职业人员年有效剂量不超过 5mSv/a）。

5.2.9.3 公众外照射剂量估算

根据本项目环境保护目标分布情况，以及与加速器、热室等区域的距离关系，估算了公司内和产业园区公众的受照剂量。项目评价范围内的公众主要是公司员工及产业园内其他公司员工，居留时间保守按每年 2000 小时计，居留因子全区，具体见表 5-18。从表中可见，本项目所在厂房楼内公众年受外照射剂量最大值 0.030mSv/a，项目厂房外周围公众受外照射剂量最大值 0.010mSv/a。

表 5-18 公众受外照射剂量估算结果

序号	预测对象	最近距离 m	辐射剂量率贡献值[1] μSv/h	居留因子	年居留时间，h	年受照剂量，mSv/a
1	一层大厅接待区工作人员	约 5	0.005	1	2000	0.010
2	三层预留理化实验室工作人员	约 7	0.015[2]	1	2000	0.030
3	四层办公室工作人员	约 12	0.005[2]	1	2000	0.010
4	北侧浙江爱索拓标记医药科技有限公司（1#在建厂房）	约 20	0.005	1	2000	0.010
5	南侧深圳拉尔文生物工程技术有限公司（3#在建厂房）	约 20	0.005	1	2000	0.010
6	东南侧在建 4#厂房	约 25	0.003	1	2000	0.006
7	东侧在建 5#厂房	约 20	0.005	1	2000	0.010
8	东北侧上海华核药业股份有限公司（在建 6#厂房）	约 25	0.003	1	2000	0.006
9	东侧中核秦山同位素有限公司	约 120	1.33E-04	1	2000	2.65E-04
10	东北侧拟建企业（诺华医药科技（浙江）有限公司	约 310	1.99E-05	1	2000	3.98E-05
11	东南侧拟建企业（浙江颐核医疗科技有限公司）	约 400	1.19E-05	1	2000	2.39E-05
12	拟建企业（嘉兴法伯远恒科技发展有限公司）	约 220	3.95E-05	1	2000	7.89E-05
13	秦山核电二期西南门停车场	约 420	1.08E-05	1	2000	2.17E-05
14	杨柳山社区民房 1	约 470	8.65E-06	1	2000	1.73E-05
15	杨柳山社区民房 2	约 490	7.96E-06	1	2000	1.59E-05

备注：（1）2#厂房一层和厂房外公众辐射剂量率水平保守取一层辐射场所热室周围辐射剂量率最大值的距离衰减，不考虑四周墙体屏蔽；

（2）三层和四层公众辐射剂量率水平保守考虑二层辐射场所手套箱四周辐射剂量率最大值的距离衰减，不考虑楼板墙体屏蔽。

5.2.9.4 放射性废气所致公众受照剂量估算

本项目公众不进入质子回旋加速器机房和α回旋加速器机房，不考虑加速器机房内空气活化和其它部件感生放射性对公众造成的辐射影响。半衰期较短的核素（^{11}C、^{13}N、^{15}O）会迅速衰变，机房内保持通风换气，活化核素不会长期累积，对检修情况下进入加速器机房的人员和周围公众的影响较小。

根据 3.5.1 和 4.4.1 节可知，质子回旋加速器排放系统和 α 回旋加速器废气排放系统分别设置 1 个独立排放口，加速器运行期间会外排少量感生放射性气体，另外诊断核素热室、砹 ^{211}At 核素手套箱、核素标记热室、放化质检实验通风柜的废气排放系统分别设置 1 个独立排放口，运行期间排放与碘有关的放射性气溶胶，保守评估上述 6 个排放口排放到环境中的气态放射性核素对公众造成的吸入内照射剂量和空气浸没外照射。

为了简单保守预测气态排放物在项目周围地面浓度分布，本报告使用 IAEA NO.19 报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》中推荐的简单稀释模式进行预测。该模式适用于小型核设施或核技术应用项目，该模式不考虑烟羽的抬升，评价范围不大于 20km。

本项目位于海盐县，其常年主导风向为东南风，平均风速 2.6m/s。本项目各放射性气体排放口高度（H）均为 26.15m，邻近建筑最大高度（H_b）约为 48.7m（排放口距北侧 1#厂房最近约 30m），最大截面积A_b约为 58m×48.7m=2824.6m^2，故本项目计算模式及参数如下：

① 当释放高度 H≤2.5H_b，且 X＞2.5$\sqrt{A_b}$时，

$$c_{a,i}=\frac{P_p B Q_i}{u_a} \qquad (5.7)$$

$$B=\frac{16}{\sqrt{2\pi^3}}\frac{1}{x\sum z} \qquad (5.8)$$

$$\sum z=(\sigma_z^{\ 2}+A_b/\pi)^{0.5} \qquad (5.9)$$

$$\sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \quad (5.10)$$

式中：

$C_{a,i}$—下风向 X 距离处的核素 i 的地面空气浓度，Bq/m^3；

P_p—一年中风吹向接收点所在扇形方位 P 的时间份额，参考《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式的参数》，保守取 0.25；

Q_i—放射性核素 i 的年均排放率，Bq/s，其值见表 5-19；

U_a—在释放高度上年平均风速，取 2.6m/s；

B—下风距离 X 处的高斯扩散因子，1/m^2；

σ_z—垂直扩散参数，m；

A_b—最靠近接收点的建筑物的最大截面积，2824.6m^2；

X—距离排放源的距离，m。

② 当释放高度 H≤2.5H_b，且 X≤2.5$\sqrt{A_b}$时，

$$c_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (5.11)$$

式中：

K—经验常数，取 K=1m；

其他符号意义同上。

表 3-27 根据各热室（手套箱或通风柜）对应排放口核素的年排放量和操作时间，可估算出其年平均排放率，保守取表 3-22、表 3-23 中加速器机房外排核素排放速率为计算参数，计算结果汇总如下表 5-19 所示。

表 5-19 各排放口核素平均排放率结果一览表

排放口对应场所	核素	排放速率（Bq/s）
质子回旋加速器机房	^{3}H	1.85E-04
	^{7}Be	1.08E-01
	^{11}C	1.66E+03
	^{13}N	8.57E+02
	^{15}O	4.12E+03
	^{37}Ar	1.65E-01
	^{41}Ar	1.39E+03

α粒子回旋加速器机房	^{13}N	2.47E+03
	^{15}O	3.01E+03
	^{41}Ar	7.11E+01
诊断核素热室	^{123}I	2.57E+02
	^{124}I	5.14E+01
砹 ^{211}At 核素手套箱	^{211}At	3.43E+01
核素标记热室	^{125}I	1.71E+01
	^{131}I	1.71E+02
放化质检实验通风柜	^{123}I	3.08E-01
	^{124}I	3.08E-01
	^{125}I	3.08E-01
	^{131}I	3.08E-01
	^{211}At	1.54E-01

备注：两个加速器机房内排放的感生放射性气体不考虑通风系统的过滤器吸附作用。

根据公式（5-7）至公式（5-11），可估算出各核素地面空气浓度，结合本项目评价范围环境保护目标的距离位置，给出计算结果见表 5-20 所示。

表 5-20　地面放射性核素浓度计算结果（Bq/m^3）

排放口对应场所	核素	距离（m）								
		≤133	220	250	310	400	420	470	490	500
质子回旋加速器机房	^{3}H	1.16E-07	5.48E-09	4.75E-09	3.71E-09	2.73E-09	2.57E-09	2.23E-09	2.11E-09	2.06E-09
	^{7}Be	6.79E-05	3.21E-06	2.78E-06	2.17E-06	1.60E-06	1.50E-06	1.31E-06	1.24E-06	1.21E-06
	^{11}C	1.04E+00	4.93E-02	4.27E-02	3.33E-02	2.45E-02	2.31E-02	2.00E-02	1.90E-02	1.85E-02
	^{13}N	5.39E-01	2.55E-02	2.21E-02	1.72E-02	1.27E-02	1.19E-02	1.04E-02	9.83E-03	9.58E-03
	^{15}O	2.59E+00	1.23E-01	1.06E-01	8.29E-02	6.10E-02	5.74E-02	4.99E-02	4.73E-02	4.61E-02
	^{37}Ar	1.04E-04	4.90E-06	4.25E-06	3.31E-06	2.44E-06	2.29E-06	1.99E-06	1.89E-06	1.84E-06
	^{41}Ar	8.74E-01	4.15E-02	3.60E-02	2.81E-02	2.07E-02	1.94E-02	1.69E-02	1.60E-02	1.56E-02
α 粒子回旋加速器机房	^{13}N	1.55E+00	6.84E-02	5.92E-02	4.62E-02	3.40E-02	3.20E-02	2.78E-02	2.64E-02	2.57E-02
	^{15}O	1.89E+00	8.33E-02	7.22E-02	5.63E-02	4.15E-02	3.90E-02	3.39E-02	3.21E-02	3.13E-02
	^{41}Ar	4.47E-02	1.97E-03	1.71E-03	1.33E-03	9.79E-04	9.22E-04	8.00E-04	7.59E-04	7.39E-04
诊断核素车间热室	^{123}I	1.62E-01	7.11E-03	6.16E-03	4.81E-03	3.54E-03	3.33E-03	2.89E-03	2.74E-03	2.67E-03

	^{124}I	3.23E-02	1.42E-03	1.23E-03	9.62E-04	7.08E-04	6.66E-04	5.79E-04	5.49E-04	5.35E-04
砹 ^{211}At 车间手套箱	^{211}At	2.16E-02	9.50E-04	8.23E-04	6.42E-04	4.72E-04	4.45E-04	3.86E-04	3.66E-04	3.57E-04
核素标记车间热室	^{125}I	1.08E-02	4.73E-04	4.10E-04	3.20E-04	2.36E-04	2.22E-04	1.92E-04	1.83E-04	1.78E-04
	^{131}I	1.08E-01	4.73E-03	4.10E-03	3.20E-03	2.36E-03	2.22E-03	1.92E-03	1.83E-03	1.78E-03
放化质检实验通风柜	^{123}I	1.94E-04	8.53E-06	7.39E-06	5.76E-06	4.24E-06	3.99E-06	3.47E-06	3.29E-06	3.20E-06
	^{124}I	1.94E-04	8.53E-06	7.39E-06	5.76E-06	4.24E-06	3.99E-06	3.47E-06	3.29E-06	3.20E-06
	^{125}I	1.94E-04	8.53E-06	7.39E-06	5.76E-06	4.24E-06	3.99E-06	3.47E-06	3.29E-06	3.20E-06
	^{131}I	1.94E-04	8.53E-06	7.39E-06	5.76E-06	4.24E-06	3.99E-06	3.47E-06	3.29E-06	3.20E-06
	^{211}At	9.68E-05	4.26E-06	3.69E-06	2.88E-06	2.12E-06	2.00E-06	1.73E-06	1.64E-06	1.60E-06

备注：表中 133m 为 $X=2.5\sqrt{A_b}$计算得出，其余计算距离涵盖本项目厂界外评价范围内的环境保护目标与 2#厂房的相对距离。

根据公式（5.5），放射性废气对公众产生的浸没外照射有效剂量见表 5-21 所示。

表 5-21 放射性废气对公众产生的浸没外照射有效剂量 （mSv/a）

排放口对应场所	核素	距离（m）								
		≤133	220	250	310	400	420	470	490	500
质子回旋加速器机房	^{7}Be	3.14E-09	1.49E-10	1.29E-10	1.01E-10	7.40E-11	6.96E-11	6.05E-11	5.73E-11	5.59E-11
	^{11}C	1.02E-03	4.79E-05	4.15E-05	3.24E-05	2.38E-05	2.24E-05	1.95E-05	1.85E-05	1.80E-05
	^{13}N	5.29E-04	2.50E-05	2.17E-05	1.69E-05	1.24E-05	1.17E-05	1.02E-05	9.65E-06	9.40E-06
	^{15}O	2.60E-03	1.23E-04	1.07E-04	8.31E-05	6.12E-05	5.76E-05	5.00E-05	4.74E-05	4.62E-05
	^{41}Ar	1.15E-03	5.47E-05	4.74E-05	3.70E-05	2.72E-05	2.56E-05	2.22E-05	2.11E-05	2.05E-05
α 粒子回旋加速器机房	^{13}N	3.23E-04	1.42E-05	1.23E-05	9.61E-06	7.07E-06	6.66E-06	5.78E-06	5.48E-06	5.34E-06
	^{15}O	4.02E-04	1.77E-05	1.53E-05	1.20E-05	8.81E-06	8.29E-06	7.20E-06	6.82E-06	6.65E-06
	^{41}Ar	1.25E-05	5.49E-07	4.76E-07	3.71E-07	2.73E-07	2.57E-07	2.23E-07	2.12E-07	2.06E-07
诊断核素车间热室	^{123}I	3.69E-07	1.63E-08	1.41E-08	1.10E-08	8.09E-09	7.62E-09	6.61E-09	6.27E-09	6.11E-09
	^{124}I	5.93E-07	2.61E-08	2.26E-08	1.77E-08	1.30E-08	1.22E-08	1.06E-08	1.01E-08	9.81E-09

砹 ^{211}At 车间手套箱	^{211}At	6.17E-08	2.72E-09	2.35E-09	1.84E-09	1.35E-09	1.27E-09	1.10E-09	1.05E-09	1.02E-09
核素标记车间热室	^{125}I	1.61E-09	7.11E-11	6.16E-11	4.80E-11	3.54E-11	3.33E-11	2.89E-11	2.74E-11	2.67E-11
	^{131}I	9.81E-07	4.32E-08	3.74E-08	2.92E-08	2.15E-08	2.02E-08	1.76E-08	1.67E-08	1.62E-08
放化质检实验通风柜	^{123}I	3.69E-11	1.62E-12	1.41E-12	1.10E-12	8.08E-13	7.61E-13	6.60E-13	6.26E-13	6.10E-13
	^{124}I	2.96E-10	1.30E-11	1.13E-11	8.82E-12	6.49E-12	6.11E-12	5.30E-12	5.03E-12	4.90E-12
	^{125}I	1.62E-12	7.11E-14	6.16E-14	4.81E-14	3.54E-14	3.33E-14	2.89E-14	2.74E-14	2.67E-14
	^{131}I	9.82E-11	4.32E-12	3.75E-12	2.92E-12	2.15E-12	2.02E-12	1.76E-12	1.67E-12	1.62E-12
	^{211}At	3.08E-12	1.36E-13	1.17E-13	9.16E-14	6.74E-14	6.35E-14	5.51E-14	5.23E-14	5.09E-14
叠加值		6.03E-03	2.83E-04	2.45E-04	1.91E-04	1.41E-04	1.33E-04	1.15E-04	1.09E-04	1.06E-04

