核技术利用建设项目

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目

环境影响报告书

（公示本）

中国科学院合肥物质科学研究院

2026年05月

核技术利用建设项目

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目

环境影响报告书

建设单位名称：中国科学院合肥物质科学研究院

建设单位法定代表人（签名或签章）：刘建国

通讯地址：安徽省合肥市蜀山湖路350号

邮政编码：230031　　**联系人：**尹红星

电子邮箱：yinhx@ipp.ac.cn　　**联系电话：**13966736849

打印编号：1775802191000

编制单位和编制人员情况表

项目编号	649179
建设项目名称	聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目
建设项目类别	55--172核技术利用建设项目
环境影响评价文件类型	报告书
一、建设单位情况	
单位名称（盖章）	中国科学院合肥物质科学研究院
统一社会信用代码	12100000717806802O
法定代表人（签章）	刘建国
主要负责人（签字）	宋云涛
直接负责的主管人员（签字）	尹红星
二、编制单位情况	
单位名称（盖章）	中核第七研究设计院有限公司
统一社会信用代码	91140000405747452W
三、编制人员情况	

1. 编制主持人

姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
樊林栋	06351443505140245	BH005291	

2. 主要编制人员

姓名	主要编写内容	信用编号	签字
樊林栋	第1～8章	BH005291	
刘毓健	第1、3、5章部分内容	BH005293	
刘霞	审核	BH005660	
李光柱	审定	BH006420	

目 录

第一章 概 述 1

1.1 项目名称、地点 1

1.2 项目概况 1

1.2.1 建设单位概况 1

1.2.2 项目背景、意义 2

1.2.3 建设规模 4

1.2.4 项目拟建场址及周围环境概况 7

1.2.5 符合性分析 16

1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状 33

1.3 编制依据 44

1.3.1 国家法律、法规和部门规章 44

1.3.2 地方性法规及文件 47

1.3.3 技术导则、标准 48

1.3.4 其它文件、资料 50

1.4 评价标准 51

1.4.1 电离辐射评价标准 51

1.4.2 非放射性评价因子及评价标准 54

1.5 评价范围和保护目标 58

1.5.1 电离辐射评价范围和保护目标 58

1.5.2 非放射性评价范围和保护目标 61

第二章 自然环境与社会环境状况 67

2.1 地理位置 67

2.2 自然环境状况 67

2.2.1 地形地貌 67

2.2.2 地质条件 67

2.2.3 地下水 68

2.2.4 地表水 69
2.2.5 气候气象 70
2.2.6 土壤 70
2.2.7 地震 71
2.3 社会环境概况 71
2.3.1 人口 71
2.3.2 经济 72
2.3.3 教育 72
2.3.4 科技 72
2.3.5 医疗 72
2.4 辐射环境质量现状与评价 72
2.4.1 辐射环境现状调研 72
2.4.2 辐射环境现状监测 73
2.4.3 小结 85
2.5 非放射性环境现状与评价 85
2.5.1 大气环境质量现状调查与评价 85
2.5.2 地表水环境质量现状调查与评价 86
2.5.3 声环境质量现状调查与评价 86
2.6 场址适宜性评价 88
第三章 工程分析与源项 89
3.1 项目规模与基本参数 89
3.1.1 项目规模与基本参数 89
3.1.2 项目基本参数 90
3.2 工程设备与工艺分析 91
3.2.1内燃料循环平台 91
3.2.2 外燃料循环平台 106
3.2.3 氚安全防护平台 121
3.2.4 涉氚材料测试平台 121

3.2.5 介质除氚实验平台 126
3.2.6 涉氚部件维护及处理支撑平台 142
3.2.7 氚辐射安全效应实验平台 160
3.2.8 包层材料批量化制备平台 175
3.2.9 包层原型模块先进制造平台 220
3.2.10 固态包层综合性能测试平台 236
3.2.11 液态包层综合性能测试平台 241
3.2.12 供电系统 252
3.2.13 冷却系统 254
3.2.14 通排风与给排水系统 259
3.2.15 公用技术系统 267
3.2.16 智能控制系统 269
3.3 污染源项 269
3.3.1 放射性污染源项及源强分析 269
3.3.2 非放射性污染源项及源强分析 274
第四章 辐射安全与防护设施 289
4.1 场所布局与屏蔽 289
4.1.1 项目总平面布置 289
4.1.2 氚燃料实验楼布局与屏蔽 290
4.1.3 人流物流 291
4.2 辐射安全与防护措施 292
4.2.1 辐射工作场所分区 292
4.2.2 氚污染防护（包容）措施 296
4.2.3 其他辐射安全防护措施 297
4.3 辐射安全联锁系统 302
4.3.1 工艺辐射安全联锁 302
4.3.2 氚环境排放安全联锁 305
4.4 辐射监测系统 307

4.4.1 涉氚平台工艺监测单元 308
4.4.2 场所及个人监测单元 311
4.5 放射性三废的治理 312
4.5.1 放射性废气及其处理措施 312
4.5.2 放射性废水及其处理措施 323
4.5.3 放射性固体废弃物及其处理措施 346
4.6 服务期满后的环境保护措施 347
第五章 环境影响分析 348
5.1 正常运行期间辐射环境影响分析 348
5.1.1 氚辐射环境评价模型 348
5.1.2 计算工况设置依据 355
5.1.3 结果与讨论 359
5.1.3 屏蔽体外剂量率水平 376
5.2 事故工况辐射环境影响分析 377
5.2.1 事故列表 377
5.2.2 事故后果分析 380
5.2.3 事故防范措施 393
5.3 非放射性环境影响分析 393
5.3.1 施工期环境影响分析 393
5.3.2 营运期环境影响分析 402
5.3.3 生态环境影响分析 422
第六章 辐射安全管理 432
6.1 机构与人员 432
6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构及职责 432
6.1.2 辐射工作人员管理 433
6.2 辐射安全管理规章制度 434
6.3 辐射监测 435
6.3.1 个人剂量监测 435

6.3.2 辐射工作场所监测 436
6.3.3 辐射环境监测 436
6.3.4 竣工环保验收监测 436
6.4 辐射事故应急 438
6.5 从事辐射工作能力评价 439
6.5.1 辐射安全与环境保护管理 439
6.5.2 辐射工作人员培训 439
6.5.3 工作场所的安全防护措施 440
6.5.4 个人防护用品及监测仪器 440
6.5.5 规章制度 441
6.5.6 辐射事故应急 441
6.5.7 放射性三废治理 441
6.6 环保投资一览表 442
第七章 利益-代价分析 446
7.1 利益分析 446
7.2 代价分析 448
第八章 结论和建议 450
8.1 结论 450
8.1.1 项目工程概况 450
8.1.2 实践的正当性 450
8.1.3 选址、布局合理性分析 451
8.1.4 辐射安全与防护措施 451
8.1.5 辐射环境影响分析 451
8.1.6 放射性三废排放和处理 451
8.1.7 辐射安全管理 452
8.1.8 公众参与 452
8.1.9 总结 452
8.2 建议 452

附件：

附件1　环境影响评价工作委托书；

附件2　国家发展和改革委员会关于聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台、万焦耳级高能皮秒激光装置建设项目可行性研究报告的批复，发改高技〔2025〕811号，2025年6月25日；

附件3　中国科学院关于合肥物质科学研究院聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目可行性研究报告的批复，科发建复字〔2026〕21号，2026年3月20日；

附件4　中国科学院合肥物质科学研究院辐射安全许可证，国环辐证[00147]，2026年01月29日；

附件5　聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台建设项目辐射环境本底调查调查报告，中国辐射防护研究院、核工业太原环境分析测试中心，2025年12月；

附件6　项目建设用地规划许可证，地字第340103202600001号，合肥市自然资源和规划局，2026年1月23日。

附件7　项目噪声质量现状监测报告，报告编号：FS-20260048，2026年4月10日。

附图：

附图1　氚燃料实验楼地下一层平面图；

附图2　氚燃料实验楼地上一层平面图；

附图3　氚燃料实验楼地上二层平面图；

附图4　氚燃料实验楼屋顶平面图；

附图5　氚燃料实验楼1-1剖面图；

附图6　氚燃料实验楼2-2剖面图；

附图7　氚燃料实验楼3-3剖面图。

文中表目录

表 1-1 本项目涉及建筑主要指标 6
表 1-2 配套工程主要技术经济指标 6
表1-3 本项目非密封放射性物质修正因子 7
表 1-4 本项目非密封放射性物质主要参数及其工作场所分级一览表 7
表 1-5 本项目拟建场址四至坐标 7
表 1-6 “三线一单”符合性分析 20
表 1-7 本项目与分区管控单元（重点管控单元）要求符合性分析 22
表 1-8 与《巢湖流域水污染防治条例》的相符性分析 29
表 1-9 与《安徽省饮用水水源环境保护条例》的符合性分析 29
表 1-10 与《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022 版）》的符合性 30
表 1-11 与《中华人民共和国水污染防治法》《合肥市饮用水水源保护条例》符合性 31
表 1-12 与《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见》（升级版）（皖发〔2021〕19 号文）符合性分析 31
表 1-13 与《加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见的通知》符合性分析 33
表1-14 主要核技术利用项目环保手续履行情况一览表 33
表1-15 已许可使用的放射源台账 34
表1-16 许可使用的射线装置台账 36
表1-17 已获许可使用的非密封放射性物质 40
表1-18 现有辐射工作人员信息表 41
表1-19 已配备防护用品及监测仪器一览表 42
表 1-20 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平 52
表 1-21 非密封放射性物质工作场所分级 52
表1-22 放射性核素毒性组别修正因子 53
表1-23 操作方式与放射源状态修正因子 53
表 1-24 工作场所的放射性表面污染控制水平 53
表 1-25 含氚废气排放限值 54

表 1-26 《综合污水排放标准》（GB 8978-1996）总 β 排放限值 54
表 1-27 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）排放限值 54
表 1-28 放射性固体废物中相关核素的解控水平 54
表 1-29 非放射性评价因子识别一览表 55
表 1-30 环境空气质量标准（2031年1月1日前），单位： μg/m³ 55
表 1-31 环境空气质量标准（2031年1月1日起），单位： μg/m³ 55
表 1-32 地表水环境质量标准，单位：mg/L ，pH 无量纲 56
表 1-33 声环境质量标准 单位：dB(A) 56
表 1-34 本项目废水排放标准 单位：mg/L 56
表 1-35 望塘污水处理厂排放标准 单位：mg/L 57
表1-36 《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078-1996 57
表1-37 《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996） 57
表1-38 《挥发性有机物无组织排放控制标准》（GB37822-2019） 58
表 1-39 噪声排放标准 58
表 1-40 本项目电离辐射评价范围保护目标情况表 59
表 1-41 地表水评价等级判定表 61
表1-42 危险物质储存量及临界量一览表 63
表1-43 环境风险影响评价工作等级划分表 63
表1-44 评价工作等级分级表 64
表1-45 地下水环境敏感程度分级表 64
表 1-46 本项目评价范围一览表 64
表 1-47 地表水环境保护目标 65
表 1-48 生态环境保护目标 66
表 2-1 监测对象和监测项目 73
表 2-3 所使用仪器设备清单 76
表2-4 γ辐射空气吸收剂量率测量结果 77
表 2-5 中子剂量当量率测量结果 79
表2-6 气溶胶和空气采样点位 81

表 2-7 气溶胶检测结果 81
表 2-8 空气检测结果 82
表2-9 土壤采样点位 82
表2-10 土壤测量结果 83
表2-11 陆地水体监测点位 83
表 2-12 地表水测量结果 84
表 2-13 地表水沉积物测量结果 84
表2-14 生物采样点位 84
表 2-15 生物检测结果 85
表 2-16 区域空气质量现状评价表 85
表2-17 声环境监测布点及监测条件一览表 86
表2-18 监测使用的仪器、仪表 87
表2-19 声环境质量现状监测结果一览表 87
表3-1 氚的主要核辐射特征 91
表 3-2 本项目非密封放射性物质主要参数 91
表3-3 氢同位素气体贮存需求与初步设计 92
表3-4 联锁保护控制功能信息 104
表3-5 内燃料循环平台主要工艺设备一览表 104
表3-6 固态氚提取单元设计输入参数 106
表3-7 固态包层氚提取单元主要设备工艺操作参数 108
表3-8 氢同位素预浓集单元主要工艺操作参数 112
表3-9 单元运行功能和气体来源 118
表3-10 外燃料循环平台主要工艺设备一览表 120
表3-11 涉氚材料测试平台主要设备及参数 124
表3-12 氚去除材料考核平台主要设备及参数 129
表3-13 氚去除专用设备考核平台主要设备及参数 131
表3-14 气体除氚工艺考核平台主要设备及参数 133
表3-15 液体除氚工艺考核平台主要设备及参数 136

表3-16 固体除氚工艺考核平台主要设备及参数.....139
表3-17 涉氚设备可靠性考核平台主要设备及参数.....141
表3-18 空地一体智能监测模块主要设备及参数.....144
表3-19 涉氚部件自主输运模块主要设备及参数.....147
表3-20 双臂执行器系统主要设备及参数.....149
表3-21 人形机器人系统主要设备及参数.....151
表3-22 自动维护总控模块主要设备及参数.....154
表3-23 涉氚部件清洗除氚模块主要设备及参数.....156
表3-24 涉氚部件废物存储模块主要设备及参数.....159
表3-25 氚辐射安全效应研究平台主要工艺设备统计表.....163
表3-26 氚辐射安全效应研究平台辐射环境监测仪器清单.....166
表3-27 包层楼环境级辐射测量分析系统主要工艺设备统计表.....172
表3-28 干燥烧结系统工艺参数表.....197
表3-29 放电等离子体烧结系统工艺参数表.....200
表3-30 热等静压系统主要参数.....201
表3-31 机加工系统主要参数.....202
表3-32 等离子体旋转电极系统主要参数.....203
表3-33 固态包层功能材料批量化制备表.....207
表3-34 界面沉积系统主要参数.....209
表3-35 化学气相渗透系统主要参数.....211
表3-36 压力浸渍系统主要参数.....212
表3-37 真空裂解系统主要参数.....214
表3-38 平面磨削系统主要参数.....215
表3-39 液态包层功能材料批量化制备平台.....217
表 3-40 关键材料分析测试平台主要设备.....218
表3-41 包层部件增材制造系统主要设备表.....228
表3-42 热等静压设备主要技术参数.....231
表3-43 包层部件热等静压制造系统主要设备.....233

表3-44 包层部件制造集成检测系统主要生产设备 235
表3-45 固态包层综合性能测试平台主要设备及其技术参数 241
表3-46 项目供电系统一览表 253
表3-47 项目供电系统主要设备一览表 253
表3-48 涉氚水冷系统主要技术参数 255
表3-49 项目涉放冷却系统主要设备一览表 255
表3-50 常规水冷系统主要设计参数 257
表3-51 冷冻水系统设计要求 258
表3-52 项目非放（常规）冷却系统主要设备一览表 258
表3-53 项目涉放通排风系统主要设备一览表 262
表3-54 项目非放通排风系统主要设备一览表 264
表3-55 项目用水设计参数 266
表3-56 生活用水量表 266
表3-57 项目给排水系统主要设备一览表 266
表3-58 项目公用技术系统主要设备一览表 268
表3-59 含氚废气排放情况一览表 271
表3-60 正常工况下含氚废水源项及源强 272
表3-61 正常工况不可燃放射性固体废物统计 273
表3-62 大气污染物产排污情况 278
表3-63 废水产排污情况 281
表 3-64 建设项目废水产生情况一览表 281
表3-65 一般工业固废产排污情况 282
表3-66 危险固态废物产排污及暂存情况 282
表 3-67 建设项目噪声源强调查清单（室外声源） 284
表 3-68 建设项目噪声源强调查清单（室内声源） 285
表 3-69 项目有组织废气主要污染物排放情况一览表 单位：t/a 288
表 3-70 项目废水主要污染物排放情况一览表 单位：t/a 288
表 3-71 项目固体废物排放情况一览表 单位：t/a 288

表4-1 辐射工作场所分区 293
表 4-2 进入氚实验楼控制区采取的措施 295
表 4-3 辐射安全与防护对标情况 301
表4-4 联锁保护控制功能信息 307
表 4-5 涉氚平台主要监测仪器一览表 311
表4-6 辐射监测设备一览表 312
表4-7 包容区域类别 312
表4-8 ADS运行工况主要条件参数及技术指标 317
表 4-9 水去氚化系统氚水储存罐和应急水池的参数 324
表4-10 放射性废气废水处理主要工艺设备一览表 343
表4-11 废物直接包装型钢箱（F 型） 347
表 5-1 氚工厂厂址与周围主要人群密集区的间距汇总表 356
表 5-2 实验验证平台拟建场址2023年平均风速及风向频率 357
表 5-3 正常工况下气态氚排放量估算表 357
表 5-4 正常运行工况下气态氚排放量汇总表 358
表 5-5 正常运行工况分类 359
表 5-6 不同工况下高斯模型计算结果汇总表 360
表 5-7 不同工况下CFD模型计算结果汇总表 364
表5-8 土壤参数 370
表5-9 不同关键人群所在地在不同降水强度下的雨水中氚浓度 373
表5-10 设计基准事故列表 378
表5-11 典型事故工况下含氚废气排放量估算表 383
表5-12 事故工况含氚水源项源强 383
表5-13 事故工况不可燃放射性固体废物统计 383
表5-14 典型事故工况氚排放量估算表 384
表 5-15 事故运行工况下气态氚排放量汇总表 385
表 5-16 事故运行工况分类 385
表 5-17 两种事故工况下NNW下风向主要人群暴露有效剂量表（事故后5000秒内） 390

表 5-18 事故工况9 (VDS)在NNW下风向主要人群有效暴露剂量 392
表 5-19 主要施工设备振动值 单位：dB(A) 397
表 5-20 常规建筑施工机械及其噪声级 397
表 5-21 各施工阶段的昼、夜噪声级估算值 单位：dB(A) 398
表 5-22 噪声值随距离的衰减关系 398
表 5-23 施工噪声随距离的衰减值 （dB(A)） 399
表 5-24 建设项目废水产生情况一览表 403
表 5-25 望塘污水处理厂设计进出水水质一览表 405
表 5-26 废水类别、污染物及污染治理设施信息表 407
表 5-27 建设项目废水间接排放口基本情况表 407
表 5-28 建设项目废水污染物排放执行标准表 408
表 5-29 建设项目废水污染物排放信息表 408
表 5-30 建设项目噪声源强调查清单（室外声源） 409
表 5-31 建设项目噪声源强调查清单（室内声源） 410
表 5-32 场界噪声环境影响贡献值预测结果 单位：dB(A) 415
表5-33 声环境保护目标预测结果一览表 单位：dB（A） 415
表5-34 危险废物标识要求 420
表 5-35 安徽庐阳董铺国家湿地公园湿地类型统计表 424
表6-1 合肥物质院主要辐射安全管理制度 434
表 6-2 本项目环境监测计划 436
表 6-3 项目辐射安全与防护设施及环保投资一览表 442

文中图目录

图1-1 平台项目总体技术方案.....5
图1-2 平台项目各系统逻辑关系图.....5
图 1-3 项目地理位置.....8
图 1-4 项目拟建场址现状图.....9
图 1-5 项目总平面布置图.....10
图 1-6 项目鸟瞰图(西北→东南).....11
图 1-7A 项目周边环境示意图.....12
图 1-7B 项目周边环境示意图.....13
图 1-7C 项目周边环境示意图.....14
图 1-8 项目用地规划图.....15
图 1-9 董铺水库、大房郢水库水源保护区与本项目位置示意图.....17
图 1-10 本项目拟建场址与区域“三区三线”套合图.....19
图 1-11 “三线一单”环境管控单元与本项目位置示意图.....21
图 1-12 本项目电离辐射评价范围及保护目标示意图.....60
图 1-13 建设项目噪声评价范围图.....65
图2-1 γ辐射空气吸收剂量率监测点位示意图.....79
图 2-2 辐射环境现状监测布点示意图.....80
图2-3 环境噪声质量现状监测布点示意图.....87
图3-1 总体技术方案.....89
图3-2 各子系统逻辑关系图.....90
图3-3 排灰气处理单元工艺流程图.....95
图3-4 3m^3/h内循环氢同位素低温精馏工段流程图.....97
图3-5 0.6m^3/h内循环氢同位素低温精馏工段流程图.....97
图3-6 氚分析与计量衡算单元与其他系统总体界面关系.....99
图3-7 界面连接与支撑单元的功能界面关系框图.....101
图3-8 自动控制单元系统结构.....104

图3-9 真空渗透法氚提取与回收系统流程示意图.....115
图3-10 气液接触法氚提取与回收系统流程示意图.....115
图3-11 单级TCAP子单元流程图.....119
图3-12 多级TCAP子单元流程图.....119
图3-13 氚的安全防护平台功能框图.....121
图3-14 涉氚材料测试平台总体设计方案.....122
图3-15 涉氚材料测试平台总体设计方案.....123
图3-16 介质除氚实验平台总体设计方案.....127
图3-17 介质除氚实验平台各部分逻辑关系.....127
图3-18 空地一体智能监测模块实验平台建设.....143
图3-19 涉氚部件自主输运实验平台建设.....146
图3-20 无氚实验区.....150
图3-21 涉氚测试区.....150
图3-22 自动维护总控模块系统架构图.....153
图3-23 氚辐射安全效应实验平台.....160
图3-24 超宽量程气态氚连续测量系统.....170
图3-25 包层材料批量化制备平台组成图.....176
图3-26 包层关键材料研发平台系统构成图.....176
图3-27 关键材料分析测试平台组成图.....218
图3-28 平台系统构成图.....220
图3-29 平台系统构成图.....235
图3-30 氦冷却回路平台系统构成图.....237
图3-31 锂铅冷却剂回路工艺设计.....243
图3-32 液态包层多物理场耦合实验平台工艺流程.....245
图3-33 破口实验回路流程图.....249
图3-34 包层可靠性测试平台系统流程.....250
图3-35 电缆隧道设计方案.....252
图3-36 涉放水冷系统工作原理.....254

图3-37 常规水冷系统初步工艺流程简图.....257
图3-38 系统组成结构示意图.....260
图3-39 氚楼气(液)态流出物排放及监测点位示意图.....270
图4-1 聚变产业实验基地衔接示意图.....289
图4-2 项目总平面布置图.....290
图4-3 氚燃料实验楼地下一层辐射防护分区图.....293
图4-4 氚燃料实验楼地上一层辐射防护分区图.....294
图4-5 氚燃料实验楼地上二层辐射防护分区图.....294
图4-6 项目纵深防御原则示意图.....297
图4-7 系统整体架构.....303
图4-8 工艺辐射安全联锁工艺流程.....304
图4-9 工艺辐射安全联锁控制逻辑.....305
图4-10 氚循环和辐射安全实验系统构成框图.....306
图4-11 联锁保护控制系统结构.....307
图4-12 氚燃料实验楼地下一层包容分区图.....313
图4-13 氚燃料实验楼地上一层包容分区图.....313
图4-14 氚燃料实验楼地上二层包容分区图.....314
图4-15 房间空气除氚单元工艺流程图.....318
图4-16 排放气除氚单元功能示意图.....320
图4-17 排放气除氚单元工艺流程简图.....321
图 4-18 平台项目各类氚水的处理逻辑图.....325
图4-19 水精馏模块工艺流程示意图.....327
图4-20 水精馏子单元操作流程.....335
图4-21 氚燃料实验楼地下一层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图.....340
图4-22 氚燃料实验楼地上一层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图.....341
图4-23 氚燃料实验楼地上二层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图.....341
图4-24 氚燃料实验楼地下一层ADS排气、ADS回气管路走向图.....342
图4-25 氚燃料实验楼地上一层ADS排气、ADS回气管路走向图.....342

图4-26 氚燃料实验楼地上二层ADS排气、ADS回气管路走向图.....343
图 4-27 放射性固体废物转运过程示意图.....346
图5-1 辐射环境影响分析技术路线图.....348
图5-2 常用的三类大气扩散评价方法.....349
图5-3 氚工厂厂址周围5公里主要人群密集区分布图.....355
图5-4 氚燃料实验楼场址的2023年平均风向风速玫瑰图和四季风向风速玫瑰图.....356
图5-5 实验验证平台拟建场址周围160 km内的地形分布.....359
图5-6 高斯烟羽模型计算烟囱正常运行工况排放在四个不同风向下氚浓度变化.....360
图5-7 网格划分和网格无关性验证.....361
图5-8 氚工厂周围主要建筑物分布：①CRAFT园区（南偏东30度600米）；②合肥综合性国家科学中心能源研究院（南偏东15度1400米）；③科学岛（南偏东15度3-5公里）362
图5-9 不同风向下氚浓度变化曲线.....363
图5-10 相同NNW风向不同风速时氚浓度变化曲线.....364
图5-11 不同风向垂直截面氚浓度分布云图.....365
图5-12 不同风向地表1.5m处水平截面氚浓度分布云图.....366
图5-13 相同NNW风向不同风速下垂直截面氚浓度分布云图.....367
图5-14 相同NNW风向不同风速下地表1.5m处水平截面氚浓度分布云图.....367
图5-15 氚工厂地面气象站和高空气象站分布.....368
图5-16 2023年不同季节氚工厂正常运行排放的氚平均浓度扩散分布.....369
图5-17 NNW下风向峰值浓度处近地表空气中氚浓度变化曲线.....370
图5-18 降水蒸发气象数据.....370
图5-19 不同深度土壤水中氚浓度动态变化.....371
图5-20 不同时间土壤剖面中氚浓度分布.....372
图5-21 各个关键人群所在地降水前后浓度廓线.....373
图5-22 NNW下风向董铺水库水体表面上方空气氚浓度变化曲线.....374
图5-23 不同流量下HTO在董铺水库中随时间的累积量.....375
图5-24 NNW下风向峰值位置处（能源研究院园区）全年个人暴露剂量.....376
图5-25 事故工况8 (HVAC)后4000秒内NNW下风向氚扩散垂直截面云图.....386

图5-26 事故工况8 (HVAC)后4000秒内NNW下风向地表1.5m高度处氚扩散云图 387
图5-27 事故工况9 (VDS)后4000秒内NNW下风向氚扩散垂直截面云图 388
图5-28 事故工况9 (VDS)后4000秒内NNW下风向地表1.5m高度处氚扩散云图 389
图5-29 NNW下风向监测点位置 390
图5-30 HVAC事故后5000秒内NNW下风向距离烟囱不同位置氚浓度及个人暴露剂量391
图5-31 VDS事故后5000秒内NNW下风向距离烟囱不同位置氚浓度及个人暴露剂量 . 392
图5-32 谭岗路及配套市政排水井 405
图 5-33 建设项目噪声预测等值线 416
图 5-34 安徽生态功能区划图 428
图 6-1 竣工环保验收工作流程 438

第一章 概 述

1.1 项目名称、地点

项目名称：聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目

建设性质：新建

建设地点：安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角

建设单位：中国科学院合肥物质科学研究院

建设规模：本次拟在合肥庐阳区三十岗乡实施聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目建设，在新建氚燃料实验楼与包层研发楼内开展聚变堆材料与氚燃料两大方向的关键技术研发、实验验证及中间规模试验活动。

投资规模：建设总投资为376423万元，其中科研设备购置费363583.64 万元，工程建设其他费2260.78万元，预备费为10578.58万元，全部由超长期特别国债资金支持。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位概况

本项目实验验证平台由中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所牵头，参建单位包括中国工程物理研究院等国内优势单位。

中国科学院合肥物质科学研究院（以下简称“合肥研究院”），是中国科学院所属大型的综合性科研机构之一，是合肥综合性国家科学中心的核心建设单位之一，同时也是国家创新人才培养示范基地、国家示范型国际科技合作基地、国家双创示范基地等。

合肥研究院位于合肥市蜀山区科学岛，面积 2.65 平方公里。由安光所、等离子体所、固体所、智能所、强磁场中心、核能安全所、健康所 7 个研究单元组成。与地方政府共建了 6 个成果转化平台。现有职工约 2700 名，领军人才如两院院士、海内外高层次人才、国家杰出青年基金获得者、国家重点研发计划首席科学家、关键技术人才等 300 余人。设有 5 个博士后流动站、18 个博士点和 20 个硕士点，在学研究生约 2500 名。拥有 30 多个国家或省部级重点实验室和研究中心，以及 10 多个大型实验平台。合肥研究院的科研方向包括等离子体物理、磁约束核聚变工程、大气环境光学遥

感、激光与光电子科学技术、强磁场科学与技术、环境科学与工程、先进核能、生物物理、转化医学、先进诊疗技术、材料科学与工程、人工智能与机器人、智慧农业技术等，并取得了诸多重大科研成果。作为科研实力雄厚的大型综合性科研基地，合肥研究院是国家创新人才培养示范基地、国家示范型国际科技合作基地、国家双创示范基地等。已经建成并运行了两个国家大科学装置，分别为：全超导托卡马克核聚变实验装置、稳态强磁场实验装置，正在建设第三个大科学装置——聚变堆主机关键系统综合研究设施。此外，大气环境立体探测设施、强光磁集成实验设施正在开展预研工作。

中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所（以下简称“等离子体所”）成立于 1978 年 9 月，其前身为“合肥受控热核反应研究实验站”。主要从事高温等离子体物理、磁约束核聚变工程技术及相关高技术研究和开发，以探索、开发、解决人类无限而清洁的新能源为最终目的。

等离子体所是中国热核聚变研究的重要基地，先后建成常规磁体托卡马克 HT-6B 、HT-6M，我国第一个圆截面超导托卡马克核聚变实验装置“合肥超环”（HT-7），世界上第一个非圆截面全超导托卡马克核聚变实验装置“东方超环”（EAST），并在物理实验中获得了一系列国际先进或独具特色的成果，荣获 2 项国家科学技术进步奖及多个国家重要奖项。此外，全面参与合肥综合性国家科学中心建设，正在建设“十三五”国家重大科技基础设施聚变堆主机关键系统综合研究设施，完成中国聚变工程堆 CFETR 设计和预研。

等离子体所现有 14 个研究室、2 个中心、1 个专项办公室、1 个综合管理部门和多个高技术公司。在职职工 700 余人，其中专业技术人员逾 80%。先后有 6 位科学家入选中国科学院或中国工程院院士，多人入选国家杰出青年基金、“万人计划”领军人才和拔尖人才等人才专项或担任国家重点研发计划项目首席科学家。

1.2.2 项目背景、意义

发展清洁能源是人类必经之路。核聚变能具有资源丰富、无碳排放和安全等突出优点，最有希望彻底解决人类能源问题，是构建清洁低碳、安全高效的能源体系的重要途径之一，可为碳中和的实现做出重大贡献。

经过近几十年的发展，我国磁约束聚变研究实现了从跟跑、并跑到部分领跑的跨越，磁约束核聚变研究总体上已进入国际第一方阵，在长脉冲运行物理、超导磁体工程技术等方面已处于国际领先，并取得了一系列原创性成果，为我国未来独立建设、运行聚变堆奠定了坚实的基础。

氚作为聚变的燃料，在聚变堆中的处理和使用量以公斤计，然而我国现有氚处理技术能力尚无法满足相关要求。聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目集成的氚燃料循环与辐射安全实验系统面向聚变工程堆需求的氚燃料循环和安全防护技术研发、测试、验证与演示，确保燃料利用和安全性；聚变堆包层关键技术研发和综合验证系统则开展先进包层制造及综合性能测试，试制聚变能综合取能与转化高效发电示范样机，解决聚变多种热源波动下的高效取能问题。可见，本平台的顺利实施和良好实践，将使我国在国际上首先实现获得掌握大规模连续运行以及高回收效率的燃料氚循环技术，为中国在国际上率先实现聚变能的实际利用做出重要贡献。

本平台项目的科学目标是：面向聚变示范堆需求，研究规模化、连续运行的氚循环相关科学技术问题，完善核安全标准体系，为未来聚变堆设计与建造提供规范依据。突破产氚包层核心材料的国产化、批量化制备技术，国际上首次实现聚变堆规模全尺寸产氚包层的工程制造，验证其在聚变堆服役环境下的综合性能与可靠性。

本平台项目的工程目标是：建成氚燃料循环和辐射安全实验系统，实现燃料循环、提取和回收处理效率满足聚变功率500兆瓦聚变堆安全运维要求，实现涉氚场所测量、维护和除污远程控制和操作。建成聚变堆包层关键技术研发和综合验证系统，实现包层结构、功能及屏蔽材料批量制备，达到中试规模；实现聚变堆包层运行参数的综合集成测试和验证。

2025年6月25日，《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目可行性研究报告》获得国家发展和改革委员会批复，文号为发改高技〔2025〕811号，详见附件2。

为顺利推进、实施平台项目，为其提供必要的基础设施条件保障，项目建设单位适时启动了“聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目配套工程”（以下简称“配套工程”）。2026年3月20日，中国科学院对配套工程可行性研究报告予以批复，文号为科发建复字〔2026〕21号，详见附件3。结合《建设项目环境影响评价分类管理

名录（2021年版)》及实施后的使用功能，该配套工程属于“四十五、研究和试验发展”之“98 专业实验室、研发（试验)基地”，由于配套工程只涉及实验研发楼土建及基础设施的建设，项目施工及运营期间“不产生实验废气、废水、危险废物”，因此，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021年版)》，该配套工程不需要编制环境影响评价文件。

鉴于平台项目与配套工程密切相关，特别是氚实验楼各楼层的平面布局、人流物流走向、通排风设置等直接关系着平台项目的辐射安全与环境保护可行性，因此，本次环境影响评价工作的评价范围将囊括配套工程相关内容，特别在施工期环境影响方面予以重点体现。

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021版）》以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》有关规定，平台项目参照甲级非密封放射性物质工作场所环境影响评价文件类别确定为编制环境影响报告书。

中国科学院合肥物质科学研究院于2025年10月13日委托我公司（中核第七研究设计院有限公司)对其聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目进行辐射环境影响评价（见附件1）。接受委托后，评价单位组织技术人员对本项目拟建场址以及周边环境进行了实地踏勘，建设单位委托有检验检测资质的机构进行了辐射环境质量现状调查和监测，在此基础上编制完成了《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目环境影响报告书（送审版）》，现提交建设单位，提请技术审查。

1.2.3 建设规模

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台是集成氚燃料循环、氚增殖技术、包层关键技术研究与验证于一体的综合研究平台，主要包括以下几大部分：

⑴氚循环和辐射安全实验系统，包括内燃料循环、外燃料循环、氚的安全防护、涉氚材料测试、介质除氚、涉氚部件维护及处理、氚辐射安全效应等实验平台；

⑵产氚包层关键技术研发和综合验证系统，包括包层材料批量化制备、包层原型模块先进制造、固态综合性能测试、液态综合性能测试等实验平台；

⑶辅助与智控系统，主要包括为整个平台的运行提供供电、冷却、通排风、公用技术和智能控制等系统。

拟建实验验证平台的总体技术方案和系统之间逻辑关系分别如图1-1和图1-2所示，各系统紧密结合，平台总体高度集成。

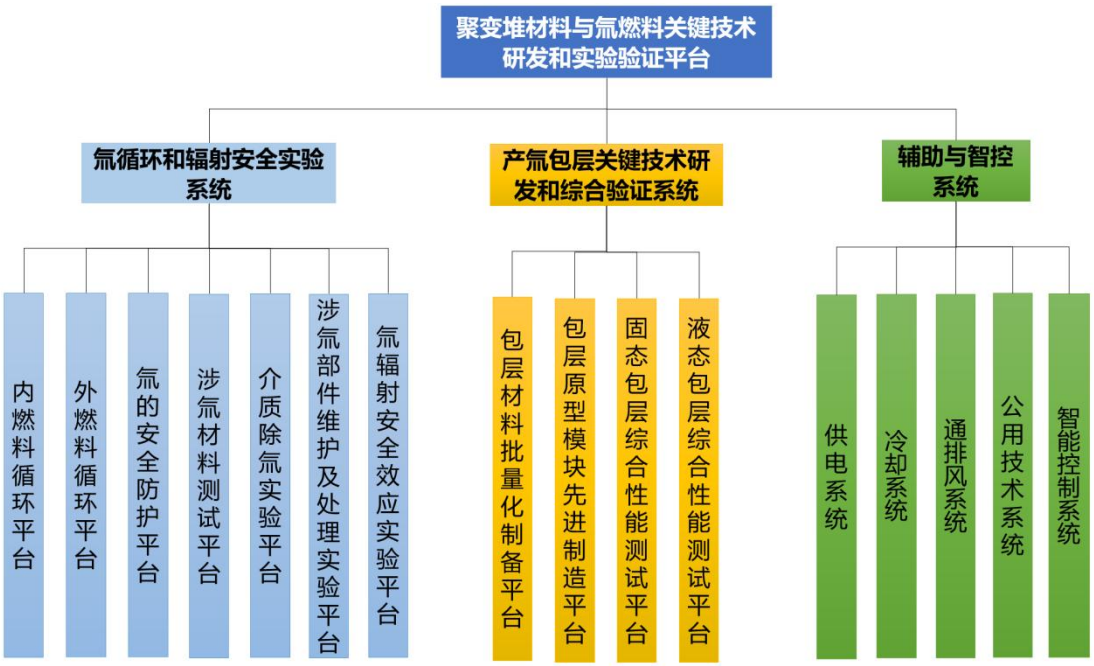


图1-1 平台项目总体技术方案

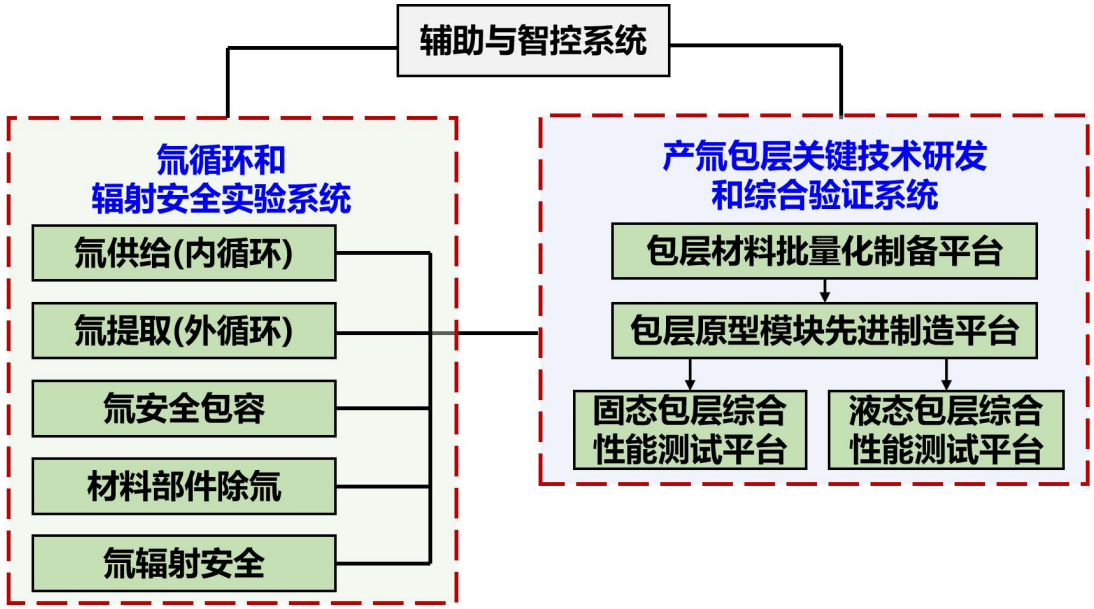


图1-2 平台项目各系统逻辑关系图

本报告书的主要评价内容为甲级非密封放射性物质工作场所，涉及氚循环和辐射安全实验系统、产氚包层关键技术研发和综合验证系统，有关实验验证平台分别位于氚燃料实验楼、包层研究楼，本项目所涉及建筑物主要建筑指标见表 1-1。配套工程主要技术经济指标见表1-2。

表 1-1 本项目涉及建筑主要指标

序号	名称	地上（下）层数	规划高度，m	总面积，m^2	地上建筑面积，m^2	地下建筑面积，m^2
1	氚燃料实验楼	2（1）	38.65	30323	23231	7092
2	包层研究楼	2（1）	34.70	22350	20350	2000
3	门卫室	1	/	200	200	/

表 1-2 配套工程主要技术经济指标

序号	项目		指标	单位	备注
1	规划总用地面积		66643.9	㎡	约100亩
2	总建筑面积		52873	㎡	
	其中	氚燃料实验楼	30323	㎡	地上2层、地下1层；地上每层层高16m，地下9m（含实保网处值班室）
		包层研发楼	22350	㎡	地上2层、地下1层；1层层高17m/13.0m，夹层层高10.6m，2层层高7.1m，地下6.5m
		门卫室	200	㎡	
3	地上总建筑面积		43781	㎡	
	其中	氚燃料实验楼	23231	㎡	
		包层研发楼	20350	㎡	
		门卫室	200	㎡	
4	地下总建筑面积		9092	㎡	
	其中	氚燃料实验楼	7092	㎡	
		包层研发楼	2000	㎡	
5	容积率		0.65		
6	建筑占地面积		26191.12	㎡	
7	建筑密度		39.30%	/	
8	绿地面积		16660.98	㎡	
9	绿地率		25.00%	/	
10	规划高度		38.65/34.70	m	氚燃料实验楼38.65米；包层研发楼34.70米
11	消防高度		32.65/23.90（多层部分）/28.70（单层部分）	m	氚燃料实验楼32.65米；包层研发楼23.90米（多层部分）/28.70米（单层部分）
12	机动车位		89	辆	其中充电车位33个，占比超过35%
13	大巴车位		3	辆	本项目为大科学装置，使用人数较少
14	非机动车位		100	辆	

本项目核技术利用所使用非密封放射性物质及其修正因子如下表所示：

表1-3 本项目非密封放射性物质修正因子

序号	核素名称	毒性组别	毒性组别修正因子	操作方式修正因子
1	H-3	低毒	0.01	0.1

表 1-4 本项目非密封放射性物质主要参数及其工作场所分级一览表

核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量（Bq）	日等效最大操作量（Bq）	年最大用量（Bq）*	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
[redacted]									
[redacted]									
[redacted]									

大于4E+9Bq，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》中非密封源工作场所的分级原则，氚燃料实验楼属于甲级非密封源工作场所。

1.2.4 项目拟建场址及周围环境概况

本项目拟建场址位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，其地理位置如图1-3所示。拟建场址四至坐标如下表所示：

表 1-5 本项目拟建场址四至坐标

序号	经度	纬度	备注
1	31度56分23.259806N	117度08分23.593275E	西北角
2	31度56分23.767820N	117度08分33.873796E	东北角
3	31度56分16.002831N	117度08分38.887333E	东南角
4	31度56分15.559648N	117度08分28.797506E	西南角

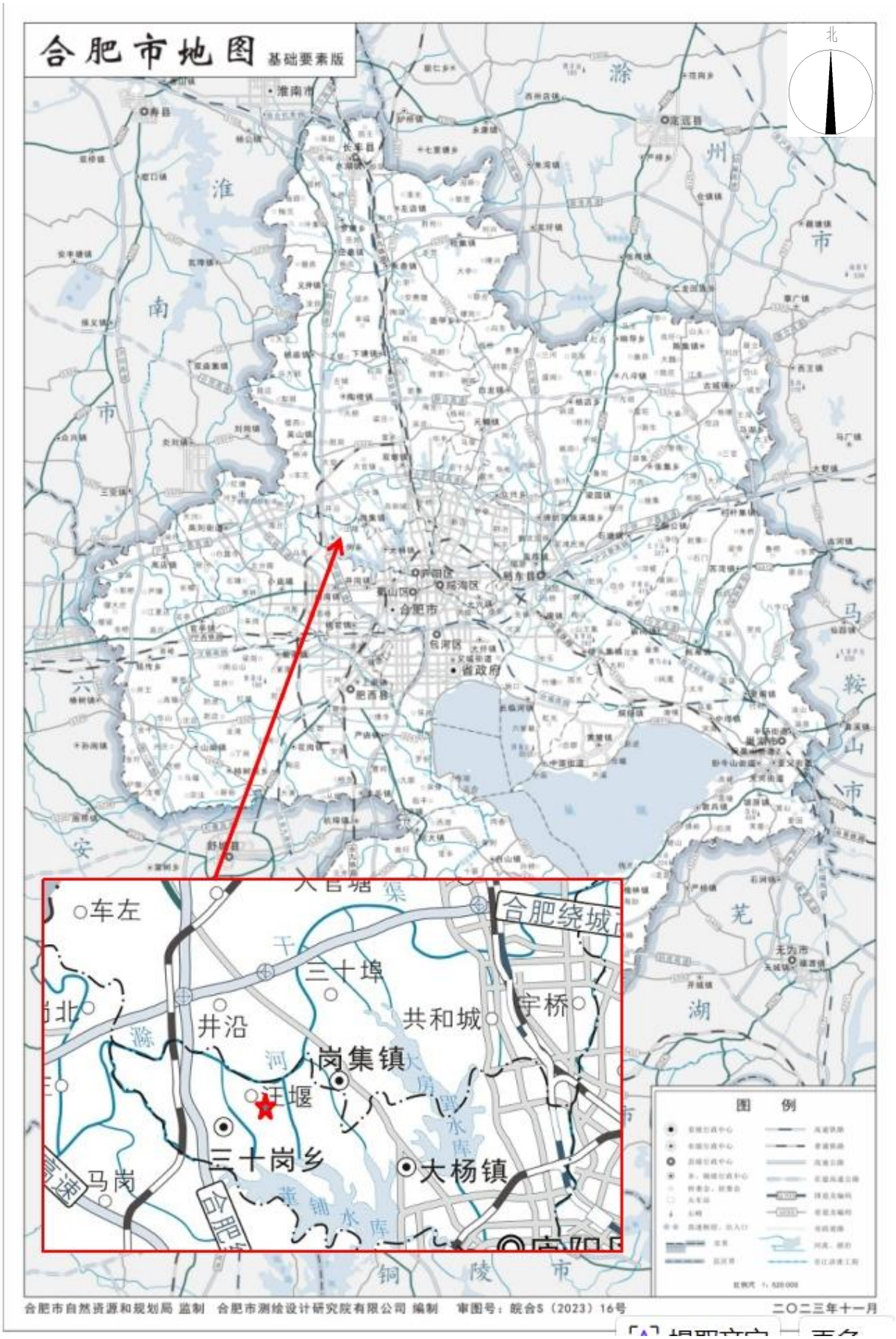

合肥市地图 基础要素版
北
淮南市
寿县
长丰县
定远县
滁州市
淮南市
六安市
马鞍山市
芜湖市
铜陵市
安庆市
庐阳区
瑶海区
蜀山区
合肥市
包河区
省政府
肥西县
肥东县
舒城县
巢湖市
无为市
车左
三十埠
井沿
共和城
宇桥
岗集镇
汪堰
三十岗乡
大杨镇
马岗
合肥绕城
图 例
合肥市自然资源和规划局 监制 合肥市测绘设计研究院有限公司 编制 审图号：皖合S（2023）16号
二〇二三年十一月

图 1-3 项目地理位置

本项目现状为空地，包括拆迁区、荒地、水塘，项目范围内未经人工整平，场地起伏较大，场地内无污染源及建筑物。拟建场址东侧、北侧为空地，西侧为谭岗路，南侧为聚变堆主机关键系统综合研究设施园区（CRAFT园区南区）。

项目拟建场址现状见图1-4；

项目总平面布置见图 1-5 ；

项目鸟瞰图见图1-6；

周边环境图见图 1-7。



图 1-4 项目拟建场址现状图

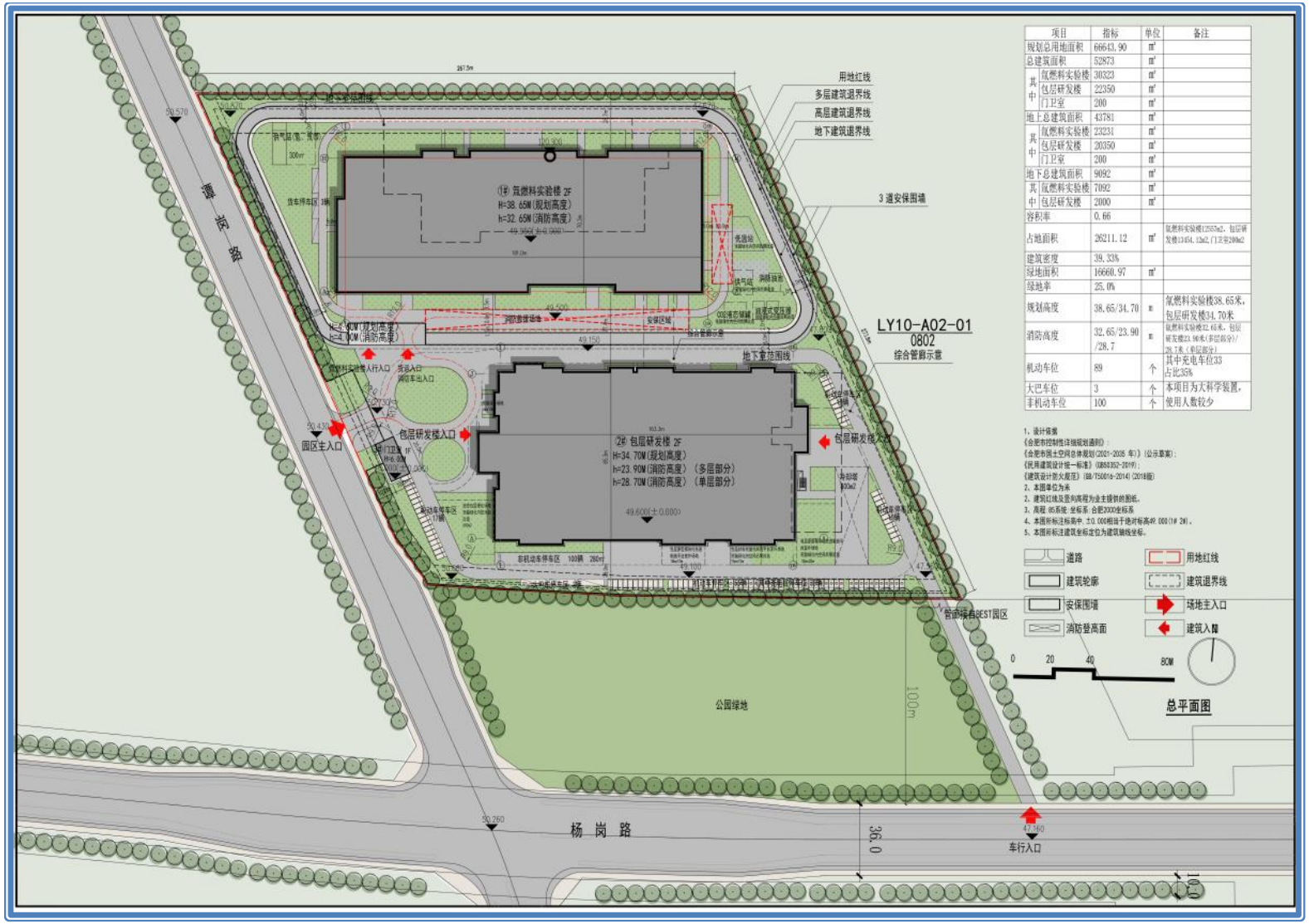


图 1-5 项目总平面布置图



图 1-6 项目鸟瞰图(西北→东南)



图 1-7A 项目周边环境示意图



图 1-7B 项目周边环境示意图



图 1-7C 项目周边环境示意图


合肥市
庐阳区杨岗路与谭岗路交口东北角
LY10-A02地块控制性详细规划
规划图则
地块位置示意图
指北针
比例尺
大气路
科学院北路
谭岗路
杨岗路
LY10-A02-01
0802
LY10-A02-02
1401
LY10-A02-03
16
X=3535471.046
Y=39513820.314
X=3535427.724
Y=39513063.138
X=3534890.703
Y=39513961.956
X=3534846.936
Y=39513377.388
24.0m
18.0m
30.0m
20.0m
60.0m
80.0m
38.0m
图例
地块编号
道路
机动车禁开口路段
主要出入口方位
道路红线宽度
控制点坐标
地块界线
街边石围
科研用地
公园绿地
留白用地
城镇开发边界
饮用水源二级保护线
公厕
环卫驿站
规划道路控制预条件
道路名称 道路等级 红线宽度 绿线宽度
谭岗路 次干道 30米 ——
杨岗路 次干道 36米 ——
大气路 支路 24米 ——
科学院北路 支路 18米 20米
地块占地面积 38.53公顷，合578亩
地块指标控制一览表
地块编号 用地性质 占地面积 容积率(≤) 建筑密度(%)(≤) 建筑高度(米)(≤) 绿地率(%)(≥) 备注
LY10-A02-01 科研用地（0802） 28.07公顷（421.07亩） 1.2 45 —— 35
LY10-A02-02 公园绿地（1401） 3.91公顷（58.62亩） —— —— —— 65
LY10-A02-03 留白用地（16） 1.24公顷（18.53亩） —— —— —— ——
配套设施控制
名称 所在地块 占地面积（平方米） 建筑面积（平方米） 备注
公厕 LY10-A02-02 —— ≥60
环卫驿站 LY10-A02-02 —— —— 结合公园布置
通则管理
建筑退让、日照间距、停车位配置、消防间距等指标按照《合肥市控制性详细规划通则》及《合肥市规划审查暂行规定》（合规〔2018〕70号）等相关技术管理文件执行。
特别控制
1、LY10-A02地块除东北角0.86公顷用地位于饮用水源地二级保护区外，其余用地均位于饮用水源地准保护区，相关控制要求应按《合肥市董铺、大将军水库饮用水源保护区综合保护规划》执行。
2、控规中最终道路线型（含公交港湾、交口展宽段等）以施工图为准，各地块出入口具体位置和宽度可结合项目方案进一步明确。
3、建筑风格、环境营造与周边环境要求相协调。建筑风格体现科技感、现代感，结合大科学装置体现科学地标形象；
4、LY10-A02-01地块在保证绿地率指标不低于20%的基础之上，结合具体大科学装置项目两侧绿地率可适当降低且不得低于20%；
5、LY10-A02-01地块机动车与非机动车停车位结合大装置实际需求配置；
6、LY10-A02-02地块预留7m弹性道路，具体位置可结合实施方案确定；
7、LY10-A02-03地块在保证用地规模的基础上，用地形态和位置可依据具体建设项目适行微调。
8、结合公园设计规范合理配置公厕、环卫驿站等相关兼容配套设施；
9、结合公园绿地建设体育场地设施，用地比例原则上不低于公园总面积的10%；
10、落实《合肥市海绵城市专项规划（2016-2030年）》相关要求。LY10-A02-01地块年径流控制率达到75%，LY10-A02-02地块年径流控制率达到81%；
11、该控制性详细规划实施需执行有关文教三体、生态环境、社区安全、绿色建筑、建筑产业化、海绵城市等相关文件要求。
委托单位 合肥市自然资源和规划局 合肥滨湖科学城管理委员会 日期
编制单位 合肥市规划设计研究院 2025.07

图 1-8 项目用地规划图

1.2.5 符合性分析

1.2.5.1 产业政策符合性分析

本项目属于《产业结构调整指导目录》（2024 年本）中“鼓励类”中第六项第 4 条“核能——核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”，以及第三十一项第 10 条“科技服务业——国家级工程（技术）研究中心、国家产业创新中心、国家农业高新技术产业示范区、国家农业科技园区、国家认定的企业技术中心、国家实验室、全国重点实验室、国家重大科技基础设施、科技企业孵化器、众创空间、绿色技术创新基地平台、新产品开发设计中心、科教基础设施、产业集群综合公共服务平台、中试基地、实验基地、国家技术创新中心建设 ”的范畴。因此，本项目建设符合国家相关产业政策。

另外，根据安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于《安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于印发安徽省“两高”项目管理目录（试行）的通知》（皖节能〔2022〕2 号）可知，本项目不属于“两高”项目。

综上所述，项目符合国家产业政策和地方产业政策要求。

1.2.5.2 选址符合性分析

⑴用地规划符合性分析

根据用地规划图（见图 1-7），项目所在地为科研用地，符合土地利用总体规划要求。

项目建设用地规划许可证见附件6，发证机关为合肥市自然资源和规划局，文号为：地字第340103202600001号。

⑵环境相容性分析、四至关系相容性分析

经现场踏勘，本项目现状为空地，包括拆迁区、荒地、水塘，项目范围内未经人工整平，场地起伏较大，场地内无污染源及建筑物。拟建场址东侧、北侧为空地，西侧为谭岗路，南侧为聚变堆主机关键系统综合研究设施园区（CRAFT园区南区）。

⑶本项目对董铺水库、大房郢水库的影响分析

根据合肥市董铺水库、大房郢水库水源保护区划分方案，项目位于董铺水库饮用水源准保护区内，项目东侧边界距离二级水源保护线约 259 米，见图 1-9。



图 1-9 董铺水库、大房郢水库水源保护区与本项目位置示意图

按照《合肥市饮用水水源保护条例》第十六条规定：“禁止在饮用水水源准保护区新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量”。 本项目生活污水和循环冷却废水（主要包括常规水冷系统在运行和调试过程中排出的废水）接管入市政污水管网；含氚废水经检测达标后排放至市政污水管网。望塘污水处理厂服务范围主要包括合肥市黄山路以北、环城西路及亳州路以西的区域以及长丰县岗集镇镇区及工业园区、三十岗、大杨店、蜀山新产业园、城市森林公园、中国科学院合肥研究院的建设用地，规划服务面积66km^2，属于合肥市污水规划系统中的南淝河系统。项目所在区域属于望塘污水处理厂的收水范围，区域污水均纳入望塘污水处理厂。因此，本项目不会对董铺水库、大房郢水库产生影响。

1.2.5.3 “三区三线”符合性分析

“三区三线”是根据城镇空间、农业空间、生态空间三种类型的空间，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。其中“三区”突出主导功能划分，“三线”侧重边界的刚性管控。它是国土空间用途管制的重要内容，也是国土空间用途管制的核心框架。

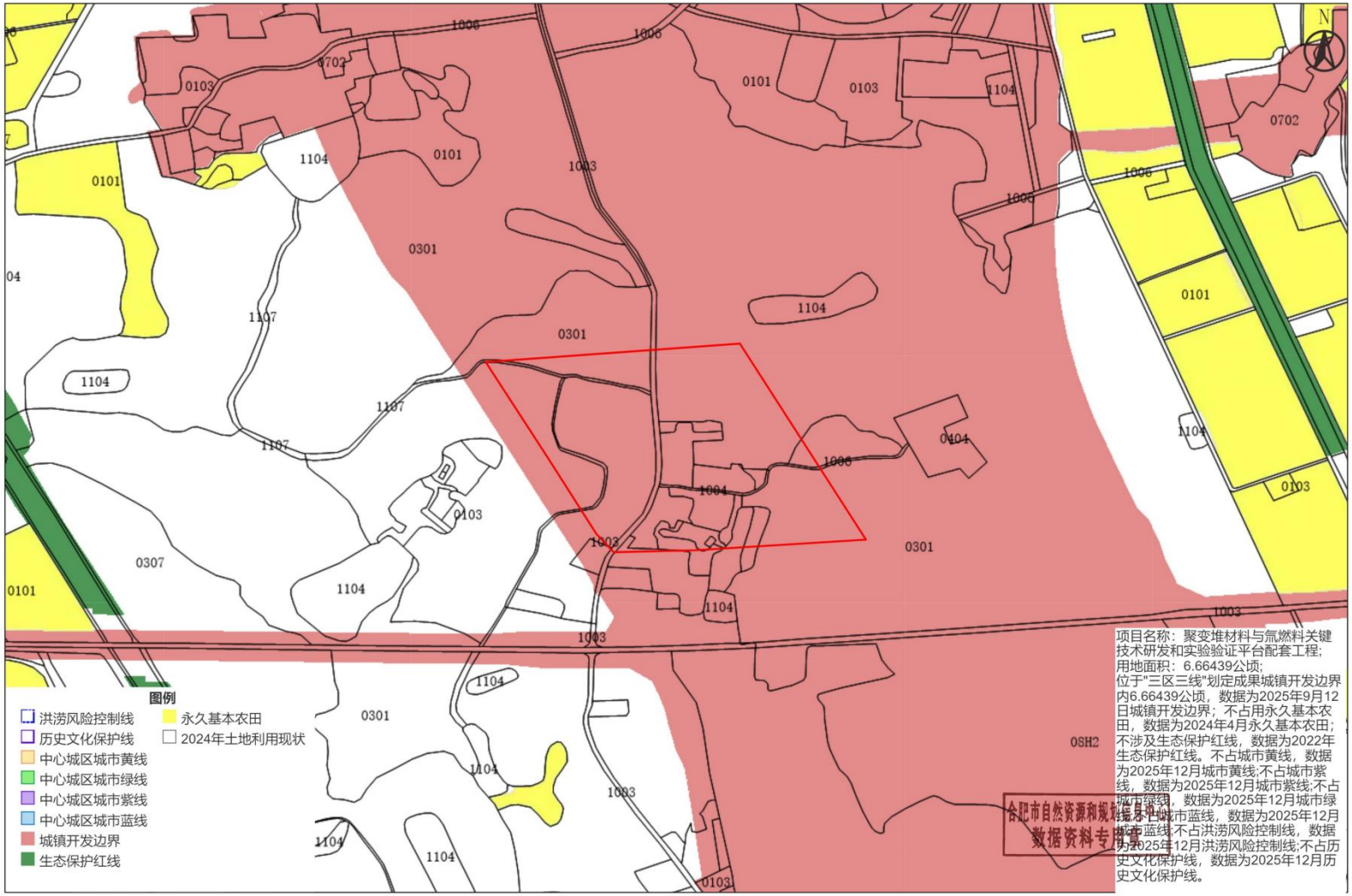
“三区”内部统筹要素分类，是功能分区和用途分类的基础；“三线”是“三区”内部最核心的刚性要求。空间关系上，“三区”各自包含“三线”。生态空间，包括生态保护红线范围和一般生态空间：农业空间，包括永久基本农田和一般农业空间：城镇空间，包括城镇开发边界内和边界外部分城镇空间。

根据合肥市“三区三线”的划定，本项目在城镇开发边界内，不涉及永久基本农田、生态保护红线。项目拟建场址与区域“三区三线”套合情况如图1-10所示。

2026年1月23日，本项目获取了合肥市自然资源和规划局下发的项目建设用地规划许可证，说明“本建设用地符合国土空间规划和用途管制要求”，符合“三区三线”规划要求。

编号：ct202512310123

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目与"国土空间总体规划控制线"套合图



编制时间:2025-12-31　　1:4000

图 1-10 本项目拟建场址与区域“三区三线”套合图

1.2.5.4 “三线一单”符合性分析

根据原环境保护部“环评〔2016〕150 号”文《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》，建设项目选址选线、规模、性质和工艺路线等应与“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”（以下简称“三线一单”）进行对照，更好地发挥环评制度从源头防范环境污染和生态破坏的作用，加快推进改善环境质量。本项目与“三线一单”的符合性分析见表 1-6。

表 1-6 “三线一单”符合性分析

分析项目		分析过程	符合性
生态红线		根据《安徽省生态保护红线》中合肥市生态保护红线分布区域可知，项目不位于自然保护区、森林公园、风景名胜区、世界文化和自然遗产、地质公园等保护区内，与生态红线相符。	符合
环境质量底线		根据《2023年合肥市生态环境状况公报》和《2024年合肥市生态环境状况公报》等相关数据可知，项目所在地环境空气质量为达标区；合肥市饮用水源地董铺水库和大房郢水库，2023年、2024年所监测的各项指标均值符合GB3838－2002《地表水环境质量标准》III类水质标准，达标率为100%。南淝河总体水质2023年由轻度污染好转优良，2024年保持优良，主要污染指标中，南淝河的氨氮和总磷浓度均呈下降趋势。	符合
资源利用上限		本项目能源、水、土地等资源消耗符合资源利用上线的要求	符合
优先保护单元		该项目所在区域不在合肥市 51 个优先保护单元内，无建设条件限制。	符合
准入清单	《产业结构调整指导目录》（2024 年本）	该项目属于国家《产业结构调整指导目录（2024 年本）》中鼓励类项目	符合
	《限制用地项目目录（2012年本）》《禁止用地目录（2012年本）》	本项目不在国家《限制用地项目目录（2012 年本）》、《禁止用地目录（2012 年本）》中	符合
	《巢湖流域禁止和限制的产业产品目录》	本项目不在《巢湖流域禁止和限制的产业产品目录》中	符合

由表 1-4 可知，本项目的建设符合“三线一单”相关要求。

对照安徽省生态环境厅发布的安徽省“三线一单”公众服务平台（http//39.145.8.156：1509/ah/public/#/home），本项目涉及1个分区管控单元：沿江绿色生态廊道区重点管控单元（环境管控单元编号：ZH34010320169）。



图 1-11 “三线一单”环境管控单元与本项目位置示意图

项目与对应分区管控单元（重点管控单元）符合性分析如表1-7所示。

表 1-7 本项目与分区管控单元（重点管控单元）要求符合性分析

管控类别	管控要求		本项目情况	相符性
空间布局约束	禁止开发建设活动的要求	1.在城市城区及其近郊禁止新建、扩建钢铁、有色、石化、水泥、化工等重污染企业。	本项目不属于钢铁、有色、石化、水泥、化工等重污染项目	符合
		2.禁止新建燃料类煤气发生炉（园区现有企业统一建设的清洁煤制气中心除外）	不涉及	符合
		3.严禁新增钢铁、焦化、电解铝、铸造、水泥和平板玻璃等产能；严格执行钢铁、水泥、平板玻璃等行业产能置换实施办法。	本项目不属于钢铁、焦化、电解铝、铸造、水泥和平板玻璃等行业	符合
		4.严格执行国家关于“两高”产业准入目录和产能总量控制政策措施。	本项目不属于“两高”项目	符合
		5.严禁新增钢铁、焦化、电解铝、铸造、水泥和平板玻璃等产能；	不涉及	符合
		6.新、改、扩建涉及大宗物料运输的建设项目，原则上不得采用公路运输。	不涉及	符合
		7.非电行业新建项目，禁止配套建设自备纯凝、抽凝燃煤电站。	不涉及	符合
		8.在城市建成区及居民区、医院、学校等环境敏感区域，严禁现场露天灰土拌合。	不涉及	符合
		9.严格控制新增“两高”项目审批，认真分析评估拟建项目必要性、可行性和对产业高质量发展、能耗双控、碳排放和环境质量的影响，严格审查项目是否符合产业政策、产业规划、“三线一单”、规划环评要求，是否依法依规落实产能置换、能耗置换、煤炭消费减量替代、污染物排放区域削减等要求。对已建成投产的存量“两高”项目，有节能减排潜力的加快改造升级，属于落后产能的加快淘汰。	本项目不属于“两高”项目	符合
		10.禁止建设生产和使用高挥发性有机物含量涂料、油墨、胶粘剂、清洗剂等项目。	不涉及	符合
		11.禁止新建不符合国家规定的燃煤发电机组、燃油发电机组和燃煤热电机组。	不涉及	符合
		12.禁止新建、扩建分散燃煤供热锅炉。	不涉及	符合
		13.在城市规划区内禁止新建、扩建大气污染严重的建设项目。	本项目不属于大气污染严重的建设项目	符合
		14.禁止高灰分、高硫分煤炭进入市场。新建煤矿应当同步建设煤炭洗选设施，已建成的煤矿所采煤炭属于高灰分、高硫分的，应当在国家和省规定的期限内建成配套的煤炭洗选设施，使煤炭中的灰分、硫分达到规定的标准。	不涉及	符合
		15.禁止在人口集中地区、机场周围、交通干线附近以及当地人民政府划定的区域露天焚烧秸秆、落叶、垃圾等产生烟尘污染的物质。	不涉及	符合
		16.在燃气管网和集中供热管网覆盖的区域，不得新建、扩建、改建燃烧煤炭、重油、渣	本项目由所在区域集中供	符合

管控类别	管控要求		本项目情况	相符性
		油的供热设施；原有分散的中小型燃煤供热锅炉应当限期拆除。	热管网供热	
		17.禁止在居民住宅楼、未配套设立专用烟道的商住综合楼、商住综合楼内与居住层相邻的商业楼层内新建、改建、扩建产生油烟、异味、废气的饮食服务项目。	不涉及	符合
		18.任何单位和个人不得在政府划定的禁止露天烧烤区域内露天烧烤食品或者为露天烧烤食品提供场地。	不涉及	符合
		19.在机关、学校、医院、居民住宅区等人口集中地区和其他依法需要特殊保护的区域内，禁止从事下列生产活动：（1）橡胶制品生产、经营性喷漆、制骨胶、制骨粉、屠宰、畜禽养殖、生物发酵等产生恶臭、有毒有害气体的生产经营活动；（2）露天焚烧油毡、沥青、橡胶、塑料、皮革、垃圾或者其他可能产生恶臭、有毒有害气体的活动。	不涉及	符合
		20.严禁钢铁、水泥、电解铝、平板玻璃等行业新增产能，对确有必要新建的必须实施等量或减量置换。	不涉及	符合
		21.禁止淘汰落后类的产业进入开发区。	本项目属于鼓励类	符合
		22.从事餐饮服务业的经营活动，不得有下列行为：（一）未经处理直接排放、倾倒废弃油脂和含油废物；（二）在居民住宅楼、未配套设立专用烟道的商住综合楼以及商住综合楼内与居住层相邻的商业楼层内新建、改建、扩建产生油烟、异味、废气的餐饮服务项目；（三）在当地人民政府禁止的区域内露天烧烤食品或者为露天烧烤食品提供场所。限制开发建设活动的要求。	不涉及	符合
空间布局约束	限制开发活动建设的要求	23.加大钢铁、铸造、炼焦、建材、电解铝等产能压减力度。	不涉及	符合
		24.严格资源节约和环保准入门槛，转入项目必须符合国家产业政策、资源节约和污染物排放强度要求，避免产业转移中的资源浪费和污染扩散。	本项目属于鼓励类	符合
		25.对污染治理不规范的露天矿山，依法责令停产整治，整治完成并经相关部门组织验收合格后方可恢复生产。	不涉及	符合
		26.加大落后产能淘汰和过剩产能压减力度。严防“地条钢”死灰复燃。	不涉及	符合
		27.重点区域钢铁、水泥、焦化、石化、化工、有色等行业，二氧化硫、氮氧化物、颗粒物、挥发性有机物（VOCs）排放全面执行大气污染物特别排放限值。	不涉及	符合
		28.加大工业涂装、包装印刷等行业低挥发性有机物含量原辅材料替代力度，严格执行涂料、油墨、胶粘剂、清洗剂挥发性有机物含量限值标准，确保生产、销售、进口、使用符合标准的产品。	不涉及	符合
		29.严格合理控制煤炭消费增长，大气污染防治重点区域内新建、改扩建用煤项目严格实施煤炭消费等量或减量替代。	不涉及	符合

管控类别	管控要求		本项目情况	相符性
		30.推动钢铁行业碳达峰。严格执行产能置换，严禁新增产能，依法依规淘汰落后产能。	不涉及	符合
		31.优化产能规模和布局，引导化工企业向产业园区转移，提高集聚发展水平。 不符合空间布局要求活动的退出要求。	不涉及	符合
空间布局约束	不符合空间布局要求活动的退出要求	32.加快城市建成区、重点流域的重污染企业和危险化学品企业搬迁改造，加快推进危险化学品生产企业搬迁改造工程。	不涉及	符合
		33.对城区内已建重污染企业要结合产业结构调整实施搬迁改造。	不涉及	符合
		34.城市规划区内已建的大气污染严重的建设项目应当搬迁、改造，城市建成区应当在规定的时间内完成重污染企业搬迁、改造或者关闭退出。	不涉及	符合
		35.严格执行环境保护法律法规，对超过大气和水等污染物排放标准排污，以及超过重点污染物总量控制指标排污的企业，责令限制生产、停产整治等；情节严重的，报经有批准权的地方政府批准，责令停业、关闭。依法打击违反固体废物管理法律法规行为。	不涉及	符合
		36.加快区域产业调整。加快城市建成区重污染企业搬迁改造或关闭退出；城市钢铁企业要切实采取彻底关停、转型发展，就地改造、域外搬迁等方式，推动转型升级。加大现有化工园区整治力度。退城企业，逾期不退城的予以停产。	不涉及	符合
		37.对不服从整改的餐饮企业，责令停业整治。依法关闭市、县（区）人民政府禁止区域内的露天餐饮、烧烤摊点，推广无炭烧烤。	不涉及	符合
		38.对违反资源环境法律法规、规划，污染环境、破坏生态、乱采滥挖的露天矿山，依法予以关闭；对污染治理不规范的露天矿山，依法责令停产整治，对拒不停产或擅自恢复生产的依法强制关闭。	不涉及	符合
		39.对热效率低下、敞开未封闭，装备简易落后、自动化程度低，无组织排放突出，以及无治理设施或治理设施工艺落后等严重污染环境的工业炉窑，依法责令停业关闭。	不涉及	符合
		40.对以煤、石油焦、渣油、重油等为燃料的工业炉窑，加快使用清洁低碳能源以及利用工厂余热、电厂热力等进行替代。重点区域禁止掺烧高硫石油焦（硫含量大于3%）。玻璃行业全面禁止掺烧高硫石油焦。	不涉及	符合
		41.重点区域取缔燃煤热风炉，基本淘汰热电联产供热管网覆盖范围内的燃煤加热、烘干炉（窑）。加快推动铸造（10吨/小时及以下）、岩棉等行业冲天炉改为电炉。	不涉及	符合
		42.严格执行水泥熟料、平板玻璃产能置换要求，实施水泥常态化错峰生产，有序退出低效产能。推进燃煤窑炉清洁能源替代，逐步淘汰钢铁企业煤气发生炉。 其他空间布局约束要求。	不涉及	符合
空间布局约束	其他空间布局约束要求	43.强化“散乱污”企业综合整治。全面开展“散乱污”企业及集群综合整治行动。根据产业政策、产业布局规划，以及土地、环保、质量、安全、能耗等要求，制定“散乱污”企业及集	不涉及	符合

管控类别	管控要求		本项目情况	相符性
		群整治标准。按照“先停后治”的原则，实施分类处置。		
		44.企业应当全面推进清洁生产，优先采用能源和原材料利用效率高、污染物排放量少的清洁生产技术、工艺和设备，淘汰严重污染大气环境质量的产品、落后工艺和落后设备，减少大气污染物的产生和排放。 1 严格城市规划蓝线管理，城市规划区范围内应保留一定比例的水域面积，现有水域面积不得减少。新建项目一律不得违规占用水域。 2 落实磷石膏综合利用途径，综合利用不畅的可利用现有磷石膏库堆存，不得新建、扩建磷石膏库（暂存场除外)。 3 坚持以水定城、以水定地、以水定人、以水定产，严格控制缺水地区、水污染严重地区和敏感区域高耗水、高污染行业发展，鼓励推动高耗水企业向水资源条件允许的工业园区集中。 4 引导石化、化工、钢铁、建材、有色金属等重点行业合理布局，提高化工、有色金属、农副食品加工、印染、制革、原料药制造、电镀等行业集聚水平。 5 严格控制缺水地区、水污染严重地区和敏感区域高耗水、高污染行业发展，鼓励推动高耗水企业向水资源条件允许的工业园区集中。 6 新建、扩建磷化工项目应布设在依法合规设立的化工园区或具有化工定位的产业园区内，所在化工园区或产业园区应依法开展规划环境影响评价工作，磷化工建设项目应符合园区规划及规划环评要求。 7 持续开展涉水“散乱污”企业 清理整治，严把能耗、环保等标准，促使一批达不到标准或淘汰类产能的企业，依法依规关停退出。 8 推动污染企业退出。城市建成区内现有钢铁、有色金属、造纸、印染、原料药制造、化工等污染较重的企业应有序搬迁改造或依法关闭。 9 严格水域岸线用途管制，土地开发利用应按照有关法律法规和技术标准要求，留足河道、湖泊的管理和保护范围，非法挤占的应限期退出。 10 国家禁止新建不符合国家产业政策的小型造纸、制革、印染、染料、炼焦、炼硫、炼砷、炼汞、炼油、电镀、农药、石棉、水泥、玻璃、钢铁、火电以及其他严重污染水环境的生产项目。1 查明河道两岸和水体周边所有排污口，对污水直排的排污口实施截污纳管，实现旱季污水不入河。严格实施排污许可和排水许可制度，加强入河排污口监督监测。加强对小餐饮、理发店、洗车店等排污的执法管理，加大对乱排、偷排行为的整治和处罚力度。 2 城市建成区排放污水的工业企业应依法持有排污许可证，并严格按证排污。排入城镇水体的工业污水应符合相关行业标准及地方标准要求，严禁任何企业、单位超标和超总量排污，对超标或超总量的排污单位一律限制生产或停产整顿。 3 科学确定城市河道疏浚范围和清淤深度，妥善处理底泥，严禁清淤底泥沿岸随意堆放或作为水体治理工程回填土，防止二次污染。 4 严肃执法监督，严格执行排污许可、排水许可制度，严禁生活污水和工业废水直排水体。严防道路冲洗污水、洗车冲洗污水、餐饮泔水、施工排水等污水进入雨水口。 5 积极推行低影响开发建设模式，建设滞、渗、蓄、用、排相结合的	不涉及	符合

管控类别	管控要求		本项目情况	相符性
		雨水收集利用设施，加快海绵城市建设。新建城区可渗透地面占总硬化地面面积比例要达到 40%以上。 6 加快对河道两岸违法建设的清理。对河道湖泊绿线范围内的岸线进行排查、清理，重点治理河湖水域岸线乱建、乱占行为。对硬质驳岸的非行洪河道、渠道，有计划实施生态修复与改造。		
空间布局约束	禁止开发建设活动的要求	巢湖流域水环境一、二、三级保护区内禁止下列行为：（1）新建化学制浆造纸企业；（2）禁止新建制革、化工、印染、电镀、酿造、水泥、石棉、玻璃等水污染严重的小型项目；（3）禁止销售、使用含磷洗涤用品；（4）围湖造田；（5）法律、法规禁止的其他行为。巢湖流域水环境一、二级保护区内除需执行三级保护区相关规定外，还需禁止下列行为：（1）新建、扩建制革、化工、印染、电镀、酿造、水泥、石棉、玻璃等水污染严重的项目；（2）新建、扩建除污水集中处理设施排污口以外的排污口。巢湖流域水环境一级保护区除需执行二级、三级保护区相关规定外，还需禁止下列行为：（1）新建、扩建排放水污染物的建设项目；（2）运输国家规定禁止通过内河运输的剧毒化学品以及其他危险化学品；（3）设置剧毒物质、危险化学品的贮存、输送设施；（4）从事围网、网箱养殖；（5）利用机械吸螺、底拖网等进行捕捞作业；（6）设立畜禽养殖场；（7）从事水上餐饮经营；（8）开垦、围垦、填埋等改变湿地用途或者占用湿地；（9）法律法规禁止的其他可能污染水质的活动。 巢湖岸线1公里范围内，严禁新（改、扩）建尾矿库。 限制开发建设活动的要求：严格限制在水环境三级保护区内新建制革、化工、印染、电镀、酿造、水泥、石棉、玻璃等水污染严重的大中型项目；确需新建的，应当事先报经省人民政府生态环境主管部门同意。其中，排放含氮、磷等污染物的项目，按照不低于该项目氮、磷等重点水污染物年排放总量指标，实行减量替代。加强水产养殖全过程管理，严格控制抗生素过度使用，养殖尾水禁止直排入河（湖），环巢湖规模水产养殖尾水实现有效处理或循环利用。巢湖岸线1公里范围内，严禁新（改、扩）建尾矿库。	本项目不涉及	符合
空间布局约束	限制开发建设活动的要求	严格限制在水环境三级保护区内新建制革、化工、印染、电镀、酿造、水泥、石棉、玻璃等水污染严重的大中型项目；确需新建的，应当事先报经省人民政府生态环境主管部门同意。其中，排放含氮、磷等污染物的项目，按照不低于该项目氮、磷等重点水污染物年排放总量指标，实行减量替代。加强水产养殖全过程管理，严格控制抗生素过度使用，养殖尾水禁止直排入河（湖），环巢湖规模水产养殖尾水实现有效处理或循环利用。	不涉及	符合
	不符合空间布局要求活动的退出要	合肥市人民政府应当采取措施，明确期限，拆除水环境一级保护区内现有排放水污染物的生产项目。	不涉及	符合

管控类别	管控要求		本项目情况	相符性
	求			
	其他空间布局约束要求	在巢湖湖体开展水上旅游、水上运动、水上经营等开发利用活动，不得污染水质。有关部门在批准前，应当征求省巢湖管理局的意见。水环境一级保护区内的建设项目不得缩小水域或者滩涂面积。因建设水生态环境治理与保护、防洪、抗旱、供水、道路、航道整治工程和项目以及由省人民政府报经国家批准的重大工程和项目确需占用的，应当科学论证，经省人民政府水行政主管部门同意后，报省人民政府批准，并同时兴建等效替代工程或者采取其他功能补救措施。在水环境一级保护区内因保护需要建设环湖湿地、环湖景观林带、污染治理项目等，应当经省巢湖管理局审查后，依法办理相关手续。对巢湖流域产业和项目布局实行最严格的规划管控，出台巢湖流域氮磷总量控制方案，严守生态功能保障基线、环境质量安全底线、自然资源利用上线。在有条件的一、二级保护区依法依规实施退耕还湿，还林，还湖工程。三级保护区积极争取国家政策支持，依法依规有序推进耕地轮作休耕。	本项目主要开展科学技术研究，不属于水上旅游、水上运动、水上经营等开发利用活动	符合
	禁止	市区及各县（市）建成区严禁使用农用车运输土石方和货料。在巢湖湖区、引江济淮沿线、饮用水源及输水通道、水质良好湖泊、国家重点考核河流等区域禁止围网投饵养殖。禁止没有加装生活污水处理装置的船舶在合裕线航行；到2020年，全面禁止没有加装生活污水处理装置的船舶在合肥市所有通航水域航行。	不涉及	符合
空间布局约束	限制	严格控制燃煤机组新增装机规模，新增用电量主要依靠区域内非化石能源发电和外送电满足。对超过重点水污染物排放总量控制指标或者未完成水环境质量改善目标的区域，市、县(市)区人民政府环境保护行政主管部门应当依法暂停审批责任区域内新增重点水污染物排放总量建设项目的环境影响评价文件。开展水上旅游、水上运动、水上经营等开发利用活动，不得影响防洪安全、污染水质、损害河道及其配套设施。有关行政部门在批准前，应当征求环境保护、水行政主管部门的意见。开发区和各类工业园区污水不能接入城镇污水集中处理设施的，应当配套建设园区污水集中处理设施。未配套建设园区污水集中处理设施的，应当限期完成建设。逾期未完成建设的，市、县（市、区）环境保护行政主管部门不得审批园区内的建设项目环境影响评价文件。	不涉及	符合
	退出	巩固饮用水水源保护与治理成果，推进县级水源地规范化管理，加强乡镇水源地规范化建设，完善水源保护区标志、隔离防护等风险防控设施。定期开展水源地环境巡查，严格落实网格化监管和问题排查整治三联签制度，严厉打击水源地污染行为。	不涉及	符合
	其他	加强畜禽粪污综合利用，开展种养业有机结合、循环发展。对污染地块开发利用，以及在优先保护类耕地集中地区新建涉重金属重点行业企业、伴生放射性矿产利用企业等，开展风险评估。工业资源综合利用基地和示范工程，拓宽粉煤灰、炉渣、副产石膏等大宗工业	不涉及	符合

管控类别	管控要求		本项目情况	相符性
		固体废物综合利用渠道。推动一般工业固废处置能力建设，因地制宜采取水泥窑协同处置、制造建筑材料等方式处置固体废物		
环境风险防控	——	1.以化工园区、尾矿库、冶炼企业等为重点，严格落实企业生态环境风险防范主体责任。	本项目不属于化工项目、冶炼项目及尾矿库等	符合
		2.对使用有毒有害化学物质或在生产过程中排放有毒有害物质的企业，全面实施强制性清洁生产审核，严格执行产品质量标准中有毒有害化学物质的含量限值，加强农药、石化、涂料、印染、医药等行业新污染物环境风险管控。	本项目属于科学技术实验研究，不属于化工、印染等污染型项目	符合
资源开发效率要求	——	1.坚持集中式与分布式建设并举，因地制宜建设集中式光伏发电项目，推动整县（市、区）屋顶分布式光伏发电试点工作。坚持集中式和分散式相结合，有序推进皖北平原连片风电项目建设，稳妥推进皖西南地区集中式风电项目建设，鼓励分散式风电商业模式创新。大力推进风光储一体化建设。加快建设一批抽水蓄能电站，打造千万千瓦级绿色储能基地。多元高效利用生物质能，推进农林生物质热电联产项目新建和供热改造，合理规划城镇生活垃圾焚烧发电项目，统筹布局生物燃料乙醇项目，适度发展先进生物质液体燃料。到2025年，非化石能源占能源消费总量比重达到15.5%以上。	不涉及	符合
		2.推动煤电行业实施节能降耗改造、供热改造和灵活性改造“三改联动”。加快供热管网建设，淘汰管网覆盖范围内的燃煤锅炉和散煤。到2025年，火电平均供电煤耗降至295克标煤/千瓦时，散煤基本清零。	不涉及	符合
		3.实施“煤改气”和“以电代煤”。在陶瓷、玻璃、铸造等行业积极推进天然气替代煤气化工程，有序实施燃煤设施煤改气。结合区域和行业用能特点，积极推进工业生产、建筑供暖供冷、交通运输、农业生产、居民生活五大领域实施“以电代煤”，着力提高电能占终端能源消费比重。	不涉及	符合
		4.推动光伏发电规模化发展，充分利用荒山荒坡、采煤沉陷区等未利用空间，建设集中式光伏电站。加快工业园区、公共建筑、居民住宅等屋顶光伏建设，有序推动国家整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点，因地制宜推进“光伏+”项目。	不涉及	符合
		5.积极开发风电资源，在皖北平原、皖西南地区建设集中连片风电，持续推进就近接入，就地消纳的分散式风电建设。	不涉及	符合
		6.大力推广新能源汽车，推动城市公共服务车辆、政府公务用车新能源或清洁能源替代1到2025年，全省用水总量控制在306亿立方米以内，万元GDP用水量、万元工业增加值用水量较2020年均下降18%，农田灌溉水有效利用系数达到0.58。	不涉及	符合

1.2.5.5 与《巢湖流域水污染防治条例》的相符性分析

表 1-8 与《巢湖流域水污染防治条例》的相符性分析

相关要求	符合性分析	相符性
第三条：巢湖流域水环境实行三级保护。巢湖湖体，巢湖岸线外延一千米范围内陆域，入湖河道上溯至一万米及沿岸两侧各二百米范围内陆域为一级保护区；巢湖岸线外延一千至三千米范围内陆域，入湖河道上溯至一万米沿岸两侧各二百米至一千米范围内陆域为二级保护区；其他地区为三级保护区。巢湖流域水环境一、二、三级保护区的具体范围，由省人民政府确定并公布	根据《安徽省人民政府关于公布巢湖流域水环境保护区范围的通知》（皖政秘（2017） 254 号），本项目所在地为三级保护区，本项目不属于《巢湖流域禁止和限制的产业、产品目录》中水环境三级保护区内禁止或限制的产业。	符合
直接或者间接向水体排放污染物的，应当按照规定取得排污许可证；城镇污水集中处理设施的运营单位，也应当取得排污许可证	本项目实验及生活污水排入市政管网。	符合
在巢湖流域新建、改建、扩建直接或者间接向水体排放污染物的建设项目和其他水上设施，应当依法进行环境影响评价。建设项目的环境影响报告书、报告表未依法经有审批权的生态环境主管部门审查或者审查后未予批准的，建设单位不得开工建设	本项目为新建项目，依法进行环境影响评价。建设项目的环境影响报告书未依法经有审批权的生态环境主管部门审查或者审查后未予批准的，不得开工建设。	符合
编制环境影响报告书、环境影响报告表的建设项目，其水污染防治设施经建设单位按照国务院生态环境主管部门规定的标准和程序验收合格，方可投入生产或者使用；未经验收或者验收不合格的，不得投入生产或者使用。不得擅自拆除或者闲置水污染防治设施	本项目含氚废水满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入污水管网；非放生活污水与循环冷却废水接管入市政污水管网，经望塘污水处理厂处理，达标排放。	符合

1.2.5.6 与《安徽省饮用水水源环境保护条例》的符合性分析

表 1-9 与《安徽省饮用水水源环境保护条例》的符合性分析

相关要求	本项目情况	符合性
第十四条 在饮用水水源准保护区内，禁止下列行为：	不属于	符合
（一）新建扩建制药、化工、造纸、制革、印染、染料、炼焦、炼硫、炼砷、炼油、电镀、农药等对水体污染严重的建设项目；	不属于	符合
（二）改建增加排污量的建设项目；	不属于	符合
（三）设置易溶性、有毒有害废弃物暂存和转运站；	不涉及	符合
（四）施用高毒、高残留农药；	不涉及	符合
（五）毁林开荒；	不涉及	符合
（六）法律、法规禁止的其他行为。	不涉及	符合

由表 1-9 可知，本项目与《安徽省饮用水水源环境保护条例》相符。

1.2.5.7 与《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022 版）》符合性分析

表 1-10 与《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022 版）》的符合性

相关要求	本项目情况	符合性
1.禁止建设不符合全国和省级港口布局规划以及港口总体规划的码头项目，禁止建设不符合《长江干线过江通道布局规划》的过长江通道项目。	不属于	符合
2.禁止在自然保护区核心区、缓冲区的岸线和河段范围内投资建设旅游和生产经营项目。禁止在风景名胜区核心景区的岸线和河段范围内投资建设与风景名胜资源保护无关的项目。	不属于	符合
3.禁止在饮用水水源一级保护区的岸线和河段范围内新建、改建、扩建与供水设施和保护水源无关的项目，以及网箱养殖、畜禽养殖、旅游等可能污染饮用水水体的投资建设项目。禁止在饮用水水源二级保护区的岸线和河段范围内新建、改建、扩建排放污染物的投资建设项目。	不属于	符合
4.禁止在水产种质资源保护区的岸线和河段范围内新建围湖造田、围海造地或围填海等投资建设项目。禁止在国家湿地公园的岸线和河段范围内挖沙、采矿，以及任何不符合主体功能定位的投资建设项目。	不属于	符合
5.禁止违法利用、占用长江流域河湖岸线。禁止在《长江岸线保护和开发利用总体规划》划定的岸线保护区和保留区内投资建设除事关公共安全及公众利益的防洪护岸、河道治理、供水、生态环境保护、航道整治、国	不属于	符合
家重要基础设施以外的项目。禁止在《全国重要江河湖泊水功能区划》划定的河段及湖泊保护区、保留区内投资建设不利于水资源及自然生态保护的项目。		
6.禁止未经许可在长江干支流及湖泊新设、改设或扩大排污口。	不属于	符合
7.禁止在“一江一口两湖七河”和322 个水生生物保护区开展生产线捕捞。	不属于	符合
8.禁止在长江干支流、重要湖泊岸线一公里范围内新建、扩建化工园区和化工项目。禁止在长江干流岸线三公里范围内和重要支流岸线一公里范围内新建、改建、扩建尾矿库、冶炼渣库和磷石膏库，以提升安全、生态环境保护水平为目的的改建除外。	不属于	符合
9.禁止在合规园区外新建、扩建钢铁、石化、化工、焦化、建材、有色、制浆造纸等高污染项目。	不属于	符合
10.禁止新建、扩建不符合国家石化、现代煤化工等产业布局规划的项目。	不属于	符合
11.禁止新建、扩建法律法规和相关政策明令禁止的落后产能项目。禁止新建、扩建不符合国家产能置换要求的严重过剩产能行业的项目。禁止新建、扩建不符合要求的高耗能高排放项目。	不属于	符合

由表 1-10 可知，本项目的建设不属于《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022 版）》中的禁止项目，符合相关要求。

1.2.5.8 与《中华人民共和国水污染防治法》《合肥市饮用水水源保护条例》符合性分析

表 1-11 与《中华人民共和国水污染防治法》《合肥市饮用水水源保护条例》符合性

相关要求	本项目情况	符合性
《中华人民共和国水污染防治法》第六十七条禁止在饮用水水源准保护区新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量。	本项目含氚废水满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入污水管网；非放生活污水与循环冷却废水接管入市政污水管网，经望塘污水处理厂处理，达标排放，不会对水体造成严重污染。	符合
《合肥市饮用水水源保护条例》中第十六条 禁止在饮用水水源准保护区新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量。	本项目含氚废水满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入污水管网；非放生活污水与循环冷却废水接管入市政污水管网，经望塘污水处理厂处理，达标排放，不会对水体造成严重污染。	符合

由表 1-11 可知，本项目的建设符合《中华人民共和国水污染防治法》和《合肥市饮用水水源保护条例》的相关要求。

1.2.5.9 与《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见》（升级版）（皖发〔2021〕19 号文）符合性分析

表 1-12 与《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见》（升级版）（皖发〔2021〕19 号文）符合性分析

相关要求	本项目情况	符合性
严控 5 公里范围内新建项目。长江干流岸线 5 公里范围内，全面落实长江岸线功能定位要求，实施严格的化工项目市场准入制度，除提升安全、环保、 节能水平，以及质量升级、结构调整的改扩建项目外，严格控制新建煤化工和石油化工等重污染、重化工项目。严禁新建布局重化工园区。合规化工园区内，严禁新批环境基础设施不完善或长期不能稳定运行的企业新建和扩建化工项目。	本项目不在长江干流岸线 5km 范围内。	符合
全面治理“散乱污”企业。	本项目不属于“散乱污”企业	符合
依法依规推动落后产能退出。以钢铁、煤炭、水泥、平板玻璃等行业为重点，严把能耗、环保、质量、安全、技术等标准，严格常态化执法，促使一批达不到标准和生产不合格产品或淘汰类产能的企业，依法依规关停退出。	本项目不属于落后产能项目	符合

相关要求	本项目情况	符合性
严格控制污染物排放。加快构建市场导向的绿色技术创新体系，采用节能低碳环保技术改造传统产业，推进冶金、化工、印染、有色、建材、电镀、造纸、农副食品加工等行业清洁生产改造，从源头上减少高浓度难降解有机废水、挥发性和持久性有机污染物、重金属等排放量及固体废物产生量。监督土壤污染重点监管单位全面落实土壤污染防治义务，督促关闭搬迁企业落实设备设施拆除及腾退地块土壤污染防治措施，防范土壤污染风险。	本项目严格控制污染物排放。污染物均按要求达标排放。	符合
园区企业污水处理全覆盖。园区工业污水和生活污水全部纳入统一污水管网，实行统一处理、不留死角。企业工业废水在排入园区污水处理厂之前，必须经过预处理且达到园区污水处理厂纳管标准。园区污水集中处理设施和管网全部建成运行。鼓励有条件的园区实施化工企业“一企一管、明管输送、实时监测”，确保化工污水全收集、全处理。	本项目含氚废水满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入污水管网；非放生活污水与循环冷却废水接管入市政污水管网，经望塘污水处理厂处理，达标排放。	符合

由上表可知，本项目的建设符合《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见》（升级版）（皖发〔2021〕19 号文）的相关要求。

1.2.5.10 与《安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于印发安徽省“两高”项目管理目录（试行）的通知》 皖节能【2022】2 号文件符合性分析

根据安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于《安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于印发安徽省“两高”项目管理目录（试行）的通知》皖节能【2022】2 号文件可知，本项目不属于“两高”项目。

1.2.5.11 与《安徽省生态环境厅关于印发加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见的通知》（皖环发〔2021〕28 号）符合性分析

表 1-13 与《加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见的通知》符合性分析

相关要求	本项目情况	符合性
三、严格环境准入。各地不得受理钢铁、水泥、电解铝、平板玻璃、铸造等产能严重过剩行业新增产能项目的环评文件；对国家明令淘汰、禁止建设、不符合国家产业政策的项目环评文件，一律不批；沿江各市应按国家推长办《长江经济带发展负面清单指南（试行）》及我省实施细则要求，对合规园区外新建、扩建钢铁、石化、化工、焦化、建材、有色等“两高”项目的环评文件一律不批。新增主要污染物排放量的“两高”项目应按照生态环境部办公厅《关于加强重点行业建设项目区域削减措施监督管理的通知》（环办环评〔2020〕36 号）要求，依据区域环境质量改善目标，制定配套区域污染物削减方案，采取有效的污染物区域削减措施，相应的减排措施应在项目投产前完成。	本项目选址安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，根据用地总体规划，项目用地属性地类为科研用地；根据皖节能办〔2022〕2 号文，本项目不属于“两高”项目。	符合

由上表可知，本项目的建设符合《安徽省生态环境厅关于印发加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见的通知》（皖环发〔2021〕28 号）的相关要求。

综上所述，本项目的建设符合相关政策和规划的要求。

1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状

中国科学院合肥物质科学研究院自2006年起开展了核技术应用，目前持有辐射安全许可证，编号为国环辐证[00147]，许可证有效期至2028年9月30日，许可种类和范围包括：使用II类、III类、IV类、V类放射源；使用I类、II类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所。详见附件3。

⑴核技术利用及环保手续履行情况

中国科学院合肥物质科学研究院近几年主要核技术利用项目环保手续履行情况如下表所示。

表1-14 主要核技术利用项目环保手续履行情况一览表

序号	项目名称	审批情况	验收情况	备注
1	HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置环境影响报告书（可行性研究阶段）[1]	环函〔1999〕280 号	环验〔2016〕82 号	EAST
2	壹台BIOBEAM 2000 型γ血液辐照仪	皖辐射报告（2013)65号	自主验收20180716	/
3	加速器技术与应用实验大厅及配套实验室项目	皖辐射报告表〔2013〕69 号升级为皖辐射报告表（2015）02 号	自主验收20180616	/

序号	项目名称	审批情况	验收情况	备注
4	X 射线辐照仪应用项目环境影响报告表	皖环函〔2015〕1051号	自主验收20180716	
5	非密封源操作项目环境影响报告表	皖环函〔2016〕1048号	自主验收20180616	
6	辐射安全综合实验平台改造项目环境影响报告表	皖环函〔2018〕1449号	/	在建
7	聚变堆主机关键系统综合研究设施项目环境影响报告表	安徽省生态环境厅 皖环函〔2019〕488 号	/	在建
8	中国科学院合肥物质研究院工业CT装置应用项目	合环辐审〔2023〕35号	/	在建

备注：1.EAST 装置原名称为“HT-7U 全超导非圆截面托克马克装置”，原有项目报告名称为：《超导托卡马克核聚变实验装置环境影响报告书（可行性研究阶段）》，已取得国家环保总局批复和验收意见（开展 DD 聚变实验研究），以及安徽省环境保护厅关于中国科学院合肥物质研究院 EAST 辅助加热系统工程项目对环境影响的意见。

截至2026年1月29日，中国科学院合肥物质科学研究院现有放射源45枚，其中II类放射源3枚；III类、IV类放射源各2枚；V类放射源38枚。现有射线装置26台，其中I类射线装置1台、II类射线装置19台、III类射线装置6台。现有两个乙级非密封放射性物质工作场所，使用的放射性核素分别为Ra-226、Po-209、Ni-63、U-238、H-3。

中国科学院合肥物质科学研究院已获许可使用的放射源、射线装置和非密封放射性物质的使用情况分别列于表1-15、1-16和表1-17。

表1-15 已许可使用的放射源台账

序号	核素名称	出厂活度（Bq）	类别	活动种类	用途	使用场所	含源装置（存储方式）	数量	备注
1	Am-241	3.70E+08	V类	使用	刻度/校准	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）	放射源库源盒内	1枚	
2	Am-241	1.85E+08	V类	使用	刻度/校准	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）	放射源库源盒内	1枚	
3	Cs-137	3.20E+08	V类	使用	刻度/校准	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）	放射源库源盒内	1枚	
4	Eu-152	3.79E+04	V类	使用	刻度/校准	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源	放射源库源盒内	1枚	

序号	核素名称	出厂活度（Bq）	类别	活动种类	用途	使用场所	含源装置（存储方式）	数量	备注
						）			
5	Am-241/Be	4.70E+05	V类	使用	刻度/校准	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）	放射源库源盒内	1枚	
6	Cs-137	3.70E+04	V类	使用	刻度/校准	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）	放射源库源盒内	1枚	
7	Am-241	7.40E+06	V类	使用	刻度/校准	智能所技术生物与农业工程研究所综合实验楼106室	α源照射装置	1枚	
8	Ni-63	5.55E+08	V类	使用	科研实验	健康所交叉楼南楼810室（1号楼422室）	炸药毒品检测发生仪	1枚	
9	Fe-55	7.40E+08	V类	使用	刻度/校准	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）	放射源库源盒内	1枚	
10	Cf-252	6.00E+07	V类	使用	科研	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）	放射源库屏蔽罐内	1枚	
11	Cs-137	4.44E+13	II类	使用	科研	智能所技术生物与农业工程研究所综合实验楼106室	γ血液辐照仪	1枚	
12	Cs-137	5.55E+10	IV类	使用	科研	核安全所加速器技术与应用实验大厅	加速器大厅橘黄罐子内	1枚	
13	Am-241/Be	1.48E+11	III类	使用	科研实验用	核安全所加速器技术与应用实验大厅	加速器大厅水井内	1枚	
14	Cs-137	1.78E+12	II类	使用	刻度/校准源	核安全所加速器技术与应用实验大厅	加速器大厅橘黄罐子内	1枚	
15	Co-60	5.55E+10	III类	使用	刻度/校准源	核安全所加速器技术与应用实验大厅	加速器大厅橘黄罐子内	1枚	
16	U-235	3.12E+06	IV类	使用	其他	等离子体所EAST主机大厅		1枚	
17-26	Ni-63	5.55E+08	V类	使用	科研实验用	核能安全所核素分析室		10枚	
27-36	H-3	1.85E+11	V类	使用	科研实验用	核能安全所加速器技术与应用实验大厅		10枚	

序号	核素名称	出厂活度（Bq）	类别	活动种类	用途	使用场所	含源装置（存储方式）	数量	备注
37-43	Ni-63	5.55E+08	V类	使用	科研实验用	核能安全所核素分析室		7枚	
44	H-3	9.25E+10	V类	使用	科研实验用	核能安全所加速器技术与应用实验大厅		1枚	
45	Cf-252	1.80E+08	V类	使用	科研实验用	等离子体所8-1大厅、核辐射防护实验室（放射源）		1枚	

从上表可知，核能安全所共使用放射源32枚（其中II类1枚、III类2枚、IV类1枚，V类28枚），智能所2枚（其中II类、V类各1枚），等离子所10枚（其中IV类1枚、V类9枚），健康所使用V类放射源1枚。

表1-16 许可使用的射线装置台账

序号	装置名称	规格型号	类别	数量	用途	工作场所	管电压	管电流	功率	射线种类
1	X射线衍射仪	Rigaku TTRIII	III类	1	材料科学研究	强磁场科学中心一楼实验大厅	60kV	300mA	18kW	X
2	静电加速器	5.5MeV	II类	1	辐照装置用加速器	智能所生物楼离子束大厅	5.5MV	3mA	20kW	质子
3	X射线探伤机	XXG-3505	II类	1	X射线探伤机	等离子体所射线曝光室（探伤机）	350kV	5mA	175kW	X
4	X射线探伤机	XXG-3505	II类	1	X射线探伤机	等离子体所射线曝光室（探伤机）	350kV	5mA	175kW	X
5	X射线探伤机	XXQ-3505	II类	1	X射线探伤机	等离子体所射线曝光室（探伤机）	350kV	5mA	175kW	X

序号	装置名称	规格型号	类别	数量	用途	工作场所	管电压	管电流	功率	射线种类
6	X射线探伤机	XXQ-1605	II类	1	X射线探伤机	等离子体所射线曝光室（探伤机）	160kV	5mA	800W	X
7	X射线探伤机	XXQ-1605	II类	1	X射线探伤机	等离子体所射线曝光室（探伤机）	160kV	5mA	800W	X
8	X射线探伤机	XXG-2505	II类	1	X射线探伤机	等离子体所射线曝光室（探伤机）	250kV	5mA	125kW	X
9	X射线探伤机	XXG-3505	II类	1	X射线探伤机	等离子体所射线曝光室（探伤机）	350kV	5mA	175kW	X
10	EAST		I类	1	等离子体实验	等离子体所EAST主机大厅	1V（环电压）	600KA	600kW	
11	X射线辐照仪	X-RAD320	II类	1	辐射生物学研究	智能所综合实验楼106室	320 kV	45mA	4.2 kW	X
12	中子发生器	1.0+13n/s	II类	1	中子发生器	核能安全所加速器技术与应用实验大厅	400kV	50mA	20kW	中子
13	中子发生器	DSWL-DT48	II类	1	中子发生器	核能安全所加速器技术与应用实验大厅	100kV	0.15A	30W	中子

序号	装置名称	规格型号	类别	数量	用途	工作场所	管电压	管电流	功率	射线种类
14	微焦点X射线源	牛津仪器96004	III类	1	X射线衍射仪	等离子体所植物楼：二楼核测量测试实验室	90kV	2mA		
15	电子加速器	HM-J-16-I	II类	1	粒子能量小于100兆电子伏的非医用加速器	核能安全所加速器技术与应用实验大厅			粒子能量：16Mev	
16	电子加速器	XHA600D	II类	1	粒子能量小于100兆电子伏的非医用加速器	核能安全所加速器技术与应用实验大厅			粒子能量：6Mev	
17	X射线检测装置	X130kV1mA型	III类	1	用于检测钙钛矿X射线探测器的灵敏度、检测下限及成像分辨率等性能	固体所长江西路2221号工研院大楼A108室	120 kV	0.3mA		X
18	离子注（植）入装置_负离子源中性束发生装置（NNBI系统）	无（自研）	III类	1	等离子体所离子注（植）入装置	10#楼NBI系统主机大厅	400 kV	10A		
19	工业用X射线探伤装置_X射线探伤机	SF-1605	II类	1	工业用X射线探伤装置	等离子体所射线曝光室	160 kV	5 mA		
20	工业用X射线探伤装置_X射线探伤机	XXG3505	II类	1	工业用X射线探伤装置	等离子体9#楼探伤室及工程现场	350kV	5mA		

序号	装置名称	规格型号	类别	数量	用途	工作场所	管电压	管电流	功率	射线种类
21	工业用X射线探伤装置_X射线探伤机	XXG-1605	II类	1	工业用X射线探伤装置	等离子体9#楼探伤室及工程现场	160 kV	5 mA		
22	工业用X射线计算机断层扫描（CT）装置_工业CT	nanoVoxel-5000	II类	1	工业用X射线计算机断层扫描（CT）装置	等离子体13#楼工业CT室	300 kV	3 mA		
23	粒子能量小于100兆电子伏的非医用加速器_60kW电子枪系统	EG 150-60BJK	II类	1	粒子能量小于100兆电子伏的非医用加速器	等离子体13#楼偏滤器部件工程测试平台装置大厅	150 kV	400 mA		
24	粒子能量小于100兆电子伏的非医用加速器_800kW电子枪系统	VA EBS 800-60	II类	1	粒子能量小于100兆电子伏的非医用加速器	等离子体13#楼偏滤器部件工程测试平台装置大厅	60 kV	13.3 A		
25	烟草堆积密度体素成像系统	nanovoxel-1000	III类	1	其他各类X射线检测装置（测厚、称重、测孔径、测密度等）	光机所医工楼北楼102室	100 kV	0.5 mA		
26	X射线发生装置	MNX2-910-AU	III类	1	其他各类X射线检测装置（测厚、称重、测孔径、测密度等）	光机所综合实验楼309室	50 kV	0.52mA		

从上表统计可知，核能安全所共使用4台II类射线装置，智能所使用2台II类射线装置，强磁场中心使用1台III类射线装置，等离子所共使用16台射线装置，其中1台I类射

线装置、13台II类射线装置、2台III类射线装置，安光所使用2台III类射线装置，固体所使用1台III类射线装置。

表1-17 已获许可使用的非密封放射性物质

序号	工作场所	场所等级	核素	理化性质	活动种类	用途	日最大操作量(Bq)	日等效最大操作量(Bq)	年最大操作量（Bq）
1	核素分析室	乙级	Ra-226	液态	使用	科研	2.0E+04	2.0E+05	4.0E+05
2			Po-209	液态	使用	科研	3.0E+05	3.0E+05	3.0E+06
3			Ni-63	液态	使用	科研	1.5E+09	1.5E+08	4.0E+11
4	氚回收实验室	乙级	U-238	固态	使用	科研	9.8E+07	9.8E+07	9.8E+07
5			H-3	气态	使用	科研	3.7E+10	3.7E+09	9.25E+12

以上两个乙级非密封放射性工作场所（核素分析室、氚回收实验室）均隶属于核能安全所。

⑵辐射安全与环境保护管理机构

中国科学院合肥物质研究院已成立了辐射安全管理委员会由法定代表人任主任，新任纪委书记为“辐射安全与环保负责人”，作为主要管理人员，院所两级有关领导及相关辐射工作人员为组员。规定了辐射安全管理委员会职责，要求全面负责辐射安全管理领导工作。在辐射安全管理委员会领导下，设置了专门的辐射安全管理部门（安全保密处）负责全院运行期间的安全和防护工作的统一监督管理，并对执行情况进行监督检查。

⑶规章制度建设情况

为了保障辐射工作人员和公众的身体健康，杜绝环境辐射污染事故的发生，中国科学院合肥物质研究院成立了辐射安全与环境管理机构，并制定了相关的规章制度，主要包括《中国科学院合肥物质科学研究院辐射安全管理规定》《中国科学院合肥物质科学研究院放射性废物安全管理规定》《合肥研究院辐射岗位工作人员培训管理规定》《合肥研究院放射源库房安全管理规定》《合肥研究院放射源库房事故应急处置方案》《中国科学院合肥物质科学研究院生产安全事故综合应急预案》（含《辐射事故应急预案》）等。

⑷人员培训

中国科学院合肥物质研究院现有在职辐射工作人员共44名，均已参加核技术利用

辐射安全与防护知识培训，均取得了合格成绩单，部分人员培训证书已超出有效期，目前，合肥院及有关研究所已安排有关人员参加再培训。有关信息详见下表。

表1-18 现有辐射工作人员信息表

序号	姓 名	性别	工作岗位	培训证号	证书有效期
1	胡立群	男	开放性实验室	FS21AH2200008	2021.4.7-2026.4.7
2	林士耀	男	开放性实验室	FS25AH2300112	2025.6.13-2030.6.13
3	钟国强	男	开放性实验室	FS25AH2300099	2025.6.10-2030.6.10
4	毛松涛	男	开放性实验室	FS25AH2300103	2025.6.13-2030.6.13
5	张继宗	男	开放性实验室	FS25AH2300110	2025.6.13-2030.6.13
6	陈开云	男	开放性实验室	FS22AH2300068	2022.6.13-2027.6.13
7	段艳敏	女	开放性实验室	FS25AH2300104	2025.6.13-2030.6.13
8	凌必利	男	开放性实验室	FS21AH2300005	2021.4.7-2026.4.7
9	王华忠	男	开放性实验室	FS21AH2200003	2021.4.7-2026.4.7
10	提昂	男	开放性实验室	FS22AH2300072	2022.6.13-2027.6.13
11	常加峰	男	开放性实验室	FS25AH2300118	2025.6.13-2030.6.13
12	蒋才超	男	辐射安全与防护	FS22AH2300069	2022.6.13-2027.6.13
13	梁立振	男	辐射安全与防护	FS22AH2300067	2022.6.13-2027.6.13
14	吴婧	女	辐射安全与防护	FS22AH2300070	2022.6.13-2027.6.13
15	黄俊	男	辐射安全与防护	FS22AH2200162	2022.6.13-2027.6.13
16	许键	男	辐射安全与防护	FS22AH2200163	2022.6.13-2027.6.13
17	谢春意	男	辐射安全与防护	FS22AH2300071	2022.6.13-2027.6.13
18	刘胜	男	辐射安全与防护	FS21AH2300006	2021.4.7-2026.4.7
19	谢亚红	男	辐射安全与防护	FS21AH2300013	2021.4.7-2026.4.7
20	李二众	男	开放性实验室	FS22AH2300076	2022.6.13-2027.6.13
21	孔岩松	男	工业探伤	FS21AH2300011	2026.04.07
22	姜北燕	女	工业探伤	FS25AH1200463	2030.8.25
23	胡长城	男	工业探伤	FS21AH2300007	2026.04.07
24	陈斌	男	科研	FS22AH2300063	2027.06.13
25	陈连运	男	科研	FS22AH2300066	2027.06.13
26	袁航	男	科研	FS22AH2300065	2027.06.13

序号	姓 名	性别	工作岗位	培训证号	证书有效期
27	张蕾	男	X射线衍射仪管理测试	FS21AH2300002	2026.04.07
28	张思纬	男	氚靶、放化实验室管理	FS21AH2300016	2026.04.07
29	章勇	男	加速器、放射源运行	FS21AH2300012	2026.04.07
30	王子帮	男	加速器、放射源运行	FS23AH2200178	2028.03.02
31	谢远来	男	NBI运行	FS23AH2300334	2028.12.13
32	许永建	男	NBI运行	FS23AH2300330	2028.11.27
33	陈思泽	男	加速器、放射源运行	B1704108	2026.08.04
34	肖丹	男	加速器、放射源运行	FS25AH2300095	2030.6.10
35	徐照	女	加速器、放射源运行	FS21AH2300008	2026.04.07
36	冯东	男	工业CT	FS24AH1200122	2029.03.05
37	刘小川	女	工业探伤	FS23AH1200194	2028.03.02
38	陈磊	男	工业CT	FS23AH1200192	2028.03.02
39	王万景	男	电子枪运行	FS24AH2300067	2029.02.07
40	祝庆军	男	电子枪运行	FS24AH1200117	2029.02.07
41	戚强	男	工业CT	FS23AH1200193	2028.03.02
42	陶汝华	男	科研	FS24AH2300120	2029.03.29
43	赵远哲	女	NBI运行	FS23AH2300335	2028.12.13
44	邑伟	男	NBI运行	FS24AH2300006	2029.01.07

⑸辐射防护用品及监测仪器配备情况

合肥物质研究院配备了必要的辐射防护用品及监测仪器，具体如下表所示。

表1-19 已配备防护用品及监测仪器一览表

监测仪名称	用途	数量	规格参数	备注
固定式中子剂量率仪	主机大厅及外围环境中子剂量率实时监测	13台	BF_3正比计数管探头、热中子～14MeV	
固定式X/γ剂量率仪	主机大厅及外围环境X/γ剂量率实时监测	13台	高压Ar_2电离室、60keV~10MeV	
便携式中子雷姆计	主机大厅外围中子剂量率巡测	2台	3He正比计数管探头、热中子～14MeV	
便携式X/γ剂量率	主机大厅外围X/γ剂量率巡测	2台	塑料闪烁体探测器、60keV~3MeV	
中子伽马个人剂量	辐射工作人员个人剂量	60枚	CR39固体径迹片、光释	

监测仪名称	用途	数量	规格参数	备注
计	累积测量		光剂量片	
电子直读式X/γ个人剂量报警器	放电间隙临时进入装置主机大厅维护工作人员个人剂量监测报警	15枚	DMC2000S	
电子直读式中子/X/γ个人剂量报警器	放电间隙临时进入装置主机大厅维护工作人员个人剂量监测报警	5枚	DMC2000GN	
表面污染监测仪	装置主机及设备表面放射性污染监测	2台	CoMo170, PCM170-NA780	
气密服	涉氚操作人员防护	1件	全身	
中子防护服	中子原位刻度期间实验人员辐射防护	1件	含硼纺织物，热中子屏蔽	
铅衣、铅眼镜	探测器刻度人员辐射防护	若干		
空气氚连续监测仪	装置主机大厅及涉氚场所空气氚浓度连续监测	10台		
便携式氚监测仪	涉氚场所及应急空气氚浓度巡测	3台		
氚表面污染监测仪	涉氚场所建筑物、人员和设备表面氚污染监测	3台		
气氚、水氚综合采样器	环境空气中气氚和水氚采样器	3台		
低本底液闪β/γ射线谱仪	环境空气、水体及生物样本氚活度浓度测量	2台		

⑹个人剂量监测

合肥物质院委托有省级以上生态环境部门认可的具有相关资质的单位开展个人剂量监测，提供个人剂量监测报告。在岗的辐射工作人员均已按照规范佩戴了热释光个人剂量计，每季度送检，建立了个人剂量监测档案。具体如下：

①等离子体物理研究所：辐射岗位工作人员的个人剂量监测委托天津瑞丹辐射检测评估有限责任公司。对所有在岗辐射工作人员每季度进行中子、伽马累积辐射剂量监测。2025 年监测结果显示，所有辐射工作人员接受的剂量均处于极低水平，未出现超限值现象。

②核能安全所：每季度由中国辐射防护研究院根据现场的个人剂量计出具个人辐射监测报告。2025 年监测结果显示无异常。

③智能所：委托天津瑞丹辐射检测评估有限责任公司对所有在岗辐射工作人员每季度进行中子、伽马累积辐射剂量监测。2025 年监测结果显示无异常。

④强磁场中心：委托安徽省职业病防治院进行个人剂量监测并出具报告，2025 年

监测结果显示无异常。

⑤安光所：委托安徽赛尔福职业安全健康有限公司进行个人剂量监测并出具报告，2025 年监测结果显示无异常。

根据 2024 年度外照射个人剂量监测结果，中国科学院合肥物质研究院现有辐射工作人员中，2024 年度年有效剂量最高值为 2.07mSv/a（许永建），满足职业人员年有效剂量约束值要求。

⑺辐射事故应急管理

中国科学院合肥物质研究院制定了《中国科学院合肥物质科学研究院生产安全事故综合应急预案》（科合院发安字〔2025〕5 号)，《辐射事故应急预案》作为专项应急预案予以单列，该专项预案中明确了应急组织机构、人员组成及职责，明确了发生辐射事故时预案启动、通讯联络和协调、应急处置、安全防护、应急终止等内容，基本满足该单位辐射事故应急需求。

中国科学院合肥物质研究院自开展核技术利用项目以来未发生过辐射安全事故。

⑻年度辐射安全评估报告落实情况

2025 年度，中国科学院合肥物质研究院完成了各项辐射安全防护工作，依据相关法律法规对单位核技术应用设施的安全和防护状况进行了年度评估，编写并上报了内容及格式均满足相关要求的年度评估报告。

⑼小结

综上可知，中国科学院合肥物质研究院现有核技术利用设施环保手续完善、根据有关规定履行了环境影响评价、竣工环境保护验收手续，取得了辐射安全许可，各项规章制度较为健全，执行情况基本正常。针对部分人员培训证书有效期已逾期或即将到期的情况，目前，合肥物质院及有关研究所已安排有关人员参加再培训。

1.3 编制依据

1.3.1 国家法律、法规和部门规章

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

（2）《中华人民共和国环境影响评价法》（全国人民代表大会常务委员会，2018年12 月 29 日施行）；

（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，2003 年10 月 1 日）；

（4）《中华人民共和国原子能法》（2025年 9 月 12日通过）；

（5）《中华人民共和国核安全法》（2017 年 9 月 1 日通过）；

（6）《中华人民共和国大气污染防治法》（国家主席〔2015〕31 号令，2018 年10 月 26日修订通过）；

（7）《中华人民共和国水污染防治法》（2017 年 6 月 27 日修订，2018 年 1 月 1 日实施）；

（8）《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020 年 4 月 29 日修订）；

（9）《中华人民共和国土壤污染防治法》（2018 年 8 月 31 日审议通过，2019 年 1 月1 日起施行）；

（10）《中华人民共和国噪声污染防治法》（2022 年 6 月 5 日起施行）；

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

（12）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月22 日修正版）；

（12）《生态环境监测条例》（国务院令第 820 号，2026 年 1 月1日起施行）；

（13）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第 20 号，2021年 1 月 4 日修订版）；

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

（15）

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

（17）《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（国家发展改革委令第 7 号，2023 年 12月 27 日）；

（18）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》（生态环境部令第 9 号，2019 年 11 月 1 日）；

（19）《关于聚变装置辐射安全管理有关事项的通知》（生态环境部办公厅，环办辐射函〔2025〕128 号，2025 年 4 月 2 日）；

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

（21）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号，2019 年 12 月 23 日）；

（22）《关于发布实施〈限制用地项目目录（2012 年本）〉和〈禁止用地项目目录（2012年本）〉的通知》（国土资发〔2012〕98 号）；

（23）《危险化学品安全管理条例》（国务院第 591 号令，2013 年 12 月 7 日修订）；

（24）《环境影响评价公众参与办法》（生态环境部令第 4 号，2019 年 1 月 1 日起执行）；

（25）《关于发布<环境影响评价公众参与办法>配套文件的公告》（公告 2018 年第 48号，生态环境部，2019 年 1 月 1 日起执行）；

（26）《国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知》（国发〔2013〕37 号）；

（27）《国务院关于印发水污染防治行动计划的通知》（国发〔2015〕17 号）；

（28）《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》（国发〔2016〕31 号）；

（29）《“十四五”噪声污染防治行动计划》（环大气〔2023〕1 号）；

（30）《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》（环环评〔2016〕150 号）；

（31）《排污许可管理办法（试行）》（2019 修订）；

（32）《市场准入负面清单》（2022 年版）。

1.3.2 地方性法规及文件

（1）《安徽省环境保护条例》（2010 年 11 月 1 日起施行，2018 年 1 月 1 日修订）；

（2）《安徽省饮用水水源环境保护条例》（2016 年 12 月 1 日起施行）；

（3）《安徽省城镇生活饮用水水源环境保护条例》（2001 年 7 月 28 日）；

（4）《安徽省实施< 中华人民共和国固体废物污染环境防治法>办法》（2021 年 9 月1 日起施行）；

（5）《安徽省实施< 中华人民共和国土地管理法>办法》（2022 年 5 月 27 日修订， 2022 年 12 月 1 日起施行）；

（6）《安徽省实施< 中华人民共和国水土保持法>办法》（2015 年 1 月 1 日起施行）；

（7）《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见（升级版）》（皖发〔2021〕19 号）；

（8）《安徽省人民政府关于发布安徽省生态保护红线的通知》（皖政秘〔2018〕120号）；

（9）《安徽省生态功能区划》（2003 年 11 月）；

（10）《安徽省主体功能区规划》（皖政〔2013〕82 号，2013 年 12 月 4 日）；

（11）《安徽省人民政府关于印发安徽省水污染防治工作方案的通知》（皖政〔2015〕 131 号，2015 年 12 月 29 日）；

（12）《安徽省污染源排放口规范化整治管理办法》（安徽省环境保护厅环法函〔2005〕114 号）；

（13）《安徽省环保厅关于进一步加强建设项目新增大气主要污染物总量指标管理工作的通知》（皖环发〔2017〕19 号）；

（14）《关于印发落实全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带河（湖）长制工作方案的通知》（皖河长办〔2018〕45 号）；

（15）《安徽省“十四五 ”生态环境保护规划》（皖环发〔2022〕8 号）；

（16）《安徽省生态环境厅关于印发安徽省“十四五”大气污染防治规划的通知》（皖环发〔2022〕12 号）；

（17）《合肥市大气污染防治条例》（2019 年 1 月 1 日）；

（18）《合肥市饮用水水源保护条例》（2021 年 7 月 1 日）；

（19）《合肥市区声环境功能区（2020 修订）划分方案》；

（20）合肥市城乡建设委员会关于印发《合肥市建设工程扬尘污染防治暂行规定》的通知（合建〔2015〕33 号，2015 年 3 月 30 日）；

（21）《合肥市环境噪声污染防治条例》（2018 年 6 月 8 日）；

（22）《合肥市水环境保护条例》，（2018 年 6 月 8 日）；

（23）《合肥市“十四五”生态环境保护规划》（2022 年 8 月 2 日）。

（24）《关于加强生态环境分区管控的实施意见》（2024 年 11 月 28 日）。

（25）《安徽省生态环境分区管控管理实施细则》（皖环发〔2026〕1号，2026年2月）。

1.3.3 技术导则、标准

（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）《环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）；

（3）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；

（4）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

（5）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；

（6）《环境影响评价技术导则 磁约束聚变装置（征求意见稿)》及其编制说明；

（7）《环境影响评价技术导则 核技术利用（二次征求意见稿)》及其编制说明；

（8）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）；

（9）《职业性内照射个人监测规范》（GBZ 129-2016）；

（10）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）；

（11）《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》（GB/T 16148-2009）；

（12）《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ 2.1-2019）；

（13）《放射性废物管理规定》（GB 14500-2002）；

（14）《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》（GB27742-2011）；

（15）《低、中水平放射性固体废物包安全标准》（GB12711-2018）；

（16）《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）；

（17）《声环境质量标准》（GB3096-2008）；

（18）《环境空气质量标准》（GB3095-2026）；

（19）《大气污染物综合排放标准》（GB 16297-1996）；

（20）《污水综合排放标准》（GB8978-1996）；

（21）《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）；

（22）《环境影响评价技术导则·大气环境》（HJ 2.2-2018）；

（23）《环境影响评价技术导则·地表水环境》（HJ 2.3-2018）；

（24）《环境影响评价技术导则·声环境》（HJ 2.4-2021）；

（25）《环境影响评价技术导则·生态影响》（HJ 19-2022）；

（26）《环境影响评价技术导则·地下水环境》（HJ 610-2016）；

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

（28）《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ 169-2018）；

（29）《国家危险废物名录》（2025 年版）；

（30）《有毒有害大气污染物名录（2018 年）》；

（31）《有毒有害水污染物名录（第一批）》（生态环境部国家卫生健康委员会公告2019 年第 28 号）；

（32）《危险化学品重大危险源辨识》（GB18218-2018）；

（33）《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》（GB18599- 2020）；

（34）《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2023）；

（35）《危险废物鉴别技术规范》（HJ 298-2019）；

（36）《固体废物鉴别标准通则》（GB 34330-2017）；

（37）《危险废物鉴别标准通则》（GB 5085.7-2019）；

（38）《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）；

（39）《危险废物识别标志设置技术规范》（HJ 1276-2022）；

（40）《危险废物收集 贮存 运输技术规范》（HJ 2025-2012）；

（41）《国民经济行业分类》（GB/T4754-2017）；

（42）《排污单位自行监测技术指南总则》（HJ819-2017）；

（43）《固定污染源排污许可分类管理名录》（2019 年版）；

（44）《排污单位环境管理台账及排污许可证执行报告技术规范总则（试行）》（HJ944- 2018）；

（45）《污染源源强核算技术指南准则》（HJ884-2018）；

（46）《核技术利用类建设项目环境影响评价文件审评大纲》（NNSA/HQ-08-SP-PP-021）；

（47）《甲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-005）；

（48）《核技术利用单位自行监测技术规范》（DB34/T 4571-2023）；

（49）《电离辐射工作场所监测的一般规定》（EJ 381-1989）；

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

1.3.4 其它文件、资料

（1）《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目初步设计报告（第一册 总论分册）》，2025年 10 月；

（2）《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目初步设计报告（第二册 工艺分册）》，2025年 10 月；

（3）《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程建议书》，2025 年 10 月；

（4）《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程可行性研究报告》，2026 年 1 月；

（5）《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目岩土工程初勘报告》，2026 年 3 月；

（6）《中国科学院合肥物质科学研究院放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告(2025年度)》，2026 年1 月。

1.4 评价标准

1.4.1 电离辐射评价标准

1.4.1.1 剂量限值和剂量约束值

⑴剂量限值

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

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）审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量（但不可做任何追溯性平均），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。

⑵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），参考同类型项目，**本评价以 5mSv/a 作为本项目的职业人员剂量约束值（针对本项目），以 0.1mSv/a 作为公众剂量约束值。**

事故工况下，单次工作人员个人剂量约束值为 10mSv，公众剂量约束值为 1mSv。

⑶事故分级

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例(2019修正)》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。

特别重大辐射事故，是指I类、II类放射源丢失、被盗、失控造成大范围严重辐射污染后果，或者放射性同位素和射线装置失控导致3人以上(含3人)急性死亡。

重大辐射事故，是指I类、II类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致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III类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致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IV类、V类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射。

1.4.1.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

结合本项目特点并参考同类型项目，本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平按照表 1-20 执行。

表 1-20 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

分区	剂量率控制水平	居留因子	备注
1	Dr≤2.5μSv/h	T>1/2	各墙体外表面30cm处
2	10μSv/h≤Dr	T≤1/2	各墙体外表面30cm处
3	Dr≤100μSv/h	——	不需要人员到达并只有借助工具才能进入的楼顶外表面30cm处

1.4.1.3 非密封放射性物质工作场所分级

⑴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，见表 1-21。

表 1-21 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	$>4\times10^{9}$
乙级	2×10^{7}-4×10^{9}
丙级	豁免活度值以上-2×10^{7}

⑵放射性核素日等效操作量的计算

放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际操作量（Bq）与该核素毒性组别修正因子的积除以与操作方式有关的修正因子所得的商，即：

$$日等效最大操作量=\frac{日实际操作量\times毒性组别修正因子}{操作方式修正因子}$$

放射性核素的毒性组别修正因子及操作方式有关的修正因子分别见表 1-22 和表 1-23。放射性核素的毒性分组见 GB18871-2002 附录 D。

表1-22 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

表1-23 操作方式与放射源状态修正因子

操作方式	放射源状态			
	表面污染较低的固体	液体、溶液、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
简单操作	10	1	0.1	0.01
特别危险的操作	1	0.1	0.01	0.001

按照附录D，本项目涉及的核素^{3}H毒性组别属于低毒组。

1.4.1.4 表面污染水平

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），工作人员体表、内衣、工作服，以及工作场所的设备和地面等表面放射性污染的控制应遵循附录B表B11 所规定的限制要求。详见表 1-24。

表 1-24 工作场所的放射性表面污染控制水平

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

注：根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），氚和氚化水的表面污染控制水平可为表B11（即上表）中所列数值的10倍。

1.4.1.5 放射性废物管理要求

⑴放射性废气

本项目的含氚废气主要是氚气（HT）和氚化水（HTO），监测结果需满足表 1-25 中的相关排放限值方可排放。

表 1-25 含氚废气排放限值

废气	排放限值（Bq/m³）
HT	3.7×10^{7}
HTO	5×10^{3}
总计	3.7×10^{7}

⑵放射性废液

本项目可能排放的放射性废液主要是含氚废水。本项目放射性废液排放前需进行取样监测。本项目放射性废液监测结果需满足表1-26及表1-27中相关排放限值方可排放，接管入市政污水管网至望塘污水处理厂处理。

表 1-26 《综合污水排放标准》（GB 8978-1996）总 β 排放限值

目	活度浓度，Bq/L
总β	10

表 1-27 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）排放限值

核素	单次排放限值 $1ALI_{min}$，Bq	单月排放限值 $10ALI_{min}$，Bq
H-3	4.76E+08	4.76E+09

⑶放射性固体废物

本项目运行期间可能产生的放射性固体废物主要包括废旧的实验品和运维产生的防护器具等。

根据《放射性废物分类》，本项目运行期间放射性固体废物中相关核素的解控水平列于表 1-28。

表 1-28 放射性固体废物中相关核素的解控水平

核素	活度浓度，Bq/g
H-3	100

1.4.2 非放射性评价因子及评价标准

1.4.2.1 评价因子

本项目非放射性评价因子识别详见表 1-29。

表 1-29 非放射性评价因子识别一览表

环境要素	现状评价因子	影响评价因子	总量控制因子
大气环境	CO、O_3、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、PM_{10}	颗粒物、SO_2、NO_x	SO_2、NO_x、烟（粉）尘
地表水	pH、COD、BOD_5、NH_3-N、SS	pH、COD、BOD_5、NH_3-N、SS	COD、NH_3-N
声环境	等效连续A声级	等效连续A声级	/
生态环境	土地利用、动植物、水土流失等		/

1.4.2.2 评价标准

⑴环境质量标准

①环境空气质量标准

项目所在区域环境空气功能区划类别为二类区，环境空气中 SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO、O_3 执行《环境空气质量标准》（GB3095-2026）中的二级标准，根据标准，各污染物项目的具体浓度限值分阶段执行，具体标准值详见表 1-30、表 1-31。

表 1-30 环境空气质量标准（2031年1月1日前），单位：μg/m³

污染物项目	过渡阶段浓度限值				标准来源
	小时平均	日平均	年平均	日最大8小时平均	
SO_2	500	150	60	/	《环境空气质量标准》（GB3095-2026）表1二级标准
PM_{10}	/	120	60	/	
$PM_{2.5}$	/	60	30	/	
NO_2	200	80	40	/	
CO	10000	4000	/	/	
O_3	200	/	/	160	

表 1-31 环境空气质量标准（2031年1月1日起），单位：μg/m³

污染物项目	浓度限值				标准来源
	小时平均	日平均	年平均	日最大8小时平均	
SO_2	150	50	20	/	《环境空气质量标准》（GB3095-2026）表1二级标准
PM_{10}	/	100	50	/	
$PM_{2.5}$	/	50	25	/	
NO_2	200	50	30	/	
CO	10000	4000	/	/	
O_3	200	/	/	160	

②地表水环境质量标准

区域地表水南淝河水体执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中IV类水标准；董铺水库、滁河干渠、王小河水体执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中III类水标准，评价项目具体标准值见表 1-32。

表 1-32 地表水环境质量标准，单位：mg/L ，pH 无量纲

项目	标准值	标准来源	标准值	标准来源
pH	6~9	《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）IV类标准	6~9	《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类标准
CODcr	≤30		≤20	
BOD_5	≤6		≤4	
氨氮	≤1.5		≤1.0	

③声环境质量标准

建设项目所在区域声环境执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）中 1 类声功能区标准。项目拟建场址南侧为杨岗路、西侧为谭岗路，均为现有次干道，因此南场界、西场界执行4a类标准；北厂界与东厂界执行1 类标准。具体标准值见表 1-33。

表 1-33 声环境质量标准 单位：dB(A)

标准类别	昼间	夜间	适用区域
《声环境质量标准》（GB3096-2008）中1 类	55	45	北场界、东场界
《声环境质量标准》（GB3096-2008）中4a类	70	55	南场界、西场界

⑵污染物排放标准

①水污染物排放标准

本项目废水主要为循环冷却废水和生活污水。项目循环冷却废水和生活污水等一同接管入望塘污水处理厂处理后，达标排放，尾水排入南淝河。建设项目废水排放执行望塘污水处理厂接管标准。望塘污水处理厂尾水排放执行《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》（DB34/2710-2016），其中未规定污染物指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级标准中A 标准限值要求，具体标准值见表 1-34、表 1-35 所示。

表 1-34 本项目废水排放标准 单位：mg/L

项目	单位	限值	备注
pH	/	6~9	望塘污水处理厂接管标准
COD	mg/L	320	
BOD_5	mg/L	180	
NH_3-N	mg/L	30	
SS	mg/L	220	

表 1-35 望塘污水处理厂排放标准　　单位：mg/L

项目	单位	限值	备注
pH	/	6~9	《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》（DB34/2710-2016）
COD	mg/L	40	
NH_3-N	mg/L	2（3.0）	
BOD_5	mg/L	10	《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）
SS	mg/L	10	
注：括号外数值为水温>12℃时的控制指标，括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。			

②大气污染物排放标准

包层研发楼在包层材料批量化制备过程中会产生一定量的大气污染物，各环节执行标准如下所示：

1）熔炼炉、熔化炉、热处理炉、加热炉烟气排放执行《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078-1996 标准，具体如下。

表1-36 《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078-1996

炉型	排放浓度（mg/m^3）		无组织排放烟（粉）尘最高允许浓度（mg/m^3）
	烟（粉）尘	铍及其化合物（以Be计）	
熔炼炉	100	0.010	25
熔化炉	150		5
热处理炉	200		5
加热炉	200		5

2）制粉、造粒、球磨、筛分产生的颗粒物、HCL、铍及其化合物执行《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）中标准限值，具体如下。

表1-37 《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）

污染物	最高允许排放浓度（mg/m^3）	最高允许排放速率		无组织排放监控浓度限值	
		排气筒高度（m）	二级（kg/h）	监控点	浓度（mg/m^3）
颗粒物	120	15	3.5	周界外浓度最高点	1.0
HCl	150	15	0.30		0.25
铍及其化合物	0.015	15	1.3×10^{-3}		0.001

3）无组织有机废气排放执行《挥发性有机物无组织排放控制标准》（GB37822-2019），具体如下。

表1-38 《挥发性有机物无组织排放控制标准》（GB37822-2019）

污染物项目	特别排放限值（mg/m³）	限值含义
非甲烷总烃	6.0	监控点处1h平均浓度值

③噪声排放标准

施工期噪声排放执行《建筑施工噪声排放标准》（GB12523-2025），运营期场界噪声执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）中的 1 类标准限值要求，具体标准详见下表。

表 1-39 噪声排放标准

时期	位置	声功能区类别	标准值	
			昼间dB(A)	夜间dB(A)
施工期	场界	1类	70	55
营运期	场界	1类	55	45
		4类	70	55

④固体废物控制标准

危险固废执行《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2023）。

1.5 评价范围和保护目标

1.5.1 电离辐射评价范围和保护目标

⑴电离辐射评价范围

本项目内容为新增使用甲级非密封放射性物质工作场所。本项目主要的辐射环境影响途径为辐射工作人员内照射以及运行期间排入环境的放射性气体对公众可能造成的辐射影响。

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）“1.5 节评价范围和保护目标”中的规定，“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”。参照 HJ 10.1-2016的要求，**考虑到氚的特殊性，本项目电离辐射环境影响评价范围取项目拟建场址向外1000m的范围。**

⑵电离辐射环境保护目标

本项目辐射环境影响评价范围内不涉及自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象。保护目标以本项目相关的辐射工作人员、场所周围活动的其他非辐射工作人员以及公众为主，详见图 1-12、表 1-40。

表 1-40 本项目电离辐射评价范围保护目标情况表

位置	方位	距离，m	保护目标	类型	人数
项目拟建场址内	氚实验楼内部		各涉氚实验验证平台	职业人员	30
			不涉氚实验验证平台及中控室等	公众	6
			安保室、武警岗亭等	公众	4
	南	25~65	包层研发楼	公众	48
	西南	30	门卫室	公众	2
项目拟建场址外	南	180~934	聚变堆主机关键系统综合研究设施园区（CRAFT南区）	公众	300
	南	845~1000	紧凑型聚变能实验装置（BEST园区、在建）	公众	315
	南	970~1000	合肥综合性国家科学中心能源研究院	公众	400
	西南	680~1000	东瞿村	公众	600
	西北	888~1000	汪堰村	公众	500
	西北	280~480	吴郢村	公众	已搬迁
	东北	588~925	柴冲村	公众	230

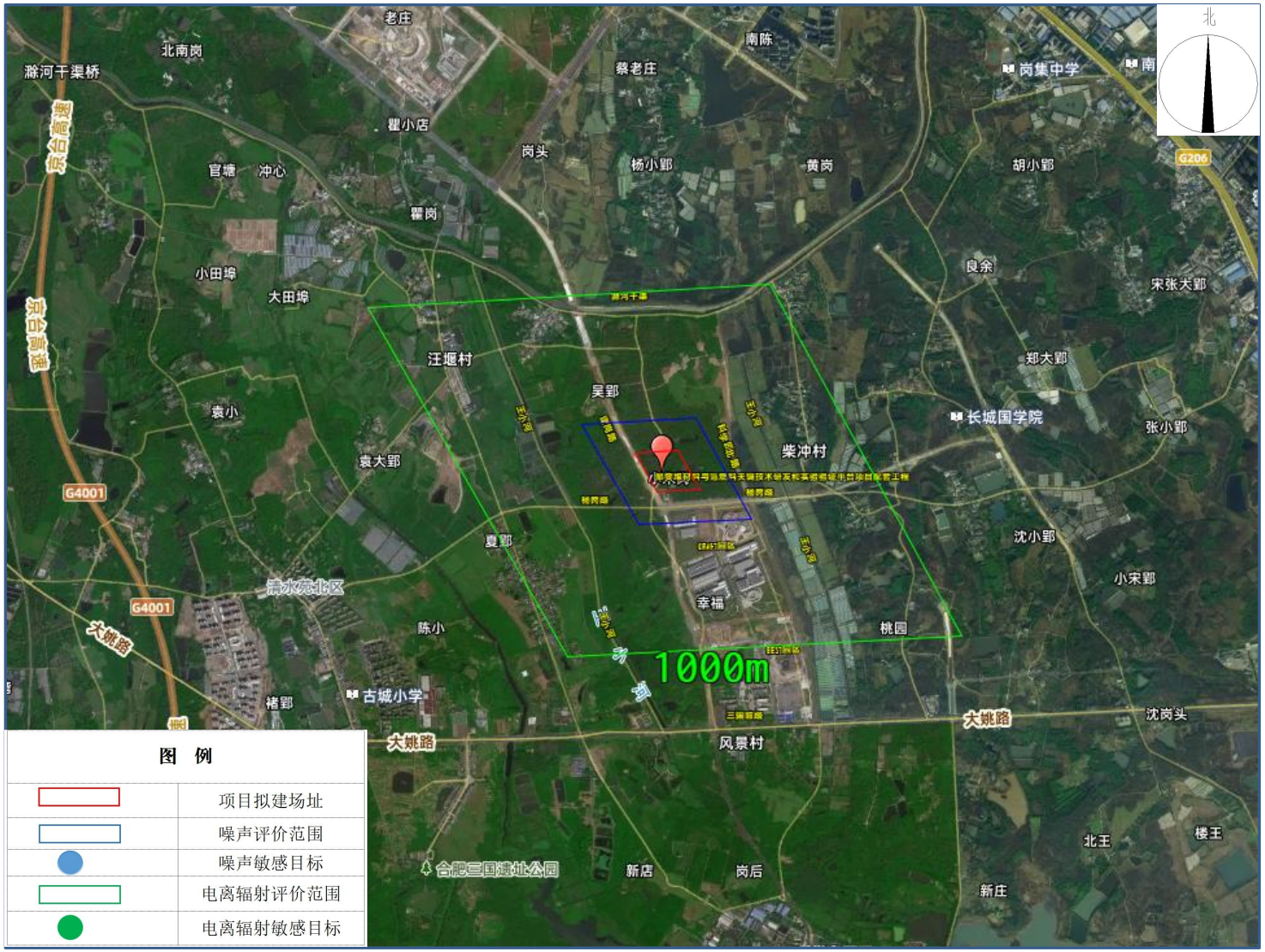


图 1-12 本项目电离辐射评价范围及保护目标示意图

1.5.2 非放射性评价范围和保护目标

1.5.2.1 评价工作等级

⑴大气评价工作等级

本项目正常工况下有粉尘、烟尘、HCl、硅氯烷（$SiCl_4$/$SiCl_2$）等大气污染物，包层研发楼所涉及装置均为实验研发设备，非生产型设施，大气污染物产生量小，且具有间歇排放不连续的特点；项目应急柴油发电机属于备用设备，使用频率低，只有在市政供电都发生故障时，才开启使用。总体看，项目产生废气量很小且持续时间短，不会对周围大气环境产生明显影响，故不再进行大气环境影响评价分析。

⑵地表水评价工作等级

本项目废水主要为循环冷却废水和生活污水。循环冷却废水和生活污水一同接管入望塘污水处理厂处理后，达标排放，尾水排入南淝河。建设项目废水排放方式属于“间接排放”，根据《环境影响评价技术导则 地表水环境》（HJ2.3-2018）相关规定，本项目地表水评价等级为三级 B。

表 1-41 地表水评价等级判定表

评价等级	判定依据	
	排放方式	废水排放量Q/（m^3/d）；水污染物当量数W/（无量纲）
一级	直接排放	Q≥20000或W≥600000
二级	直接排放	其他
三级A	直接排放	Q＜200且W＜6000
三级B	间接排放	—

⑶声环境影响评价工作等级

根据《环境影响评价技术导则·声环境》（HJ2.4-2021）：建设项目所处的声环境功能区为GB3096规定的1类、2类地区，或建设项目建设前后评价范围内声环境保护目标噪声级增高量达3dB（A）-5dB（A），或受噪声影响人口数量增加较多时，按二级评价。

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，项目所处的声环境功能区为 GB3096-2008 规定的 1 类区，因此，确定本次声环境影响评价工作等级为二级。

⑷生态环境评价工作等级

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，占地为科研用地，项目现状为空地，包括拆迁区、荒地、水塘，项目范围内未经人工整平，场地起伏较大，场地内无污染源及建筑物。距离本项目最近的生态红线为王小河（董铺水库饮用水水源二级水域保护区），南侧的安徽庐阳董铺国家湿地公园距离本项目场地边界最近距离为 1862m 。王小河属于董铺水库饮用水水源二级水域保护区，距离本项目场界约为 259m ，王小河与北侧滁河干渠相接处设有闸口，主要功能是作为董铺水库的清水通道，在必要时将闸口打开，将滁河干渠中的水引入董铺水库。建设项目所在区域雨水均经市政雨水管网收集后排入王小河，最终汇入董铺水库。

本项目施工活动均在项目占地范围内进行，施工活动不占用生态红线和安徽庐阳董铺国家湿地公园。施工期产生的施工废水经场地内设置的沉淀池等装置处理后尽可能的回用于施工场地洒水降尘等，多余部分与施工人员产生的生活污水一同接管入市政污水管网进望塘污水处理厂处理，施工废水和施工人员生活污水均不外排，项目与王小河及安徽庐阳董铺国家湿地公园之间无水力联系，不会对其产生影响。项目南侧1862m处为安徽庐阳董铺国家湿地公园的合理利用区和宣教展示区，不涉及其湿地保育区，施工噪声不会对保育区内的动物生境产生影响。

本项目运营期主要从事氚循环及其辐射安全的科研活动。经预测，本项目运营期噪声可以满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）相关标准要求，运营期噪声不会对保育区内的动物生境产生影响。

项目运行期有少量大气污染物产生，经过净化处理后均可以做到达标排放；废水主要为循环冷却废水和职工生活污水，经市政污水管网进望塘污水处理厂处理，达标排放，尾水排入南淝河。本项目与王小河及安徽庐阳董铺国家湿地公园之间无水力联系，不会对其产生影响。

综上所述，本项目不占用生态保护红线和安徽庐阳董铺国家湿地公园，影响途径和影响范围不涉及生态保护红线和安徽庐阳董铺国家湿地公园。

根据《环境影响技术评价导则 生态影响》（HJ19-2022），本项目不涉及国家公园、自然保护区、世界自然遗产、重要生境、自然公园。项目地表水评价等级为三级B，地下水水位或土壤影响范围内不涉及天然林、公益林、湿地等生态影响保护目标。项目占地面积远小于 20km^2 ，故生态环境影响进行三级评价。

⑸土壤环境评价工作等级

根据《环境影响评价技术导则·土壤环境（试行）》（HJ964-2018）中附录A·土壤环境影响评价项目类别，项目所属行业为“其他行业”，土壤环境影响评价项目类别为IV类项目，可不开展土壤环境影响评价。

⑹环境风险评价等级

对照《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ169-2018）附录B中重点关注的危险物质及临界量，项目涉及的危险物质主要为应急柴油发电机使用的燃料—柴油。

因此，对照《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ169-2018）附录B以及《危险化学品重大危险源辨识》（GB18218-2018），本项目实验验证、使用、储存过程中涉及的有毒有害、易燃易爆危险物质储存量及临界量见下表。

表1-42 危险物质储存量及临界量一览表

序号	物质名称	最大储存量/t	临界量/t	危险物质数量与临界量的比值/Q
1	柴油	1.6	2500	0.00064
备注：本项目共设置两台应急柴油发电机，单台最大储油量为0.8t。				

由上表分析可知，本项目危险物质储存量与其临界量的比值Q为0.00064，Q＜1，根据《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ169-2018）附录C，该项目环境风险潜势为I。

根据《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ169-2018）4.3，环境风险评价工作等级划分表。判定本项目的评价工作等级为简单分析。

表1-43 环境风险影响评价工作等级划分表

环境风险潜势	IV、IV^+	III	II	**I**
评价工作等级	一	二	三	**简单分析**

⑺ 地下水环境评价等级

①行业类别

根据《环境影响评价技术导则·地下水环境》（HJ610-2016）中附录A（地下水环境影响评价行业分类表），项目属于“V 社会事业与服务业”中“163、专业实验室”和“164、研发基地”中的“其他项目”，地下水环境影响评价项目类别为IV类项目。

表1-44 评价工作等级分级表

项目类别 环境敏感程度	I类项目	II类项目	III类项目
敏感	一	一	二
较敏感	一	二	三
不敏感	二	三	三

②地下水环境敏感程度

建设项目的地下水环境敏感程度可分为敏感、较敏感、不敏感三级。

表1-45 地下水环境敏感程度分级表

敏感程度	地下水环境敏感特征
敏感	集中式饮用水水源（包括已建成的在用、备用、应急水源，在建和规划的饮用水水源）准保护区；除集中式饮用水水源以外的国家或地方政府设定的与地下水环境相关的其它保护区，如热水、矿泉水、温泉等特殊地下水资源保护区。
较敏感	集中式饮用水水源（包括已建成的在用、备用、应急水源，在建和规划的饮用水水源）准保护区以外的补给径流区；未划定准保护区的集中水式饮用水水源，其保护区以外的补给径流区；分散式饮用水水源地；特殊地下水资源（如矿泉水、温泉等）保护区以外的分布区等其他未列入上述敏感分级的环境敏感区[a]。
不敏感	上述地区之外的其它地区。
注：a“环境敏感区”是指《建设项目环境影响评价分类管理名录》中所界定的涉及地下水的环境敏感区。	

项目拟建场址位于董铺水库饮用水源准保护区内，因此，项目地下水环境敏感程度为敏感。根据建设项目地下水影响评价工作等级划分表，项目地下水环境评价等级判定为简单分析。

1.5.2.2 评价范围

参照相关环境影响评价技术导则规定，根据本项目的特点及周围自然环境状况确定本次评价范围见下表 所示。

表 1-46 本项目评价范围一览表

评价内容	评价范围
地表水	望塘污水处理厂排污口上游500m 至下游5000m
声环境	项目周边200m 范围内
生态环境	项目占地范围

1.5.2.3 主要环境保护目标

⑴地表水环境保护目标

本项目地表水环境主要环境保护目标详见表 1-47。

表 1-47 地表水环境保护目标

环境要素	名称	保护对象	规模	环境功能区	相对场址方位	相对厂界距离（m）
地表水环境	南淝河	地表水	小型	IV类	SE	8554
	董铺水库	地表水	大型	III类	S	2890
	王小河	地表水	小型	III类	E	259
	滁河干渠	地表水	小型	III类	N	845

⑵声环境保护目标

项目噪声评价范围如下图所示，本项目场界外 200m 范围内涉及聚变堆主机关键系统综合研究设施园区(CRAFT南区)、CRAFT园区110千伏变电站，本次评价将聚变堆主机关键系统综合研究设施园区(CRAFT南区)列为声环境保护目标。



图 1-13 建设项目噪声评价范围图

（3）生态环境保护目标

本项目生态环境保护目标详见表 1-48。

表 1-48 生态环境保护目标

保护目标	保护内容	与本项目位置关系
场地内生态系统	项目拟建场地内树木、草地等生态系统	场地内

本项目与安徽庐阳董铺国家湿地公园关系详见图1-9，与周边生态保护红线、永久基本农田之间的位置关系详见图1-10。

第二章 自然环境与社会环境状况

2.1 地理位置

本项目拟建场址位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角。三十岗乡隶属于安徽省合肥市庐阳区，地处合肥市西北部，董铺水库北岸，东与大杨镇相连，南邻董铺水库与蜀山区井岗镇相望，西与肥西县高刘镇接壤，北隔滁河干渠与长丰县岗集镇毗邻。

2.2 自然环境状况

2.2.1 地形地貌

三十岗乡地势南低北高，东低西高，地形为丘陵。最高点海拔 56 米，最低点海拔29米。

根据《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目岩土工程初勘报告》，拟建场地位于合肥市庐阳区，场地现状为拆迁区、荒地、水塘。拟建场地属江淮波状平原地貌单元，原始微地貌为岗地。勘察范围内未经人工整平，场地起伏较大，实测勘探孔孔口高程在44.90～49.00m之间，最大相对高差为5.10m。

2.2.2 地质条件

拟建场地一级构造单元属于中朝准地台，二级构造单元为江淮台隆。构造位置处于华北板块南部边缘，南部为大别山造山带，东侧以郯庐断裂带为界，其形成与演化与这两大构造体系密切相关，是两者共同作用下形成的中新生代残留盆地。

自第四纪以来，合肥地区的新构造运动明显继承了早期构造运动的特点，并受其严格控制，池河—西山驿断裂以东为相对上升的低山丘陵区，而该断层以西为相对下降的平原区，这是自燕山运动初期就已经形成的地貌格局。地壳表现为大幅度的水平和垂直升降运动，并以振荡性垂直升降运动为主。由于间歇性升降运动，使低山丘陵和分水岭地带继续上升，其两侧相对下沉，形成了逐渐降低的层状地貌带，使流水地质作用加强，河流地质作用和河流地貌发育，合肥地区广泛堆积了第四系松散沉积物。

根据《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目岩土工程初勘报告》，勘探所测深度范围内的地基土体类型及其物理力学性质如下：

①层杂填土：整个场地均有分布，厚度变化较小，土质不均匀，承载能力差。工程性能评价为“差”；

②层黏土：硬塑状态。场地内广泛分布，勘探深度范围内厚度变化较小，土质较为均匀，承载力较高。工程性能评价为“较好”。

③层黏土：硬塑状态。场地内广泛分布，勘探深度范围内厚度变化较小，土质较为均匀，承载力较高。工程性能评价为“较好”。

④$_1$层强风化泥质粉砂岩：场地内广泛分布，勘探深度范围内厚度有一定变化，土质较为均匀，承载力高。工程性能评价为“较好”。

④$_2$层中风化泥质粉砂岩：属软岩，场地内广泛分布，厚度大，粉砂质结构，层状构造，泥质胶结。节理、裂隙发育，土质好，承载力高，物理力学性质较均匀。工程性能评价为“良好”。

拟建场地表层主要为耕植土，局部堆土区厚度较大，主要为黏性土，夹有机质土、砖石等。局部①层土厚度较大，主要分布在场地顶层，整体呈松散～稍密状态，场地原状地貌岗地。填土来源部分为附近建设场地弃土，回填时间约3年，不均匀、高压缩性。根据工程经验具有湿陷性，湿陷等级为I级。地基稳定性差，不宜作为基础持力层。根据区域地质资料，拟建场地未见活动构造断裂带通过，拟建场地范围内及周边未见崩塌、滑坡、泥石流、采空区等对工程有影响的不良地质作用。在勘察范围内未发现埋藏的河道、沟浜、墓穴、防空洞、孤石等对工程不利的埋藏物。

2.2.3 地下水

根据《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目岩土工程初勘报告》，本场地地下水主要为上层滞水，承压水。

上层滞水主要赋存于①层土表层裂隙中，勘探期间测得水位为43.90m（埋深为1.00m）该层地下水主要由大气降水渗入、地表渗透补给，通过蒸发、下渗及地下水径流排泄，地下水径流方向与地表水的径流方向基本一致。该层地下水受大气降水、季节、气候影响，变化较大。

拟建场地②、③层土主要为黏性土，渗透系数低，为隔水层。

④$_1$层及④$_2$层中的孔隙水、裂隙水，属承压水，勘探期间为平水期，稳定水位为35.50m（埋深为10.00m）。该层地下水主要依靠降水及地下水径流补给，主要以下渗及地下水径流排泄。

经调查，本场地未有被淹没的历史，历史最高地下水位在自然地面下1m左右，近3～5年最高地下水位在自然地面下1.5m左右。根据近年来在本地区勘测资料，该场区水位随季节变化，秋冬季节水位低，春夏季节水位高。地下水年变化幅度范围在1.0～2.0m。

2.2.4 地表水

三十岗乡地处丘陵地带，属淮河流域。项目所在地附近地表水水体为南淝河和巢湖。

南淝河（纳污水体）：南淝河，古称施水，长江流域巢湖的支流。发源于合肥市西北部江淮分水岭东南侧，跨蜀山区、长丰县两地交界处高刘镇岗北村何老家村民组西北侧的红石桥。经鸡鸣山，向东南流入董铺水库，穿合肥城区，再转向东南流经合肥市包河区和肥东县边界，于施口注入巢湖。南淝河全长 70 公里，流域面积 1700 平方公里。

巢湖：我国五大淡水湖泊之一，属长江下游左岸水系，距合肥市约 15km 。巢湖流域面积 13350km2，其中巢湖闸以上 9130km2，多年平均水位为 8.31m，平均水深 3.06m ，水位变化幅度平均为 2.5m，水位为 7.5～7.8m 时湖泊水域面积约 760km2。巢湖沿岸入湖河流有店埠河、南泥河、派河、十五里河、丰乐河、杭埠河、兆河等 33 条水系，主要通过裕溪河与长江进行水交流，因建巢湖闸和裕溪河闸，巢湖由原来的过水性河流性湖泊变成了受人工控制的半封闭、封闭式湖泊，其水域的水基本上不与长江水交流。

董铺水库：董铺水库位于安徽省合肥市西北近郊，距市中心约 7 公里，巢湖支流南淝河上游，大坝坐落在二环路旁 ，是一座以合肥城市防洪为主，结合城市供水、郊区农菜灌溉及发展水产养殖等综合利用的大型水库。董铺水库集水面积 207.5 平方公里 。 1956 年建库时，设计总库容 1.73 亿立方米。1978 年加高加固后，提高到 2.42 亿立方米。

滁河干渠：滁河干渠是集农业灌溉、城市防洪、城市供水、旅游观光于一体的大型水利工程。沟通江淮两水系，横跨合肥市中部全境，西起肥西县新民坝，劈将军岭穿越江淮分水岭，沿分水岭南绕肥西县、长丰县、庐阳区、 瑶海区、肥东县曲折东流，经滁河注入长江，全长 100.61 km。

根据《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目岩土工程初勘报告》，项目所在区域地表水主要由大气降水补给，拟建场地地势平缓，地表水经地表径流汇入低洼处。本场地地表水主要由场地外地表水径流及降雨补给，场地地表水排泄主要以地表径流、下渗和蒸发为主。

2.2.5 气候气象

庐阳区境地处中纬，东距海洋仅 450 千米，受海洋影响较大，属北亚热带季风气候。气候温润，四季分明，春季天气多变、冷暖无常，初夏多梅雨，盛夏多炎热，秋季降温快，冬季干冷，雨雪较少。一年四季冬季最长，夏季次之，春季最短，日照充足，光能资源丰富。

根据气象部门历年资料分析表明，庐阳区域年平均气温 15.8℃, 最热月（7月）平均气温28.3℃, 极端最高气温41.0℃, 最冷月（1 月）平均气温2.1℃, 极端最低气温-2.6℃。年均日照时数 2218 小时，平均气压 1012.5 百帕。年均蒸发量 1514.7 毫米，年均相对湿度 76%。冬、秋季节风向以东北偏南为主，常年主导风向为东北偏东，年平均风速 2.7 米/秒，静风频率 18%，全年大风（8 级以上）日数 10.6 天。年均农耕期 336天，无霜期 226~230 天，冰冻期 80 天。年降雨量适中，年均降水量 988.4 毫米，最大年降水量 1541.9 毫米，最小年降水量 557.3 毫米，但分配不均匀，夏季暴雨较多，占年降水量 42%，春秋次之，冬季降水最少，仅占年降水量 11%，季风气候显著，旱、涝灾害频繁。

2.2.6 土壤

庐阳区土壤以黄棕壤、水稻土两类为主要土壤，其余为石灰(岩)土、紫色土和砂黑土。土壤计为5个土类，12个亚类，103个土种。黄棕土壤遍及全境，成土母系下蜀黄土。该土壤土层较厚，质地粘重，阻水、阻气，在30厘米深以上形成滞水层，水分难以向下渗透。降雨时上层滞水，即从地面流失，雨过天晴，土壤很快又变干，出现龟裂。适耕期短，肥力低，理化性质也差。此土壤俗称黄泥或“黄泥板子”。农民形容为“下雨流不歇，晴