备注：根据源项大小及核素特性，上表中释放 β 射线的 ^{3}H 和低能 γ 射线的 ^{37}Ar 未考虑。

根据公式（5.6），放射性废气对公众产生的吸入内照射有效剂量见表 5-22 所示。

表 5-22　放射性废气对公众产生的吸入内照射有效剂量　（mSv/a）

排放口对应场所	核素	距离（m）								
		≤133	220	250	310	400	420	470	490	500
质子回旋加速器机房	^{3}H	4.63E-11	2.18E-12	1.89E-12	1.48E-12	1.09E-12	1.02E-12	8.88E-13	8.42E-13	8.20E-13
	^{7}Be	3.01E-08	1.42E-09	1.23E-09	9.61E-10	7.07E-10	6.65E-10	5.78E-10	5.48E-10	5.34E-10
	^{11}C	1.66E-04	7.85E-06	6.80E-06	5.31E-06	3.91E-06	3.68E-06	3.19E-06	3.03E-06	2.95E-06
诊断核素车间热室	^{123}I	1.55E-06	6.83E-08	5.92E-08	4.62E-08	3.40E-08	3.20E-08	2.78E-08	2.63E-08	2.57E-08
	^{124}I	5.82E-06	2.56E-07	2.22E-07	1.73E-07	1.27E-07	1.20E-07	1.04E-07	9.87E-08	9.62E-08
砹 ^{211}At 车间手套箱	^{211}At	2.67E-03	1.18E-04	1.02E-04	7.94E-05	5.85E-05	5.50E-05	4.78E-05	4.53E-05	4.41E-05
核素标记车间热室	^{125}I	3.39E-06	1.49E-07	1.29E-07	1.01E-07	7.42E-08	6.98E-08	6.06E-08	5.75E-08	5.60E-08
	^{131}I	5.81E-05	2.56E-06	2.21E-06	1.73E-06	1.27E-06	1.20E-06	1.04E-06	9.86E-07	9.60E-07
放化质检实验通风柜	^{123}I	1.55E-10	6.82E-12	5.91E-12	4.61E-12	3.39E-12	3.19E-12	2.77E-12	2.63E-12	2.56E-12
	^{124}I	2.90E-09	1.28E-10	1.11E-10	8.65E-11	6.36E-11	5.99E-11	5.20E-11	4.93E-11	4.80E-11

	^{125}I	3.39E-09	1.49E-10	1.29E-10	1.01E-10	7.42E-11	6.99E-11	6.07E-11	5.75E-11	5.61E-11
	^{131}I	5.81E-09	2.56E-10	2.22E-10	1.73E-10	1.27E-10	1.20E-10	1.04E-10	9.86E-11	9.61E-11
	^{211}At	1.33E-06	5.86E-08	5.08E-08	3.96E-08	2.92E-08	2.75E-08	2.38E-08	2.26E-08	2.20E-08
叠加值		2.91E-03	1.28E-04	1.11E-04	8.68E-05	6.39E-05	6.02E-05	5.22E-05	4.95E-05	4.83E-05

备注：计算参数中剂量转换因子查 GB18871-2002 表 B7，因未有 ^{13}N、^{15}O、^{37}Ar 和 ^{41}Ar 的有效剂量转换因子，表中不再计算不作考虑。

根据表 5-21 和表 5-22，本项目评价范围公众因浸没外照射和吸入内照射所致受照剂量见表 5-23 所示。

表 5-23 放射性废气排放所致公众受照剂量一览表

序号	预测对象	最近距离（m）	浸没外照射有效剂量（mSv/a）	吸入内照射有效剂量（mSv/a）	受照剂量（mSv/a）
1	浙江爱索拓标记医药科技有限公司（一期在建 1#厂房）	约 20	6.03E-03	2.91E-03	8.94E-03
2	深圳拉尔文生物工程技术有限公司（一期在建 3#厂房）	约 20	6.03E-03	2.91E-03	8.94E-03
3	在建 4#厂房	约 25	6.03E-03	2.91E-03	8.94E-03
4	在建 5#厂房	约 20	6.03E-03	2.91E-03	8.94E-03
5	上海华核药业股份有限公司（一期在建 6#厂房）	约 25	6.03E-03	2.91E-03	8.94E-03
6	中核秦山同位素有限公司（已建）	约 120	6.03E-03	2.91E-03	8.94E-03
7	拟建企业（诺华医药科技（浙江）有限公司	约 310	1.91E-04	8.68E-05	2.78E-04
8	拟建企业（浙江颐核医疗科技有限公司）	约 400	1.41E-04	6.39E-05	2.05E-04
9	拟建企业（嘉兴法伯远恒科技发展有限公司）	约 220	2.83E-04	1.28E-04	4.11E-04
10	秦山核电二期西南门停车场	约 420	1.33E-04	6.02E-05	1.93E-04
11	杨柳山社区民房 1	约 470	1.15E-04	5.22E-05	1.67E-04
12	杨柳山社区民房 2	约 490	1.09E-04	4.95E-05	1.59E-04

根据前文及表 5-23 结果可知，距离本项目 2#厂房边界 133m 内的公众（即

产业园内 2#厂房相邻建筑内公众及中核秦山同位素有限公司公众）受排放口放射性废气所致受照剂量最大，为 8.94E-03mSv/a。

根据上述各途径估算模式计算各保护目标公众人员的受照剂量汇总结果见表 5-24 所示。

表 5-24 公众人员年有效剂量汇总一览表

序号	预测对象	最近距离（m）	外照射所致剂量（mSv/a）	放射性废气排放所致剂量（mSv/a）	合计剂量（mSv/a）
1	一层大厅接待区工作人员	约 5	0.010	/	0.010
2	三层预留理化实验室工作人员	约 7	0.030	/	0.030
3	四层办公室工作人员	约 12	0.010	/	0.010
4	北侧浙江爱索拓标记医药科技有限公司（1#在建厂房）	约 20	0.010	8.94E-03	1.89E-02
5	南侧深圳拉尔文生物工程技术有限公司（3#在建厂房）	约 20	0.010	8.94E-03	1.89E-02
6	东南侧在建 4#厂房	约 25	0.006	8.94E-03	1.49E-02
7	东侧在建 5#厂房	约 20	0.010	8.94E-03	1.89E-02
8	东北侧上海华核药业股份有限公司（6#在建厂房）	约 25	0.006	8.94E-03	1.49E-02
9	东侧中核秦山同位素有限公司	约 120	2.65E-04	8.94E-03	9.21E-03
10	东北侧拟建企业（诺华医药科技（浙江）有限公司	约 310	3.98E-05	2.78E-04	3.18E-04
11	东南侧拟建企业（浙江颐核医疗科技有限公司）	约 400	2.39E-05	2.05E-04	2.29E-04
12	东北侧拟建企业（嘉兴法伯远恒科技发展有限公司）	约 220	7.89E-05	4.11E-04	4.90E-04
13	秦山核电二期西南门停车场	约 420	2.17E-05	1.93E-04	2.15E-04
14	杨柳山社区民房 1	约 470	1.73E-05	1.67E-04	1.84E-04
15	杨柳山社区民房 2	约 490	1.59E-05	1.59E-04	1.75E-04

由计算结果可知，在正常运行工况下，本项目运行造成三层楼内公众受照剂量最大，为 0.030mSv/a，低于 0.1mSv/a 的公众年有效剂量约束值。

综上，本项目运行所致评价范围内公众内照射和外照射的年有效剂量合计结果均满足低于 0.1mSv/a 的公众年有效剂量约束值。

5.2.10 销售及运输辐射影响评价

本项目销售的产品为企业自行生产的医用放射性核素，即从热室（或手套箱）中取出分装好的铅罐，经包装检测合格的产品。砹尔法公司根据客户订单安排生产，生产的核素大都为短半衰期核素，成品货包通常不在厂区内暂存，仅特殊情况（如生产后中途订单临时取消等小概率事件）下考虑在放射性药物成品库短时暂存。

发货前在成品包装区委托有资质单位运输。根据《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）中 5.3.1 规定：“货包或集合包装的外表面任一点的最高辐射水平应不超过 2mSv/h……”，以及 5.4 规定：“对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体为 4Bq/cm³；对所有其他 α 发射体为 0.4Bq/cm³”，本项目在货包运输前，应对货包表面进行辐射剂量率和表面污染检测，满足要求后，才能装车运输。

放射性核素货包离开厂区后，运输过程中的辐射安全由运输单位负责，运输过程中运输单位将遵守我国有关放射性同位素安全运输管理要求。

建设单位的辐射工作人员，需考虑货包车间内运输的辐射影响以外，销售过程中不受到辐射影响。运输过程中相关运输人员的受照剂量和采取的辐射安全措施，由运输单位进行管控。放射性核素销售后，建设单位不提供售后服务。

5.2.11 辐射影响计算结果涨落统计与分析

本项目采用蒙特卡罗数值模拟的方法，除了给出剂量场分布图外，还给出了剂量率随水平方向和垂直方向的变化，数据和图件中包含了对计算结果涨落范围的统计，通过误差指标进行分析。

图 5-16 为加速器机房辐射剂量率统计结果所对应的统计误差（加速器机房东西方向截面 1 的剂量率）。图中可见，对于辐射水平较高的区域，统计误差很低，通常低于 1%。而进入混凝土墙体后，随辐射剂量率衰减，计算结果统计误

差逐渐增加。但在屏蔽墙外统计误差不高于 20%，本项目对于模拟计算结果高于 0.01μSv/h 的区域，计算结果统计误差不超过 20%。

略

图 5-16 加速器机房东西方向剂量率计算结果统计误差

5.2.12 放射性“三废”影响分析

5.2.12.1 放射性废气环境影响分析

本项目辐射工作场所设置独立的排风系统，药物生产和质检过程中在专用的热室、手套箱或通风橱中进行操作，药物挥发至空气的份额相对较少，排风系统中放射性废气经活性炭吸附（及高效过滤器）后等排放，经计算本项目放射性废气对周围公众的影响相对很小。

5.2.12.2 放射性废水环境影响分析

车间正常运行过程中产生的少量工艺废水、质检废水通过吸附材料转固方式作为放射性固废分类置于铅废物桶，含较长半衰期核素应急冲洗废水通过吸附材料转固方式作为放射性固废分类置于铅废物桶，均定期转移至地下一层本项目放射性废物暂存库进行衰变贮存，不会对地表水产生影响。

车间产生的含短半衰期核素应急冲洗废水通过下水管道排入地下一层本项目衰变池间内设置的水箱暂存衰变，加速器机房泄漏的冷却水经地面预埋管道排放至放射性衰变池间预留专用储水箱，衰变一定时间后取样监测，若监测结果满足排放标准限值要求（总 α 排放标准：1Bq/L；总 β 排放标准 10Bq/L），排入园区污水管网，最终引至海盐城乡污水处理厂处理达标后排入杭州湾，对地表水影响较小。

5.2.12.3 放射性固体废物环境影响分析

本项目运营期产生的放射性固体废物由建设单位分为 A 类放射性固废（半衰期≤24h）、B 类放射性固废（半衰期＞24h 且≤59.4d）和 C 类固废（半衰期（含子体核素）＞59.4d），A 类废物暂存 30d 后，取样监测达清洁解控水平，后作为一般固体废物或危险废物进行处理，B 类废物暂存 10 倍半衰期最长半衰期（固体废物包中所含最长半衰期核素），取样监测达清洁解控水平后，作为一般固体废物或危险废物进行处理。C 类废物单独分类收集暂存，达到一定量且无法

进行清洁解控的可交由产业园放废收贮中心处置。采取上述措施后本项目放射性固体废物对环境影响较小。

5.3 运行阶段非放环境影响分析

5.3.1 废气环境影响评价

本项目非放射性废气主要来自热室和放化质检过程中浓盐酸少量挥发产生的酸雾以及使用有机化合物产生的少量挥发性有机物，由于本项目单次使用量浓盐酸和挥发性有机物很少，在不考虑废气吸收处理污染防治措施的情况下，HCL和非甲烷总烃最大排放浓度分别为0.765mg/m^{3}和8.68mg/m^3，分别满足《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）中表2氯化氢最高允许排放限值（10mg/m^3）和表1非甲烷总烃最高允许排放限值（60 mg/m^3），因此本项目非放射性废气排放对环境影响很小，本项目采取的废气净化措施可以满足排放要求。项目大气污染物有组织排放量核算表见表5-25所示。

表5-25 项目大气污染物有组织排放量核算表

序号	排放口编号	污染物	核算排放浓度（μg/m^3）	核算排放速率（kg/h）	核算年排放量（t/a）
1	锗镓核素车间P3	HCl	0.765E+03	0.005	1.2E-04
		NMHC	8.68E+03	0.052	1.25E-04
2	诊断核素车间P4	HCL	0.151E+03	8.8E-04	2.2E-04
3	砹^{211}At车间P5	NMHC	0.303E+03	0.002	1.5E-03
4	放化质检实验P8	NMHC	0.909E+03	0.002	5.0E-04

根据《排污单位自行监测技术指南 总则》（HJ819-2017）及本项目污染物排放特点，运行期间废气污染源监测计划见表5-26所示。

表5-26 废气监测计划表

序号	监测点位	监测指标	监测频次	执行排放标准
1	锗镓核素车间P3排放口	HCl、NMHC	每半年1次	《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）
2	诊断核素车间P4排放口	HCl	每半年1次	
3	砹^{211}At车间P5	NMHC	每半年1次	
4	放化质检车间P8	NMHC	每半年1次	

本项目大气环境影响评价自查表见表5-27。

表5-27 项目大气环境影响评价自查表

工作内容		自查项目		
评价等级与范围	评价等级	一级□	二级□	三级√
	评价范围	边长=50km□	边长5~50km□	边长=5km√
评价因子	SO_2+NO_X排放量	≥2000t/a□	500~2000t/a□	＜500t/a√
	评价因子	其他污染物（HCL和NMHC）	包括二次$PM_{2.5}$□ 不包括二次$PM_{2.5}$√	

评价标准	评价标准	国家标准□	地方标准□	附录 D√	其他标准√		
现状评价	评价功能区	一类区□	二类区√	一类区和二类区□			
	评价基准年	（2023）年					
	环境空气质量现状调查数据来源	长期例行监测数据□	主管部门发布的数据√	现状补充监测√			
	现状评价	达标区√	不达标区□				
污染源调查	调查内容	本项目正常排放源√ 本项目非正常排放源□ 现有污染源□	拟替代的污染源□	其他在建、拟建项目污染源□	拟替代的污染源□		
大气环境预测与评价	预测模型	AERMOD□	ADMS□	AUSTAL 2000D□	EDMS/AEDT□	CALPUFF□	网格模型□	其他□
	预测范围	边长=50km□	边长 5~50km□	边长=50km□			
	预测因子	预测因子（HCL 和 NMHC）	包括二次 $PM_{2.5}$□ 不包括二次 $PM_{2.5}$√				
	正常排放短期浓度贡献值	$C_{本项目}$最大占标率≤100%√	$C_{本项目}$最大占标率＞100%□				
	正常排放年均浓度贡献值	一类区	$C_{本项目}$最大占标率≤10%□	一类区			
		二类区	$C_{本项目}$最大占标率≤30%√	二类区			
	非正常排放 1h 浓度贡献值	非正常持续时长（）h	$C_{非正常}$占标率≤100%□	$C_{非正常}$占标率＞100%□			
	保证率日平均浓度和年平均浓度叠加值	$C_{叠加}$达标□	$C_{叠加}$不达标□				
	区域环境质量的整体变化情况	k≤-20%□	K＞-20%□				
环境监测计划	污染源监测	监测因子：（HCL 和 NMHC）	有组织废气监测√ 无组织废气监测□	无监测□			
	环境质量监测	监测因子：（）	监测点位数（4）	无监测□			
评价结论	环境影响	可以接受√ 不可以接受□					
	大气环境防护距离	距（）厂界最远（）m					
	污染源年排放量			HCL（0.330）kg/a	NMHC（3.0）kg/a		
注：“□”为打勾项，填“√”；“（）”为内容填写项							

5.3.2 废水环境影响评价

生产厂房内工作人员日常工作中，日排放量约 1.73m^3/d（年排放约 432m^3/a）生活污水经化粪池预处理后排入园区污水管网；实验室非放操作使用器皿等清洗废水约 50L/d（12.5m^3/a），工作服清洗废水约 2m^3/d（500m^3/a），厂房清洁废水

（地面拖布冲洗废水）约 2m^3/d（500m^3/a）拟通过污水管网进入废水预处理池（中和及沉淀）后排入市政污水管网。厂房废水产生及排放情况见表 5-28 所示。

表 5-28 厂房废水产生、处理及排放情况

序号	污染源	废水产生量（m^3/d）	主要污染物	源强（mg/L）〔1〕	预处理措施	处理后污染物浓度（mg/L）	总排放水量〔3〕（m^3/d）	排放量（t/a）	总排放量（t/a）	排放浓度（mg/L）	外接市政管网标准（mg/L）
1	工作人员生活污水	1.73	COD	350	经化粪池预处理后，排入园区污水管网〔2〕	350	5.78	0.151	COD：0.273 BOD_5：0.189 SS：0.104 氨氮：0.020 总氮：0.026 总磷:0.009	COD：189 BOD_5：131 SS：72.0 氨氮：13.8 总氮：18.0 总磷:6.2	COD：500 BOD_5：300 SS：400 氨氮：35 总氮：45 总磷:8
			BOD_5	250		250		0.108			
			SS	100		100		0.043			
			氨氮	35		35		0.015			
			总氮	45		45		0.019			
			总磷	7		7		0.003			
2	非放操作使用器皿等清洗废水	0.05	COD	150	通过污水管网进入废水预处理池（中和及沉淀）	120		0.002			
			BOD_5	100		80		0.001			
			SS	80		50		0.0008			
			总磷	8		6		0.0001			
3	工作服清洗废水	2	pH	6~9	通过污水管网进入废水预处理池（中和及沉淀）	6~9		/			
			COD	150		120		0.060			
			BOD_5	100		80		0.040			
			SS	80		50		0.030			
			总磷	8		6		0.003			
4	厂房清洁废水（地面拖布冲洗废水）	2	COD	150	通过污水管网进入废水预处理池（中和及沉淀）	120		0.060			
			BOD_5	100		80		0.040			
			SS	80		50		0.030			
			总磷	8		6		0.003			
			氨氮	10		9		0.0045			
			总氮	15		14		0.007			

备注：（1）参考同行业类比调查；（2）保守不考虑化粪池的去除效果；（3）保守取本项目排水量计。

本项目废水可以满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）表 1 及表 4 三级标准，其中氨氮和总磷满足《工业企业废水氮、磷污染物间接排放限值》（DB33/887-2013）中氨氮 35mg/L，总磷 8mg/L，TN 满足《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T31962-2015）中 45mg/L 要求后排入市政污水管网，上述废水最终进入海盐县城乡污水处理厂进一步处理。按照《环境影响评价技术导则 地表水环境》（HJ 2.3-2018），项目废水排放方式为间接排放，评价等级为三级 B。

海盐县城乡污水处理厂现有日处理规模 12 万 m^3/d，出水标准达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级 A 标准及《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》（ DB33/2169-2018）表 1 排放限值要求后排入杭州湾。

本项目日最大排水量为 5.78m^3/d，占其污水处理厂收水量约 0.006%，排放水量占比很小，本项目外排的非放生产废水主要为含少量 SS 的清洗废水和生活污水，水质成分简单，易于处理，综上可见污水处理厂可满足本项目污水处理需求，不会对其运行造成冲击影响。综上，本项目生活污水和非放废水排放不会对周围环境水体产生不良影响。

根据《排污单位自行监测技术指南 总则》（HJ819-2017）及本项目污染物排放特点，运行期间废水污染源监测计划见表 5-29 所示。

表 5-29 废水监测计划表

序号	排放口名称及编号	监测指标	监测频次	执行排放标准
1	厂区废水排放口 DW001	pH、COD、BOD_5、SS、氨氮、总磷、总氮、流量	每季度 1 次	氨氮和总磷执行《工业企业废水氮、磷污染物间接排放限值》（DB33/887-2013）；总氮执行《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T31962-2015）；其余指标执行《污水综合排放标准》（GB8978-1996）表1及表4三级标准；

本项目地表水环境影响评价自查表见表 5-30。

表 5-30 项目地表水环境影响评价自查表

<table>
<tr><td colspan="2">工作内容</td><td colspan="3">自查项目</td></tr>
<tr><td rowspan="5">影响识别</td><td>影响类型</td><td colspan="3">水污染影响型√；水文要素影响型□</td></tr>
<tr><td>水环境保护目标</td><td colspan="3">饮用水水源保护区□；饮用水取水口；涉水的自然保护区□；重要湿地□；重点保护与珍稀水生生物的栖息地□；重要水生生物的自然产卵场及索饵场、越冬场和洄游通道、天然渔场等渔业水体□；涉水的风景名胜区□；其他√</td></tr>
<tr><td rowspan="2">影响途径</td><td>水污染影响型</td><td colspan="2">水文要素影响型</td></tr>
<tr><td>直接排放□；间接排放√；其他□</td><td colspan="2">水温□；径流□；水域面积□</td></tr>
<tr><td>影响因子</td><td>持久性污染物□；有毒有害污染物□；非持久性污染物√；pH 值□；热污染□；富营养化□；其他□</td><td colspan="2">水温□；水位（水深）□；流速□；流量□；其他□</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">评价等级</td><td>水污染影响型</td><td colspan="2">水文要素影响型</td></tr>
<tr><td>一级□；二级□；三级 A□；三级 B √</td><td colspan="2">一级□；二级□；三级□</td></tr>
<tr><td rowspan="9">现状调查</td><td rowspan="2">区域污染源</td><td colspan="2">调查项目</td><td>数据来源</td></tr>
<tr><td>已建□；在建□；拟建□；其他□</td><td>拟替代的污染源□</td><td>排污许可证□；环评□；环保验收□；既有实测□；现场监测□；入河排放口数据□；其他□</td></tr>
<tr><td rowspan="2">受影响水体水环境质量</td><td colspan="2">调查时期</td><td>数据来源</td></tr>
<tr><td colspan="2">丰水期□；平水期□；枯水期□；冰封期□；春季□；夏季□；秋季□；冬季□</td><td>生态环境保护主管部门□；补充监测□；其他□</td></tr>
<tr><td>区域水资源开发利用状况</td><td colspan="3">未开发□；开发量 40%以下□；开发量 40%以上□</td></tr>
<tr><td rowspan="2">水文情势调查</td><td colspan="2">调查时期</td><td>数据来源</td></tr>
<tr><td colspan="2">丰水期□；平水期□；枯水期□；冰封期□；春季□；夏季□；秋季□；冬季□</td><td>水行政主管部门□；补充监测□；其他□</td></tr>
<tr><td rowspan="2">补充监测</td><td colspan="2">监测时期</td><td>监测因子</td><td>监测断面或点位</td></tr>
<tr><td colspan="2">丰水期□；平水期□；枯水期□；冰封期□；春季□；夏季□；秋季□；冬季□</td><td>（）</td><td>监测断面或点位个数（）个</td></tr>
<tr><td rowspan="3">现状评价</td><td>评价范围</td><td colspan="3">河流：长度（）km；湖库、河口及近岸海域：面积（）km^2</td></tr>
<tr><td>评价因子</td><td colspan="3">（）</td></tr>
<tr><td>评价标准</td><td colspan="3">河流、湖库、河口：I类□；II类□；III类□；IV类□；V类□
近岸海域：第一类□；第二类□；第三类□；第四类□
规划年评价标准：（）</td></tr>
</table>

工作内容		自查项目	
	评价时期	丰水期□；平水期□；枯水期□；冰封期□ 春季□；夏季□；秋季□；冬季□	
	评价结论	水环境功能区或水功能区、近岸海域环境功能区水质达标状况：达标□；不达标□ 水环境控制单元或断面水质达标状况：达标□；不达标□ 水环境保护目标质量状况：达标√；不达标□ 对照断面、控制断面等代表性断面的水质状况：达标□；不达标□ 底泥污染评价□ 水资源与开发利用程度及其水文情势评价□ 水环境质量回顾评价□ 流域（区域）水资源（包括水能资源）与开发利用总体状况、生态流量管理要求与现状满足程度、建设项目占用水域空间的水流状况与河流演变状况□	达标区√ 不达标区□
影响预测	预测范围	河流：长度（）km；湖库、河口及近岸海域：面积（）km^2	
	预测因子	（）	
	预测时期	丰水期□；平水期□；枯水期□；冰封期□ 春季□；夏季□；秋季□；冬季□ 涉及水文条件□	
	预测情景	建设期□：生产运行期□；服务器满后□ 正常工况□；非正常工况□ 污染控制和减缓措施方案□ 区（流）域环境质量改善目标要求情景□	
	预测方法	数值解□：解析解□；其他□ 导则推荐模式□；其他□	
影响评价	水污染控制和水环境影响减缓措施有效性评价	区（流）域水环境质量改善目标√；替代削减源□	
	水环境影响评价	排放口混合区外满足水环境管理要求□ 水环境功能区或水功能区、近岸海域环境功能区水质达标□ 满足水环境保护目标水域水环境质量要求√ 水环境控制单元或断面水质达标□ 满足重点水污染物排放总量控制指标要求：重点行业建设项目，主要污染物排放满足等量或减量替代要求□ 满足区（流）域水环境质量改善目标要求□ 水文要素影响型建设项目同时应包括水文情势变化评价、主要水文特征值影响评价、生态流量符合性评价□ 对于新设或调整入河（湖库、近岸海域）排放口的建设项目，应	

<table>
<tr><td colspan="2">工作内容</td><td colspan="5">自查项目</td></tr>
<tr><td rowspan="6"></td><td></td><td colspan="5">包括排放口设置的环境合理性评价□
满足生态保护红线、水环境质量底线、资源利用上线和环境准入清单管理要求√</td></tr>
<tr><td rowspan="2">污染源排放量核算</td><td>污染物名称</td><td colspan="2">排放量/（t/a）</td><td colspan="2">排放浓度/（mg/L）</td></tr>
<tr><td>（BOD_5、COD、TN、NH_3-N、TP、SS）</td><td colspan="2">（$BOD_5$0.189t/a、COD0.273t/a、TN0.026t/a、NH_3-N0.020t/a、TP 0.009 t/a、SS0.104t/a）</td><td colspan="2">（$BOD_5$0.131t/a、COD189mg/L、TN18.0mg/L、NH_3-N 13.8mg/L、TP 6.2mg/L、SS72mg/L）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">替代源排放情况</td><td>污染源名称</td><td>排污许可证</td><td>污染物名称</td><td>排放量/（t/a）</td><td>排放浓度/（mg/L）</td></tr>
<tr><td>（）</td><td>（）</td><td>（）</td><td>（）</td><td>（）</td></tr>
<tr><td>生态流量确定</td><td colspan="5">生态流量：一般水期（）m^3/s；鱼类繁殖期（）m^3/s；其他（）m^3/s
生态水位：一般水期（）m；鱼类繁殖期（）m；其他（）m</td></tr>
<tr><td rowspan="6">防治措施</td><td>环保措施</td><td colspan="5">污水处理设施√；水文减缓设施□；生态流量保障设施□；
区域削减□；依托其他工程措施√；其他□</td></tr>
<tr><td rowspan="4">监测计划</td><td></td><td colspan="2">环境质量</td><td colspan="2">污染源</td></tr>
<tr><td>监测方式</td><td colspan="2">手动□；自动□；无监测□</td><td colspan="2">手动√；自动□；无监测□</td></tr>
<tr><td>监测点位</td><td colspan="2">（）</td><td colspan="2">（厂区废水总排放口 D2W001）</td></tr>
<tr><td>监测因子</td><td colspan="2">（）</td><td colspan="2">（pH、COD、BOD_5、SS、氨氮、总磷、总氮、流量）</td></tr>
<tr><td>污染物排放清单</td><td colspan="5">√</td></tr>
<tr><td colspan="2">评价结论</td><td colspan="5">可以接受√；不可以接受□</td></tr>
<tr><td colspan="7">注：“口”为勾选项，填“√”；“（）”为内容填写项。</td></tr>
</table>

5.3.3 噪声环境影响评价

本项目非放射性环境影响主要是噪声影响。采用《环境影响评价技术导则 声环境》（HJ2.4-2021）中的工业噪声预测模式。工业声源有室外和室内两种声源，本项目室内噪声源主要为生产厂房内与加速器、热室配套的各类共用辅助设施，如水泵、空气压缩机、空调机组等运行时产生的噪声，通过采取选用低噪声设备、减振、隔墙和对空压机间做吸声处理等降噪措施后，对厂界噪声的贡献值很小，本项目室外声源主要是四层屋顶排风机和冷却塔，综合考虑本项目主要预测室外

噪声源的影响。根据预测点和声源之间的距离 r，根据声源发出声波的波阵面，将声源划分为点声源、线声源、面声源后进行预测。根据 HJ2.4－2021，声源中心到预测点距离超过声源最大几何尺寸 2 倍时，可将该声源近似点声源。本项目按点声源进行预测。