天大开裂”，还有“雨天一包脓，晴天一块铜”之说。水稻土呈黄白色或青灰色，下部有细砂层、砾石层，其成土母质为下蜀黄第四纪堆积物。原成土母质，经过人类长期耕作水稻后，逐渐发育形成一种特殊类型的耕作土壤。该土主要分布于巢湖沿岸低洼圩区及中部波状丘陵旁中间。该土壤在上旁地肥力较差，下旁地及十阶地平坦地带，肥力较高，低洼地带，土性冷，团粒结构差，系石灰岩风化物，属自然土壤。市境内东部和西南低山残丘及舜耕山南麓，零星分布着紫色土和砂黑土。紫色土质地较轻，结构疏松，含有砂粘、砾石，成土母质为大别山红砂岩，含水性差，有机质贫乏。砂黑土（又称黑土)成土母质为黄泛沉积物，上部为黑土层，下部为砂石土层，故又名砂石黑土。黑土层一般厚度30厘米，颜色浅灰或暗灰，质地多属粘壤，无石灰反应，中性偏酸，有机质含量低；砂石层局部出现在70厘米左右浅土层，多数在两米以下深土层。砂黑土土壤组合变化，按地形从上到下划分为黄土、灰白土、黑黏土三个亚类。三亚类土都是质地黏重，土性冷，耐旱，易涝渍，是水、肥、气、热很不协调的一种土壤。此类土壤亦是适耕期短，耕作阻力大，难以耕种。

全区境域内土壤酸碱度适中，一般中性偏酸，较适宜各种作物生长。

2.2.7 地震

庐阳区位于合肥盆地东南缘、郯庐断裂带中南段西侧，属地震重点监视防御区（1996年列入）。主要控震构造包括郯庐断裂带（嘉山 — 庐江段）、合肥 — 六安断裂、蜀山断裂等，多为隐伏断裂。地震活动整体中等偏弱，以3 级左右小震为主，偶有 4—5 级地震波及。

2.3 社会环境概况

2.3.1 人口

2024 年，庐阳区常住人口 74.4 万人，比上年增加 1.1万人，常住城镇化率 99.44%。2024年，庐阳区户籍人口 55.2713万人。少数民族约 37 个，户籍少数民族约 0.66 万人，少数民族流动人口约 0.6万人。

2.3.2 经济

2024年，庐阳区全年生产总值（GDP）1323.84亿元，按不变价格计算，比上年增长4.7%。其中，第一产业增加值1.03亿元，增长2.9%；第二产业增加值228.71亿元，增长6.1%；第三产业增加值1094.10亿元，增长4.4%。三次产业结构为0.1:17.3:82.6。

2.3.3 教育

庐阳区驻有：安徽工业大学、安徽医科大学、安徽财经大学、安徽建筑大学、合肥滨湖职业技术学院、合肥工业大学、合肥师范学院、安徽中医药大学、合肥经济技术职业学院、安徽中澳科技职业学院、安徽工商职业学院、安徽信息工程学院、安徽艺术学院。

截至 2024 年，全区现有38所中小学，其中高中1所、初中10所、小学27所，高中在校学生2167人、初中在校学生25575人，小学在校学生72708人。

2.3.4 科技

2024年，庐阳区全年成功认定国家级高新技术企业148家，累计总数达到490家，同比增长9.87%；全年完成入库国家科技型中小企业674家，同比增长10.5%。全年实现技术合同交易额115亿元，同比增长21%；科技成果转化落地和科技招商新成立企业73家，就地转化科技成果200项。

2.3.5 医疗

截至 2024年末，庐阳区拥有医疗卫生机构（含村卫生室）353个，其中医院30个、卫生院1个、妇幼保健院（所、站）3个、疾控中心和专科疾病防治机构2个、社区卫生服务中心（站）24个。卫生机构床位数12802张，其中医院、卫生院床位11020张。卫生技术人员15907人，其中执业（助理）医师6230人、注册护士8191人。

2.4 辐射环境质量现状与评价

2.4.1 辐射环境现状调研

根据《2024 年安徽省生态环境状况公报》（安徽省生态环境厅，2025年 5 月）：

2024 年，全省γ辐射空气吸收剂量率（含宇宙射线贡献值）平均值为 100.7 nGy/h，范围为 66~155 nGy/h 。全省 17 个辐射环境自动监测站采集的大气气溶胶中放射性核素水平未见异常，大气辐射环境处于正常本底水平。

2024 年，全省境内长江、淮河和巢湖流域地表水体中的总 α 放射性水平小于 0.08 Bq/L ，总 β 放射性水平小于0.3Bq/L ，总铀含量小于1.1 μg/L ，地表水体放射性核素活度浓度处于正常范围；全省设区市饮用水水源中地表水总 α 放射性水平小于0.15Bq/L ，总 β 放射性水平小于 0.24Bq/L ，地下水总 α 放射性水平小于 0.10Bq/L ，总β 放射性水平范围为 0.03~0.16 Bq/L，饮用水水源总放射性水平处于正常水平范围。

2024 年，全省设区市土壤监测点中U-238 含量范围为 29.8~57.7 Bq/kg ，Th-232 含量范围为 51.0~83.0 Bq/kg ，Ra-226 含量范围为 27.4~50.6 Bq/kg ，K-40 含量范围为460.0~719.3 Bq/kg ，Cs-137 含量不大于 4.37Bq/kg ，Sr-90 含量不大于 1.22 Bq/kg ，监测点土壤中放射性核素活度浓度均为本底水平。

2024 年，在合肥市开展了城市电磁辐射（射频）环境质量监测，监测点位处电磁辐射水平范围为 0.65~1.38 V/m ，电磁环境质量状况良好。

2.4.2 辐射环境现状监测

2025年10月，中国辐射防护研究院对中国科学院合肥物质科学研究院聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目拟建场址所在区域开展了放射性本底调查和监测。调查报告详见附件 5 。

2.4.2.1 监测内容

电离辐射的调查范围和内容主要参考HJ61-2021中应用非密封放射性物质辐射环境监测方案，并根据场址特征和项目特点，将调查范围适当扩大至场址半径1km。调查内容见表2-1。

表 2-1 监测对象和监测项目

序号	调查对象	监测项目	监测频度	调查范围	点位数量	平行样品数量	样品个数
1	陆地环境γ辐射	瞬时γ剂量率	1次	1km	32	0	32

序号	调查对象	监测项目	监测频度	调查范围	点位数量	平行样品数量	样品个数
2	中子剂量当量率	中子剂量当量率	1次	拟建场址周边	5	0	5
3	气溶胶	总α、总β、^{7}Be	1次	1km	4	0	4
4	空气	^{3}H	1次		4	0	4
5	地表水	总α、总β、^{3}H	1次	1km	2	1	3
6	土壤	总α、总β、^{3}H	1次	1km	9	1	10
7	地表水沉积物	总α、总β、^{3}H	1次	1km	2	0	2
8	植物	总α、总β、有机氚、自由水氚	1次	1km	3	1	4

2.4.2.2 各分析项目的探测下限

探测下限是表示测量方法（或装置）所能发现的最小期望放射性水平，即当测量到的计数值≥探测下限时以（1-β）的把握推断样品中含有的最小期望放射性水平。*LLD*的计算公式为：

$$LLD=\frac{4.66}{\varepsilon\cdot\ \eta\cdot\ Y\cdot\ W}\sqrt{\frac{n_b}{t_b}}$$

式中：n_b为t_b时间内的本底计数率，ε为探测效率，η为探测核素发射该能量的几率，Y为化学回收率，W为测量样品的重量或体积。

本报告提供的探测下限是特定的具体条件下的估计值。其主要条件是：α=β=0.05；在低水平计数时样品加本底的总计数与本底计数相近；样品测量时间与本底测量时间应足够长。

各环境介质的γ谱测量探测下限和放化分析方法探测下限计算方法如下：

⑴气溶胶样品中^{7}Be探测下限根据下式计算：

$$LLD=\frac{4.66\cdot\sqrt{N_b}}{\varepsilon\cdot\eta\cdot t\cdot m}\text{，Bq/kg}$$

式中：

N_b----测量时间为t时的本底计数；

ε----γ谱仪对核素发射某一能量γ光子的探测效率；

η----核素发射该能量光子的几率；

t----测量时间，s；

m----被测样品的体积，m^3。

⑵氚的探测下限按下式计算：

$$LLD=\frac{4.66\cdot\sqrt{\frac{n_b}{t}}\cdot m_2}{60\cdot E\cdot K\cdot m_1\cdot V};$$

式中：

n_b----本底计数率，cpm；

t----样品测量时间，min；

m_1----液闪制样水重，g；

m_2----解析的水重，g；

E----仪器对氚的探测效率；

K----电解浓集倍数；

V----样品量。

⑶总α、总β方法探测下限的计算公式为：

$$LLD=\frac{4.66}{\varepsilon\cdot\eta\cdot Y\cdot W}\sqrt{\frac{n_b}{t}}$$

式中：

n_b----t时间内的本底计数率；

ε ----探测效率；

η ----为探测核素发射该能量的几率；

Y ----化学回收率；

W----为测量样品的重量或体积。

根据上式计算出的探测下限的结果见表2-2。

表2-2 各类样品分析方法的探测下限

序号	调查对象	样品用量	分析核素	测量时间	探测限
1	气溶胶	$1000m^3$	总α	1000min	$15\mu Bq/m^3$
		$1000m^3$	总β	1000min	$5\mu Bq/m^3$
		$10000m^3$	γ谱分析	80000s	^7Be:$0.1mBq/m^3$
2	空气	$10m^3$	^3H	1000min	$8.0mBq/m^3$
3	土壤、地表水沉积物	0.2g	总α	1000min	2.0mBq/L

序号	调查对象	样品用量	分析核素	测量时间	探测限
		0.2g	总β	1000min	5.0mBq/L
		/	^{3}H	1000min	0.15Bq/kg
4	地表水	3L	总α	600min	2.0mBq/L
		3L	总β	600min	5.0mBq/L
		250mL	^{3}H	1000min	0.14Bq/L
5	生物	0.2g灰	总α	1000min	66Bq/kg灰
		0.2g灰	总β	1000min	21Bq/kg灰
		20g鲜样	有机氚	400min	1.10Bq/kg鲜
		/	自由水氚	400min	1.84Bq/kg鲜

2.4.2.3 仪器设备

本次调查中所使用的仪器设备清单见下表。

表 2-3 所使用仪器设备清单

序号	仪器设备名称	型号规格	数量	用途
1	HPGeγ谱仪	GR3019	1	γ谱测量
2	低本底α/β测量仪	LB770	2	总放测量
3	低水平液闪谱仪	Quantulus 1220	1	^{3}H测量
4	低水平液闪谱仪	Tri-Carb 3170TR/SL	1	
5	便携式X-γ剂量率仪	RP3000B	1	γ剂量率测量
6	大流量TSP采样器	2031	5	气溶胶采样
7	空气氚采样器	定制	1	空气氚采样

2.4.2.4 调查结果与分析

⑴环境γ辐射空气吸收剂量率

①点位布设

按照距离场址半径500m、1km与16个方位角形成的扇形区域内布点，布点覆盖了全部子区，共设置32个测量点，监测频次为单次。

由于场址周边没有符合标准要求的淡水水面开展宇宙射线测量，因此，使用太原晋阳湖测量的宇宙射线响应值，并根据标准HJ61-2021中附录D修正方法对宇宙射线响应值进行修正。

②监测结果

宇宙射线响应值是使用太原市晋阳湖面测量响应值，并通过标准HJ61-2021附录D中修正方法修正到测量点的结果。修正后宇宙射线响应值为36.9。所有剂量率测量结果均已扣除宇宙射线成分。

γ辐射空气吸收剂量率测量点位共计32个，于2025年5月进行了测量。全部点位测量结果均值为92.7±17.1 nGy/h，最低值出现在NE方位1km处点位，最高值出现在NE方位500m处点位。

γ辐射空气吸收剂量率测量结果见表2-4和图2-1。

表2-4 γ辐射空气吸收剂量率测量结果

序号	点位名称	点位坐标	γ辐射空气吸收剂量率测量结果
			(nGy/h)
1	N方位500m	N31°57′09.43″ E117°08′47.33″	79.9±9.9
2	N方位1km	N31°56′43.35″ E117°08′51.26″	103±13
3	NNE方位500m	N31°56′55.97″ E117°09′03.92″	77.2±10.9
4	NNE方位1km	N31°56′44.25″ E117°08′58.05″	75.8±8.0
5	NE方位500m	N31°56′35.73″ E117°09′00.44″	124±6
6	NE方位1km	N31°56′47.17″ E117°09′18.49″	48.5±9.9
7	ENE方位500m	N31°56′35.69″ E117°09′05.96″	73.3±6.6
8	ENE方位1km	N31°56′37.93″ E117°09′20.58″	91.1±7.1
9	E方位500m	N31°56′39.29″ E117°09′11.51″	93.8±6.3
10	E方位1km	N31°56′27.07″ E117°09′23.70″	86.3±6.1
11	ESE方位500m	N31°56′24.73″ E117°09′12.24″	107±8
12	ESE方位1km	N31°56′18.19″ E117°09′25.51″	115±7
13	SE方位500m	N31°56′18.74″ E117°09′10.93″	109±5
14	SE方位1km	N31°56′14.20″ E117°09′23.81″	106±8
15	SSE方位500m	N31°55′34.16″ E117°09′11.02″	96.1±5.7
16	SSE方位1km	N31°56′15.84″ E117°09′01.06″	100±4

序号	点位名称	点位坐标	γ辐射空气吸收剂量率测量结果
			(nGy/h)
17	S方位500m	N31°56′15.75″ E117°08′54.19″	95.3±5.4
18	S方位1km	N31°56′05.45″ E117°09′03.06	100±8
19	SSW方位500m	N31°56′05.27″ E117°08′47.94″	64.2±5.5
20	SSW方位1km	N31°56′19.76″ E117°08′50.10″	82.0±5.9
21	SW方位500m	N31°56′12.57″ E117°08′34.98″	103±5
22	SW方位1km	N31°56′22.57″ E117°08′49.72″	69.0±6.2
23	WSW方位500m	N31°56′27.95″ E117°08′48.41″	98.6±6.4
24	WSW方位1km	N31°56′19.31″ E117°08′21.25″	109±5
25	W方位500m	N31°56′30.90″ E117°08′46.02″	109±6
26	W方位1km	N31°56′53.64″ E117°08′18.47″	115±5
27	WNW方位500m	N31°56′35.29″ E117°08′45.79″	78.1±6.6
28	WNW方位1km	N31°56′42.93″ E117°08′20.63″	87.0±9.6
29	NW方位500m	N31°56′40.67″ E117°08′45.01″	77.1±6.0
30	NW方位1km	N31°56′43.89″ E117°08′39.15″	87.7±5.4
31	NNW方位500m	N31°56′59.22″ E117°08′43.78″	99.3±7.9
32	NNW方位1km	N31°56′43.75″ E117°08′46.48″	76.4±4.3
平均值			91.8
标准差			16.9

注：测量结果已扣除宇宙射线响应

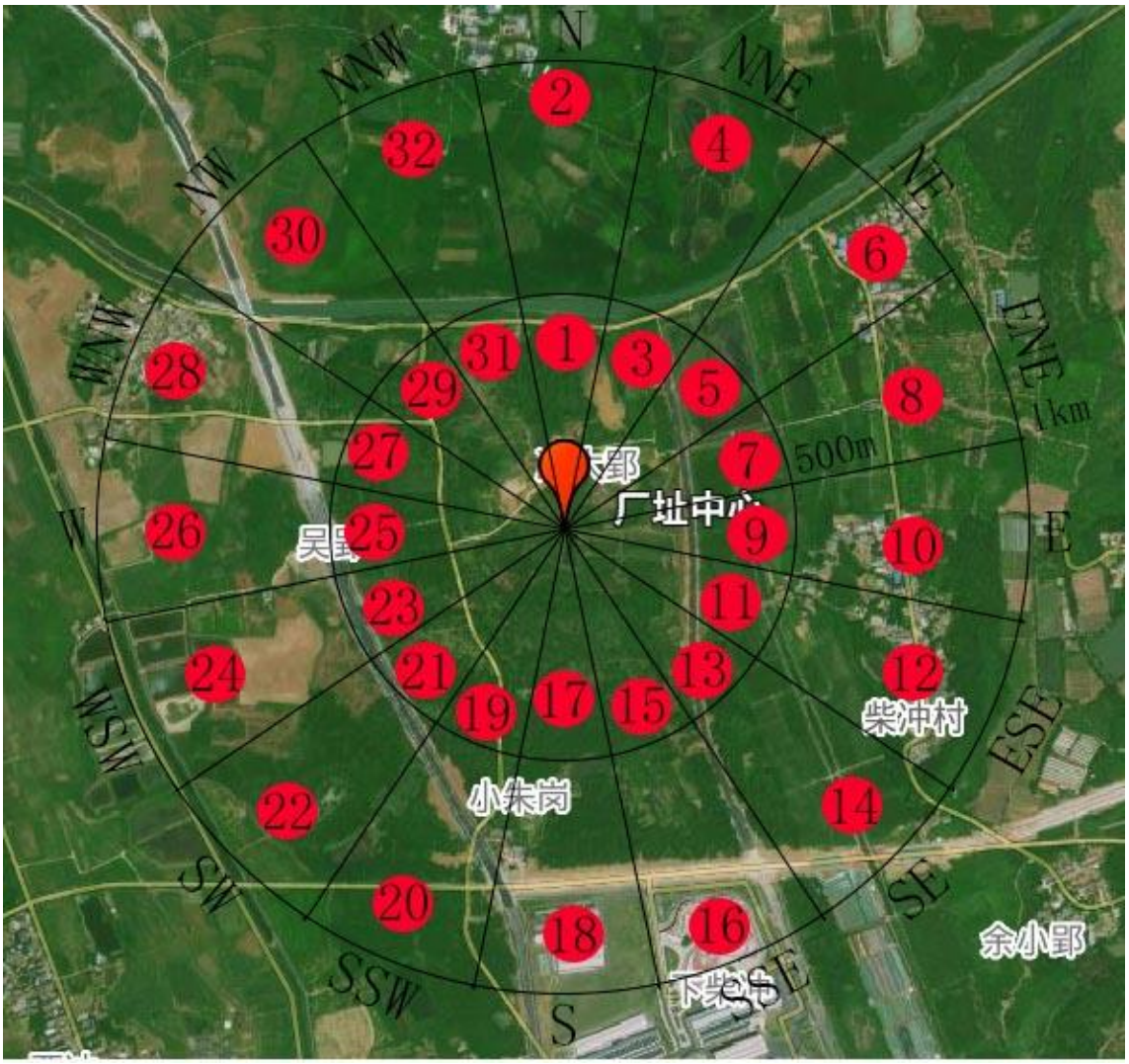


图2-1 γ辐射空气吸收剂量率监测点位示意图

⑵中子剂量当量率

①点位布设

在拟建场址的东、南、西、北四个边界，共设置4个测量点，并在南侧聚变设施场区边界布设1个测量点，共5个测量点，监测频次为单次。测量点位见表2-5和图2-2。

②监测结果

中子剂量当量率监测结果均小于探测限，测量结果具体见表2-5。

表 2-5 中子剂量当量率测量结果

序号	点位名称	中子剂量当量率
		（μSv/h）
[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]

序号	点位名称	中子剂量当量率 （μSv/h）
[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]

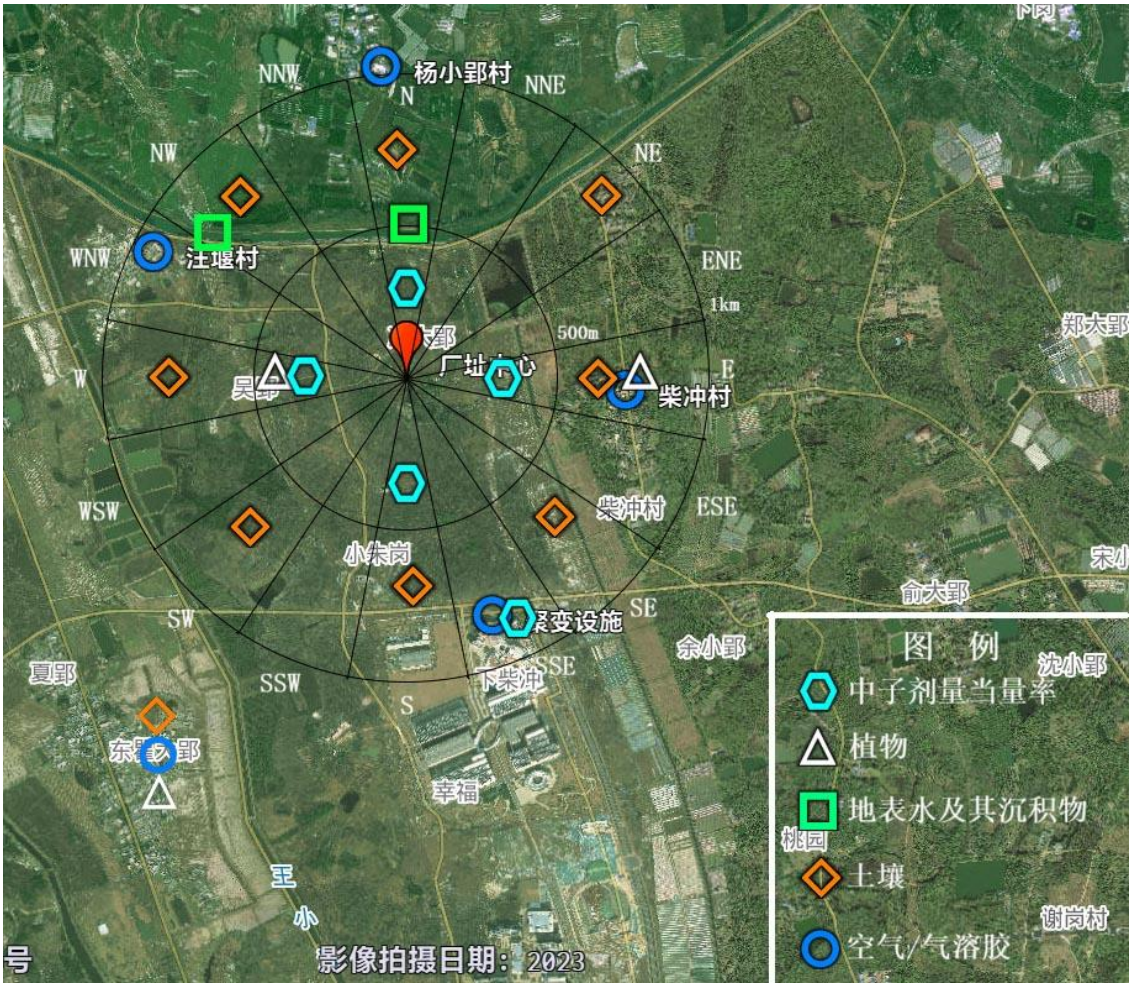


图 2-2 辐射环境现状监测布点示意图

⑶气溶胶和空气

①点位布设

气溶胶和空气的调查范围为1km，共布设5个采样点，[redacted]采样点位具体见表2-6和图2-2。

气溶胶分析项目为总α、总β、^{7}Be，空气分析项目为^{3}H，所有项目监测频次均为单次。

表2-6 气溶胶和空气采样点位

序号	点位名称	经纬度坐标	方位	距离（km)	备注
[redacted]					

②监测结果

所有样品的测量结果均高于探测限，气溶胶样品测量结果具体见表2-7。空气样品测量结果具体见表2-8。

表 2-7 气溶胶检测结果

序号	样品编号	点位名称	总α	总β	^{7}Be
			(mBq/m^{3})	(mBq/m^{3})	(mBq/m^{3})
1	HFL2505QR001	[redacted]			
2	HFL2505QR002				
3	HFL2505QR003				
4	HFL2505QR004				
5	HFL2505QR005				

注：^{7}Be测量结果参考日期为2025年6月28日

表 2-8 空气检测结果

序号	样品编号	点位名称	^{3}H	^{3}H
			（Bq/L水）	(mBq/m^{3})
1	HFL2505QH001	[redacted]	[redacted]	[redacted]
2	HFL2505QH002	[redacted]	[redacted]	[redacted]
3	HFL2505QH003	[redacted]	[redacted]	[redacted]
4	HFL2505QH004	[redacted]	[redacted]	[redacted]
5	HFL2505QH005	[redacted]	[redacted]	[redacted]

⑷土壤

①点位布设

土壤共布设9个采样点，[redacted]，采样点位置见表2-9与图2-2。

土壤分析项目为总α、总β和^{3}H，监测频次为单次。

表2-9 土壤采样点位

序号	点位名称	方位	距离（km）	经纬度	备注
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.97	N31°57′09.43″ E117°08′47.33″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.82	N31°56′40.67″ E117°08′45.01″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.90	N31°56′35.73″ E117°09′00.44″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.77	N31°56′30.90″ E117°08′46.02″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.75	N31°56′27.07″ E117°09′23.70″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.73	N31°56′14.20″ E117°09′23.81″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.76	N31°56′05.45″ E117°09′03.06″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.80	N31°56′22.57″ E117°08′49.72″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.86	N31°56′42.93″ E117°08′20.63″	/

②监测结果

除SW方位1km处的^{3}H测量结果小于探测限外，其余所有测量结果均高于探测限，土壤样品测量结果具体见表2-10。

表2-10 土壤测量结果

序号	样品编号	点位名称	总α	总β	^{3}H
			Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
[redacted]					

⑸地表水及其沉积物

①点位布设

场址周边地表水系较为匮乏，本次调查将地表水及其沉积物采样点布设在距场址中心最近的滁河干渠，共布设2个采样点，分别布设在滁河干渠的上游和下游。测量点位具体见表2-11和图2-2。

地表水及其沉积物的分析项目包括总α、总β和^{3}H，监测频次均为单次。

表2-11 陆地水体监测点位

样品名称	点位名称	方位	距离（km)	经纬度	备注
地表水及其沉积物	滁河干渠上游	NW	0.83	N:31°56′43.35″ E:117°08′51.26″	场址最近河流
	滁河干渠下游	N	0.49	N:31°56′40.67″ E:117°08′45.01″	场址最近河流

②监测结果

地表水及其沉积物样品均给出了总α、总β和^{3}H的测量结果，地表水样品测量结果具体见表2-12、地表水沉积物样品测量结果具体见表2-13。

表 2-12 地表水测量结果

序号	样品编号	点位名称	总α	总β	^{3}H
			Bq/L	Bq/L	Bq/L
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

表 2-13 地表水沉积物测量结果

序号	样品编号	点位名称	总α	总β	^{3}H
			Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

⑹生物

[redacted]采集野生树叶样品。采样点位置见表2-14与图2-2。

生物的分析项目包括总α、总β、有机氚和组织自由水氚，监测频次均为单次。

表2-14 生物采样点位

序号	点位名称	方位	距离（km）	经纬度	备注
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.76	N31°56′02.95″ E117°09′23.70″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	0.82	N31°56′31.53″ E117°08′18.47″	/
[redacted]	[redacted]	[redacted]	1.52	N31°56′42.93″ E117°08′20.63″	/

②监测结果

所有样品测量结果均高于探测限，生物样品测量结果具体见表2-15。

表 2-15 生物检测结果

序号	样品编号	点位名称	总α	总β	有机氚	组织自由水氚
			(Bq/kg鲜)	(Bq/kg鲜)	(Bq/kg鲜)	(Bq/kg鲜)
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

2.4.3 小结

对本项目拟建场址及周围环境辐射环境质量现状的调查结果表明，拟建场址及周围环境的辐射环境现状水平未见异常。

2.5 非放射性环境现状与评价

2.5.1 大气环境质量现状调查与评价

根据合肥市生态环境局网站发布的《2023年合肥市生态环境状况公报》和《2024年合肥市生态环境状况公报》中环境空气质量数据，项目区域环境空气基本污染物质量现状见表 2-16。

表 2-16 区域空气质量现状评价表

污染物	年评价指标	现状浓度		标准值（μg/m³）	占标率（%）		达标情况
		2023 年	2024 年		2023 年	2024年	
SO_2	年平均质量浓度	7	6	60	11.67	10.00	达标
NO_2	年平均质量浓度	31	27	40	77.50	67.50	达标
PM_{10}	年平均质量浓度	62	57	70	88.57	81.43	达标
$PM_{2.5}$	年平均质量浓度	34	33.7	35	97.14	96.29	达标
CO	95%日平均质量浓度	900	1000	4000	22.50	25.00	达标
O_3	90% 8h 平均质量浓度	150	153	160	93.75	95.63	达标

由上表判定可知，本项目所在区环境空气中基本污染物均满足《环境空气质量标准》（GB3095-2026）中二级标准。因此，判定合肥市为环境空气质量达标区。

2.5.2 地表水环境质量现状调查与评价

根据《2023年合肥市生态环境状况公报》中水环境质量状况可知，合肥市饮用水源地董铺水库和大房郢水库，2023年所监测的各项指标均值符合GB3838－2002《地表水环境质量标准》III类水质标准，达标率为100%。南淝河水质由轻度污染好转为良好，主要污染指标中，南淝河的氨氮、化学需氧量和总磷，均呈下降趋势。南淝河氨氮、化学需氧量和总磷浓度分别为0.91mg/L 、16.0mg/L 和0.170 mg/L，较去年同期分别下降24.17% 、6.43%和17.87%。

根据《2024 年合肥市生态环境状况公报》中水环境质量状况可知，合肥市饮用水源地董铺水库和大房郢水库，2024年所监测的各项指标均值符合GB3838－2002《地表水环境质量标准》III类水质标准，达标率为100%。南淝河总体水质保持优良，主要污染指标中，南淝河的氨氮和总磷浓度均呈下降趋势。南淝河氨氮和总磷浓度分别为0.74mg/L和0.163mg/L，较去年同期分别下降18.68%和4.12%；十五里河氨氮浓度为0.44mg/L，较去年同期下降2.22%。

2.5.3 声环境质量现状调查与评价

根据声环境保护目标调查结果，本项目边界外 200m 范围内有一处声环境保护目标(聚变堆主机关键系统综合研究设施园区)。为了解项目所在区域的声环境质量现状，2026年4月7日，项目建设单位委托中国建材检验认证集团安徽有限公司开展了环境质量现状监测。监测情况如下：

⑴监测因子：等效连续 A 声级（dB（A））。

⑵监测方法：执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）。一般情况下，测点选在敏感点外1m、高度1.2m以上。同步记录监测日天气状况、环境温度、环境湿度、风速及监测点经纬度，监测应在无雨雪、无雷电天气，风速5m/s以下时进行。

⑶监测布点：在拟建场址四周各布设 1 个监测点、CRAFT 园区南区、CRAFT 园区 110 千伏变电站各布设 1 个监测点。噪声监测布点图见下图。

表2-17　声环境监测布点及监测条件一览表

监测因子	监测时间	气象条件	监测内容	
环境噪声	2026 年 4 月 7 日	天气状况：晴；温度：25.4℃；湿度：34%	6 处	高 1.2m 处



图2-3　环境噪声质量现状监测布点示意图

⑷监测仪器

表2-18　监测使用的仪器、仪表

监测仪器名称	型号	仪器性能	仪器编号	检定/校准有效期
积分声级计	AWA5688	28dB~133dB（A）	ACTC-SB-289	2026.02.09 至 2027.02.08
声校准器	AWA6021A	标准声压级：94dB 和 114dB	ACTC-SB-184	2026.02.09 至 2027.02.08

⑸监测结果

表2-19　声环境质量现状监测结果一览表

编号	监测点位	昼间	夜间
1#	项目拟建场址西场界	51	42
2#	项目拟建场址北场界	55	38
3#	项目拟建场址东场界	48	37
4#	项目拟建场址南场界	50	39
5#	CRAFT园区南区	50	33
6#	CRAFT园区110千伏变电站	50	40

由监测结果可知：项目拟建场址南场界和西场界声环境昼间为50~51dB（A）、夜间为39~42dB(A)，均满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）4a类标准要求（昼间

70dB（A）、夜间55dB（A））；北场界和东场界声环境昼间为48~55dB（A）、夜间为37~38dB(A)，均满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）1类标准要求（昼间55dB（A）、夜间45dB（A））；CRAFT园区南区昼间为50dB（A）、夜间为33dB(A)，满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）1类标准要求（昼间55dB（A）、夜间45dB（A））；项目区域内声环境质量状况良好。

2.6 场址适宜性评价

本项目所在区域地质条件良好，没有影响装置安全稳定运行的颠覆性因素。

结合本项目特征辐射污染因子和电离辐射环境影响评价范围，区域周边社会环境相对简单，条件较好。

环境质量和辐射现状调查结果表明，项目区域的辐射环境质量良好，环境电离辐射水平均处于当地天然本底波动范围内。

综上所述，本项目选址适宜开展所申请的核技术利用活动。

第三章 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

3.1.1 项目规模与基本参数

未来聚变堆的建设需要确保掌握聚变堆材料与氚燃料研制关键技术。以未来聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证发展目标为指南，在广泛吸收国内外同行建议的基础上，项目提出以下技术方案。

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台是集成氚燃料循环、氚增殖技术、包层关键技术研究与验证于一体的综合研究平台，主要包括以下几大部分：

（1）氚循环和辐射安全实验系统，包括内燃料循环、外燃料循环、氚的安全防护、涉氚材料测试、介质除氚、涉氚部件维护及处理、氚辐射安全效应等实验平台；

（2）产氚包层关键技术研发和综合验证系统，包括包层材料批量化制备、包层原型模块先进制造、固态综合性能测试、液态综合性能测试等实验平台；

（3）辅助与智控系统，主要包括为整个平台的运行提供供电、冷却、通排风、公用技术和智能控制等系统。

拟建设平台的总体技术方案和系统之间逻辑关系分别如图3-1和图2-2所示，各子系统紧密结合，平台总体高度集成。

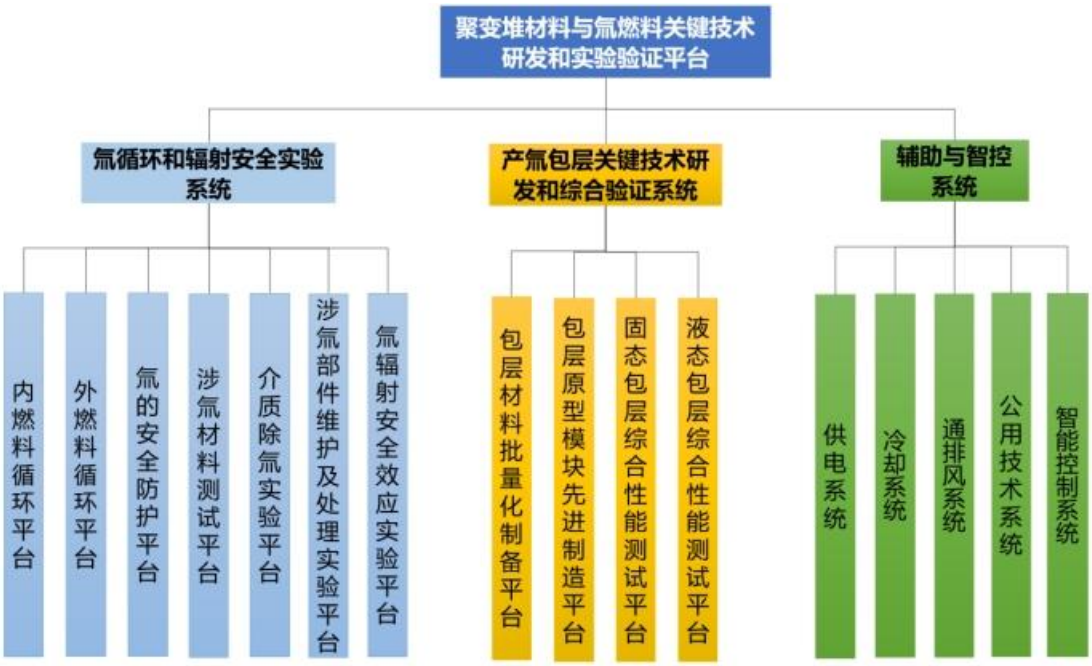


图3-1 总体技术方案

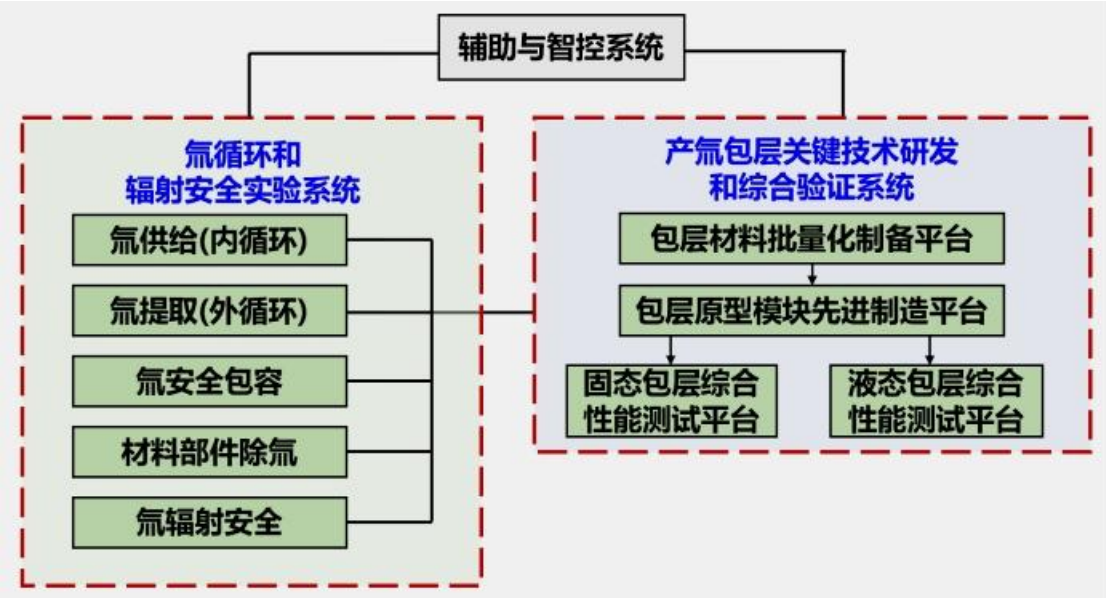


图3-2 各子系统逻辑关系图

平台项目主要建设内容为：建设氚循环和辐射安全实验、产氚包层关键技术研发和综合验证以及辅助与智控等3大系统。购置设备548台（套)，国产化率为96%。氚循环和辐射安全实验系统包括内燃料循环、外燃料循环、氚的安全防护等实验平台建设；产氚包层关键技术研发和综合验证系统包括包层材料批量化制备、包层原型模块先进制造及综合性能测试等实验平台建设；辅助与智控系统为整个平台的运行提供供电、冷却、通排风、公用技术和智能控制。

配套工程只涉及园区土建及配套基础设施建设，不含实验工艺、设施。具体建设内容为：总占地面积约100亩，总建筑面积约52873㎡，其中地上总建筑面积约43781㎡，包括氚燃料实验楼23231㎡、包层研发楼20350㎡和门卫室200㎡；地下总建筑面积约9092㎡，包括氚燃料实验楼7092㎡，包层研发楼2000㎡，并配套建设室外给排水、电气、道路、广场、绿化、停车场等工程。项目总投资估算65339.49万元（含土地购置费10350万元），其中30000万元由地方财政支持，剩余部分由项目建设单位多渠道筹措解决。

3.1.2 项目基本参数

作为氢的放射性同位素，氚在衰变过程中发射低能β射线，衰变为^{3}He。氚为纯β辐射体，β粒子的能量大约在0~18.6keV，没有任何γ射线伴随发射。氚不产生外照射危害，主要辐射危害为内照射。氚的部分核数据及氚的主要核辐射特征见下表。

表3-1 氚的主要核辐射特征

名　　称	特　性　数　据
衰变方式	β(100%)
半衰期/a	12.33
最大能量/keV	18.6
平均能量/keV	5.7
衰变常数/s^{-1}	1.783×10^{-9}
比活度/[×3.7×10^{10} Bq/g(T_2)]	9.6×10^{3}
比活度/[×3.7×10^{10} Bq/cm^3(T_2)]	2.58
比活度/[×3.7×10^{10} Bq/g(T_2O)]	2.65×10^{3}
单位质量衰变热功率/[W/g(T_2)]	0.324
单位活度衰变热功率/[W/(3.7×10^{16} Bq(T_2))]	3.32×10^{-5}
^{3}He(衰变产物)生成速率 1)/[cm^3/s·g(T_2)]	1.32×10^{-5}
^{3}He(衰变产物)生成速率 1)/[cm^3/(3.7×10^{10}(T_2)·s)]	1.38×10^{-9}

注:1) 以标准状态下的气体体积计。

表 3-2 本项目非密封放射性物质主要参数

核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量(Bq)	日等效最大操作量(Bq)	年最大用量（Bq）*	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
[redacted]									

3.2 工程设备与工艺分析

3.2.1内燃料循环平台

3.2.1.1 氘氚贮存与供给单元

⑴单元功能

氘氚贮存与供给单元是内燃料循环平台的三大主工艺单元之一，主要用于贮存与供给满足模拟500 MW聚变堆内、外燃料循环集成运行考核试验和专用考核测试平台所需的氘氚气体及定比例配制氘氚混合气；贮存与供给模拟第一壁清洗气或模拟中性束

注入气所需的含氚氘气；暂存外燃料循环单元和安全包容功能单元停机期间的含氚氢同位素气体；实现氚长期贮存及氘计量等。

⑵**主要设计参数**

根据功能需求分析和相关文件要求，氘氚贮存与供给单元的主要设计参数如下：

① 供气速率：模拟排灰气≥2.5 Nm^3/h，模拟中性束注入系统的氘供给≥2 Nm^3/h，合计≥4.5 Nm^3/h；

② 氢同位素气体贮存容量：≥40 Nm^3；

③ 氢同位素配气精度优于±1%。

⑶**工艺设计**

对于氢同位素气体的安全贮存，采用锆钴基固态储氢技术；对于氢同位素气体的定比例配制需求，采用流量控制+PVT-c相结合的气体配制技术；对于向其他单元系统供给氘氚燃料，采用流量控制+氚兼容转移增压技术来实现按需供给。

根据氢同位素气体贮存需求与初步设计输入，氘氚贮存与供给单元设计三个子单元：氘氚贮存与供给子单元、含氚氢气暂存与输送子单元和氚长期贮存子单元。

针对不同氚丰度氘氚气体的贮存与供给设计氘氚贮存与供给子单元；针对含氚氢气的暂存与转移设计含氚氢气暂存与输送子单元；针对氚的长期贮存需求设计氚长期贮存子单元。

表3-3 氢同位素气体贮存需求与初步设计

序号	气体种类	需求	设计贮存量
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
2	氘氚，T：10%—90%，H<0.5%其余为氘	[redacted]	[redacted]
3	氘，D≥90%，T＜10%, H<0.5%	[redacted]	[redacted]
4	氢，HT＞1%	[redacted]	[redacted]
5	氢，HT＜0.1%	[redacted]	[redacted]
6	氘氚，T＞20%，H<0.5%其余为氘	[redacted]	[redacted]

⑷安全设计

氘氚贮存与供给单元安全设计涵盖以下内容：

单元抗震设计：确保氘氚贮存与供给单元在地震事故条件下的安全性。采用ANSYS软件分析关键设备（如缓冲罐、贮存床等）在不同工况下的应力情况，对模型整体进行模态分析；基于模态分析结果，采用考虑地震反应谱法进行地震响应分析。

安全冗余设计：贮存床温度传感器和关键部位的氚兼容泵采用一用一备的安全冗余设计。关键用电设备如控制系统等双路供电，设置UPS，电力故障时可自动切换，可有效保障单元安全可靠运行。

安全联锁：针对单元控制设计逻辑互锁，避免误操作造成设备损坏。针对关键部位可能出现的超温和超压，设计安全联锁。

超压、超温保护：贮存床压力过高时，信号反馈，控制加热功率，或直接停止加热。贮存床的出口处配置泄压装置，气体可泄压至过压保护容器中；缓冲罐过压后，设置压力调节器调节压力。当压力过高时，可以将气体泄压至过压保护容器中；贮存床温度过高，引起控制系统报警。通过安全联锁控制加热器的加热功率或切断加热器的电源。

氚泄漏保护：设计氘氚燃料贮存与供给单元的整体漏率和关键部件漏率指标，选用氚兼容且具有良好密封性的设备，降低氚泄漏风险。对于关键组件（如压力容器、主工艺管道等），在焊接完成后进行全面的泄漏检测，对检测结果进行严格评定。

3.2.1.2 排灰气处理单元

⑴单元功能

氚循环和辐射安全实验系统中，为演示500MW聚变堆运行过程中所产生的等离子体排灰气、氚辉光放电、NBI尾气等含氢同位素气体的净化处理以及平台其他单元运行过程中产生的含氚气体净化处理需要，设计了排灰气处理单元（Tokamak Exhaust Processing，TEP）。排灰气处理单元主要采用钯膜渗透分离工艺，分离得到的高纯氢同位素气体送往燃料贮存与供给单元进行贮存或转运，或者送往内循环氢同位素分离单元进行同位素分离。处理后的低氚尾气送往排放气除氚单元进行深度除氚后排放。

排灰气处理单元的主要功能是对含氘氚气体进行净化回收处理，具体包括以下功能：

① 回收模拟等离子体排灰气中未燃烧的氘氚燃料；

② 回收模拟中性粒子束注入尾气的氘氚气；

③ 回收模拟氘辉光放电壁处理尾气中的氘氚气；

④ 回收实验平台内其他氚浓度较高气体中的氘氚气；

⑤ 对新型氢同位素气体净化技术进行集成验证考核。

⑵**主要设计参数**

排灰气处理单元（TEP）的主要设计参数包括：

① 等离子体排灰气净化处理速率不低于2.5Nm^3/h，中性束注入尾气/氘气辉光放电清洗气净化处理速率不低于2.0Nm^3/h；

② 净化后氢同位素纯度不低于99.999%，氢同位素回收效率不低于99.9%；

③ 处理后尾气氚浓度低于3.7×10^{9}Bq/m^3。

⑶**工艺设计**

排灰气净化子单元

排灰气处理单元主要采用“钯膜渗透分离”“催化反应+钯膜渗透”“钯膜反应器”等工艺对进行氘氚燃料进行净化回收。根据排灰气处理单元的功能，包含5个子单元，分别是排灰气净化子单元、NBI/氘辉光尾气净化子单元、低氢同位素气体处理子单元、循环处理子单元、末端处理子单元。排灰气处理单元的工艺流程图如下图所示。

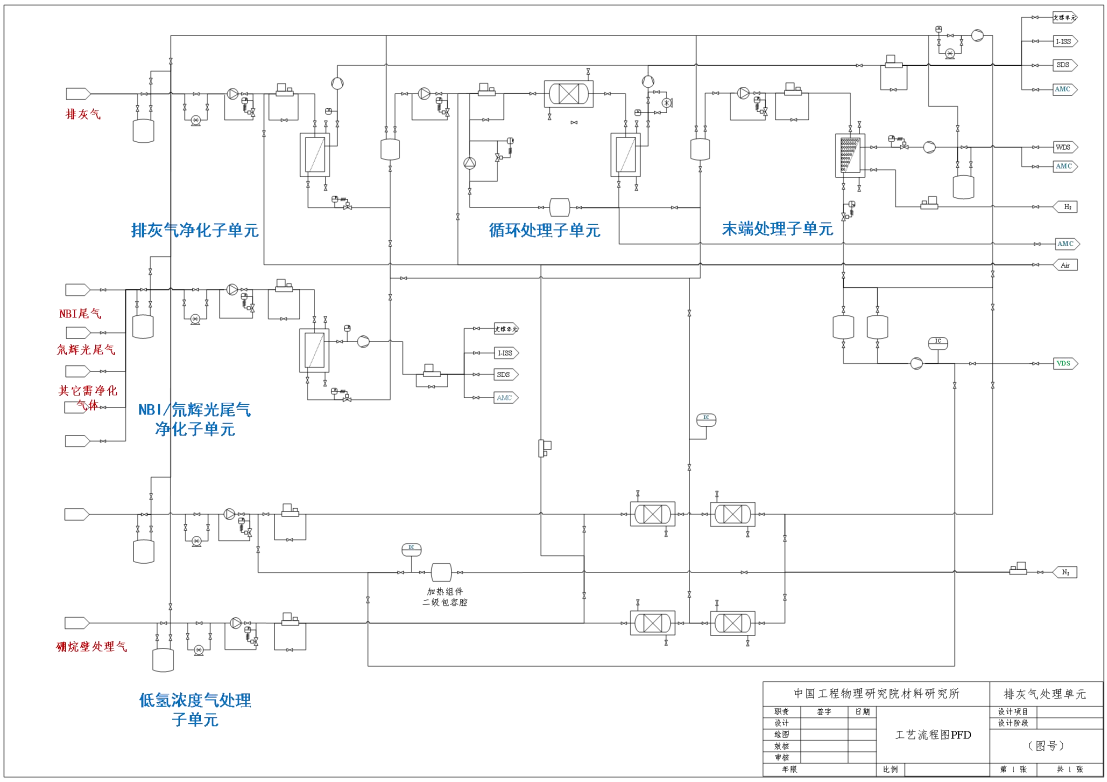


图3-3 排灰气处理单元工艺流程图

⑷**安全设计**

TEP单元主要从超温保护、防氚渗漏等方面进行安全方面的设计。加热器部件的温度采用监测专用温度传感器。如果实际温度显著高于设定温度，自动关闭加热器。在加热器关闭后，温度如仍在上升，则系统报警。同时，若温度达到设计温度，连入安全系统的另一个热电偶指示加热器报错。此时需要切断加热器电源防止设备进一步加热引发安全问题。加热部件均配置有包容腔体，对包容腔体的氚浓度实时监测，根据需要进行处理回收渗出的氚。加热部件出气口设计散热翅片，快速降低非包容管道温度，减少氚渗透。

3.2.1.3 低温精馏单元

⑴**单元功能**

根据聚变堆运行场景设计，氚工厂内燃料循环系统中氢同位素分离单元（ISS-I）的主要功能或任务包括两个方面：一是对经排灰气处理单元（TEP）纯化后的氢同位素气体进行部分同位素分离；二是对源于中性束注入器（NBI）的富氚氢同位素气体进行除氚处理。其中，对于经TEP纯化处理后的等离子体排灰气，目前考虑每次提取其中～40%进行同位素分离，制备燃料级纯氚及纯氚，用于补充加料，其余部分则直接

送入氘氚贮存与供给单元（SDS），经补充加料后直接作为燃料重新使用。对源于NBI及辉光放电工况的富氘氢同位素气体，经除氚处理后，获得的高纯氘将送入SDS作为NBI气源继续使用。针对上述分离要求，拟设计建造两组低温精馏工段来开展内循环氢同位素分离工况实验研究，以满足上述两种氢同位素气体的同位素分离需求。

以满足聚变功率为500MW、燃耗率为1%的聚变堆运行要求的设计基准，在氚工厂内燃料循环系统中，源于托卡马克等离子体排灰气的氢同位素气体流量约为2.5m^3/h，预计气体组分为T≥49.5%, D≥49.5%, H≤1%。为确保向托卡马克真空室加注的氘氚燃料中氕含量不高于10%，拟每次从经TEP纯化后的等离子体排灰气中提取约40%进行氢同位素分离，以制备高浓度氚（T≥90%, D～10%, H<0.5%）、高浓度氘（D≥98%）及氘氚混合物（D：T～1:1）来进行燃料组分调节，因此ISS-I需处理源于等离子体排灰气的氢同位素气体流量约为1m^3/h。而用于等离子体加热的NBI及辉光放电工况则预计将产生2 m^3/h的富氘氢同位素气体，其中氚含量约为0.1%, 其余为氘。对于来自NBI的氢同位素气体，主要分离要求是降低其中的氚含量，以获得可继续用于制作中性束的贫氚氘气（D≥99.5%, T<0.02%, H<0.5%）。在氢同位素分离过程中产生的氕，将被送往SDS暂存，后续进行进一步处理。

⑵**主要设计参数**

内循环氢同位素分离单元负责内燃料循环平台中氢同位素气体的富集与分离，主要设计处理对象及相应技术指标要求包括：

①内循环氢同位素分离单元最大处理量为3 Nm^3/h，其中轻重组分比例为1:1H/D的模拟排灰气处理量为1Nm^3/h，重组分氘含量约为1000ppm的模拟中性束注入及辉光放电清洗气体处理量为2Nm^3/h；

②针对最大流量为1Nm^3/h、轻重组分比例为1:1 H/D的模拟排灰气，分离得到的产品气氘丰度≥90%；

③针对最大流量为2Nm^3/h、重组分氘含量约为1000ppm的模拟中性束注入及辉光放电清洗气体，分离得到的目标产品气中，氘含量不高于200ppm。

⑶**工艺设计**

考虑氢同位素低温精馏装置运行过程铺底投氘量，内循环氢同位素分离单元拟设置两组氢同位素低温精馏工段开展不同工况实验研究。其中，第一组低温精馏工段配

置4根低温精馏柱，处理量3m³/h（源项TEP 1m³/h，源项NBI和辉光放电2m³/h）；第二组低温精馏工段同样配置4根低温精馏柱，处理量0.6m³/h（源项TEP 0.2m³/h，源项NBI和辉光放电0.4m³/h）。

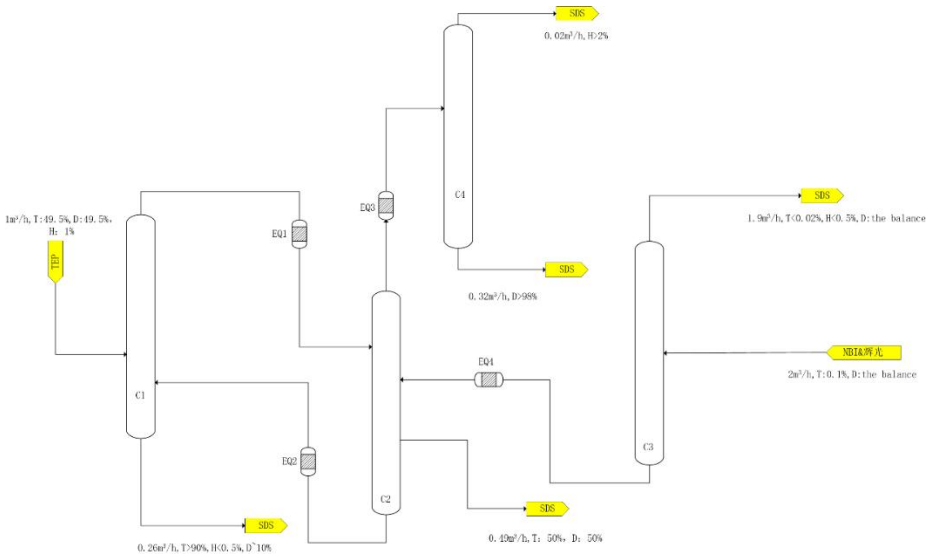


图3-4 3m³/h内循环氢同位素低温精馏工段流程图

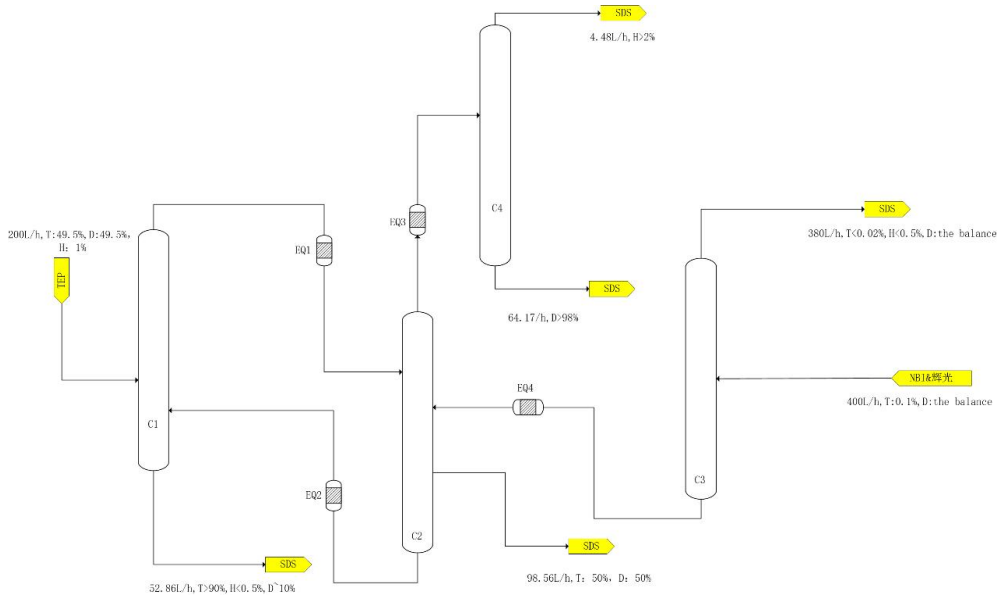


图3-5 0.6m³/h内循环氢同位素低温精馏工段流程图

氢同位素低温精馏工艺流程具体工艺流程包括：源自TEP的氢同位素气体经过预冷后进入精馏柱“C1”进行浓集分离，重组分高浓度氚产品（T≥90%, D～10%, H<0.5%）从精馏柱“C1”下端提取，而精馏柱“C1”上端轻组分提取物氚含量依然较高，因此通过300K平衡反应器进行氢同位素平衡反应后进入精馏柱“C2”进行进一步分离；经过精馏柱“C2”提纯分离后，下端采出物经由300K平衡反应器后返回精馏柱“C1”，上端产品需

进入精馏柱“C4”进行分离处理，精馏柱中段采出1:1氘氚混合产品；精馏柱“C3”主要处理源项NBI和辉光放电的氢同位素气体，上端采出用于制作中性束的贫氚氘气产品（D≥99.5%，T<0.02%，H<0.5%），下端采出流股进入精馏柱“C2”处理；精馏柱“C4”对精馏柱“C2”上端产品进行分离处理，精馏柱“C4”下端产品作为高浓度氚产品（D≥98%），而精馏柱“C4”上端采出将被送往SDS暂存，后续进行进一步的处理。

⑷**安全设计**

氢同位素的精馏是在20K左右的低温条件下进行，在该温度下，精馏柱系统中的绝大部分氢同位素以液态形式存在，若发生因停电、低温制冷机故障、冷箱真空破坏等意外事件导致精馏柱失冷，液氢大量蒸发气化会导致精馏柱超压，存在严重的安全隐患。此外，若发生精馏柱或管道破损，导致氢同位素气体泄漏到硬壳包层中，也需将泄漏的氢同位素气体及时回收转移，以免发生事故。针对上述潜在安全隐患，系统中需设置安全防护组件。精馏塔T10-3001和精馏塔T10-3002塔顶分别设置超压防护组件，安全阀和防爆片的额定工作压力将由精馏柱系统最高泄压压力Pmax决定。

3.2.1.4 氚分析与计量衡算单元

⑴**单元功能**

氚循环和辐射安全实验系统中，氚分析与计量衡算单元作为实验平台的运行支撑单元。其中：

氚分析单元主要负责燃料供给与处理实验、氚提取与回收以及氚安全包容三个实验平台工艺介质组分分析，实现气、固、液三种形态氚的准确可靠检测，具体包括贮氚床中固态氚化物、各系统含氚工艺气体，以及水除氚系统含氚水样等的分析检测。其分析范围涵盖高氚浓度（0.01% T_2～100% T_2）、低氚浓度（1×10^5Bq/m^3～1×10^{12}Bq/m^3）的含氚气体，以及氚活度浓度范围为10Bq/kg到10^{13}Bq/kg的含氚水样。

氚计量衡算单元主要负责实验平台中氚的盘存与衡算工作。

氚衡算单元总体设计方案以“全过程监控、精准量化、安全防护”为核心。该单元依据中华人民共和国《核材料管制条例》及其实施细则的要求，建立核材料衡算制度。在持有核材料期间，严格执行衡算工作：根据各平台特点划分材料平衡区，按核材

料类别进行衡算，并建立核材料衡算测量系统。同时，需定期向国家核材料管制办公室上报核材料账目与衡算报告。

⑵**主要设计参数**

实现氚循环系统内多形态氚的分析测量，完成氚循环系统氚的闭合衡算。系统指标为：

①固态贮存氚测量：氚总量测量准确度 ≤±0.5% FS，测量下限：25mg，分辨率1mg。

②液态氚化水测量：测量范围100Bq/L～10^6Bq/L，测量精度≤±5%。

③含氚气体测量：测量范围：0.01%vol～1%vol，测量精度≤±5%。测量范围：1%vol～100%vol，测量精度≤±1%。

③氚循环系统内氚计量衡算准确度≤±5%。

⑶**工艺设计**

氚分析系统对应的界面关系如下图所示，内燃料循环平台、外燃料循环平台和氚的安全防护平台均有接口。

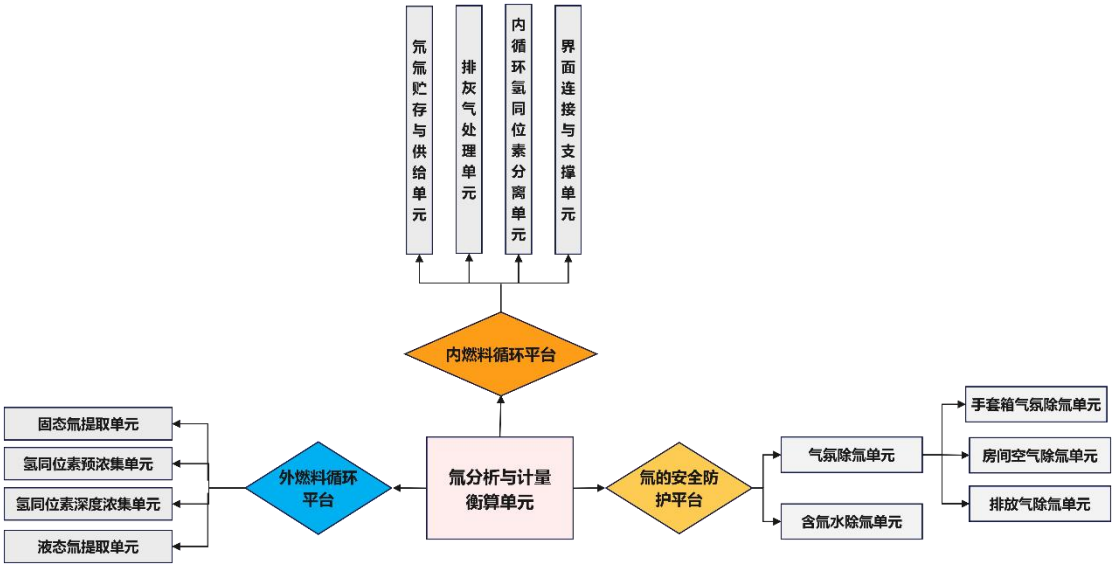


图3-6 氚分析与计量衡算单元与其他系统总体界面关系

基于各工艺系统分析需求及氚分析功能，氚分析系统规划为两个部分：

①工艺系统集成分析单元

各分析单元物理位置与工艺系统设备就近布置，空间布局遵循各工艺系统的整体规划。

在保持空间布局协调性的同时，分析单元的功能管理统一纳入氚分析系统体系。

通过集成化分析仪器仪表与工艺管线的直联安装，实现工艺气体成分的实时动态检测分析。系统采用模块化进样预处理单元，保障分析过程的连续稳定性。

连续监测模式：适用于关键工艺节点的实时浓度趋势监控（如氚浓度>1×10^5 Bq/m³区域）；

间歇监测模式：应用于辅助工艺段，按预设周期执行采样分析。

②离线分析与巡检校验区

设置气、液、固三个专业分析区，配置高精度氢同位素气体及水中氢同位素分析用质谱仪、气相色谱仪以及放射性测氚液体闪烁计数器、氚量热计等离线分析设备并配备放射性物质处理手套箱系统。

建立包含移动式检测设备及标准化样品制备的巡检标定平台，部署开展氢氚实验时所需的低分辨率磁质谱仪等氚水分析设备。

⑷安全设计

① 所有与含氚气体接触的部件（如管道、阀门、泵、分析仪气室）选用氚兼容性材料，如316L不锈钢、铜材、特定等级的铝合金等，以减少氚渗透和材料氢脆。

② 进样系统管道内表面进行电抛光或钝化处理，以降低表面粗糙度，减少氚的吸附和滞留，便于系统吹扫和去污。

③ 在系统关键点位（如采样入口、分析仪排气口、包容腔室内）安装连续工作的氚监测仪，监测空气中氚化水蒸气和氚化氢的浓度。

④ 监测数据实时传输至中央控制室，并设定多级报警阈值（如警告、报警、高报警）。报警须与通风系统联动，确保在浓度异常升高时能自动增强通风或隔离相关区域。

⑤ 配备便携式氚表面污染监测仪，用于日常巡检和维修前后的污染检查。

3.2.1.5 界面连接与支撑单元

⑴单元功能

界面连接与支撑单元的主要功能是为内燃料循环平台、外燃料循环平台以及氚循环和辐射安全实验系统、其他专用实验平台配制、供给含氚实验气体，并为氘氚贮存

与供给单元、排灰气处理单元和内循环氢同位素分离单元三个单元系统的独立运行调试以及内燃料循环平台的整体运行调试提供支撑。

界面连接与支撑单元主要由配气子单元、泵输转移子单元、暂存与安全子单元、仪控子单元等组成，该单元与其他单元、平台的功能界面关系如下图所示。

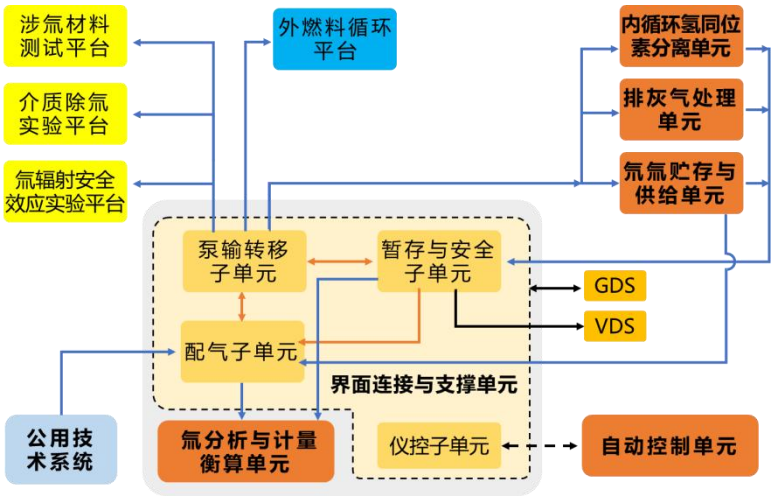


图3-7 界面连接与支撑单元的功能界面关系框图

⑵主要设计参数

针对氚循环和辐射安全实验系统运行要求，界面连接与支撑单元主要设计参数如下：

①可为氢同位素气体准确配制氢、氘及He、Ne、Ar、N_2、CO、CO_2、硼烷等多种杂质气体，对于高浓度组分（＞5%），配气精度优于±2%；对于中浓度组分（0.5%～5%），配气精度优于±5%；对于低浓度组分（200 ppm~0.5%），配气精度优于±10%。

②对氢同位素气体的最大泵输转移速率≥4.5 Nm^3/h。

⑶工艺设计

根据功能要求，界面连接与支撑单元包含三个关键子单元，分别是配气子单元、泵输转移子单元、暂存与安全子单元。

配气子单元基于高精度流量控制和流量积分可实现快速定比例配气，提供不同丰度的氢同位素气体或含多种杂质（He、Ne、Ar、N_2、CO、CO_2、硼烷等）的氢同位素气体。为提高配气精度，对混气罐体积进行标定，结合PVT-c法，监测其中含氚气体的温度、压力与组分浓度，并根据需要调整配气比例。

泵输转移子单元采用“氚兼容气体泵输转移与高精度压力与流量控制”，可为多个实验平台提供最高不低于4.5m^3/h的含氚气体泵输。泵输转移子单元主要由气体转移泵、流量控制器、压力控制器等组成，两路混气出口独立泵输供给，避免管道残留杂质气体相互影响，又可满足多个平台的含氚气体同时供给或互为备份。

暂存与安全子单元的功能是为内燃料循环平台提供实验气体暂存、循环与应急泄放，为平台内部各单元的独立调试提供条件，并具备为配气子单元和泵输转移子单元的容器与管道提供气体快速转移与抽空的能力。暂存与安全子单元主要由暂存罐、泄压罐、气体转移泵、真空泵组、流量控制器、压力控制器等组成，总计可提供10 Nm^3的气体暂存和10 Nm^3的泄压存储。

⑷安全设计

为了保证系统关键部件在事故状态下的安全性，首先围绕“器件－系统－完整性”三级分析框架，开展界面连接与支撑单元中关键部件的热水力分析、结构分析以及地震分析，确保单元器件在地震载荷下可以保证其结构完整性。

界面连接与支撑单元运行过程中，安全风险主要来自单元或部组件的超压以及氚的泄漏。涉及超压风险的组件主要包括气体缓冲罐，为此每个缓冲罐均设计了压力监测与安全联锁功能，当前端管路系统气体超压，可采取主动泄压的方式防止超压，并设计安全阀；当缓冲罐超过阈值压力且控制系统故障导致气动阀未能打开时，安全阀被动开启，含氚气体会流向泄压罐，从而避免系统超压。系统处于室温下运行，涉及的氚泄漏风险主要源于管道仪表接头和储罐泄漏，为此，管道与储罐漏率设计低于10^{-8} Pa·m^3/s，并设计二级包容手套箱，实时监控氚泄漏的情况，一旦发生氚泄漏，则与气氛除氚系统联动。

3.2.1.6 自动控制单元

⑴单元功能

自动控制单元为燃料供给和处理实验平台、氚提取与回收实验平台以及氚安全包容实验平台提供支撑，实现上述平台运行和实验过程的监测、控制和保护，其基本功能分为以下三部分。

① 常规过程监控：建立内部网络，收集实验平台各单元上传的参数信息，集中

各单元操作员站、工作师站，实现对各单元运行状态的监测，完成运行过程中各单元间的协调和联动控制。

② 氚应急响应控制：接收氚监测系统上传的信号，对各监测点位的氚浓度进行实时判断，当判断发生氚泄漏事故时，及时发出信号给对应区域的除氚系统。

③ 联锁保护控制：针对极端条件下可能出现的氚非受控释放，对各实验平台与环境之间存在的气体排放界面接口进行实时氚监测，一旦发现有异常排放的可能，控制该接口处的安全隔离阀关闭。

⑵主要设计参数

① 氚监测应急响应时间（指接收到氚监测单元上报的异常氚浓度信号到常规控制系统输出信号的时间延迟)不大于3s；

② 联锁保护响应时间（指接收到排放管道上氚监测设备上报的异常氚浓度信号到联锁保护控制系统输出信号的时间延迟）不大于1s。

⑶工艺设计

自动控制单元包括常规控制系统和联锁保护控制系统两部分，结构如下图所示。其中，常规控制系统包括现场工艺设备、分布式过程单元、集中监控主机、中控大屏、操作员站和工程师站。系统网络划分为三个层级，分别是现场设备层、过程控制层和监控操作层。常规工艺设备属于现场设备层，主要包括泵、阀门、流量计、温度传感器等现场设备和仪表；各单元本地控制系统属于过程控制层，主要包括本地过程控制站、网络设备、通信设备等；实现远程操作、控制、显示、报警等功能的相关设备，如操作员站、工程师站和中控大屏等属于监控操作层。现场设备层和过程控制层的设备系统分布于各单元所在位置或区域；监控操作层的设备集中于中控大厅。

联锁保护系统包括联锁保护功能相关设备、联锁保护控制器、联锁保护操作员站和联锁保护工程师站。联锁保护功能相关设备通过专用I/O模块直接接入联锁保护控制器，与常规控制系统相互独立。联锁保护功能相关设备分布在对应的工艺管道处，联锁保护控制器、联锁保护操作员站和联锁保护工程师站集中布置于中控大厅的独立隔间内，与大厅内常规控制系统相关的设备相互隔离。

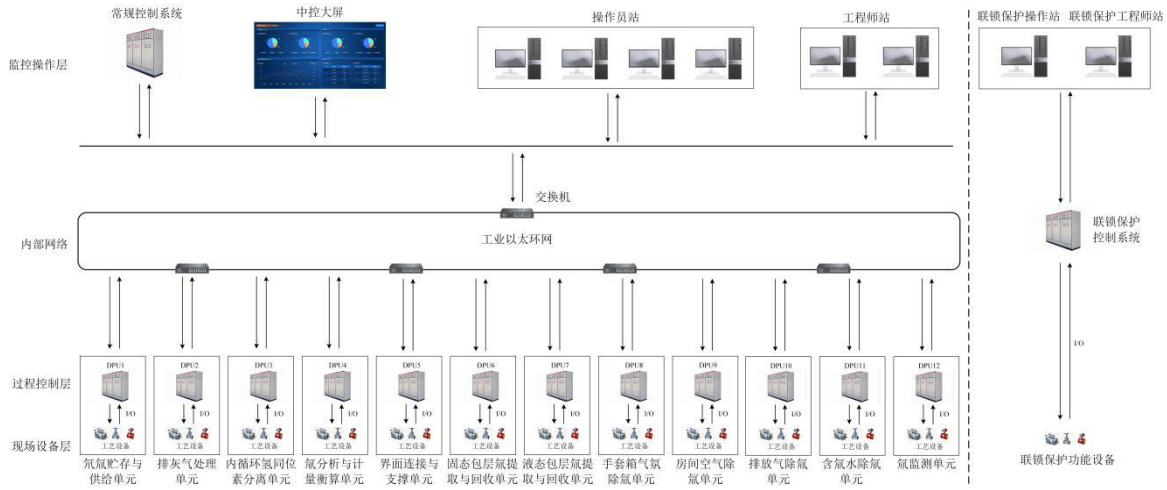


图3-8 自动控制单元系统结构

⑷安全设计

氚可能向环境排放的路径有两处，分别是含氚水除氚单元氢气排放管道和排放气除氚单元排放管道，为防止氚在恶意或误操作情况下的非受控排放，在上述两处与环境直接连接的管道上分别设置氚监测电离室对排放气体的氚浓度进行实时监测。

联锁保护拟采用双通道架构，每个点位的氚监测电离和对应的信号采集设备、联锁保护控制器、安全隔离阀均设置独立且隔离的A/B两路，联锁保护控制功能信息如下表所示。

表3-4 联锁保护控制功能信息

联锁保护	器件名称	器件位置	控制逻辑说明
排放保护	氚监测电离室A和B（同时工作）、安全隔离阀、电堆电源柜	含氚水除氚单元氢气排放管道及电堆电源柜安装位置	异常排放（氚浓度大于3.7 × 10^7Bq/m^3），关闭该管道上的安全隔离阀
	氚监测电离室A和B、（同时工作）、安全隔离阀	排放气除氚单元排放管道	异常排放（氚浓度大于3.7 × 10^7Bq/m^3），关闭该管道上的安全隔离阀，打开该管道上阀门进行气体处理循环

内燃料循环平台主要工艺设备如下表所示。

表3-5 内燃料循环平台主要工艺设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途
1	转移泵	自研氚兼容泵	名义抽速≥2 L/s；泵抽速≥120NL/min（前级压强0.1MPa时)；极限真空≤20Pa；整机动态泄漏率≤1×10^{-8} Pa·m^3/s，抗氚辐照	20	气体转移输送
2	真空泵	爱德华nx ds35i	极限真空小于5Pa，抽速≥35m^3/h	6	管道抽空

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途
3	磁悬浮分子泵	普发HiPace 700M	抽速≥ 480 L/s（H_2），极限真空度优于-9Pa；冷却方式：风冷	6	管道抽空
4	钯膜渗透器	非标	钯银金镍合金材质，单套钯膜面积0.2m^2	40	氘氚纯化
5	氚兼容转移泵	非标	抽速≥2NL/s（入口压力0.1MPa），出口压力≥0.25MPa，极限真空≤10Pa，漏率≤1×10—^{8}Pa·m^3/s	14	气体转移
6	手套箱	非标	漏率≤ 0.001 vol%/h，容积约50m^3	2	包容排灰气处理单元
7	低漏率真空泵	爱德华 nx Ds15i	抽速15Nm^3/h，极限真空50Pa，漏率≤1×10^{-7} Pa·m^3/s	7	气体转移
8	涡旋真空泵	爱德华 nx ds35i	抽速30 Nm^3/h，极限真空5Pa	2	气体转移
9	分子泵	中科科仪	抽速不小于480L/s，极限真空1E-7Pa，风冷	5	气体转移
10	精馏柱单元	非标	由316L不锈钢内抛光管制成，配置精馏柱体、冷凝器、再沸器、填料和塔内件等，直径范围：20mm～1000mm，工作温度：15K～300K，漏率：≤1×10^{-8}Pam^3/s	1	精馏过程场所
11	低温制冷单元	非标	制冷功率：2kW@20K；出口氦气温度：15K±0.1K，配置氦气纯度分析仪、氦气外置纯化器等	1	为精馏过程提供冷量
12	绝热子单元与分析采样子单元	非标	含支撑塔架（抗震8度设防）、真空冷箱（优于10^{-2}Pa)、分析管路、液氦冷屏及真空泵组等	1	提供真空绝热环境及采样分析管路
13	冷量分配单元	非标	含调节阀、截止阀和真空绝热腔室等；介质：氦气；工作温度：15K	1	根据工艺需求分配冷量
14	换热单元	非标	包括换热器、冷凝器、加热器等；介质：氦气、氢同位素气体；工作温度：15K	1	为工艺过程提供制冷和换热功能
15	转移泵		双波纹管泵，流量6m^3/h，介质：含氚氢同位素，漏率<1×10^{-8}Pa·m^3·s^{-1}	6	为工艺过程提供泵输功能
16	转移泵		双波纹管泵，流量2.2m^3/h，介质：含氚氢同位素，漏率<1×10^{-8}Pa·m^3·s^{-1}	4	为工艺过程提供泵输功能
17	转移泵		单波纹管泵，流量0.01m^3/h，介质：含氚氢同位素，漏率<1×10^{-8}Pa·m^3·s^{-1}	4	为工艺过程提供泵输功能
18	分离柱	非标	填充30～40%wt的Pd/Al_2O_3，有效Pd填充质量4200g，Pd/Al_2O_3的粒径范围为1mm～2mm	5	分离
19	储氢床	非标	ZrCo床/U床	15	氢同位素暂存
20	油浴循环	奥克兰MDH	最大流量大于250L/min	20	导热油循环

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途
	泵				
21	真空泵组	爱德华 nx ds35i配浦发 Hipace700M	抽速不小于480L/s，极限真空10^{-9}Pa	14	管路真空
22	制冷机	冠亚LN20W	制冷量大于25kW，制冷机集成，合并使用水冷换热器	4	制冷

3.2.2 外燃料循环平台

3.2.2.1 固态包层提取与回收平台

3.2.2.1.1 固态包层氚提取单元

⑴单元功能

以含氢的氦气为载气，通过吹扫的方式从模拟包层（模块）中提取出氚，并对载气中的含氚氢同位素气体进行分离纯化。具体功能如下：

① 通过载气吹扫的方式从模拟包层（模块）中提取氚；

② 从载气中回收氚，包括氚水（HTO）和氚气（HT）；

③ 将回收的氚水（HTO/H2O）转化成气态形式（HT/H2）；

④ 对回收的氚（HT/H2）进行纯化处理，然后输送至氢同位素预浓集单元进行氚的分离浓缩；

⑤ 对载气中氚浓度进行在线测量，并分析评估氚提取回收效率；

⑥ 对载气的化学组分（氢气比例）和物理条件（温度、压力）进行控制；

⑦ 去除载气中的其他杂质。

⑵主要设计参数

固态氚提取单元主要设计输入参数列于下表。

表3-6 固态氚提取单元设计输入参数

序号	参数名称	设计指标	备注
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
[redacted]	[redacted]	[redacted]	
5	HTO/(HT+HTO)	5%	
6	水蒸气浓度（ppm）	~10	

序号	参数名称	设计指标	备注
7	Q_2提取速率（mol/h）	~129	
8	Q_2O提取速率（g/h）	~23	
9	氚提取效率	≥95%	
10	包层入口载气温度（℃）	30	
11	包层出口载气温度（℃）	~500	参考HCCB
12	包层入口载气压力（MPa）	0.3	
13	包层出口载气压力（MPa）	~0.2	

⑶工艺设计

在 He+0.1%H_2 载气条件下，固态增殖剂释放的氚主要有 HT 和HTO 两种形式。因此氚提取过程分为两步进行：第一步采用常温分子筛床（AMSB）从载气中提取含氚水蒸气（HTO/H_2O 或Q_2O）；第二步采用低温（77 K）分子筛床（CMSB）从载气中提取含氚氢气（HT/H_2，或Q_2）。为实现连续氚提取，AMSB 和CMSB 均至少配置两套，其中一套工作（吸附），另一套再生（解吸）。AMSB 工作一定时间后需再生，再生时采用加热的氦气进行吹扫，载带出的水蒸气（Q_2O）通过金属还原床转化为氢气（Q_2），然后再从AMSB 入口前端送回载气主回路。CMSB 工作一定时间后同样需要再生，再生时可采用“加热－氦气吹扫”或“加热－抽真空”的方式，采用钯合金膜分离技术对解吸的氢气进行分离纯化。

⑷安全设计

① 超压保护

CMSB 可能发生失液氮事故。CMSB 丧失液氮会导致吸附的氢气释放，进而导致系统压力升高。一旦发生这种超压事故，可以通过与CMSB 相连的缓冲罐来进行保护。CMSB 与缓冲罐之间的连接管道上设计有爆破阀，当系统内压力达到系统设计压力一定范围内的压力值时，爆破片即爆裂。

② 超温保护

固态包层氚提取单元中的每个加热器都是通过可控硅控制器进行控制，且临近组件的温度通过热电偶进行监测，这样可以使可编程逻辑控制（PLC）在向上/下偏离设定值时给出警告。如果温度到了与设计温度接近的第二个设定值，加热器将停止工作并且PLC 会给出一个报警。

此外，如果温度高于某个值，另一个热电偶会给出警告。加热器停止工作和报警功能对上面提到的热电偶是冗余的。这两个热电偶的读数通过虚拟仪表进行一直比较，以检测它们之中某一个的非正常工况。

③ 氚渗透保护

固态包层氚提取单元中的氚浓度虽然较低，但是涉及高温组件。为了减缓氚渗透，固态包层氚提取单元中也采取了相应的措施。针对钯合金膜渗透器组件，配备了内置的热屏蔽和真空夹套，真空夹套的温度接近室温，在该温度下没有可检测的氢气渗透发生。抽真空的夹层可以实现氚的包容和回收，其中氚是通过初级容器壁渗透进入的。渗透气体的存在可以通过夹层内的压力监测器或通过真空夹层隔热性能的恶化来进行检测，渗透气体通过泵抽出，然后输送至氚安全包容系统进行处理。

④ 冗余设计

固态包层氚提取单元中的部分组件采取了冗余设计，其目的是提高系统的操作灵活性。冗余组件主要包括过滤器、低温吸附床（CMSB）、气体转移泵等。

过滤器的作用是去除可能从包层区载带出来的颗粒物，随着运行时间的累积，过滤器中的颗粒物会越来越多。颗粒物的增加将导致过滤器的气阻变大，从而影响氚提取回路的正常运行。考虑到载气流量非常大，为了减小压降损失，延长过滤器更换周期，固态包层氚提取单元中设计了两个并联的过滤器，这给实际运行带来了便利。

CMSB 的作用是对载气中的氢气进行捕获，即提取气态氚（HT）。在实际运行过程中，CMSB 会吸附载气中的杂质气体和残余的水蒸气，从而导致氢气的吸附容量降低，使 CMSB 提前吸附饱和。为了应对这种情况，定期对CMSB 进行完全再生处理是采取的主要措施之一。

另外，固态包层氚提取单元中除了设计两个用于常规轮换的CMSB 外，还专门设计了第三个CMSB 作为备用。

解吸气转移泵和钯膜进料侧增压泵均为高频使用，且存在温度、压力波动，容易出现故障。为此， 固态包层氚提取单元设计中均考虑备台。

⑸平台主要设备及参数

平台关键设备及主要技术参数见下表。

表3-7 固态包层氚提取单元主要设备工艺操作参数

序号	参数名称	设计值	备注
分子筛干燥床（MSB）			
1	处理流量（Nm^3/h）	3000	
2	工作压力（MPa）	~0.2	
3	工作温度（℃)	25	室温
4	再生周期（h）	48	2 天
5	再生气温度（℃)	300~350	
6	再生气流量（Nm^3/h）	300	
低温吸附床（CMSB）			
7	处理流量（Nm^3/h）	3000	
8	工作压力（MPa）	~0.15	
9	工作温度（℃)	-196	
10	Q2 再生周期（h）	6	
11	Q2 再生温度（℃)	-170~-120	抽真空
12	完全再生周期（h）	168	7 天
13	完全再生温度（℃)	300	抽真空
金属还原床			
14	处理流量（Nm^3/h）	~300	
15	工作压力（MPa）	0.1~0.3	<0.3
16	工作温度（℃)	550	
17	更换周期（d）	30	连续运行条件下
钯膜渗透器			
18	处理流量（Nm^3/h）	4	平均值
19	进料侧工作压力（kPa）	300	100~1000 可调
20	渗透侧工作压力（kPa）	10	1~10 可调
21	工作温度（℃)	400	

3.2.2.1.2 氢同位素预浓集单元

⑴单元功能

对固态包层氚提取单元回收的含氚氢同位素气体进行同位素分离，实现氚的预浓集。具体功能如下：

① 接收来自固态包层氚提取单元产生的含氚氢同位素气体，通过分离获得较高氚浓度的产品气，并将其输送至氢同位素深度浓集单元或燃料储存与供给系统。

② 分离获得的贫氚氢气送回固态包层氚提取单元作为载气循环使用或送入氚安全包容系统进一步除氚。

③ 可根据聚变堆不同功率因子或包层提氚载气成分变化，灵活选择运行模式，包括连续精馏和间歇精馏模式。

⑵主要设计参数

外燃料循环平台氢同位素预浓集单元（ISS）接收来自包层氚提取系统（TES）的高纯氢同位素气体。TES输入源项：

氢同位素气体流量：127 mol/h；

组分：H_2>98.9%，HT=1%，HD=0.015%（天然丰度）。

ISS的输出产品气包括燃料级氚气和贫氚氢气。对于燃料级氚气，其氚浓度应满足T＞90%，通过SDS进行收集。贫氚氢气的氚含量小于10^{-6}，可直接回到外燃料循环系统内重复使用。

⑶主要设计

由于氢同位素气体处理量较大、分离因子要求较高，氢同位素预浓集单元拟采用低温精馏（CD）技术，通过三级低温精馏柱（贫化柱/精馏柱A、进料柱/精馏柱B、浓缩柱/精馏柱C）级联运行实现氢同位素气体中低浓度氚的分离浓缩。针对不同运行工况，氢同位素预浓集单元可以有以下几种不同的运行模式：

① 常规运行模式：针对500 MW 聚变堆典型运行工况，进料柱/精馏柱B 作为预分离柱，浓缩柱/精馏柱C 作为浓缩产品柱。

② 低功率运行模式：贫化柱/精馏柱A 和进料柱/精馏柱B 串联作为预分离柱，原料气由贫化柱/精馏柱A 进入，浓缩柱/精馏柱C 作为浓缩产品柱。

③ 高倍贫化运行模式：贫化柱/精馏柱A 和进料柱/精馏柱B 串联作为预分离柱，原料气由进料柱/精馏柱B 进入，浓缩柱/精馏柱C作为浓缩产品柱。

④ 间歇模式：进料柱/精馏柱B 作为预分离柱，浓缩柱/精馏柱C作为浓缩产品柱，进料柱/精馏柱B 和浓缩柱/精馏柱C 浓缩产品气通过间歇方式进行提取。

⑷安全设计

① 超压保护

低温精馏系统在运行过程中可能因冷箱失效、液氮供应中断或冷凝器堵塞等原因导致内部压力异常升高。尤其当主冷凝器失去冷却能力时，未冷凝的轻组分（如氢、氖、氚等） 会在塔顶积聚，造成系统超压。为防止设备损坏及放射性物质泄漏，系统设置了多级超压保护机制。首先，在精馏塔顶部和冷凝回路出口处设有安全泄放管线，连接至专用的泄压罐。泄压罐设计容积为10 m^3，并配备爆破片，一旦系统压力超过该阈值，爆破片立即破裂，迅速向房间泄压。此外， 系统还配置了先导式安全阀作为第二道防线，其整定压力略高于爆破片动作压力，用于应对爆破片失效或缓慢升压工况。所有泄放气体均导入氚包容处理系统，经吸附、催化氧化和干燥后回收，避免环境释放。

② 超温保护

低温精馏系统虽应在低温条件下运行，但其再沸器、加热器等局部区域存在高温风险。为防止设备过热导致材料失效或氚释放加速，系统采用多重温度监控与联锁保护策略。所有关键加热元件（如再沸器加热装置、加热器等）均由可控功率控制器精确调节功率输出，并通过双冗余热电偶实时监测温度。两组热电偶分别安装于不同位置，信号独立接入可编程逻辑控制器。当任一热电偶检测温度偏离设定值±10℃时，控制系统触发一级预警；若温度继续上升至超出设定温度20℃时，则自动切断加热电源并启动声光报警。为增强可靠性，系统还设置独立的硬接线超温继电器，不完全依赖于控制系统，直接串联在加热回路中。当温度超过机械式温控开关的设定值，继电器立即断电，形成“故障安全”机制。同时， 所有温度数据通过虚拟仪表平台进行交叉比对，若两热电偶读数偏差超过预设容差，系统将标记传感器故障并提示维护。

③ 氚渗透保护

尽管低温精馏系统整体运行在低温低压环境，但其中仍包含富氚流股和部位（如浓缩柱的柱底和再沸器等），存在氚通过金属或密封材料渗透的风险。为此， 系统采取多层包容与监测措施。对于高氚浓度部位容器采用双壁结构，并在夹层抽真空或充入惰性气体。真空夹套不仅提供绝热功能，还可作为氚渗透包容和监测，一旦内壁发生微渗漏

，氚将以HT 或T：形式进入夹层，引起夹层压力缓慢上升或热导率变化，从而触发真空泵，将渗透至夹层的含氚气体抽出输送至氚包容与安全系统。此外，在所有法兰、阀门和泵密封处设置局部负压抽包容结构，持续抽取可能逸散的含氚气体，并输送至在线氚监测子系统。若检测到氚浓度异常，系统自动启动应急隔离程序，关闭相关隔离阀，并切换至备用流程。

④ 冗余设计

为保障低温精馏系统在连续运行条件下的高可用性与容错能力，关键子系统均采用功能冗余或备用配置，具体包括：

1) 气体净化单元：氢同位素预浓集系统配备两套气体净化单元，一套正常使用，一套作为备用。当气体净化单元因杂质累积导致吸附效率下降时会启动再生程序，则可无缝切换至备用床，无需停机。每套气体净化单元均配备独立的温度、压力和流量监测通道。

2) 产品转移泵与循环压缩机：氢同位素预浓集单元中的压缩机和气体循环泵均为双泵/双机并联配置，一用一备。考虑到低温介质对机械密封的严苛要求，备用泵始终保持预冷待机状态，可在主泵故障后30 秒内自动投运。

3) 控制系统冗余：主控单元采用双机热备架构，I/O 模块分散布置，通信网络为环形光纤冗余拓扑，确保单一节点故障不影响整体控制功能。

上述冗余设计不仅提升了系统可靠性，也为计划性维护、在线检修和事故响应提供了操作灵活性，是实现连续安全运行的关键保障。

⑸平台主要设备及参数

平台关键设备及主要技术参数见下表。

表3-8 氢同位素预浓集单元主要工艺操作参数

序号	参数名称	设计值			备注
低温精馏系统					
1	处理量（m^3/h）	3.0			
		贫化柱	进料柱	浓缩柱	
2	理论板数	30	30	60	
3	柱径	~DN80	~DN80	~3/4,	316L, EP

4	回流比	5-10	5-10	15-20		
5	冷凝冷量（W）	300-500	300-500	20-50		
6	加热功率（W）	300-500	300-500	20-50		
7	操作压力（kPa）	100-150	100-150	100-150		
8	操作温度（K）	15-25	15-25	15-25		
9	冷箱外径（m）	1.0		0.5		
10	冷箱真空度（Pa）	$<10^{-3}$		$<10^{-3}$		
压缩机						
11	气体介质	氢气（少量氚）				
12	处理量（m^3/h）	2~5				可调频
13	进气压力（kPa）	100				
14	排气压力（kPa）	≥200				
15	电机功率	5kV/380V/50Hz				ExdIICT4
16	漏率（$Pa·m^3/s$）	$\leq10^{-6}$				氦检
换热器						
		E0	E1	E2	E3	
17	处理量（m^3/h）	3	0.1	0.1	0.1	
18	设计压力（kPa）	200	200	200	200	
19	操作温度（K）	20-500	20-500	20-500	20-500	
20	热功率（W）	-500	-20	20	-20	
21	漏率（$Pa·m^3/s$）	$\leq10^{-6}$	$\leq10^{-6}$	$\leq10^{-6}$	$\leq10^{-6}$	氦检
歧化反应器						
22	处理量（m^3/h）	0.1				
23	设计压力（kPa）	200				
24	操作温度（K）	400				
25	催化剂装填量(L)	300				
26	漏率（$Pa·m^3/s$）	$\leq10^{-6}$				氦检

3.2.2.2 液态包层氚提取与回收平台

⑴单元功能

为了验证未来聚变堆液态增殖包层氚提取与回收工艺技术可行性，设计建设液态包层氚提取单元，开展模拟聚变堆液态包层的提取、分离、浓集和回收等主要氚处理工艺的集成运行考核测试。

⑵主要设计参数

液态包层氚提取单元的总体设计指标包括：

① 液态锂铅中氚提取效率不低于95%；

② 锂铅回路子单元锂铅流量不低于60 kg/s；

③ 氚测量子单元氢同位素分压测量范围0.1 Pa ~ 10 Pa；

④ 氚测量子单元漏率优于1.0×10^{-9} Pa·m^3/s；

⑶工艺设计

液态包层氚提取单元采用真空渗透法和气液接触法对液态锂铅中的氢同位素进行提取回收。真空渗透技术（PAV）原理为利用氚通过特定膜的渗透现象来实现氚的高效提取，工艺流程如下图所示。将固态锂铅介质在熔化罐内熔化过滤后进入储料罐内，储料罐储存足够锂铅后，分批将锂铅投入充氚塔，充氚塔采用气液接触方式将氢同位素气体充入液态锂铅内，达到氢同位素铺底充入量后，将锂铅送入余量罐内，当余量罐内储存了一定量的完成充气的锂铅后，开启阀门使得液态锂铅进入回路。通过锂铅泵、液态金属电动调节阀、液态金属流量计和加热器等设备对锂铅流量流速和温度进行调节，使得液态锂铅以一定量的流速（渗透窗内锂铅流速0.02 m/s ~ 0.1 m/s）和温度（450℃ ~ 550℃）进入的渗透窗氚提取子单元，完成氚提取后锂铅重新进入锂铅回路子单元，进行锂铅杂质净化。提取获得气体通过高真空泵输送至储氢床，储存达到一定量后送往氘氚贮存与供给单元。

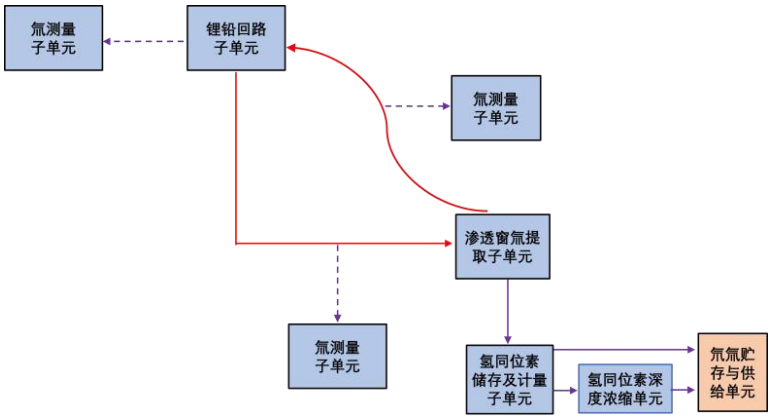


图3-9　真空渗透法氚提取与回收系统流程示意图

气液接触法工作原理为气态氚和液态锂铅之间接触进而发生扩散交换，工艺流程如下图所示。单元系统内锂铅完成熔化、进料和充氚等工艺步骤正常运行后，通过锂铅泵、液态金属电动调节阀、液态金属流量计和加热器等设备对锂铅流量流速和温度进行调节，使得液态锂铅以一定量的流量（鼓泡塔内锂铅流量＜20 kg/s）和温度（≤550℃）进入的鼓泡塔氚提取子单元，提取获得氦+氢/氚混合气，完成氚提取后的锂铅重新进入锂铅回路子单元，进行锂铅杂质净化。鼓泡塔氚提取子单元提取获得氦+氢/氚混合气进入氢氦分离子单元进行氢氦分离，分离后的氦气重新进入鼓泡塔氚提取子单元作为提取载气，氢/氚混合气则进入氢同位素储存及计量子单元进行储存与计量。储存达到一定量后送往氢同位素分离单元。

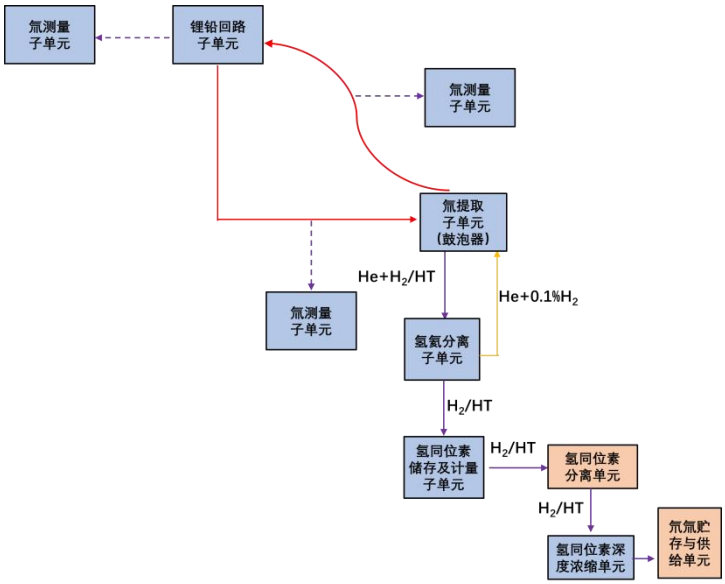


图3-10 气液接触法氚提取与回收系统流程示意图

为了保证系统关键部件在事故状态下的安全性，首先围绕“器件-系统-完整性”三级分析框架，开展液态包层氚提取单元中关键部件的热水力分析、结构分析以及地震分析，确保单元器件在地震载荷下可以保证其结构完整性。

液态包层氚提取单元储氢床加热释放氢同位素气体的过程中，有可能因为储氢床的出口端阀门未正常接通，导致储氢床内部的压力过高。为了避免这种情况，在系统中设计了安全联锁功能，当压力传感器检测到储氢床内部压力过高时，信号反馈，通过软件控制储氢床加热器的加热功率，或通过安全指令直接停止加热器。另外，在储氢床的出口处配置泄压装置，当上述安全防护功能失效时，将氢同位素气体泄压至系统过压保护容器中。

液态包层氚提取单元有较多的加热部件，在加热中存在超温风险。针对系统超温风险，所有加热设备或管道均配备2个及以上的温度传感器。通过多个温度传感器的对比，实现对反馈温度传感器正常工作状态的评估。在多根温度传感器出现较大温差时，向控制系统发送报警信号。通过冗余设计，提高加热系统工作过程的可靠性，从而避免系统超温。

液态包层氚提取单元中液态锂铅存在泄漏风险，针对上述风险，在设计制造过程中要求液态锂铅接触管道和设备均为焊接，并进行100%探伤。同时，在设备、阀门及管道配置泄漏探测仪表，当相关部件发生介质泄漏时，泄漏探测仪表可及时感知并发出报警并启动排空阀门将单元内液态锂铅排回至锂铅储料罐内。

⑷操作规程

回路运行

① 装填固态介质：将固态锂铅砖块放入储料罐之后，关闭锂铅介质管道阀门，全部开启储料罐气路阀门，进行抽真空（＜10 Pa）与充氩气操作，反复进行至少5次。

② 抽真空/充氩气：对管路系统进行抽真空（＜10 Pa）与充氩气操作，抽真空与充气操作需要反复进行至少5次。随后将储料罐加热至350℃，罐内锂铅完全熔化。

③ 若储料罐一次熔解的锂铅量不够，为了避免锂铅蒸汽被人体吸入，需待罐内锂铅冷却凝固后再打开上端法兰进行二次加料，再重复（a）装填固态介质和（b）抽真空/充氩气的操作。

④ 管道设备预热：回路注入液态金属锂铅之前，关闭所有气路阀门，对锂铅回路和锂铅泵分别进行预热升温至350℃和250℃以上并保温待用。

⑤ 回路进料：管道设备预热完毕进料前，对系统抽真空（＜10 Pa）。随后向储料罐内充入氩气，通过气体压力将锂铅压入回路管道。锂铅回路系统充装锂铅结束后，储料罐维持350℃，保证预备事故工况下介质紧急回流。

⑥ 回路运行：锂铅泵先以较低功率运行逐步提高运行功率，待回路温度、压力稳定后，如无异常再继续调整；运行时管道温度设定为350℃，回路升温通过加热器实现；整个实验过程中回路管道和储料罐温度需≥350℃。

⑦ 回路停运：逐步降低锂铅泵运行功率，待温度、压力稳定后如无异常再继续调降低功率。

⑧ 回路排空：该步骤紧接回路停运步骤为首先关闭加热器，开启锂铅回路管路上所有阀门，后缓慢打开卸料阀，并时刻监测储料罐压力为微正压防止回路倒吸，回路中的锂铅缓慢流入储料罐中。排放锂铅时要保证回路系统设备和管道温度≥350℃，防止管道及设备内的介质降温凝固。

渗透窗氚提取工艺

① 锂铅回路子单元运行功能调试完成，锂铅回路进料回路正常运行。通过充氚塔向锂铅中充入不同含量氢/氚气混合气，进行渗透窗提取实验，要求渗透窗入口流量最高达到10 kg/s，渗透窗温度500℃~550℃，渗透窗高真空泵组持续运行，外腔体真空度优于1.0×10^{-3} Pa。通过渗透窗氚提取子单元入口和出口端氚测量子单元评估氢/氚收集效率，验证系统工艺满足设计要求。

② 完成调试后，按照锂铅回路运行功能调试方案⑥回路停运和⑦回路排空将回路中的锂铅缓慢流入储料罐中。

鼓泡塔氚提取工艺

① 锂铅回路子单元运行功能调试完成，回路正常运行。

② 通过充氚塔向锂铅中充入不同含量氢/氚气混合气，进行鼓泡器提取实验，要求鼓泡器入口锂铅流量最高达到20 kg/s，气体流量1500 NL/h ~ 2500 NL/h，最高加热温度550℃，通过鼓泡塔氚提取子单元入口和出口端氚测量子单元评估氢/氚收集效率，验证系统工艺满足设计要求。

③ 完成调试后，按照锂铅回路运行功能调试方案⑥回路停运和⑦回路排空。

3.2.2.3 氢同位素深度浓集单元

氚燃料循环与辐射安全实验系统中，设计大量氢同位素的分离需求。大规模氢同位素分离采用低温精馏工艺，低温精馏预浓缩后的产品气以及精馏柱内的滞留气体在氢同位素深度浓集单元中再次处理，获得满足燃料贮存与供给系统可存储的燃料氚。

氢同位素深度浓集单元的分离工艺采用热循环吸附工艺（Thermal cycling absorption process, TCAP）。热循环吸附分离单元的主要工艺部件包括分离柱和回流柱，在冷半周中，空柱内的氢同位素气体被分离柱吸附，轻同位素被首先吸附在分离柱上端，重同位素则流向柱的下端，在分离柱的固相中沿着轴向产生了浓度分布。在热半周时，一部分固相中的氢同位素解析流向空柱。每一个循环都能获得一定的净分离效果，最终系统内达到循环稳态。针对氚燃料循环与辐射安全实验系统的运行条件，TCAP工艺处理的气体来源如下表所示。

表3-9 单元运行功能和气体来源

来源	运行模式	待分离气体量	待分离气体组成	分离产品丰度要求
液态包层提取回收单元	间歇运行	~56NL/次	D-T混合气体	分离成燃料级氚（>90%T）和燃料级氘(>90%D)
固态包层提取回收单元	间歇运行	430NL	10%H_2-90%HT	产品气H<1%
内循环氢同位素分离单元	间歇运行	(1)18%T-82%D，~1m^3； (2)1%~10%T,10m^3; (3)50%T,1m^3	D-T混合气体	重同位素丰度>90%
含氚水除氚单元	间歇运行	~6L/h	~0.03%T，其余H，D	产品气H<1%

⑵主要设计参数

氢同位素深度浓集单元的主要技术参数如下：

① 针对50%D-50%T的氘氚混合气体，产品气氚丰度≥90%，尾气中氘丰度≥90%；

② 针对90%D-10%T的氘氚混合气体，产品气氚丰度≥50%，尾气中氘丰度≥99%；

③ 所采用的TCAP分离工艺具备多种分离模式，可根据待分离气体的组分需求调整分离目标。

④ 所采用的TCAP工艺模块中任意分离柱单周期循环时间不长于30min；

⑤ 所采用的TCAP工艺模块可实现-20℃~160℃的稳定高低温循环；

⑶工艺设计

本单元设计了2套TCAP分离柱，包括单级TCAP处理子单元和多级TCAP处理子单元。其中单级TCAP处理子单元处理对象包括：①液态包层提取单元中的氘氚气体；②内循环氢同位素分离单元获得的部分需要深度分离的氢同位素气体以及精馏柱内滞留的氢同位素气体。

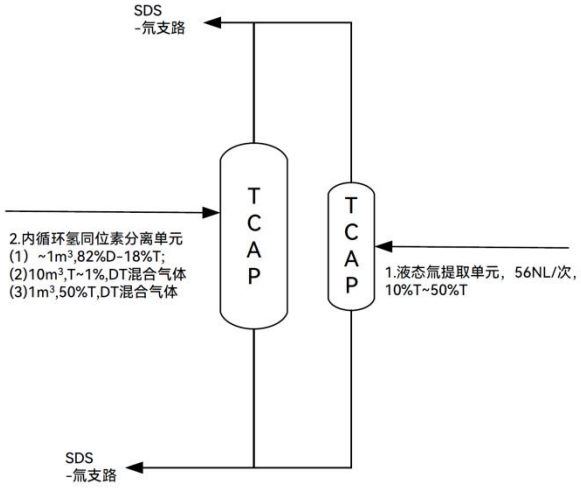


图3-11 单级TCAP子单元流程图

多级TCAP处理子单元处理对象包括：①处理含氚水除氚单元中低温精馏模块产生的H-D-T混合气体；②固态包层氚提取单元低温精馏产生的H-T混合气体。流程图如下图所示。

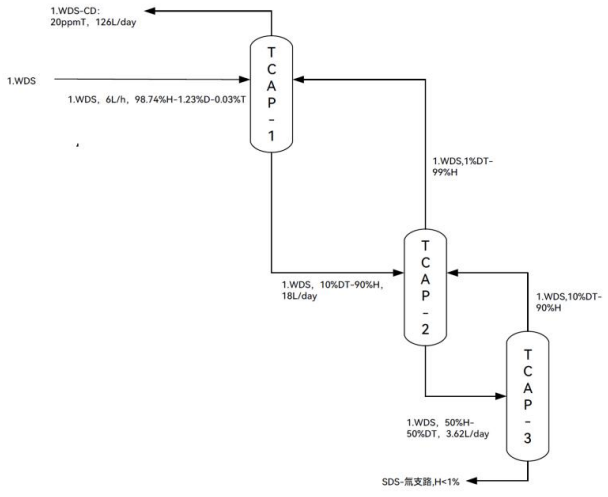


图3-12 多级TCAP子单元流程图

为了保证系统关键部件在事故状态下的安全性，首先围绕“器件-系统-完整性”三级分析框架，开展氢同位素深度浓集单元中关键部件的热水力分析、结构分析以及地震分析，确保单元器件在地震载荷下可以保证其结构完整性。

氢同位素深度浓集单元在运行时TCAP分离柱为带压运行，因此有系统超压风险。根据系统的运行需求开展了超压安全设计。系统中每根分离柱在工艺气动阀与分离柱之间均设计了安全阀，安全阀设计了安全阈值压力。当系统控制系统故障，气动阀未能打开时，安全阀会被动开启，分离柱内含氚气体会流向暂存罐体，从而避免系统超压。

氢同位素深度浓集单元有较多的加热部件，在加热中存在超温风险。针对系统超温风险，所有加热器均配备2个及以上的温度传感器。通过多个温度传感器的对比，实现对反馈温度传感器正常工作状态的评估。在多根温度传感器出现较大温差时，向控制系统发送报警信号。通过冗余设计，提高加热系统工作过程的可靠性，从而避免系统超温。

外燃料循环平台主要工艺设备如下表所示。

表3-10 外燃料循环平台主要工艺设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	噪声范围dB(A)
1	锂铅泵	非标	负载量100～150kg/s，扬程≥8m，工作温度450℃~550℃。	2	锂铅输运	
2	渗透窗	非标	渗透膜材料α-Fe管，渗透窗锂铅处理流量8~12 kg/s，α-Fe，纯度＞99%，壁厚0.5 mm ~1.0 mm，设计温度350℃~550℃	12	氢同位素提取	
3	鼓泡塔	非标	由316H或31608不锈钢内抛光管制成，配置鼓泡塔体、液相分散器和塔内件等，直径范围：0.8 m~1.5 m，最高加热温度550℃	6	氢同位素提取	
4	四极质谱仪		质量分析数1-100 amu，质量分辨率≤0.5 amu@10%峰高，含FC/EM检测器，分压检测极限3.0×10^{-13} Pa	25	氢同位素分析	
5	储氢床	非标	器件整体漏率≤1×10^{-9} Pa·m^3/s。设计压力为0.5 MPa，Zr-Co合金填料	2	氢同位素储存	
6	分子泵组	非标	包含干式涡旋真空泵和涡轮分子泵，抽速≥67 L/s，极限真空度优于5.0×10^{-8} Pa	6	气体转移输送	
7	氚测量探头	非标	运行温度350℃~650℃，内部极限真空度优于1.0×10^{-6} Pa，薄壁α-Fe管最高耐压1.2 MPa，材质为α-Fe（纯度不低于99.99%）	25	氢同位素测量	

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	噪声范围dB(A)
8	热金属还原床	非标	加热功率≥0.5 W/cm^2，耐温500℃，水分解处理量约～15 kg	2	气体处理	
9	金属吸氢床	非标	加热功率≥0.5 W/cm^2，耐温500℃。填料为Zr-Co合金	2	气体处理	

3.2.3 氚安全防护平台

为确保聚变堆氚燃料与包层关键技术研发和实验验证平台的安全、稳定和经济运行，需配套氚的安全防护平台，实现各种含氚流出物的处理，以及事故条件下氚的安全包容与回收，实现氚环境排放量、工作人员和公众辐射剂量的有效控制。

氚的安全防护平台包括手套箱气氛除氚单元、房间空气除氚单元、排放气除氚单元、含氚水除氚单元和氚监测单元，平台功能框图如下图所示。

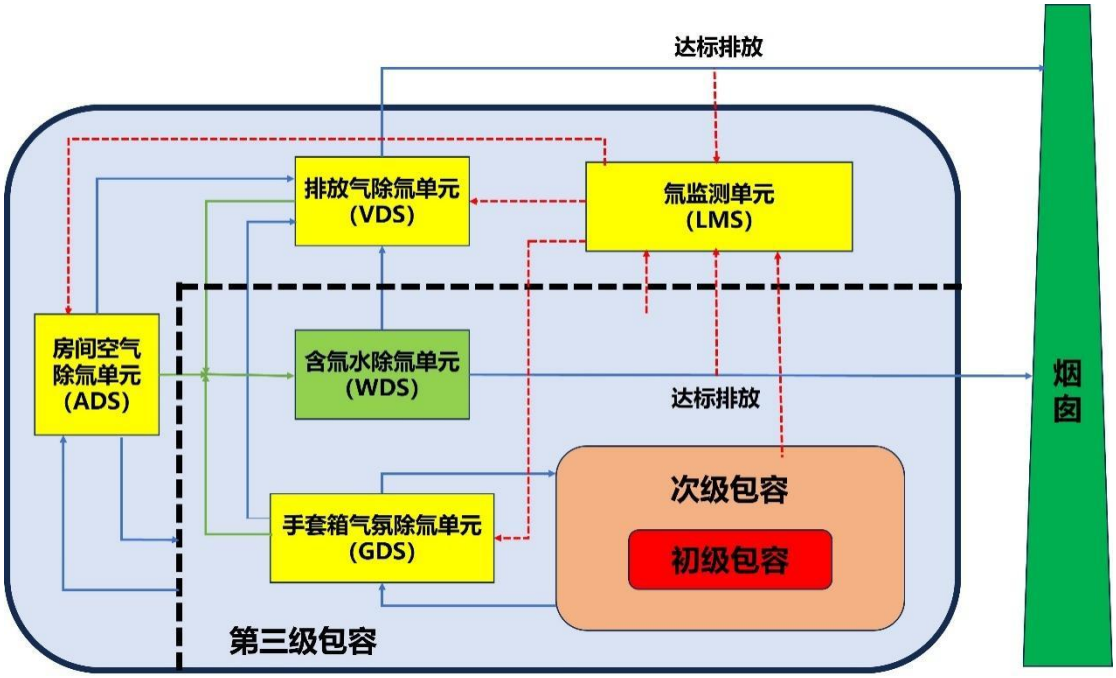


图3-13 氚的安全防护平台功能框图

本平台主要涉及含氚废气、含氚废水的处理处置，因此有关工艺流程、设计参数等将分别在“4.6.1放射性废气及其处理措施”、“4.6.2放射性废水及其处理措施”、“4.4辐射监测系统”中详述。

3.2.4 涉氚材料测试平台

⑴平台功能

涉氚材料测试平台是氚循环和辐射安全实验系统一部分，研究聚变堆内以及氚工厂涉及的壁材料、结构材料、功能材料等与氚的相互作用，包括含氚样品制备单元、材料性能测试单元、材料成分与结构表征单元，其总体设计方案如下图所示。



图3-14 涉氚材料测试平台总体设计方案

⑵主要设计参数

① 直线等离子体装置最高离子注入能量大于 100 eV；

② 气体驱动渗透测试装置氢同位素气压力范围 1-10 Pa；温度调节范围 300-500 ℃，控温精度优于±1 ℃；下游渗透侧真空度优于 5×10^{-5} Pa。

③ 热脱附谱测试装置测试温度室温至 1000 ℃，控温精度±1 ℃；极限真空度优于 5×10^{-5} Pa；

④ 基于激光技术的材料表面氢同位素滞留测试平台中激光测试深度分辨率小于 100 nm；激光测试光谱分辨率小于 0.05 nm。

⑶工艺设计

本系统氚引入单元中的直线等离子体装置、材料中的氚输运特性测试单元中的气体驱动渗透测试平台、热脱附谱测试及利用激光技术测量材料表面氚浓度的测试样品均放置在真空手套箱内。工艺设计如下图所示。

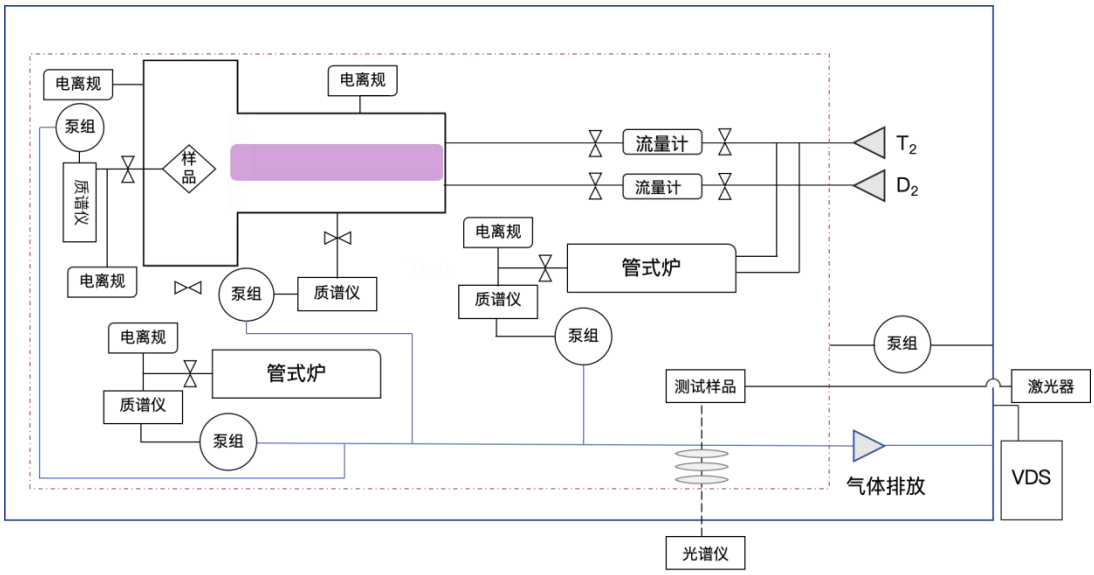


图3-15 涉氚材料测试平台总体设计方案

⑷安全设计

在涉氚材料测试平台运行过程中，主要面临氚接触、表面污染扩散、高温烫伤、高压气体泄漏、电气故障及机械伤害等潜在风险。针对上述安全隐患，本平台依据《核设施辐射防护规定》《氢气使用安全技术规程》及相关涉氢实验室标准，做出如下安全设计：

①氚包容与氚泄漏预防设计

本系统采用三级氚包容设计，其中一级氚包容为金属真空室，二级氚包容为低压手套箱，三级氚包容为独立负压实验室，连接VDS系统。

②电气安全

装置选用的供配电设备、控制柜及线缆均为合格防爆或阻燃产品。所有涉氚金属设备、管道法兰均进行等电位连接，接地电阻严格控制在4Ω以下，防止静电积聚引发氢气爆炸风险。全部电气设备均设计漏电检测联锁跳闸功能。

防爆设计： 鉴于氢气/氚气的易燃易爆特性，手套箱内部及可能积聚氢气的区域，电气元件（如照明、传感器）均选用防爆型（Ex d IIC T4等级以上），防止电火花引燃工艺气体。

③火灾与氢气爆炸预防

在手套箱内部、实验室顶部（氢气密度小，易积聚）设置高灵敏度氢气/氚气泄漏报警仪。当可燃气体浓度达到爆炸下限（LEL）的25%时，自动触发声光报警；达到50% LEL时，自动切断进气源并启动事故排风。

④真空失效预防

气体驱动渗透测试装置及氚气管路系统均配备安全阀或爆破片。当系统压力超过设定值（如0.3MPa）时，自动泄压至应急安全罐（缓冲罐），防止管路爆裂。

⑸平台主要设备及参数

表3-11 涉氚材料测试平台主要设备及参数

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途
1	机械泵	定制	极限真空小于5Pa,抽速≥45m^3/h	8	管道抽空
2	分子泵	定制	抽速≥ 700 L/s（H_2），极限真空度优于-9Pa	8	管道抽空
3	手套箱	非标	漏率≤ 0.001 vol%/h，容积约50m^3	4	包容排灰气处理单元
4	四极质谱仪	定制	质量分析数1-100 amu，质量分辨率≤1 amu	11	氢同位素分析
5	超高分辨四极杆质谱仪	定制	1-10 amu 质量范围，区分D2与He-4	1	氢同位素分析
6	分子泵	定制	抽速约：200 L/s	2	用于控制腔室内气压
7	机械泵	定制	抽速约：3 L/s	2	用于控制腔室内气压

⑹操作规程

涉氚材料测试平台独立运行调试，按照调试类别，分为直线等离子体装置操作流程、气体驱动渗透测试安全操作流程、热脱附谱测试流程。

①直线等离子体装置操作流程：

1）安全检查：

■ 确认一级、二级氚包容压力正常，三级系统通风状态正常。操作人员正确着装，且佩戴便携式氚检测仪。

■ 安装实验样品。

（1）氚注入与等离子体放电：

- 调节冷却水、磁体磁场；将实验样品加热至特定温度。
- 缓慢打开氚供气阀门，进气速率通过质量流量计精确调节。

- 启动等离子体电源，设置放电功率，监测等离子体参数（电子温度、密度）稳定。

（2）运行监控：

- 实时监测真空室气压、温度、样品温度、冷却水温度。
- 每小时记录一次手套箱内氚浓度、真空室压力。
- 若氚浓度超过报警阈值，立即停止氚注入，启动应急排风系统，待浓度降至安全值后排查泄漏点。

（3）实验后操作：

- 关闭等离子体电源，用氢气吹扫真空室及管路。
- 降温后取出样品，密封于专用容器，标注氚污染信息。
- 对真空室进行高温烘烤（300℃，2 小时），促进氚脱附，脱附气体经 VDS 处理后排放。

气体驱动渗透测试安全操作流程：

（1）安全检查：

- 确认一级、二级氚包容压力正常，三级系统通风状态正常。操作人员正确着装，且佩戴便携式氚检测仪。
- 安装实验样品，检查密封性。

（2）渗透测试：

- 将样品加热至实验温度。
- 向真空室内充入适当压力的混合氢同位素气体。
- 利用四级质谱仪检测渗透通过样品的混合氢同位素原子数量。

（3）运行监控

- 实时监测真空室气压、温度、样品温度、冷却水温度。
- 每小时记录一次手套箱内氚浓度、真空室压力。若压力异常变化则立即停止测试。
- 若氚浓度超过报警阈值，启动应急排风系统，待浓度降至安全值后排查泄漏点。

（4）实验后操作

- 测试结束后，用氢气吹扫腔体及管路，将残留氚转移至 VDS 系统处理。
- 取出样品，密封于专用容器，标注氚污染信息，送至放射性废物暂存间。

热脱附谱测试流程

（1）安全检查：

- 确认一级、二级氚包容压力正常，三级系统通风状态正常。操作人员正确着装，且佩戴便携式氚检测仪。
- 安装实验样品。

（2）热脱附测试：

- 设置加热速率
- 记录质谱仪检测到的样品中氢同位素脱附量和对应加热温度的实验数据。

（3）运行监控：

- 实时监测真空室气压、温度、样品温度、冷却水温度。
- 每小时记录一次手套箱内氚浓度、真空室压力。若金属真空室压力升高至 10^{-3}Pa 则立即停止测试。
- 若氚浓度超过报警阈值，启动应急排风系统，待浓度降至安全值后排查泄漏点。

（4）实验后操作：

- 测试结束后，用氢气吹扫腔体及管路，将残留氚转移至 VDS 系统处理。
- 取出样品，密封于专用容器，标注氚污染信息，送至放射性废物暂存间。

3.2.5 介质除氚实验平台

聚焦未来聚变堆除氚需求和技术瓶颈，建设氚去除材料及专用设备考核平台、气液固除氚工艺考核平台、涉氚设备可靠性考核平台，基于拟建设平台开展相关除氚材料、专用设备、除氚工艺研发，以及相关氚测试验证，保障聚变能安全发展，加速除氚技术从实验室走向工程应用，提升我国在该领域的自主创新能力和核心竞争力。

介质除氚实验平台主要聚焦聚变堆除氚需求，建设覆盖材料、专用设备、工艺及设备的研发测试及性能考核平台，包含氚去除材料及专用设备考核、气液固除氚工艺考核、涉氚设备可靠性考核的综合实验平台，其总体设计方案如下图所示。

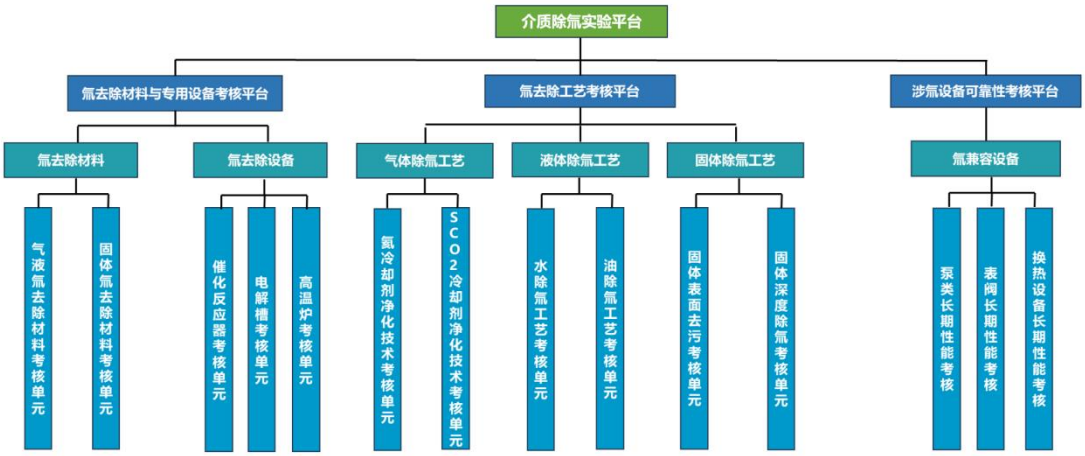


图3-16 介质除氚实验平台总体设计方案



图3-17 介质除氚实验平台各部分逻辑关系

3.2.5.1 氚去除材料与专用设备考核平台

3.2.5.1.1 氚去除材料考核平台

⑴平台功能

氚去除材料考核平台面向聚变堆氚安全与氚工艺系统需求，集成气体除氚、液体除氚、固体表面去污三类材料性能考核功能，可在多气氛、多工况、多活度条件下完成催化剂、吸气剂、储氢/还原材料、疏水交换材料、精馏填料、表面去污材料的关键性能测试与评价，为聚变堆氚系统提供材料筛选、参数优化与机理验证支撑。

平台可实现：①多气氛（N_2、Ar、空气、高压 He、高压 CO_2等）下氚化氢、碳氚化合物等气体氚的催化氧化、吸气捕集性能考核；②高浓氚水热金属还原材料性能与再生特性评价；③疏水催化剂/填料氢水催化交换（LPCE）及水精馏（WD）填料同位

素分离性能测试；④氚污染表面复合材料吸附、阻氚、去污效果与服役性能考核；⑤材料活性、选择性、稳定性、抗毒化、循环寿命及结构–性能演变规律研究。

⑵主要设计参数

各子系统主要设计参数如下表所示：

子系统名称	子系统指标
气体除氚材料考核单元	1) 并行测试路数：≥4 路独立工况流程 2) 气体最大流量：10 L/min 3) 氚活度水平：含氚气体≥3.7×10^{12} Bq/m³ 4) 承压能力：He/CO_2气氛管路最高压力 12 MPa 5) 温度范围：加热组件最高 800 ℃，温升速率＞10 ℃/min 6) 氚测量：电离室检测，量程 1.0×10^{5}～1.0×10^{12} Bq/m³，精度≤5%～10%，腔体漏率＜1×10^{-9} Pa·m³/s
液体除氚材料考核单元	1) 液体氚活度：≥3.7×10^{6} Bq/L 2) LPCE 单元：最大液体流量 10 g/min，温度最高 100 ℃，压力 常压～0.2 MPa 3) WD 单元：最大液体流量 1 kg/h，塔釜最高温度 100 ℃，操作压力 -0.1 MPa～常压，极限真空 3 kPa 4) 同位素分析：低分辨磁质谱，量程 5～10000 ppm，比值精度＜0.1%
固体去污材料考核单元	1) 表面污染水平：10^{4}～10^{8} Bq/m² 2) 材料形式：高分子基复合膜 / 涂层，含吸氢、吸水、屏蔽多层结构

⑶工艺设计

①气体除氚材料考核工艺

催化氧化工艺：在 N_2、Ar、空气、高压 He、高压 CO_2气氛下，将 HT、$C_xH_\gamma T_\gamma$等氚化物在催化剂作用下氧化为氚水（HTO），配套喷淋洗脱捕集；高压 CO_2工况兼顾 CO 等中间产物毒化效应考核。

金属吸气剂工艺：在惰性气氛下采用 Zr_2Fe 等吸气剂直接吸附回收氚。

热金属还原工艺：采用 ZrMnFe 等合金对高浓氚水（≥1×10^{12} Bq/L）进行还原，将 HTO 转化为 HT，完成还原材料性能与固废特性考核。

4路独立流程可分别开展催化氧化催化剂、吸气剂、高压工况专用催化剂、热金属还原材料的并行考核。

②液体除氚材料考核工艺

氢水催化交换（LPCE）工艺：基于疏水催化剂实现 HT 与 H_2O 间氚的催化交换，使氚由气相转入水相，考核疏水催化剂 / 填料的交换效率、寿命与抗毒化性能。

水精馏（WD）工艺：利用 H_2O/HTO 蒸气压差实现气液同位素多级分离，考核精馏填料的分离效率、通量与长周期运行稳定性。

③**固体表面去污材料考核工艺**

采用**多层复合功能设计**与涂覆成型工艺：

吸附层：不可逆消氢材料 + 水凝胶捕获氚气；金属氧化物（TiO_2、ZrO_2）/ 沸石分子筛吸附氚化水。

屏蔽层：聚偏二氯乙烯 / 金属氧化物薄膜抑制氚渗透与扩散。

制备工艺：以 SEBS、SBS、PMMA、PAN、PVA、聚氨酯、硅橡胶等为基体，复合吸氢/吸水组分，经分散、涂覆 / 成膜、屏蔽层复合制备去污材料，手套箱内外双设备制备以降低放射性废物。

⑷安全设计

氚包容与密闭：全流程密闭管路与反应床，高真空漏率设计，电离室等关键部件漏率＜1×10^{-9} Pa·m^3/s，防止氚泄漏。工况安全边界：高压 He/CO_2回路设置超压保护；加热系统限温与速率控制，避免热失控。放射性防护：高/低活度分区，手套箱隔离操作，减少人员直接接触；材料制备与测试分置，最小化放射性固废产生。介质与尾气处理：含氚尾气 / 废液经氧化、吸附、洗脱等单元预处理后进入氚处理系统，避免直排。真空与压力安全：水精馏单元配置真空保护与压力联锁，LPCE/WD 工作压力在安全区间内可调可控。

⑸平台主要设备及参数

表3-12 氚去除材料考核平台主要设备及参数

序号	名称	主要技术指标
1	液体闪烁谱仪	氚探测下限：≤5Bq/L，氚探测效率≥60%
2	电离室	量程 I：1.0×10^5 ~1.0×10^8 Bq/m^3，测量精度≤5%；量程 II：1.0×10^8 ~1.0×10^{12} Bq/m^3，测量精度≤10%；电离室腔体漏率＜1×10^{-9} Pa·m^3/s
3	低分辨磁质谱	氚水分析范围 5ppm-1000ppm；同位素比值精度 0.1%
4	氚表面污染测量仪	试验压力：10 kPa~150 kPa（任意设定）
5	超低本底液闪	氚的探测限：≤10 Bq/L，氚探测效率：≥60%；优值因子：$(E\times V)^2/B$＞50000
6	水中氚浓缩装置	电解时间≤ 24 h(对 10 倍浓集系数),富集因子 10~20 倍可调，至少同时浓缩 2 个样品
7	氚碳氧化燃烧炉	单批次处理样品数>4，氚水收集效率(HTO)≥90%，碳-14 的收集效率 14CO2≥90%
8	特殊气体透过性测试仪	探测范围：0 ~3552 kDPm/dm2

3.2.5.1.2 氚去除专用设备考核平台

⑴平台功能

氚去除设备研发考核平台面向聚变堆氚工艺系统工程化放大与装备验证需求，重点开展**大流量催化反应器、PEM 电解槽、高温除氚炉**三类关键氚处理设备的性能测试、可靠性考核与工程化验证，为氚工厂、含氚废物处理、氚回收系统提供装备放大设计、运行参数优化、长周期可靠性及安全边界验证支撑。

平台可实现：①大流量除氚催化反应器的压降、传热、催化效率与放大性能考核；②PEM 电解槽关键材料、膜电极组件与电堆的性能、寿命及可靠性并行测试；③真空/气氛型高温炉的氚兼容、高温除氚、大体积部件处理能力验证；④为聚变堆氚处理系统装备定型与工程应用提供试验数据与技术依据。

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
催化反应器考核单元	1) 最大处理流量：1500 Nm^3/h 2) 氚活度测量：电离室，1.0×10^5～1.0×10^8 Bq/m^3（精度≤5%），1.0×10^8～1.0×10^{12} Bq/m^3（精度≤10%） 3) 电离室漏率：＜1×10^{-9} Pa·m^3/s
电解槽考核单元	1) 原料水适用范围：天然水、含氚水、氚化水 2) 氚化水浓度：10 Bq/L～10^{11} Bq/L 3) 氚分析：液体闪烁仪，低本底下限≤5 Bq/L，量程 5～10000 Bq/L（效率≥60%）；高本底量程 1.0×10^4～1.0×10^8 Bq/L（效率≥60%） 4) 测试路数：6 路独立并行系统
高温炉考核单元	1) 有效尺寸：长度≥2 m，截面积≥0.8 m^2 2) 最高处理温度：≥1000 ℃ 3) 工作氛围：高温水汽、Ar 吹扫、真空＜1×10^{-4} Pa 4) 具备氚兼容与尾气回收处理能力

⑶工艺设计

① 催化反应器考核工艺

面向1500 Nm^3/h 级大流量除氚工艺，开展反应器工程化放大验证：采用工业级风机提供大流量气源，测试不同结构与尺寸反应器的压力降、流场均匀性及温度分布；接入含氚气体，考核反应器在大流量工况下的催化氧化效率与氚去除性能；重点解决放大过程中系统压降过大、传热不均、催化性能衰减等工程问题，保障氚设施安全稳定运行。

② 电解槽考核工艺

采用6 路独立并行 PEM 电解测试系统，实现关键材料与电堆的高效考核：以天然水、含氘水、氘水为原料，通过 PEM 电解将氘水分解为氢气与氧气；电解产物经气液分离、干燥、冷凝、净化后，氧气送入喷淋洗脱单元，氢气送入 LPCE 分离单元；可分别开展阴极催化剂、阳极催化剂、质子交换膜、膜电极、双极板及电堆整体性能、长周期寿命、可靠性与放大性能考核。

③ 高温炉考核工艺

针对聚变堆大体积含氘部件深度除氘需求，采用两类炉型组合工艺：

气氛炉：半连续运行，在高温水汽、Ar 吹扫氛围下实现含氘污染物加热解吸与去除；真空炉：批式处理，在高真空（＜1×10^{-4} Pa）下实现部件深度除氘；对炉体结构、耐火材料、加热元件、温控系统进行选型与优化，集成氘尾气回收处理单元，实现氘兼容设计。

⑷安全设计

氘密闭与泄漏控制：全流程密闭管路与设备，高真空漏率指标，电离室、电解系统、高温炉均具备氘包容与尾气收集处理能力。流量与压力安全：大流量反应器设置流量、压力联锁保护；PEM 电解系统配置气液分离、止回、超压泄放等安全措施。温度与真空安全：高温炉具备超温保护、真空联锁与氛围控制；多区域独立温控，防止热失控。放射性物料安全：含氘水、含氘尾气分区处理，在线氘监测与事故排放收集，避免氘向环境释放。长周期运行可靠性：6路电解系统独立控制与保护，可在无人值守条件下开展数月级寿命考核。

⑸平台主要设备及参数

表3-13 氘去除专用设备考核平台主要设备及参数

序号	名称	主要技术指标
1	风机	最大流量 500Nm3/h，出口最大压力 2bar（绝对压力），压力调节范围 20%~100%
2	电离室	量程 I：1.0×10^{5} ~1.0×10^{8} Bq/m³，测量精度≤5%；量程 II：1.0×10^{8} ~1.0×10^{12} Bq/m³，测量精度≤10%；电离室腔体漏率＜1×10^{-9} Pa·m³/s
3	PEM 电解槽	水电解量：5kg/h，耐压：1MPa
4	高温真空除氘炉	炉体长度不小于 2m，截面积不小于 0.8 平方米；额定温度 1000℃，包含氘气导出系统
5	半连续气氛除氘炉	可对待处理氘污染废物进行半连续除氘操作，炉体长度不小于 2m，截面积不小于 0.8 平方米；额

序号	名称	主要技术指标
		定温度 1000℃，包含氚气导出系统

3.2.5.2 氚去除工艺考核平台

3.2.5.1.1 气体除氚工艺考核平台

⑴平台功能

冷却剂净化技术考核平台面向聚变堆**高压氦冷却剂**与**超临界 CO_2冷却剂**两大主流冷却回路，分别建立对应净化工艺考核单元，可完成氚氧化、氚水吸附、杂质气体脱除、床体再生等全流程工艺验证与性能测试，为聚变堆包层冷却系统氚安全控制、杂质净化、长周期稳定运行提供试验依据与工程数据支撑。

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
氦冷却剂净化技术考核单元	1) 设计压力：12 MPa 2) 系统漏率：优于 1×10^{-6} Pa·m³/s 3) 运行参数：8 MPa，最大流量 0.6 kg/s（约 1.2×10^{4} Nm³/h）
超临界 CO_2冷却剂净化技术考核单元	1) 设计压力：12 MPa 2) 系统漏率：优于 1×10^{-6} Pa·m³/s 3) 运行参数：9 MPa，流量 0.68 kg/s（约 2.5×10^{3} kg/h）

⑶工艺设计

①氦冷却剂净化技术考核单元技术方案

本单元采用“催化氧化－吸附法”去除氦气中的氚、“吸气剂法”去除氦气中的杂质气体的技术工艺，冷却剂分流进入净化系统后，依次经催化氧化单元将Q_2转化为Q_2O、氚水吸附单元回收Q_2O、杂质吸附单元去除CO_2、N_2等杂质，净化后的冷却剂返回冷却回路；催化氧化单元失效后通入空气氧化再生，氚水吸附单元失效后采用热氦吹扫解吸Q_2O再生并由氚回收单元收集氚化水，杂质吸附单元失效后通入热氦吹扫释放杂质气体再生；单元设置配气罐用于配制所需氚浓度、氢浓度及杂质浓度的反应气体，平行设置两组可拆卸氧化床、氚水吸附床、杂质吸附床，可开展不同催化剂、吸附剂的性能对比测试，同时配备完善的在线气体分析系统，可对气体成分、氚浓度、水浓度进行实时检测，还可考查床体温度、气体流量、再生时间等参数对各床体再生效率的影响。

② 超临界CO_2冷却剂净化技术考核单元技术方案

本单元采用“催化氧化－吸附法”去除超临界CO_2中的氚、“液化相分离法”去除超临界CO_2中的杂质气体的技术路线，冷却剂依次经催化氧化单元将Q_2转化为Q_2O、氚水吸附单元回收Q_2O、液化分离单元去除O_2、N_2等杂质，净化后的冷却剂返回冷却回路；催化氧化单元失效后通入空气氧化再生，氚水吸附单元失效后采用热氦吹扫解吸Q_2O再生；单元设置配气罐用于配制所需氚浓度、氢浓度及杂质浓度的反应工质，平行设置两组可拆卸氧化床、氚水吸附床和气液分离器，可开展不同催化剂、吸附剂及分离填料的性能对比测试，配备在线气体分析系统，可对气体成分、氚浓度、水浓度进行实时检测，同时可考查床体温度、气体流量、再生时间等参数对催化氧化床、氚水吸附床再生效率的影响。

⑷安全设计

氦冷却剂净化技术考核单元与超临界CO_2冷却剂净化技术考核单元安全设计均遵循统一的高压安全与氚安全标准，核心保障系统长期安全稳定运行。两个单元均严格按照12MPa设计压力规范建设，确保系统漏率优于1×10^{-6} Pa·m³/s，从源头杜绝高压介质与氚泄漏隐患；针对含氚介质，将各单元再生尾气、气体分析尾气均导入除氚系统（DS）进行集中处理，避免氚向环境扩散，保障人员与环境安全。同时，两单元均对加热温度、系统压力、介质流量等关键工况设置完善的联锁保护机制，防止超温、超压、流量异常等安全隐患发生；此外，针对各单元工艺特点，氦冷却剂净化单元重点强化杂质吸附床再生过程的气体吹扫安全控制，超临界CO_2冷却剂净化单元重点优化气液分离环节的温度与压力协同控制，确保各工艺环节安全可控。

⑸单元主要设备及参数

表3-14　气体除氚工艺考核平台主要设备及参数

序号	名称	主要技术指标
1	催化氧化反应器	设计压力 12MPa，设计温度 400℃，氦气流量 0.6kg/s；有效容积＞200L。
2	气体冷却器	设计压力 12MPa，氦气流量 0.6kg/s；入口温度 300℃，出口温度＜50℃。
3	回流换热器	管程及壳程设计压力 12MPa，设计温度 300℃；氦气流量 0.6kg/s，换热面积＞100m²。
4	水吸附反应器	设计压力 12MPa，氦气流量 0.6kg/s；有效容积＞200L。
5	杂质吸附反应器	设计压力 12MPa，氦气流量 0.6kg/s；有效容积＞

序号	名称	主要技术指标
		200L。
6	隔膜压缩机	设计压力 12MPa，氦气流量 0.3kg/s；漏率<1×10-7Pam3s-1。
7	循环泵	工作压力 3bar(a)，流量 20 Nm3/h，漏率<1×10-7Pam3s-1。
8	减压取样装置	取样管路 10 通道以上，设置减压阀及截止阀，入口压力 12MPa，出口压力＜5bar。

3.2.5.2.2 液体除氚工艺考核平台

⑴平台功能

液体除氚工艺考核平台面向聚变堆低、中浓度氚化水及含氚废油处理需求，集成水除氚与油除氚两大核心功能，可开展水精馏、联合电解催化交换（CECE）及含氚废油固化三种工艺的性能考核、能耗优化与可靠性验证。平台可实现低浓氚化水（10 Bq/L~10^8 Bq/L）的高效节能自适应精馏处理、中浓氚化水（10^6 Bq/L~10^{11} Bq/L）的低能耗动态适应CECE处理，以及氚活度小于10^{11} Bq/m^3含氚废油的吸附－固化、乳化－固化工艺研发与性能测试，为聚变堆液体氚废物处理提供工艺优化、参数标定、可靠性验证及工程化支撑。

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
高效节能自适应水精馏系统	处理量 20 kg/h，单柱结构；处理源项为模拟含氘水或实际氚化水，氚化水浓度范围 10 Bq/L~10^8 Bq/L；采用负压精馏工艺，集成自回热节能技术，具备全回流与连续进料采出两种运行模式。
低能耗动态适应 CECE 系统	处理量 10 kg/h，单柱结构；处理源项为模拟含氘水或实际氚化水，氚化水浓度范围 10^6 Bq/L~10^{11} Bq/L；集成贫化氢气能量回收单元，可实现氢气能量回收与电能再利用。
油除氚技术考核单元	处理对象为氚活度小于 10^{11} Bq/m^3的含氚废油；固化体养护条件为温度（20±2）℃、相对湿度≥90%；固化体 42d 氚累积浸出分数低于 0.2cm；配备手套箱内外各一套固化体制备设备，减少放射性废物产生。

⑶工艺设计

① 水除氚工艺设计

高效节能自适应水精馏工艺：采用单塔负压精馏工艺，基于自回热节能技术，通过热泵系统工作介质相变循环，吸收塔顶蒸汽热能并压缩升温，用于加热塔底釜液实现蒸发，无需单独热源与冷源，降低系统能耗；含氚原料水经计量、预热后进入精馏塔，塔内下行含氚水与上行含氚水蒸气充分交换，塔底富集液态氚水，塔顶贫化氚水蒸汽冷凝后，部分回流、部分采出，实现氚的去除与分离。系统具备全回流（预注原

料水、间歇采出分析）与连续进料采出（控制进料、采出速率及回流比，实现稳态运行）两种模式，同时研究极端及变化工况下系统动态演变规律，实现自适应调节。

低能耗动态适应CECE工艺：由介质引入、PEM电解、LPCE分离、贫化氢气能量回收四大单元组成；介质引入单元将不同浓度含氘水/氚化水引入前置储罐，按需泵入后续单元并灵活调配浓度；PEM电解单元将富集氚水电解为氢气和氧气，氧气经冷凝后送入VDS系统处理排放，氢气送入LPCE分离单元；LPCE分离单元将氢气中的氚转移至水相，柱底高浓氚水返回PEM电解单元，贫化氢气送入能量回收单元；贫化氢气能量回收单元通过燃料电池将贫化氢气转化为直流电或交流电，实现能量回收，降低系统能耗。同时开展极端及各类工况测试，掌握系统动态演变规律，实现动态自适应运行。

②油除氚技术考核单元

采用吸附－固化法与乳化－固化法两种工艺，解决水泥直接固化含氚废油相容性差、包容量低、性能不稳定等难题，最终将含氚废油转化为稳定固体废弃物，便于后续处置。

1）乳化－固化工艺：分别量取水与废油，将不同HLB值的乳化剂分别加入水相和油相并溶解，将油倒入水中经高速分散机乳化制备乳液；制备水泥浆料后，将乳液与水泥浆料混合搅拌，在标准养护条件下养护至预定龄期，开展浸出率、抗压强度等性能测试。

2）2） 吸附－固化工艺：将废油与吸附材料（活性炭、粘土等）混合搅拌至完全吸附，再与制备好的水泥浆料混合搅拌，在标准养护条件下养护至预定龄期，进行性能测试。含氚水泥固化体的制备及抗浸出性试验在手套箱内进行，手套箱内外双设备设计以减少放射性废物。

⑶ 安全设计

本平台安全设计核心围绕氚安全、操作安全及废物安全，确保全流程安全可控。

①氚安全防护：含氚介质处理全流程密闭，水除氚单元的含氚尾气、废液按规范导入对应除氚系统（VDS/DS）处理，油除氚单元的含氚固化操作在手套箱内进行，防止氚泄漏；配备液体闪烁仪、气相色谱、电离室等氚浓度检测设备，实时监测氚活度，及时预警异常。

②工况安全控制：水精馏系统设置负压保护、温度与压力联锁，防止超温、超压；CECE系统配备安全阀、止回阀等安全部件，对电解、分离环节的温度、压力、流量进行实时调控，避免工况异常；加热、搅拌等设备设置过载保护，保障设备安全运行。

③废物安全管理：手套箱内外双设备制备固化体，最小化放射性废物产生；合格固化体密封于指定容器，按规范送往专用放射性废物处置场，确保长期安全；试验过程中产生的含氚废水、废气经处理达标后再排放或回收。

④环境与人员防护：设置专用防护区域，操作人员配备相应防护装备；养护区域保持通风、温湿度可控，避免固化体损坏导致的放射性泄漏。

⑸单元主要设备及参数

表3-15　液体除氚工艺考核平台主要设备及参数

序号	名称	主要技术指标
1	精馏塔	塔径 400mm，塔高 30m，含分布器
2	导热油单元	蒸汽量 100kg/h，功率 100kW
3	PEM 电解槽	单台电解槽水电解量 20kg/h
4	催化交换柱	内径约 300mm，304 不锈钢材质，夹套水浴保温，外包保温层
5	氧气气液分离器	氧气流量 12.5Nm^3/h，旋风分离，列管冷凝
6	氢气气液分离器	氢气流量 25Nm^3/h，旋风分离，列管冷凝
7	混凝土快速养护箱	温控范围：室温 0-100℃
8	水泥稠度凝结时间测试仪	相对位移精度≤±0.1mm
9	全自动混凝土快速冻融试验机	试件尺寸：100*100*400mm

3.2.5.2.3 固体除氚工艺考核平台

⑴平台功能

固体除氚工艺考核平台面向聚变工程堆退役、维护过程中受氚污染的结构材料部件及固体含氚废物，集成固体表面去污与固体污染物深度除氚两大核心功能，可开展自动化表面封闭去污工艺研发与性能考核、固体深度除氚工艺优化与效率验证。平台可实现氚污染复杂部件的自动化扫描定位、精准喷涂封闭去污，建立固体表面去污评价体系；同时可开展不同类型固体含氚废物（氚活度10^6~10^{10} Bq/g）的热脱附深度除氚工艺研究，完成除氚效率评估与氚去向追踪，为聚变堆固体氚污染治理、废物减容及部件再利用提供工艺支撑、参数标定及工程化验证。

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
固体表面去污考核单元	配备耐辐照高精度喷涂机器人与耐辐照大负载协作机器人，实现协同作业；融合结构光视觉与激光雷达技术，完成部件表面精细扫描与精准定位；自适应末端执行器可根据封闭剂黏度自动调节喷涂参数；搭建完整工艺研发平台，可开展氚污染部件表面封闭去污测试，建立固体表面去污评价体系。
固体污染物深度除氚工艺考核单元	处理对象为氚活度 10^{6}~10^{10} Bq/g 的固体部件或材料；除氚效率不低于 90%；氚活度测量精度达到固体物质清洁解控水平（10^{2} Bq/g）；高温炉可实现程序控温，配套真空提取、惰性气氛吹扫系统；具备含氚固体样品制备能力，可开展氚释放动力学研究与工艺参数优化。

⑶工艺设计

① 固体表面去污考核单元

以双臂协作机器人技术为核心，融合视觉传感、智能喷涂、抗辐照等技术，通过“环境感知－决策规划－精准执行－反馈优化”的闭环流程，实现氚污染部件自动化表面封闭去污。

1）机器人选型与加固：定制耐辐照高精度喷涂机器人与大负载协作机器人，对喷涂模块、视觉摄像头、供电模块等进行抗辐射加固，喷涂机器人负责封闭剂喷涂，协作机器人负责部件夹持、翻转，实现协同作业。

2）工艺平台搭建：由耐辐照智能协作机器人、部件传输线、供料系统、喷涂系统、防护罩，就地及远程控制系统组成，部件传输线将氚污染部件传送至作业区域，供料系统提供不同类型封闭剂，就地及远程控制系统实现全平台操控。

3）视觉激光雷达融合定位：激光雷达快速获取部件大致轮廓与位置，结构光视觉进行精细扫描获取表面细节，两者融合实现喷涂区域精准识别与喷涂轨迹优化，根据表面起伏调整喷枪角度、距离与速度，确保封闭剂均匀覆盖。

4）自适应喷涂与效果测试：自适应末端执行器根据封闭剂黏度自动调节喷涂压力、流量及雾化参数，完成去污材料喷涂后，用氚表面污染监测仪测量喷涂前后氚活度，评估去污效果，建立表面去污评价体系。

②固体污染物深度除氚工艺考核单元

基于热脱附技术，配合真空提取、惰性气氛吹扫或同位素交换方法，将固体内部溶解氚转换为含氚气氛或含氚水，实现固体除氚与氚去向追踪，核心分为四个功能模块。

1）样品处理与制备单元：对热室转运的含氚固体废物进行分拣、表面去污预处理，同时制备样品级含氚固体，保证氚含量均一准确，满足后续工艺考核要求。

2） 固体含氚释放动力学研究系统：研究不同固体材料中氚的释放特性，获取滞留水平、脱附峰值温度、脱附速率、脱附活化能等参数；探索电阻加热、红外加热等多种加热方式的除氚效率，研究真空、气体氛围对氚释放的影响，为工艺参数设置提供参考。

3）除氚工艺研究单元：针对不同尺寸、表面状态、成分的固体含氚废物或再利用部件，以高温炉加热为主，配合真空提取、惰性气氛吹扫，考察并优化升温速率、峰值温度、保温时间等工艺参数。

4）氚去除效率与去向评估单元：采用溶解－液体闪烁体探测器等方法，定量分析除氚前后固体样品氚含量，评估除氚效率；含氚气体中HTO由水冷乙二醇鼓泡器吸收，HT由电离室、质谱仪等定量测量，尾气送入VDS系统处理，通过液闪测量、数值积分等方式追踪氚去向，为工艺优化提供数据支撑。

⑶ 安全设计

本平台安全设计核心围绕氚安全、辐射安全、操作安全，结合固体除氚工艺特点，确保全流程安全可控。

1）氚安全防护：除氚全流程密闭操作，表面去污作业区域设置防护罩，防止封闭剂喷涂过程中氚泄漏；深度除氚单元的高温炉、气体传输管路严格密封，含氚尾气、含氚液体全部导入VDS系统集中处理，避免氚扩散；配备氚表面污染监测仪、液体闪烁体探测器、电离室等设备，实时监测氚活度，及时预警异常。

2）辐射安全防护：所有机器人、设备均进行抗辐射加固，适配高辐射环境；操作人员通过远程控制系统操控设备，减少现场接触；作业区域设置辐射防护屏障与警示标识，定期开展辐射检测。

3）工况安全控制：高温炉设置程序控温与超温联锁保护，防止热失控；真空系统、气体吹扫系统设置压力保护与泄漏检测，避免气体泄漏；机器人作业设置安全限位与紧急停止装置，防止设备碰撞与操作事故。

4）废物与人员防护：含氚固体样品、废弃封闭剂、固体残余物等按放射性废物规范收集、密封与处置；操作人员配备专用防护装备，作业区域保持通风，定期开展人员辐射剂量监测，保障人员安全。

⑸单元主要设备及参数

表3-16 固体除氚工艺考核平台主要设备及参数

序号	名称	主要技术指标
1	高精度耐辐照机器人	抗辐加固，臂展≥1.5m，负载 15kg，重复定位精度±0.1mm，配置工具换装模块
2	大负载耐辐照机器人	抗辐加固，臂展≥2m，负载 150kg
3	激光雷达模块	非标定制，抗辐加固，测量精度±1cm，测量距离 0.1—20m
4	3D 结构光视觉模块	抗辐加固，分辨率 500W，精度±0.5mm
5	小型高真空高温炉	真空度优于 5E-5 Pa,RT~1000℃，样品级实验
6	氚水取样器	氚兼容，1~5 mL
7	氚气收集器	氚兼容，100~300 mL
8	熔融分析系统	温度>3500℃
9	离子枪	0~ 5keV，材料表面处理

3.2.5.3 涉氚设备可靠性考核平台

⑴平台功能

涉氚设备可靠性考核平台面向水除氚、气体除氚两大应用场景，聚焦各类涉氚核心部件与器件，通过模拟流-热-辐射多物理场条件，开展全面的性能与可靠性考核。平台可完成转移泵、氚兼容泵、真空泵等泵类设备的基础性能测试，开关阀等标准器件的性能考核，压力表、流量计等仪器仪表的精度校准与误差分析，以及换热设备的传热、阻力及氚渗透性能验证；依托水介质、气体介质两大考核系统，采用“加载－传感－分析”架构，实现多通道同步测试、数据实时采集与融合分析，最终完成涉氚设备可靠性评估与预测，为涉氚设备的工程化应用、性能优化及安全运行提供数据支撑与技术保障。

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
气体介质考核系统	1) 常规测试单元：最大流量 10 NL/min，最大压力 1 MPa，控温范围-40℃~800℃，升降温速率不低于 10℃/min； 2) 高压测试单元：最大流量 150 NL/min，最大压力 12 MPa； 3) 真空要求：子单元抽空压力（真空泵入口）不超过 10^{-2} Pa。
水介质考核系统	1) 最高温度 100℃，最大流量 100 kg/h，最大压力 0.6 MPa； 2) 真空要求：系统充液前抽真空及漏率检测，真空泵入口压力不超过 10^{-2} Pa。

⑶工艺设计

①气体介质考核系统

气体介质考核系统集成高压考核单元、常规转移泵考核单元、常规阀门考核单元、常规循环风机考核单元、仪表考核单元、常规真空泵考核单元、常规换热设备考核单元7个子单元，形成多通道闭环测试体系，介质从储罐输送至各子单元，运行后回收气通过转移泵返回储罐，各子单元采用真空腔或真空泵组抽空至规定压力；其中高压考核单元通过增压泵将介质压力提升至12MPa以上、流量在最大150 NL/min范围内可调，设置泄压罐维持压力稳定；常规转移泵考核单元控制运行压力在1MPa以内，检测转移前后压力、流量；常规阀门考核单元采用循环开关模式，结合相关仪器检测泄漏情况；常规循环风机和真空泵考核单元分别测量进出口压力、流量及振动情况，真空泵考核单元还通过质谱仪检测气体成分判断内漏；常规换热设备考核单元利用制冷和加热功能实现-40℃~800℃工况考核，同步检测氚泄漏量、杂质浓度及气体氚含量；仪表考核单元采用前后对照实验完成仪表校准与误差分析。

②水介质考核系统工艺

水介质考核系统集成换热设备考核单元、真空泵/转移泵考核单元、循环泵考核单元、阀门/流量计考核单元4个子单元，形成闭环循环测试体系，介质从储水罐输送至各子单元，运行后返回储水罐，系统充液前需完成抽真空及漏率检测；其中换热设备考核单元利用制冷设备调节介质温度，通过液闪仪检测氚泄漏量；真空泵/转移泵考核单元测量进出口压力、流量及振动参数，借助质谱仪检测介质成分；循环泵考核单元维持流量在100 kg/h范围内可调，实时监测相关运行参数；阀门/流量计考核单元采用循环开关模式测试阀门泄漏情况，同时利用流量校准仪完成流量计精度校准，保障测量准确性。

此外，平台配备数据融合分析系统，基于PXIe总线架构，配置高速数据采集卡，同步采集压力、流量、温度等多通道信号，深入分析多物理场下涉氚部件性能数据，实现可靠性评估与预测；多物理场加载模块通过循环泵提供流场动力，采用电感加热/制冷剂复合温控方式调节流场温度，满足多工况考核需求；性能表征传感网络依托各类高精度仪表与检测设备，完成基础参数、漏率、氚渗透等各类性能指标的精准检测。

⑷安全设计

平台安全设计围绕氚安全、高压安全、工况安全及人员安全，结合气体、水两大介质特性，构建全流程安全防护体系，确保考核过程安全可控：

①氚安全防护：全系统采用密闭式设计，气体、水介质循环回路严格密封，防止氚泄漏；配备电离室、液闪仪、气相色谱仪等氚检测设备，实时监测氚浓度，异常时及时预警；含氚尾气、废液按规范导入对应除氚系统（VDS/DS）集中处理，避免氚向环境扩散。

②高压与真空安全：气体高压考核单元设置泄压罐，防止系统超压；各子单元真空抽空过程严格控制压力，配备压力联锁保护装置，超压、超真空时自动停机；管路、储罐等高压部件按规范选型，定期开展耐压检测，杜绝高压泄漏隐患。

③工况安全控制：温度控制采用复合温控与超温联锁保护，防止加热、制冷过程中温度失控；泵类、风机等设备设置振动监测与过载保护，避免设备故障；阀门循环测试过程中设置安全限位，防止阀门损坏导致介质泄漏；系统充液、抽空等关键环节设置流程联锁，确保操作规范。

④人员与环境防护：作业区域设置辐射防护屏障与警示标识，操作人员通过远程控制系统开展部分操作，减少现场接触；配备专用防护装备，定期开展人员辐射剂量监测；测试区域保持通风，及时排出可能泄漏的微量气体，保障人员与环境安全。

⑸单元主要设备及参数

表3-17　涉氚设备可靠性考核平台主要设备及参数

序号	名称	主要技术指标
1	高压转移泵	气体转移，耐压 12MPa，漏率<1×10-7Pam3s-1
2	常规转移泵	双波纹管泵，耐压 2MPa，漏率<1×10-8Pam3s-1
3	真空腔	密封，漏率<1×10-7Pam3s-3
4	内漏检测仪	超声波泄漏检测，激光波长约 650nm，500 万像素
5	测振仪	检测泵体运行振动，频率范围 5—3500HZ，8 通道
6	气相色谱	PDHID/TCD/检测器，含多种色谱柱，杂质气体测量检出限：10ppb
7	电离室	氚活度可分析 1.0×10^{5} ~1.0×10^{8} Bq/m³，测量精度≤5%，1.0×10^{8} ~1.0×10^{12} Bq/m³，测量精度≤10%，电离室腔体漏率＜1×10^{-9} Pa·m³/s
8	液闪仪	水中氚测量，氚探测下限：≤5Bq/L，氚探测效率≥60%

3.2.6 涉氚部件维护及处理支撑平台

涉氚系统的各类核心部件在长期运行过程中难免发生故障或损坏，如填料设备、高温组件、传感器件、管道及阀门等，一旦出现问题，需及时进行拆卸、维修或更换，以及针对维护部件开展系统性检验、处理和放射性废物处置等工作，以快速恢复系统的正常功能，要求维护平台具备针对不同类型部件的适配性操作能力，能够应对多样化的维护场景，是维系系统长期可靠运行的关键环节。