（1）声源处于半自由空间，在只取得声功率级或 A 声功率级时，采用下式计算离声源任一距离处的声压级或 A 声级：

$$L_P(r) = L_W - 20\lg r - 8 \qquad (5.12)$$

（2）设第 i 个室外声源在预测点产生的 A 声级为 L_{Ai}，在 T 时间内该声源工作时间为 t_i；第 j 个等效室外声源在预测点产生的 A 声级为 L_{Aj}，在 T 时间内该声源工作时间为 t_j，则拟建工程声源对预测点产生的贡献值（L_{eqg}）为：

$$L_{eqg} = 10\lg\left[\frac{1}{T}\left(\sum_{i=1}^{N} t_i 10^{0.1L_{Ai}} + \sum_{j=1}^{M} t_j 10^{0.1L_{Aj}}\right)\right] \qquad (5.13)$$

$$L_{eq} = 10\lg\left(10^{0.1L_{eqg}} + 10^{0.1L_{eqb}}\right) \qquad (5.14)$$

式中：L_{eqg}—建设项目声源在预测点的等效声级贡献值，dB(A)；

L_{eqb}—预测点的背景值，dB(A)；

将设备噪声源在项目平面图上进行定位，利用上述的预测数字模型，将有关参数代入公式计算，预测拟建工程噪声源对各向厂界的影响。

（3）预测主要计算参数

本项目室外噪声源情况详见表 5-31。

表 5-31　噪声预测结果及达标分析表（厂界）

序号	源强 dB（A）	降噪量 dB（A）	预测点	噪声源距各厂界计算点最近距离（m）	采取措施后噪声源在厂界处的贡献值 dB(A)	各厂界计算点不同噪声源贡献值的叠加值 dB(A)	工业企业厂界噪声排放标准 GB12348-2008 标准 dB(A)	达标情况
1	75	10	东厂界	33.2	26.6	东厂界：46.4 南厂界：46.5 西厂界：46.9 北厂界：44.4	昼间 65、夜间 55	达标
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	25.6	28.8			
			北厂界	28.6	27.9			
2	75	10	东厂界	32.6	26.7			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	26.0	28.7			
			北厂界	28.6	27.9			
3	75	10	东厂界	31.9	26.9			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	26.4	28.6			
			北厂界	28.6	27.9			
4	75	10	东厂界	31.2	27.1			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	26.8	28.4			
			北厂界	28.6	27.9			

5	75	10	东厂界	29.4	27.6			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	28.3	28.0			
			北厂界	28.6	27.9			
6	75	10	东厂界	28.8	27.8			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	28.8	27.8			
			北厂界	28.6	27.9			
7	75	10	东厂界	28.3	28.0			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	29.4	27.6			
			北厂界	28.6	27.9			
8	75	10	东厂界	30.6	27.3			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	27.3	28.3			
			北厂界	28.6	27.9			
9	75	10	东厂界	30.0	27.5			
			南厂界	35.4	26.0			
			西厂界	27.8	28.1			
			北厂界	28.6	27.9			

10	85	5	东厂界	28.7	42.8			
			南厂界	27.3	43.3			
			西厂界	27.3	43.3			
			北厂界	37.8	40.5			
11	85	5	东厂界	28.7	42.8			
			南厂界	28.2	43.0			
			西厂界	27.3	43.3			
			北厂界	38.6	40.3			

注：考虑相邻 9 台排风机和 2 台冷却塔同时运行并考虑表 3-27 中相应的降噪效果。

（4）预测结果

经治理后项目室外声源对厂界的噪声贡献值见表 5-31，项目建成后排风机运行噪声厂界贡献值满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）3 类标准昼（65 dB(A)）、夜间（55 dB(A)）要求，且厂界外 200m 范围内无声环境保护目标，因此本项目对周边声环境的影响较小。

按照《排污单位自行监测技术指南 总则》（HJ 819-2017），本项目运行期噪声监测计划见表 5-32。

表 5-32 项目环境噪声监测计划一览表

环境因素	监测点位	监测项目	监测频次	排放标准
噪声	四周厂界	等效连续 A 声级	每季度 1 次昼夜噪声监测	《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）3 类声功能区标准

本项目声环境影响评价自查表见表 5-33。

表 5-33 声环境影响评价自查表

工作内容		自查项目					
评价等级与范围	评价等级	一级□	二级□	三级☑			
	评价范围	200 m☑	大于 200 m□	小于 200 m□			
评价因子	评价因子	等效连续A声级☑	最大A声级□	计权等效连续感觉噪声级□			
评价标准	评价标准	国家标准☑	地方标准□	国外标准□			
现状评价	环境功能区	0 类区□	1 类区□	2 类区□	3类区☑	4a 类区□	4b 类区□
	评价年度	初期☑	近期□	中期□	远期□		
	现状调查方法	现场实测法☑	现场实测加模型计算法□	收集资料□			
	现状评价	达标百分比	100%				
噪声源调查	噪声源调查方法	现场实测□	已有资料☑	研究成果□			
声环境影响预	预测模型	导则推荐模型☑	其他□				
	预测范围	200 m☑	大于200m□	小于200 m□			

测与评价	预测因子	等效连续A声级☑ 最大A声级□ 计权等效连续感觉噪声级□		
	厂界噪声贡献值	达标 ☑ 不达标□		
	声环境保护目标处噪声值	达标□ 不达标□		
环境监测计划	排放监测	厂界监测☑ 固定位置监测□ 自动监测□ 手动监测☑ 无监测□		
	声环境保护目标处噪声监测	监测因子：（ ）	监测点位数（ ）	无监测☑
评价结论	环境影响	可行☑ 不可行□		
注“□”为勾选项 ，可√；“（ ）”为内容填写项。				

5.3.4 固体废物环境影响评价

（1）生活垃圾和一般工业固体废物

企业年产生生活垃圾约 4.5t/年，这部分收集后统一由环卫部门处置。

企业生产过程中产生废西林瓶（未沾污放射性核素）、废包装材料和新风系统废滤芯等，年产生量约 2t/年，废西林瓶（未沾污放射性核素）、废包装材料属于《固体废物分类与代码目录》（公告 2024 年第 4 号）中 SW92 实验室固体废物非特定行业，废物代码为 900-001-S92；废滤芯属于 SW59 其他工业固体废物非特定行业，废物代码为 900-009-S59。废包装材料可变卖废品由收购站处理，新风系统废滤芯交由生产厂家回收处理，其他不可回收由专业机构协议处理。

（2）危险废物

非放操作过程中产生的实验废液包括使用过酸碱等试剂的容器前三次清洗废液和实验检测废液，实验过程产生的沾染废酸碱等一次性实验用品、微生物质检产生的灭活培养基等实验废物，以及达到解控的废活性炭和废高效滤芯，根据《国家危险废物名录》（2025 年版），上述废物均属于危险废物，属于 HW49 其他废物。本项目危险废物的产生情况详见表 5-34。

表 5-34 本项目产生危险废物表

序号	危险废物名称	危险废物类别	危险废物代码	产生量（吨/年）	产生工序及装置	形态	主要成分	有害成分	产废周期	危险特性	污染防治措施
1	实验废液	HW09 其他废物	900-047-49	0.7	质检工序	液体	化学废液	酸、碱、有机试剂	1 年	T/C/I/R	危废库暂存，定期交由有危废处置资质的单位处理
2	沾染试剂的实验废物	HW09 其他废物	900-047-49	0.0125	质检工序	固体	有机试剂	酸、碱、有机试剂	1 年	T/C/I/R	
3	废活性炭（及废高效滤芯）	HW09 其他废物	900-041-49	0.4	核素生产及质检	固体	活性炭	酸、有机试剂	1 年	T	

本项目在 2#厂房二层南部规划 1 间危废库暂存项目产生的危险废物，按照《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2023）的相关要求进行地面与裙脚的防渗。危废库暂存的危险废物定期交由有危废处置资质的单位进行处置。

本项目危险废物贮存场所的名称、位置、占地面积、贮存方式、贮存能力、贮存周期等情况见表 5-35。

表 5-35 项目危险废物贮存场所基本情况样表

序号	贮存场所（设施）名称	危险废物名称	危险废物类别	危险废物代码	位置	占地面积（m^2）	贮存方式	贮存能力（t）	贮存周期
1	危废暂存库	实验废液	HW09 其他废物	900-047-49	2#厂房二层南部	21	密封塑料桶	2	1 年
2		沾染试剂的实验废物	HW09 其他废物	900-047-49			专用密封袋	2	1 年
3		废活性炭（及废过滤器芯）	HW09 其他废物	900-041-49			专用密封袋	2	1 年

本项目危废暂存库建设及管理要求：

（1）危废库应按照《危险废物贮存污染控制标准》（ GB18597 2023 ）的相关要求，做好地面与裙脚防渗，至少 2mm 厚高密度聚乙烯膜等人工防渗材料（渗透系数不大于 10^{-10}cm/s），或其他防渗性能等效的材料；

（2）危废库贮存危险废物应根据危险废物的类别、形态、物理化学性质和污染防治要求进行分类贮存，且应避免危险废物与不相容的物质或材料接触；

（3）在危废库贮存液态危险废物，应具有液体泄漏堵截设施，堵截设施最小容积不应低于对应贮存区域最大液态废物容器容积或液态废物总储量 1/10（二者取较大者），危废库地面、墙面裙脚、堵截泄漏的围堰、接触危险废物的隔板和墙体等应用坚固的材料建造，表面无裂缝；

（4）严格按要求记录危险废物情况，记录上注明危险废物的名称、来源、数量、特性和盛装容器的类别、入库日期、存放位置、废物出库日期及接收单位名称；危险废物贮存应设置相应的标志及标签；

（5）定期对所贮存的危险废物包装、容器及贮存设施进行检查，发现破损，及时清理贮存设施地面，更换破损泄漏的危险废物贮存容器和包装物；

（6）危废库应采取技术和管理措施防止无关人员进入，配应急照明设施和消防设施；

（7）设施规范的危险废物识别标志。危废库应按照《危险废物识别标志设置技术规范》（HJ1276-2022）规范设置危险废物贮存设施或场所标志、危险废物贮存分区标志和危险废物标签等危险废物识别标志。

本项目产生的危险废物交由具有相应资质的单位处置。在选择处置单位时，应选择具有相应危险废物运营许可证，能够提供专业收集、运输、贮存、处理处置危险废物的企业，避免危险废物对环境的二次污染风险。

综上所述，本项目产生的非放固体废物全部妥善处置，满足相关环保要求。

5.3.5 环境风险分析

（1）风险源调查

根据公司提供原辅料使用情况，项目可能发生的环境事故风险主要为化学品试剂和实验废液，本项目涉及风险物质为易制毒化学试剂间贮存的盐酸、硫酸、

丙酮，易制爆化学试剂间贮存的硝酸、过氧化氢、乙腈和氨水，各热室原辅料间乙醇和甲醇，以及危废库暂存的实验废液。计算所涉及的每种危险物质在厂界内的最大存在总量与其在《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ169-2018）附录B、《企业突发环境事件风险分级方法》（HJ941-2018）中对应临界量的比值 Q。当只涉及一种危险物质时，计算该物质的总量与其临界量比值，即为 Q；当存在多种危险物质时，则按下式计算物质总量与其临界量比值（Q）：

$$Q=q1/Q1+ q2/Q2+……+qn/Qn$$

式中：q1，q2，…，qn—每种危险物质的最大存在总量，t；

Q1，Q2，…，Qn—每种危险物质的临界量，t。当 Q＜1 时，该项目环境风险潜势为 I。

当 Q≥1 时，将 Q 值划分为：（1）1≤Q＜10；（2）10≤Q＜100；（3）Q≥100。本项目物料存储情况见表 5-36。

表 5-36 项目涉及的危险物质数量与临界量的比值

序号	危险化学品名称	最大存放总量（L）	最大存放总量（t）	临界量（t）	危险物质 Q 值
1	盐酸 （≥37%）	20	0.0238	7.5	3.17E-03
2	过氧化氢	35	0.0385	50	7.70E-04
3	乙醇	25	0.0197	500	3.94E-05
4	硝酸	10	0.0150	7.5	2.00E-03
5	氨水（浓度20%）	5	0.0045	10	4.50E-04
6	乙腈	2.5	0.0020	10	2.00E-04
7	甲醇	25	0.0099	50	3.96E-03
8	硫酸	31.5	0.0580	10	5.80E-03
9	丙酮	2.5	0.0020	10	2.00E-04
10	实验废液	/	0.7	50	1.40E-02
合计	/	/	/	/	3.06E-02

根据表 5-36 计算可知，本项目 Q 值为 3.06×10^{-2}＜1，则该项目环境风险潜势为I。按照《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ/T169-2018）表 1 判定本项目环境风险评价等级为简单分析。

（2）危险物质特性

本项目上述存放的危险物质发生泄漏，遇静电、明火等火源可能发生火灾事故。上述危险物质的特性见表 5-37 所示。

表 5-37 危险物质的特性

序号	名称	物理化学性质	毒性	爆炸性
1	盐酸	盐酸是氯化氢（HCl）的水溶液，为无色透明的液体。有强烈的刺鼻气味，具有较高的腐蚀性，浓盐酸具有极强的挥发性。熔点：-27.32℃（247K，38%溶液），沸点：48℃（321K，38%溶液）密度：1.18g/cm^3。浓盐酸（发烟盐酸）会挥发出酸雾。由于浓盐酸具有挥发性，挥发出的氯化氢气体与空气中的水蒸气作用形成盐酸小液滴。盐酸与水、乙醇任意混溶，浓盐酸稀释有热量放出。	LD_{50}：900mg/kg（兔经口）；LC_{50}：3124ppm，1 小时（大鼠吸入）	不燃，具有强腐蚀性、强刺激性，可致人体灼伤
2	过氧化氢	无色透明液体，有微弱的特殊气味；溶于水、醇、醚，不溶于苯、石油醚；相对密度(水=1)1.46(无水)；熔点-2℃/无水 沸点：158℃/无水；主要用于漂白、医药，也用作分析试剂。	LD_{50}：4060mg/kg (大鼠经皮)；LC_{50}：2000mg/m3 (大鼠吸入)。	爆炸性强氧化剂。过氧化氢本身不燃，但能与可燃物反应放出大量热量和气氛而引起着火爆炸。
3	乙醇	乙醇液体密度是0.789g/cm^3。沸点是78.2℃，熔点是-114.3℃。纯乙醇是无色透明的液体，有特殊香味，易挥发。能与水以任意比互溶；可混溶于醚、氯仿、甲醇、丙酮、甘油等多数有机溶剂。	毒性：低毒。LD_{50}：7060mg/k(大鼠经口)；LC_{50}：37620 mg/m^3，10 小时(大鼠吸入)。	易燃，其蒸气与空气可形成爆炸性混合物，遇明火、高热能引起燃烧爆炸。与氧化剂接触发生化学反应或引起燃烧。
4	硝酸	硝酸是一种具有强氧化性、腐蚀性的强酸。熔点-42℃；沸点122℃。易溶于水。纯硝酸为无色透明液体，浓硝酸为淡黄色液体（溶有二氧化氮），正常情况下为无色透明液体，	/	不易燃。吸入硝酸气雾产生呼吸道刺激作用，可引起急性肺水肿。口服引起腹部剧痛，严重者可有胃穿孔、腹膜炎、喉痉挛、肾损害、休克以及窒息。眼和皮肤接触引起灼伤。