涉氚部件维护及处理支撑平台的构建是保障氚循环与辐射安全实验系统及包层关键技术研发系统稳定运行、推动聚变能源技术发展的重要举措，其设计与研发需综合考量维护效率、操作安全、环境防护等多重因素，通过技术创新与系统优化，为涉氚系统的维护工作提供全方位的支撑。

3.2.6.1 涉氚部件自动维护平台

3.2.6.1.1 空地一体智能监测模块

⑴模块功能

在氚工厂环境中，空地一体智能监测模块承担着保障辐射安全与工艺完整性的核心管控功能。整个空地一体智能监测模块的实验平台建设如下图所示，该模块针对氚易渗透、难监测的特性，构建了立体无死角的监测网络：固定式检测实验平台，实现本底持续监测；防撞耐辐照无人机平台，负责对高空管线、罐顶、狭缝等人员难以触及区域进行快速扫描与气载氚采样；地面巡检机器人平台，深入设备底部、执行表面擦拭取样与近距离复核。

平台通过智能交互数字孪生平台，融合多源实时数据，动态模拟并预测氚泄漏扩散路径，自动生成污染热力图。同时，平台与检漏系统及洗消单元联动，支持远程泄漏诊断与自动化去污作业，实现从监测－预警－处置－验证的全流程闭环管理，确保氚工厂在严格受控状态下安全、稳定运行。

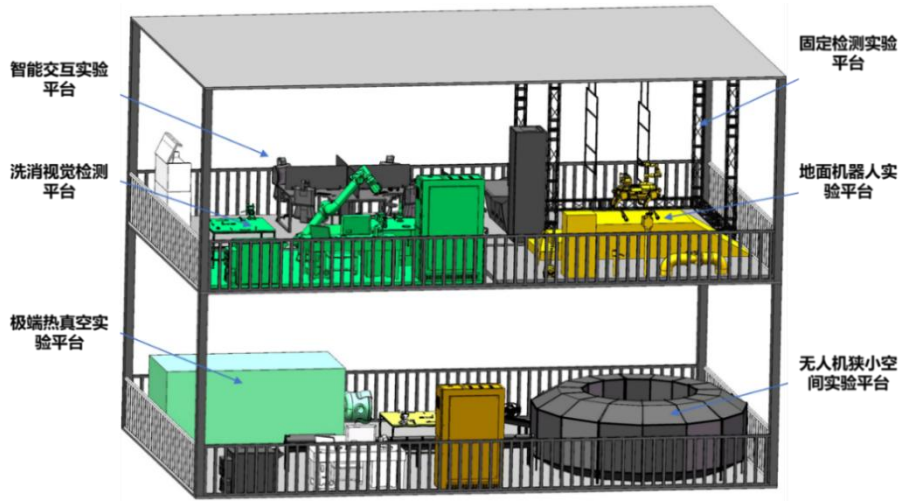


图3-18 空地一体智能监测模块实验平台建设

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
空地一体智能监测模块	（1）完成空地一体协同监测平台建设，空中平台能携带辐射监测仪，实现γ、 X 或中子的高精度悬停采样，悬停误差≤15 cm；地面平台能实现越障和物体擦拭污染取样，跨越斜坡角度≥30°，擦拭定位误差≤±2 mm； （2）设备自动化检漏定位与洗消监测设备：实现检漏定位误差≤20 cm；洗消残留成分监测准确度≥95%； （3）多源数据融合智能决策软件平台：实现各类传感器数据的集成显示与建图，视频流延迟≤500 ms；数据更新频率≥10 hz；预警准确率≥95%。

⑶工艺设计

氚工厂工艺流程中，空地一体智能监测模块构建了监测－取样－去污－验证的闭环管理链。固定式探测器网络作为第一道防线，在关键点位网格化部署，通过耐腐蚀与温湿度补偿设计，在复杂工况下提供稳定本底数据。无人机与地面机器人作为动态执行单元协同作业。固定网络触发异常后，无人机率先对高空区域快速扫描；随后地面机器人抵近指定位置，利用机械臂执行擦拭取样或接触式测量，样本密封送检。所有流程由数字孪生平台统一调度与可视化监控。监测数据实时融合生成动态污染模型，并自动触发后续洗消或检漏工单，形成从感知、分析到执行的全过程可追溯管控，确保辐射安全。

⑷安全设计

氚工厂空地一体智能监测模块的安全设计贯穿运行、数据与应急全流程。运行上，高危区探头采用防爆耐腐蚀设计，无人机与机器人路径经数字孪生预先仿真与碰撞检测，确保作业安全。数据层面建立多级校验机制，探测器定期自校准，数据传输加密。中央控制层对自动应急指令进行多源数据交叉验证，防止误报。应急联动方面，

模块与工厂安全系统深度集成，确认泄漏后自动触发事故通风、电子围栏隔离等联动响应，基于预设安全逻辑快速抑制污染扩散，实现闭环管控。

⑸模块主要设备及参数

表3-18　空地一体智能监测模块主要设备及参数

序号	名称	型号	主要技术指标	套	用途
1	3D 导航激光雷达	Livox Mid-360	Livox Mid-360 激光雷达核心参数包括：拥有 360°×59°的全面视场角，可实现无死角扫描；在强光下（@ ）对目标最远测距约 90 米，测距精度高达±2 厘米；其点云数据率高达每秒 920,000 点，并提供双回波技术，能有效穿水雾等干扰，这些参数使其在 SLAM 与导航应用中表现出色。	5	为移动巡检平台（机械狗/无人机）在复杂的氚工厂环境中提供高精度、全天候的环境感知与自主导航能力。
2	智能地面巡检机器人	定制	总负载（含协作机械臂、氚监测设备、工具及物料）≥20kg；速度≥1.5m/s，爬坡角度≥30°、越障高度最大连续台阶高度≥20cm、具备通过电缆保护槽、攀爬楼梯等障碍物的能力。自主导航（SLAM/视觉/激光雷达/GPS），局部定位精度优于 20mm 及 1°。	1	作为地面移动监测与应急响应的核心载体，替代或辅助人员进入高风险、空间受限或辐射剂量较高的区域。
3	耐辐照协作机械臂	苏州法奥机器人 FR10/瑞尔曼机器人	夹持力（如 10—100N）、开口范围（如 0-50mm）、定位精度（±0.5mm），支持自适应抓取（软爪/硬爪）；接口应具有兼容性，支持所需工具电气接口、机械接口（ISO 标准/定制）的快速对接。	2	作为机械狗的可更换“工具手”，执行精细化操作。
4	真空及加热系统	定制	维持现有真空腔室温度不低于 120℃；真空度低于 10-4pa, 真空漏率小于 1.0×10-9Pa.m3/s；	1	模拟并测试相关设备（如探测执行器、机械臂）在氚工艺系统典型工况下的可靠性。
5	固定式监测和动捕设备	Mars26H 等型号	配备伽马、氚等辐射剂量监测传感器和粉尘、红外、动态捕捉等系统；动态捕捉传感器重量 15.8 g；最小分辨率 0.02°；静态姿态精度 Roll 0.7°, Pitch 0.7°, Yaw 2°；	1	用于高精度记录和复现空间辐照分布；人员、设备的维修、检漏等操作动作。
6	笼式巡检无人机	定制	尺寸小于 180 mm 重量小于 1kg；具有暗黑环境自主定位能力；具有线缆无线供电能力；可搭载 0.5kg 以内环境监测智能探头	1	针对氚工厂内人员难以直接到达的高空、屋顶空间、大型设备顶部及通风管道进行快速巡查。
7	便携辐射气体检测仪	定制	配备专用软件，数据可通过 USB 下载至 PC 机或上传至服务器进行存储处理；－剂量率及累计剂量、计数率均可测量；－多级报警阈值功能，具有	1	作为系统化固定监测网络的灵活补充与移动设备现场验证工具。

序号	名称	型号	主要技术指标	套	用途
			声音、闪灯及振动报警功能/同时显示实时测量曲线趋势；一具有峰值保持功能/具有放射源搜寻模式/具有自动故障检测报及超量程报警功能		

3.2.6.1.2 涉氚部件自主输运模块

⑴模块功能

涉氚部件自主输运系统旨在研发一套用于核设施维护及后处理区域的涉氚部件自动转运系统（如下图2)。该系统将严格遵循放射性物品处理与职业安全规范，最大限度减少人员直接接触风险，实现涉氚维修部件在限定区域内的安全、高效、精准、自动化转运。涉氚部件自主输运系统的整体设计与集成的主要任务，是研制一套集密封承载、自动导航、精准对接、部件抓取等功能于一体的自动化输运系统。具体的建设内容包括：

① 密封包容的转运车系统：设计与制造具有高强度、可靠密封的容器，为涉氚部件提供密封包容环境，防止放射性污染扩散。集成可靠的双密封门系统，确保与后处理区域接口的安全、可靠对接与隔离。具备足够的结构强度，以承受内部载荷及外部各种应力。

② 底部输运系统：设计与制造高精度、高承载能力的自动导航移动平台（AGV)，实现底盘与转运车盒体的快速、可靠分离与结合。

③ 对接机构：开发用于转运车盒体与后处理区域维护窗口的精准对接机构，实现转运车与维护窗口的可靠对准、连接，然后开启双密封门实现转运车盒体内部环境与后处理大厅内部环境连通，并保持可靠的密封包容。

④ 部件抓取系统：研制内置于转运车内置机器人自动化部件抓取平台，实现涉氚部件视觉自动定位、抓取和放置存储。

⑤ 集成监测和运行控制系统：开发用于任务调度、状态监控、路径规划、机器人运行控制和安全联锁的软件平台，实现系统的智能化管理与控制。

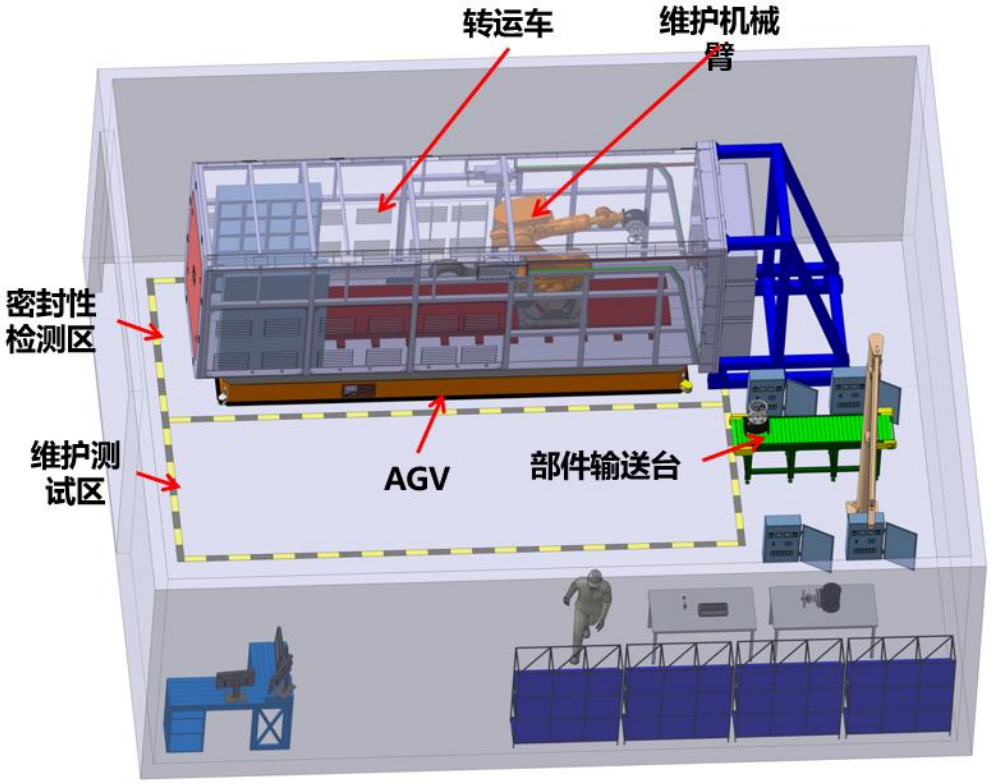


图3-19　涉氚部件自主输运实验平台建设

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
涉氚部件自主输运模块	输运最大负载：5000Kg； 密封包容性能：2.5×10-3/h

⑶工艺设计

涉氚部件自主输运系统的建设目标： 研发一套安全、高效、智能的涉氚部件自主输运系统，以全流程自动化作业替代人工操作，实现涉氚维修部件在核设施限定区域间的无人化转运与交接，从根本上降低人员辐照风险，提升运维安全与效率。主要建设内容： 研制具备高可靠密封能力的转运车、高精度自主导航运输底盘（AGV）、与维护窗口的自动对接机构、内置视觉抓取机器人以及集成监控与运行控制系统，并通过系统集成形成协同作业能力。拟解决的关键技术：攻克转运车在长期使用与频繁对接中的高可靠密封与毫米级精准对接技术，解决在复杂工况下对涉氚部件的机器人视觉识别与灵巧抓取技术，以及实现多模块在辐射环境下的智能协同与安全联锁控制技术。

⑷安全设计

涉氚部件自主输运系统主要风险在于转运车长期高频次使用后的密封与对接可靠性。密封材料可能因老化和机械磨损导致性能衰退，对接机构也可能因重复定位产生精度漂移，二者均可能破坏系统密封包容的完整性。应对措施包括：选用抗磨损材料并采用冗余密封设计；集成内部压力监测传感器，及时感知负压异常变化；设计具备自动补偿功能的对接结构以容错微小偏差。

⑸ 主要设备及参数

表3-19　涉氚部件自主输运模块主要设备及参数

序号	名称	型号	主要技术指标	套	用途
1	维护操作机械臂	KUKA 或 ABB	机器人额定负载能力不低于 200kg，最大工作半径不小于 2.7m，重复定位精度优于±0.1mm；机器人系统包含二次开发软件包，可用于视觉跟踪或力反馈等机器人的高级运动控制；	1	转运车内置机器人自动化部件抓取平台，实现涉氚部件视觉自动定位、抓取和放置存储
2	双密封门系统	定制	开口尺寸大于 1.5x1.5 米，密封性等级 2 级（2.5x10-3/h），自动运行，开启或关闭耗时 4 分钟以内。	1	内置于转运车内部，实现转运车内部环境与涉氚腔室的连通和断开。
3	AGV 运输平台	定制	额定负载 10 吨，可实现自主导航，自动充电，续航时间不少于 6h。满载爬坡能力≤2°；顶升高度 50mm	1	承载转运车车体，实现车体的整体运输、顶升和姿态调整。
4	密封测试柜	定制	压力变化法测量箱室密封性等级，温度计分辨率 0.1℃；气压计分辨率 10Pa；差压计分辨率 10Pa；抽气机组抽速 10 m^3/h。	1	用于转运车和双密封门测试平台的密封性测试，内置抽气机组实现箱室的负压环境，并提供响应的温度计、气压计、差压计以及相关控制设备实现箱室密封性的自动测试。
5	对接锁紧机构	定制	对准精度±1mm，电机驱动实现自动对接	1	用于转运车盒体与后处理区域维护窗口的精准对接机构，实现转运车与维护窗口的可靠对准、连接

3.2.6.1.3 双臂执行器系统

⑴ 模块功能

本项目氚燃料实验楼内部由于存在辐射等有害环境因素，利用机器人进行自动化智能化维护可以显著降低风险、提高维护效率。双臂移动维护机器人主要瞄准的便是氚燃料实验楼内部的维护工作，以两类最常见的任务为例：一、氚燃料实验楼内部遍

布各种管道，管道中的侧插式滤芯需要维护机器人及时更换；二、当故障检测系统检测到局部地区存在泄漏时，维护机器人应当及时进行焊接补漏作业。

⑵**主要设计参数**

①硬件指标：

全向移动底盘：总负载（含机械臂、工具及物料）≥500 kg，采用轮式驱动方案，整车可全向移动，转弯和原地掉头，具备通过电缆保护槽（梯形50—80mm）高度的通过性；续航时间≥2小时，可实时显示剩余电量，低电量（如≤20%）时自动触发充电任务；支持自动充电。

全局相机：安装在移动底盘上，负责补充手眼相机视角范围，观测帧率优于30HZ；带有两轴云台，俯仰角可±60°调整，水平方向航向角可0-360°连续旋转；

②软件算法指标：

自主导航定位算法模块： 激光雷达扫描频率≥10Hz，建图精度≤±5mm，定位精度（SLAM 模式）≤±10mm，行走定位精度：≤±10mm（普通场景），航向角定位精度≤1°；

自主更换工具功能：双臂需要通过快换系统，实现自主更换多种类型工具的能力；

末端工具：各类型末端工具均应实现相对应的功能及能力。

⑶**工艺设计**

工艺流程设计：工艺流程是双臂移动机器人系统的 “骨架”，需以 “高效、无冗余、可追溯” 为原则，设计双臂移动机器人的全任务链路，要求流程闭环化，流程轻量化，流程可追溯。

路径规划设计：平衡效率与安全，需在 “效率优先” 与 “安全冗余” 间找到平衡，应包含路径类型适配，路径层级划分，冲突规避设计等功能。

调度系统设计：实现智能分配，全局最优，调度系统是双臂移动机器人工艺系统的 “大脑”，须具备 “任务分配、资源调度、状态监控、异常处理” 四大核心能力，要求具备任务分配逻辑，资源管理能力，异常处理机制。

人机与系统交互设计：双臂移动机器人工艺系统需与人员、外部系统高效交互，应具备人机交互（HMI）设计，系统交互（API）设计，物理交互设计等。

⑷安全设计

感知预警：提前识别风险，主动避障通过设计前后双激光雷达，实现对周围环境的实时监测，提前识别人员、障碍物，避免碰撞；

紧急停止触发方式：双臂移动机器人车身前后两端安装红色蘑菇头急停按钮（凸起高度≥20mm，防误触），按下后立即切断动力电源，触发制动；调度系统支持“区域急停”功能，当某一区域出现事故时，可远程停止该区域双臂移动机器人；传感器检测到“致命风险”（如人员直接挡在双臂移动机器人正前方＜0.3m）、双臂移动机器人严重偏航（偏离路径＞10cm）、电池电压过低（低于保护阈值）时，自动触发急停。

物理防护：双臂移动机器人车身边角采用圆角设计，避免尖锐边缘划伤人员；车身外侧加装安全触边（聚氨酯材质或橡胶材质），碰撞时可缓冲冲击力并可触发安全回路停车。

过载防护：当总体负载超过双臂移动机器人本身的设计指标时，触发过载警报并自动触发急停。

⑸主要设备及参数

表3-20　双臂执行器系统主要设备及参数

序号	设备名称		内容/规格型号	数量	用途
1	全向移动底盘		定制	1	承载机械臂及实现全向自主移动
2	双臂		UR-20	1	承担操作型任务
			UR-30	1	承担承重型任务
3	快换系统		抓取工具快换：SmartShift Tool Pocket	1	实现不同工具的快速更换功能
			拆装工具快换：定制	1	
4	力传感器		ATI Mini85	2	测量接触力/力矩
5	末端承重工具	两指夹爪	RobotiQ Hand-E	1	抓取物体
		三指夹爪	RobotiQ Hand-E C10	1	
		真空吸盘	RobotiQ EPick-Four	1	吸取板材
6	末端操作工具	电动螺丝刀	定制	1	螺栓拆卸
		激光焊接	FIBERLASER-1500AIR	1	焊接板材
7	手眼相机		Mech-Mind Nano	2	观测

序号	设备名称	内容/规格型号	数量	用途
8	全局相机	Intel RealSense D456	1	观测
9	工控机	Lenovo	2	信号处理及运算

3.2.6.1.4 人形机器人系统

⑴模块功能

涉氚部件精细维护模块人形机器人子系统用于氚循环系统中复杂紧凑空间内中小型部件的精准维护。整个人形机器人子系统实验平台建设如图1所示，包含无氚实验区和涉氚测试区两部分。无氚实验区用于前期维护任务训练与全流程模拟，涉氚测试区用于后期真实场景下维护性能测试。无氚实验区分为运动控制区与精细操作区，运动控制区用于人形机器人行走、越障、部件运输、自主导航等技术研发与测试；精细操作区用于人形机器人部件识别、板件拆装、轴孔装配等单任务数据采集与强化学习训练以及维护任务全流程综合测试。涉氚测试区用于评估人形机器人系统在真实涉氚环境下作业性能。

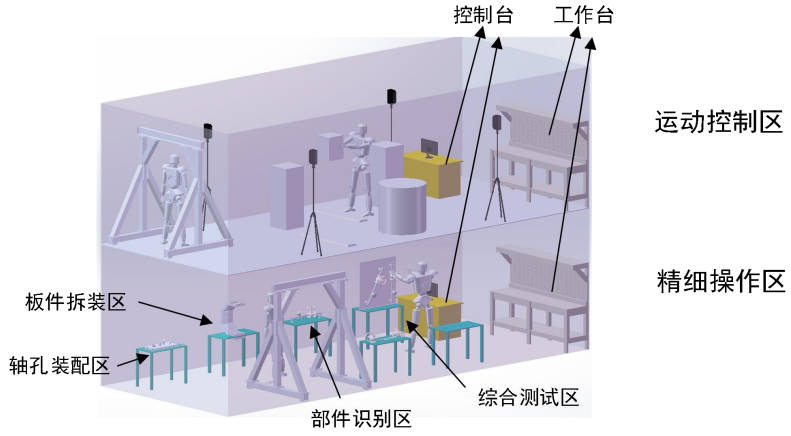


图3-20 无氚实验区

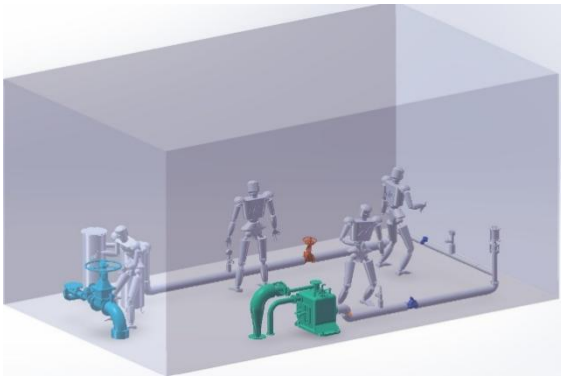


图3-21 涉氚测试区

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
涉氚部件精细维护模块人形机器人子系统	人形机器人可跨越≤5 cm 的地面线缆保护槽，具备自主导航功能，实现 20kg 以内部件的自主搬运，阀门、过滤器等氚循环系统中小型部件的维护成功率≥95%。

⑶工艺设计

在氚循环系统中小型部件维护工艺流程中，人形机器人子系统建立了监测－定位－维护－验证的行为流程。人形机器人总控系统通过氚循环系统仪表与传感器数据去监测部件运行状态，利用部件故障模型确定待维护部件编号。随后总控系统关联氚循环系统全局地图与部件数据库，确定距离待维护部件最近的空闲人形机器人编号。指定编号人形机器人自主导航至待维护部件附近开展维护作业。作业完成后，总控系统评估维护后部件运行状态正常后人形机器人返回至等待区。整个流程由人形机器人数字孪生系统统一调度，过程数据实时可视化并定时存入数据库，确保维护作业全程可追溯。

⑷安全设计

涉氚部件精细维护模块人形机器人子系统的安全设计包含系统和组件两个层面。系统层采用基于Fast -DDS的硬实时分布式通讯架构将数字孪生总控系统、人形机器人机载控制器以及安全报警系统连接起来，保证人形机器人系统中数据传输的安全性与高效性。组件层中总控组件基于高保真数字孪生技术，实现人形机器人运行状态的在线监测、导航路径的无碰撞测试以及维护过程的安全评估；人形机器人机载控制器组件基于本体关节传感器反馈信息在线评估本体安全状况，预测有运行故障时发送故障报警信号并关机；人形机器人电气系统配备急停按钮，支持总控系统远程控制。

⑸主要设备及参数

表3-21　人形机器人系统主要设备及参数

序号	名称	型号	主要技术指标	套	用途
1	人形机器人	宇树 G1	高宽厚（站立)≥1300x450x200mm，高宽厚（折叠)≥690x450x300mm，整体重量（带电池)≤50kg。总自由度（关节电机)≥35，其中单腿自由度≥6 个，腰部自由度≥1 个，单手臂自由度≥5 个。手臂最大负载≥3kg。全关节中空内走线，内置双编码器，膝关节最大扭矩≥120N.m。配备 2 只五指灵巧手，深度	4	中小型部件维护作业执行器。

序号	名称	型号	主要技术指标	套	用途
			相机、3D 激光雷达、4 麦克风阵列、5W 扬声器		
2	运动捕捉系统	FZMotion 等型号	分辨率：4096x3072，帧速：300fps，视场角：54x42，光源：波长 850nm，亮度可调节追踪距离：30m，捕捉精度 0.02mm	1	人形机器人运动控制与自主导航全局精准定位。
3	灵巧手	定制	重量≤1.5kg，自由度≥15，可实现机器人无触觉本体感知，最小抓握直径≤15mm，指尖重复定位精度≤1.5mm	8	人形机器人执行精细化维护作业的末端执行器。
4	悬吊移位机	柠安等型号	底座宽 85—105cm，提升高度 80—240cm，负载≥70kg	4	人形机器人运动测试防护用具。
5	可穿戴设备	XsensMVN 等型号	内置传感器数量≥16，传感器采样频率≥100Hz，数据传输距离≥100m，数据传输频率≥200Hz	1	人形机器人维护流程训练数据采集。

3.2.6.1.5 自动维护总控模块

⑴模块功能

自动维护总控模块是统一集成控制平台的核心，通过分层分布式架构实现涉氚维护全流程的集中调度与远程操控。系统由中央控制层、功能执行层及监测与交互层组成，协同完成从部件维护、除氚清洗到废物暂存的全过程管理。依托多级安全连锁体系，系统整合设备互锁、区域屏障联动及辐射超限停机等机制，确保异常工况下快速切断与风险隔离。通过主从双边遥操作技术，实现力反馈同步与精细作业的远程执行，并结合虚拟现实辅助系统进行三维预演与路径规划，提升操作安全性与效率。实时监控平台集成多源传感器数据，实现辐射、设备状态等参数的动态采集与故障预警，构建数字化运行管理体系。系统通过标准化接口与模块化设计支持灵活扩展，并经过模拟环境与辐射工况验证，保障其在涉氚场景下的稳定可靠运行，为精细化维护与安全管控提供全面支撑。

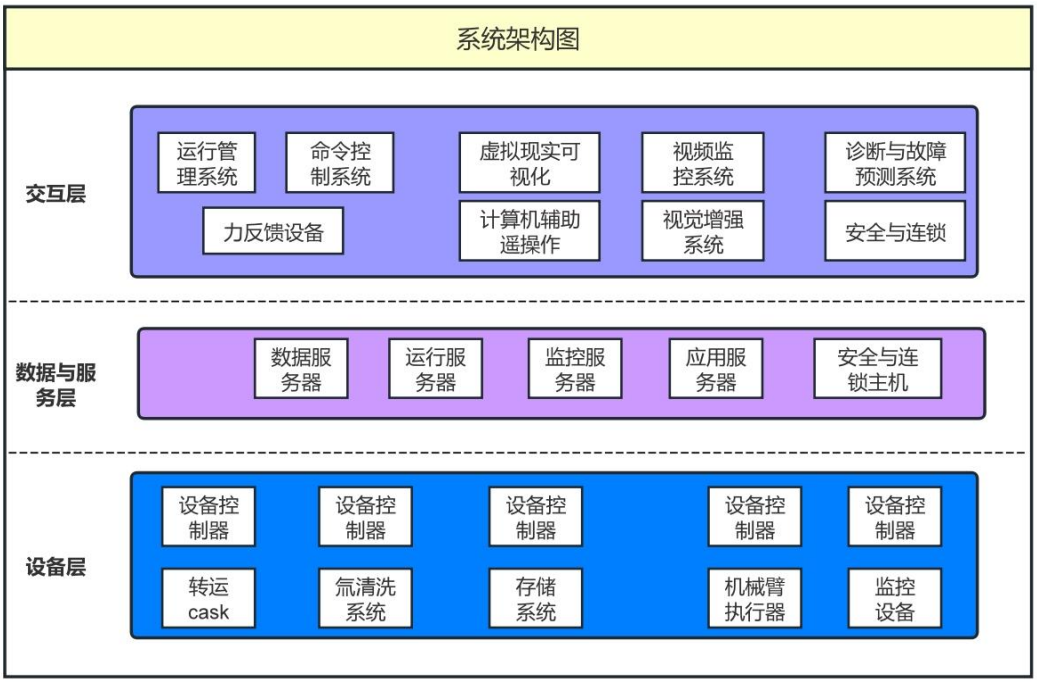


图3-22 自动维护总控模块系统架构图

⑵主要设计参数

子系统名称	子系统指标
空地一体智能监测模块	1.实现对涉氚部件维护和存储全流程的监控和调度控制，系统响应时间≤ 100 ms。 2.主从双边系统满足开展插拔、拆装、夹取、对准等精细化操作需求，要求成功率≥98%； 3.辐射安全与多级安全联锁与运行安全保障能力，联锁保护且响应时间≤ 100 ms。 虚拟现实系统可渲染和显示 > 50 个动态实体，刷新周期 ≥ 10 Hz。

⑶工艺设计

自动维护总控模块的工艺设计旨在实现涉氚环境下作业流程的自动化、数字化与智能化控制。它以“集中调度、远程操作、实时监控”为核心，将维护作业、去污清洗、封装转运及废物暂存等关键工序进行一体化集成。设计通过中央控制系统，统筹调度各功能执行单元（如遥操作机械臂、去污设备）按预设或优化工艺逻辑顺序执行任务，并由监测层实时反馈辐射剂量、设备状态等多维数据。工艺控制深度融合多层次安全联锁机制，在每一步操作中嵌入风险判定与联动响应，并通过虚拟现实系统进行工艺流程的三维预演与仿真验证，确保实际作业路径最优、风险可控。最终构建起一个闭环、可追溯、自适应调整的数字化工艺执行体系，为高辐射环境下的安全、高效、精准维护提供核心流程保障。

⑷安全设计

针对涉氚操作的高风险性，建立了设备级、工艺级与区域级联动的多层次安全联锁系统网络。系统通过硬接线与逻辑程序，实现设备状态互锁、区域访问控制、辐射剂量超限自动联动停机等刚性防护。集成的环境监测网络实时感知氚浓度与异常工况，触发声光报警与远程急停。所有关键操作均需通过权限验证，并在虚拟现实系统中进行安全预演与路径验证，以预先排除干涉与碰撞风险。同时，结合实时数据监控与故障诊断，形成“事前预警、事中拦截、事后追溯”的全流程闭环安全管理，确保人员、设备与环境在任何工况下的绝对安全隔离与受控状态。

⑸主要设备及参数

表3-22　自动维护总控模块主要设备及参数

序号	名称	型号	主要技术指标	套	用途
1	主从遥操作机械臂系统	Haption 6D，从端定制机械臂	负载能力：≥50kg；自由度：6-7；重复定位精度：±0.5mm；内置力/力矩传感器；具备碰撞检测功能。	1	用于涉氚部件的远程精细化拆解、装配、搬运等核心操作，是执行层关键设备。
2	辐射剂量在线监测仪	固定式，γ/中子型	量程：0.1μSv/h ~ 10 Sv/h；能量响应：48 keV ~ 3 MeV；响应时间：≤2s；输出：4—20mA/网络信号。	10	实时监测工作区域γ及中子辐射场强度，数据用于安全联锁与人员防护。
3	氚浓度实时监测仪	电离室或闪烁体型	测量范围：0.1 ~ 1E+6 Bq/m³；采样流量：1-2 L/min；响应时间：< 30s。	10	持续监测空气中氚化水蒸气（HTO）浓度，是氚泄漏预警和内部照射风险评估的关键。
4	系统机房服务器	工业级冗余服务器	CPU：多核高性能处理器；内存：≥64GB ECC；存储：RAID 配置固态硬盘；支持冗余热备与实时操作系统。	5	作为中央控制层核心，负责任务调度、逻辑控制、安全连锁管理和数据存储。
5	虚拟现实仿真工作站	高性能图形工作	GPU：专业级显卡；VR 头盔分辨率：≥4K/眼；定位系统精度：毫米级；与控制系统数据接口：OPC UA/定制协议；	1	用于维护任务的三维预演、操作员培训、路径规划与碰撞检测，提升安全与效率。
6	安全联锁控制器	安全型 PLC	安全完整性等级：SIL 2；处理速度：< 100ms；I/O 点：冗余配置；支持安全协议（如 CIP Safety, PROFIsafe）	1	安全联锁逻辑的核心处理器，独立于主控制系统，专用于处理急停、区域互锁、超限停机等安全功能，实现故障安全原则。

3.2.6.2 涉氚部件后处理平台

涉氚部件后处理平台主要用于实现涉氚部件的安全、高效后处理，破解氚污染带来的环境、安全及资源回收难题，支撑核相关领域的合规运营与技术升级。平台建设以“减污、安全、可控”为核心，涵盖多个功能模块，重点完善涉氚部件清洗除氚模块、固废存储模块的建设，配套建设辅助及安全防护系统，形成从部件接收、处理到固废处置的全流程闭环体系。

平台建设整体分为核心功能模块、辅助系统及安全防护系统三部分，其中核心功能模块重点建设涉氚部件清洗除氚模块与固废存储模块，各系统协同运作，确保后处理过程安全、高效、环保。

3.2.6.2.1 涉氚部件清洗除氚模块

⑴ 模块功能

涉氚部件清洗除氚模块作为平台核心处理单元，主要建设内容包括：搭建激光清洗、高温除氚工艺线，配备转运装置、激光清洗设备、湿法净化系统及除尘装置等附属设备，实现涉氚部件从表面清洁到深度除氚的全流程处理。转运装置由一套接转平台cask组成，负责将涉氚部件转至清洗工位；激光清洗装置可针对不锈钢、铝、黄铜等多种材质部件进行表面去污，避免湿法处理产生二次废水污染。高温除氚模块由高温真空除氚炉及真空系统，实现部件内部残留氚的深度去除；配套建设除尘系统，在清洗过程中避免气溶胶对外部环境造成大量污染。

⑵主要设计参数

涉氚部件清洗除氚模块	1. 清洗去污能力：氚以及活化粉尘，碳钨等表面颗粒，清洗完成后包容等级由 C3 降至 C2； 2.含氚固废体的除氚要求：废物表面氚活度限值需低于 4×10^4 Bq/cm²，除氚效率不低于 90%。

⑶工艺设计

涉氚维护部件从系统中拆解下来后，颗粒的扩散以及放射性氚从材料中解析出来泄漏进入设施附近的气体环境中，易使得相关从业人员极易吸入放射性颗粒，使得从业人员和近距离接触人员受到内照射。同时维护设备如果浸没在放射性颗粒污染的气体环境中使得维护设备的相关电子设备的寿命和可靠性大大降低。所以在进入后处理系统进行处理前，需要对其进行表面污染的清洗工作，以此尽可能地降低和限制污染

的扩散，便于后续处理、处置或再利用，同时减少对环境和人员的辐射危害。该模块主要由自动化清洗箱室及高温除氚系统组成。整个清洗除氚过程为：维护部件通过遥操作系统拆卸后，通过输运系统转入后处理系统内，并对接自动化清洗箱室，由箱室内部执行单元将部件转至清洗工位。再由机械臂执行系统对部件进行自动化清洗，并采样检测，以确认污染是否达到下一步处理工艺水平，否则，清洗将一直进行到可接受的范围为止。当维护部件足够清洁时，由内部转运系统将部件转运至下一道工序。在自动化清洗工序完成后，通过高温除氚系统，将涉氚部件内的吸附氚通过高温同位素置换的方式进行去除。

⑷安全设计

在整个清洗除氚过程中会面临氚泄漏风险，若设备密封性能不足、管道破损、操作不当，可能导致氚气、氚化水泄漏，造成人员辐射暴露、环境污染，甚至引发安全事故。通过严格落实设备密封与防渗透要求，对清洗槽、存储容器、管道等关键设备进行严格的密封测试，采用双重密封设计，定期开展密封性能排查与维护；优化操作流程，制定标准化操作规范，对操作人员进行专业培训，严禁违规操作；在各风险节点强化负压通风系统，确保泄漏的氚气可及时收集、处理，防止扩散；定期开展氚泄漏应急演练，提升应急处置能力。

⑸主要设备及参数

表3-23　涉氚部件清洗除氚模块主要设备及参数

序号	名称	主要技术指标	套	用途
1	激光清洗系统	激光器，脉冲模式，平均功率 500w，工作电压 220/380V，接口协议 XY2-100； 光纤抗拉强度≥0.69GPa,1064nm 光纤； 快换组件包括连杆组件，手轮，减速齿轮，驱动部件，连杆圈座，连杆圈组成； 桁架机器人系统：3 自由度，重复定位精度±0.2，最大速度 1.0m/s，电压 220v； 主臂：6 自由度；末端负载：30kg；机械臂臂展：1100mm；重复定位精度±0.05，末端速度最大 2.0m/s； 视觉相机：能够提供≤0.05mm 的重复精度，高分辨率成像分辨率≤0.5mm，扫描仪的视场约为 200×300mm	1	激光清洗主设备
2	整体箱室	3500×3000×4000mm，材质是 8mm 聚碳酸酯材料，门板上装有 4 个手套孔	1	包容箱室
3	N100 传感器	1000Hz 的传感器采样频率，数据输出频率	1	/

序号	名称	主要技术指标	套	用途
		400HZ，输出接口类型 TTL 串口/RS485		
4	举升机构	举升高度 80mm—100mm，工作电压 380v	1	/
5	高效离心风机	采用无刷直流电机驱动，提供≥300m³/h 的额定风量，支持变频调速	1	除尘风机
6	多级过滤器	对 0.3μm 颗粒物的过滤效率≥99.99%；	1	过滤装置
7	压差传感器	成品采购	1	负压传感装置
8	温度传感器	成品采购	1	温度传感装置
9	集尘容器	采用快拆式设计，容积≥10L	1	清洗过程气溶胶收集
10	密封机构，密封门	不锈钢材料	1	包容箱室进出口
11	排风过滤器	排风系统，选定 100 风量的过滤器	1	箱室氛围控制
12	六轴机械臂	6 自由度；末端负载：30kg；机械臂臂展：1100mm；重复定位精度±0.05，末端速度最大 2.0m/s	2	手套箱内执行机械臂
13	液体闪烁计数器	定制，手套箱集成	1	β核素及表面氚污染检测
14	氚取样器	定制，手套箱集成	2	取样器
15	压力变送器	/	1	/
16	抽样气动装置	定制	1	取样转运装置
17	高温除氚炉	温度 1000℃，最大装载量 500kg	1	高温除氚主设备
18	红外测温器	标准件	1	温度检测
19	热电偶密封装置	定制	1	/
20	CF63 辅助测量站	定制	1	/
21	氚水处理罐	定制	2	临时储罐
22	催化氧化手套箱	尺寸，2494mm*1270mm*1780mm	1	氚气处理手套箱

3.2.6.2.2 涉氚部件废物存储模块

⑴模块功能

固废存储模块聚焦涉氚部件清洗除氚处理过程后的固废安全处置，主要建设内容包括：建设智能化自动存储立库系统，配备防氚渗透存储容器、温湿度及氚活度监测设备；建设固废预处理设施，对后处理过程中产生的污染滤网、废弃试剂包装、拆解废料等进行分类固化处理，采用水泥固化或树脂固化技术，降低固废中氚的迁移性与泄漏风险；配套建设固废转运系统与应急处置设施，实现固废从产生、预处理到存储的闭环转运，同时配备泄漏应急吸附材料与处理设备，应对突发泄漏情况；搭建固废

存储信息化管理系统，对存储固废的种类、数量、存储时间、氚活度等信息进行实时记录与追溯，确保存储过程可查、可控、可追溯，贴合核固废存储的安全管理要求。

⑵主要设计参数

涉氚部件废物存储模块	含氚固废处理能力：固废存放空间为 300m^3，固废临时存储周期为 5 年；

⑶工艺设计内容

涉氚部件固废存储模块主要针对放射性部件的低害化处理及无害化处理，衰变热的去除，放射性物质暂存，放射性物质长存等。面向废物处理场所空间拥挤的实际问题，研发小型化、高度集成化、全遥操作式固废处理设备，融合分拣、切割、压缩、灌浆功能的装置，动力执行部件尽可能布置在箱体外，箱体内仅布置从动部件，同时考虑部件的远距离检修要求；考虑远距离更换维修（机械手、智能设备）；在缓冲储存之前，应监测废料包装的释放情况，金属部件通过伽马能谱测量来表征切割的碎片，然后进行装箱。在废料封盖后，最后需要采用氚放气测量站测量含氚废物的氚释放量；针对放废存储需求，建立一套集自动输运、机器人、监控和控制、安全和安防、维护和支持等功能模块为一体的自动化固废仓储库。

⑷安全设计

涉氚部件固废存储模块安全设计核心是防范氚渗透泄漏、保障人员与环境安全，遵循“分级防控、全程监测、应急可控”原则，结合涉氚固废放射性、氚迁移性强的特性，从存储容器、库房环境、监测预警、应急处置及流程管控五大维度开展系统性安全设计，全面符合核安全相关规范，确保固废存储全过程安全可控。

存储容器采用防氚渗透复合结构设计，基材选用耐腐蚀316L不锈钢，经硼碳离子注入改性处理，内壁涂覆致密聚四氟乙烯涂层，形成“基材－改性层－功能涂层”三重防护，有效阻断氚原子扩散，将氚泄漏率控制在安全限值以下；容器配备双重密封装置，采用密封垫圈与焊接密封结合方式，存储前严格开展泄漏检测，合格后方可投入使用，同时按固废放射性等级分类选用专用容器，避免交叉污染。

库房环境采用分级分区设计，设置物理隔离屏障；采用负压通风系统，确保库房内氚浓度低于安全限值，通风尾气经分子筛吸附处理后达标排放；配备温湿度智能调

控设备，将库房温湿度控制在适宜范围，抑制氚渗透迁移，同时设置防火、防渗等防护设施，防范次生安全风险。

构建全流程监测预警体系，按网格布局布设氚气监测仪、表面氚测量仪，实现固废存储区域氚活度实时监测，检测精度达±5%，结合LSTM神经网络模型实现氚活度异常预判，预警响应时间≤10秒；搭建信息化追溯系统，实时记录固废种类、氚活度、存储时间等信息，实现全生命周期可追溯。

配套完善应急处置设施，配备氚泄漏应急吸附材料、应急喷淋设备等，制定分级应急处置预案；明确标准化操作流程，操作人员经专业培训考核合格后方可上岗，定期开展应急演练与安全排查，形成“防控－监测－预警－处置”的闭环安全设计，全面保障固废存储安全。

⑸主要设备及参数

表3-24　涉氚部件废物存储模块主要设备及参数

序号	名称	主要技术参数	套	用途
1	电动密封门	1400mm*220mm*2365mm	2	包容隔离
2	不锈钢导轨装置	定制	1	/
3	伸缩传动机构	定制	1	直线驱动装置
4	拖链机构	定制	1	/
5	升降机构	负载 500kg	1	/
6	立库钢箱、钢桶	满足 300m^3 存放空间	1	废物存储装置
7	立库放置架	承重 500kg 分离式货架柱片，货架主体结构使用 Q235 材料，厚度 2mm 的型材	1	置物架
8	立库堆垛机	定制	2	立库储存装置
9	电动 AGV	长宽高 2300*2050*2600mm，额定载荷 2500kg，满载行驶速度最大为 0.8m/s	1	转运装置
10	钢桶钢箱焊接装置	定制	1	焊接装置
11	密封性检测装置	定制	1	封焊后密封性检测
12	液体闪烁计数器	定制	1	β核素及表面氚污染检测

3.2.7 氚辐射安全效应实验平台

氚辐射安全效应实验平台建设的主要内容包括：安全防护单元、氚实验平台辐射监测与防护单元、先进放射性氚测量技术研发单元、氚扩散及迁移转化实验单元，其逻辑关系见下图。

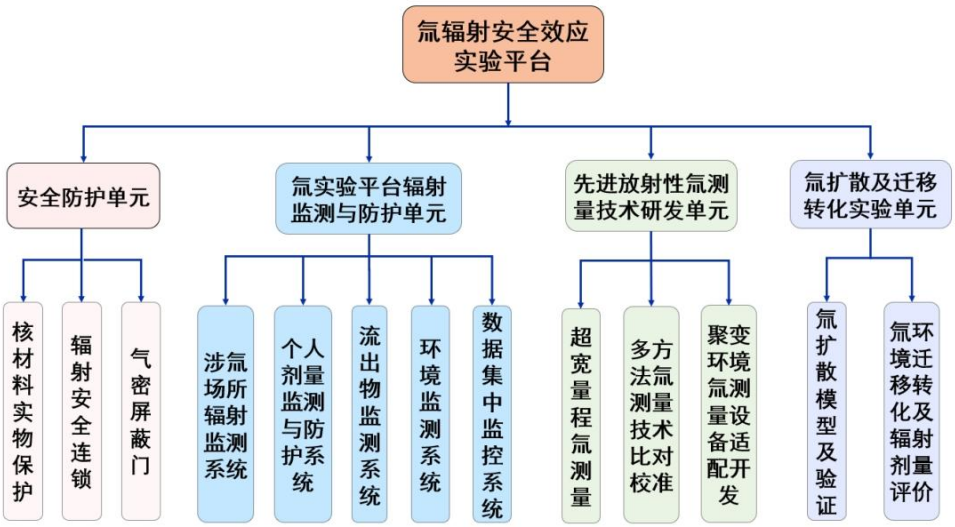


图3-23 氚辐射安全效应实验平台

随着项目的逐渐实施和落地，氚辐射安全效应实验平台大部分实验验证平台设置在氚燃料实验楼，环境级辐射测量分析系统设置在包层研发楼。

3.2.7.1 氚辐射安全效应实验平台（氚燃料实验楼）

⑴单元功能

氚辐射安全效应研究平台主要包括安全防护单元，辐射监测与防护单元（涉氚场所辐射监测系统、个人剂量监测与防护系统、流出物监测系统、数据集中监控系统），先进放射性氚测量技术研发单元（多方法氚测量技术对比校准、聚变环境氚测量设备适配开发），氚扩散及迁移转化实验单元（氚在大气－土壤－水体多介质耦合迁移的一体化实验系统、含氚微粒生成及实验系统）。主要功能为落实本项目环境影响评估和核材料实物保护涉及的安全联锁、气密屏蔽和安保防护等基础设施；建成涉氚场所内外围环境、放射性流出物及工作人员完善的辐射监测与防护系统，确保氚燃料循环实验平台运行的核与辐射安全；针对聚变堆工艺与环境中多形态氚精确测量需求，研发基于放射性、质谱、色谱等各种方法的先进氚测量技术，实现超宽量程、多形态

氚高精度测量；建立大气、水体及土壤中氚扩散的模拟台面实验平台，开展氚在环境中扩散及迁移转化实验，获得关键实验数据用于聚变堆辐射环境影响分析评估。

⑵主要设计参数

①氚实验平台辐射监测与防护单元

场所氚浓度实时监测范围覆盖1×10^{5}Bq/m^{3}~1×10^{11} Bq/m^{3}，不确定度≤±10%；氚表面污染水平监测范围1.0Bq/cm^{2}~10^{6} Bq/cm^{2}，不确定度≤±20%。环境空气中氚测量范围覆盖1~10^{6}Bq/m^{3}，环境水中氚测量下限≤1.5Bq/L，土壤、生物样中氚测量下限≤10Bq/kg。气载流出物氚在线监测探测下限≤1×10^{4} Bq/m^{3}，取样监测探测下限≤10Bq/m^{3}；液态流出物氚在线监测范围覆盖10^{3} Bq/L~10^{8}Bq/L，取样监测范围覆盖2 Bq/L~10^{4}Bq/L。

②先进放射性氚测量技术研发单元

超宽量程气态氚浓度在线监测采用多类型探测组合方式，量程覆盖500 Bq/m^{3}~1×10^{14}Bq/m^{3}；气态氚测量设备校准实验平台，氚浓度校准范围10^{3}~10^{15} Bq/m^{3}，校准气压范围0.1 Pa至1.0 Mpa，校准不确定度≤±5%（k=2）； 聚变辐射环境模拟测试平台， 中子能量从热中子～2MeV快中子能区、中子通量≥10^{3}n/s•cm^{-2}，X/γ能量达到1MeV、剂量率≥100mSv/h，中心磁场强度达到200mTs。

③氚扩散及迁移转化实验单元

多介质环境氚迁移转化实验单元具备演示验证释放点周边5km内（空间比例1:200～1:2000），环境的氚大气扩散、大气－土壤介质沉积转移、大气－水体沉积转移，风速0～10m/s，风速分辨率最高可达0.2m/s；降水喷淋具备模拟小雨、中雨、大雨、暴雨四种强度能力；土壤蒸发量最高可达0.35 mm/h。氚氚扩散及迁移转化具有生成不同活度浓度的氚及含氚微粒、开展环境生态系统迁移转化与联合毒性效应实验研究的能力。

⑶工艺设计

氚辐射安全效应实验平台工艺设计围绕“支撑保障、技术研发、简便高效”三大原则，聚焦平台核心功能定位，结合设备特性优化安装调试流程，严格遵循相关标准规范，确保平台稳定运行、满足项目辐射监测与安全防护及实验研究需求，整体工艺设计简洁高效，无需复杂总装调试，核心内容如下。

氚辐射安全效应实验平台工艺设计以功能适配为核心，主要为聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台提供全方位辐射监测与安全防护支撑，同时兼顾聚变堆先进氚测量方法与技术研发，氚扩散、迁移转化及辐射效应实验研究。基于该定位，工艺设计重点围绕辐射监测、安全防护、实验研究三类核心设备及系统展开，充分考虑各单元功能需求，避免冗余设计。

设备选型与布局工艺具有分立运行特性，平台采购及自研的核心设备包括辐射监测仪器、防护器具、氚扩散模拟实验台等，此类设备均为具备独立运行功能的分立设备，无需进行总体装配及总体联合调试，仅需按各单元功能需求，完成单台设备的合理布局，确保设备运行空间充足、操作便捷，同时保障设备间互不干扰，各自可独立运行。

安装调试工艺突出简便性与规范性，分三类场景优化设计。一是少量涉及土建和组网运行的防护及监测系统，工艺设计明确其安装与调试流程简化，重点适配现场实际条件。其中，涉氚实验场所气密包容用气密屏蔽门，工艺设计要求其倒运安装及开闭调试，严格依据建筑施工改造空间和方案进行适配，确保气密性能达标，满足涉氚场所包容防护需求。二是辐射监测与防护单元相关系统，装配、调试需严格遵循环境影响评估报告书和核材料实物保护审评方案，重点完成终端设备布局组网安装、运行逻辑及控制联动等功能调试，核心把控辐射监测点位、量程、时间响应和测量准确度四大关键参数，确保完全满足本项目涉氚系统辐射防护及应急响应需求；同时优化安全联锁逻辑及运行流程，满足氚燃料循环实验的防护要求，保障系统联动可靠、应急响应及时。三是各实验研发单元设备，工艺设计针对性优化调试流程。氚测量技术研发单元试制的氚测量和标定测试设备，安装调试工艺仅限于单台设备自身的组装与功能测试，不涉及外部总装及联合调试，在简化调试流程的同时，确保设备测量精度达标；环境氚扩散与迁移转化模拟实验单元搭建的台面实验平台，其装配涉及小型风机、水泵、温湿度控制器及氚监测与通排风除氚等系统，且该平台与本项目涉氚主工艺系统无任何接口，因此仅需对模拟实验平台单独进行装配，并开展相关功能调试，确保模拟实验条件达标、数据精准。

工艺设计同时明确核心管控要求，全过程围绕辐射安全与实验可靠性展开，所有设备安装调试均须符合核安全相关规范，确保辐射防护到位、监测数据准确、实验流

程合规。整体工艺设计既满足平台支撑保障与技术研发的核心需求，又依托设备分立运行特性，简化总装调试流程，提升平台建设效率，为项目涉氚系统安全稳定运行及相关实验研究顺利开展提供坚实的工艺支撑。

⑷安全设计

结合平台涉氚操作及辐射监测核心功能，辐射安全设计与辐射监测、防护工艺深度融合，重点防控氚辐射泄漏及人员辐射暴露，具体要求如下：

包容防护设计：严格沿用工艺中气密屏蔽门、手套箱等防护设备的气密、防辐射参数，涉氚操作区域均采用密闭式设计，防止氚挥发泄漏；操作区墙面、地面、台面采用防氚污染、易去污材质，避免氚吸附残留。

监测预警设计：依托工艺中辐射监测仪器组网系统，实现辐射剂量、氚浓度的实时监测、超标报警及数据追溯，监测点位无盲区，设定氚浓度报警阈值，γ辐射剂量报警阈值适配环境级辐射防护要求；报警信号同步联动应急通风、紧急停机系统，确保异常情况快速处置。

人员防护设计：配套专用辐射防护器具（辐射防护衣、防护手套、防护眼镜等），与工艺操作流程适配，明确操作人员上岗前需完成辐射安全培训及考核，持证上岗；操作过程中严格按规程穿戴防护器具，定期开展人员辐射剂量监测，建立个人剂量档案。

区域划分设计：按辐射风险等级，将平台分区，与工艺单元布局同步，设置明显的辐射安全警示标识（如氚辐射警示、禁止入内标识），明确各区域准入权限，禁止无关人员进入控制区、监督区；控制区设置强制通风、氚捕集系统，确保区域内氚浓度持续达标。

⑸主要设备及参数

表3-25 氚辐射安全效应研究平台主要工艺设备统计表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途	备注
1	PLC控制系统	S7-400	响应时间≤5s，支持软、硬联锁，可远程调整报警限值，具备日志追溯功能	1	全局安全联锁联动控制	与各单元联锁对接
2	总控终端	工业级	支持实时监测数据显示、设备状态管控、报警信息推送	1	全平台设备及安全状态总控	配套PLC系统使用

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途	备注
3	高清监控摄像头	1080P	含360°无死角型，帧率≥25fps，存储时间≥90天，支持联动报警	8	全平台区域视频监控	要害区优先布置
4	集中声光报警装置	工业级	可区分报警类型及区域，报警音量可调，支持与PLC联动	1	全平台安全报警提示	安装于中控区域
5	紧急广播系统	工业级	覆盖全平台区域，语音清晰，支持应急指令快速播报	1	应急状态下指令传达	与报警装置联动
6	入侵报警系统	红外对射型	探测范围≥15m，响应时间≤0.5s，支持与监控、报警联动	4	平台周界及要害区防护	配合栅栏网布置
7	专用核材料储存柜	防泄漏型	防盗防泄漏防辐射，配套双重门禁，与氚浓度监测仪联动	2	核材料及标准氚源储存	安装于专用储存间
8	双重门禁设备	指纹+密码+人脸	识别精度≥99.8%，支持权限分级管理，可记录出入日志	3	储存间、要害区出入管控	与监控系统联动
9	红外对射探测装置	工业级	探测距离≥15m，响应速度快，抗干扰能力强	6	平台周界入侵探测	配合栅栏网使用
10	应急物资储备柜	不锈钢型	304不锈钢材质，密封良好，可分类存放应急物资	2	泄漏处置、人员应急物资存放	便于应急取用
11	大型电动推拉气密门	7000×7000 mm	304不锈钢，≥10mm厚，充气氟橡胶密封圈，变频驱动	1	大型设备进出及区域隔离	手动应急开启功能
12	小型手动平开气密门	1000×2100 mm	304不锈钢，≥8mm厚，三元乙丙橡胶密封，气密性X级	4	人员进出及区域隔离	带防爆联锁门锁
13	辐射屏蔽门	2000×2200 mm	复合屏蔽材质，600mm含硼聚乙烯+400mm碳钢，屏蔽效率≥99.9%	2	辐射区域防护隔离	铅密封，缝隙≤0.5mm
14	全氚取样仪	工业级	催化氧化-冷凝法取样，HTO捕集及HT氧化效率≥95%，取样流量0.5~2 L/min	1	气载流出物氚浓度取样	与监测仪联动
15	电磁流量计	智能型	测量精度≤±0.5%，支持流量实时监测，可联动报警	1	流出物流量监测	配套全氚取样仪
16	液态流出物在线监测仪	智能型	测量范围10^3~10^8 Bq/L，响应时间≤60s，每小时自动取样	1	液态流出物氚浓度监测	超标自动联动阀门
17	废水缓冲罐	1m³	304不锈钢材质，密封良好，配套液位监测	1	液态流出物缓冲暂存	配套排放阀门

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途	备注
18	应急贮水罐	10m³	耐腐蚀材质，密封良好，具备应急排放功能	1	超标流出物应急暂存	便于后续处理
19	洗消设备	工业级	含常规/应急洗消设施，高压喷淋，洗消剂储存配套	1套	操作人员及设备洗消	分级洗消功能
20	校准用标准器具	标准型	精度高，符合核设施校准标准，配套校准工具	1套	设备安装调试及校准	定期校准维护
21	大理石防振实验台	防振型	防振等级≤2μm，台面平整，耐腐蚀，配套防护边	2	研发实验操作	安装于研发操作区
22	PP材质通风柜	防腐型	排风≥1.2 m³/h，防腐耐磨，密封良好，配套风量监测	2	含氚样品预处理操作	防泄漏设计
23	样品预处理设备	智能型	可完成样品分离、提纯，处理精度高，配套温控功能	1	研发用样品预处理	耐腐蚀材质
24	仪器组装工作台	防静电型	防静电台面，配套工具收纳，高度可调	2	测量仪器原型机组装	配套调试工具
25	离心式通风机	工业级	全局风量≥20 m³/h，局部排风配套，风压稳定	2	研发区域通风换气	1台备用
26	通风净化系统	活性炭+催化	吸附效率≥99%，可去除氚及有害气体，配套过滤监测	1	排风净化处理	与通风机联动
27	恒温恒湿机	精密型	精度±1℃、±3%RH，控温范围18-25℃，配套自动调节	1	校准区温湿度控制	安装于校准区
28	UPS备用电源	工业级	续航≥4小时，输出稳定，支持断电自动切换	1	核心设备应急供电	双回路供电配套
29	冷藏密封样品存放柜	2~8℃	温度精度±0.5℃，密封防泄漏，耐腐蚀，配套消毒功能	1	研发样品冷藏储存	304不锈钢内胆
30	标准氚源	标准型	不确定度≤±5%，活度稳定，配套专用密封储存	1	仪器校准及性能测试	专用储存柜存放
31	氚扩散实验装置	不锈钢型	腔体容积0.5～1m³，工作温度室温～80℃，压力0.1~10MPa，漏率≤1×10⁻⁵ Pa·L/s	1	氚在介质中扩散实验	配套嵌入式监测仪
32	氚迁移实验装置	多介质型	含气、液、土壤三套子装置，气体流量0.1~5 L/min，液体流速0.01~0.1 L/min	1	氚在多介质中迁移实验	与监测仪联动
33	PIV粒子图像测速仪	高精度型	分辨率≥2048×2048，帧率≥100fps，测量范围0.01~100 m/s，精度≤±1%	1	氚迁移过程中流体速度监测	配套氚迁移实验装置使用
34	同位素	精密型	测量精度≤±0.2‰，质量范围	1	氚迁移/	安装于实

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途	备注
	比质谱仪		1~96 u，分辨率≥110，支持氢同位素比例分析		扩散样品同位素比例检测	验分析区

表3-26 氚辐射安全效应研究平台辐射环境监测仪器清单

序号	名称	型号	主要技术参数	台（套)数	用途	位置	备注
1	场所氚浓度实时监测仪	实时监测型	测量范围1×10⁴ ~ 1×10¹¹ Bq/m³，响应时间≤30s，支持联锁联动及数据传输	4	各涉氚区域氚浓度实时监测	各单元涉氚关键区域	与PLC系统联锁
2	手套箱氚浓度实时监测仪	嵌入式	测量范围3.7×10⁵ ~ 3.7×10¹¹ Bq/m³，漏率≤1×10⁻⁴ Pa·L/s，支持本地声光报警	3	手套箱内氚浓度实时监测	辐射监测与防护单元	嵌入式安装
3	便携式氚浓度监测仪	便携型	测量范围3.7×10⁵ ~ 3.7×10⁹ Bq/m³，重量≤1.5kg，响应时间≤20s，续航≥8小时	2	各单元移动氚浓度监测	全平台可移动使用	便于核材料转运监测
4	氚表面污染测量仪	低水平+高水平	低水平探测下限≤1 Bq/cm²，高水平测量范围10²~10⁸ Bq/cm²，不确定度≤±10%，探测面积≥100 cm²	2	设备及区域表面氚污染监测	涉氚实验及研发区域	含低、高水平各1台
5	超低本底液闪谱仪	精密型	适配含氚样品检测，本底计数低，测量精度高，配套样品预处理辅助功能	2	含氚样品实验室检测分析	研发及实验分析区	与样品预处理设备联动

⑹操作规程

依据氚辐射安全效应实验平台工艺设计方案，聚焦安全防护单元、氚实验平台辐射监测与防护单元、先进放射性氚测量技术研发单元、氚扩散及迁移转化实验单元四大核心单元，明确各单元操作规程（含操作频次、时间分配）及平台辐射工作人员配置、工作制度。

安全防护单元操作规程

本单元核心为全平台安全联锁、监控及防护管控，操作以日常巡检、设备校验为主，无需高强度连续实验，具体要求如下：

年操作天数：约220天（跟随平台整体工作节奏）；

每天操作次数：2次；

主要工序及操作时间：① PLC控制系统及总控终端巡检；② 高清监控、声光报警、入侵探测系统状态检查；③ 核材料储存柜、门禁设备校验；④ 应急物资储备柜清点；⑤ 操作记录填写；

每天总操作时间：约240分钟。

氚实验平台辐射监测与防护单元操作规程

本单元核心为辐射监测、样品取样及防护隔离，操作需遵循辐射防护规范，分常规监测与应急监测，具体要求如下：

年操作天数：约200天（依据项目实验计划变动）；

每天操作次数：1次（常规监测），突发情况（如监测数据异常）额外增加1—2次应急操作；

主要工序及操作时间：① 气密门、辐射屏蔽门状态检查及密封性测试（60分钟）；② 全氚取样仪、电磁流量计校准及取样操作（120分钟）；③ 液态流出物在线监测仪数据读取及校验（120分钟）；④ 废水缓冲罐、应急贮水罐液位及密封性检查（30分钟）；⑤ 洗消设备调试及操作记录填写（30分钟）；

每天总操作时间：约360分钟（常规操作），应急操作额外增加60—120分钟/次。

先进放射性氚测量技术研发单元操作规程

本单元核心为氚测量技术研发、样品预处理及仪器组装调试，操作精度要求高，工序连贯性强，具体要求如下：

年操作天数：约180天（研发实验具有阶段性）；

每天操作次数：1次（研发实验连贯性强，单次操作完成完整研发工序片段）；

主要工序及操作时间：① 实验区域温湿度校准（恒温恒湿机调试，30分钟）；② 样品预处理设备调试及样品处理（60分钟）；③ 大理石防振实验台、PP材质通风柜状态检查及操作（30分钟）；④ 测量仪器原型机组装及调试（180分钟）；⑤ 实验数据记录、分析及样品储存（60分钟）；

每天总操作时间：约240分钟（不含研发实验中断等待时间，如样品反应、仪器稳定时间）。

氚扩散及迁移转化实验单元操作规程

本单元核心为氚扩散、迁移转化实验，实验周期长、操作严谨，需全程监控实验参数，具体要求如下：

年操作天数：约160天（实验具有连续性，单次实验周期较长，全年分阶段开展）；

每天操作次数：1次（单次操作覆盖实验全流程监控及参数调整）；

主要工序及操作时间：① 氚扩散实验装置、氚迁移实验装置校准及调试（60分钟）；② 实验介质装填及密封检查（60分钟）；③ PIV粒子图像测速仪、同位素比质谱仪调试及数据采集（180分钟）；④ 实验参数（温度、压力）调整及监控（30分钟）；⑤ 实验数据整理、设备清洁及记录填写（30分钟）；

每天总操作时间：约 360 分钟。

3.2.7.2 环境级辐射测量分析系统（包层研发楼）

⑴单元功能

环境级辐射测量分析系统由环境氚及放射性核素测量分析实验区、氚扩散模型验证实验区（多介质环境氚迁移转化模型现场验证）、先进氚测量技术研发实验区（超宽量程气态氚在线监测系统）和氚迁移转化实验区四个部分组成。分别用于平台外围辐射环境监测，开展放射性包容、排放控制安全检验与评价，监测异常报警、评估环境影响及公众剂量，保障符合环评要求并优化辐射防护；验证多介质环境氚迁移转化模型的准确性；研发不同环境介质中氚的测量方法，实现环境介质中氚浓度的准确测量分析，为进一步实现氚的污染评价、迁移转化、氚衡算提供技术手段；构建多尺度实验体系，研究氚及含氚微粒环境转化、生物累积、微生物响应及毒性机制，为聚变堆氚的防护与辐射环境影响分析评估提供数据支撑。

⑵主要设计参数

环境监测系统设计指标：环境空气中氚测量范围覆盖1~10^6 Bq/m^3；环境水中氚测量下限≤1.5 Bq/L；土壤、生物样中氚测量下限≤10 Bq/kg；土壤、生物样中氚回收率≥90%。

多介质环境氚迁移转化模型现场验证设计指标参数：低浓度氚在线测量范围覆盖1×10^4 Bq/m^3~1×10^8 Bq/m^3，响应时间≤ 15 min，不确定度≤±10%；液态流出物氚在线监

测下限≤1000 Bq/L；多形态大气氚取样装置HTO水蒸气捕集效率≥97%@3L/min，流量范围0~10 L/min可调，催化氧化效率≥95%。

先进放射性氚测量技术研发单元－超宽量程气态氚浓度在线监测设计指标：量程覆盖500 Bq/m^3~1×10^{14} Bq/m^3；

氚迁移转化实验区设计指标：搭建综合性实验平台，具备制备各种含氚微粒、开展多介质氚迁移转化、环境健康效应及剂量评估研究的能力。

⑶工艺设计

①环境监测系统工艺设计

参照核技术利用类设施的辐射环境监测标准，平台运行前、运行期间与退役时都要进行辐射环境监测。运行前应以工作场所为中心，在半径50~500 m以内对所应用核素进行监测，监测项目包括γ辐射空气吸收剂量率、土壤中氚活度浓度、液态流出物排放口上下游500 m处地表水与底泥的氚活度浓度。在平台运行期间，应根据HJ 61-2021的要求，对γ辐射、土壤、地表水、底泥、废水、废气、放射性固体废物等项目进行监测。退役监测包含运行期间监测项目，并增加场所和设备的表面污染水平监测。按照监测项目的不同处理流程，环境监测系统应包含环境空气中氚制样实验室，水中氚制样实验室与土壤、生物中氚制样实验室。

②多介质环境氚迁移转化模型现场验证工艺设计

以气/液态氚在线监测、流量、气象及水文设备，实时获取排放源项与地形、气象、水文输入数据；采用多形态大气氚取样、土壤/植物及有机氚制样装置，完成不同形态氚甄别取样与前处理；通过超低本底液闪仪、高纯锗谱仪、低本底α/β测量仪，实现氚及其他放射性核素定量检测；将实测数据代入模型，与多介质氚活度浓度比对，完成迁移转化模型准确性验证。

③超宽量程气态氚在线监测系统工艺设计

针对场所气态氚浓度变化大、精度要求高的需求，设计集成两种探测器的气态氚连续测量系统，实现超宽量程测量。闪烁光纤阵列探测器：适用于低浓度范围（500 Bq/m^3~106Bq/m^3），采用固体闪烁法，测量精度＜10%，结合干扰识别技术，排除本底及电磁干扰，保障低探测下限与稳定性。氚电离室探测器：适用于高浓度范围10^5Bq/m3~10^{14}Bq/m3，具备γ与氡补偿功能，分便携式、壁挂式（10^5~10^{10}Bq/m3）和工

艺型（10^{10}~10^{14}Bq/m^3）。系统通过阀门控制进样，将气态氚分别送入两种探测器，结合测量数据输出浓度值，满足场所使用需求。

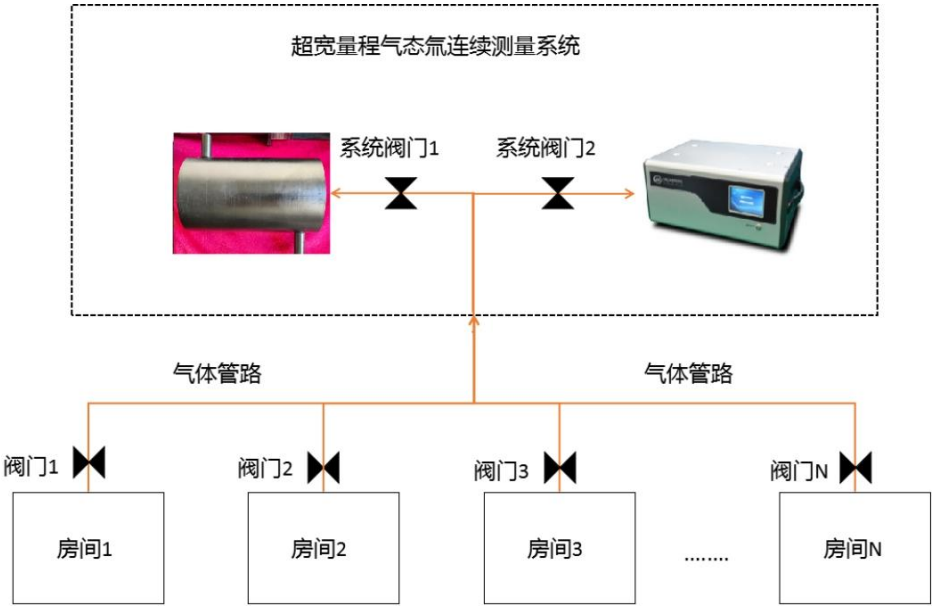


图3-24 超宽量程气态氚连续测量系统

④氚迁移转化实验单元工艺设计

为解决聚变产业氚释放后，其环境扩散、迁移转化及健康影响缺乏系统性实验支撑的问题，搭建聚焦模拟实验研究的综合性平台，核心工艺如下。

生态迁移转化模拟系统：构建多介质实验单元，包括土壤－植物体系，水生生态微环境等。布置氚监测及各类环境传感器，动态监测氚迁移变化；配套采样分析设备与高通量测序组学平台，探究氚在土壤－植物间的转化、沿食物链的传递规律，以及微生物群落对氚污染的响应。

联合毒性研究系统：建立细胞水平暴露体系，选用合适细胞系，将含氚微粒分散后精准输送至细胞培养系统，控制暴露剂量与时间。通过多种检测手段，分析细胞摄取情况、DNA损伤、炎症反应等指标，量化氚辐射与微粒毒性的单独及联合效应，明确剂量－效应关系与作用模式，为风险评估提供数据支撑。

辐射剂量评价及系统：构建自主知识产权的氚辐射动态评估工艺体系，集成风场预报、大气迁移、剂量评价等多功能模块，完成技术架构、数据库、操作界面及接口设计。通过与国际知名程序、CFD计算模型及实验室机理实验对比测试，验证评估系统有效性，确保能精准评估氚及含氚废物的生态健康风险。通过各工艺系统协同运作，为聚变能产业环境与健康保护提供坚实的实验与技术支撑。

⑷安全设计

结合环境级辐射测量分析系统四个工艺组成部分特点，针对性设置安全防护措施，与整体安全设计衔接，确保各环节安全可控。

环境监测系统安全：包含环境氚及放射性核素测量分析两部分。各类氚制样实验室，实验区与制样实验室分区布局、协同管控。实验区配备专用辐射防护屏障及个人防护装备，操作人员穿戴防护装备规范开展测量分析工作；制样实验室落实安全操作要求，实验区与制样实验室均配备专用通风净化系统，防止氚及放射性核素泄漏扩散；监测及分析设备定期校准，确保辐射环境监测、核素分析数据准确，及时发现异常辐射隐患。

多介质环境氚迁移转化模型现场验证安全设计：取样设备密闭式设计，避免取样过程中氚泄漏；检测设备（超低本底液闪仪等）布置于专用检测室，配备辐射防护屏障，减少操作人员辐射暴露风险。

超宽量程气态氚在线监测系统安全设计：系统进样、测量环节采用密闭管路连接，阀门控制精准，防止气态氚泄漏；若检测到氚浓度异常，立即触发报警并切断进样，防范风险扩散。

氚迁移转化实验单元安全：重点关注单元内生态迁移转化模拟系统，配备环境监测设备，防止意外氚污染；联合毒性研究系统需关注含氚实验材料等相关环节，确保实验环节安全可控，符合规划要求。

污染防控与去污：配备常规放射性去污试剂及工具，实验操作全程佩戴防水防氚手套、连体防护衣，接触高风险样品时加配防毒面具，避免皮肤及呼吸道暴露。

废物与应急管理：实验废液、固体废物（含氚样品、制样残渣、防护用品）分类收集，标记低水平放射性标识，交由有资质单位合规处置；配备基础应急防护装备及应急处置预案，针对性应对氚样品泄漏、设备故障等突发情况，定期开展氚泄漏、设备故障等专项应急演练，每年演练不少于2次，做好演练记录并优化应急处置预案。

设备安全管控：仪器设备定期开展校准与维护，确保测量精度；高纯锗谱仪等大型设备按常规防护要求布局，操作人员经操作基础培训、考核合格后上岗，执行标准化操作流程，防范设备故障引发风险。

⑸主要工艺设备及参数

表3-27 包层楼环境级辐射测量分析系统主要工艺设备统计表

序号	名称	主要技术指标	合（套)数	用途	备注
1	大气多形态氚采样装置	HTO水蒸气捕集效率≥97%@3L/min，流量范围0~10 L/min可调；催化氧化法可分温（200℃/400℃）捕集HT、CH3T	4	采集空气中HTO、HT、CH3T多形态氚	可采用分子筛吸附法、冷凝法或催化氧化-冷凝法
2	分子筛解吸装置	最高加热温度≥500℃，解吸时间4h	1	解吸分子筛吸附的HTO，制备测量样品	配合分子筛吸附法采样器使用
3	冷凝法氚取样器	样品收集容量≤500 ml×2；流量范围0~120 L/h可调；氚化水的捕集效率≥95%	1	快速收集空气中HTO，无需解吸直接测量	适用于环境空气HTO快速采样
4	蒸馏装置	常压蒸馏，可收集电导率＜10μS/cm的冷凝液≥200mL	1	处理水样，去除杂质，制备氚测量样品	依据《HJ 1126-2020》标准
5	SPE电解浓集装置	浓集倍数≥10倍，回收率≥60%，电解时间≤60 h，最大处理量≥1 L	1	浓集低浓度水样中氚，提升测量准确性	适用于氚浓度较低的环境水样
6	减压蒸馏收集装置	可烘干样品测含水率，减压蒸馏收集自由水氚样品	1	分离土壤、植物中自由水氚，制备测量样品	用于自由水氚（TFWT）测量
7	高温氧化－冷凝收集装置（有机氚制样装置）	最高温度≥900℃，氚回收率≥90%	2	将土壤、植物中有机氚转化为HTO，制备测量样品	依据《HJ 1324-2023》标准，用于有机结合氚（OBT）测量
8	低本底液体闪烁计数器	本底＜2.0 cpm，非淬灭效率≥60%	2	测量空气、水、土壤、生物制样后样品的氚活度浓度	全介质氚测量核心设备
9	外环境监测集成柜体	尺寸1m×1m×2.0m，带通风、温湿度监测，提供220V交流电及网络通信	5	集成外环境监测部件，保障监测设备稳定运行	5 个监测点拟布设于平台外围 50～500m 范围内，具体位置待土建方案定稿后确定
10	高通量测序平台	微生物组学分析	1	微生物群落响应研究	生态迁移实验
11	低浓度氚在线测量仪	测量量程：1×10^4 Bq/m³~1×10^8 Bq/m³；响应时间≤15 min；测量不确定度≤±10%	4	气载含氚流出物在线监测，获取排放源项数据	低水平氚（＜10^6 Bq/L）监测

序号	名称	主要技术指标	合（套)数	用途	备注
12	排放流量测量仪	测量精度≤±5%；测量不确定度≤±10%	4	辅助获取气/液态含氚流出物排放流量数据	氚在线测量仪使用
13	液态排放流氚在线监测仪	探测下限≤1000 Bq/L	1	液态含氚流出物在线监测，获取液态源项数据	液态低水平氚监测
14	小型气象站	风速测量范围：0~10 m/s；风向测量范围：0~360°；可监测温度、湿度、降水量	1	获取现场实时气象数据，作为模型输入参数	用于迁移转化模型气象参数采集
15	流速流量仪	流速测量范围：0~5 m/s	3	获取河流典型位置流速流量，获取水文输入参数	迁移转化模型水文参数采集
16	土壤中氚制样装置	最高温度≥1200℃；氚回收率≥90%	2	土壤样品中自由水氚与有机氚分离制样	配合减压蒸馏、高温氧化装置使用
17	高纯锗谱仪	N型相对探测效率≥40%；能量响应范围：3keV~10MeV；能量分辨率≤2.5keV（对1.332MeV）；配备液氮回凝制冷器、低本底铅室	2	环境介质中其他放射性核素定量分析、聚变中子活化核素检测	迁移转化模型核素干扰检测
18	低本底α/β测量仪	通道数：10路；α测量偏差≤2%；β测量偏差≤2.5%；α进入β道计数比≤1%；β进入α道计数比≤0.1%	2	环境水体总放射性（α/β）监测	辅助迁移转化模型水体放射性监测

⑹工作制度

①环境氚及放射性核素测量分析实验区

聚焦环境级氚监测研究，开展大气、水、土壤、生物多介质环境级氚活度浓度测量，以及其他放射性核素定量分析工作。核心设备包括低本底液体闪烁计数器、高纯锗谱仪、低本底α/β测量仪、大气多形态氚采样装置、蒸馏装置等，用于环境级氚监测相关操作。

年操作天数：200天，依据辐射环境监测方案集中采集各类环境样品，进行氚活度浓度的测量分析；

每天操作次数：1次，采用批量处理环境样品的方式，避免频繁启停设备造成的测量误差及污染，提升监测效率；

主要工序及操作时间：样品接收与预处理1小时（核对环境样品编号、状态，去除杂质，做好污染防护）；样品制样约3小时（根据环境样品类型，采用蒸馏、减压蒸馏、

高温氧化等方式制备监测样品，制样所需时间因样品种类和氚含量各不相同）；核素测量约3小时（完成环境级氚及其他核素活度浓度测量，所需时间因样品种类和氚含量各不相同）；数据整理与校验0.5小时（核对监测数据、修正误差，录入系统并形成监测报告）；设备清洁与维护0.5小时（清理设备及样品台，检查运行状态，收集废弃耗材）。

每天总操作时间：8小时，合理分配各工序时间，保障监测数据精准、操作规范。

②多介质环境氚迁移转化模型现场验证平台

聚焦氚迁移模型现场验证研究，采集现场环境中气载/液态含氚流出物源项数据、气象/水文数据，代入迁移转化模型进行比对验证，优化模型参数。核心设备包括低浓度氚在线测量仪、排放流量测量仪、小型气象站、流速流量仪、冷凝法氚取样器等，用于现场验证的数据采集。

年操作天数：180天，受现场气象、水文条件影响，主要集中在春秋季（气象稳定期）开展，避开暴雨、暴雪等极端天气，保障现场数据采集的准确性；

每天操作次数：1次，采用现场连续监测、批量采集环境数据的方式，减少现场人员暴露时间，提升验证效率；

主要工序及操作时间：现场设备检查0.5小时（检查在线监测仪、气象站等设备运行状态，校准参数）；源项与环境数据采集3.5小时（采集现场环境级氚活度浓度、排放流量及气象、水文数据）；样品采集1.5小时（在预设监测点采集大气、水、土壤等环境样品，做好标记）；数据比对与验证0.5小时（将现场数据代入模型，比对验证模型准确性）；现场清理与设备收纳0.5小时（整理设备，收集废弃采样耗材，开展现场污染排查）。

每天总操作时间：7小时，优化工序分配，保障环境数据采集的连续性、准确性，支撑模型验证研究。

③先进氚测量技术研发实验区

核心开展超宽量程氚测量系统研发，核心设备包括多形态大气氚采样装置、SPE电解浓集装置、低本底液体闪烁计数器等，同步依托现有测量设备开展技术优化。

年操作天数：200 天（研发类实验，结合技术攻关进度）；

每天操作次数：1 次（研发实验需连续操作，确保实验数据的连贯性，避免频繁中断）；

主要工序操作时间：实验方案确认与设备调试：1小时（明确当日研发任务，调试超宽量程氚测量系统、采样装置等设备，确保参数达标）；测量系统性能测试：3.5 小时（开展超宽量程氚测量系统的精度、响应时间等性能测试，记录实验数据，延长测试时长保障研发数据完整性）；研发数据整理与优化：3小时（全面分析实验性能测试数据，优化测量系统参数，完善研发方案，形成研发日志）；设备维护与调试：0.5 小时（检修研发设备，清理实验台面，收集废弃研发耗材）。

每天总操作时间：8.0小时，研发类实验工序复杂，预留充足时间用于设备调试及数据优化。

④氚迁移转化实验区

聚焦氚环境迁移转化实验研究，开展氚及含氚微粒在多介质生态系统中的迁移转化实验、联合毒性研究，明确迁移规律及生物效应，完善风险评价体系。核心实验设备包括陆生/水生态微环境模拟装置、光合效应测定仪、含氚微粒联合毒性研究系统等。

年操作天数：220天，实验周期较长，需连续监测环境级氚迁移转化过程；

每天操作次数：1次，每日定时监测、记录实验数据，保障实验的连续性及数据完整性；

主要工序及操作时间：实验系统启动与检查0.5小时；实验样品投放或培养1小时（投放含环境级氚的样品及实验生物，设置对照组，保障实验条件一致）；过程监测与采样3.5小时（定时监测系统内环境级氚活度浓度、含氚微粒分布，采集实验样品）；毒性效应观察与记录2.5小时（观察实验生物生长状态，记录联合毒性效应数据）；系统维护与清洁0.5小时（清理系统管路，补充实验介质，收集废弃样品及耗材）。

每天总操作时间：8小时，实验过程以监测、培养为主，合理分配人工操作时间，降低劳动强度，支撑迁移转化实验研究。

3.2.8 包层材料批量化制备平台

包层材料批量化制备平台包括先进结构材料研发平台、固态包层功能材料批量化制备平台、液态包层功能材料批量化制备平台、关键材料分析测试平台四部分，具体

组成见下图。

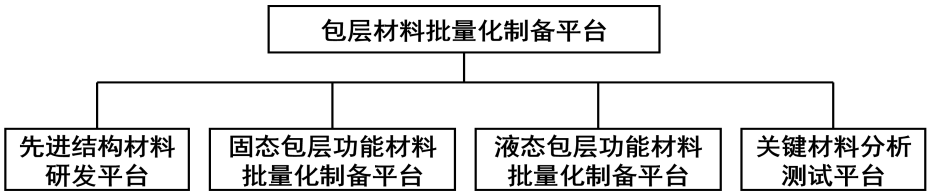


图3-25 包层材料批量化制备平台组成图

3.2.8.1 先进结构材料研发平台

先进结构材料研发平台为覆盖材料设计、制备、成形和加工的全流程研发平台，为未来的聚变工程结构材料提供技术储备。

主要设计参数为完成百公斤级低活化钢制备，材料 650℃高温强度大于 300MPa，先进结构材料研发平台建设包括先进材料研发平台和热处理平台两部分，如下图所示。

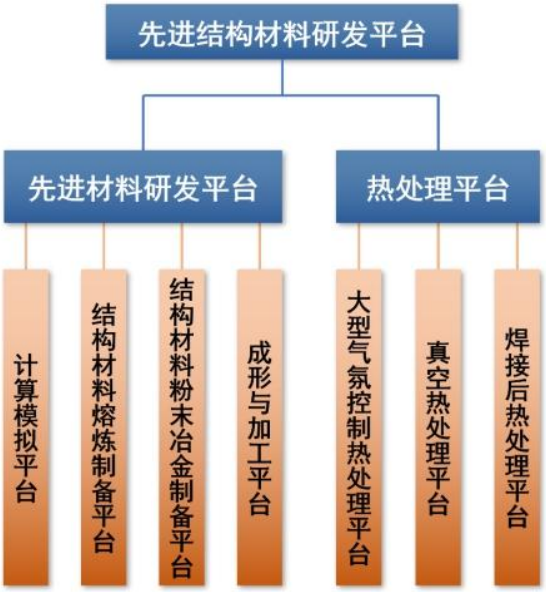


图3-26 包层关键材料研发平台系统构成图

3.2.8.1.1 先进材料研发平台

先进材料制备与研发是一套综合性的流程，涵盖了从计算到实验的多方面任务，主要包括计算模拟平台、结构材料熔炼制备平台、粉末冶金工艺研发平台和成形与加工平台四个子平台，每部分相互结合，联系紧密，为先进包层材料研发提供重要支撑。

⑴计算模拟平台

材料计算模拟是现代材料科学的重要工具，通过理论建模和数值计算手段，能够从原子、电子到宏观尺度揭示材料的本质规律，大幅加速新材料的研发进程。对于先

进结构材料（RAFM、ODS钢），结合国际最新的辐照实验数据，改进钢材的合金配比，提升其抗辐照性能、高温强度和蠕变性能。计算机模拟平台主要采用计算机进行模拟论证，不涉及工艺流程，本报告不进行论述。

⑵结构材料熔炼制备平台

本平台的主要任务为搭建先进低活化钢结构材料生产加工平台，系统开发批量化生产先进低活化钢的技术路线，攻关先进包层结构材料工业化制备技术，完善生产技术路线过程的每个技术指标，同时也为后续合作单位的放大生产提供有力的技术保障。

本平台由多个关键设备系统组成：真空感应熔炼炉、电子束精炼炉和电渣重熔炉，能够在高温和真空条件下熔炼合金，确保材料的均匀熔化、成分控制以及降低夹杂物含量。

①真空感应熔炼炉

真空感应熔炼炉利用中频感应加热原理，在真空或惰性气体状态下对合金（或金属材料）原料进行脱气、熔化并通过坩埚倾炉系统浇铸，以减少氧化和污染，适用于小批量和高纯度材料的生产，高温金属合金材料在真空或保护气氛下进行熔化及精炼。本项目所选真空熔炼炉处理能力为100kg/炉，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为纯铁、高纯合金。

1）真空模块：真空模块主要功能是创造并维持熔炼所需的高真空或低氧环境，避免材料氧化。采用机械泵（初级）和扩散泵/分子泵（次级）串联组成的真空泵组，联通密封的真空室腔体，以机械泵组抽至10^{-1}Pa、再用次级泵组抽至10^{-3}Pa以下的逐级抽真空方式，使真空室内部可达到10^{-3}Pa至10^{-5}Pa的真空度，并采用真空阀门与管路控制气体流动和真空度的维持，以及真空计实时监测真空度。

2）感应加热模块：感应加热模块是熔炼设备的核心，通过向感应线圈（由水冷铜管绕制）通入高频或中频交流电后形成的快速变化的交变磁场产生涡流，从而加热待冶炼的金属，实现高效熔炼。

3）钢制感应炉壳体：容纳熔炼过程的所有组件，并确保密封性和耐高温性。由耐火材料（氧化铝、石墨、镁砂等）制成的坩埚及炉衬，盛放熔融金属并保护炉体免受高温和化学侵蚀，坩埚使用寿命＞1000次，凝壳率＜10%。设置耐高温玻璃或石英制成的观察窗，以监控熔炼过程。

4）加料与浇注模块：模块通过模具车或转盘进行多模具浇注，采用计算机和PLC控制，并支持通过闭路电视进行远程操作。采用顶加料室多批次向感应坩埚内加料。最终取样（钢液）检测合格后，将熔融金属注入模具浇注成型。

5）辅助模块：包括安全保护模块和冷却模块等。安全保护模块核心功能为确保设备和操作人员安全，泄漏报警及过温/过流保护功能可检测真空模块密封性，并在发生危险时自动切断电源或启动应急冷却，应急排气阀可在紧急情况下快速释放真空。冷却模块可防止设备因高温损坏，确保稳定运行，由水冷模块和热交换器组成，对感应线圈、电源、真空泵等关键部件进行循环水冷却，并控制冷却水温度，以防设备温度过高发生危险。

6）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有熔炼残渣、熔炼废气、冷却循环水排水。

②卧式悬浮炉

卧式悬浮炉是一种采用真空（或惰性气氛）+电磁悬浮感应加热的先进无（冷）坩埚熔炼装备，适用于高纯金属和高活性、高熔点合金的小批量高洁净制备，在合金研发与高端精密铸锭领域应用突出。本项目所选卧式悬浮炉处理能力为30kg/炉，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为高纯金属料块、合金、氩气。

卧式悬浮炉设备主体包括下列组成单元：

1）真空腔体：真空腔体采用卧式圆形设计，侧壁与顶部设计有夹层水道，水道采用导流设计，保证炉室壁每个地方能冷却到位，防止熔炼时炉室外侧发热；炉身上配备加料接口、倒料杆接口、观察接口、电极轴接口、真空泵接口；预留模具水冷接口、测温接口、水轴接口、离心浇铸以及真空检漏接口。真空腔体采用双侧炉门，方便更换坩埚和拆卸模具，炉门与炉身采用浮动式铰链连接，配备快速缩紧手柄，炉体安装于炉架之上。炉体内部安装炉内灯，在炉体底部铺有保护板，以及排水阀。

2）真空系统：真空系统采用三级真空泵配置，真空系统配备一套数字式复合真空计和压力传感器，用于炉室内部压力的监控。真空系统具备自动充氩功能，设定参数后，充氩压力到达后自动关闭阀门，另外配备一套自动排气阀和一个手动排气阀，用于炉室正常破空和应急破空。

3）感应熔炼系统：感应熔炼系统主要由熔炼电源与感应线圈构成。悬浮熔炼采用IGBT超音频感应电源，额定功率350kW，额定频率8-15kHz。感应器表面采用特殊绝缘和耐高温涂料覆盖，并通过5000V耐压测试。

4）水冷铜坩埚：水冷铜坩埚主体采用T2半硬锻造铜加工，通过钎焊工艺与水套连接，坩埚主体分瓣采用串联冷却，底部水套与坩埚瓣采用串联供水。坩埚主体外侧壁通过特殊绝缘处理，并经过2500V耐压测试，确保坩埚在使用过程中与线圈之间无打火现象。

5）水冷轴以及倾翻驱动装置：水冷轴采用单轴双通道供水，前端与坩埚分水管连接，主轴内分进水和回水通道，通过安装于外侧轴承座，可使倾翻转动。在水冷轴侧面安装有翻转驱动装置，通过齿轮传动，伺服电机驱动/液压驱动实现水冷主轴转动，从而带动坩埚支架一起倾翻。

6）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有熔炼残渣、熔炼废气、冷却循环水排水。

③电渣重熔炉

电渣重熔技术的工作原理是通过重熔电流产生的热能熔化插入渣池的自耗电极，金属熔滴在穿过渣液时被清洗净化，随后在水冷结晶器中凝固成电渣锭。低活化钢在初步的感应熔炼后，得益于渣液的去夹杂作用和优化的结晶条件，电渣重熔铸锭具有极高的纯净度，铸态组织均匀致密，夹杂物细小且弥散分布；此外，现代电渣重熔炉普遍采用惰性气体保护技术，有效防止重熔金属的氧化和烧损。本项目所选电渣重熔炉处理能力为100kg/炉，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为高纯金属料块、合金、氩气。

电渣重熔炉设备主体包括下列组成单元：

1）电源、电极及渣模块：通过电源提供稳定的交流或直流电能，熔渣产生电阻热熔化金属，通过多级变压器实现功率分段控制，调节电流和电压，优化熔炼效率。由待精炼的金属作为自耗电极，液压驱动电极夹持装置确保电极稳定下降与对中，通过电流传导实现熔化，随熔炼过程逐渐消耗。电渣提供熔炼所需的导电介质，并通过化学反应去除杂质，维持渣层厚度和成分稳定性，包括渣池维护装置、自动补渣模块等。

2）结晶器与冷却模块：主要功能为控制金属熔池的凝固过程，形成高质量铸锭。结晶部分由铜制水冷结晶器、拉锭机构和液压动力单元组成，通过在结晶器中通循环水，强制金属液定向凝固，并控制铸锭的拉出速度、电极升降、结晶器移动等，确保工艺精度，确保凝固铸锭组织均匀。冷却模块主要由循环水冷管道、底水盘与侧壁冷却构件组成，覆盖结晶器、电极夹持器等高温区域，内部通过优化分布的冷却循环水，防止设备局部过热导致设备损坏。

3）控制及辅助模块：自动化调控工艺参数，并保障熔炼过程的连续性与安全性。控制模块主体为PLC/工业计算机和传感器网络，集成温度、电流、拉速等参数的实时监控与调整，包括热电偶（熔池温度）、压力传感器（水冷模块）、流量计（冷却水）等。其他辅助模块包括：除尘模块：处理熔炼过程中产生的烟尘，符合环保要求。起重设备：运输电极、铸锭等重型部件。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有熔炼残渣、熔炼废气、冷却循环水排水。

⑶结构材料粉末冶金制备平台

粉末工艺研发平台的建设内容主要集中在制粉、球磨与粉末成型这几项关键环节，本平台旨在为高性能先进结构材料粉末冶金工艺的开发提供前期探索，推动新型材料的工业化生产，为高性能先进包层材料的开发提供技术支撑。主要包括粉末制备设备、高能机械化合金设备、粉末封装除气设备、粉末固化成型设备几个部分，具体工艺流程如下：

①雾化制粉工艺

批量生产球形金属粉末的主要方法是在真空或受控惰性气体气氛中感应熔炼金属原料和合金，熔融金属流经高压惰性气体被分解成液滴（或在真空环境中），液滴在飞行中凝固成球形粉末颗粒。本系统所选熔化炉处理能力为50kg/炉，制粉系统处理能力为100kg/h，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为高纯金属料块、合金、氩气。真空雾化制粉设备主体包括下列组成单元：

1）熔炼模块：熔炼模块的核心功能是将金属原料加热至熔融状态，确保成分均匀并去除杂质。熔融金属通过倾斜坩埚或导流嘴流入中间包，再进入雾化喷嘴，确保液态金属流的稳定性。坩埚采用石墨或陶瓷材质制成的，适用于中试级生产的30kg以上

大容量坩埚。通过中频电源在感应线圈中产生电磁场，加热金属至熔融状态，最高温度超过1000℃。

2）雾化装置：雾化装置是雾化制粉设备的核心部分，通过高压气体喷嘴将熔融金属破碎成微米级液滴，控制粉末粒度与形貌。采用紧耦合环缝式或拉瓦尔结构喷嘴，高压惰性气体（氩气/氮气）形成超音速气流冲击金属液流，实现高效雾化，之后金属液滴在雾化室惰性气体保护下快速冷却凝固，凝固速率极高，可形成球形度高、氧含量低的粉末。

3）真空与气体模块：由于先进低活化钢在高温条件下易氧化，而球形粉末本身比表面积大，更易加剧氧化反应，因此制粉过程需维持高度真空的无氧环境，防止金属液滴氧化并促进杂质挥发。采用三级泵抽模式（机械泵+分子泵），极限真空度能够达到极高水平。此外由于制粉设备的特殊构造，在高速旋转或移动部件（如中间包）处易产生泄漏，因此需要在此类位置配备动态密封装置以保持真空密封，防止设备内部真空度下降。

4）冷却与粉末收集模块：是快速冷却液滴并分级收集粉末的模块。水冷模块包含冷却坩埚、雾化室内冷却循环回路等高温部件，冷却雾化室的金属液滴在此处快速冷却后，通过旋风分离器与筛分机的离心力分级收集粉末，最后在全封闭真空封装机中收集与包装，避免粉末二次污染。

5）控制模块及安全与辅助模块：自动化调控工艺参数，确保生产稳定与粉末质量，保障设备安全运行与环保要求。除尘与环保模块处理雾化过程中产生的烟尘，符合工业排放标准；水循环与热交换器优化冷却效率，防止设备过热。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有熔化烟尘，粉尘。

②机械合金化工艺平台

ODS钢基体中的纳米氧化物颗粒一般通过机械合金化法引入。在高能球磨过程中，粉末将继续经历冷焊、破碎、再焊接等过程，不断细化粉末的微观结构，最终实现原子混合和合金化，形成层状结构的复合粉末，利用这种方法，纳米Y_2O_3颗粒可以被破碎分解，然后与Ti等元素形成纳米氧化物分散颗粒机械合金化。本项目所选球磨机处

理能力为15kg/炉，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为Fe/Cr/W/Ti/Y_2O_3等粉末、研磨球、氩气。

1）研磨模块：通过高能机械作用实现材料的破碎、混合以及合金化。研磨模块由研磨罐与研磨球、行星式运动机构和真空/惰性气体保护机构构成。

研磨罐与研磨球：为满足ODS钢高纯净冶炼的防污染需求，研磨罐选用不锈钢、碳化钨、氧化锆、聚四氟乙烯等材质制成；研磨球材质则包括刚玉、碳化钨等，直径3～20mm，通过碰撞和摩擦作用实现高效研磨。设计：真空/惰性气体保护研磨罐配备密封接口，支持真空或惰性气体（如氩气）环境，避免材料氧化或污染。

行星式运动机构：采用双轴驱动形式，主盘（太阳轮）与研磨罐分别以相反方向旋转，形成离心力与向心力的交替作用，显著增强研磨效率。研磨球在离心力作用下对材料产生高频撞击，同时与罐壁摩擦，实现纳米级颗粒细化。

2）真空与气体控制模块：高能机械合金化工艺过程需要在无氧环境中进行，需要通过真空或气体来维持无氧环境，提升材料纯度并防止氧化。采用机械泵与分子泵组合的真空泵组，确保研磨过程的无氧条件。在高速旋转的研磨罐与固定部件间采用磁流体密封或机械密封的动态密封技术，防止气体泄漏。

3）冷却与温控模块：研磨过程中颗粒相互之间发生剧烈碰撞，产生大量热量，可能导致材料热降解，为避免此问题，需要通过外部冷却抑制温升。冷却模块分为两部分，分别为液氮冷冻模块和水冷循环装置，液氮冷冻模块通过外部液氮循环快速冷却研磨罐，实现研磨罐内低温环境。水冷循环装置对驱动电机、真空泵等高温部件进行冷却，维持设备稳定运行。

4）驱动与传动模块：提供高能研磨所需的动力与运动控制。高扭矩电机可提供较大转速、支持无级调速，适应不同材料需求。复合式皮带传动采用涨紧轮设计，降低噪音并提升能量传输效率。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有加料、出料研磨粉尘。

③热等静压（HIP）加工平台

热等静压机利用压力非常高的气体（通常是高温氩气）固化材料，消除孔隙和微裂隙等内部缺陷。HIP工艺的温度非常接近热处理温度，所以材料除了发生蠕变和扩散，

由于极端外部压力，缺陷还发生机械变形，从而改善了负载的内部缺陷，提高了材料疲劳寿命、延伸率和冲击韧性等材料特性，随后的表面抛光研磨能达到优良的光洁度，在加工完成后未显现多余的气孔。本项目所选热等静压处理能力为100kg/炉，每天工作24小时，年工作200天，主要原辅材料为粉末包套坯、氩气。

1）主体压力容器：高温高压环境的核心承载结构。作为HIP设备的核心物理容器，主体压力容器需在极端工况下长期稳定运行。其设计需兼顾高强度、耐高温及抗蠕变特性。采用高强度低合金钢（如SA-723），通过多层绕丝增强或整体锻造工艺制造。容器壁集成光纤应变监测系统，实时检测微裂纹扩展。

2）加热模块：精准控温的能量输入源。加热模块的均匀性和控温精度直接影响材料处理的微观结构。加热器类型包括电阻加热和感应加热，电阻加热采用钼（Mo）、石墨或碳化硅（SiC）发热体，最高可达2200℃。通过多区独立控温控制温度均匀性。感应加热对导电材料直接感应涡流加热，升温速率快，但需精确匹配频率以避免电磁干扰。使用热电偶进行多点测温，结合PID算法动态调节功率输出，实现温度控制。先进设备采用红外热像仪进行非接触式全场温度监测，通过反馈控制确保梯度不超过危险值。

3）压力生成与调控模块：通过高压惰性气体（Ar或N2）传递各向同性压力，模块需实现快速升压与精确稳压。采用多级往复式压缩机与增压泵组合的压缩模块压缩气体。储气罐配备压力缓冲器，减少脉动冲击，超高压段使用液压驱动气体放大器。基于实时压力传感器（压阻式或压电式）数据，PLC控制器调节比例阀开度，避免杂质引发材料氧化。

4）冷却模块：快速淬火与热应力管理。后处理阶段的冷却速率对材料相变具有决定性影响。具备主动冷却技术，水冷夹套通过湍流强化传热，配合内部喷淋系统实现急冷。气冷模块采用高速氦气对流，适用于对热冲击敏感的材料。采用梯度冷却策略分段控制冷却速率，例如先以较高温度梯度降至临界相变点，再切换至自然冷却，避免残余应力累积。

5）真空与气体循环模块：机械泵与扩散泵组合将腔体抽至10^{-3}Pa级真空，移除氧、水蒸气等活性气体，防止材料高温氧化。动态气体循环，离心风机驱动气体在腔体内形成层流，结合导流板设计，确保压力分布均匀。

6）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析初步分析，本平台产生污染物有加热炉烟气。

④热压烧结（HP）加工平台

用于在高温和单轴压力下对粉末进行烧结，以获得所需的材料性能。允许精确地应用液压压力并进行高温操作，适用于金属或陶瓷粉末的烧结以及固体部件的扩散接合。本项目所选烧结装置处理能力为100kg/炉，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为金属/陶瓷粉末、石墨/钼模具。

1）加热模块：实现高纯度热源与精确控温。为避免污染低活化钢，发热体需满足高温稳定性与低挥发特性，采用石墨或钼（Mo）或钨（W）材料制作。设计多区独立加热模块（环形分布电阻丝或板状发热体）结合反射屏，确保炉膛温度均匀。

2）压力模块：高精度载荷与均匀加压。采用机械加压（滚珠丝杠+伺服电机组合）方式，提供稳定线性压力，响应时间短，定位精度高。采用热强合金（如Inconel718）或陶瓷（Si_3N_4）压头与压板，表面抛光，减少摩擦损耗；对复杂形状工件，使用金属或石墨模具内填充玻璃粉介质的等静压囊，通过介质传递各向同性压力。压力闭环控制模块采用压电式力传感器（精度±0.1%FS）实时监测轴向载荷，结合应变片检测模具形变，结合动态补偿算法，根据温度-压力耦合模型，自动补偿热膨胀引起的压力漂移。

3）模具模块：耐高温抗蠕变与界面工程。选择内层TaC涂层+外层SiC纤维增强金属基体的复合材料模具，兼顾高温强度与抗氧化性，并采用梯度孔隙的结构优化设计，针对粉末烧结收缩特性，模具内腔预设锥度，避免脱模开裂；可拆卸式结构的多段组合模具设计，便于复杂部件的成形与脱模。此外模具界面层喷涂六方BN或云母粉，降低脱模力，并配备超声振动辅助，高频振动促进模具-烧结体分离，减少机械损伤。

4）气氛控制模块：超低氧环境与杂质抑制。真空系统采用机械泵+分子泵+低温吸附泵的多级抽气配置，确保腔体氧分压＜10^{-3}Pa，防止RAFM钢氧化；利用氦质谱检漏仪实时监控，保证动态泄漏率低于所需要求。保护气体模块通过涡轮分子泵和高纯氩气，经吸气剂过滤，驱动气体循环，去除O_2、H_2O，带走挥发性杂质（如S、P）。通入渗碳/氮，通过碳势传感器（如ZrO_2氧探头）控制CO/CO_2比例调控活性气氛，避免烧结过程中非控元素掺杂。

5）粉末预处理与送料模块：气雾化RAFM钢粉末，经筛分与球磨优化，减少孔隙率，优化粉末特性。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有工艺尾气、冷却循环水排水。

⑷成型与加工平台

成形与加工平台是探索增材制造直接成形和塑性变形进一步优化加工工艺的平台，包括小型样品增材制造工艺研发平台和塑性变形加工平台，是研发材料性能优化的保障。

①小型样品增材制造工艺研发平台

样品增材制造技术研发平台是研发先进低活化钢增材制造工艺方法、调试工艺参数的生产技术测试开发平台。能够在几分钟内制造高精度金属零件，速度比激光粉床熔化模块快10倍。其设计喷嘴数量多，确保打印过程中的可靠性和高分辨率（1600×1600dpi）。模块采用自适应打印引擎，支持无工具操作，简化了复杂打印作业的处理。过程包括打印、除粉和烧结三个阶段，在打印阶段，打印机将金属粉末铺设在成型床上，使用粘合剂逐层固定粉末以确立零件的几何结构。完成后，构建盒被移至粉末站进行快速精细的除粉，并通过内置回收模块清除和回收松散粉末。最后，清理后的零件在高容量烧结炉中进行批量烧结，炉温可达1400℃，确保高强度粘合剂的有效处理，提供高质量的烧结结果，同时能够实现高质量和表面光洁，支持多种几何形状的经济批量生产。本项目所选小型样品增材制造最大尺寸为400×400×400 mm，每天工作24小时，年工作100天，主要原辅材料为低活化钢/钨基粉末、粘结剂/氩气。

1）热源模块：热源是增材制造的核心驱动力，其特性直接影响熔池形态、冷却速率及最终材料性能，高精度热输入与熔池动力学控制是其关键技术。针对低活化钢高熔点、易氧化等特点，设备通常采用高能激光作为热源。激光热源（如光纤激光器）通过近红外光和高度聚焦光斑，功率密度可达极高水平，实现粉末层快速熔化。热源需配备动态调制模块如声光调制器，以调节功率输出及扫描路径，适应低活化钢的高温熔融特性。此外还需集成同轴熔池监控摄像头与高温计，实时捕捉熔池亮度与形貌，反馈调节激光功率与扫描速度，避免未熔合或匙孔塌陷等缺陷。

2）粉末供给模块：粉末供给模块需确保低活化钢粉末的化学成分纯净度与物理特性一致性，均匀性与活化元素控制。粉末通过气雾化或等离子旋转电极工艺制备，严格控制粒径分布、球形度和氧含量。供粉模块采用分体式设计，包含储粉罐、送粉器及筛分装置。储粉罐内壁涂覆氮化硅涂层，减少粉末流动摩擦导致的Fe-Cr氧化物污染；送粉器通过精密螺杆或气动喷射输送粉末至铺粉区域。铺粉模块由刮刀或滚筒实现均匀铺覆，刮刀材质为硬质合金或陶瓷，降低与粉末的黏附力。

3）构建腔室与气氛控制模块：构建腔室作为增材制造的物理载体，需提供稳定的高温环境与惰性气体保护，实现超低氧环境与热管理。腔体采用双层水冷不锈钢结构，内部衬有耐高温陶瓷纤维，腔室充入高纯氩气，氧含量通过氧传感器实时监控并维持在极低水平，防止低活化钢中Cr元素氧化生成挥发性CrO_3。腔室集成多区温控模块，基板可预热，显著降低残余应力与裂纹倾向。热梯度管理通过环形辐射加热器与基板底部电阻丝协同实现，确保构件在逐层沉积过程中温度分布均匀，抑制马氏体相变引起的畸变。

4）运动与扫描模块：运动模块负责精确控制能量源与工件的相对位置，通过多轴协同与路径优化，实现复杂三维结构的逐层构建。设备采用多轴联动架构，包含XYZ直线运动模块，支持悬垂结构无支撑成形。扫描振镜模块由高动态镜片组成，配合f-theta透镜消除离焦畸变。扫描路径算法基于体素化模型生成，采用岛状扫描、条纹扫描或分形填充策略，优化热输入分布，避免局部过热导致的晶粒粗化。此外，自适应路径规划模块可根据实时熔池监测数据动态调整扫描间距与层间旋转角度，补偿热累积效应，提升低活化钢构件的疲劳寿命。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有工艺尾气。

②轧制变形加工平台

本平台的中试实验机集轧前加热、轧制、冷却、轧后热处理及矫直功能于一体，为新型材料开发提供有效的研究手段和科技创新空间。二辊可逆式热轧试验轧机的控轧、控冷及热处理功能的集成设计为中试基地提供先进的工艺开发平台。本项目所选加热炉处理能力为100kg/炉，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为钢坯/铸锭。

1）加热模块：加热作为热轧工艺的起始环节，承担着将低活化钢坯料加热至再结晶温度以上的关键任务。由于低活化钢通常含有Cr、W、V、Ta等合金元素，其相变温度区间较普通钢材更为复杂。中试设备采用小型加热炉，通过多区独立控温实现炉内温度场均匀性严格控制，避免局部过热导致的元素偏析。坯料传输采用液压机构，配合测距仪实时修正坯料位置，防止跑偏导致的局部过热。炉内氧浓度通过传感器闭环控制，表面氧化铁皮厚度可控制在较小范围内。坯料出炉前需通过高温金属检测仪实时监测表面温度分布，配合补偿加热模块对温差区域进行微调。

2）轧机主机架与辊系结构：四辊可逆式轧机作为中试热轧机的核心，其机架采用整体铸钢结构，工作辊采用高速钢复合轧辊，表层涂覆有效提升耐磨性的涂层，延长换辊周期，并通过有限元分析优化辊型曲线，补偿轧制过程中的不均匀变形。支撑辊采用先进的结构设计，通过优化应力分布降低辊面剥落风险，接触应力分布较传统辊更低，辊颈部位实施感应淬火处理。辊缝调节模块配备自动厚度控制与弯辊装置，集成压磁式压力传感器，弯辊力调节采用圆锥滚子轴承支撑结构，动态补偿轧制过程中的弹性变形，非线性误差小。轧制润滑采用油气混合喷射技术，在轧辊表面形成微米级厚微乳膜，降低摩擦系数，同时设置辊缝吹扫装置防止氧化皮压入。此外，针对低活化钢的高温强度特性，轧机须具备大压下率调节能力，通过多道次累积变形实现晶粒的充分破碎与再结晶。

3）传动与动力模块：主传动采用双电机同步驱动技术，交流变频电机通过组合式减速箱驱动工作辊。齿轮箱配备油膜轴承和在线监测模块，确保在频繁正反转工况下的稳定运行。电机控制模块集成控制算法，实现转速的精确调节，动态响应时间短。万向接轴内置扭矩传感器实时监测传动模块负载变化，当检测到异常扭矩波动时，系统可自动触发紧急抬辊保护，避免堆钢事故。动力模块总成需满足连续轧制多道次的耐久性要求，并控制主电机绕组温度。双电机驱动采用主从控制模式，主电机速度环控制，从电机转矩环控制，两台电机间设置扭振阻尼器，齿轮箱采用合金钢齿轮。传动模块配备动态惯量补偿算法，在轧制速度突变时通过飞轮储能装置吸收动能波动，减小转速波动。

4）层流冷却装置：轧后冷却模块对低活化钢的相变行为具有决定性影响。中试设备配置多段式层流冷却箱，每组冷却单元包含可调式喷嘴阵列，冷却速率可调，冷却

水经板式换热器降温。在高速冷却段，采用气雾混合喷射模式。对于需要两相区控轧的工艺路线，系统可切换为间歇冷却模式，在特定温度区间停留以促进相变。

6）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有工艺尾气、冷却循环水排水。

③拉拔变形加工平台

制备低活化钢焊丝的拉拔机设备是金属材料加工领域中的关键装备之一，其核心功能是通过多道次的塑性变形工艺，将初始直径较大的低活化钢线材逐步拉拔至目标直径，首先，通过精确的轧制工艺，控制材料的厚度和微观组织，确保板材在后续加工过程中具备良好的变形性能。本项目所选拉拔装置处理能力为50kg/批，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为线材/焊丝坯料。

拉拔机设备主体包括下列组成单元：

1）设备整体架构：拉拔机的核心工艺链始于线材的放线系统，经过润滑处理、模具拉拔、张力控制、冷却处理等关键环节，最终通过收线系统完成成品焊丝的卷绕存储。整个流程中，设备需实现对金属流动的精准控制，既要克服材料加工硬化带来的变形抗力，又要避免因局部温升导致的材料性能劣化。对于低活化钢这类高合金材料，拉拔过程中需要严格控制应变速率与温度场分布，以维持其特有的纳米析出相结构。设备各子系统的协同运行，需通过先进的控制算法实现工艺参数的动态优化。

2）放线系统与张力控制模块：放线系统作为拉拔工艺的起始端，其核心功能在于保证线材连续、平稳地供给。对于低活化钢线材这类高价值原材料，系统通常采用主动放线设计，配备高精度伺服电机驱动放线盘，通过闭环控制系统实时调整放线速度与拉拔速度的同步性。放线张力传感器以非接触式测量技术监测线材张力波动，其反馈信号控制器处理后动态调节制动器，确保线材在进入首道模具前保持恒定张力。该模块的稳定性直接影响后续拉拔道次的均匀性，特别是当处理直径规格较粗的线材时，微小的张力波动会导致后续模具的异常磨损。

3）表面处理与润滑模块：材料在拉拔前需进行表面预处理以去除氧化皮及污染物，旋转式钢丝刷以特定倾角与线材表面接触，通过周向运动去除表层氧化物，同时超声波清洗槽内的弱酸性溶液可溶解残留杂质。润滑系统采用高压喷射技术将润滑剂均匀

涂覆于线材表面，不仅降低模具与金属间的摩擦系数，还能在高温条件下形成保护层抑制材料氧化。

4）多道次拉拔模具组：模具组是拉拔机的核心成形单元，其结构设计直接影响金属流动的均匀性。每道模具均采用组合式结构，入口区引导段为锥角，使线材逐渐进入变形区；工作区采用圆弧过渡设计，有效降低局部应力集中。对于低活化钢的高强度特性，需控制模具压缩率，过大的道次变形量会导致材料内部位错密度剧增，引发微观裂纹。模具冷却通道采用螺旋式流道设计，通过强制水冷将模芯维持在较低温度，避免因摩擦热导致的材料相变。

5）动力传动与速度协同模块：主传动系统采用多电机分布式驱动架构，各道次拉拔轮由同步电机驱动。电机通过谐波减速器与拉拔轮轴连接，传动精度达到角秒级。通过编码器实时检测各道次线速度，动态调整电机转矩输出，确保相邻道次间的秒流量相等。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有工艺尾气、酸洗废液、冷却循环水排水。

3.2.8.1.2 热处理平台

热处理平台的建设旨在提供一套完整的材料热处理解决方案，支持先进包层材料在不同批次和工艺条件下的热处理需求。该热处理平台的核心功能是为先进包层材料提供高温加热、精确控温、可控加热与冷却速率，以及气氛保护的热处理操作。

⑴大型气氛控制热处理平台

为保证所接收的合作单位大尺寸样品验收及质量把关工作得以顺利完成，需要配备炉膛尺寸足够容纳大尺寸样品的大型热处理平台。由于尺寸较大，难以保证炉膛内的真空度，因此选用气氛炉作为替代，而对于一般的大尺寸样品，较为先进的气氛炉基本能够达到所需要的指标。大型气氛控制热处理炉是一种通过精确调控炉内气体成分、温度及流动状态，实现金属材料高性能热处理的热处理设备。本项目所选大型气氛控制热处理处理能力为500kg/批，每天工作24小时，年工作100天，主要原辅材料为大尺寸钢坯、氮气/氩气。

1）多层复合炉体结构：炉体结构设计直接决定低活化钢的相变均匀性和晶粒尺寸分布。设备采用内外双层壳体架构焊接而成，外层为不锈钢水冷夹套。炉膛内部采用六面体加热布局，通过氧化铝纤维模块与碳化硅硬质耐火砖的梯度组合，形成动态热阻补偿层。针对低活化钢中9%—12%Cr元素的高温氧化敏感性，炉门密封系统采用双道金属波纹管与磁流体密封复合技术，确保在高温工况下的密封条件。

2）多模式加热系统：加热单元采用分区控制阵列，功率密度可调。对于厚度超过20mm的低活化钢坯料，特别设计了交变电磁感应辅助加热装置，通过中频电源在材料表层产生趋肤效应，实现芯表温差的快速升温。在高温均质化阶段将氩气电离形成定向热流，消除因Cr、W元素偏析导致的局部过热现象。预热区设置回转式热交换器，利用废气余热将保护气体预加热，避免冷气体注入。

3）气氛调控模块：气氛系统由高纯气体供应、动态循环净化及残余气体分析三大模块构成。主供气系统采用液态氩储罐配合分子筛吸附塔，循环风机采用磁悬浮轴承技术，气体流速经过优化，减小炉内各角落气氛均匀性偏差。

4）梯度冷却模块：为实现低活化钢从奥氏体到马氏体的可控转变，冷却系统集成气淬、油淬和雾化喷淋三种模式。高压气淬装置配备可变截面喷嘴阵列，氮气经液氮换热器冷却后以不同压力梯度喷射，冷却速率在大范围区间连续可调。等温淬火油槽采用改性油基淬火液，通过外置板式换热器维持油温。对于复杂几何构件，智能化喷淋系统动态调整各区域冷却介质流量，以控制残余应力。盐浴淬火单元采用混合熔盐，确保$M_{23}C_6$碳化物的均匀析出。

6）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台产生污染物有工艺尾气、废淬火液、冷却循环水排水。

⑵真空热处理平台

真空炉由一个密封腔室组成，腔室与真空系统相连，可清除氮气和氧气，防止加工材料被氧化和污染。真空炉中常见的热处理类型包括退火、沉淀硬化、回火、正火和应力消除等。真空热处理平台包括中小型真空热处理设备，具备高度灵活性，适用于工件的连续批次式加工作业。设备包含搅拌系统，确保进料的均匀油渗透，实现良好的热处理均匀性和快速冷却，油淬效果更加高效；气体系统、泵系统、电源和冷却系统的参数尺寸较高，确保能够应用于广泛的结构材料热处理项目。本项目所选大型

真空热处理炉处理能力为100kg/批，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为中小型钢坯、真空泵油气/清洗剂。

1）真空与压力控制模块：设备的核心基础是超高真空获得与维持系统，由机械泵、罗茨泵和扩散泵三级抽气单元构成。首先利用机械泵作为前级泵降低炉腔压力，随后利用罗茨泵将真空度降至10^{-3}Pa，最后分子泵通过高速旋转叶片将真空度提升至最高，最终使工作压力稳定。该真空水平可有效抑制低活化钢中Mn、Cu等元素的挥发，并防止C、N等轻元素与材料表面反应形成脆性相。压力控制系统通过算法动态调节泵组抽速，确保在高温阶段材料放气导致的压力波动不偏离设定值过多。

2）加热室与热场设计：加热室采用模块化石墨发热体结构，通过三维编织技术将高纯等静压石墨制成多区独立控温的笼形加热器。发热区由石墨棒组成，表面沉积涂层以提高抗氧化性和使用寿命。针对低活化钢大尺寸构件的均匀性需求，热场设计采用有限元仿真优化，通过调整加热器排布角度与功率分布，使有效加热区内温度均匀性达到极高水平。隔热屏由高热反射率合金薄板构成，可控制炉壳表面温度，显著降低热损失。为精确测量材料实际温度，设备配置了W-Re热电偶与红外高温计测温系统，前者直接接触试样表面，后者进行非接触式监测，两者数据融合后作为控温反馈信号，以减少漂移误差。

3）快速冷却与淬火模块：低活化钢的固溶处理需在真空环境下实现快速冷却以抑制粗大相析出，这对冷却系统的设计提出极高挑战。设备集成高压气淬与定向喷淋复合冷却技术：当温度降至设定值时，储气罐内的高纯氩气经环状喷管高速喷射至工件表面，同时布置在炉膛底部的液氮冷阱启动，通过辐射冷却降低环境热负荷。气淬阶段可在短时间内将工件从高温冷却至较低温度；对于更严苛的淬火需求（如马氏体相变控制），可切换至其他混合气体介质，将冷却速率进一步提升。淬火过程产生的热应力通过监测实时反馈，系统自动调节气体压力梯度以避免材料损伤。

4）控制模块：控制算法的核心是基于材料热物性参数的自适应模糊PID模型。系统内置低活化钢的比热容、热导率随温度变化的非线性曲线数据库，在升温阶段自动切换控制参数：当温度低时采用高增益比例控制以加快响应速度；在奥氏体化温区切换至积分主导模式以消除稳态误差；在接近设定温度时引入微分项抑制超调。针对真

空环境下传热滞后显著的特点，算法嵌入前馈补偿机制，通过实时计算工件吸收的热流密度与辐射散热损失，提前预判功率需求变化。

6）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析初步分析，本平台产生污染物有工艺尾气、废淬火液、冷却循环水排水。

⑶焊接后热处理平台

焊后热处理（PWHT）平台为焊接接头的焊后热处理工艺提供了实验平台，从而能够评估焊后热处理工艺对先进低活化钢焊接接头的组织性能影响，并调试先进低活化钢焊接接头合适的PWHT参数。采用工业台式马弗炉，设备包括多重安全功能和两个温度控制选项，可调报警或过温保护设置可用于防止炉或装载室过热，热电偶断保护切断加热元件的电源，防止热电偶故障失控；另外，炉腔内部耐火水泥中有独立的加热元件，使温度分布更加均匀，还以耐用型隔热耐火砖围绕开口，增加耐用性，包括采用独立的测量设备监测腔内温度，对于温控更加准确高效。本项目所选热处理加热炉处理能力为30kg/批，每天工作8小时，年工作100天，主要原辅材料为焊接试样/接头、油基淬火液。

1）炉体结构：炉体结构作为热处理设备的物理载体，需兼顾保温性能、密封性和机械强度。炉膛通常采用多层复合结构：内衬为高纯度氧化铝纤维或碳化硅耐火砖，中间层为硅酸铝陶瓷纤维毡，外层为不锈钢或碳钢壳体。这种设计可将炉膛外壁温度降至60℃以下，同时保持内部温度均匀性（±5℃以内）。炉门密封采用水冷法兰与石墨组合密封技术，确保在高温下仍能维持气密性。对于大型工件处理，炉体设计为可移动式或升降式结构，便于装卸操作。部分设备还配备旋转工作台，使工件在热处理过程中匀速转动，进一步改善温度分布的均匀性。

2）加热系统：加热系统是焊后热处理设备的核心动力单元，其功能在于提供精确可控的热源，确保低活化钢工件在热处理过程中达到预设温度曲线要求。电阻加热系统因其温度均匀性和控制精度高的特点，在低活化钢焊后热处理中应用最为广泛。电阻加热系统由加热元件、电源模块及功率调节装置构成。加热元件采用高熔点金属合金制成，布置于炉膛内壁或独立加热腔内，通过辐射和对流方式传递热量。电源模块

将工业电网的交流电转换为适合加热元件的低电压大电流，并通过可控硅或固态继电器实现功率的连续调节，从而精确控制升温速率和保温阶段的温度波动。

3）温度控制系统

温度控制系统是确保热处理工艺参数精确执行的中枢神经。该系统由温度传感器、信号调理模块、控制器及执行机构组成闭环控制回路。在低活化钢的热处理过程中，在相变敏感的温度区间（如RAFM钢的Ac1点附近），过大的温度波动会导致马氏体回火程度不均或碳化物析出异常。温度传感器多采用K型或S型热电偶，其测温范围可覆盖低活化钢的工艺需求。对于大型工件或复杂几何结构，需布置多组热电偶构成分布式测温网络，实时监测不同区域的温度梯度。控制器采用算法根据设定温度曲线与实际测量值的偏差动态调整加热功率。设备集成PLC或工业PC，支持多段程序升温、保温时间设定及异常工况处理等功能。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，本平台无污染物产生。

3.2.8.2 固态包层功能材料批量化制备

3.2.8.2.1 固态氚增殖材料锂陶瓷小球制备

针对锂陶瓷小球设计采用熔融喷雾造粒工艺和离心造粒工艺实现高致密度、高球形度、大小均一的增殖剂微球的批量化生产，确保材料致密性和力学性能，拟建设制粉系统、熔融喷雾造粒系统、离心造粒系统、干燥烧结系统、筛分及分装系统。固态包层氚增殖剂陶瓷微球生产能力不小于2吨/年。

⑴固态氚增殖材料制粉系统

①系统组成

制粉平台由上料装置、原料仓、定量给料器、气流分级机、球磨机、除尘器、成品料仓、转移传送系统组成。本项目所制粉系统处理能力为10kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为锂陶瓷粉末。

②工艺流程

制粉平台的工艺流程始于上料装置通过机械输送系统将固态增殖剂原材料粉末送入原料仓暂存，原料仓底部通过振动给料机或螺旋输送装置将物料稳定输送至定量给

料器，后者通过称重传感器或流量控制器精确调节原料供给量，确保连续球磨机进料的均匀性；球磨机内部采用钢球或陶瓷研磨介质，在高速旋转筒体的离心力作用下，通过撞击、摩擦及剪切力将原料粉碎至目标细度，研磨后的粉末经输送系统输送至气流分级机，分级机通过调节涡轮转速或气流速度实现颗粒动态分级，符合粒径要求的细粉在离心力与负压作用下进入成品料仓暂存，而粗粉则经返料管道由输送系统闭环回送至球磨机重新研磨，形成资源高效利用的循环体系；在整个研磨、分级及输送过程中，脉冲除尘器通过覆膜滤袋（过滤精度达0.3μm）和多点布设，实时捕集逸散粉尘，压缩空气脉冲喷吹自动清灰，回收的粉尘通过螺旋输送机返回原料仓或直接掺入成品，确保粉尘排放浓度低于10mg/m³；成品料仓内的粉末经流化装置防止板结，最终由转移传送系统以全密闭方式输送至包装线或下游生产环节，系统全程通过PLC集成控制，实现高效、安全、环保的连续化制粉生产。

③主要设备参数

上料装置：用于给原料仓进行固态增殖剂自动进料，上料速度＞50L/h；

原料仓：储存陶瓷粉末原料＞200L；

定量给料器：实现给料体积的控制；

连续式球磨机：

工作容积：60L

＞300rpm转/分钟

④主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，污染物有粉尘。在整个研磨、分级及输送过程中，脉冲除尘器通过覆膜滤袋（过滤精度达0.3μm）和多点布设，实时捕集逸散粉尘，压缩空气脉冲喷吹自动清灰，回收的粉尘通过螺旋输送机返回原料仓或直接掺入成品，确保粉尘排放浓度低于10mg/m³。

⑵熔融喷雾造粒系统

①系统组成

本系统由气路、工作平台、坩埚、熔融炉、循环水系统、水路、气路、除尘系统、收粉罐、防爆系统、高压气路等设备构成。本项目所熔融喷雾造粒系统处理能力为10kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为锂陶瓷粉末。

②工艺流程

熔融喷雾法造粒的工艺流程主要分为固态增殖剂熔融和喷雾造粒两个步骤。

固态增殖剂熔融工序中，先将增殖剂粉体通过压力管加入炉膛内，这是整个熔融喷雾法制备增殖剂微球过程的起始步骤，为后续的加热熔融操作做好了原料的准备工作；利用电磁感应加热技术，将炉膛内的增殖剂粉体加热至1300℃-1600℃，使其转变为熔融态的增殖剂液体。由于锂陶瓷粉末导电性差，不能直接感应熔融，且熔融的硅酸锂溶液具有强碱性，易于腐蚀坩埚材料，该套设备考虑采用铂金坩埚。

喷雾造粒工序中，加压装置通过施加惰性气体施加压力，迫使熔融态的增殖剂液体从滴管滴落，形成增殖剂液滴。同时，加压装置将惰性气体通入吹气管，将滴落的增殖剂液滴吹散成均匀的小液滴，并呈锥形向外发散，有效控制液滴的大小和分布，提高增殖剂陶瓷小球的质量和均匀性。

③关键参数

自动上料，20kg/h；

容量：10kg/炉（按陶瓷粉2.5g/cm^{3}的密度计）；

熔炼温度不低于1300℃-1600℃；

采用空气压缩气体进行雾化制粉，配备相应的空压机满足雾化造粒要求；

罐体为立式，筒体为304不锈钢，厚度6~8mm，内壁抛光处理；

收粉罐结构为双层水冷，内外层为304不锈钢并表面抛光。

④主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，污染物有粉尘。系统配置过滤除尘系统，将加料过程和喷雾过程中产生的含锂粉尘收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

⑶离心造粒系统

①系统组成

离心造粒系统由前驱体平台、离心造粒设备等关键部分组成。前驱体制造平台用于为离心造粒法制备增殖剂小球提供前驱体，具体操作包括：将增殖剂陶瓷粉体进行喷雾造粒预处理，再喷洒黏结剂溶液进行造粒，过筛得到球坯；将所述球坯加入离心造粒装置进行离心造粒形成增殖剂微球产品。本项目所离心造粒系统处理能力为10kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为锂陶瓷粉末。

②主要参数

前驱体微球直径：0.1—0.2mm

产品微球直径：0.5—1mm

合格产品微球年产量：＞2.0吨

③工艺流程

离心造粒过程的关键步骤包括喷雾造粒预处理、生成种子、逐层造粒黏结、密实化处理以及干燥与烧结。在喷雾造粒预处理中，使用锂陶瓷粉体，并采用含有PVA和分散剂的第一黏结剂溶液，同时使用田菁胶溶液来增强粉体的可塑性。浆料的固含量控制在30-55wt%，并通过离心式喷雾方式进行造粒，确保浆料持续搅拌，并通过筛网筛分，以提高粉体流动性和堆积密度，生成球形球坯。

在离心造粒生成种子的步骤中，采用离心造粒机进行操作，设备转速和倾角根据造粒结果不断优化。第二黏结剂溶液由羟丙基甲基纤维素、甘油、田菁胶、乙醇等至少两种物质组成，确定羟丙基甲基纤维素：甘油：田菁胶：乙醇优选配比，最终生成直径为0.2—0.4mm的锂陶瓷微球种子。

在逐层造粒黏结阶段，向造粒机中添加含锂陶瓷粉体，形成层状或多相结构。为了改善层间结合，可以加入聚乙二醇，与第二黏结剂混合。通过筛网进行颗粒的分散处理。

密实化处理过程中，降低设备转速，喷洒去离子水，滚动处理，以提高微球的致密度。随后进入干燥与烧结阶段，完成排胶处理。最后确定烧结温度和烧结时间，获得致密的陶瓷微球。

④主要污染物排放及治理措施

根据初步分析，应该有粉尘。系统配置过滤除尘系统，将加料过程和离心过程中产生的含锂粉尘收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

⑸干燥烧结系统

①系统组成

干燥烧结系统由保护气氛煅烧炉、工业机械臂组成，可实现产品增殖剂微球的自动进出料、高温烧结及去应力等热处理工艺。本项目所干燥烧结系统处理能力为20kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为锂陶瓷粉末。

②主要参数

干燥烧结系统工艺参数见下表。

表3-28 干燥烧结系统工艺参数表

参数编号	技术规格与要求
额定温度	1400℃
有效加热区尺寸	100L
炉温均匀性	±5℃(1200℃)
控温精度	±0.1%
升降温周期	<24h

③工艺流程

干燥烧结系统主要功能是通过控制温度和湿度等条件，去除陶瓷小球中的水分，并促进陶瓷粉体的烧结过程，从而确保最终得到具有高密度、良好机械强度和稳定性能的致密陶瓷微球。干燥烧结系统的主要设备为气氛保护煅烧炉，该设备采用钼带或钼丝作为发热体，立式侧开门结构，全金属隔热保温屏，纯钼料台，专有技术设计的保温层炉温均匀性好，变形小，使用寿命长。

④主要污染物排放及治理措施

根据初步分析，应该有粉尘。系统配置负压粉尘收集系统，系统配置负压粉尘收集装置，将真空泵组以及装卸粉料过程中产生的粉尘过滤收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

⑹筛分及分装系统

①系统组成

筛分及封装系统通过多级振动筛分机和真空封装码垛设备组成，实现对固态增殖剂产品的直径的筛分并对合格产品进行真空封装，不合格增殖剂陶瓷颗粒返回制粉系统重新制备。

②主要参数

最终固态增殖剂微球振动筛分粒径：0.5—1.0mm；

筛分产能：＞5kg/h；

密封方案：塑料包装真空密封方案；

封装产能：＞20kg/h；

极限真空度：1.0Pa。

③工艺流程

真空振动筛分机是一种结合负压吸附与机械振动原理的高效筛分设备，主要由密封筛箱、振动电机、真空系统、筛网组件及自动控制系统构成。其工作原理是通过振动电机驱动筛面高频振动实现物料分层与筛分，同时真空系统在筛箱内形成负压环境，利用气流吸附微细颗粒，有效防止筛网堵塞并加速物料透筛。设备采用模块化结构设计，配备多级可调振动参数及智能化控制界面，支持不同粒径物料的精准分级。

真空封装机器的工作原理是去除包装中的空气，创造真空密封环境。这个过程涉及几个关键组成部分，真空泵产生吸力，去除包装中的空气；密封机构：排空空气后，使用热封、粘合带或夹紧装置密封包装；真空室在排除空气的同时保留食物或产品；控制面板允许调整真空压力和热封时间等设置。

④主要污染物排放及治理措施

根据初步分析，应该有粉尘。统配置过滤除尘系统，将加料过程和喷雾过程中产生的含锂粉尘收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

3.2.8.2.2 中子倍增材料批量化制备

铍及其金属间化合物（如Be12Ti）作为聚变堆中子倍增材料的核心候选，其批量化制备系统的建设是实现聚变能工程化应用的关键技术支撑。设计采用等离子旋转电极雾化制粉工艺和模压成型工艺制备铍钛合金小球，拟建设混粉系统、铍基棒材烧结系统、机加工系统、铍基小球制备系统、粒径筛分系统、环境监测系统。铍基中子倍增剂验证生产能力不小于2吨/年，表观密度不小于理论密度的95%。

⑴混粉系统

本项目所选混粉系统处理能力为12kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为铍粉末。

①系统组成

主要由手套箱、球磨机、废气处理系统等几部分组成。球磨机置于手套箱中，通过过渡仓粉末运送至球磨机中进行混粉，同时手套箱提供真空或惰性气体保护，产生的粉尘和废气通过粉尘废气处理系统进行回收处理。

②主要参数

球磨机：最大容积20L，配备四个球磨罐，单罐容积5L，转速0-800rpm，最小粒度可至0.1μm；

手套箱：前级室真空度0-0.1MPa，主箱体真空度0-0.1MPa，水氧指标＜1ppm，可通氩气，氮气等惰性气体；

粉尘废气处理系统：配有过滤器0.3μm（气体出入口各1个），有机溶剂吸附器，铜触媒和分子筛净化材料。

③工艺流程

粉系统设计的核心目标是确保操作的安全性、气氛的稳定性以及高效粉末混合处理。手套箱提供了一个封闭的操作环境，通过球磨机和气氛控制系统，确保在惰性气体或真空环境下进行精确的粉末混合、细化，同时废气处理系统对产生的废气进行有效回收和净化。粉末通过适当的包装、存储与运输，避免与空气接触。将粉末放入手套箱的操作区域，通过手套箱的手套进行操作，确保操作人员不直接接触粉末。手套箱内部配备气氛控制系统，确保手套箱内维持在低氧或惰性气体环境中。通常使用氮气或氩气充气，确保氧气浓度低于所需水平。粉末通过手套箱内的过渡仓被传送到球磨机。过渡仓的设计必须确保在传输过程中没有空气泄漏，并且要有适当的密封。过渡仓内可能配有密封门或快速关闭阀门，以确保气氛保持稳定。在球磨机内，粉末通过高速的球磨过程进行混合、细化或合金化。球磨机通常采用高能球磨机或行星式球磨机，可以通过控制球磨时间、转速和球磨介质的比例来调节粉末的粒度和均匀性。

④主要污染物排放及治理措施

根据工程分析污染物有粉尘。在球磨机运行过程中，可能会产生粉尘或其他废气。这些废气通过废气处理系统回收处理。

⑵钹基棒材烧结系统

本项目所选钹基棒材烧结系统处理能力为12kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为钹粉末。

①放电等离子体烧结系统

1）系统组成

放电等离子体烧结系统由炉体、脉冲直流电源、真空系统、液压系统、水冷系统、保护气氛系统、电气控制系统等关键部分组成，具体见下表。

2）主要参数

放电等离子体烧结系统工艺参数见下表

表3-29 放电等离子体烧结系统工艺参数表

参数编号	技术规格与要求
最高温度	2000℃
压头直径	100mm
压力行程	100mm
最大压力	20T
烧结样品	φ50—80mm
冷态极限真空度	5×10^{-4}Pa
压升率	≤3Pa/小时

3）工艺流程

炉体采用双层水冷结构，全不锈钢材料，炉体侧开门，装卸模具方便，炉体顶部安装有监测热电偶三支，炉顶安装进口双色红外仪一套，炉体上部安装有可靠的不锈钢波纹管轴向密封，动密封长期可靠。脉冲直流电源采用全数字式IGBT脉冲直流电源，配有功率模块，显示电压、电流值，脉冲参数都可调节，可以实现工艺更精确控制。真空系统由1台TRP-48直联式机械泵、1台分子泵、配真空电动阀等组成真空机组。液压系统采用框架式一体结构，单向加压方式。炉体上的水冷压头与油缸的连接方式为法兰连接，保证上下压头的平行度，压头测距采用光栅尺（测距精度±0.02mm）。水冷系统由管道及阀门等相关装置组成，冷却水总管进入后，经过各支管送到炉体、炉盖、炉底、水冷电极、真空泵等需要冷却水的地方，然后汇总到水管排出。保护气氛系统由CKD电磁阀、转子流量计及管路构成，通过压力开关可自动充气和补气。电气控制系统集中在控制柜中，面板上设计配备15寸液晶触摸屏、电流及电压表等。电器元件采用欧姆龙或施耐德品牌，稳定可靠。

4）主要污染物排放及治理措施

根据初步分析，应该有烧结尾气粉尘。统一配置有过滤除尘系统，将加料过程和喷雾过程中产生的含铍粉尘收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

②热等静压系统

1）系统组成

热等静压系统由压力容器、加热系统、气体压缩机系统、真空系统、冷却系统、控制系统等关键部分组成，

2）主要参数

表3-30 热等静压系统主要参数

参数编号	技术规格与要求
额定压力	200MPa
压力介质	氩气
最大工作温度	1400℃
最大工件高度	300mm
最大工件直径	200mm
真空环境加热温度	1000℃
最大装载重量	50kg
炉温均匀性	±7℃

3）工艺流程

压力容器是热等静压系统的核心部件，负责容纳待处理的铍基棒材及传递均匀的压力。在设计过程中，压力容器采用高强度合金钢或特殊耐腐蚀材料，以承受高温高压环境下的工作要求。容器内的内衬经过特殊设计，以最大程度避免与铍的反应。容器能够在高达200MPa的压力下稳定运行，并确保铍基棒材在压力和温度条件下的均匀加热与压制。

为确保铍基棒材的均匀加热，采用高效的电阻加热元件，分布在压力容器的内壁周围。加热系统具有精确的温控能力，能够在指定的温度范围内稳定工作。温度控制系统包括温度传感器和高精度的温控器，能够实时监控和调节温度波动，确保铍基棒材在整个热等静压过程中均匀受热，从而提高材料的致密度和力学性能。

气体压缩机系统是热等静压过程中的重要组成部分，其主要作用是提供高压气体介质（通常为氮气或氩气），并将气体均匀地传输到压力容器内，确保铍基棒材受力均匀。该系统配备高效压缩机，能够提供高压气体源，并保持气体的稳定流动，确保

系统内的压力达到设定要求。气体压缩机系统需要具备较高的可靠性和稳定性，以保证每次处理过程中压力精度和气体的均匀分布。

在热等静压工艺中，真空系统用于在加热前或处理过程中对压力容器内进行预抽真空处理，消除系统中的气体杂质，保证铍基棒材在加热过程中不受氧化或污染。真空系统包括高性能的真空泵和真空阀门，能够在较短时间内将压力容器抽至较低的真空度。

控制系统负责对压力、温度、真空、冷却速率等各个参数进行实时监控和调节。系统采用PLC或DCS控制平台，配备触摸屏操作界面，操作人员可以通过图形化界面实时监控设备状态，进行参数设置与调整。该系统具有自动化控制功能，能够在各个工艺阶段自动切换模式，并提供数据记录功能，为生产过程提供精确控制和数据支持。此外，控制系统还具备故障诊断、报警与紧急停机等功能，确保设备的安全运行。

4）主要污染物排放及治理措施

根据工程分析初步分析污染物为粉尘，系统配置负压粉尘收集装置，将真空泵组以及装卸粉料过程中产生的粉尘过滤收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

⑶机加工系统

本项目机加工处理能力为12kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为铍棒。

①系统组成

金刚石线切割机是一种高精度的切割设备，利用金刚石颗粒的超硬特性来切割硬质材料，适用于精密切割，能够非常准确地控制切割的尺寸和形状。

②主要参数

表3-31 机加工系统主要参数

参数编号	技术规格与要求
金刚石线径	0.1～0.3mm
金刚石粒度	20~50μm
线材张力控制	10～50N可调
线速范围	0.5～30m/s可调
最大加工尺寸	300×300×200mm
定位精度	≤±1μm

参数编号	技术规格与要求
进给速度	10～300mm/min可调
运动轴数	6轴

③工艺流程

金刚石线切割机是本系统的核心设备，专门用于高精度切割铍基棒材。该切割机采用金刚石线作为切割工具，能够在加工过程中提供极高的切割精度和效率。集尘罩是用来收集金刚石线切割过程中产生的粉尘和微小颗粒的设备。这些粉尘不仅影响工件质量，还对操作人员的健康造成潜在危害。集尘罩紧密地包裹在切割机周围，能够迅速有效地将粉尘吸入，防止粉尘散布到车间环境中。负压风机是本系统中的关键组成部分，用于维持集尘罩内部的负压环境。风机通过产生负压，确保集尘罩内的空气流动顺畅，将产生的粉尘吸入管道系统，并将其输送到过滤装置中，避免粉尘对操作环境造成污染。过滤装置用于对收集到的粉尘进行处理，确保排放到外部的空气符合环保标准。过滤装置通常包括多级滤网系统。

④主要污染物排放及治理措施

根据工程分析初步分析污染物有粉尘。粉尘储存装置用于安全地收集和存储切割过程中产生的粉尘。这些粉尘通常被吸入管道系统，并通过集尘罩进入密封的粉尘收集容器。储存装置采用密封设计，防止粉尘外泄，确保车间环境的整洁与安全。

⑷铍基小球制备系统

本项目铍基小球制备系统处理能力为12kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为铍粉末。

①系统组成

等离子体旋转电极系统由等离子枪装置（等离子枪及电源）、传动装置组件、雾化室及粉末收集系统、真空系统、冷却系统、气体系统及供电和控制系统等关键部分组成，

②主要参数

表3-32 等离子体旋转电极系统主要参数

参数编号	技术规格与要求
整机功率	3相380V±10%，50Hz±1%；功率≤300kW
电极棒直径	~Φ75mm

参数编号	技术规格与要求
工作转速	~22000r/min
等离子发生类型	转移弧形等离子体
熔化电流	0-4000A（连续可调）
极限真空	~5×10^{-3}Pa
工作气体介质	高纯氩气（Ar_2，纯度≥99.999%）
雾化室冷却方式	强制循环水冷
粉末粒度分布	全范围：100-1000μm

③工艺流程

等离子体旋转电极设备能够通过旋转电极的高速旋转和等离子体加热，将铍及其金属间化合物电极棒快速加热至熔点，并利用离心力将熔融金属喷射成细小颗粒。电极棒旋转动作由电主轴或皮带轮等驱动机械轴转动，机械轴采用内外螺纹直接连接电极棒料伸入雾化室，并带动其高速旋转，高性能碳刷通过机械轴固定支撑并直接接触电极棒料给其通电，制球过程中电极棒料作为阳极，与雾化室内转移弧形等离子枪形成导通回路，产生高温等离子体，高速旋转的棒料端面被转移型高温等离子弧熔化、破碎、冷凝成球。该过程能够在极短的时间内实现球体的快速冷却，从而避免了晶粒的粗化，确保了小球的细小和均匀结构，使得合金的颗粒界面更加均匀，从而增强了合金的整体力学性能。等离子体旋转电极技术通常在低氧环境或惰性气体氩气、氮气等保护气体中进行，这有效防止了铍在熔化过程中与氧反应，从而避免了氧化物的形成。保持金属的高纯度有助于小球的性能优化。

④主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，污染物应该有粉尘。系统配置负压粉尘收集装置，将真空泵组以及雾化室中产生的粉尘过滤收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

⑸粒径筛分系统

本项目粒径筛分系统处理能力为12kg/批，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为铍小球。

①系统组成

粒径筛分系统由振动筛分机，集尘罩，负压风机，过滤装置，粉尘储存装置等关键部分组成。

②主要参数

筛面网孔直径：600mm

筛网目数：4-35目

③设计描述

振动筛分机配备多层筛网，可以根据需要调整筛网的孔径，以满足不同粒径的分选要求。筛分过程中，物料在筛网表面受到振动力的作用，较大的颗粒被截留在筛面上，而较小的颗粒则通过筛网孔隙落下，进行进一步分级。

④主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，污染物应该有粉尘。集尘罩位于振动筛分机的上方或周围，负责捕集筛分过程中产生的粉尘。由于振动筛分机会产生大量细小的粉尘，集尘罩的设计需要确保粉尘被迅速有效地引导进入收集系统。负压风机用于维持筛分系统的负压环境，确保集尘罩内的空气流动和粉尘能够顺利进入管道系统。风机的风量和压力根据粉尘量、筛分机的工作状态以及管道的长度和直径进行选择。通过风机的负压作用，粉尘可以被及时吸入，并输送至过滤装置。过滤装置用于对收集到的粉尘进行处理，确保排放到环境中的气体符合相关环保标准。粉尘储存装置用于收集筛分过程中产生的粉尘，并对其进行安全存储。储存装置通常是密封式的集尘桶或集尘袋，能够有效防止粉尘外泄。

⑹负压通风过滤收集系统

①系统组成

负压通风过滤收集系统由负压风机、集尘装置、通风管道、过滤装置、粉尘收集器、控制系统等主要部分组成。

②主要参数

通风量：10000m^3/h；

负压：5—10Pa；

过滤效率：99.9%。

③设计描述

铍粉尘和铍蒸气对人体健康有极大的危害，长期暴露于这种环境下可能导致严重的呼吸道疾病（如铍尘肺病）和癌症。为了有效降低铍粉尘的暴露风险，确保操作人

员的安全和健康，车间必须采取严格的通风控制措施，其中包括负压通风过滤系统的设置。负压通风系统通过将空气流向车间外部，保持车间内的负压状态，有效地避免有毒粉尘和蒸气逸散到车间外部，从而降低工作人员和周围环境的暴露风险。

负压通风过滤收集系统通过选择合适规格的负压风机来控制车间内部的空气流向，负压风机的功能是产生足够的吸力，确保车间内的空气及污染物向外流动。

集尘装置布置在铍粉尘产生的源头附近，每个设备的作业区域配备高效的集尘罩，通过高效吸风装置将铍粉尘从源头捕集并导入通风管道。集尘装置采用模块化设计，可以根据需要进行调整，以确保粉尘在产生时即被收集。通风管道网络将收集到的有害空气从车间内部传输至负压风机和过滤装置。

过滤装置是系统中的关键环节，确保空气中的有害粉尘、铍蒸气等被高效过滤。根据粉尘的性质，设计选用了多级过滤器，包括粗效过滤器、中效过滤器和高效过滤器以保证去除不同粒径的污染物。经过过滤的粉尘被收集在密封的粉尘收集器中，确保污染物不会二次释放到车间环境中。

④主要污染物排放及治理措施

根据工程分析，污染物应该有粉尘。根据粉尘的性质，设计选用了多级过滤器，包括粗效过滤器、中效过滤器和高效过滤器以保证去除不同粒径的污染物。经过过滤的粉尘被收集在密封的粉尘收集器中，确保污染物不会二次释放到车间环境中。

⑺环境监测系统

环境监测系统由取样系统、铍颗粒物监测仪等关键部分组成。

①系统功能

铍生产车间环境监测系统在保障工作环境安全、保护员工健康、遵守环境法规方面发挥着重要作用。其主要目标是实时监测铍生产过程中可能释放的有害物质，并采取有效措施防止污染或危害发生。

②主要参数

检测灵敏度：1μg/m^3；

检测精度：±10%。

③设计描述

取样系统的主要任务是从工作环境中获取空气样本，并将其输送到分析仪器中。安装高效过滤器，去除大颗粒物质（如灰尘、沙粒等），只允许较小颗粒物质（如铍粉尘）通过，确保最终样本的准确性。铍颗粒物监测仪是系统中的核心设备，采用激光诱导击穿光谱（LIBS）技术对空气中的铍粉尘浓度进行实时监测。该技术具有快速、非接触、实时、精准等优点，特别适合用于高危场所的微量污染物监测。

3.2.8.2.3 主要生产设备

固态包层功能材料批量化制备平台主要生产设备见下表。

表3-33 固态包层功能材料批量化制备表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途	噪声范围dB(A)	备注
1	热等静压设备		①最大热区有效尺寸：200mm（直径）×300mm（高度） 200mm（直径）×400mm（高度）； ②最高工作温度：2000℃；（C/C发热体) ③常用工作温度：≤1850℃；（C/C发热体） ④最大工作压力：200MPa； ⑤常用工作压力：≤185MPa； ⑥工作台最大承重：50kg；	2	制备铍钛合金电极棒材和先进结构材料研发		
2	等离子旋转电极雾化制粉设备		①等离子弧功率：≥240KW，主弧电流300—4000A可调 ②极限真空：≤5×10^{-3}Pa ③粉末氧增量：≤100ppm（TA15钛合金） ④电极棒直径：～Φ75mm和～Φ50mm ⑤工作气氛：Ar≥99.999% ⑥球形粉末总收率：≥80%	1	制备铍钛合金微球	无	
3	放电等离子热压烧结炉		①直流电源容量：200KVA ②输入电压：AC380V、50Hz ③输出电流：DC 0-20000A (数显) ④输出电压：脉冲直流输出 DC 0-10V (数显) ⑤最高温度：2200℃，升温速率：10-500℃/min（采用专用工装测）	1	制备铍钛合金棒材	无	

3.2.8.3 液态包层功能材料批量化制备

拟建设纤维预制体编织系统、高温热处理系统、界面沉积系统、化学气相渗透系统、压力浸渍系统、真空裂解系统、平面磨削系统和构件自动转运系统8个系统，液态包层SiCf/SiC流道插件长度达米级，密度≥2.5克每立方厘米。

工作制度：液态包层功能材料批量化制备平台年操作约200天，每天1次，主要工序为化学气相渗透、压力浸渍、高温裂解等，每天操作总时间8小时。

3.2.8.3.1 纤维预制体编织系统

编织主机、牵引滑台、机械臂、并丝机、轴向纱架和控制系统等关键部分组成，

纤维预制体编织系统用于编织碳化硅复合材料纤维预制体，是制备过程中尤为重要的一个环节，可以根据设计要求制造复杂形状的纤维预制体，满足各种形状尺寸流道插件制备需求。纤维预制体编织系统能够确保纤维在预制体中的均匀分布，避免纤维堆积或疏松的情况。均匀的纤维排列对于增强复合材料的力学性能至关重要，特别是在提高抗拉强度、抗弯强度和断裂韧性等方面。通过编制系统，纤维可以按特定的方向、角度或层次进行排列，满足包层应用中对碳化硅复合材料流道插件力学性能的需求。

本系统无污染物排放。

3.2.8.3.2 高温热处理系统

本项目高温热处理系统处理能力为一根米级插件/炉，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为SiC纤维预制体。

⑴系统组成

在碳化硅纤维生产过程中，可能会有一些挥发性杂质（如有机物、气体等）附着在纤维表面。通过高温真空热处理，可以有效地去除这些杂质，确保纤维的纯净度，避免影响复合材料的力学性能。高温真空热处理还能够改善纤维的表面特性，增加其与基体材料的结合强度，从而提升复合材料的整体性能。

⑵主要参数

加热系统：设计最高工作温度2300℃，有效工作区φ900′1200mm（直径′高），控温方式1200℃以下钨铼热电偶，1200℃以上红外测温仪，温度控制精度≤±1℃。

真空系统：极限真空度≤50Pa（冷态空载)，机械泵+罗茨泵连用。

充气系统：自动充气，气体介质：氮气，氩气(正压≤0.03Mpa下使用。

⑶工艺流程

加热系统作为高温热处理系统热处理的核心能源模块，采用智能控温技术，通过分布式热场布局与高精度红外测温反馈，动态调节加热功率，确保材料受热均匀性，

避免局部过热导致的变形或相变异常，同时支持预设升温曲线匹配不同工艺阶段，保障晶粒结构稳定生长。

真空及惰性气体保护系统通过机械泵与分子泵协同构建高纯度真空环境，有效隔绝氧化反应，并集成智能气体注入模块，按需自动通入氩气或氮气形成保护性气氛。

冷却系统结合循环水冷与变频风冷技术，实现差异化高效散热，高温区域通过水冷管路快速导离热量，中低温区域按需启动风冷降温，内置余热回收模块将废热转化为预热能源以降低能耗，并利用智能算法精准控制冷却速率，避免材料因急冷产生内应力。

⑷主要污染物排放及治理措施

主要污染物为有机废气。

3.2.8.3.3 界面沉积系统

本系统处理能力为一根米级插件/炉，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为甲烷。

⑴系统组成

主要由炉体、加热保温系统、沉积室系统、真空系统、尾气处理系统、工艺气路系统、气动系统、水冷系统、下出料系统和电气控制系统等组成。

⑵主要参数

表3-34 界面沉积系统主要参数

分项	参数
工作区有效尺寸	φ500mm×1500mm（直径×高度）
最大承载重量	≤100Kg（含模具及工装，不代表装炉量）
最高温度	1200℃
常用工作温度	900℃~1100℃
极限真空度	50Pa（烘炉后，空炉、清洁、冷态下）
压升率	≤10Pa/h（烘炉后，空炉、清洁、冷态下）
沉积压力范围	1000Pa～5000Pa（可控可调）
电源	380V±10%50Hz
加热方式	电阻加热
加热功率	约250kW
出料方式	立式、下进出料

分项	参数
工作气氛	氩气、甲烷
额定充气压力	≤1.1bar（绝对压力）

⑶工艺流程

该碳界面沉积系统由立式圆形双层水冷夹套炉体为核心，集成多模块协同工作。

炉体采用优质碳钢外壳，配备液压自动升降上炉门与丝杆传动下炉门（气缸锁紧+导轨平移），内置热电偶测温、真空/压力接口及氟橡胶密封件，通过机械平衡阀和自动放气阀实现过压双重保护。

加热系统采用等静压石墨环形加热元件，搭配1600℃高温石墨化硬质碳基隔热层，通过模块化直流电源经水冷电极低电压供电，结合温度补偿实现炉膛均温性（±5℃@1600℃）。

沉积室主要由石墨坩埚、石墨料台组件等部分组成，石墨坩埚采用热膨胀系数较低的细颗粒石墨材质，提高坩埚的使用寿命，相对密封结构减少反应气体对加热元件的侵蚀。

真空系统配置双滑阀泵、304不锈钢波纹管路及电动/气动球阀联动控制，真空抽气口采用双层水冷夹套，KF检漏接口与氟橡胶密封确保1~10^{-2}Pa动态真空调控。

尾气处理通过双层水冷冷凝管道和可更换玻璃纤维滤芯实现副产物收集。工艺气路集成四路进气，质量流量计独立调控气体比例，切向混气罐配合底部进气－顶部排气形成稳定流场，PLC与天然气泄漏探测器联动（响应≤0.5s）确保安全。

水冷系统采用闭式压力回水（0.3~0.5MPa），316L不锈钢硬管与耐压10MPa软管组合，电极回路配置温度流量传感器（±0.5℃精度），支路配备可视流量窥镜及电接点压力表（缺水/超压自动停机）。

下出料系统通过伺服电机驱动丝杆升降机构（定位精度±0.1mm），带直线导轨（平行度≤0.02mm/m）的托料盘实现无抖动平移装卸。电气控制以西门子PLC为核心，支持一区PID控温（N型热电偶±1.5℃）、触摸屏动态显示三维温度场，可存储20组工艺曲线（升温速率0.1~50℃/min），集成过压/泄漏/冷却故障三级互锁，满足SiC纤维复合材料的高温沉积（致密度≥95%）。

⑷主要污染物排放及治理措施

本台架主要污染物为工艺尾气。

尾气处理通过双层水冷冷凝管道和可更换玻璃纤维滤芯实现副产物收集。工艺气路集成四路进气，质量流量计独立调控气体比例，切向混气罐配合底部进气－顶部排气形成稳定流场，PLC与天然气泄漏探测器联动（响应≤0.5s）确保安全。

水冷系统采用闭式压力回水（0.3~0.5MPa），316L不锈钢硬管与耐压10MPa软管组合，电极回路配置温度流量传感器（±0.5℃精度），支路配备可视流量窥镜及电接点压力表（缺水/超压自动停机）。

3.2.8.3.4 化学气相渗透系统

本系统处理能力为一根米级插件/炉，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为甲基三氯硅烷。

⑴系统组成

化学气相渗透系统主要由炉体、加热保温系统、沉积室系统、真空系统、尾气处理系统、工艺气路系统、气动系统、水冷系统、维修操作平台、下出料系统和电气控制系统等组成。

⑵主要参数

表3-35 化学气相渗透系统主要参数

分项	参数
工作区有效尺寸	φ500mm×1500mm
最大承载重量	≤100Kg
最高温度	1500℃
常用工作温度	900℃～1300℃
极限真空度	10Pa（冷态下）
达到极限真空度时间	≤45min（冷态下）
压升率	≤2Pa/h（冷态下）
沉积压力范围	1000Pa～5000Pa（可控可调）
加热方式	电阻加热
出料方式	立式、上进出料
工作气氛	氩气、氢气、三氯甲基硅烷
额定充气压力	≤1.1bar（绝对压力）

⑶工艺流程

该化学气相渗透系统由多个精密子系统集成，具体组成及功能如下：炉体采用立式双层水冷夹套结构，内壁为抛光酸洗钝化的316L不锈钢，外壁为304不锈钢，配备液压自动升降上炉门和丝杆传动下炉门，内置热电偶测温、真空/压力传感器及氟橡胶密封件，并设有机械平衡阀实现过压自动泄放。

加热系统采用等静压石墨环形加热元件和2200℃高温石墨化硬质碳基整体隔热层，结合低电压大电流水冷电极供电，通过闭环PID控温确保炉膛温度均匀性（±5℃），且隔热层可有效阻隔沉积副产物渗透。

沉积室由细颗粒石墨坩埚（低膨胀系数）、模压三高石墨导气组件及可旋转料台（1~2r/min调速）构成，相对密封设计减少气体对加热元件的侵蚀。

电气控制以PLC为核心，支持二区钨铼热电偶测温、触摸屏人机交互（动画模拟工况）、工艺曲线存储及手动干预，安全互锁涵盖气体泄漏、水冷故障及真空异常。

⑷主要污染物排放及治理措施

本台架主要污染物为工艺尾气（有机废气）甲基三氯硅烷，尾气经双层水冷夹套冷凝收集副产物，再经多级滤芯过滤和两级耐酸碱塑料喷淋。

3.2.8.3.5 压力浸渍系统

本系统处理能力为一根米级插件/炉，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为聚碳硅烷。

⑴系统组成

通过高压环境（1~20MPa）将液态浸渍剂（如聚碳硅烷、聚甲基硅烷）强制渗透至碳化硅纤维预制体的微观孔隙中，结合梯度加压（分阶段升压避免结构损伤）与真空辅助（预抽真空至10^{-2}Pa级排除气体）技术。

⑵主要参数

表3-36 压力浸渍系统主要参数

分项	参数
工作区尺寸	φ500mm×1500mm
最高温度	200℃
工作温度	150℃
设计压力	9.8MPa

分项	参数
允许工作压力	8MPa
温度均匀性	≤±10℃
极限真空度	≤50Pa（空炉、清洁、冷态下）
抽极限真空度的时间	≤40min（空载，冷态、抽至极限真空）
工作气氛	氩气/氮气（纯度≥99.999%）
额定充气压力	最高压力8.5MPa（相对压力)