		有窒息性刺激气味。浓硝酸含量为68%左右，易挥发。浓硝酸不稳定，遇光或热会分解而放出二氧化氮，分解产生的二氧化氮溶于硝酸，从而使外观带有浅黄色。但稀硝酸相对稳定。对于稀硝酸，一般认为浓稀之间的界线是6mol/L。		
5	氨水	氨水是氨的水溶液，无色透明且具有刺激性气味。氨的熔点-77.773℃，沸点-33.34℃，密度0.91g/cm³。氨气易溶于水、乙醇。易挥发，具有部分碱的通性，氨水由氨气通入水中制得。氨气有毒，对眼、鼻、皮肤有刺激性和腐蚀性，能使人窒息。	毒性：低毒。LD_{50}：350mg/k(大鼠经口)；	氨水容易与空气中氧气起反应，形成易燃的气体，具有一定燃爆危险性。在高温下、静电火花等内源火时，容易引发火灾。
6	乙腈	无色液体，有刺激性气味；熔点-45.7℃ 沸点：81.1℃；与水混溶，溶于醇等多数有机溶剂；相对密度(水=1)0.79；用于制维生素B1等药物，及香料、脂肪酸萃取等。	急性毒性：LD_{50}：2730mg/kg(大鼠经口)；LC_{50}：12663mg/m³，8小时(大鼠吸入)。	易燃，其蒸气与空气可形成爆炸性混合物。遇明火、高热或与氧化剂接触，有引进燃烧爆炸的危险。与氧化剂能发生强烈反应。
7	甲醇	甲醇为无色、透明、易燃、易挥发的有毒液体。甲醇常温下对金属无腐蚀性（铅、铝除外），略有酒精气味。相对密度0.792(20/4℃)，熔点-97.8℃，沸点64.5℃，能与水、乙醇、乙醚、苯、酮、卤代烃和许多其他有机溶剂相混溶。	急性毒性：LD_{50} 5600mg/kg(大鼠经口)；LC_{50} 64000mg/m3(大鼠吸入)。	易燃，闪点12.22℃，自燃点463.89℃，蒸气密度1.11，蒸气压13.33kPa(100mmHg21.2℃)，蒸气与空气混合物爆炸极限为6～36.5%（体积比）
8	硫酸	纯硫酸一般为无色油状液体，密度1.84 g/cm³，沸点338℃，能与水以任意比例	毒性：属中等毒性。 急性毒性：LD_{50}：	浓硫酸本身不会爆炸，很多反应却会起火或爆炸，如与金属会产生可燃性气体，与水混合会大量

		互溶，同时放出大量的热，使水沸腾。加热到290℃时开始释放出三氧化硫，最终变成为98.54%的水溶液，在317℃时沸腾而成为共沸混合物。硫酸助燃，具强腐蚀性、强刺激性,可致人体灼伤。	80mg/kg(大鼠经口)；LC_{50}：510mg/m^3，2小时(大鼠吸入)；320mg/m^3，2小时(小鼠吸入)	放热，造成爆炸；与易燃物（如苯）和有机物（如糖、纤维素等）接触会发生剧烈反应，也会发生爆炸。
9	丙酮	丙酮熔点-95℃，沸点56℃，无色液体，有特殊气味，能溶解醋酸纤维和硝酸纤维。丙酮对人体没有特殊的毒性，但是吸入后可引起头痛，支气管炎等症状。丙酮以游离状态存在于自然界中，能溶于水、乙醇、乙醚及其他有机溶剂中。	急性毒性：LD50:5800 mg/kg(大鼠经口)；20000mg/kg(兔经皮)。	蒸气与空气混合可形成爆炸性混合物，爆炸极限 2.55%～12.8%(体积)。

（3）影响环境的途径及后果

①大气：正常情况下存存放期间不对环境造成污染，若存放间发生局部火灾后，会导致事故地点贮存的危险化学品泄漏或挥发，从而进入区域大气环境。考虑到本项目危险化学品贮存量较小，且试剂按照化学性质分类分开贮存化学试剂，有效限制了事故情况下受影响的化学试剂量。事故情况下挥发的有害气体仅在试剂间及周边区域逸散，经自然扩散后，对区域环境空气影响轻微。

②地表水：存放期间发生局部火灾后，会导致事故地点贮存的危险化学品发生泄漏，本项目化学试剂贮存量小，并将化学试剂按照化学性质分类单试剂柜贮存。发生泄漏后，化学试剂限制在存放间内，避免进入外部水环境。

（3）防范措施

① 技术措施：

公司应当在危险化学品贮存场所设置监测、监控、通风、调温、防火、灭火、防爆、泄压、防毒、中和、防潮、防静电、防腐、防泄漏以及防护围堤或者隔离操作等安全设施，以及通信、报警装置。

按照《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2023）的相关要求，本项目做好危废库地面与裙脚防渗，防渗层至少 2mm 厚高密度聚乙烯膜等人工防渗材

料（渗透系数不大于 10^{-10}cm/s），或其他防渗性能等效的材料。将污染物泄漏的环境风险事故降到最低限度。

本项目所在园区地下一层设置有效容积约 600m³ 的消防废水收集池，用于收集园区内可能产生污染的室内消防废水。本项目收集消防废水的方式主要是通过各出入口设置的排水地漏及管道收集。消防事故后对消防废水的水质进行监测，根据监测结果，委托有相应资质的单位进行处置。

② 管理措施：

生产过程中，砹尔法公司严格把好工程设计和施工质量关，必须加强安全管理，提高事故防范措施，加强技术培训，提高安全意识和应急处理的能力。

公司应当合理规划应急疏散通道，当发生火灾爆炸以及由此引发的次生污染事故等污染较严重的风险事故时，确保厂内及周边人员尽快撤离事故点，保障人员生命安全。

建立危险化学品出入库核查、登记制度。对易制毒化学品存放间、易制爆化学存放间和危废库配备专职或兼职环保管理人员，对危险化学品仓库的安全设施、设备定期进行检测、检验，保证处于适用状态，加强危化品和危险废物的日常安全检查与记录，检查中发现问题，及时采取措施。

根据《关于印发<企业事业单位突发环境事件应急备案管理办法（试行）>的通知》（环发[2015]4 号）、《突发环境事件应急管理办法》（环境保护部令第 34 号）、《企业突发环境事件风险分级方法》（HJ941-2018）等文件要求，可能发生突发环境事件的企业，应当编制环境风险事故应急预案，建设单位制定的环境应急预案，应当在建设项目投入生产或者使用前，按照企业环境应急预案首次备案的要求，在当地生态环境保护主管部门进行备案。

对于所在产业园区，园区管委会将建设领导小组，下设应急指挥部，由管委会主管领导担任组长，当地安全、环保、公安、消防及园区重点企业的主管领导组成；应急指挥部下分设各专业救援队伍，负责现场人员救护、工艺处理、设备抢修、消防警戒、供应运输、通讯宣传和后勤保障等。建设单位将对接园区应急指挥部，做好事故情况下各项应急处置工作。

通过落实上述风险防范措施，本项目的环境风险发生概率可进一步降低，对周边环境的影响将进一步下降，环境风险可控。

5.3.6 排污口规范化及排污许可管理

本项目必须要对其污染物排放口进行规范化管理，项目各污染源排放口应规范设置，应符合国家、省、市有关规定。

有组织废气排气筒应按照《环境保护图形标志 排放口（源）》（GB15562.1-1995）中的相关要求设置排放口图形标志，并规范设置永久采样孔、采样测试平台。项目噪声排放源醒目位置处设置环境保护图形标志牌。厂区废水排放口应在其附近醒目处设置环境保护图形标志牌，并设置采样点。危废库应按照《危险废物识别标志设置技术规范》（HJ1276-2022）规范设置危险废物贮存设施或场所标志、危险废物贮存分区标志和危险废物标签等危险废物识别标志。

本项目属于核技术利用类项目，根据《固定污染源排污许可分类管理名录（2019 年版）》，该类项目目前未做规定。

5.4 事故影响分析

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）第四十条“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”。本项目涉及生产、使用和销售非密封放射性物质，以及使用 1 台I类射线装置（质子回旋加速器和 α 粒子回旋加速器）。根据分析，本项目可能发生的辐射事故主要有：

（1）加速器工作场所人员误入或滞留导致超剂量照射事故；

（2）放射性核素失控事故，包括泄漏或丢失；

（3）过滤系统失效事故，导致气载流出物全部外排；

（4）冷却水泄漏事故。

加速器系统和热室设备日常运行和维护保养过程中可能发生辐射事故，根据辐射事故具体情况，公司对辐射事故进行应急响应。

5.4.1 人员误入或滞留导致超剂量照射事故

5.4.1.1 事故描述

加速器运行出束时加速器机房安全联锁失灵，人员误入机房内控制区，加速器未及时停止出束。加速器机房内有人员开展检维修工作，加速器误启动。上述两类事故均可能造成人员误照、超剂量照射事故。

当人员误入或滞留在本项目正在运行的加速器机房内时，根据 MCNP 计算，保守取质子加速器靶站外表面 1m 处最大辐射剂量率水平约 10Sv/h 计，假设受照时间为 30s，其受照剂量约为 83.3mSv/h，导致人员受照剂量超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业 20mSv 的剂量限值，构成一般辐射事故。

5.4.1.2 事故影响

人员在系统运行出束时误入或滞留在控制区内，短时间的照射可以使受到照射的人员产生放射损伤，本项目加速器最大能量 30MeV，长时间照射可能造成严重的放射性损伤。

加速器机房屏蔽结构完好的情况下，事故对控制区外公众及周围环境不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

5.4.1.3 预防措施

加速器的安全联锁和安全控制系统在设计时考虑满足独立性、多重性和冗余性要求，以防止该类事故的发生。本项目采用多重安全联锁，包括门机联锁、急停开关、巡检开关、开门开关、剂量联锁、控制系统开关钥匙控制等，满足纵深防御的设计要求，能够有效防止人员误入事故的发生。

为了防止各项安全联锁失效，公司内辐射工作人员在每个运行班组交接运行工作时，确认上述安全联锁设施的有效性、随身佩戴有效的报警仪。

公司需严格控制辐射工作人员受照剂量，在非例行加速器检维修时段，如加速器意外停机或者故障停机，若重启前需要开展机房内清场巡检的工作流程，设备停机状态进入机房有必要等待一段时间，以使得机房内辐射水平能够有效降低，机房内工作时与易活化部件保持一定距离，机房内其它工作根据剂量探头探测的室内辐射水平，制定详细操作步骤，限制工作时间，尽量避免超剂量照射事故发

生。工作人员进入机房时需关注进入高辐射区内人员的剂量，及时送检个人剂量计。

维修保养工况下，设备生产单位的辐射工作人员需要进入辐射水平较高的机房内，本项目建设单位作为辐射安全许可证的持证单位，承担工作场所的辐射安全管理责任。检维修人员进入前需根据机房内固定式监测系统的监测数据，初步估算机房内工作点的剂量率水平，制定可行的工作方案，对人员工作时间进行管控，采取轮流工作，尽量缩短工作时间的方式，减少受照剂量。公司辐射安全管理人员应监督检维修人员进入机房时佩戴好可以累计受照剂量的报警仪，设置合理的单次活动受照剂量阈值，严格控制人员受照剂量不超过年剂量约束值。

5.4.1.4 应急措施

（1）一旦发生人员误入和滞留控制区事故，就近按下加速器机房内急停开关或操作台上的急停开关，立即停止加速器出束，人员通过开门开关打开加速器机房门实现撤离；

（2）评估人员是否受到超剂量照射，视情况送有资质医疗机构检查和救治；

（3）查找事故原因，确认安全联锁等各项安全设施是否发生故障。

5.4.2 放射性核素失控事故

5.4.2.1 事故描述

（1） 在生产放射性同位素的过程中，因容器破碎、液体泼洒等，有可能污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成手和皮肤的污染。

（2）放射性核素丢失或被盗，造成放射性事故；放射性核素或者废物在转移过程中由于操作人员违反操作规定或误操作引起意外泄漏而造成放射性表面污染。

（3）因受到爆炸、火灾等各种自然或人为灾害的破坏，可能会导致放射性核素成品货包或者废物容器破损、放射性液体泄漏，若处置不当，会对人员和环境造成危害。

5.4.2.2 事故影响

放射性核素泼洒，沾污工作场所，造成环境放射性污染或者人员意外照射。放射性核素（成品）存放过程中丢失，可能会对公众人员和环境造成危害。

放射性废物管理不善：放射性废水排放周围环境可能对环境或人体造成一定的危害；放射性固体废物未按规定擅自处理，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

事故情形下工作人员未按要求穿戴个人防护用品等，造成体表污染和附加剂量。

对于辐射工作人员，若发生本项目生产的单个放射性药物成品包装西林瓶全部泼洒泄漏至热室所在车间地面（按最大液体活度 100mCi 计）的情形，假设全部泄漏后辐射工作人员未有效做好个人防护情况下进行事故处理时间按最长 15min 考虑，与污染源的最近距离 0.5m。根据以上假设条件，事故工况时，经分析本项目核素中 ^{89}Zr 对事故处理人员的外照射剂量最大，约为 0.6mSv/次。若上述泼洒泄漏的液体为具有一定挥发性的放射性碘同位素或砹 ^{211}At，假设因擦拭等处置过程中挥发比例为 0.1%/h，泄漏活度、处置时间和距离同上，则事故处置人员未有效做好个人防护情况下受到内照射剂量最大值约 102mSv/次，导致人员受照剂量超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业 20mSv 的剂量限值，构成一般辐射事故。

5.4.2.3 预防措施

辐射事故可以通过完善辐射防护安全设施、制定相关管理规章制度等进行防范，尽可能减小或控制事故的危害和影响：

（1）制定和完善放射性核素安全管理制度，在日常工作中，设置专人负责放射性核素管理；放射性成品和放射性废物的出入库都由专人进行登记，设立生产、使用、销售台账。做好日常检查，防止放射性核素被盗、丢失。

（2）工作人员进行岗前培训合格后方可上岗，工作人员须熟练掌握操作技能和熟悉辐射防护基本知识，能正确处置意外情况。

（3）制定完善的操作规范，对辐射工作人员定期培训，使之熟练操作，严格按照操作规范操作，减少药物洒漏事故的发生。操作过程中，操作者应穿戴防护服、防护眼镜及手套，如果液体溅到皮肤上，立即用自来水冲洗。

（4）加强放射性废物的管理，对储存的放射性废物，在废物桶外标明放射性废物的类型、核素种类和存放日期等说明，并做好相应的记录。

（5）辐射工作人员做好个人防护，工作人员进入监督区必须穿戴工作服、工作鞋、帽等基本防护用品，同时应佩戴个人计量计。在近距离操作放射性核素时根据具体情况穿铅衣、戴口罩、手套，必要时戴防护眼镜。公司有专人负责个人防护用品使用方法培训及个人防护用品的存放、更新工作。

（6）加强对工作人员安全教育，严格按操作规程操作。辐射安全管理人员定期监督检查。

（7）一旦出现热室等核素生产设备控制系统出现故障，工作人员应立即切断电源、关闭热室区域，尽快联系厂家专业人员维修。项目应严格遵循所用辐射设备的安全使用年限，避免机械事故造成辐射污染，严禁超期使用。

（8）核素操作场所配备防护面罩、吸水滤纸、纱布、酒精、抹布、铅容器等应急物资。

5.4.2.4 应急措施

（1）由于操作不慎，有少量的液态核素溅洒。发生洒漏等事故后，应迅速用吸水纸吸干溅洒的液体，以防止污染扩散，然后用棉签等擦抹，应注意从污染区的边沿向中心擦拭，直到擦干污染区，并用表面污染监测仪测量污染区，如果工作场所控制区的 α 表面污染大于 4Bq/cm^2（极毒性 α 放射性物质）、40Bq/cm^2（其他 α 放射性物质）以及 β 表面污染大于 40Bq/cm^2，表明该污染区未达到控制标准，这时继续用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，直到该污染区表面污染满足标准要求。擦拭物收集至放射性固体废物桶中，作为放射性固体废物进行处理。

（2）因不慎造成放射性核素污染了地面或台面时，应先用吸水纸将其吸干，以防扩散，并立即标记污染范围。根据污染程度及时报告上级领导和有关部门。人体溅污放射性核素时，可先用高锰酸钾的饱和溶液洗涤，再用酸性亚硫酸钠进行洗涤。

（3）若发生放射性核素丢失、被盗，应第一时间将事故情况通报有关（生态环境、公安、卫生等）主管部门；分析确定丢失、被盗事故的具体时间及原因，向相关部门提供信息，根据有关线索，组织人员协同相关部门查找丢失、被盗放射性同位素，在查找过程中携带辐射监测仪器，防止事故处理人员受到照射；对放射性核素丢失前存放场所进行监测并调取监控录像，根据现场辐射剂量率的大

小确定是否受污染。如现场受到污染出现辐射剂量率异常情况，根据辐射剂量率大小划定警戒线，撤离警戒区域内的所有人员，事故处理人员应穿戴防护用品，佩戴个人剂量计进入事故现场。

（4）放射性废物处置或管理不当造成污染时，立即划定警戒区，并设置放射性污染标识，限制无关人员靠近，由专业人员处理，根据现场辐射强度，确定工作人员在现场处置的工作时间；现场经监测满足解控要求后再解除警戒。

（5）尽可能记录下现场有关情况，对工作人员可能受到的事故照射剂量，可针对事故实际情况进行评估，并对工作人员进行健康检查和跟踪，按照国家有关标准和规范以及相关程序，评估事故对工作人员健康的影响；事故处理后，必须组织有关人员进行讨论，分析事故发生的原因，从中吸取经验和教训，必须采取措施防止类似事故再次发生。

5.4.3 过滤系统失效事故

5.4.3.1 事故描述

排风系统过滤装置达到饱和或受潮、断电导致过滤失效，导致放射性废气未经过滤直接外排，对公众产生辐射影响。

5.4.3.2 事故影响

当排风系统故障，过滤器失效，气溶胶无过滤排出时，气溶胶会对公众产生影响。当过滤器失效时，热室或手套箱内产生的气溶胶全部排至外环境，根据本项目生产的核素挥发性及最大活度分析，选取代表性放射性核素 ^{211}At 和 ^{131}I 分别考虑，最大挥发量分别 7.40E+07Bq/d 和 3.70E+08Bq/d，工作人员事故处理时间最长按 1h 考虑，则排放速率分别为 2.06E+04Bq/s 和 1.03E+05Bq/s。根据以上假设条件，事故工况时，计算得出，经大气扩散所致公众成员的受照剂量为分别为 2.14E-03mSv/次和 2.37E-04mSv/次，处于较低水平。

5.3.3.3 预防措施

本项目使用的过滤器为定制型过滤器，厂家根据活性炭装量，过滤器性能，风量，环境温湿度，确定活性炭过滤器更换周期不超过一年；同时，排风管道安装气载流出物在线监测系统，当在线监测系统提示 24 小时平均监测值有高出正

常平均值趋势时，在排除其它异常情况后，则需更换过滤器。二者以先达到更换条件者为先。

5.3.3.4 应急措施

排风系统过滤装置失效发生后，第一时间停止对应房间放射性同位素生产或操作，并立即组织外部专业人员对排风系统进行检修，待正常后才能开展核素生产或操作。

5.4.4 冷却水泄漏事故

5.4.4.1 事故描述

加速器冷却水系统在运行期间，冷却水被活化，系统为闭式封闭循环系统。在系统运行或检修过程中由于设备故障或操作失误可能会发生活化冷却水泄漏的事故。

5.4.4.2 事故影响

冷却水系统设置了水量检测仪器，发生泄漏引起系统水量减少时，系统报警。报警监测系统可提醒维护人员及时处理报警点的各种问题，防止由跑冒滴漏形成的大漏水。

两个加速器机房内角落处均设置了地漏，机房地面形成一定坡度，在冷却水泄漏时能依靠重力自行流入地漏。地面下设置了管道接入地下放射性衰变池间，衰变池内设置 1 个储罐（1.5m^3）。储罐用于收集冷却水泄漏事故时排水，在排放前由建设单位进行委托检测。

5.3.4.3 预防措施

定期检查水冷系统运行情况，确认漏水检测与报警系统的有效性。制定检修操作程序，加强安全教育，严格遵守操作程序，防止误操作造成的泄漏事故。

5.3.4.4 应急措施

（1）一旦发生冷却系统漏水报警，立即停止加速器运行；

（2）查找漏水点，采取补救措施，防止形成大的漏水事故；

（3）及时报告公司内辐射安全管理机构，确认冷却水顺利完成收集。

6 辐射安全管理

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，生产放射性同位素药物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。

砹尔法公司首次申请开展放射性同位素生产，项目运行后，为保障职业人员与公众的健康和安全，保护环境，结合本项目运行特点，公司拟建立辐射安全管理机构，健全相应的辐射安全管理规章制度。

6.1 机构与人员

砹尔法公司将在项目运行前，建立辐射安全管理机构。该机构作为公司辐射安全工作的最高管理机构，主要成员为总经理、生产技术部、质量管理部、辐射安全部。

辐射安全管理机构的主要职责是对以下事宜进行调查、协调、审议、建议和决策：

— 辐射安全管理工作基本方针的制定；

— 辐射安全管理规章制度的建立与修订；

— 辐射安全相关装置或设施的安全审查；

— 向上级审管部门申请、汇报或提交相关资料；

— 在异常或事故情况下，采取紧急措施和进行事故调查；

— 其它辐射安全相关重大事项。

项目运行后，辐射安全部将负责加速器运行和同位素药物生产期间的辐射安全管理，其主要职责是：

— 贯彻落实国家有关辐射安全法律法规及标准，建立加速器运行和同位素药物生产操作规程；

— 辐射安全设施的运行和维护，辐射安全措施的落实；

— 辐射环境监测与评价；

— 放射性废物收集管理；

— 辐射工作人员健康管理；

— 参与辐射事故应急处置，以及其他与辐射安全相关的教育培训工作。

公司内拟设置 1 名专职辐射安全员，在辐射安全管理机构的领导下，根据规定开展相关工作：

— 组织对本部门工作人员进行辐射防护知识培训和法规的宣传教育；

— 组织辐射工作人员参加环保部门组织的辐射安全与防护知识考核；

— 协助制订和督促执行加速器、热室和核素操作实验室的安全操作规程和各项辐射安全防护措施；

— 负责收发辐射工作人员防护用品和个人剂量计；

— 辐射安全管理机构规定的其他工作。

公司辐射工作人员初步定员 32 名，从事与加速器运行、热室操作、放化质检实验、微生物检验、产品包装和辐射安全管理等相关工作。经辐射安全管理部门授权后，相关辐射工作人员才能进入辐射工作场所工作（包括控制区和监督区）。

根据生态环境部 2019 年第 57 号公告《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》的要求，公司组织所有辐射工作人员参加培训，参加生态环境部门组织的考核，合格后持证上岗。上岗后每 5 年参加复训，考核不合格的，不得上岗。

为满足辐射安全工作需要，公司将根据《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》国核安发〔2015〕40 号文件的相关要求，公司拟配备 2 名注册核安全工程师，其中 1 人担任辐射防护负责人。

公司承诺在申请辐射安全许可证前建立和完善辐射安全管理机构，配备相应的辐射安全员，并承诺项目投入运行前在核安全关键岗位配备相应资格的注册核安全工程师。

6.2 辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法（2021 年修改）》相关规定，生产、使用和销售放射性同位素的单位要有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、台账管理制度、人员培训计划、监测方案等，并有完善的辐射事故应急措施。

为保障项目运行辐射安全，保护工作人员、公众和环境，根据项目特点，公司拟建立健全辐射安全管理规章制度见表 6-1 所示：

表 6-1 拟建立健全辐射安全管理规章制度

项目	规章制度名称	主要内容
操作规程	TR-Flex 回旋加速器操作规程	规定了生产同位素用加速器、热室及实验室使用核素等操作规定。
	TR-Alpha 回旋加速器操作规程	
	非密封放射性物质操作规程	
	放射性去污操作规程	
岗位职责	TR-Flex 加速器操作人员岗位职责	明确辐射公司内各辐射工作岗位职责。
	TR-Alpha 加速器操作人员岗位职责	
	砹 211 车间放射工作人员岗位职责	
	诊断核素车间放射工作人员岗位职责	
	锗镓车间放射工作人员岗位职责	
	核素标记车间放射工作人员岗位职责	
	质量控制实验室放射工作人员岗位职责	
辐射防护和安全保卫制度	辐射安全和防护管理规定	给出辐射防护原则、辐射安全组织体系及职责、剂量管理、环境辐射水平控制原则和措施、辐射监测要求和计划、辐射工作人员健康管理、教育和培训等总体要求。
	非密封放射性物质管理规定（购买、领用、保管和盘存）	
	非密封放射性物质工作场所等级管控制度	
	场所分区管理规定（含人流、物流路线图）	
设备检修维护制度	辐射安全和防护设施维护维修制度（包括机构人员、维护维修内容与频度）	规定射线装置和热室运行、主要安全联锁设备维修和维护的辐射安全管理要求和实施要求。
	加速器巡检，维修、检修制度	
	设备巡检，维修、检修制度	
放射性同位素使用登记制度	放射性核素台账和使用登记制度	射线装置使用、同位素生产核素建立台账，对同位素销售去向进行记录。
台账管理制度	非密封放射性物质销售台账管理制度	
人员培训计划和健康管理	辐射工作人员培训/再培训管理制度	规定辐射工作人员的岗位要求、培训要求和授权规定等。 明确辐射工作人员定期参加放射工作人员职业健康体检，建立相应的健康档案并长期保存等管理要求。
	放射性物品运输人员辐射安全培训制度	
	辐射工作人员职业健康管理制度	
监测方案	监测方案	明确辐射工作场所日常辐射环境监测的目的、布点、频次、监测设备要求和结果记录及报送等内容。 个人剂量监测明确工作人员开展γ和中子个人剂量监测和档案管理方面的要求。 明确监测仪表使用方法及检定校验等质量保证要求。
	监测仪表使用与校验管理制度	
	辐射工作人员个人剂量管理制度	

应急措施	辐射事故应急方案	明确辐射事故应急响应组织、事故分级和响应措施、培训和演习等内容。
三废管理	放射性“三废”管理规定	给出放射性废水和固体废物暂存、外运处置的要求，以最终满足法律法规的要求。
	危险废物环境管理规定	
其他	非密封放射性物质销售管理制度	给出放射性同位素生产包装到委托有资质单位运输等管理要求，以及退役、人员档案和检查评估等管理要求。
	非密封放射性物质运输管理制度	
	非密封放射性物质工作场所退役管理规定	
	辐射安全档案管理制度	
	自行检查和年度评估制度	

公司拟根据放射性同位素生产和核素操作特点，在申请辐射安全许可证前建立和完善辐射安全管理制度并发布生效，并将其中《TR-Alpha 回旋加速器操作规程》、《TR-Alpha 加速器操作人员岗位职责》、《TR-Flex 回旋加速器操作规程》《TR-Flex 加速器操作人员岗位职责》、《非密封放射性物质实验操作规程》与《辐射事故应急预案》等制度张贴上墙于相关辐射工作场所。

6.3 辐射监测

本项目辐射监测主要包括工作场所监测、环境监测和个人剂量监测。工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测以巡测和环境介质取样分析结合的方式进行；个人剂量监测采取累积式个人剂量监测计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。

6.3.1 工作场所监测

本项目工作场所监测内容主要包括γ辐射空气吸收剂量率、中子当量剂量率以及表面污染监测，设置了固定式区域辐射监测系统，同时利用配备的便携式 X-γ 剂量率仪进行巡测，建设单位针对工作场所制定的监测布点及频次见表 6-2 所示。厂区内固定式监测系统主要布设在一层放射性核素生产区和二层放化质检区，地上一层固定式区域辐射监测布点示意图见图 6-1 所示，地上二层固定式区域辐射监测布点示意图见图 6-2 所示。

每个监测点由 1 台γ探测器组成，另外加速器内和加速器机房防护门外侧监督区增加 1 台中子探测器，可以实时探测场所内的中子和γ射线辐射场。加速器机房防护门实现剂量联锁，并通过对辐射场的测量，判断停机后辐射工作人员的准入条件。

根据本项目布局特点，在辐射工作场所及周围共布设了 13 个监测点，监测点位覆盖放射性活度较高的控制区。监测点位数量和布局合理，满足辐射防护监测要求；购置中子和γ射线剂量率探测器时，应考虑监测仪器能量响应满足测量要求，仪器灵敏度和测量精度满足要求。

表 6-2　工作场所辐射环境监测表

工作场所	采样（监测）布点	监测项目	监测频次	备注
两座回旋加速器机房	➢ 每个控制室内的操作人员操作位处。 ➢ 每个加速器大厅四周墙体外 30cm、离地面高度 1m 处。 ➢ 每个加速器大厅防护门外 30cm、离地面高度 1m 处，以及防护门的左、中、右 3 个点和门缝四周。 ➢ 其他人员经常活动的位置，如与加速器大厅相邻的用房及走廊。	γ辐射空气吸收剂量率	1 次/年	委托资质单位监测
			每次生产后	自行监测
	➢ 每个加速器防护门内侧和外侧	γ辐射空气吸收剂量率、中子当量剂量率	连续监测	新建固定式监测系统自动监测
热室区域及质检操作区域	锗镓核素车间操作区、诊断核素车间操作区、核标记车间操作区、砹 ^{211}At 核素车间操作区、外购核素存放间、放化实验室、高纯锗能谱室	γ辐射空气吸收剂量率	连续监测	新建固定式监测系统自动监测
			1 次/年	委托资质单位监测
			每次生产后	自行监测
	➢ 锗镓核素车间操作区、诊断核素车间操作区、核标记生产车间操作区、砹 ^{211}At 核素车间操作区、外购核素存放间、放化实验室、高纯锗能谱室各区域的人员进出口处、以及上述场所核素操作台面、设备表面、涉核生产区或实验区的墙壁与地面。 ➢ 涉放操作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋和帽子等。	表面污染监测（总α、总β）	1 次/年	委托资质单位监测
			每次生产后	自行监测

	废物和产品包装外表面	γ辐射空气吸收剂量率和表面污染监测（总α、总β）	每次废物装桶或产品包装后、包装返回时	自行监测
	锗镓核素车间操作区、诊断核素车间操作区、核标记车间操作区、砹^{211}At核素车间操作区、外购核素存放间、放化实验室、高纯锗能谱室	气溶胶（总α、β）	每年一次	委托资质单位监测
			每次生产后	自行监测