⑶工艺流程

压力浸渍系统采用上炉盖液压升降装料结构，核心由浸渍罐、预热罐及精密控制系统构成。浸渍罐作为核心压力容器，严格遵循GB150《钢制压力容器》标准设计，采用316L不锈钢材质，内壁经抛光酸洗钝化处理，配备液压驱动旋转炉门（氟橡胶密封圈+水冷隔热结构）及双液压卡箍，集成三级安全联锁：非零压状态下机械插销锁定炉门，仅当压力归零时允许开启，杜绝误操作风险；罐体配置抽真空接口、自动放气阀及冗余压力传感器，配合三级泄压机制（一级自动放气阀、二级低压安全阀、三级高压安全阀）确保超压安全。

预热罐采用双层导热油夹套（油温可控±1℃），内置10~30r/min可调防溅搅拌装置，通过保温不锈钢管路（全程硅酸铝隔热+不锈钢铠甲）与浸渍罐实现聚碳硅烷浸渍液的压差法输回，罐门液压启闭并配备E型热电偶实时监控预热温度（±2℃）。

加热系统采用模温机循环导热油（氮封膨胀槽防止氧化），独立调控浸渍罐（最高250℃）与预热罐（40~150℃）温度，外覆陶瓷纤维隔热棉降低热损，集成快速水冷模块实现30℃/min降温速率。

电气控制以PLC为核心，威图电柜搭载施耐德元件，支持三区PID控温（E型热电偶+九点炉温均匀性检测）、20段可编程升温曲线（精度±1℃），触摸屏实时显示压力—温度动态曲线、阀门状态及故障代码（含解决指引），实现一键启动、自动检漏及工艺数据存储。液压气动系统驱动炉门升降与卡箍锁紧，水路采用316L不锈钢硬管与耐压300℃软管组合，应急接口可快速接入外部水源。

⑷主要污染物排放及治理措施

本台架主要污染物为工艺尾气（聚碳硅烷）、聚碳硅烷残液，有机尾气经三级过滤器（吸附挥发物）排放。

3.2.8.3.6 真空裂解系统

核心功能是在高温、真空或低压环境下，通过热化学分解反应将有机前驱体（聚碳硅烷、聚甲基硅烷）转化为碳化硅，同时精准控制裂解过程的物理化学条件以实现材料结构的致密化与性能优化。本系统处理能力为一根米级插件/炉，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为聚碳硅烷。

⑴系统组成

真空裂解系统，核心功能是在高温、真空或低压环境下，通过热化学分解反应将有机前驱体（聚碳硅烷、聚甲基硅烷）转化为碳化硅，同时精准控制裂解过程的物理化学条件以实现材料结构的致密化与性能优化。

⑵主要参数

表3-37 真空裂解系统主要参数

分项	参数
工作区尺寸	Φ500mm×H1500mm
最大承载重量	500kg
装出料方式	立式下出料
工作温度	1500℃
温度均匀性	≤±10℃
测温方式	钨铼热电偶测温
极限真空度	≤50Pa（空炉、清洁、冷态下）
压升率	≤5Pa/h（空炉、清洁、冷态下）
工作气氛	氮气或氩气
额定充气压力	最高压力0.04MPa（相对压力)
循环冷却水压力	0.15~0.3MPa

⑶工艺流程

该真空裂解系统以立式双层水冷炉体为核心，集成多模块协同运行。炉体采用SUS304不锈钢内壁（外壁为优质碳钢）及双层水冷夹套设计，配备下进出料机构和“O”形真空专用氟橡胶，结合机械平衡阀与自动放气阀实现炉内压力动态平衡（控制范围0.1～1000Pa）。加热系统采用等静压石墨环形加热元件，搭配高温石墨毡隔热层（1600℃下热损失≤5%），配合马弗筒隔离裂解室与加热区，防止焦油副产物污染热场。进出料系统通过伺服电机驱动四丝杠同步升降，配备弹簧缓冲机构与电动料车平移导轨

（V型轨道，定位误差≤0.2mm），下炉盖采用气缸锁紧防止高温漏气。电气控制以西门子S7-1500PLC为核心，支持钨铼热电偶，测温范围0~2300℃，PID控温（±1℃精度）、可编程曲线（升温速率0.1~100℃/min），触摸屏实时显示三维热场分布及故障诊断代码（含解决指引），集成超温（＞1600℃报警）、超压（＞1.1MPa泄放）、真空异常（＜0.5Pa联锁停机）三级防护。

⑷主要污染物排放及治理措施

本台架主要污染物为裂解尾气（如甲烷、氯化氢）。治理措施：集成冷凝收集模块对裂解气体副产物（如甲烷、氯化氢）进行分离与回收，减少环境污染。

3.2.8.3.7 平面磨削系统

用于对碳化硅复合材料表面进行磨削加工，去除表面残留物，降低表面粗糙度和厚度差异。本系统处理能力为一根米级插件/炉，每天工作 8 小时，年工作 200 天，主要原辅材料为 SiCf/SiC 流道插件。

⑴系统组成

主要由炉体、加热保温系统、沉积室系统、真空系统、尾气处理系统、工艺气路系统、气动系统、水冷系统、下出料系统和电气控制系统等组成，

⑵主要参数

表3-38 平面磨削系统主要参数

分项	参数
尺寸规格	最大研磨长度＞600mm 最大研磨宽度＞400mm
工件容许质量	>200kg
工作台移动量	≥650×450mm
工作台进给	0.3到2.5m/min
砂轮头上下进给	手轮一圈进给量0.01mm、0.1mm、1.0mm；每刻度进给0.0001、0.001、0.01mm，上下自动进给：0.0001到0.03mm
主轴转速	≥1000-3600rpm

⑶工艺流程

平面磨削系统的设计旨在实现高精度、高效率的磨削加工，确保工件表面的平整度、光洁度以及尺寸精度。平面磨削系统的核心结构包括床身、工作台、砂轮架、主

轴系统、进给机构以及冷却润滑系统。首先，床身是整个系统的基础，必须具备良好的刚性和稳定性，通常采用铸铁或钢材制造，经过精密加工和热处理。床身的设计需要能够承受磨削过程中的巨大力，同时保证工件在磨削过程中不发生变形。工作台的设计要能够确保工件在磨削过程中稳定固定，并进行精确的移动。根据碳化硅流道插件米级制备需求，工作台的最大研磨长度应不小于 600mm，最大研磨宽度不小于 400mm。

在主轴系统方面，主轴的设计至关重要。主轴必须具备低振动、低跳动的特性，保证砂轮在高速旋转过程中稳定运行。根据参数要求，主轴的转速应在 1000 到 3600rpm 之间，适应不同工件的磨削需求。砂轮尺寸应不小于 φ205mm×19mm×φ50.8mm，以确保能够进行高效的磨削作业。砂轮架需要支撑并驱动砂轮进行高效磨削。

进给系统在平面磨削过程中起着至关重要的作用，决定了磨削精度和效率。工作台的移动量设计要求工作台的左右进给和前后进给的范围分别不小于 650mm 和 450mm，且工作台与砂轮之间的距离应为 47.5 到 397.5mm，确保工件在磨削时能够满足不同深度的加工需求。为了保证高精度的磨削效果，工作台的进给速度设计为 0.3 到 2.5m/min，确保可以在不同磨削方式下保持平稳的进给。

⑷主要污染物排放及治理措施

本台架主要污染物为磨削过程中产生的粉尘，需要配备除尘设备收集磨削过程中产生的粉末。

3.2.8.3.8 构件自动转运系统

构件自动转运系统通过集成柔性路径搬运 AGV 与自动化机械臂与夹具，实现全流程智能物流转运。无污染物排放，不进行论述。

3.2.8.3.9 主要生产设备

液态包层功能材料批量化制备平台主要生产设备见下表。

表3-39 液态包层功能材料批量化制备平台

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途	备注
1	化学气相渗透炉		①最高温度　　1500℃ ②常用工作温度 900℃～1300℃ ③温度均匀性　≤±10℃（空炉、真空状态下，升温至1000℃保温1h后进行9点温度均匀性测试） ④原料：三氯甲基硅烷，氢气	2	制备碳化硅基体	
2	界面沉积炉		①最高温度　　1200℃ ②常用工作温度 900℃～1100℃ ③温度均匀性　≤±14℃（空炉、真空状态下， ④加热功率　　约250kW（以实际设计为准） ⑤出料方式　　立式、下进出料 ⑥工作气氛：　氩气、甲烷	1	制备界面相	
3	压力浸渍炉		①最高温度：　200℃ ②工作温度：150℃ ③设计压力：　9.8MPa ③允许工作压力：8MPa ④加热总功率：150kW (以实际设计为准) ⑤工作气氛：　氩气/氮气、聚碳硅烷	1	制备碳化硅基体	
4	高温裂解炉		①工作温度：　1500℃ ②极限真空度　≤50Pa（空炉、清洁、冷态下） ③总功率：约250kW(以实际设计为准) ④加热功率：约200kW(以实际设计为准) ⑤工作气氛：　氮气或氩气、聚碳硅烷	1	制备碳化硅基体	

3.2.8.4 关键材料分析测试平台

关键材料分析测试平台是产氚包层关键技术研发和综合验证系统中对包层材料进行微观组织分析、力学性能测试和材料可焊性评估的关键测试平台。

工作制度：关键材料分析测试平台（X 射线衍射仪、X 射线管电子能谱仪、正电子湮灭）各设备每年操作 200 天，每天操作 2 次，主要工序操作时间：8 小时，每天总操作时间 10 小时。

该测试平台包含材料分析表征平台、高温力学性能测试平台和小型可焊性测试平台，具体见下图。

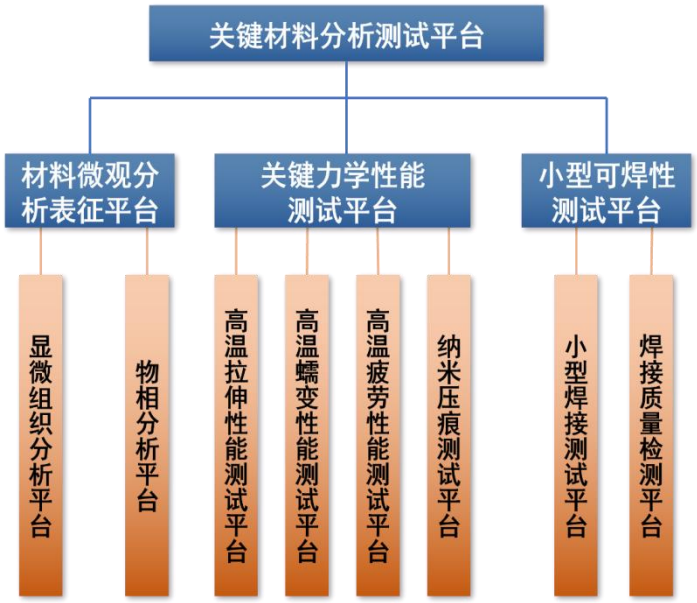


图3-27 关键材料分析测试平台组成图

①材料微观分析表征平台

a.显微镜测试

b.X射线衍射仪，X射线光电子能谱仪

②关键力学性能测试

③小型可焊性测试平台：氩弧焊、激光焊、搅拌摩擦焊

关键材料分析测试平台主要为物料检测过程，X射线衍射仪为核技术利用设备，但应该属于豁免设备，本章节不进行论述。

关键材料分析测试平台主要设备见下表。

表 3-40 关键材料分析测试平台主要设备

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
1	电子探针显微分析仪		①电子枪：肖特基场发射枪。 ②二次电子像分辨率：≤2.5nm (30kV, 1x10-11 A, 工作距离11mm)。 ③束斑尺寸：≤20nm (10kV, 1x10-8 A, 工作距离11mm)。 ④束斑尺寸：≤50nm (10kV, 1x10-7 A, 工作距离11mm)。 ⑤空间分辨率：优于0.1μm。 ⑥背散射电子像：背散射图像质量和分析速度：快扫描模式下可得到清晰的背散射图像。 ⑦加速电压：1～ 30kV（步长：0.1kV），束流范围：10-12～3×10-6 A。 ⑧束流稳定度：≤±0.3%/h；≤±1.0%/12h（10 kV, 50 nA）。	1	评估材料微观组织的均匀性和组织演化	

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
			⑨物镜光阑：四级可变光阑。			
2	X射线衍射仪		①X射线发生器：功率≥9kW。 ②靶材：Cu，旋转阳极靶。 ③额定电流≥200mA；额定电压≥45kV；电流电压稳定度：±0.01%（外电压波动10%)时。 ④最小焦斑尺寸：0.4*8mm，线焦斑。 ⑤X射线防护：安全连锁机构、剂量符合国标；防护罩外任何一点的计量小于1Sv/h。	1	物相定性、定量分析	
3	X射线光电子能谱仪		①多腔体结构设计，至少包括三个真空腔体，即：分析室、进样室和样品制备室； ②分析室 ③真空腔体为厚度不小于5mm纯μ金属制造， 极限真空≤5.0×10-10 mbar； ④配置机械泵，涡轮分子泵及钛升华泵各一套。 ⑤进样室 ⑥极限真空≤7.0×10-9 mbar；	1	元素定量和价态分析	
4	扫描电子显微镜		①加速电压0.02-30 Kv； ②探针束流3 pA-40 nA； ③分辨率0.5 nm @15 kV, 1 nm @1 kV/500 V TD, 1.5 nm @200 V, 0.6 nm @30 kV (STEM)； ④分析分辨率2.0 nm @ 15 kV, 5 nA, WD = 8.5 mm； Inlens BSE分辨率1.2 nm @1 kV；	1	形貌分析	
5	聚焦离子束显微镜		①电子束分辨率 At optimum WD: 0.6 nm @ 15 kV, 0.7 nm @ 1 kV, 1.0 nm @ 500 V(ICD); ②At coincident point: 0.6 nm @ 15 kV, 1.2 nm @ 1 kV; 离子束分辨率2.5 nm @ 30 kV, 323.7 nm @ 500 V； ③TOF-SIMS分辨率 质量分辨M/ΔM FWHM > 700；检测质量范围（Th）：1-500；横向空间分辨率：50 nm；深度分辨率：10 nm；检测限：ppm；	1	微纳加工	
6	透射电子显微镜		①无球差校正器0.2–0.3 eV 100 pm 136 pm； ②聚光镜球差校正器0.2–0.3 eV 100 pm 50 pm； ③X-FEG/Mono双球差校正器0.2–0.3 eV60 pm 50 pm（束流≥30 pA） 125 pm @ 30kV； ④X-FEG/UltiMono双球差校正器0.025 eV 60 pm 50 pm（束流≥30 pA） 125 pm @ 30kV； ⑤X-CFEG双球差校正器0.3 eV 70 pm 50 pm（束流≥100 pA） 136 pm @ 30kV。	1	组织成分分析	
7	正电子湮灭寿命谱仪		①时间分辨率≤230 ps（使用Na-22 放射源测量正电子湮没寿命谱）； ②计数率≥2000 cps（使用30μCi Na-22放射源测量正电子湮没寿命谱）； ③具有一键设置功能，自动设置所有测量参数，用户无需调试直接使用； ④具有自动校准功能，在测量过程中始终保持参数的稳定；	1	缺陷分析	
8	三束		①离子枪数量：3支独立离子枪；	1	制样	

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
	离子减薄仪		②离子枪电压范围：6 kV – 10 kV； ③抛光面积：宽度通常可达 1 mm–4 mm； ④去除速率：以单晶硅（Si）为例，在最高电压下，典型速率应在 100–500 μm/h； ⑤样品台旋转与摆动：1–10 rpm可调。			

3.2.9 包层原型模块先进制造平台

本平台旨在开发包层原型模块以及扇段的关键加工和制造技术，计划通过关键制造和检测设备建设以及原型模块制造技术开发以提升我国包层部件制造技术的成熟度和规范化。为了全面发展包层原型模块的先进制造技术，将开发两条技术路线：一是增材制造技术，二是热等静压技术。在制造工艺开发的同时，建立集成制造平台以及配套的检测系统，以确保包层原型模块以及扇段的集成制造过程能够顺利进行并满足质量要求。

本平台的设计和建设内容包括：包层部件增材制造系统、包层部件热等静压制造系统和包层部件制造集成检测系统。整个平台的系统构成如下图所示3.2.9-1。

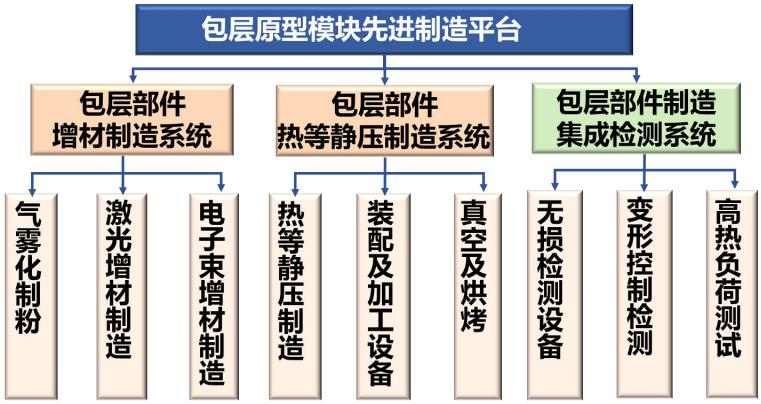


图3-28 平台系统构成图

3.2.9.1 包层原型模块先进制造平台

包层部件增材制造系统、包层部件热等静压制造系统和包层部件制造集成检测系统三部分内容。关键设备包括气雾化制粉设备、增材制造装备、热等静压设施、精密加工设备、复合焊接设备、装配测试平台和高热辐照测试设备等。

3.2.9.1.1 包层部件增材制造系统

包层作为核聚变反应堆、先进核能系统及极端环境装备中的核心功能部件，其制造技术直接关系到能源转换效率、材料服役寿命及系统安全性。包层专用增材制造系统包括气雾化制粉平台、激光增材制造平台和电子束增材制造等三部分。

⑴功能单元

增材制造技术为包层制造提供了颠覆性解决方案：通过高精度激光选区熔化（SLM）技术，可实现微米级精度的异质材料逐层熔覆，突破梯度材料界面相容性难题；基于拓扑优化的点阵结构一体化成型能力，可构建仿生多孔冷却通道，使热流密度承载能力提升2-3倍；粉末循环利用系统将材料利用率提升至95%以上。此外，增材制造支持数字仿真驱动的全流程参数优化，可动态调控热场分布，将传统工艺中因高温相变导致的残余应力降低60%—80%，显著提升包层抗辐照肿胀和疲劳性能。增材制造复杂形状和内部结构的核能部件已经有所应用，同时增材制造钨铠甲材料和RFAM钢结构材料以及钨钢连接部件已经有很多研究。基于聚变堆包层制造的激光增材制造技术，需要在低活化铁素体马氏体钢（RAFM钢）增材成型组织和性能调控、复杂流道打印、支撑施加和拆除、打印缺陷控制、打印后复杂结构的表面处理等方面进行迭代升级，推动增材制造聚变堆部件的工业化发展。建设包层专用先进增材制造平台，不仅能够突破制约聚变堆工程化应用的关键制造技术壁垒，更将推动我国在极端环境功能部件制造领域形成自主知识产权体系。该平台的建设将加速从“多级制造”向“模型驱动”的制造范式转型，为新一代聚变堆装置等国家战略需求提供核心制造能力支撑。

⑵主要设计参数

①气雾化制粉设备

本系统处理能力为100kg/h，每天工作8小时，年工作200天，主要原辅材料为不锈钢块。

雾化室设计：耐高温钢制腔体，集成快速冷却系统（水冷/气冷），生产效率需要≥100kg/h；

惰性气体环境下粉末封装，避免氧化；

金属液流直径：优化至3—5mm，配合气流速度实现稳定雾化；

气体流量比：气液质量比（GMR）设定为0.5-2.0，平衡粉末细粉率与球形度；

冷却速率：通过雾化室温度梯度控制（10^3 K/s），抑制晶粒粗化。

②先进增材制造设备

平台最大成型包层模块≥2080 mm （极向) ×937 mm（环向）×940 mm（径向）；

平台最大成型效率≥1000 cm^3/h；

平台氧含量≤100 ppm；

平台可打印材料包括但不限于：钛合金、铝合金、高温合金、钨合金、各种钢；

平台激光功率1000 W×60；

FSC少支撑打印技术，悬垂结构10°少支撑打印，倒圆锥结构15°少支撑打印；

光束整形技术，高斯光斑和环形光斑无缝切换技术实现更均匀的能量输入 更稳定的熔池，更大的熔池宽度以及扫描线间距，更高的激光功率利用率；

熔池监测技术，高分辨率逐层监测；

增材制造平台所制造的材料没有宏观缺陷与微观孔洞、裂纹，致密度达到100%，表面粗糙度不低于 Ra 6.3μm。

⑶工艺设计

包层专用增材制造系统包括气雾化制粉平台、激光增材制造平台和电子束增材制造等三部分组成。

①雾化制粉平台

真空雾化制粉设备由钢结构平台、熔炼系统、雾化系统、粉末收集系统、真空系统、水冷系统、气路系统、电气系统等部分组成。

1）钢结构平台

钢结构平台采用双层平台设计，包括操作平台、扶梯、护栏等，用以支撑送料、熔炼、雾化、收集等系统部件，电源和控制柜等安装在工作平台上。平台采用国标H型钢、槽钢、花纹板等螺栓连接而成，配以国标扶手、楼梯等，实现设备炉体快速工程安装，为产品生产提供操作空间和安全防护。平台参数为7500×6500×11000mm，双层。

2）熔炼系统

熔炼系统采用立式结构，主要包括熔炼室、中频电源、进电转轴及线圈、中间包保温系统等核心装置，可以实现合金在真空环境下化清精炼，保证合金液的纯净度和过热度。

感应熔炼系统用于熔炼金属原材料，采用IGBT中频感应加热方式，熔化升温快，生产效率高，粒度分布好，电磁搅拌均匀。

中间包保温系统采用感应加热方式，用于金属液保温和导流加热。

雾化系统设计包括上锥体、插板阀、圆柱直筒段和下部锥段等装置。自主设计快速气冷系统和雾化塔室，减少共生卫星球粉末。雾化室炉体包括上锥体、圆柱直筒段和下部锥段。直筒段顶部采用平板设计，平板中间开孔用于安装雾化喷嘴系统；下部圆锥段连接粉末收集系统，可灵活拆卸进行清炉作业。雾化室为双层水冷结构，采用优质304不锈钢；炉体内表面抛光处理，粗糙度≤Ra0.4，外表面拉丝抛光。

粉末收集系统设计方案采用雾化室侧吸方案，粉末收集系统主要包括气动粉末输送管、两级旋风分离器、下锥收粉罐、主副收粉罐、除尘过滤器、风机等。

气动粉末输送管：气动粉末输送管连接雾化室直筒段下侧和旋风分离器，用于输送管路中的粉末。材质为优质304不锈钢，内表面抛光处理，外表面拉丝抛光。

旋风分离器：旋风分离器用于分离金属粉末和惰性气体，实现粗细粉高效收集，采用二级旋风分离设计。材质为优质304不锈钢，内表面抛光处理，外表面拉丝抛光。

收粉罐：收粉罐用于收集雾化粉末，与下锥、旋风分离器采用双阀串联连接，可确保粉末产品处于惰性气体保护氛围，便于手动移动或行车吊装。一备一用，粉末冷却时间小于20分钟，材质为优质304不锈钢，内表面抛光处理，外表面拉丝抛光。

风机：在旋风分离器后端配置有一台高压特种风机，配备变频电机，风量可调节，能将雾化制粉过程中的大流量气体及时排出，为雾化室内提供微负压雾化环境。

3）超细轻金属粉末过滤及泵组延寿措施

超细轻金属粉末过滤及泵组延寿措施：真空管道上设计安装一组小型旋风分离装置和滤芯装置，用于沉降过滤在真空泵组启动时引入真空管道的超细轻金属粉末，以减少超细粉尘进入真空泵组，显著提高泵组寿命，杜绝活性金属粉末安全隐患。在机械泵出口处加装油雾分离器，吸除机械泵腔内的油雾，净化空气，保护工人身体健康。

4）水冷系统

水冷系统设计主要对熔炼室、雾化室、真空泵、熔炼电源和熔炼线圈等进行连续冷却，保障设备运行安全。

5）筛分系统

筛分系统设计方案用于钢类合金粉末的筛分分级、粉末均匀化处理、成品包装；整套系统能够按照现有的技术连续运行，生产过程能满足安全、环保、节能的要求。设备布局合理，易于操作和便于维护。系统包含机械筛分机、气流筛、混料机、灌装机。

粉末通过气流分级设备＞53μm粉末进入到一级集粉罐，15-53μm粉末进入二级集粉罐，15μm以下粉末进入三级集粉罐；

二级集粉罐出料口连接机械振动筛，使用200目筛网对成品粉再次筛分防止15-53μm，防止成品粉中有大颗粒粉末，以保证最终用粉的粒度稳定；

混料机主要用于不同炉次内的出炉粉末或不同批次粉末的合批处理，经过均匀混合的粉末在筛分过程中，各部分的粒度分布和成分更加一致，有助于提高筛分的准确性和效率，避免因物料混合不均导致的筛分结果偏差；

半自动灌装机主要用于成品粉末的包装密封，可确保每个包装内的粉末量准确一致，符合产品质量标准，减少因灌装量差异导致的产品质量问题。

⑷主要污染物排放及治理措施

根据工程初步分析污染物为粉尘、熔炼废气。

主要治理措施为：除尘过滤器：在高压特种风机的后端配置有防静电滤芯式除尘器，进一步过滤惰性气体。真空系统设计主要对熔炼室、雾化室、粉末收集系统进行抽真空，达到合金熔炼雾化对设备真空度的要求，包括真空泵组、管道、旋风分离器、过滤器、气体阀门、真空管规等装置。

真空泵组采用两级泵设计，前级泵为滑阀泵、二级泵为罗茨泵，和其他辅件等，可连续抽空熔炼室和雾化室，形成一个稳定的真空状态，极限真空达到6.67×10^{-1}Pa，工作真空为1^{-10}Pa。

3.2.9.1.2 激光增材制造设备

⑴功能单元

激光增材制造设备通过高精度多材料成型、极端环境适配性验证及数字化智能调控三大核心能力，为聚变堆包层从实验室研发到工程化应用提供了全链条技术支撑，能够验证大尺寸低活化钢材料的包层部件的净成型、一次成型，为包层的增材制造成型技术提供支撑。针对包层结构特点，开发聚变堆包层专用激光增材制造软件，可以确保完成大型复杂构件的包层一次净成型，提升大型包层组件成型效率。本项目所选增材制造最大尺寸为800×800×800 mm，每天工作24小时，年工作100天，主要原辅材料为不锈钢粉。

⑵工艺流程

增材制造复杂形状和内部结构的核能部件已经有所应用SLM成形主机设备主要由光学系统、惰性气体循环净化系统、冷却水循环系统、气路控制系统、电控系统、工控机及控制软件、机械硬件、粉路循环系统等部件组成；粉路循环系统由吸料机及管路、筛分机、转运罐等组成。

工件打印完成之后，成形缸由成形工位转运到清粉工位进行清粉工作。清粉时多余的粉末有三种回收方式：

固定清粉缸粉末回收：成形缸内的粉末直接落入固定清粉缸内，通过粉末回收装置回吸至溢粉车内，之后进行粉末筛分处理；

清粉溢粉车粉末回收：手动将粉末清扫至清粉系统的前后溢粉车内，之后移出设备进行粉末筛分处理；

清粉腔粉末回收：通过粉末回收装置可直接将清粉过程中清粉腔内的粉末吸走至溢粉车内，之后进行粉末筛分处理。粉路循环系统配备粉末输送模块及筛分模块，用于实时向设备输送、回收、筛分及烘干粉末；

工作位、清粉位以及粉末回收装置的溢粉车转移到粉末筛分装置处，粉末筛分装置将溢粉车内的粉末筛分后落到新粉车内，之后新粉车可以转移到设备用于建造。粉末的筛分和转移均在惰性气体保护下进行；具备一键泵粉功能，配有大容量落粉罐、泵粉器（转运罐）及高效筛分系统，为大型SLM设备装粉、换粉及清粉过程人机隔离，避免出现换粉过程存在的漏粉、换粉周期长和步骤烦琐等问题，提升大型SLM设备生产换粉效率及粉末作业安全规范；吸粉机吸粉管路与回气管路与清粉取件舱相连，粉末及惰性气体被吸粉机吸出清粉取件舱，经过吸粉机滤芯将粉末及气体分离，粉末收

集到转运罐中，惰性气体回填到清粉取件舱内。吸粉机最高吸料效率：8L/min。筛分机用于筛分粉末，处于惰性气体保护下进行筛分，筛网规格：200目，筛分效率：2L/min；筛分机工作时氧含量低于5%；转运罐容积200L，可实现与吸粉机、筛分机、设备主机溢粉口连接收集粉末物料，储存的粉末转运泵送至设备主机顶部储粉罐、筛分机顶部储粉罐中。粉末泵送效率：10L/min。

⑶污染物产生量

污染物有工艺尾气、粉尘冷却循环水排水。

3.2.9.1.3 电子束增材制造设备

⑴单元设计

聚变堆包层中以钨、钼为主的难熔材料难以通过激光增材制造或热等静压烧结制备，而电子束增材制造（EBAM）技术凭借其高能束流、真空环境控制及多材料兼容性，为难熔材料的增材制造成型提供了验证手段，为包层设计与工程化验证提供了关键技术支撑。

电子束选区熔化增材制造设备主要包括真空系统、成型系统、供粉及铺粉系统、电子枪系统、气氛保护系统、冷却系统、控制系统、实时监控系统、设备安全系统、附属设备等。

⑴真空系统

真空系统配备机械泵&分子泵两级真空系统，真空室与电子枪分别搭载独立的分子泵和不同的真空度控制，常温下真空就位时间≤50min；

真空腔室舱门厚度35mm，铅玻璃观察窗，可有效防止电子束辐射对人体危害；

打印工作真空度：3×10^{-1}Pa。

⑵成型系统

成型缸内腔尺寸：650mm×650mm；

最大有效成形尺寸：600mm×600mm×700mm；

Z轴导向机构：直线导轨+滚珠丝杠+伺服电机+光栅尺，定位精度≤0.05mm，重复定位精度≤0.03mm；

根据材料和底板的不同，最高预热温度超过1100℃；

打印过程中逐层预热，控制粉末同步升温，使温度场更加均匀；保温防护系统由真空室内的防护钣金及隔热罩组成，作用是减少成形区域的热量散失，减少打印过程中温度波动，隔热罩属于耗材，每炉打印结束要进行打磨或者更换，以减少金属蒸镀对加工环境的污染。

⑶供粉及铺粉系统

S600设备采用上送粉方式，双侧内置粉箱+外部粉箱+泵粉系统，外部粉箱实现实时加粉，满足全尺寸高度零件打印，刮刀通过双侧取粉后的往复运动达到铺粉目的，适用球形金属粉末材料及水雾化的非球形金属粉末材料；

⑷电子枪系统

电子枪系统包括电子枪、扫描控制、真空、冷却、高压电源等；采用清研智束自主研发的直热式电子枪，阴极形式为单晶灯丝。

灯丝寿命≥600h；

利用线圈磁场控制，实现电子束选区熔化，线圈组件包含像散线圈、聚焦线圈和偏转线圈，并实时监控线圈温度；

拥有相对于真空室更高的真空度，工作时真空度：＜2.5×10^{-4}Pa；电子枪扫描分束数量≥100；

扫描精度：±0.2mm；

高压波动性＜0.2%，束流波动＜0.5%；

栅极电压调节范围0~2000V，偏压波动≤±5%；

电子束标定方式为自动，单枪标定总时间≤60min，四枪≤240min；灯丝快速更换设计，更换时间≤5min。

⑸气氛保护系统

纯度为99.999%以上高纯惰性气体，惰性气体瓶中的气体需要经过减压阀后进入设备，减压后压力：0.08MPa±10%；

配置气氛保护系统，由PLC控制，并与打印主机可实现实时通讯；

成型时惰性气体流量：14L/h，冷却时，为加快速度，用户可自行选择加大惰性气体流量；

具有惰性气体实时流量检测与压力反馈闭环系统，实现成型室压力稳定在设定范围内；

采用真空计对室内压力波动进行实时检测，超过设定压力值上限即会发出警报。

⑹冷却系统

采用水冷&风冷的方式保证设备运行时的温度保持，冷却源是由一台功率5.48kW的工业水冷机提供，选用特优或同等档次品牌；

分子泵、真空室、电子枪的冷却方式是水冷，机柜内部其他区域是由两台水冷空调所产生的风冷负责；

成型完毕后，Z轴运行至冷却位置，通过真空室底部的水冷装置进行主动冷却，提升高温区域的冷却效率；

冷却过程节能环保，不产生任何工业废水、废气；制冷功率：≥4.6kW；

冷却水温度：20℃±10%；最大水流量：75L/min；适用冷却介质：去离子水。

⑺污染物产生量

污染物有工艺尾气、粉尘冷却循环水排水。

3.2.9.1.4 主要生产设备

包层部件增材制造系统主要设备见下表。

表3-41 包层部件增材制造系统主要设备表

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
1	雾化制粉设备		①粉末成分均匀性（偏差≤0.5%） ②熔炼室：6.67×10^{-1}Pa ③达到工作真空度抽气时间：15-20min	1	制备高纯度球形粉末	
2	选择性激光熔化成型设备		①最大尺寸：800mm×800mm×800mm ②光束质量：每个激光器中心区域焦平面光斑实测数据允许偏差在80μm±4μm范围以内。测量每个激光器中心区域焦平面上下5mm位置离焦光斑尺寸，两者实测值偏差不超过10μm ③工作模式：具备双激光打印模式	1	制备固态包层	
3	电子束熔融成型设备		①实时监测熔池形貌（深度≥1 mm）及缺陷（孔隙率<0.1%） ②动态调整束流功率（波动≤±1%）与扫描路径 ③电子束能量分布（束斑直径≤50 μm） ④打印工作真空度：3×10^{-1}Pa ⑤最大有效成形尺寸：600mm×600mm×700mm	1	制备固态包层	

3.2.9.2 包层热等静压制造系统

⑴单元功能

热等静压扩散焊接可以避免材料的宏观变形，对母材的影响小，焊接界面不会产生明显的热影响区，并保持较高的尺寸精度，特别适用于复杂结构，在液态包层扇段制造方面极具潜力。目前该技术已成功应用于固态包层的整体制造，成功制备出水冷固态包层U型第一壁部件， 实现了钨/钢HIP连接的工艺优化。并利用HIP焊接成功解决了冷却板、盖板等单元件的加工制造难题，具有丰富的工程基础和技术支撑保障。开发应用于大尺寸液态包层扇段的热等静压技术制造技术，需要依托热等静压集成加工制造平台建设，包含相应的材料加工、弯曲成型等设备，大型热等静压炉，激光焊接及电子束焊接设备，各组件的集成装配平台，以及配套的支撑移动平台。

包层部件热等静压制造系统（热等静压炉、激光焊接设备等）年操作约200天，加热炉处理规模为5吨/炉，主要工序为抽真空与脱气、升温升压、保温保压、降温降压等，每天操作总时间24小时。

⑵主要设计参数

基于以上考虑，对热等静压主机设备的主要技术参数进行汇总：

最高工作压力 150MPa

最高工作温度 1250℃

有效热区直径 1500mm

有效热区高度 2500mm

热区温度均匀性（保温稳定状态）≤5℃

温度控制精度 ≤±1℃

压力测量精度 ≤±1MPa

⑶工艺设计

基于包层扇段功能区域划分，兼顾结构对称性与焊接可操作性，将近9 m高度部件分为垂直方向4个叠层模块（单个高度约2.2 m，长宽接近1 m）。分缝位置避开高应力集中区与复杂内嵌流道交叉点，采用阶梯式或曲面分型面降低焊接装配误差。单模块制造工艺中，利用HIP焊接技术实现大尺寸、复杂结构包层扇段的一体化制造。实现钨、

RAFM钢以及流道的材料连接及成型。对单个模块进行观测孔隙率，缺陷尺寸检测、力学性能测试及尺寸检测等，来保障单个模块制造的可靠性。

在模块焊接装配流程中，首先可考虑在各模块接口处预留焊接坡口（V型或U型，角度60°-80°，间隙0.1—0.3mm），并设计自定位销孔+激光刻线基准，确保装配精度模块焊接边缘采用电子束清洗（真空条件下）去除氧化层与污染物，确保表面Ra≤0.8 μm。采用对称分段焊接法，从模块中心向两侧交替施焊，每段焊缝长度≤500 mm，间隔冷却时间≥5min，保障焊接的均匀性及可靠性。

根据液态包层扇段的制造技术路线和技术需求，初步制定了液态包层热等静压制造系统的平台构成设计，主要包括一个大型热等静压制造设施，用于开展液态包层扇段组件的整体成型制造，一个装配及加工设备平台，用于包层扇段的装配焊接和测试，最后就是真空及烘烤系统，用于焊后热处理和性能恢复。

3.2.9.2.1 热等静压制造

⑴功能单元

热等静压扩散焊接可以避免材料的宏观变形，对母材的影响小，焊接界面不会产生明显的热影响区，并保持较高的尺寸精度，特别适用于复杂结构，在包层扇段制造方面极具潜力。目前该技术已成功应用于包层的整体制造，成功制备出水冷包层 U 型第一壁部件，实现了钨/钢 HIP 连接的工艺优化。并利用 HIP 焊接成功解决了冷却板、盖板等单元件的加工制造难题，具有丰富的工程基础和技术支撑保障。开发应用于大尺寸包层扇段的热等静压技术制造技术，需要依托热等静压集成加工制造平台建设，包含相应的材料加工、弯曲成型等设备，大型热等静压炉，激光焊接及电子束焊接设备，各组件的集成装配平台，以及配套的支撑移动平台。

热等静压机的设备主体（超高压容器部分）安装于地坑，各系统围绕超高压容器进行布置。加热隔热及测温模块置于主机筒体内，具备加热隔热与测温功能。产品放置在加热系统内，依靠电阻加热实现设备升温，采用内保温结构和控温热电偶将炉内温度维持在设定温度。

气路模块分成两个部分。第一部分为加压、真空系统，由四台压缩机与气体分配阀架、超高压高压管路、超高压高压阀门、超高压高压接头及真空机组等组成，布置

在主机模块的侧面，主要用于完成设备气体加压、抽真空及气体回收等功能。第二部分为气库系统，气库系统主要用于气体的制备和贮存，布置于厂房外，低温储罐内的低温气体经低温泵、汽化器汽化后先储存于高压容器（高压储罐或气瓶组等）内。工作时，通过加压系统进入超高压容器中，按工艺要求达到指定压力。

冷却系统布置在设备侧面，靠近气路系统位置。冷却系统分为内循环与外循环系统，户内放置内循环系统，并与外循环连接。

电气系统由控制系统与监控系统组成，采用分散布局，集中控制的方式。炉前电气操作系统安装于地面，远程控制系统在专用的控制间进行，可对设备运行参数及工艺控制参数检测。

通过上述各个系统的安全联锁功能，从而实现热等静压高温高压的压制功能，详细描述将在后续相关系统中展开。本平台定位于大尺寸、高精度、多材料复合部件的热等静压扩散焊接制造与一体化成型，核心功能覆盖从异种材料连接到成品检测的全流程。平台架构分三大子系统：

⑵设计参数

热等静压主机设备的主要技术参数见下表：

表3-42 热等静压设备主要技术参数

序号	名称	规格	单位
1	最高工作压力	150	MPa
2	最高工作温度	1250	℃
3	有效热区直径	1500	mm
4	有效热区高度	2500	mm
5	热区温度均匀性（保温稳定状态）	≤5	℃
6	温度控制精度	≤±1	℃
7	压力测量精度	≤±1	MPa

⑶气体加压和回收系统

气体回收功能有助于减少有害气体的排放，同时回收的气体经过适当处理后，可以再次用于热等静压工艺，从而实现气体的循环利用，节约资源。气体洁净回收系统分为两个阶段进行，每个阶段都采用特定的技术和设备来确保气体的有效回收。高压段回收：在高压段，气体回收通过压力平衡的方式进行。这意味着超高压容器中的气

体可以直接向气库放气，通过精确控制气体流量，实现高压气体的回收。低压段回收：在低压段，系统启动压缩机来完成气体的回收工作。这一阶段确保了气体回收的连续性和完整性。

气体回收率不低于 90%。当炉内压力小于 7MPa，此时回收率已经大于 90%，为了节约时间，采用直接放气的操作。

3.2.9.2.2装配及加工设备

本台架无工艺流程，无污染物排放。

3.2.9.2.3 真空及烘烤

⑴功能单元

为了满足包层制造过程中对关键部件的高标准保存需求，亟须设计开发一套高度集成化的多功能真空保存与烘烤系统。该系统旨在为大尺寸包层部件构建长时间、低污染的干燥保存环境，确保部件从制造到使用的全过程质量稳定性。

该集成系统主要由三大核心子系统构成：高密封性真空室、高抽速真空系统以及智能温控烘烤系统。其中，真空室采用316L不锈钢双层腔体结构设计，配备氮气吹扫接口和观察视窗，既能满足整体部件的安全置放需求，又能为其他系统提供标准化安装接口和结构支撑。为确保环境纯净度，系统配置了由罗茨泵和分子泵组成的两级真空抽气系统，通过CF法兰与真空室实现无泄漏连接，可使真空室达到10^{-3}Pa的工作真空度，有效防止部件氧化与化学污染，降低表面杂质吸附量。

烘烤系统初步考虑直接采用水冷烘烤方式对真空室材料和内部部件进行烘烤，烘烤温度为150℃。该系统既能高效去除部件表面吸附的杂质气体，又可消除残余应力，使部件长期保持干燥清洁状态。可显著抑制存放过程中的表面锈蚀问题，避免存放过程中的气孔和裂纹生成，保障部件致密度和机械强度。

本台架无工艺流程，无污染物排放。

3.2.9.2.4 主要生产设备

包层部件热等静压制造系统主要设备见下表

表3-43 包层部件热等静压制造系统主要设备

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
1	热等静压设备		①最大热区有效尺寸：200mm（直径）×300mm（高度），200mm（直径）×400mm（高度）； ②最高工作温度：2000℃；(C/C发热体) ③常用工作温度：≤1850℃；（C/C发热体） ④最大工作压力：200MPa； ⑤常用工作压力：≤185MPa； ⑥工作台最大承重：50kg；	1	液态包层界面连接	
2	激光焊接设备		①激光功率密度：≥1×10⁶ W/cm² ②激光功率：15-20 kW ③激光焊接舱室：4m×4m×12m ④工作气氛：Ar≥99.9% ⑤缝尺寸精度（熔深±0.1 mm），热影响区宽度≤1.2 mm	1	包层部件RAFM钢连接	
3	TIG焊设备		①工程稳定性：连续焊接8米以上无断弧或功率波动（±2%），焊接速度达2米/分钟以上 ②输入电压：AC380V、50Hz ③成形一致性：焊缝余高波动≤0.15 mm，表面无氧化色	1	包层部件RAFM钢连接	

3.2.9.3 包层部件制造集成检测系统

⑴单元功能

针对包层模块的制造工艺流程，开发相应的无损检测技术和硬件设备，搭建液态包层扇段集成检测平台，来评估部件的制造质量，保障加工制造的可靠性。包层部件制造集成检测系统主要包括对各部件单元的HIP焊接制备，众多冷却管复杂管路的焊接，电子束组装焊接等焊接界面的结合情况进行无损检测评估；对增材制造制备的部件成型情况，内部孔隙情况进行无损检测；另一方面考虑到大尺寸板材的弯折变形，流道成型，以及焊接变形形变量进行量化评估；最后针对包层第一壁结构设计和服役特性，还需要开展高热负荷测试，确保包层部件设计和连接质量可靠。

包层部件制造集成检测系统（水浸超声、阵列涡流检测系统、电子枪系统等）各设备每年操作200天，每天操作1—2次，主要工序操作时间：6小时，每天总操作时间8小时。

⑵主要设计参数

针对大尺寸部件的无损检测，需兼顾检测效率、覆盖范围、精度和设备适应性。设计了以下适合大尺寸包层部件的集成制造检测技术的关键指标：

参数	指标范围	说明
检测深度	1–500mm	适用不同材料和厚度
分辨率	≤0.5mm（缺陷横向尺寸）	用于识别微小裂纹和夹杂
扫查速度	1–10m²/h	自动扫查机器人可达更高速度
探头频率	1–15MHz	低频用于厚件，高频用于薄件
覆盖率	100%扫描，无盲区	适用于复杂几何表面
缺陷类型	裂纹、气孔、未熔合	适用于多材料界面缺陷检测
尺寸检测范围	大于10m	适用于整个包层扇段的变形检测
尺寸检测精度	≤0.1mm	适用于整个包层扇段的变形检测
高热负荷测试	1MW/m^2	主要用于包层第一壁高热负荷测试

⑶工艺设计

根据工艺需求，初步设计了如下结构的包层制造集成检测平台：无损检测平台、变形检测平台以及高热负荷测试平台，如下图所示。

集成检测系统是包层扇段从合格部件迈向工程实用的核心桥梁，对大尺寸部件内部缺陷的精准识别，对大尺寸部件变形控制及检测等关键生产问题进行把关，开发相关先进检测技术，既保障了核聚变装置的安全性与可靠性，又推动了大科学工程装备制造技术的代际跃升。

在包层的制造工艺中，超声探伤技术凭借其高穿透性、对内部缺陷敏感以及操作相对便捷等优点，被广泛应用于多个环节的质量控制。在原材料的质量检测方面，原材料的内部质量直接影响最终部件的服役性能。例如，在采用粉末冶金方法制备坯料后，可以利用超声波检测其内部是否存在裂纹、气孔、夹杂等缺陷。通过发射高频超声波并接收其在材料内部传播过程中的反射、透射信号，分析信号的特征（如波形、幅度、传播时间等），可以判断缺陷的位置、大小和类型，从而筛选出不合格的原材料，避免其进入后续的精密加工环节。

⑵无损检测流程

无损检测流程见下图。

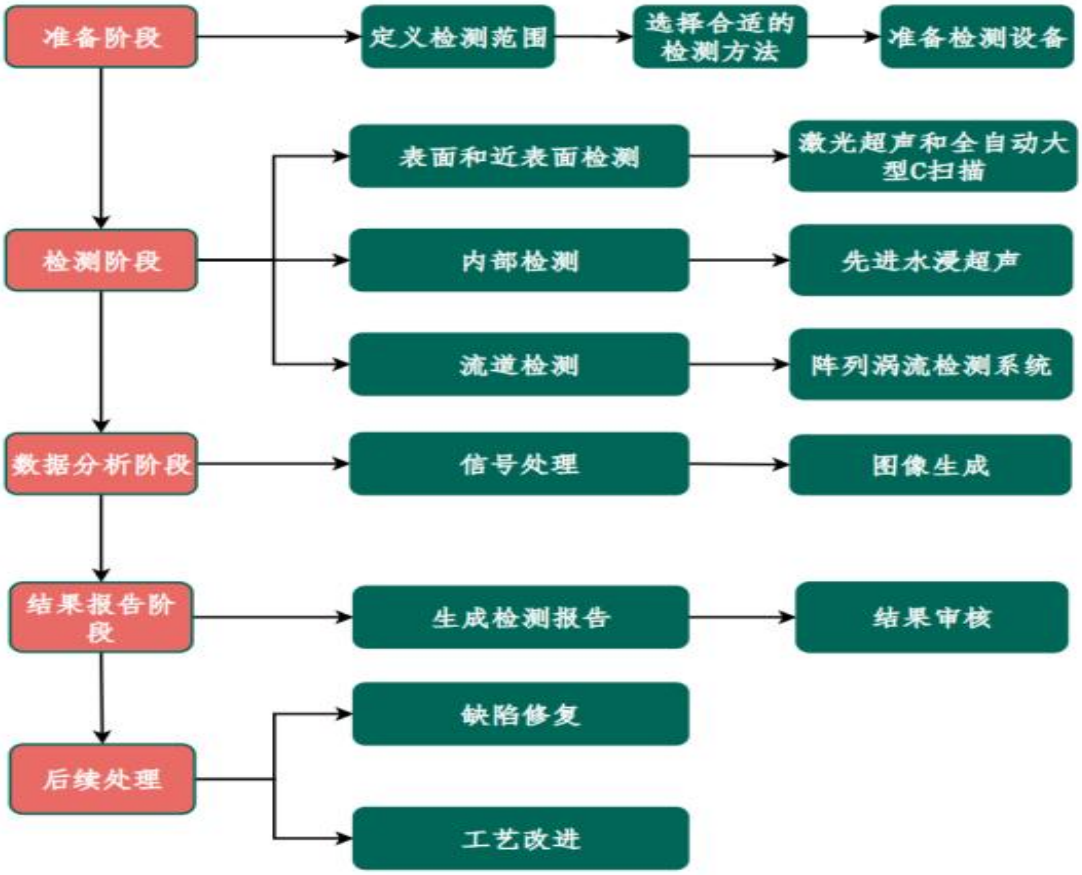


图3-29 平台系统构成图

包层部件制造集成检测系统无污染物排放。

包层部件制造集成检测系统主要生产设备见下表。

表3-44 包层部件制造集成检测系统主要生产设备

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
1	电子枪系统		①额定功率0-800kW（连续/脉冲）连续可调，纹波<1%，阴极寿命＞1000小时 ②电子束最小光斑≤30mm，电子束流长时间运行漂移＜±0.5% ③电子束二维电磁偏转角度±10°至±15° ④电子束扫描频率0-10kHz，扫描图像支持矩形、圆形等	2	作为稳定热源，搭建包层部件高热负荷测试平台	
2	红外相机		①空间分辨率：640 × 512像素 ②测温范围：0℃～3000℃ ③测温精度：±1℃ 或 1%（0℃-150℃），±2%（150℃以上时），±3%（2000℃以上时） ④光谱范围：覆盖1.5μm～5.1μm ⑤相机帧频：310Hz@640×512，1100Hz@320×256，8100Hz@136×2	1	获得包层部件高热负荷测试时钨表面的温度分布图像	
3	比色高		①测温范围：300℃～2000℃ ②测温分辨率：≤0.1℃ ③工作波长范围：覆盖900nm～1700nm	1	实时监测高热负荷实验过程中包层样品表	

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
	温计		④测温数据响应时间：≤10ms ⑤测温重复性：≤0.015%。		面温度变化情况	

3.2.10 固态包层综合性能测试平台

固态包层综合测试平台主要由氦冷却回路、氦检漏平台、真空与热环境模拟测试平台、综合性包层测试平台以及综合性球床测试平台组成。

3.2.10.1 氦冷却回路

⑴单元功能

氦冷平台主要用于冷却包层模块，与真空实验腔室连接组合运行，可以通过实验腔室上布置的加热系统模拟真实聚变堆内热负荷，研究不同包层模型件的热工水力特性。

⑵主要设计参数

①氦气最大流量2.5kg/s；

②最高温度500℃；

③运行压力8MPa。

⑶工艺设计

氦冷回路可提供8MPa、500℃的氦冷却剂。冷却系统考虑采用闭式循环水冷却系统，一方面通过氦气—水换热器将氦气中的热量传递到水侧，另一方面通过冷却水塔将水侧的热量排出到大气环境中。为降低冷却系统的负荷和整个系统的能耗，参考其他同类实验装置，高温实验部分设计为“8”字形结构，常温实验部分与高温实验部分共用部分设备呈“O”字形结构。“8”字形回路结构部分可以开展高温实验，同时为满足不同流量的实验工况要求，在氦气风机的进出口端设计一条旁通支路，可用于“8”字形回路运行过程中的流量调节。

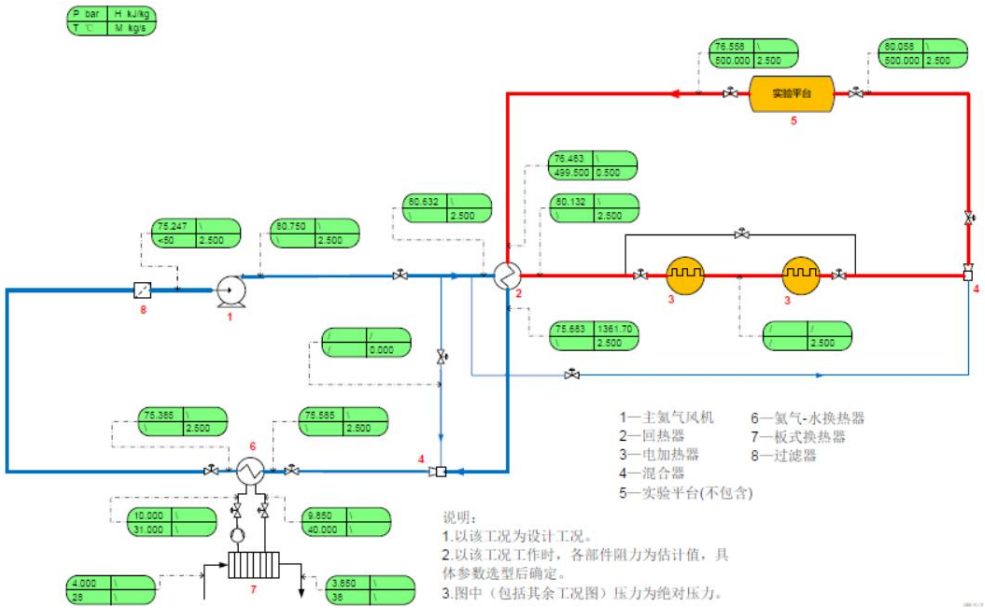


图3-30 氦冷却回路平台系统构成图

系统主要由主回路系统、氦气补偿系统、水冷系统和抽真空系统等组成。主回路系统构成整个测试平台的主体，又分为高温回路和常温回路两部分。其他各系统具备不同的辅助功能，从而实现实验回路的安全、高效、稳定运行。主回路系统可以为实验段提供一定压力、温度和流量的冷却剂，并将被加热后的冷却剂降低到一定温度后经过压缩机加压在实验回路中实现循环。氦气补偿系统主要的功能包括两部分，一是回收、储存实验平台运行所需的氦气，二是减小主回路运行时的压力波动，起到稳压的作用。水冷系统为实验回路提供冷阱，将实验后不可回收的余热排到环境中去。

3.2.10.2 氦检漏平台

⑴单元功能

氦检漏平台的主要功能是对完成加工的包层模块进行高温环境下的真空泄漏检查，确定部件是否满足加工要求。

⑵主要设计参数

①最高温度500℃

氦气最大压力8MPa

③系统灵敏度优于$1\times10^{-11}Pa\cdot m^3/s$

⑶工艺设计

系统主要由真空舱体分系统、加热分系统、充氮气分系统、强制内循环换热分系统（采用低温冷水机组制冷）、真空抽气分系统、测量控制系统、氦检漏系统、复压系统、辅助分系统等部分组成。

系统采用不锈钢矩形卧式舱体结构，底部采用鞍座支撑，外加环形加强筋。由于工件较重，为减少舱体的局部变形，在舱体外焊接三条支撑鞍座，并与舱内的支撑对齐，可将舱内的工件重量直接传导到基础上，保证工件支架有足够的支撑强度；真空舱体前端开门，舱门采用铰链手动开启，舱门关闭后用4个气缸预紧，预紧后采用4个气缸带动插销机构锁紧，锁紧采用气缸拖动插销结构，舱门采用双O型圈密封；后端面与箱体直段焊接为一体，采用平板结构，外部焊接井字形加强筋。

真空抽气分系统，安装在真空箱体后部，确保真空度需求。强制内循环换热冷却分系统，采用低温冷水机组制冷，换热器安装在真空箱体内部后方，伺服电机安装在箱体外侧，通过磁流体穿舱；用于舱内工件温度的冷却。加热分系统的加热笼安装于舱内，前端加热笼安装于舱门上，随舱门闭合，中间活动加热板安装于工件架上，活动工件支架既起工件安装支撑作用，又是加热架的固定架，可根据相应的工件灵活安装；用于对工件的加热和温度的控制工件。

3.2.10.3 真空与热环境模拟测试平台

⑴单元功能

主要功能为包层模块在真空与热环境下的性能验证，可开展热负荷下的服役环境模拟，同时可以模拟在真空与热环境下包层模块的振动响应情况，支撑包层方案验证。

⑵主要设计参数

①真空度优于5×10^{-3}Pa

②真空室内部环境温度优于200℃

⑶工艺设计

真空与热环境模拟运行平台主要包括真空室、抽气系统、内部支撑及移动平台、加热系统、维护及定位系统、振动平台及冷却系统。真空室位于整个平台中心，安装聚变装置真空室结构设计，整体尺寸采用缩比形式，尺寸小，易于加工测试。抽气系统紧邻真空室，考虑真空室空间尺寸及真空度要求，拟采用两台真空泵开展真空室内部抽真空。内部支撑及移动平台位于真空室内部，可实现固态包层原型件临时位置固

定及支撑，同时在固态包层原型件安装过程中，可完成原型件推送及移动，实现精确定位功能。振动平台位于支撑剂移动平台的上端，主要与维护定位系统配合使用，在包层转运的过程中，维护平台用于包层垂直移动，方便包层吊装，振动平台下部安装有激振电机，需要振动时，激振电机工作带动平台振动，实现包层原型件振动实验工况。维护与定位系统安装在真空室内壁上，内部装载有维护工具，用于开展包层原型件的装配验证和维护验证。加热系统位于真空室内部，依托真空室中窗口，对包层原型件第一壁及内部加热，同时冷却系统对包层原型件开展冷却，验证包层原型件内部冷却流道设计的合理性与冷却方案的可靠性。包层原型件装配完成后，包层与真空室绝缘（支撑位置）。包层原型件背部中心与真空室内壁设有电连接。设备运行时，将包层通入大电流，在真空与热环境下验证电连接和绝缘设计的可靠性。

真空室要求可承受内部系统和包层原型件。真空室侧边和上中两个窗口分别留抽气系统接口、电源系统接口和水冷系统接口，同时设有诊断和监测口。

3.2.10.4 综合性包层测试平台

⑴单元功能

为固态包层模块测试提供热、磁场和真空等综合服役环境模拟，验证固态包层在多物理场下的各项性能参数。

⑵主要设计参数

①真空度优于0.5×10^{-3}Pa

②静态磁场3T

③加热功率1MW/m^2

⑶工艺设计

固态包层多物理场测试系统是将固态包层原型件置于真空环境且受激光高热流和静态和脉冲磁场相互作用的设备。该设备实现的运行环境及工况是未来聚变堆包层所要面对的。装置整体尺寸约4m×4m×5m，主要由以下几个部分组成：真空装置、磁体系统、激光加热装置、冷却系统、抽气系统和诊断及监测系统。

屏蔽体包络整个装置，要求可承受内部真空系统、磁体系统和包层原型件，同时实现磁环境屏蔽。屏蔽体侧边分别留抽气系统接口、电源系统接口和水冷系统接口，屏蔽体上部留有包层原型件及激光加热系统吊装口，前端设有诊断和监测口。

3.2.10.5 综合性球床测试平台

⑴单元功能

固态包层内部填充结构具有多样性，开展内部结构特性研究对未来聚变堆固态包层设计具有重要意义。系统的主要功能是为固态包层内部结构设计提供参考数据，包含氚吹扫特性、内部结构演变、结构稳定性等相关参数。

⑵主要设计参数

①吹扫气体入口温度400℃

②球床最大振动频率1000Hz

③球床表面最大热负荷60kW/m^2

⑶工艺设计

考虑到固态包层球床功能的多样性与重要性，需要全面评估球床的各项性能及其稳定性。而为了可以同步测试和评估同一球床的不同性能，以及降低测试平台的安装复杂程度和试验操作的难度，整个测试平台采用多模块协同的设计方案。

整个测试平台分为四个子测试模块：高温氦气吹扫模块、球床内部结构观测模块、力学性能与结构稳定性测试模块以及多物理场耦合测试模块，不同测试模块之间通过球床传送装置（滑轨）相互关联，实现对球床试样的流程化测试。整个平台的测试流程规划如下：首先在高温氦气吹扫系统对球床进行高温氦气吹扫测试，获取球床的吹扫特性；随后转入球床内部结构观测系统，扫描重构球床的三维立体结构，获取球床的堆积结构、孔隙率等参数；接着对球床进行力学性能和结构稳定性测试，分别对球床施加静载荷、动载荷以及循环载荷等作用，测试球床宏观特性及力学性能变化，同时可再结合球床结构观测系统，观测球床内部细微观结构变化及动力学行为；最后，转入多物理场耦合测试系统，该系统中同时集成有加热装置、磁场生成装置、应力加载装置以及数据监测系统，可模拟和评估球床在多物理场耦合作用下或长期服役过程中的性能及稳定性，包括力学稳定性、传热性能等。除了上述四个主要的测试模块之外，平台还配有多物理场数据采集与控制系统，该系统集成数据传输与存储、系统监测与控制、人机交互与数据分析以及通信与应急管理等模块，可实现对整个测试平台的统一调配与管理。

固态包层综合性能测试平台主要设备见下表。

表3-45 固态包层综合性能测试平台主要设备及其技术参数

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
1	氦风机系统		工作介质：氦气，进口压力：7.5MPa，出口压力：8.1Mpa，转速：~25000rpm，	2		
2	高压氦气泵系统		工作介质：氦气，出口压力：2-5MPa，流量：0.5-1.5kg/s	1		
3	储气罐（氦气）		工作压力：0-20MPa；工作介质：氦气	1		
4	氦气主回路稳压器		工作介质：氦气	1		
5	氦气辅助回路稳压器		工作介质：氦气	1		
6	氦-氦热交换器		工作介质：氦气，运行压力：10Mpa，总换热功率：3.2MW，流量：~3kg/s，	1		
7	电加热及控制系统		工作介质：氦气，电热丝材质：Cr20Ni80，加热功率：120kW，介质流量9000Nm^3/h，	1		
8	电加热器		工作介质：氦气，电热丝材质：Cr20Ni80，加热功率：120kW，介质流量9000Nm^3/h	1		
9	3050L/s分子泵		DN 320 ISO-F；水冷，流量不大于60L/h			
10	冷却塔		冷却方式：空冷，换热功率：0.6MW，电机功率：100kWx2，塔高6m，塔宽7m，塔长10m			
11	回流换热器		工作介质：氦气，进口温度：150℃，温差：50℃，流量：1-3kg/s，换热功率：0.5MW，			
12	过滤器		运行压力：8-10MPa，耐温：~500℃，工作流量：3kg/s，			

3.2.11 液态包层综合性能测试平台

液态包层综合测试平台包含液态锂铅冷却剂回路、超临界二氧化碳冷却剂回路、液态包层多物理场测试平台、锂铅系统关键部件考核平台、包层核性能表征平台、包层破口安全实验平台、包层可靠性测试平台。

3.2.11.1 液态锂铅冷却剂回路

该回路的主要功能是与超临界二氧化碳冷却剂回路联合，为全尺寸液态包层模块测试提供高温液态锂铅冷却剂，有效移除COOL包层模块的热量，在确保包层温度等关键参数满足限值要求的前提下，实现高出口温度，获取高品位热能，并开展包层综合实验，以验证CFETR COOL包层的热工水力学特性。同时，该回路可配合氚提取系统实现氢同位素提取，并协同保障系统安全运行。

其主要建设内容包括：液态锂铅冷却剂回路及其辅助系统的设计与建造；以及高温、大流量、高扬程液态锂铅机械泵的研制。**液态锂铅冷却剂回路在一期运行中不涉及氚，二期运行将投入克量级的氚，并与液态包层氚提取系统联合开展氚提取过程演示。**

⑴技术参数

液态锂铅出口最高温度达500-600℃，最高流量不低于300kg/s，可有效移除COOL包层模块的热量并获得高品位热。

⑵建设方案

高温锂铅实验回路的一次侧是闭式回路，主要由锂铅熔化、储存系统、锂铅主回路系统、锂铅杂质净化系统，锂铅冲排系统（主要指冲排管路，没有设备）、气路系统、锂铅紧急泄放系统及加热保温系统等组成。在回路运行前，锂铅储存在低位储液罐中，在锂铅回路预热阶段，锂铅储罐上缠绕加热丝将其熔化，高压氩气将锂铅压满整个回路后，关闭阀门将储罐与回路隔离。在实验阶段，锂铅在泵的驱动下流经包层扇段吸收热量升温，高温锂铅流经中间换热器将热量传递给二次侧园区冷却水。为避免包层扇段中的热源模拟器失效，在包层扇段入口处布置电加热器，确保锂铅进入包层扇段的温度满足设计要求。在主回路上引出锂铅总流量的5%进入净化系统，过滤金属和非金属杂质后到达泵的入口，完成整个循环。为防止锂铅凝固，所有管道和设备上均缠绕伴热系统，并且功率可调。实验结束后，锂铅应及时流回储罐，避免凝固阻塞相应设备及管道。

锂铅冷却剂回路工艺流程如下图。

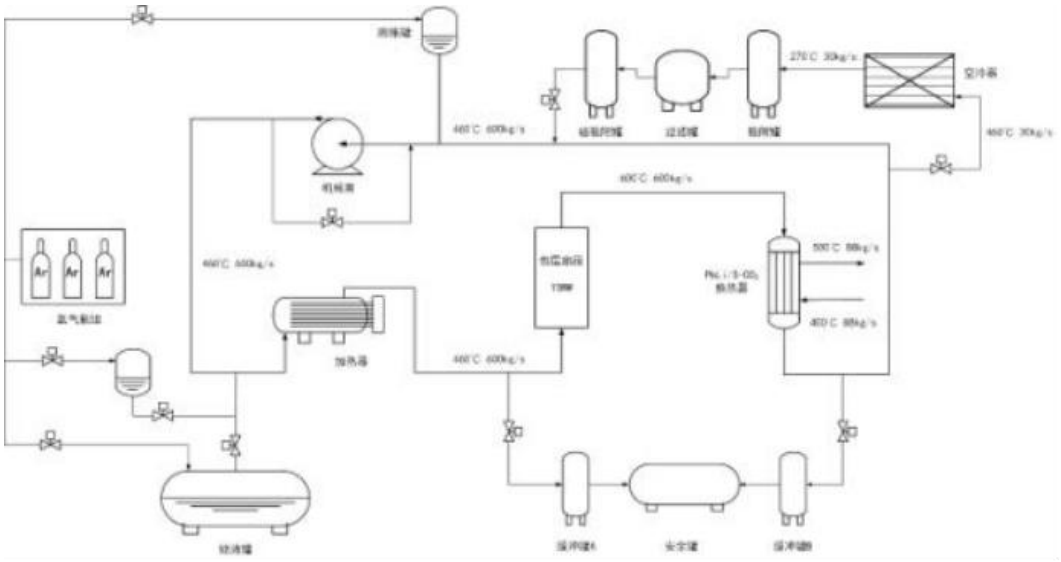


图3-31 锂铅冷却剂回路工艺设计

3.2.11.2 超临界二氧化碳冷却剂回路

超临界二氧化碳冷却剂回路的主要功能是与液态锂铅冷却剂回路联合，支撑液态包层模块热工水力特性测试实验，支撑超临界二氧化碳冷却系统关键部件在在高温高压、大流量工况下的安全稳定运行特性以及动态运行特性的实验研究。其主要建设内容为：超临界二氧化碳主回路系统设计方案与建造；二氧化碳存储-充装-排放系统、工质检测与管理系统、多级高温加热系统、冷却水系统、电气及仪控系统设计方案与建造；完成超临界二氧化碳高温大流量高效压气机设计方案及研制；完成超临界二氧化碳高效低流阻高强度热交换器设计方案及研制；系统调试运行方案与闭式系统参数解耦控制方案。该平台旨在为包层冷却模块的工程验证、超临界二氧化碳关键装备研发及系统运行调控方案工程验证提供实验支撑。

COOL包层超临界二氧化碳冷却剂回路主要包括：S-CO_2主回路和CO_2充装回路、泄放和抽真空系统。其中S-CO_2主回路一方面与COOL包层的S-CO_2联箱连接，为COOL包层提供S-CO_2冷却剂，带走COOL包层结构热量；另一方面与COOL包层主传热系统的锂铅回路通过PbLi/S-CO_2换热器换热，带走锂铅回路热量。S-CO_2主回路与演示发电二回路系统通过S-CO_2/S-CO_2换热器换热，带走S-CO_2主回路的热量。CO_2充装回路为系统运行提供二氧化碳充装，确保足够的二氧化碳工作压力。同时，回路上配置抽真空设备，用于系统启动时抽真空排出空气。

在二期运行时，液态锂铅冷却剂回路将投入克量级的氚，并与液态包层氚提取系统联合开展氚提取过程演示。由于超临界二氧化碳冷却剂回路与液态锂铅冷却剂回路通过包层原型扇连接，超临界二氧化碳回路可能会渗入氚，也会涉氚运行。

⑴技术参数

超临界二氧化碳冷却剂系统最高出口温度≥500℃，运行压力8-9MPa，流量不低于125kg/s，可有效移除COOL包层模块的热量并获得高品位热。

⑵建设方案

超临界二氧化碳冷却回路的工艺设计主要包括系统总体设计、辅助系统集成、核心设备研制及控制联调等环节。针对系统压力高、循环阻力大、加热负荷大及工质热物性变化显著等特点，首先完成主回路及辅助系统的总体优化与工程设计，明确设备仪表技术要求，并协调空间布置及与外部设施的接口，为系统稳定运行及试验段测试奠定基础。在核心设备方面，开展大流量高压比超临界二氧化碳压气机的研制，联合研制与制造单位攻克高温大流量工况下的关键技术，开发满足实验平台要求的高性能压气机；同时，研制高效紧凑的大功率热交换器，采用缠绕管式或印刷电路板式（PCHE）结构，通过引入回热器回收热量以降低回路电功率，解决高温高压环境下换热器的设计、制造及运行验证难题。在控制与集成方面，建立主回路及关键设备的动态响应模型，揭示温度、压力、流量等参数的耦合机理，形成基于压气机控制、闭式系统阻力调节及电加热器PID调节的多参数协同解耦控制策略，完成分系统调试、整机联调及典型工况实验验证，为后续液态锂铅冷却剂回路的系统联调及包层原型扇段的集成测试提供支撑。

3.2.11.3 液态包层多物理场耦合实验平台

平台用于模拟聚变堆极端耦合环境（如强磁场、高温及大流量），开展液态锂铅在“磁-热-流-固”多场耦合机理研究，具体包括磁流体动力学（MHD）效应，强湍流效应以及浮升力引起的混合对流效应，同时面向CFETR包层设计，开展全尺寸包层模块的电磁特性测试。

⑴技术参数

包层多物理场耦合实验平台磁场强度最高达5T，不均匀度优于5%。

⑵建设方案

包层多物理场耦合实验平台主要包括磁场产生系统、包层电磁实验模块和多物理场测量系统。磁场产生系统包括稳态磁场产生系统和瞬态磁场产生系统，稳态磁场产生系统用于提供5T的主磁场，瞬态磁场产生系统采用脉冲电源电容放电产生快速磁场变化，模拟等离子体破裂瞬态。包层电磁实验模块分为2个全尺寸包层电磁实验模块和4个包层简化电磁实验模块，全尺寸包层模块用于极端电磁工况下包层结构测试，包层简化模块用于量化包层在稳态/瞬态磁场下的电磁力、涡流及结构响应，为开发高精度电磁载荷计算模型提供实验数据支持。包层模块结构材料采用具有铁磁性的低活化钢，结构部件内置冷却流道，包层盒体内部布置流道。多物理场测试模块由磁场测量子模块、涡流检测子模块和力学参数测量子模块组成。磁场测量子模块采用高精度霍尔传感器阵列，可实现磁场强度、电流、位置等物理量的高精度检测，用于稳态磁场测量及瞬态磁场监测，其核心优势在于非接触测量、宽动态范围与高线性度。涡流检测子模块采用罗氏线圈，是一种基于电磁感应原理的非接触式电流/磁场测量装置，能够精确测量瞬态或交流电流及其变化率，其核心优势在于宽频响、高线性度、抗饱和特性。力学参数测量子模块采用光纤光栅应变传感器和六维力传感器。光纤光栅应变传感器是一种基于光纤光栅波长调制原理的高精度应变测量装置。其核心功能是通过光信号变化捕捉被测物体的应变、温度、振动等物理量，具有抗电磁干扰、耐高温、分布式测量等独特优势，尤其适用于核聚变的极端环境。六维力传感器是一种能够同时测量三维空间中的三个力分量和三个力矩分量的高精度传感器。其核心功能是捕捉物体在复杂载荷下的合力与合力矩。

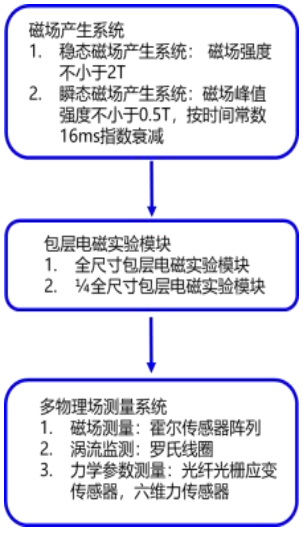


图3-32 液态包层多物理场耦合实验平台工艺流程

3.2.11.4 锂铅系统关键部件考核平台

该平台的功能是评估高温液态锂铅流动传热、测量及控制系统的关键部件在高温、强腐蚀及破口事故等极端条件下的性能表现，具体而言，是对流量计、压力和温度传感器，以及循环主泵、阀门、换热设备等关键部件进行系统性测试与考核，同时测试液态金属杂质净化、材料腐蚀性能及氧浓度控制技术，提升材料科学与工程技术水平，为未来聚变堆主传热系统的安全运行奠定坚实基础。

⑴技术参数

液态锂铅最大流量≥50kg/s，最高温度≥600℃。

⑵工艺设计

该平台通过外部加热系统将回路中的固态锂铅合金加热至熔化温度（通常高于235℃），使其转化为液态；通过电加热器逐步升温至目标运行温度600℃，确保系统各部件均匀受热，避免热应力集中；启动循环主泵，驱动高温液态锂铅在回路中流动，形成稳定的循环；通过流量计和阀门调节液态锂铅的流速，确保流量满足实验或运行需求。回路配备腐蚀实验设备，包括腐蚀测试段、样品支架和手套箱等；设有氧控系统，包括氧控剂添加装置、气体净化系统、氧浓度传感器等，通过控制液态锂铅中的氧浓度，研究其对材料腐蚀和锂铅氧化的影响；同时回路留有部件测试接口，可测试仪表和部件的性能，以及不同的高效过滤和分离技术。

锂铅回路中设计两处破口试验段，分别为高温段600℃和低温段460℃各一处，用于模拟工程项目中的包层超二破口事故和超二换热器的破口事故。

锂铅回路系统组成：锂铅熔化、储存系统，锂铅主回路系统，锂铅杂质净化系统，锂铅冲排系统（主要指冲排管路，没有设备），气路系统，锂铅破口泄放系统1和2，加热保温系统。

3.2.11.5 包层核性能表征平台

氚增殖包层承担着氚增殖、核热提取、屏蔽等重要的涉核功能，其中子学设计的可靠性直接影响着未来聚变堆氚自持目标的实现。为验证中子学设计工具在包层中子学设计中的可靠性，需要在DT中子环境下开展中子学实验，对以产氚率、中子能谱为代表的中子学参数进行分析，以验证产氚性能；对以活度为代表的辐射防护参数进行分析，以验证辐射防护设计。此外通过高精度的源项测量系统，对源中子参数进行高

精度测量，进而实现高保真的中子输运模拟，在此基础上，实现模拟和实验的验证分析，为聚变堆关键涉核功能验证提供技术储备和前期实验支持。

⑴技术参数

在DT中子场下验证包层中子学设计，包层模块内TPR验证测量不确定度优于±5%；包层模块内中子强度测量不确定度优于±10%；活度测量不确定度优于±10%以内。

⑵建设方案

针对DT聚变中子环境下的包层内产氚率验证，研发包括基于光纤和电离室的产氚率在线测量技术，以及基于液闪技术法的产氚率离线测量技术；针对DT聚变中子环境下的包层内中子参数测量验证，研发包括基于自给能中子探测器、电离室、半导体探测器的中子参数在线测量技术，以及基于活化片气动传输系统离线测量技术；针对DT聚变中子环境下的包层内中子参数测量验证，研发包括基于自给能中子探测器、电离室、半导体探测器的中子参数在线测量技术，以及基于活化片气动传输系统离线测量技术；针对DT聚变中子环境下的包层材料的活度测量验证，研发基于符合测量技术和闪烁体谱仪的冷却剂活度在线测量技术，以及基于高纯锗谱仪系统的材料活度离线测量技术。将上述研发的测量技术通过堆外、堆内实验对研发技术进行考核，最终应用于包层核性能验证。

3.2.11.6 包层破口安全实验平台

液态包层采用高温高压（压力8-9MPa，进/出口温度~350/400ºC）超临界二氧化碳（以下简称超二）冷却包层结构（如第一壁、上下盖板），液态PbLi（压力1-2MPa，进出口温度～400/600ºC）作为增殖区自冷却剂、氚增殖剂和中子倍增剂。超二破口和包层内破口事故是液态包层典型设计基准事故。超二破口事故伴随有超二从超临界状态向气体状态转变的瞬态过程，导致泄压空间压力急剧上升，威胁聚变堆放射性包容边界完整性。包层内破口事故工况下，高温高压超二从破口位置进入增殖区，与高温液态PbLi发生化学反应，释放热量，同时导致液态PbLi压力迅速升高，存在包层结构破裂和放射性物质泄漏的风险。

3.2.11.6.1 技术参数

⑴超临界二氧化碳破口实验平台：二氧化碳测试压力达8-9MPa，温度达350-500℃；

⑵包层内破口实验平台：二氧化碳测试压力达8-9MPa，温度达350-500℃，液态PbLi温度大于350℃。

3.2.11.6.2 方案设计

⑴超临界二氧化碳破口实验平台

超二破口实验平台主要由环型真空室系统和超二产生系统组成，总体流程图如下图所示，两个子系统组成和功能如下：

①真空室系统主要包括环形真空室、泄压箱、真空泵组。环型真空室采用体积比1/1000缩比设计，保留了CFETR真空室以及喷嘴长径比的几何特征，可以很好地模拟实际的CFETR真空室状态。真空室连接吹扫气系统，用于实验前后烘干真空室。真空室连接至排水系统，用于排气、排水。大、小泄压箱与真空室连接管线上的阀门在真空室压力上升到预设阈值时快速打开，与真空室安全泄压阀组共同保护真空室，防止其超压。通过管道将两个泄压箱连接，保证足够的泄压空间。泄压箱设置有安全泄压阀，防止泄压箱超压。泄压箱连接到排水系统用于排气、排水。补水系统将园区去离子水充装至泄压箱。真空泵组主功能是在实验开始之前对环形真空室与泄压箱进行抽真空，使三者达到满足要求的真空状态。真空泵与设备冷却水系统相连接，用于泵冷却。

②超二产生系统主要由二氧化碳气瓶和二氧化碳加热罐构成。二氧化碳气瓶接收来自超二回路的超二（8-9MPa），二氧化碳加热罐则负责将超二加热至测试要求的温度（350-500℃）。二氧化碳气瓶和加热管均设置有安全泄压阀，防止超压。超二产生系统提供与原型设计温度、压力相同的超二冷却剂，满足实验需求。超二产生系统与真空室容器有三个接口，分别模拟上、中、下位置破口事故。