6.3.2 辐射环境监测

依据 HJ 61-2021《辐射环境监测技术规范》，结合本项目特点，对项目周围γ辐射水平、土壤、空气辐射环境进行监测，监测项目、监测点位、监测频次见表 6-3 所示，并将监测结果连同辐射安全评估报告按规定一并上报生态环境主管部门。

表 6-3　辐射环境监测方案

监测对象	采样（监测）布点	监测项目	监测频次	监测方式
γ辐射	以辐射工作场所为中心，半径 500m 以内环境敏感点目标	γ辐射空气吸收剂量率	1次/年	每年委托有资质单位监测
中子		中子剂量当量率	1次/年	每年委托有资质单位监测
土壤	厂界四周	土壤中总α、总β	1次/年	委托有资质单位取样监测
废气	楼顶各排放口	空气中γ核素、空气中总α、总β、放射性碘同位素	1次/年	委托有资质单位取样监测
地表水	杭州湾	水中总α、总β	1次/年	委托有资质单位取样监测
放射性固体废物暂存库	放射性废物暂存库周围、废物桶表面	γ辐射空气吸收剂量率和表面污染监测（总α、总β）	1次/年	委托资质单位监测

6.3.3 流出物监测

（1）气载流出物监测

本项目外排放射性气载流出物核素拟采取在排放口安装在线监测系统，以监测并记录放射性气溶胶的排放量和排放浓度。

①监测对象、监测项目

监测对象：气载流出物

监测项目：总 α、总 β、放射性碘同位素、总 γ 核素的排放量和排放浓度

②监测点位

在加速器机房、锗镓核素车间、诊断核素车间、砹 ^{211}At 核素车间以及核素标记车间放化实验区的放射性废气排放口。

③监测方法

监测数据自动记录，存入计算机系统。

（2）液态流出物监测

①监测对象

监测对象：衰变池间需要外排的放射性废水

②监测点位

衰变池解控废水排放口

③ 监测因子

衰变池槽式排放口：总 α、总 β

循环冷却水储罐排放口：总 α、总 β

④监测方法

采用取样监测的方式，在排放前取样检测分析，水质符合《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）的排放要求后，经审管部门批准后排入园区市政污水管网。若总 α 大于 0.5Bq/L，总 β 大于 1.0Bq/L，则进一步分析 γ 核素。

⑤监测频次：每次排放前。

6.3.4 个人剂量监测

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（国家环境保护部令第 3 号，2008 年 12 月 6 日起施行；环境保护部令第 47 号修正，2017 年 12 月 20 日施行）的要求，对辐射工作人员所受辐射剂量进行控制，对所有在职辐射工作人员进行个人剂量监测，并按规定周期送检。

公司将定期委托有资质的单位进行个人剂量监测，检测周期不超过 90 天，项目投入运行前，为辐射工作人员配备相应的个人剂量计，其中进出加速器大厅的辐射工作人员拟采用中子和γ复合个人剂量计。

辐射安全管理机构负责建立辐射工作人员个人剂量档案并长期保存。

6.3.5 事故监测

对于发生事故情形下，事故应急监测项目、监测点位、监测频次等需要根据事故发生性质、时间、可能污染范围等因素综合确定，及时进行有关项目追踪监测，取得事故现场监测数据和有关资料，并进行事故评价，最终将结果上报至审管部门。

6.3.6 监测仪表

本项目工作场所辐射监测拟配备的仪器设备见表 6-4。

表 6-4 工作场所辐射防护监测仪器表

序号	名称	单位	数量	相关参数	备注
1	固定式区域辐射监测仪	套	13	γ测量范围：100nSv/h~0.1Sv/h γ能量范围：80keV~2MeV； 测量范围：30nSv/h~0.1Sv/h 能量范围：热中子~20MeV	一层两座回旋加速器机房内、外各 1 套（每套均含 1 个γ剂量探头和 1 个中子剂量探头）；其余两个控制室各 1 套，四个热室车间各 1 套、外购核素车间 1 套和二层放化质检区 2 套，均配套 1 个γ剂量探头
2	便携式表面污染仪	台	6	α探测下限≤0.08Bq/cm^2、β探测下限≤0.8Bq/cm^2	一层四个热室车间各有 1 台，二层质检区 2 台
3	热释光个人剂量仪	个	32	/	每名辐射工作人员
4	个人剂量报警仪	台	32	/	每名辐射工作人员
5	多功能便携式辐射环境γ巡测仪	台	1	测量范围50nSv/h~10Sv/h；	地下一层、一层和二层均使用

				能量范围：15keV~3MeV	
6	中子剂量率仪	台	1	测量范围：30nSv/h~100mSv/h 能量范围：热中子~20MeV	一层和二层均使用
7	放射性气态流出物在线监测系统	套	7	/	楼顶排放口（除了外购核素存放间及阳性对照实验的排放口）
8	便携式气溶胶取样装置	台	1	/	一层车间内使用
9	便携式碘取样装置	台	1	/	一层车间内使用

略

图 6-1　固定式辐射监测系统测点布设示意图（一层）

略

图 6-2　固定式辐射监测系统测点布设示意图（二层）

6.4 辐射事故应急

按照国家相关要求，公司将在项目运行前设置相应的辐射应急响应组织机构，并按照射线装置和放射性同位素药物生产的特点，拟制定《辐射事故应急方案》，开展相应的应急响应和应急准备工作。公司制定的《辐射事故应急方案》主要包括：

（1）总则

为了加强射线装置的安全防护和监督管理，促进加速器的安全运行，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应急能力，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，结合公司使用射线装置和放射性同位素生产的特点，制定本方案。

（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：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：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。

本项目辐射事故主要是指回旋加速器联锁故障导致意外照射或个人剂量超标的事件；非密封放射性物质丢失、被盗或非密封放射性物质污染等。

（3）应急组织体系与职责分工

公司成立辐射事故应急响应指挥部，以法定代表人为总指挥，其他相关部门负责人为指挥部成员，其主要职责为：负责针对辐射事故的危害程度，发布预警等级，组织实施辐射事故应急方案，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，配备相应防护装备（服装、防护器具等）。

— 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；对事故的基本情况进行定性和定量描述，对整个事故进行评估，进行工作总结。

（4）辐射事故应急响应流程

辐射事故应急响应流程如图 6-所示。

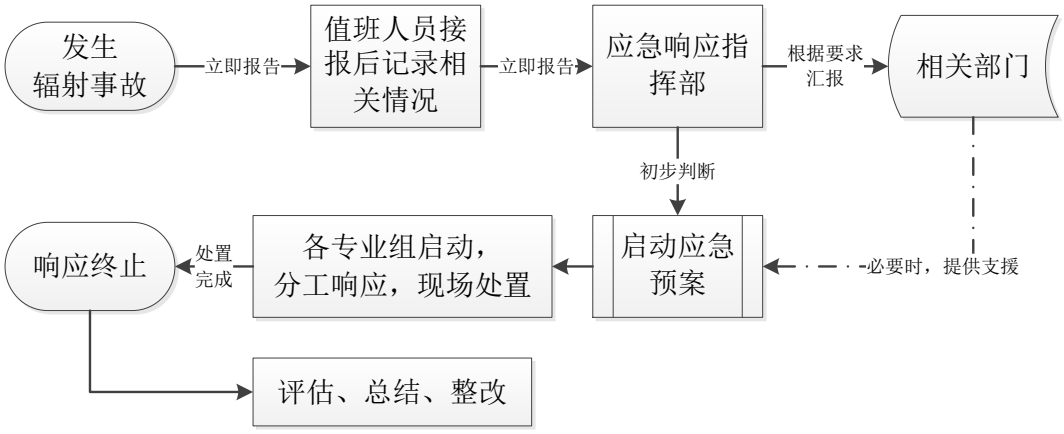


图 6-3　辐射事故应急响应流程图

对照特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故事故四个等级分别启动Ⅰ级响应、Ⅱ级响应、Ⅲ级响应和Ⅳ级响应，发生特别重大事故（Ⅰ级响应）、重大事故（Ⅱ级响应）和较大事故（Ⅲ级响应）时，按照《生态环境部（国家核安全局）辐射事故应急预案》要求，由嘉兴市生态环境局启动应急预案，协助上级环保部门进行辐射事故的处理。发生一般事故（Ⅳ级响应）由海盐县生态环境局启动应急预案，负责园区辐射事故应急响应、事故处理及事故原因调查。

1）当发生辐射事故时，有关部门和现场人员应立即通过电话等各种方式报告辐射安全管理值班人员，值班人员记录相关情况（事故发生地点、时

间、事故影响等）后，立即报告公司应急响应指挥部值班领导；

2）公司应急指挥部值班领导初步判断后立即启动公司辐射应急方案，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、卫生健康等部门汇报，必要时请求外部支援；

3）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，并随时向园区应急响应指挥部汇报，发生较大及以上辐射事故时，园区应急响应指挥部相关成员到现场指挥；

4）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；

5）善后处置组人员负责收集、整理所有应急日志、记录和相关书面信息，在应急响应指挥部的指导下编制应急总结报告，按规定提交相关部门；并提出相应的整改措施，并根据应急响应的实践修订应急方案。

（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应急培训，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

辐射事故应急演习一般每年 1 次；演习有计划、方案和程序以及总结报告。

3）辐射应急物资配备

在锗镓核素生产车间、诊断核素生产车间、核标记生产车间、砹 ^{211}At 核素药物生产车间、放化实验室各配置 1 套辐射事故应急处理包，作为辐射事故应急使用。包括不限于一卷足够长度的隔离带，若干一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污清洗剂（至少为加入清洗洗涤剂和硫代硫酸钠的水）；小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔（水溶性油墨）、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签、不透水的塑料布、一次性镊子、远距离取物夹，以及铅手套，铅衣、铅玻璃眼镜等。

（6）附则

应急方案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实践及时进行修订。

公司建立的《辐射事故应急方案》将结合项目特点给出辐射事故应急响应组织、事故分级和响应措施、培训和演习等内容，并符合相关法律和法规的要求。同时在预案中做好与园区应急指挥部、地方生态环境主管部门的对接工作。

考虑目前公司新成立且没有回旋加速器和放射性核素生产的运行经验，该方案在后续工作中应按照实际辐射工作特点进一步完善和优化。辐射应急方案中要求细化应急物资的准备、定期开展应急人员的培训和演习，并与省、市辐射应急方案和园区辐射应急方案做好衔接。公司承诺在取得辐射安全许可证前建立和完善辐射应急方案。

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

7.1.1 产业发展前景

放射性药物广泛应用于肿瘤、心血管及神经系统等疾病的诊治，是核医学发展的重要内容和精准医学的基石，也是健康中国建设的重要保障。项目建设两台30MeV回旋加速器，生产诊断用放射性核素和治疗用放射性核素。

放射性诊断核素药物可从细胞水平上显示活体生物过程，揭示疾病的机理。是生命科学研究领域的分子探针。传统的诊断显像手段，如CT、核磁共振显像、光学显像主要通过病理学进行疾病的诊断，只能显示分子变化的最终结果，不能反映人体器官功能和代谢过程。放射性核素诊断药物不但可分层显示出脏器的形态变化，而且还可观察功能性动态变化及放射性药品在脏器内的代谢过程，给出三维影像数字数据分布，特异性高、显像性能好、图像清晰，在分子（细胞）水平上直接研究人体的功能和代谢过程，实现人体内生理和病理过程的快速、无损和实时成像。真正意义实现对各种疾病，尤其是肿瘤疾病的早期诊断，为预防医学、转化医学、个性化医学的实现提供可能。项目建成投产，可向终端用户市场提供两类放射性诊断药物：单光子发射计算机断层显像（SPECT）药物和正电子发射型计算机断层显像药物（Positron Emission Computed Tomography 简称称PET）。在放射性治疗药物领域，α核素药物处于行业技术最前沿，α核素具有传能线密度（Linear Energy Transfer，LET）高、电离辐射效应大、细胞杀伤效率高和射程短的特点，使用剂量远远小于β类核素药物，有助于减少给药剂量，从而降低用药成本和副作用。本项目建成投产，将成为国内唯一一家商业化生产α核素药砹^{211}At的设施。

7.1.2 促进地区经济、社会发展

项目位于我国最具发展活力的长江经济发展带，项目建设对海盐地区医药产业的打造有较好的推动力，并有利于提升当地区域警戒的竞争力。项目建设后，将会产生对研发、生产技术、销售及其它职能人员的一定需求，为新型核药研发人才打造很好的就业平台。

7.1.3 经济效益

项目运行后，据测算每年营业收入约 2 亿元人民币，将为当地贡献税收约2000 万元人民币。

综上所述，本项目建设符合新兴医药产业的发展需要，有利于加快实现区域产业发展布局规划，有利于促进当地经济快速发展，增加就业机会，具有明显的经济和社会效益。

7.2 代价分析

7.2.1 经济代价

本项目计划环保投资约 1800 万元，占总投资的 15%。环保投资主要用于回旋加速器屏蔽结构建设，废气、废水、噪声和固体废物的处置，环境管理、环境监测及事故预防设施建设。

7.2.2 社会和环境代价

本项目建设用房为地方政府统一代建，项目运行将依托产业园区的基础设施，项目建设和运行对社会影响较小。本项目运行后，经预测项目对环境的影响满足国家相关标准要求，对环境的影响是可接受的。

7.2.3 资源代价

本项目利用购买的工业厂房开展放射性药物生产，厂区占地面积 1922.58m^2。项目建成后在生产厂房四周将进行适当绿化，恢复部分绿化资源。

7.3 正当性分析

放射性核素是放射性药物研发和生产的必要条件，我国医用放射性核素短缺，绝大部分医用核素依赖进口，这严重制约了我国放射性药物的发展。本项目配置两台 30MeV 回旋加速器，研究开发、生产、销售新型放射性核素和核素药物，实现产品管线、放射性核素原料的国产化，自主生产供应，解决“卡脖子”问题。建立自主创新原研放射性药物研发转化平台，产品创制达到全球领先水平；丰富国内核医学临床一线可用的创新型诊断、治疗放射性药物。成为中国 α 核素及 α 核素标记药物研发、生产的先驱者和技术引领者。

从正当性角度分析，本项目的实践具有正当性。

8 结论与建议

8.1 项目工程概况

浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司选址于海盐县核技术应用（同位素）产业园标准化厂房一期 2#厂房。本项目辐射工作场所包括一层两座回旋加速器机房、热室等核素生产区域，两层放化质检实验室和微生物检验区。三层为预留的理化试验室仪器分析区及四层办公区等非辐射工作场所。地下一层主要为产业园内汽车停车场，设备用房以及放射性废物暂存库用房和放射性废水衰变池用房。本项目厂房内还配套建设通风系统、配电系统等公共设施。

公司在一层生产区建设两座回旋加速器机房，分别配置 1 台 ACSI 公司生产的 TR-FLEX 型质子回旋加速器（最大质子能量为 30MeV，最大束流强度为 750μA，I 类射线装置）和 1 台 ACSI 公司生产的 TR-Alpha 型 α 粒子回旋加速器（最大 α 束流能量为 30MeV，最大束流强度为 100μA，I 类射线装置），并且质子回旋加速器配套热室开展 ^{68}Ge（锗镓发生器）、 ^{57}Co、^{64}Cu、^{67}Cu、^{89}Zr、^{99}Mo（钼锝发生器）、^{123}I、^{124}I、^{203}Pb 、^{225}Ac、^{18}F 放射性核素生产、使用和销售工作，α 粒子回旋加速器配套手套箱开展 ^{211}At 放射性核素生产、使用和销售工作，另外砹尔法公司在一层开展外购放射性核素开展标记、提纯和分装等制备放射性药物工作。一层非密封工作场所的日等效最大操作量合计为 7.70E+11Bq，属于甲级非密封工作场所。砹尔法公司在二楼质检实验室开展放射性核素操作，日等效最大操作量 4.50E+08Bq，属于乙级非密封工作场所。

厂房周围 500m 范围内没有学校、医院等环境敏感目标，仅有两处杨柳山居民点，评价范围内主要是公司厂房、相邻企业生产厂房、产业园规划道路等。

根据砹尔法公司工作计划，每年在辐射工作场所工作时间 250 天，两台加速器每年最多停机检修 1 次。设备首次安装、调试和定期停机检维修工作由设备生产单位负责。

8.2 辐射安全与防护

（1）辐射防护

本项目两座回旋加速器机房南北共墙建设，均采用混凝土结构，质子回旋加速器机房设置 4 个靶站，并配套建设固体靶材传输系统和液体靶材传输系统，以

及锗镓核素车间和诊断核素车间（含热室、成品包装间等）。α粒子回旋加速器机房设置2个内靶，配套建设固体靶材传输系统，以及砹^{211}At核素车间（含手套箱、成品包装间等）。按照控制区和监督区对放射性工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。辐射工作场所均设有通风系统，其排风量、换气次数、排风方式、排气口高度等的设计均能满足相关标准要求，确保排入环境中的放射性废气对环境影响能够满足相关标准的要求。辐射工作场所设置了相对独立的人流和物流通道，并采取相应的时空管制措施，可有效避免工作人员受到不必要的外照射。

加速器机房设计采用门机联锁、剂量联锁、急停开关、巡检开关、声光报警、光电联锁、工作状态指示灯、控制系统开关等设施，满足辐射防护安全设施多元性、独立性、冗余性、失效保护和最优切断要求，可以达到保护辐射工作人员人身安全的目的。

（2）放射性三废治理

本项目辐射工作场所设置独立的排风系统，药物生产和质检过程中在专用的热室、手套箱或通风橱中进行操作，药物挥发至空气的份额相对较少，排风系统中放射性废气经高效过滤后排放，放射性废气对周围公众的影响相对较小。

加速器及靶站设备使用的冷去水循环使用，不排放。项目正常生产过程中的少量放射性废水拟转为放射性固体废物定期转移至地下一层放射性废物库暂存。应急冲洗废水中较长半衰期核素（半衰期＞59.4d）在各自场所回更间洗手池下方通过专用下水管道收集到内装有两级包容专用容器中，转移至地下一层放射性废物库进行衰变贮存，对于无法进行清洁解控处理的，依托产业园规划建设的放废收贮中心进行处理。其它短半衰期放射性核素（半衰期≤59.4d）的应急冲洗废水直接经预埋管网排入地下一层放射性废水衰变池，储存超过10个半衰期达到解控标准后申请解控，按规定排入园区污水管网。

放射性固体废物包括废固体靶金属背板、废离子交换色谱柱、废PVC管线、废移液枪头、废试纸、废玻璃试管、废高效滤芯和废活性炭等统一存放在地下一层放射性废物库中，当满足清洁解控要求后，进行解控处理，对于无法进行清洁解控处理的，依托产业园规划建设的放废收贮中心进行处理。

项目运行期间三废治理措施可以满足环境保护和辐射防护要求。

8.3 环境影响分析

（1）辐射环境影响

— 环境辐射水平

根据辐射场特点和屏蔽设施设计参数，校核计算结果，回旋加速器开机运行期间，加速器机房和热室屏蔽设施外操作位、实验室质检操作场所等人员长期居留场所辐射剂量率均低于 2.5μSv/h，满足辐射防护要求。

— 工作人员受照辐射剂量

辐射工作人员年最大受照剂量为 2.383mSv/a，小于本项目职业人员剂量约束值 5mSv/a。

— 公众受照剂量

保守估算本项目周围公众受照剂量最大值为 0.030mSv/a，小于 0.1mSv/a 的公众剂量约束值。

（2）非放射性影响

项目运行期间产生的非放废气包括浓盐酸少量挥发产生的酸雾及少量挥发性有机物（以 NMHC 计），经通风系统至离地 26.15m 高的屋顶排放口外排，废气排放满足《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）中表 2 氯化氢最高允许排放限值（10mg/m^3）要求和表 1 非甲烷总烃最高允许排放限值（60 mg/m^3）的要求。

项目日常运行产生的生活污水经化粪池预处理后接入园区污水管网，实验室非放操作使用器皿等清洗废水、工作服清洗废水、厂房清洁废水（地面拖布冲洗废水）拟通过污水管网排入废水预处理水池后排入市政污水管网。

项目运行期间设备噪声（包括循环水泵、空调机组、风机等）对厂界边界处噪声贡献值较小，公司厂界噪声能够达标排放，满足《工业企业厂界环境噪声排放标准(GB12348-2008)》中的 3 类标准要求。

公司办公产生的生活垃圾委托环卫部门统一处置。一般工业固体废物中废包装材料可变卖废品由收购站处理，新风系统废滤芯交由生产厂家回收处理，其他不可回收由环卫部门处理。非放操作过程中沾染酸碱等试剂的实验废物、使用过

酸碱等试剂的容器前三次清洗废液和实验检测废液，以及解控后的废活性炭及废高效滤芯均作为危险废物委托有资质单位处置。

综上，项目运行产生的非放射性污染对周围环境的影响很小。

项目在设计、建设和运行过程采取本环评提出的各项环境风险防范措施，制订并落实企业突发环境事件应急预案，在此前提下，该项目环境风险可控。

8.4 辐射安全管理

本项目为新建项目，浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司作为射线装置使用单位和医用放射性同位素药物生产、销售和使用单位，将根据法律法规的要求，建立和完善企业辐射安全与环境保护管理机构和辐射安全管理规章制度、开展辐射环境监测和个人剂量监测等工作，并制定辐射事故应急方案。企业在本项目运行前建立和完善上述安全管理制度和应急方案，才能具备相应的辐射安全管理能力并满足辐射安全管理要求。

8.5 公众参与

建设单位根据《环境影响评价公众参与办法》的要求开展了公众参与工作，于 2023 年 6 月 5 日在砹尔法宁波网站发布第一次信息公告，2024 年 10 月 14 日在砹尔法宁波网站公布第二次信息公示（征求意见时间 10 月 15 日~28 日 10 个工作日），通过网站、报纸（第二次信息公示 10 个工作日期间 2 次登报）、张贴公告等形式广泛征求了公众意见，并于 2025 年 4 月 11 日在砹尔法宁波网站公布报告全文征求了公众意见。已编制完成《浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司新建医用阿尔法核素等同位素药物生产项目环境影响评价公众参与说明》，满足相关法规要求，公示期间没有公众对本项目建设提出反对意见。

8.6 结论

浙江砹尔法纽克莱医疗科技有限公司新建医用阿尔法核素等同位素药物生产项目符合国家产业政策，符合地区国民经济和社会发展、产业发展规划，符合园区规划要求，符合地区相关规划管控要求，综合考虑项目的经济、社会和环境等方面的利益和代价，本项目的实施具有正当性。本项目设计采取的放射性污染防治措施和非放射性污染防治措施有效合理，可确保项目运行产生的各项污染物

达标排放；项目建成后正常运行所致公众和工作人员的辐射影响满足相关评价标准要求，是可接受的。项目的建设在严格遵守国家有关法律法规要求、严格按照建设项目“三同时”制度要求、贯彻落实本环境影响报告书提出的各项环境保护措施和风险防范措施并加强管理的前提下，从辐射防护和环境保护角度考虑，本项目的建设是可行的。

8.7 建议和承诺

8.7.1 建议

（1）建议单位在建设和运营过程中须严格落实项目设计及本报告书提出的各项污染防治措施与辐射安全防护措施。

（2）建设单位定期对辐射安全防护设施进行检查、维护，发现问题及时维修。

（3）建设单位定期进行辐射事故应急演练，检验应急预案的可行性、可操作性，并根据演练反应的问题，总结、完善事故应急预案。

8.7.2 承诺

（1）关于辐射安全管理的承诺

建设单位将加强辐射工作场所控制区和监督区入口的管控，不参与辐射工作的人员不能进入辐射工作场所。在项目投运前完成所有辐射工作人员的辐射安全与防护考核，保证所有辐射工作人员考核通过持证上岗。并在后续的运营期间，按相关规定对辐射工作人员进行再培训教育。

（2）关于建立和完善辐射安全管理机构和辐射规章制度的承诺

建设单位承诺在申请辐射安全许可证之前，建立和完善辐射安全管理机构和辐射规章制度，包括与回旋加速器和热室、实验室核素操作有关的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、设备使用登记和放射性核素台账管理制度、人员培训计划、辐射环境和个人剂量监测方案、辐射应急方案等，并在后续运营期间，根据相关法律法规的更新及运营过程中发现的问题，及时组织修订，使其具有针对性、可操作性。

（3）关于核安全关键岗位设置的承诺

建设单位承诺根据国家核安全法规的要求，项目投入运行前使本单位核安全关键岗位的人数达到相关规定要求，配备相应的注册核安全工程师。

（4）关于投入使用前开展委托监测并取得相应许可的承诺

建设单位承诺取得相应的辐射安全许可后，由设备厂家开展回旋加速器的出束调试，并委托有资质的单位开展辐射环境检测，经检测满足相关国家标准、竣工环保验收合格后正式投入使用。

附：　　项目“三同时”措施一览表(1/2)

项目	“三同时”措施内容	预期效果	投资（万元）
辐射安全管理机构	建立辐射安全与环境管理机构或指定专职人员负责辐射安全与环境保护管理工作	满足《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等法规的要求。	/
辐射安全和防护措施	回旋加速器机房、热室（手套箱或通风柜）均按照现有屏蔽设计方案建设。运行后辐射工作场所屏蔽设施外职业人员长期居留及公众可达处辐射水平低于 2.5μSv/h。	职业人员和公众年受照剂量小于 GB18871-2002 中规定的剂量限值和本项目剂量约束值：职业人员 5mSv/a、公众 0.1mSv/a。	800
	加速器机房设置安全联锁系统，包括急停开关、巡检开关、剂量联锁、声光报警、光电联锁、工作状态指示灯、门机联锁等设施。	落实辐射工作场所各项安全设施，逻辑控制系统实现对这些系统信号和设备的联锁控制，防止人员误照。	550
	一楼加速器机房、热室（含手套箱）所在车间，二楼质检实验室等控制区设置独立的排风系统，各场所产生的放射性废气经管道在 2#厂房顶部独立的排放口排放。	通过吸附过滤装置处理后废气排放对周围环境影响很小。	50
	电缆、水管、通风、靶材传输等管线穿过屏蔽墙进出机房，主要采用斜穿、“Z”形、“S”形以及地埋管道“U”形穿过屏蔽墙。	不破坏屏蔽效果，穿越屏蔽设施处防护门/墙外辐射剂量率不超过 2.5μSv/h。	50
人员配备	辐射工作人员和辐射安全管理人员参加生态环境部门组织的考核，合格后持证上岗，满足《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》的要求。配备 1 名注册核安全工程师担任辐射防护负责人	辐射工作人员和辐射安全管理人员通过考核，具有辐射安全与防护知识，持证上岗。 注册核安全工程师人数满足《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》国核安发〔2015〕40 号文件的相关要求。	/
	辐射工作人员佩戴个人剂量计，定期（每 3 个月）送有资质单位检测，建立个人剂量档案并长期保存。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等法规要求	1.0

附：　　项目“三同时”措施一览表(2/2)

项目	“三同时”措施内容	预期效果	投资（万元）
人员配备	辐射工作人员每 1~2 年参加职业健康检查，并建立职业健康档案，档案长期保存。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等法规的要求	1.0
辐射防护规章制度	健全操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、设备使用登记、台账制度、人员培训计划、环境监测和个人剂量监测制度及辐射事故应急措施	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等法规的要求	/
检测仪表	辐射工作人员每人配备有效的报警仪，人员进入机房内时随身佩戴。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等法规的要求。	3
	配备 1 台多功能辐射环境 γ 巡测仪、1 台中子剂量率仪、5 台便携式表面污染仪、1 台便携式气溶胶取样装置及 1 台便携式式碘取样装置以及 7 套放射性气态流出物在线监测系统		60
	一层两座回旋加速器机房内、外各 1 套（每套均含 1 个 γ 剂量探头和 1 个中子剂量探头）；其余两个控制室各 1 套，四个热室车间各 1 套、外购核素车间 1 套和二层质检区 2 套，均配套 1 个 γ 剂量探头，检测工作场所和周围区域辐射水平。		100
“三废”处置	废气：加速器机房、热室通风换气率不低于 8 次/h、核素操作热室（手套箱或通风柜）风量不低于 0.5m/s，辐射工作场所保持负压。	辐射工作人员和公众受到气态途径辐射剂量较小。	95
	废水：核素生产和实验室核素操作时产生的放射性工艺废水和应急清洗废水中含较长半衰期（＞59.4d）的核素拟作为放射性固体废物收集暂存，含较短半衰期（≤59.4d）应急废水进入衰变池水箱衰变经检测达到排放标准后接入园区污水管网。 生活污水经化粪池预处理后接管园区污水管网。非放操作使用器皿清洗废水、工作服清洗废水、厂房清洁废水拟通过污水管网排入园区废水预处理水池。 设备冷却水循环使用不排放。	放射性工艺废水和含较长半衰期（＞59.4d）的核素拟作为放射性固体废物收集暂存，含较短半衰期（≤59.4d）应急废水进入衰变池；生活污水及其他非放工艺废水接入园区污水管网，废水经预处理后排入海盐县城乡污水处理厂进一步处理外排，不对周围水环境产生不良影响。设备冷却水循环使用不排放。	50

	固体废物：放射性固体废物分类暂存于放射性废物暂存库中，定期委托有资质单位处置。 沾染酸碱等试剂的实验废物、使用过酸碱等试剂的容器前三次清洗废液和实验检测废液，以及解控的废活性炭和废高效滤芯等危险废物委托有资质的单位处置。	固体废物（包括放射性固体废物、危险固体废物）妥善处置，不对周围环境造成不良环境影响。	40
总计	/	/	1800