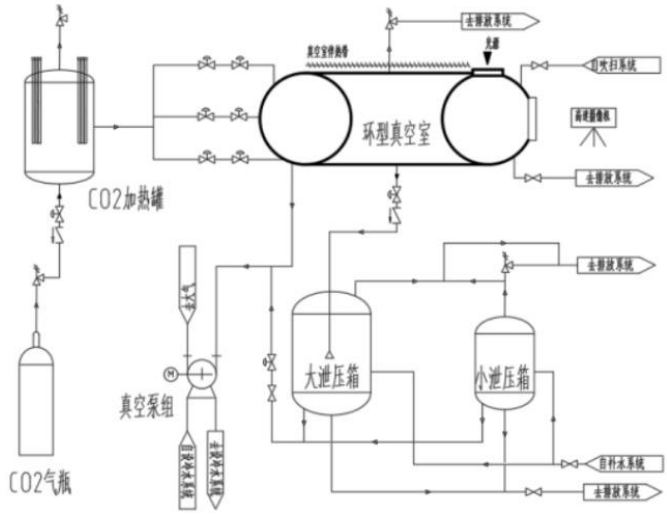


图3-33 破口实验回路流程图

⑵包层内破口实验平台

包层内破口实验平台用于开展液态包层发生In-boxLOCA事故下高压S-CO2进入增殖区与高温液态锂铅的热化学反应实验研究，并研究液态包层结构对锂铅-S-CO2反应引起的强压力变化和温度变化的动态响应。包层内破口实验平台工艺路流程图如下图所示，平台由包层模拟模块、锂铅管线、膨胀罐、泄压罐、伴热组件等组成。锂铅由实验室锂铅回路阀门控制充满包层模拟模块、管线、膨胀罐，膨胀罐中充有氩气，控制膨胀罐内锂铅液位，伴热加热控制液态锂铅的温度；实验时，调节S-CO2支路上的阀门，定量喷放一定温度、压力的S-CO_2到包层模拟模块中；模拟模块、连通管线、膨胀罐、泄压罐上安装有压力、温度、应力应变传感器；通过高速数据采集和控制系统监测喷射过程中超临界二氧化碳管路的流量变化，以及实验本体及管路各处的应变、压力、温度变化。分别改变S-CO_2破口尺寸、喷射压力、温度，以及锂铅温度，重复进行多轮破口实验，获得不同条件下实验系统内压力传播特性、温度演化，明确关键影响因素。

3.2.11.7 包层可靠性测试平台

包层可靠性、可用性、可维护性和可检测性（RAMI）已被公认是聚变领域走向商业示范堆（DEMO）的关键挑战之一。在聚变堆特有脉冲运行工况下，包层承受循环热－机械载荷（如热应力、Maxwell力），疲劳、蠕变损伤是包层主要失效机制。特别地，对于液态包层而言，高温液态PbLi腐蚀环境将会加剧接头蠕变和疲劳损伤过程，降低结构寿命。此外，在异常热-机械负载（如等离子体大破裂MD）工况下，包层部

件可能产生过度变形而突发破裂，引发冷却剂丧失设计基准事故。因此，有必要开展热机械负载下包层结构部件可靠性测试。

液态包层可靠性测试平台主要用于开展包层结构部件加速退化试验（ADT）：1）热循环载荷下包层结构部件热-机械疲劳试验；2）高温环境下包层结构部件热－机械蠕变试验；3）高温PbLi腐蚀环境中包层结构部件热－机械疲劳/蠕变试验。上述试验旨在识别包层结构特别是几何不连续处/焊接接头在模拟正常运行和瞬态工况热-机械负载下的损伤行为规律和失效机制，获得包层失效模式和退化失效数据，进一步发展包层损伤和寿命预测模型，以全面评价包层结构的可靠性和安全性，进而揭示提升包层服役寿命和可用性的潜在途径，反馈于包层设计。

3.2.11.7.1 技术参数

结构部件最大测试温度≥425ºC，最大机械负载≥500kN。

3.2.11.7.2 系统方案

液态包层可靠性测试平台流程图如下图所示，主要由真空室系统、热－机械载荷加载系统、包层试验模块、测量系统构成。

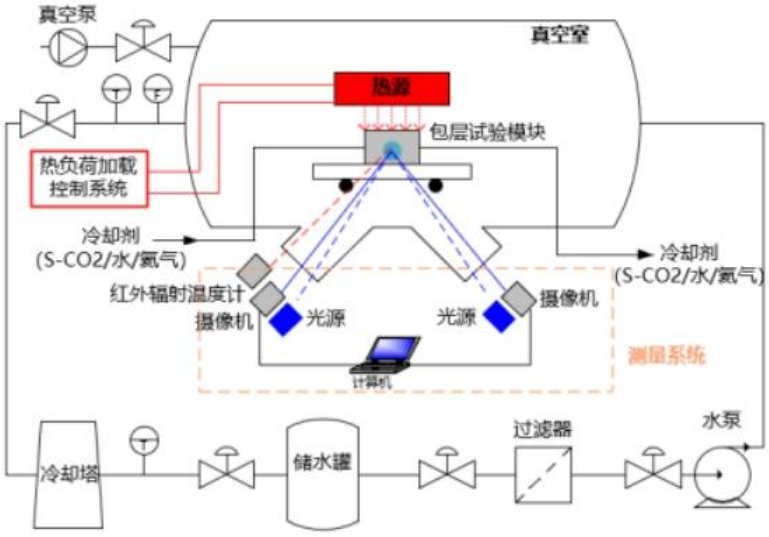


图3-34 包层可靠性测试平台系统流程

系统各个子系统组成和功能如下：

⑴真空室系统：模拟包层试服役的真空环境，另一方面可以避免高温环境中3D-DIC应变测量受到热空气干扰。该系统主要设备包括真空室容器、真空泵、水泵、储水罐、冷却塔。真空室容器为水平圆柱形结构，由壳体、端盖、支撑及附属接口和视窗

（测量预留）构成。真空室内设计有支撑平台分别用于安装包层试验模块和热源，通过地面载重平台和驱动系统水平移动。真空室采用双层壳体结构，壳体之间的夹层为水冷通道。真空室设计有安全泄压阀，防护真空容器超压。水泵、储水罐、冷却塔等构成真空室容器水冷回路，保证真空室壁温和视窗温度在室温水平，以便进行长时间测试和消除视窗加热对测量精度的影响。真空泵组由机械泵和分子泵组成，共同对真空室容器抽真空到满足测试需求的真空状态。

⑵热－机械载荷加载系统：模拟包层正常工况和瞬态工况下承受的热负荷和机械负载。系统采用辐射加热方式，核心设备为高功率石英辐射加热灯，通过多个石英辐射灯组合，实现满足测试需求的热功率。石英灯并排安装铜制支座，支座设计成特殊形状，并在表面镀金，作为反射器，使得大部分热量辐射到试验模块表面，降低由于石英灯离散布置导致的热流不均匀度。支座设计有冷却通道，并通过特定冷却回路提供冷却剂，以降低提高支座和石英灯端部温度，保证负荷加载系统使用寿命能满足测试任务需求。系统热负荷加载的控制由控制模块实现，通过改变施加的电压，分步或斜坡式达到峰值功率，满足测试需要的特定热负荷（如具有峰值保载时间的循环热载荷）。机械负载加载通过电液伺服结构加载试验装置实现，模拟正常运行工况下包层承受的机械载荷（如Maxwell力）。针对包层实验模块几何特征，设计专门的夹具，实现试件固定和负载传递。夹具设计有冷却通道，与支座共享冷却回路，防止夹具过热破坏。

⑶包层试验模块：拟研制两种包层测试模块，分别用于开展有无PbLi腐蚀下的热疲劳、蠕变和高热负荷试验。包层试验模块几何特征尽可能与原型设计相似，以考虑包层几何特征对其热负荷下材料变形和结构损伤影响。包层试验模块采用与原型设计相同的结构材料和功能材料，并采用与原型设计相同的加工制造工艺。包层内部保留与原型相同的冷却流道，并与特定冷却回路连接，用于冷却包层，模拟包层实际运行工况下由于同时受到高热负荷和冷却剂冷却条件下的极高温度梯度。包层试验模块通过法兰连接到冷却回路，以便更换试验模块；冷却回路接入和接出管道通过真空室端盖接口部分伸入真空室内。

⑷测量系统：测量系统用于测量包层模块结构在热负荷下的温度和应变，采用非接触式测量技术，温度测量红外辐射温度计实现。应变测量由3D-DIC技术实现，核心

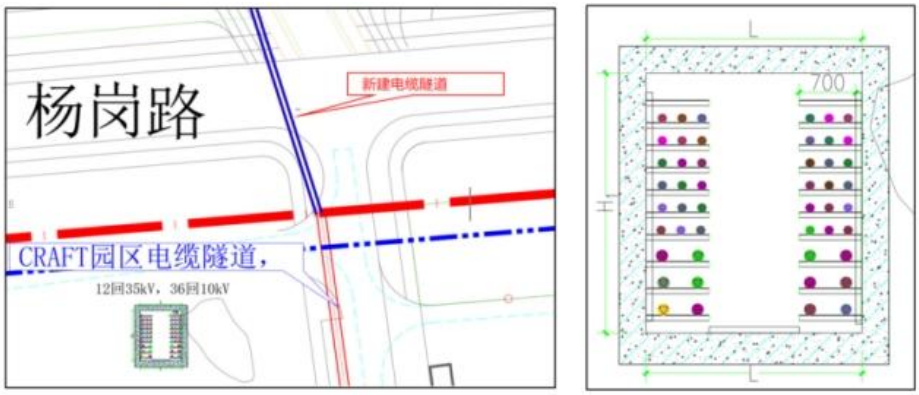
设备包括高速摄像机、光源和执行3D-DIC算法的工作站。通过高速摄像机拍摄试验模块指定区域承受载荷变形前后形貌特征，利用数字图像相关性算法得出图像各像素的对应坐标，获取试样三维位移场。然后通过逐点最小二乘应变估计方法对位移场进行微分，获得变形试样应变场。通常需要使用随机高对比度散斑图案来制造目标表面，使图像具有足够的特征，以便能够准确跟踪相关子集。

3.2.12 供电系统

供电系统承载着传输、变换、分配电能的作用，作为实验验证平台各系统及办公用电的基础，在运行过程中，不间断地给实验设施及各实验系统设备运行输入能量，以维持装置各子系统及设备的持续、安全、稳定运行。

本项目供电系统主要由高压开闭所、10/0.4kV变电所、低压开闭所组成，试验平台设备总的合计功率为79.29MW，最大运行功率为45.15MW，柴油发电机需求容量2.5MW。

为满足聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台用电需求，本项目高压开闭所电源计划引自CRAFT 110kV变电站现有电力设施。现有CRAFT园区电缆隧道已建设至该园区北门位置，需新建一段电缆排管穿越杨岗路，沿杨岗路和科学院北路至本项目配套建筑，外线部分由地方配套实施，电缆排管已完成实施，其中过杨岗路部分排管正在实施。电缆隧道设计方案如下图所示，图中，红色双线部分为已有电缆隧道（宽2.4米，高3.2米），蓝色双线为需新建电缆隧道。



图一、电缆隧道示意图　　图二、已有电缆隧道截面图

图3-35 电缆隧道设计方案

10kV开闭所：接受上级变电站 10kV 电源，通过多回路开关柜向周边配电房、公

变、专变分配电能；实现线路分段、故障隔离、负荷转移，提升供电可靠性；

0.4kV低压配电间：接受上级 10kV/0.4kV 配电变压器输出的 0.4kV 低压电能，通过低压开关柜、配电箱、母线等设备对电能进行再分配、控制、保护与计量，为项目内各类用电负荷（如动力设备、照明、空调、弱电系统、辅助设施等）提供安全、稳定、可靠的低压供电。

本项目拟在氚燃料实验楼设置1#变电所和2#变电所，供氚实验楼工艺和非工艺设备的供电；在包层研发楼设置3#和4#变电所，供包层研发楼工艺和非工艺设备的供电。考虑到特级负荷用电的要求，两栋楼各设置柴油发电机房作为备用电源。本项目供电系统如下表所示。

表3-46 项目供电系统一览表

变电所名称	容量（kVA）	供电区域	设置位置
1#变电所	4×2500	氚实验楼工艺	氚实验楼一层
	4×2500	氚实验楼工艺	
2#变电所	2×1250	氚实验楼非工艺区域	氚实验楼二层
3#变电所	6×2500	包层研发楼工艺	包层研发楼一层
	6×2500	包层研发楼工艺，最终由工艺确定	
4#变电所	2×1250	包层研发楼非工艺区域	包层研发楼一层
柴油发电机房	2×1250	氚实验楼和工艺使用 包层研发楼工艺使用	氚实验楼地下室 包层研发楼地下室

供电系统涉及的主要设备如下表所示。

表3-47 项目供电系统主要设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	用途	备注
1	10kV开关柜	KYN-28	额定电压12kV；频率50Hz；电流630A/1250A	66	供电	
2	变压器	SCB14-2500/10	额定容量2500；额定组合电压10±2×2.5%/0.4；频率50Hz；连接组别Dyn11	20	变电	
3	0.4kV开关柜	抽屉式	额定电压0.4kV；频率50Hz；	187	配电	
4	柴油泵发电机	0.4kV、1250kVA	额定电压0.4kV；频率50Hz；容量1250kVA	2	应急发电	

3.2.13 冷却系统

本项目冷却系统主要分为涉放与非放水冷系统，主要由内循环冷却水系统、内循环冷冻水系统以及在线水质处理系统等组成。

3.2.13.1 涉放水冷系统

该系统主要为氚循环和辐射安全实验系统中的带放射性负载提供冷却能力，其主要功能是把氚实验楼涉氚实验验证平台中的主要系统及设备在运行过程中产生的热负荷通过冷却水带出转移给散热系统，通过其排放到大气环境中，同时为部分负载提供冷冻水，并且保证系统中的冷却水水质满足各负载的运行要求。主要包括冷却水系统、散热系统、水质处理系统和控制系统。涉放水冷系统是专为放射性实验负载设计的封闭式循环冷却系统，其工艺设计核心在于高效导出热负荷的同时，确保放射性物质（氚）的严密包容。其工作原理如下图所示：

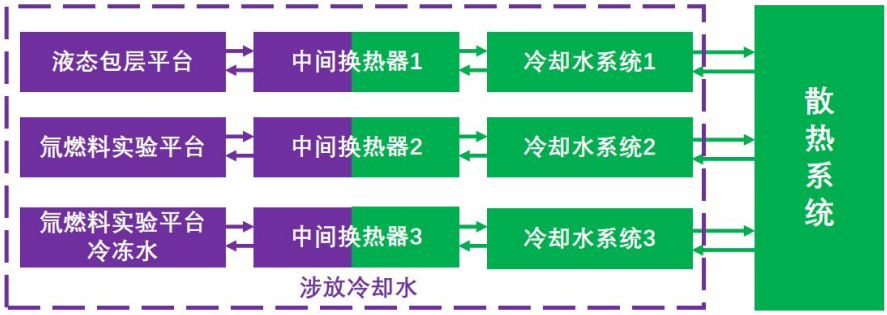


图3-36 涉放水冷系统工作原理

该系统具有以下设计特点：

⑴系统采用多回路隔离架构，由一回路冷却环路、中间换热环路、二回路散热环路及安全包容系统构成。一回路直接冷却液态包层、氚燃料实验平台等放射性负载，吸收热量后通过中间换热器将热负荷传递给中间隔离回路，最终由二回路转移至非放水冷系统散热。该设计实现放射性介质与非放冷却水的物理隔离，是放射性包容的核心屏障。

⑵针对涉氚特性，系统设置氚净化系统持续监测并控制冷却水中的氚浓度；安装安全泄压阀和泄压罐用于超压保护，确保放射性泄放介质被集中收集；通过排灌系统对系统水进行受控排放或填装，紧凑布置各环路及安全包容设施，实现热量从放射性区域到非放环境的封闭转移。

经核算，涉放水冷系统需要为涉氚实验平台各负载子系统提供总流量为1000t/h的冷却水和3200t/h的冷冻水，以转移各负载在运行过程中所产生的热负荷；在实验平台运行期间，维持冷却水的温度、压力和流速在设定的范围内以保证平台各子系统设备的温度和冷却裕量；在试验平台运行过程中转移最大热负荷为38MW。其有关参数如下表所示：

表3-48 涉氚水冷系统主要技术参数

负载系统名称		流量（t/h）	入口温度(℃)	最大热负荷(MW)	最大入口压力（MPa）	最大压力损失（MPa）	水质要求
涉放水冷系统	液态包层	200	32	2	1	0.5	电阻率≥2兆欧
	氚燃料实验平台常温水	800	32	6	1	0.5	电阻率≥2兆欧 溶解氧≤500ppb
	氚燃料实验平台冷冻水	3200	6	30	1	0.5	电阻率≥2兆欧 溶解氧≤500ppb
合计	/	4200	/	38	/	/	

项目涉放冷却系统主要设备如下表所示。

表3-49 项目涉放冷却系统主要设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途
1	液态包层一次水泵	定制	Q=200m^3/h，H=100m，90KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	液态包层冷却水循环
2	液态包层二次冷却水泵	定制	Q=100m^3/h，H=30m，15KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	液态包层冷却水循环
3	氚燃料循环一次水泵	定制	Q=400m^3/h，H=100m，160KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	氚燃料冷却水循环
4	氚燃料循环二次冷却水泵	定制	Q=800m^3/h，H=30m，160KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	氚燃料冷却水循环
5	氚燃料循环冷冻水二次冷却循环水泵	定制	Q=625m^3/h，H=100m，250KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	氚燃料冷却水循环

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途
6	加热水循环泵	定制	Q=100m³/h，H=120m，75kw，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	烘烤水循环
7	电加热器	定制	600kw，304	1	烘烤水加热
8	变频离心式冷水机组	定制	制冷量3868kW（1100RT），过流壁面304	4	冷冻水制备
9	离心机冷冻水泵	定制	流量480m³/h，H=100m，304	4	冷冻水制备
10	脱盐系统	定制	EDI膜堆，处理量20m³/h	1	冷却工质脱盐
11	脱氧系统	定制	真空脱气膜，处理量20m³/h	1	冷却工质脱氧
12	稳压设备	定制	氮气稳压，不锈钢S30408，10m³	1	冷却系统压力稳定

3.2.13.2 非放水冷系统（常规冷却系统）

该系统主要为包括包层关键技术研发和综合验证在内的系统提供冷却水，其主要功能是把包层关键技术研发和综合验证系统中的主要系统及设备在运行过程中产生的热负荷通过冷却水带出转移给散热系统，通过其排放到大气环境中，同时为部分负载提供冷冻水，并且保证系统中的冷却水水质满足各负载的运行要求。

非放水冷系统作为实验设施的公用配套冷却系统，主要为液态包层测试平台、氚循环平台装置等常规负载提供冷却服务，同时为二回路提供所需的冷冻水，其工艺设计的核心在于构建一个高效、稳定且节能的大型热循环体系。其工艺流程简图如下图所示：

非放水冷系统主要由内循环冷却水系统、外循环散热系统、内循环冷冻水系统以及在线水质处理系统四大部分组成。

⑴内循环冷却水系统：负责将各实验负载（总流量3885t/h）运行产生的热负荷（最大30.65MW）通过循环冷却水带出，输送至板式换热器进行热量交换。

⑵外循环散热系统：通过3台单台处理能力2000m³/h的逆流式冷却塔，将内循环传递过来的热量最终排放至大气。冷却塔设计温差为10℃（进水42℃→出水32℃），并配有高效收水器以控制飘水率。

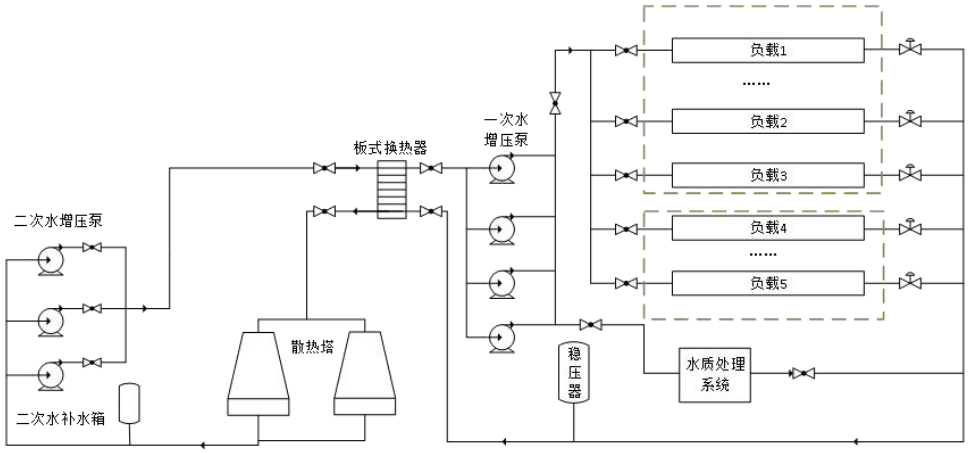


图3-37 常规水冷系统初步工艺流程简图

⑶内循环冷冻水系统：采用2台高压变频离心式冷水机组（单台制冷量4084kW），为需要低温环境的负载提供3200t/h、6℃的冷冻水，转移热负荷30MW。机组具备20%~100%的无级调节能力，并满足新国标一级能效要求。

⑷在线水质处理系统：集成过滤、反渗透、EDI、除氧及离子交换装置，确保系统水质满足导电率≤0.5μs/cm（冷冻水≤1μs/cm）及pH值6.5-8的严格标准。

经核算，常规水冷系统主要为实验平台各负载子系统提供总流量为3885t/h的冷却水和30MW的冷冻水，以转移各负载在运行过程中所产生的热负荷；在实验平台运行期间，维持冷却水的温度、压力和流速在设定的范围内以保证平台各子系统设备的温度和冷却裕量；在试验平台运行过程中转移最大热负荷为30.65MW。常规水冷系统、冷冻水系统主要设计参数分别如下表所示。

表3-50 常规水冷系统主要设计参数

负载系统名称		流量（t/h）	入口温度(℃)	最大热负荷(MW)	最大入口压力（MPa）	最大压力损失（MPa）	水质要求
常规水冷系统	液态包层测试平台	3200	32	30	1	0.5	电阻率≥2兆欧；溶解氧≤500ppb
	氚循环平台装置	55	32	0.05	0.8	0.5	电阻率≥2兆欧溶解氧≤500ppb
	液态包层实验平台	630	32	0.6	1	0.5	电阻率≥2兆欧溶解氧≤500ppb
合计	/	3885	/	30.65	/	/	

表3-51 冷冻水系统设计要求

负载系统名称	流量（t/h）	入口温度(℃)	热负荷(MW)	最大入口压力（MPa）	最大压力损失（MPa）	水质要求
二回路冷冻水	3200	6	30	0.8	0.5	电阻率≥2兆欧 溶解氧≤500ppb
合计	3200	/	30	/	/	

需要说明的是，本项目冷却系统所涉及的冷却塔和制冷机，涉放水冷系统与非放水冷系统（常规冷却系统）共用。项目非放（常规）冷却系统涉及的主要设备如下表所示。

表3-52 项目非放（常规）冷却系统主要设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途
1	冷却塔（含冷却塔、冷却水池、降噪设施)	定制	2000m³/h，32/42℃，风扇75kW	1	强制冷却
2	外循环水泵	定制	Q=2000m³/h，H=30m，250kW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	外循环水输送
3	包层冷却水泵	定制	600t/h，100m 扬程，250kW	5	包层冷却水输送
4	包层冷却换热器	定制	600t/h，换热功率5MW	2	包层冷却水热量移除
5	脱盐系统	定制	EDI 膜堆，处理量20m³/h	1	冷却介质除盐
6	脱氧系统	定制	真空脱气膜，处理量 20m³/h	1	冷却介质除氧
7	稳压设备	定制	氮气稳压，不锈钢S30408,10m3	1	水压系统压力稳定
8	液态包层一次水泵	定制	Q=200m³/h，H=100m，90KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	液态包层冷却水循环
9	液态包层二次冷却水泵	定制	Q=100m³/h，H=30m，15KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	液态包层冷却水循环
10	氚燃料循环一次水泵	定制	Q=400m³/h，H=100m，160KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	氚燃料冷却水循环
11	氚燃料循环二次冷却水泵	定制	Q=800m³/h，H=30m，160KW，n=2900r/min，过流	4	氚燃料冷却水循环

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途
			部件：S30408		
12	氚燃料循环冷冻水二次冷却循环水泵	定制	Q=625m³/h，H=100m，250KW，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	氚燃料冷却水循环
13	加热水循环泵	定制	Q=100m³/h，H=120m，75kw，n=2900r/min，过流部件：S30408	4	烘烤水循环
14	电加热器	定制	600kw，304	1	烘烤水加热
15	变频离心式冷水机组	定制	制冷量3868kW（1100RT），过流壁面304	4	冷冻水制备
16	离心机冷冻水泵	定制	流量480m³/h，H=100m，304	4	冷冻水制备
17	脱盐系统	定制	EDI膜堆，处理量20m³/h	1	冷却工质脱盐
18	脱氧系统	定制	真空脱气膜，处理量20m³/h	1	冷却工质脱氧
19	稳压设备	定制	氮气稳压，不锈钢S30408，10m³	1	冷却系统压力稳定

3.2.14 通排风与给排水系统

本系统服务于氚实验楼、包层研发楼与配套办公区域，围绕“安全、洁净、高效、可控”的运行要求，构建了集冷热源供应、空气调节、负压控制、污染物隔离、给排水处理及智能监控于一体的**多系统协同平台**，确保涉放区域环境长期处于稳定、安全、受控状态，同时兼顾能源利用效率与智能化运维能力。

⑴系统功能

实现涉放实验区域内部空气的污染物控制、负压维持与洁净度保障，防止放射性气体扩散；

实现科研办公与设备厂房区域的热湿环境调节，满足舒适性与设备运行需求；

实现对供冷、供热、送风、排风、给排水的全过程集中管理、自动调控与远程监控；

具备应对事故状态（如氚浓度异常、停电等）的应急联动响应能力，确保系统安全；

支持能源系统的数据采集、蓄冷调度、负荷分析与能效优化，为智慧运维与策略管理提供支撑。

⑵系统组成结构

通排风与给排水系统组成结构示意图如下图所示。

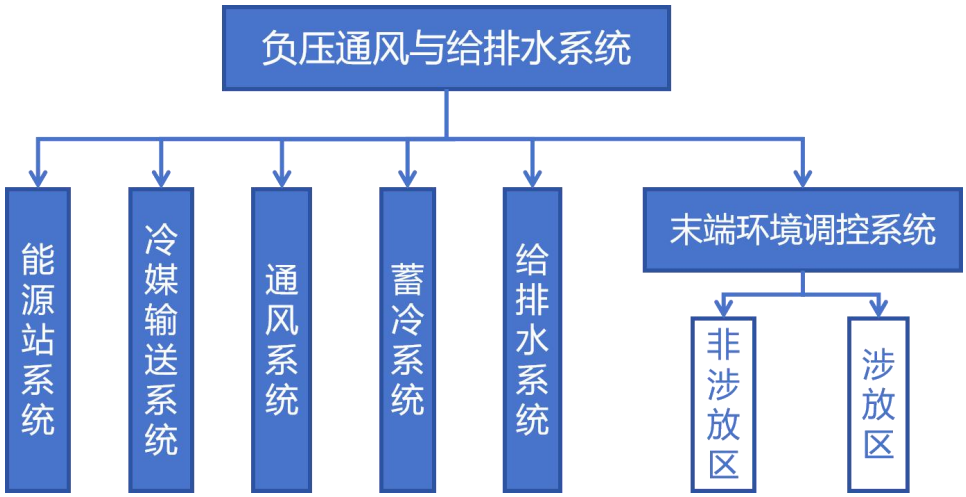


图3-38 系统组成结构示意图

①能源站系统为包层楼与氚燃料实验楼提供全年集中冷/热源，能源站按照高效机房组织配置，冷热源设备具备分段启停与负载调节能力，系统支持供回水温度、流量、压力等关键参数的集中监测与联动控制，并具备运行数据记录与能效分析能力。

②冷媒输送系统负责将能源站产生的冷/热量稳定输送至包层楼与氚燃料实验楼各用能系统，系统具备多支路水力分配、变流量调节与压差控制能力，配置在线压力/温度/流量监测装置，保障输配过程稳定与可控。

③通风系统（常规与涉放）面向两栋建筑物实现室内环境调节与运行工况支撑，其中包层楼常规暖通系统完成通风与空调环境调节；氚燃料实验楼涉氚负压通风系统实现负压维持、通风排风组织与空气洁净控制，并配置高效过滤与空气处理单元；工艺排风通过单筒自立式钢烟囱排放，烟囱高度70.8m。

④蓄冷系统通过冷量储存与分时释放机制，实现能源负荷削峰填谷，提升运行经济性与系统调节能力。系统具备冷量回收、按需切换与策略调度功能。

⑤给排水系统提供全区域生活与工艺供水保障，并实现废水的收集、隔离与安全排送，涉氚相关排水采用密封与防泄漏设计，并通过专用接口移交后续废水处理系统进行安全处理。

⑥末端环境调控系统建立覆盖能源站、冷热媒输送系统及两栋建筑物关键节点的监测与控制网络，实现对温度、湿度、风量、水量、压差与空气质量等参数的实时采集、异常报警与联锁控制，支撑能源站供能与末端环境调控的协同运行与运行状态可追溯管理。

3.2.14.1 通排风系统

本项目能源站位于包层楼一层东北区域，统一为包层楼与氚燃料实验楼提供全年集中冷/热源，冷热媒经输送管网送至两栋建筑物各用能系统。能源站内设置冷热源设备及配套循环输送设备，制取的冷冻水和热水经冷热媒输送系统送至两栋建筑物各用能系统。

⑴涉放通排风系统

涉放通排风系统服务于氚楼涉氚区域，通过建立分级负压环境，实现放射性气载污染物的定向控制与集中排放，系统维持涉氚房间及相关操作空间持续处于微负压状态，形成由清洁区向污染区的稳定压差梯度，防止氚气向非涉氚区域扩散。系统对涉氚操作过程中产生的气体进行集中收集，经多级过滤及必要的尾气处理后，通过专用排气筒高空排放，确保排放过程可控、可监测。事故工况下，系统保持连续运行能力，保障负压不失效并限制污染物外逸范围。

经核算，涉放通风量 200,000m³/h；C2 区换气次数 1~2 次/h，负压控制范围−80～−100 Pa；C3 区换气次数 2 次/h，负压控制范围−120～−140Pa。

涉放通风系统针对 C2、C3 分区采用独立排风、集中处理、统一高空排放的组织方式运行。系统通过控制送排风量比例及压差调节装置，按分级负压原则设计，C3 区域维持−120～−140Pa，C2 区域维持−80～−100Pa，通过压差闭环控制形成稳定梯度，使 C3 区域维持最低压力等级，C2 区域维持次级负压，形成稳定的C2→C3→排风系统的气流组织路径，确保空气由 C2 向 C3 单向流动并进入排风系统，保证空气由低污染级别区域向高污染级别区域单向流动，防止污染物向非放区域扩散。

C2、C3 各房间设置独立排风支路，经支管汇入排风干管后进入过滤处理单元。排风系统配置多级过滤装置，末端设置高效过滤单元，对气载颗粒物进行拦截。处理后的空气由排风机送至专用排气筒高空排放。系统连续运行，排风设备采用冗余配置，确保设计换气次数和压差控制要求持续满足。系统预留在线监测接口，与场所辐射监

测系统联动，实现运行状态与排放状态的实时监测。

涉放通风系统系统连续运行，排风机及控制系统采用双路电源供电，并接入柴油发电机备用电源。市电中断时自动切换，保证负压功能不中断。排风设备具备冗余能力，单台故障不影响分区负压控制。排风管道采用密闭连接结构。系统设置压差、风量及运行状态监测点，异常状态触发报警并与辐射监测系统联动。排风末端设置多级过滤单元，采用密封安装结构，并配置压差监测装置。事故工况下系统维持设计排风能力运行，所有气体经处理后通过专用排气筒排放。

项目涉放通排风系统主要设备如下表所示。

表3-53 项目涉放通排风系统主要设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	备注
1	涉放新风机组（C2区）		Q=92500 m³/h，静压3000 Pa，电功率132 kW	3	
2	涉放排风机组（C2区）		Q=103000 m³/h，静压5300 Pa，电功率280 kW	3	
3	高效过滤单元（C2区）		单套处理风量≥103000 m³/h，过滤等级H13	3	
4	涉放新风机组（C3区）		Q=9500 m³/h，电功率18 kW	2	
5	涉放排风机组（C3区）		Q=10500 m³/h，电功率11 kW	2	

⑵非放通排风系统

包层楼全部为非访区，全部设置常规暖通系统，用于满足实验及辅助用房的室内温湿度调节需求。

包层楼暖通系统主要承担实验及辅助用房的常规温湿度调节功能。系统运行过程中，冷热源设备根据负荷变化分段启停，循环水系统按需调节流量，末端换热设备完成室内冷量或热量释放，回水返回能源站形成闭式循环。末端环境调控系统建立覆盖能源站、冷热媒输送系统及两栋建筑物关键节点的监测与控制网络，实现温度、湿度、风量、水量、压差及空气质量等参数的实时采集、异常报警和联动控制。

氚燃料实验楼非放区主要房间有：

一层：气固介质除氚控制室、遥操作维护、设备预装间（门厅）、卫生通过间

二层：氚测量技术研发单元、涉放区中控室、应急防护设备间、调试间、实保控制室、值班室

屋面：水箱间、气瓶间

①包层楼空调系统

1）门厅、研发等大空间场所采用全空气低速风管空调系统，送风方式根据不同空间条件及使用需要采用顶送的送风方式，回风采用集中回风。系统新风比可调，过渡季最大新风量可达50%以上，排风系统风机风量与新风量对应控制。

2）测试平台等工艺房间采用高大空间空调器+低噪音立式空调，送风方式采用顶送+低位侧送相结合的方式。另外根据工艺需求，设置机械通风系统。

3）科研用房等区域采用风管式室内机+新风系统。新风系统按楼层设置，新风经新风空调机组处理后通过风管输送至各使用区域。

4）新风取风口远离废气排放 口，防止吸入烟雾或燃烧物，避免放射性物质释放带来安全问题。新风入口处设置与风机联锁启闭的电动密闭风阀。

5）新风空调机组、空调机组内设置空气净化装置，用以除尘、灭菌、分解有害挥发性气体并消除异味，保证室内空气品质，满足卫生防疫要求。

6）工作用途房间的空调系统冬季加湿方式采用湿膜。湿膜基材为无机抑菌材料，加湿效率大于60%。

7）空调冷/热水系统采用机械循环两管制异程式系统，冷源测定流量运行，负荷侧变流量运行，供回水总管上设置压差旁通调节系统压力变化。水系统采用低位定压装置补水定压，设置全自动在线加药装置处理水质。

8）每台空调机组、新风空调机组的回水管路上设置动态平衡电动调节阀，每台风机盘管的回水管路上设置带温差控制功能的开关式电动二通阀，避免大流量小温差现象发生。连接风机盘管支路的供回水支干管上设置静态平衡阀和区域压差控制阀。动态平衡电动调节阀、区域压差控制阀的流量和温度数据可实时监测并能远传至BAS系统。

9）变配电间、消控室等采用独立的变制冷剂流量多联机空调。室内机选用吊顶安装风管型或吊顶嵌入多相气流型。室内机及冷凝水管避免安装在电气设备的正上方，以防止可能的漏水隐患。

②氚燃料实验楼非放区空调系统

1）办公研发用房，设备预装间(门厅)设置风机盘营+新风空调系统。办公研发用房，设备预装间(门厅)集中设置1个新风系统，新风空调机组经初中效过滤，夏季冷却，冬季加热处理后通过风管输送至各房间，新风空调机组设置在三层送风机房内

2）卫生通过间，卫生间设置风机盘管空调系统。对应卫生通过间排风系统，设计1个新风系统，新风量小于排风量，维持卫生通过间负压。新风系统采用1台吊顶式新风空调机组，室外新风经初中效过滤，夏季冷却，冬季加热后送入家庭服间和工作服间，新风机组设在家庭服间吊顶内。

3）风机盘管和新风室调机组冷热源来自包层研发楼能源站，空调冷热水系统采用机械循环两管制异程式系　统。每台新风空调机组回水管设置动态平衡电动调节阀，每台风机盘管回水管设置带温差控制功能的开关式电动二通阀，供回水支干管上设置静态平衡阀和区域压差控制阀。

4）风机盘管和新风空调机组冷凝水就近集中排至卫生间拖布池或地漏。

5）值班室、配电室、控制室等采用独立冷热源的分体空调，室外机就近设在屋面或外墙，室内机冷凝水就近排至卫生间拖布池或地漏。

非放通排风系统安全设计遵循稳定、可控、可监测原则。能源站冷热源设备、循环水泵、管道、阀门及监测仪表按设计要求配置，系统运行参数纳入中央控制平台统一管理，实现温湿度、风量、压差、水量及电功率等关键参数的在线监测、历史记录、多级报警及联动控制。能源站及冷热媒输送系统通过分段启停、变流量调节和参数联动控制保障供能过程稳定；末端环境调控系统对异常工况具备报警和联锁响应能力。

非放通排风系统总冷负荷6680 kW，总热负荷2750 kW。室内环境控制要求为：有人设备间18～25℃、40%～60%RH，无人设备间18～35℃、20%～60%RH。

项目非放通排风系统主要设备如下表所示。

表3-54 项目非放通排风系统主要设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	备注
1	冷水机组		制冷量：1406kW；冷水进出口温度：7/12℃；	1	
2	冷水机组		制冷量2988 kW；冷水进出口温度7/12℃	2	
3	中温式热泵机组		制热量：2000kW；热水进出口温度：40/45℃ 蒸发器进出口温度：		

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	备注
			28/24℃		
4	风冷热泵		制热量950 kW；热水进出口温度40/45℃；制冷量920 kW；冷水进出口温度7/12℃	2	
5	风冷热泵		制热量830 kW；热水进出口温度40/45℃；制冷量800 kW；冷水进出口温度7/12℃	2	
6	冷却塔		流量：900m³/h	2	室外设备区域
7	冷冻水泵		流量：265m/h；水泵扬程32m；	1	
8	冷冻水泵		流量：565m/h；水泵扬程22m；	2	
9	热水泵		流量200 m³/h；水泵扬程40 m	3	
10	热水泵		流量：380m/h；水泵扬程32m；	1	

3.2.14.2 给排水

本工程的给水水源为市政自来水。

根据项目的需求，本工程生活及消防用水从项目拟建场址周边不同的市政供水管网引入两路DN300进水管，最不利市政水压按0.25Mpa计。本项目采用分质供水，部分工艺和实验室提供去离子水和软化水（去离子水/纯水以市政自来水为原水，进行除盐除氧处理。原水需要流量为40 T/h）；绿化及室外地面冲洗用水由雨水收集回用系统提供（处理水质满足各使用场所使用要求）；其他区域采用市政自来水直接供给。

本项目冷凝水、实验室废水、核辐射污水、工艺排水单独排放，包层研发楼室内污废分流（考虑收集废水进行中水回用）、其余区域室内污废水合流，室外雨污水分流。涉核污水经过无害化处理达标后排至室外污水管网。部分需要处理的实验室废水处理达标后排至室外污水管网。基地生活污水汇总后，经化粪池后排至市政污水管网。污水排水水质应满足当地关于排放限制的规定。部分雨水回收处理回用，其余雨水合并后就近排入市政雨水管网。

根据有关规定，本项目考虑设置中水回用系统。中水水源主要收集部分公共卫生间生活废水，可收集的生活废水量约为3.2m³/d。中水主要用于雨水回收系统清水池补

水，雨水回收系统回用于室外绿化浇灌、室外场地冲洗等，最高日总用水量为82.8m³/d，最大时总用水量13.8m³/h。中水处理系统采用MBR法，规模为5m³/d。

表3-55 项目用水设计参数

区域	用水标准	使用时间（小时）	小时变化系数
冷却塔补水	1.5%循环流量	24	1
科研用房	40L/人·班	8	1.5
实验用房	125L/人·日	8	2.0
绿化	2L/㎡·次	6	1
室外场地冲洗	2L/㎡·次	6	1
未预计水量按总水量的10%计			

本项目最高日总用水量为127.4m³/d，最大时总用水量23.7m³/h。

其中设计用水标准及用水量

用水量包括人员生活用水量、实验用水量以及消防用水量。

本项目建成后，设施正常运转时，氚燃料实验楼内工作人员为90人，考虑偶然来访人员，短期最大人数可达135人，故设施投运后最大人数按135人考虑。

表3-56 生活用水量表

用水项目名称	使用单位数	单位	用水量标准(L)	小时变化系数	使用时数（h）	用水量（m³）		
						平均时用水量	最大时用水量	最高日用水量
人员生活用水	135人	每人每天	125	2.0	8	2.11	4.22	16.88
未预见水量	用水量之和的10%					0.21	0.42	1.69
合计						2.32	4.64	18.57

给排水系统涉及的主要设备如下表所示。

表3-57 项目给排水系统主要设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台(套)数	备注
1	排水泵		Q=5 m³/h，H=15～20 m，304L	4	

3.2.15 公用技术系统

公用技术系统主要为聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台提供公共服务和技术支持，主要包括除盐水供应系统、呼吸空气供应系统、氮气供应系统、压缩空气供应系统及稀有气体供应系统。

（1）除盐水供应系统

功能是生产、储存、供应和分配足够质量、数量和压力的脱盐水，用于客户系统的工艺使用或封闭冷却水回路的补充水。除盐水由超滤+双级反渗透+EDI工艺制备。主要设计参数如下：

① 设计压力：8 Bar（g），供应压力3-5Bar（g）；

② 供应电阻率：≥2 MΩ·cm；

③ 设计在 -15°C至40°C 范围内运行；

④ 制水能力：20 Nm^3/h；配水能力：20 Nm^3/h；

⑤ 管道分配网络的所有组件都应尽可能采用耐腐蚀的不锈钢或类似材料。

（2）压缩空气供应系统

功能是生产、储存、供应和分配足够质量、数量和压力的压缩空气，用于客户系统的气动部件动力源、设备冲洗等使用。压缩空气由空气压缩机经过过滤、除油污后制备。主要设计参数如下：

① 设计压力： 13 Bar(g)，供应压力：8 Bar(g)；

② 计在温度 -15°C至40°C 范围内运行；

③ 总流量：700 Nm^3/h ；

④ 管道分配网络的所有组件都应尽可能采用耐腐蚀的不锈钢或类似材料。

（3）氮气供应与分配系统要求

功能是生产、储存、供应和分配足够质量、数量和压力的氮气，用于客户系统的保护气、设备冲洗等使用。氮气由工艺制氮机（PSA变压吸附制氮）制备。主要设计参数如下：

① 设计压力： 13 Bar(g)，供应压力：8 Bar(g)；

② 设计在温度 -15°C至40°C 范围内运行；

③ 总流量：400 Nm^3/h；

④ 管道分配网络的所有组件都应尽可能采用耐腐蚀的不锈钢或类似材料。

（4）呼吸空气供应与分配系统要求

功能是生产、储存、供应和分配足够质量、数量和压力的呼吸空气，用于客户系统的呼吸防护装置的人员使用。呼吸空气由空气压缩机经过过滤、除油污和除菌后制备。主要设计参数如下：

① 设计压力：13 Bar(g)，供应压力：8 Bar(g)；

② 设计在 -15°C至40°C 范围内运行；

③ 总流量：360 Nm^3/h；

④ 管道分配网络的所有组件都应尽可能采用耐腐蚀的不锈钢或类似材料。

（5）稀有气体供应与分配系统要求

功能是储存、供应和分配足够质量、数量和压力的稀有气体，如氩气（Ar）、氢气（H_2）、氦气（He）、氖气（Ne）、氘气（D_2）用于客户系统的实验用气、保护气、冷却剂等使用。

稀有气体直接采购符合质量要求的气体并存储在洁净的储罐中，通过压缩机输送至客户。

公用技术系统涉及的主要设备如下表所示。

表3-58 项目公用技术系统主要设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套）数	用途
1	空气压缩机（无油）		500Nm^3/h，正常压力 12Bar，最小 10Bar，	2	空气压缩
2	空气压缩机干燥系统		500Nm^3/h，干燥剂：氧化铝，最大压降：138kpa	1	去除压缩空气中的水分
3	氮气压缩机		500Nm^3/h，正常压力 12Bar，最小 10Bar，压缩系数 1.0	2	对氮气进行增压和输送
4	在线除盐系统		处理能力 20t/h	1	生产除盐水
5	除盐水水泵		单台流量 10t/h，变频控制	2	除盐水转移输送

3.2.16 智能控制系统

核聚变领域因其高安全要求与复杂系统特性，亟须通过数字仿真实现设备及系统的全生命周期管理、多物理场耦合仿真及智能运维决策，为核聚变装置的设计验证与安全管控提供技术支撑。

数字仿真技术可为装置的研发提供技术赋能。通过构建与物理装置完全映射的虚拟模型，设计团队可在数字空间实现多物理场耦合仿真、参数化快速迭代和跨学科协同优化，大幅提升设计验证效率与精度。基于高精度仿真模型，设计者能够直观分析复杂工况下设备和系统的热－力－流耦合效应，精准定位潜在设计缺陷，并通过虚拟测试验证改进方案的可行性，显著降低物理原型试错成本。

此外，数字仿真支持全要素设计数据融合与动态反馈机制。通过集成运行特性、工艺约束、安全阈值等多维度数据，系统可实时评估设计参数对装置性能的影响，形成“仿真验证→问题诊断→方案迭代”的闭环优化链路。这一过程不仅可加速跨学科设计协同，更通过虚拟环境下的极限工况模拟，提前暴露传统设计方法难以预见的系统级风险，为核聚变装置的可靠性设计、运行等提供科学依据。

从智能控制系统功能及其工作过程可知，该系统基本无放射性污染物、非放射性污染物产生。

3.3 污染源项

3.3.1 放射性污染源项及源强分析

3.3.1.1 气载流出物

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台涉氚操作工艺流程的产污节点主要有如下几个：

（1）各涉氚操作平台系统，如内燃料循环平台、固态包层氚提取与回收实验平台、液态包层氚提取与回收实验平台、介质除氚实验平台、涉氚关键材料实验平台、氚安全防护平台等，其涉及的各涉氚操作设备均会产生含氚尾气，对应的手套箱也会产生含氚减压排出气。平台设置了正常工况排放气除氚单元（N-VDS）并设置接收浓度，对上述含氚气体进行深度除氚处理至达标后排放，对环境的影响可控。

（2）内燃料循环平台的分析单元在各分析环节可能产生气态或液态污染物。含高浓度氚的分析尾气将用化学床吸收，不外排；低浓度氚分析尾气通过N-VDS进行深度除氚处理，达标后排放；含氚水完成分析后，将送至水去氚化单元除氚或集中暂存，不直接外排。因此，分析环节虽然会产污，但对环境的影响可控。

（3）气氛除氚单元（含手套箱除氚单元、房间空气气氛除氚单元和排放气除氚单元）运行过程中会产生含氚水。上述含氚水送至含氚水除氚单元进行水去氚化处理，处理后产生含微量氚的氢气（氚浓度参考值：$7.26\times10^{3}Bq/m^{3}$）直接排放；含微量氚的氧气通入N-VDS除氚处理至达标后排放，对环境的影响可控。

平台向环境排放的含氚废气主要是氚气（HT）和氚化水（HTO），排出路径包括排放气体除氚单元（VDS）尾气、含氚水除氚单元（WDS）排出气、通排风系统（HVAC）排出气，所有的排放出口均经过监测，达标之后再排放。如果房间内空气中氚浓度监测结果超过排放限值，则关闭HVAC系统的排风隔离阀，启动VDS除氚系统进行除氚处理。如果除氚系统（VDS）尾气监测结果超过尾气排放限值，则关闭隔离阀，进行气体循环除氚处理。其中，VDS和WDS的取样点为系统尾气排放口位置，HVAC取样点为房间内的排风口位置，测试方法主要是电离室测量，在浓度满足排放限值要求后送入烟囱排放。此外，气态流出物排出通道将连接在线监测及离线取样设备，采集气体返回烟囱排出，测量方式采用电离室在线监测和鼓泡法、冷凝法等取样检测。

平台项目气载流出物、液态流出物排放及监测点位如下图所示。

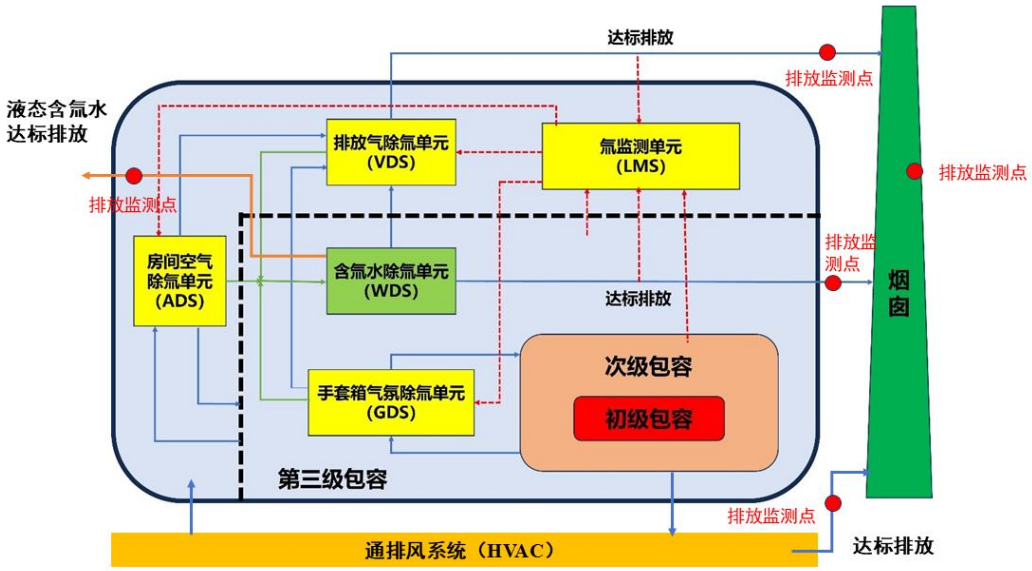


图3-39 氚楼气(液)态流出物排放及监测点位示意图

排放气体除氚单元（VDS）排放量估算：VDS与内燃料循环平台、介质除氚实验平台、氚辐射安全效应实验平台以及涉氚部件维护及处理实验平台、涉氚材料测试平台等存在界面接口。正常工况下的主要功能包括：①各涉氚研究平台及氚处理单元的工艺尾气、排出气的深度除氚及排放；②各氚处理单元次级包容体吹扫气及减压气的深度除氚及排放。N-VDS的处理流量最大为800 Nm^3/h，可以满足平台两个最大的手套箱换气（300Nm^3/h×2）及其他系统产生的真空排出气（如WDS产生的电解氧气，50Nm^3/h等）的同时除氚排放。N-VDS的尾气接收浓度限值为≤3.7E+9 Bq/m^3，除氚效率≥99.9%，处理后的气体浓度约为3.7E+6Bq/m^3。因此，考虑到本平台的实验性质，涉及氚的频繁操作及考核验证类实验，N-VDS的实际排放浓度以3.7E+6Bq/m^3计，处理流量800 Nm^3/h，年工作时间按4000 h计，则全年通过N-VDS向环境的排放量约为0.0318g。

含氚水除氚单元（WDS）排放量估算：含氚水除氚单元与气氛除氚系统、氢同位素预浓集单元、氢同位素深度浓集单元等系统存在界面接口，主要功能为处理正常运行、维修和事故等工况产生的含氚水并回收其中的氚。正常工况下，WDS的主要源项来源是气氛除氚单元（含VDS、ADS和GDS）产生的高浓含氚水，其浓度约为3.7×10^9~1.1×10^{12}Bq/L。预计含氚氢气的排放中HT和HTO形式分别为1×10^4 Bq/Nm^3和1×10^3 Bq/Nm^3，排放流量为50Nm^3/h，仅在CECE运行时连续排放，CECE按照年运行4000小时计算，年氚排放量为6.2×10^{-6} g。

通排风系统（HVAC）排放量估算：通排风系统与平台涉氚房间区域相连，主要功能是对相关区域进行负压通排风。正常工况下，涉氚房间的氚浓度在$10^3Bq/m^3$量级，该浓度远低于废气排放限值3.7×10^7 Bq/m^3，可直接通过烟囱排放。实验平台整体通排风流量为124100 m^3/h，按年运行8000h，实际控制浓度3.7×10^3 Bq/m^3计，全年通过HVAC向环境排放的氚量约0.0096g。

正常工况下，氚实验楼含氚废气排放情况如下表所示。

表3-59 含氚废气排放情况一览表

系统	设定的尾气排放限值（Bq/m^3）	排放流量（$m^3\cdot h^{-1}$）	年氚排放量（$g\cdot a^{-1}$）	排放方式	备注
N-VDS	3.7×10^7	800	0.0318	连续	正常工况：年运行4000 h，实际控制浓度按3.7×10^6 Bq/m^3计

系统	设定的尾气排放限值（Bq/m^3）	排放流量（m^3·h^{-1}）	年氚排放量（g·a^{-1}）	排放方式	备注
WDS		50	6.2×10^{-6}	连续	正常工况：CECE按年运行4000h计，HT和HTO形式分别为1×10^4 Bq/Nm^{3}和1×10^3 Bq/Nm^3
HVAC		124100	0.0096	连续	正常工况：按年运行8000h计，实际控制浓度按3.7×10^3 Bq/m^{3}计

3.3.1.2 液态流出物

平台项目主要的放射性废液是来自于氚实验楼的含氚废水，正常运行工况下含氚废水主要来源于除氚系统回收的含氚水、HVAC和局部空冷器冷凝水、人员进出控制区洗涤废水。平台项目之氚循环和辐射安全实验系统在运行和维修期间都会产生氚化水。各种气氛除氚系统，包括通排风除氚系统（VDS）、空气除氚系统（ADS）和手套箱除氚系统（GDS），经过催化氧化过程都会产生氚化水，这是主要来源；各类涉氚部件维护过程和除氚过程中也会产生含氚水；最终流入水去氚化系统（WDS）的氚水储罐。

不同来源氚水的源项特点如下：

⑴气氛除氚工艺（含VDS、ADS和GDS）主要产生高浓含氚水，其浓度大致3.7E+9~1.1E+12 Bq/kg；

⑵维修和异常状况可产生浓度高于3.7E+12 Bq/kg 的含氚水；

⑶氚实验楼C2、C3等区域的暖通空调系统HVAC及局部空冷器LAC运行过程中产生低浓含氚废水；

⑷部件清洗等操作可产生少量含氚废水。

含氚废水排放方面，对氚楼实验废水中氚浓度进行取样监测后，满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入市政污水管网；如果含氚浓度超标，将输送至含氚水除氚单元（WDS）系统进行除氚处理，处理达标后再排放。

氚实验楼正常运行情况下产生的含氚废水源项及源强统计如下：

表3-60 正常工况下含氚废水源项及源强

来源	含氚废水量	活度浓度
N-VDS	高浓23.96m^3/a，低浓25.64 m^3/a	3.7E+9~1.1E+12 Bq/kg
S-VDS	高浓24.47m^3/a，低浓24.03 m^3/a	
ADS	高浓22m^3/a，低浓24.5 m^3/a	
GDS	0.66 m^3/a	

来源	含氚废水量	活度浓度
淋浴间废水	人单次洗涤使用50L/次，每天最大40人洗涤，一年涉氚运行200天，总计400 m^3	<10Bq/L
消防系统废水	少量	<10Bq/L
局部空冷器产生的冷凝水	少量	<3.7E+4 Bq/kg

3.3.1.3 放射性固体废物

氚实验楼各子系统实验验证过程中，所涉及的非密封放射性物质为氚，无其他放射性物质同位素或射线装置，因此，各子系统所产生的放射性固体废物只涉及氚，按照可燃性，可分为不可燃放射性固废、可燃放射性固废。

⑴不可燃放射性固体废物

氚实验楼在正常工况下产生的不可燃放射性固体废物如下表所示。

表3-61 正常工况不可燃放射性固体废物统计

序号	平台	单元	固废类型	产生量 kg/a	氚比活度 Bq/kg	
1	内燃料循环平台	氘氚贮存与供给单元	外来氚床	108	1.00E+12	
2		排灰气处理单元	热金属除杂床	20	5.00E+05	
3		低温精馏单元	气体循环泵	10	1.00E+05	
4			平衡反应器	2.5	5.00E+05	
5		界面连接与支撑单元	转移泵	40	1.00E+05	
6	液态包层氚提取系统	氢同位素深度浓集单元	导热油	200	5.50E+05	
7			气路阀门	3.5	1.00E+05	
8		液态包层氚提取单元	锂铅管道、阀门	1800	1.00E+05	
9			填料ZrCo	90	1.00E+05	
10			渗透窗	500	1.00E+05	
11			填料ZrMnFe	100	1.00E+05	
12			鼓泡塔及鼓泡塔填料	900	1.00E+05	
13	氚安全防护平台	手套箱气氛除氚	分子筛床	300	5.00E+10	
14		排放气除氚单元	气体转移泵	25	1.00E+06	
15			过滤器滤芯	150	1.00E+04	
16			阀门、传感器等	100	1.00E+04	
17			管道过滤器	300	1.00E+04	
18			催化床填料	400	1.00E+04	
19			齿轮泵（泵头）	10	1.00E+04	
20			喷淋洗脱塔	2800	1.00E+04	
21			喷淋洗脱填料	912	1.00E+04	
22		含氚水除氚单元（WD+CECE+CD）	活性炭床	675	1.00E+05	
23			离子交换树脂床	220	1.00E+05	
24			气体循环泵	10	1.00E+05	

序号	平台	单元	固废类型	产生量 kg/a	氚比活度 Bq/kg	
25			平衡反应器	2.5	5.00E+05	
26			分子筛床	10	5.00E+05	
27			热金属除杂床	30	5.00E+05	
28			钯管净化器	200	1.00E+05	
29			离子交换树脂	200	1.00E+05	
30			PEM电解槽	400	1.00E+05	
31			齿轮泵	5	1.00E+05	
32			磁驱循环泵	5	1.00E+05	
33		氚监测单元	气体循环泵	20	1.00E+05	
合计				10548.5		

⑵可燃放射性固体废物

氚实验楼按照每人每天平均产生可燃固体废物量0.15kg估算，根据项目建设单位提供的数据，氚实验楼劳动定员40人，每人每年工作200天，则年产生的可燃放射性固体废物量约为1.20t。

帽子、手套、口罩、鞋套、防护服等可燃废物的活度较低，小于10×4 Bq/kg。

3.3.2 非放射性污染源项及源强分析

3.3.2.1 废气污染源项及源强分析

本项目非放射性废气污染源主要有结构材料熔炼制备平台各种熔炼炉熔炼烟尘，加料、浇筑过程中产生的烟尘；结构材料粉末冶金制备平台熔化炉产生的熔化烟气，制粉、球磨、粉末成型过程中排放的粉尘；机械合金化工艺平台加料、研磨粉尘产生的粉尘；热等静压（HIP）加工平台产生的烟尘、热压烧结（HP）加工加热炉产生的烟尘；成型与加工平台小型样品增材制造产生的工艺尾气、粉末清理产生的粉尘；轧制变形加工平台、热处理加热炉产生的烟尘；固态氚增殖材料锂陶瓷小球制粉系统研磨、分级及输送过程中产生的粉尘，熔融喷雾造粒系统、离心造粒系统、加料和喷雾过程中产生的粉尘，干燥烧结系统产生的烟尘；中子倍增材料批量化制备球磨产生的粉尘，铍基棒材烧结系统加料和喷雾过程中产生的粉尘；热等静压系统及机加工、筛分系统产生的粉尘；液态包层功能材料批量化制备热处理系统、界面沉积系统化学气相渗透系统、压力浸渍系统产生的有机废气，裂解系统产生有机废气；磨削过程产生的粉尘；包层原型模块先进制造平台产生的粉尘、熔炼废气。另外还有应急柴油发电机运行过程中产生的废气。

非放射性废气污染治理措施主要如下：

⑴结构材料熔炼制备平台真空感应熔炼炉、电渣重熔炉、卧式熔炼炉产生的熔炼废气及加料、浇筑烟尘。

①真空感应熔炼炉、电渣重熔炉、卧式熔炼炉产生的熔炼烟尘，拟在真空泵前加冷却过滤罐+真空泵后加袋式除尘器（HEPA），烟气经处理后进入排风管道，经15m排气筒排放。

②加料产生的粉尘采用侧吸罩收集后进入袋式除尘器，处理后的废气进入排风管道，经15m排气筒排放。

⑵结构材料粉末冶金制备平台熔化炉产生的熔化烟尘，制粉、球磨、粉末成型排放的粉尘。

①真空熔化炉产生的熔炼废气，拟在真空泵前加过滤罐+真空泵后袋式除尘器（HEPA），烟气经处理后进入排风管道，经15m排气筒排放。

②制粉、球磨、粉末成型排放的粉尘进入袋式除尘器处理后，进入排风管道，最终经15m排气筒排放。

⑶机械合金化工艺平台加料、研磨粉尘产生的粉尘拟进入袋式除尘器处理后，进入进入排风管道，最终经15m排气筒排放。

⑷热等静压（HIP）加工平台加热炉、热压烧结（HP）加工平台烧结炉产生的烟气经全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（99.99%）高效过滤后经15m排气筒排放。

⑸成型与加工平台小型样品增材制造工艺产生的工艺尾气经全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（99.99%）高效过滤后经15m排气筒排放。

⑹粉末清理产生的粉尘经侧吸罩收集后进入袋式除尘器处理后进入排风管道，最终经15m排气筒排放。

⑺轧制变形加工平台加热炉产生的烟气经全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（99.99%）高效过滤后经15m排气筒排放。

⑺热处理加热炉产生的烟气经全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（99.99%）高效过滤后经15m排气筒排放。

⑻固态氚增殖材料锂陶瓷小球系统

①制粉系统研磨、分级及输送过程中产生的粉尘，经脉冲袋式除尘器（覆膜滤袋，过滤精度达0.3μm）后，进入排风管道，粉尘排放浓度低于10mg/m³。

②熔融喷雾造粒系统、离心造粒系统加料过程和喷雾过程中产生的含锂粉尘经收集，进入袋式除尘器，经处理后经排气筒排放。

③干燥烧结系统产生的含锂粉尘，经负压粉尘收集系统后，经袋式除尘器处理后排放。

④筛分及分装系统产生的含锂粉尘，经收集进入袋式除尘器，经处理后经排气筒排放。

⑼中子倍增材料批量化制备系统

①球磨产生的粉尘，进入袋式除尘器，经处理后经排气筒排放。

②铍基棒材烧结系统将加料过程和喷雾过程中产生的含锂粉尘收集，进入袋式除尘器，经处理后经排气筒排放。

③热等静压系统产生的粉尘，系统配置负压粉尘收集装置，将真空泵组以及装卸粉料过程中产生的粉尘收集后，进入袋式除尘器，经处理后经排气筒排放。

④机加工产生的粉尘。切割过程中产生的粉尘，通过集尘罩收集后进入过滤器，经处理后的粉尘经排气筒排放。

⑤铍基小球制备系统筛分系统产生粉尘。在振动筛分机的上方或周围设集尘罩，负责捕集筛分过程中产生的粉尘，收集后的粉尘进入过滤器，经处理后的粉尘经排气筒排放。

⑼液态包层功能材料批量化制备系统

①热处理系统碳化硅纤维生产过程中，可能会有一些挥发性杂质（如有机物、气体等）附着在纤维表面。热处理过程中产生的有机废气经两级碱洗+除雾器、活性炭吸附、催化氧化、旋风+布袋除尘经排气筒排放。

②界面沉积系统尾气处理通过双层水冷冷凝管道和可更换玻璃纤维滤芯实现副产物收集。再经两级碱洗+除雾器、活性炭吸附、催化氧化、旋风+布袋除尘排放。

③化学气相渗透系统、压力浸渍系统产生的有机废气：甲基三氯硅烷，尾气经双层水冷夹套冷凝收集副产物，再经两级碱洗+除雾器、活性炭吸附、催化氧化、旋风+布袋除尘后排放。

④真空裂解系统产生的裂解废气主要污染物为甲烷、氯化氢，经两级碱洗+除雾器、活性炭吸附、催化氧化、旋风+布袋除尘排放。

⑤磨削过程产生的粉尘，通过集尘罩收集后进入过滤器，经处理后的粉尘经排气筒排放。

⑽包层原型模块先进制造平台初步分析污染物为粉尘、熔炼废气。主要治理措施为除尘过滤器：在高压特种风机的后端配置有防静电滤芯式除尘器，进一步过滤惰性气体。

⑾激光增材制造设备、电子束增材制造工艺尾气：系统配置负压粉尘收集装置，将真空泵组以及装卸粉料过程中产生的粉尘过滤收集，避免扩散到环境对操作人员造成侵害。

⑿应急柴油发电机废气

项目设有2台应急柴油发电机，其属于备用设备，使用频率低，只有在市政供电都发生故障时，才开启使用，会产生应急柴油发电机废气，主要污染物颗粒物、二氧化硫、氮氧化物。

考虑到部分环节一旦断电，造成重大经济损失，项目拟设 2 台功率1250kW 的备用柴油发电机作为备用电源。所选用发电机组采用优质轻质柴油，根据《普通柴油》（GB252-2011）（2013 年 7 月 1 日实施）中规定含硫量不大于 0.035%，灰分小于 0.01%。因此，项目拟使用含硫率不大于0.035%的0#轻质柴油。根据建设单位提供资料，2000 千瓦发电机在满功率状态下，每小时耗油量为455L 柴油。场区共设有2个日用柴油间，每个日用柴油间柴油储存量为0.8t。

根据市政供电情况，项目所在区域供电较为稳定，使用发电机的几率较为有限，发电机使用频率按每月使用时间2 小时，全年运行时间24 小时。则备用发电机组年耗油约为10920L（约合9.4t，柴油密度取860kg/m^3）。

根据环评工程师注册培训手册教材《社会区域》给出的计算参数：发电机运行污染物排放系数为：NO_x=2.56g/L，烟尘：0.714g/L。

根据《大气污染工程师手册》，当空气过剩系数为 1.0 时，1kg 柴油产生的烟气量约为11Nm^3，一般柴油发电机空气过剩系数 1.8，则发电机每燃烧 1kg 柴油产生的烟气量约为20Nm^3。

应急柴油发电机废气经 1 根排气筒高出屋面4m排放，经核算，应急柴油发电机废气中主要污染物烟尘排放量约为 7.80kg/a，排放速率约为0.325kg/h，排放浓度约为41.49mg/m^3；二氧化硫排放量约为6.58kg/a，排放速率约为0.274kg/h，排放浓度约为35.00mg/m^3；氮氧化物排放量约为27.96kg/a；排放速率约为 1.165kg/h，排放浓度约为148.72mg/m^3，烟气量约为7800m^3/h。

柴油发电机属于备用设备，使用频率低，只有在市政供电都发生故障时，才开启使用。应急柴油发电机废气主要污染物排放量小且排放持续时间间短，不会对周围大气环境产生明显影响。

根据初步工程分析，本项目包层楼大气污染物产生情况如下表所示。

表3-62 大气污染物产排污情况

污染源	污染物	产生			治理措施	排放		
		废气量 m^3/h	产生量t/a	浓度 mg/m^3		速率 kg/h	排放量t/a	浓度 mg/m^3
结构材料熔炼制备平台								
各种熔炼炉	烟尘	2000	极少	/	真空泵前加冷却过滤罐+真空泵后加袋式除尘器（HEPA）	/	可忽略	/
结构材料粉末冶金制备平台								
制粉平台熔化炉	烟尘	/	极少	/	真空泵前加冷却过滤罐+真空泵后加袋式除尘器（HEPA）	/	可忽略	/
制粉、球磨、粉末成型	粉尘	/	极少	/	袋式除尘器	/	可忽略	/
机械合金化工艺平台加料、研磨	粉尘	/	极少	/	袋式除尘器	/	可忽略	/
热等静压（HIP）加工平台加热炉	烟尘	/	/	/	全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（99.99%）高效过滤	/	/	/
热压烧结（HP）加工平台烧结炉	烟尘	/	极少	/	全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（99.99%）高效过滤	/	可忽略	/
成型与加工平台小	工艺尾气	/	极少	/	全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（	/	可忽略	/

污染源	污染物	产生			治理措施	排放		
		废气量 m^3/h	产生量t/a	浓度 mg/m^3		速率 kg/h	排放量t/a	浓度 mg/m^3
型样品增材制造					99.99%）高效过滤			
增材制造粉末清理	粉尘	/	极少	/	侧吸罩收集+袋式除尘器	/	可忽略	/
轧制变形加工平台加热炉	烟尘	/	极少	/	全密闭系统+多级旋风分离+HEPA（99.99%）高效过滤	/	可忽略	/
固态氚增殖材料锂陶瓷小球系统								
制粉系统研磨、分级及输送过程	锂粉尘	400	0.02	＜30	脉冲袋式除尘器（覆膜滤袋，过滤精度达0.3μm）	0.0012	0.0002	＜10
熔融喷雾造粒、离心造粒、加料和喷雾	锂粉尘	400	0.032	＜50	脉冲袋式除尘器（覆膜滤袋，过滤精度达0.3μm）	0.0002	0.0003	＜10
干燥烧结	锂烟尘	无	极少	0	负压收集+脉冲袋式除尘器（覆膜滤袋，过滤精度达0.3μm）	0	0	0
筛分、分装	锂粉尘	/	极少	/	脉冲袋式除尘器（覆膜滤袋，过滤精度达0.3μm）	/	极少	/
中子倍增材料批量化制备系统								
氧控操作生产线	铍粉	无	无	无	该生产线为控氧全程密封，且有专门的铍粉收集系统，放置于空气净化洁净间中，且与空气净化系统相连，无污染物排放	无	无	无
粉体混料系统	铍粉	无	无	无	该系统运行时，铍粉密封于混料容器中，无粉尘泄露；且该系统放置在空气净化洁净间中	无	无	无
自动装料及振实平台	铍粉	无	无	无	该系统置于氧控操作生产线，无污染物排放	无	无	无
等离子旋转电极造粒设备	铍粉	抽真空过程产生的空气	无	无	烧结设备在真空状态下运行，放置于空气净化洁净间中，且与空气净化系统相连，无污染物产生	无	无	无

污染源	污染物	产生			治理措施	排放		
		废气量 m^3/h	产生量t/a	浓度 mg/m^3		速率 kg/h	排放量t/a	浓度 mg/m^3
冷等静压系统	铍粉	无	无	无	铍粉装料过程在氧控操作生产线中完成，冷等静压系统放置于空气净化洁净间中，运行过程中无污染产生	无	无	无
热等静压系统	铍粉	无	无	无	铍棒材的装料过程在氧控操作生产线中完成，热等静压系统放置于空气净化洁净间中，运行过程中无污染产生	无	无	无
切割磨抛设备	铍屑及加工废液	无	无	无	该设备放置于空气净化洁净间中，加工过程中产生的铍屑及加工废液均可全部收集	无	无	无
液态包层流道插件制备系统								
碳化硅生产线（甲基三氯硅烷蒸发器、化学气相渗透炉、聚碳硅烷热解炉）	HCl		0.01	10	两级碱洗＋除雾器、活性炭吸附、催化氧化、旋风＋布袋	0.001	0.001	1.67
	硅氯烷（$SiCl_4$/$SiCl_2$）		0.054	9		0.0054	0.0054	0.9
	CH_4、C_2H_4、C_2H_2		0.01	10		0.12	0.12	1
	有机硅蒸气		0.018	3		0.0018	0.0018	0.3
磨削过程	粉尘	2000	0.01	\	集气罩+袋式过滤器	0.0004	0.001	0.18

3.3.2.2 废水污染源项及源强分析

根据建设项目工程分析，本项目废水主要为循环冷却系统排水、生活污水，直接排入市政污水管网。

（1）生活污水

根据建设单位提供资料，本项目建成后，场所内总人数为135人，均不在厂内食宿。职工生活用水按每人每天用水量125L 计算。经计算，生活用水的总用水量大约为16.8m^3/d，即5062m^3/a。根据《环境统计手册》，生活污水的产生量取用水量的80%，则生活污水排放量约为4050m^3/a（全年工作日按300 天计算）。

（2）循环冷却系统排水

本项目设有循环冷却系统对场内的设备等进行循环冷却，冷却介质为供应的去离子水，冷却方式为间接冷却。根据建设单位提供资料，该循环系统的循环量设计为6000m³/h，年工作时间约为4500h，循环冷却水池容积约为3000m³，平均两年更换一次，循环冷却用水的损耗量约占循环量的0.01%。经核算，本项目循环冷却用水量约为27000000m³/a，循环冷却废水产生量约为2700m³/a。

拟建项目废水产生量、水质、污染物产生情况见下表。

表3-63 废水产排污情况

废水类别	废水量t/a	污染物	产生情况		治理措施	纳管情况		最终去向
			产生浓度mg/L	产生量t/a		纳管浓度mg/L	纳管排放量t/a	
生活污水	4050	COD	≤300	1.22	直接排放	≤300	1.22	望塘污水处理厂
		pH	6~9	—		6~9	—	
		BOD_5	≤150	0.61		≤150	0.61	
		SS	≤180	0.73		≤180	0.73	
循环冷却水排水	2700	盐分	≤10	270000	直接排放	≤10	270000	望塘污水处理厂

表 3-64 建设项目废水产生情况一览表

项目		废水量	pH	COD	BOD_5	SS	NH_3-N
循环冷却系统排水	产生浓度（mg/L）	/	6~9	50	30	80	/
	产生量（t/a）	2700	/	0.14	0.08	0.22	/
生活污水	产生浓度（mg/L）	/	6~9	300	150	180	25
	产生量（t/a）	4050	/	1.22	0.61	0.73	0.10
总排口	产生浓度（mg/L）	/	6~9	173	89	131	12
	产生量（t/a）	6750	/	0.474	0.244	0.359	0.033
望塘污水处理厂接管标准		/	6~9	320	180	220	30
是否达标		/	是	是	是	是	是

3.3.2.3 固体废物源项及源强分析

本项目产生的固体废物主要包括超声波清洗系统产生的酸性废液、热处理系统油淬系统产生的废油基淬火液、除尘过滤系统收集的粉尘、甲基三氯硅烷残液，各种熔炼炉产生的熔炼残渣、废活性炭、实验室产生的实验废液、离子交换树脂、废包装桶。

⑴拉拔变形加工系统超声波清洗系统产生的酸性废液属于《国家危险废物名录》中HW17表面处理，废物代码：336-064-17，经收集后暂存，外送有资质的单位处理。

⑵热处理系统油淬系统产生的废油基淬火液属于《国家危险废物名录》中HW08废矿物油与含矿物油废物，废物代码：900-203-08，经收集后暂存，外送有资质的单位处理。

⑶甲基三氯硅烷残液属于《国家危险废物名录》中HW11精（蒸）馏残渣，废物代码：900-013-11，经收集后暂存，外送有资质的单位处理。

⑷废活性炭属于《国家危险废物名录》中HW49其他废物，废物代码：900-039-49，经收集后暂存，外送有资质的单位处理。

⑸实验室清洗废液：HW49其他废物，废物代码：900-300-34，经收集后暂存，外送有资质的单位处理。

⑹熔炼炉残渣、过滤袋粉尘、废包装桶，离子交换树脂为一般固体废物，经收集后暂存，外送有资质的单位处理。

表3-65 一般工业固废产排污情况

固体废物名称	主要成分	产生量（t/a）	处置措施
过滤袋粉尘	Be-Ti 合金碎片，SiC、C 粉尘	0.04	分类收集，密闭暂存，定期交由有资质单位处置或综合利用
废包装桶	塑料桶、铁桶	0.01	分类收集，暂存后由物资回收单位回收或交有资质单位处置
废离子交换树脂	废离子交换树脂	0.05	分类收集，规范暂存，定期交有资质单位处理
熔炼炉残渣	Be-Ti 合金碎片，SiC、C 粉尘	0.02	分类收集，密闭暂存，定期交由有资质单位处置或综合利用

表3-66 危险固态废物产排污及暂存情况

贮存场所名称	危险废物名称	主要成分	形态	危险废物类别	危险废物代码	位置	占地面积	贮存方式	贮存能力	贮存周期
危废贮存点	废油基淬火液	废油	液态	HW08	900-203-08	场区西北角	20m²	桶装	1t	不超过1月
	甲基三氯硅烷残液	CH_3SiCl_3	液态	HW11	900-013-11			桶装	0.5t	不超过1月

贮存场所名称	危险废物名称	主要成分	形态	危险废物类别	危险废物代码	位置	占地面积	贮存方式	贮存能力	贮存周期
	表面处理酸洗废液	废酸	液态	HW17	336-064-17			桶装	0.1t	不超过1月
	废活性炭	VOC 吸附	固态	HW49	900-039-49			桶装	1t	不超过1月
	实验室	废酸	液态	HW49	900-047-49			桶装	0.1t	不超过1月

3.3.2.4 噪声

本项目建成后，调查所有声源种类（包括设备型号）与数量、各声源的空间位置、声源的作用时间等，用类比测量法与引用已有的数据相结合确定声源声功率级。

本次噪声评价坐标原点设在A轴与1轴的交点，X 轴正向为向东方向，Y 轴正向为向北方向。本项目的噪声源情况见表 3-67、表 3-68。

表 3-67 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）			声功率级(dB(A))	声源控制措施	运行时段
			X	Y	Z			
1	1#冷却塔	NTG-900	26	180	4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
2	2#冷却塔	NTG-900	24	170	4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
3	1#循环水泵		26	185	-2.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
4	2#循环水泵		24	175	-2.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
5	1#外循环水泵		77	140	-4.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
6	2#外循环水泵		77	135	-4.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
7	3#外循环水泵		16	223	-4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
8	4#外循环水泵		14	227	-4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00

表 3-68 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			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)	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	包层楼	1#	氦风机1	/	90	减振、隔声门窗、墙体隔声等	24	56	1	26	62.1	0：00~24：00	20	59.5	1
2		2#	氦风机2		90		24	58	1	26	62.1	0：00~24：00			
3		3#	氦压缩机		85		24	60	1	26	59.5	0：00~24：00			
4		4#	增压泵		85		24	62	1	26	59.5	0：00~24：00			
5		5#	纳米均质机		85		26	60	1	26	59.5	0：00~24：00			
6		6#	离心烘干机		85		26	62	1	26	59.5	0：00~24：00			
7		7#	水泵	/	85		26	58	1	26	59.5	0：00~24：00			
8		8#	液压泵		85		24	54	1	26	59.5	0：00~24：00			
9		9#	抽气泵组		85		24	57	1	26	59.5	0：00~24：00			
10		10#	冲击试验机		85		22	60	1	26	59.5	0：00~24：00			
11		11#	喷雾造粒机		85		115	18	1	19	60.1	0：00~24：00			
12		12#	离心造粒机		85		120	18	1	19	60.1	0：00~24：00			
13		13#	热等静压机		85		130	20	1	19	60.1	0：00~24：00			
14		14#	冷水机组		85		106	65	6	19	60.1	0：00~24：00			
15		15#	热泵机组		85		110	70	6	19	60.1	0：00~24：00			
16		16#	风冷热泵1		85		110	73	6	19	60.1	0：00~24：00			
17		17#	风冷热泵2		85		107	73	6	19	60.1	0：00~24：00			
18		18#	冷冻水泵		85		105	73	6	19	60.1	0：00~24：00			
19		19#	热水泵1		85		105	70	6	19	60.1	0：00~24：00			
20		20#	热水泵2		85		105	68	6	19	60.1	0：00~24：00			
21		21#	热水泵3		85		105	65	6	19	60.1	0：00~24：00			
22		22#	空气压缩机		85		130	65	1	19	60.1	0：00~24：00			

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			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)	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
23		23#	氮气压缩机		85		130	62	1	19	60.1	0：00~24：00			
24		24#	除盐水水泵		85		130	60	1	19	60.1	0：00~24：00			
25		25#	风机1		90		100	64	1	19	62.1	0：00~24：00			
26		26#	风机2		90		100	60	1	19	62.1	0：00~24：00			
27		27#	风机3		90		100	55	1	19	62.1	0：00~24：00			
28		28#	风机4		90		100	50	1	19	62.1	0：00~24：00			
29	氚实验楼	1#	超碳压缩机		90	减振、隔声门窗、墙体隔声等	86	175	1	19	62.1	0：00~24：00	20	59.2	1
30		2#	锂铅机械泵		90		90	147	1	19	62.1	0：00~24：00			
31		3#	超导磁体		85		86	150	1	19	59.1	0：00~24：00			
32		4#	柴油发动机		90		97	120	1	19	59.1	0：00~24：00			
33		5#	冷水机组1		85		54	185	6	19	59.1	0：00~24：00			
34		6#	冷水机组2		85		54	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
35		7#	热泵机组		85		50	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
36		8#	风冷热泵1		85		56	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
37		9#	冷冻水泵2		85		52	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
38		10#	冷冻水泵		85		48	180	6	19	59.1	0：00~24：00			
39		11#	热水泵1		85		48	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
40		12#	热水泵2		85		45	185	6	20	59.1	0：00~24：00			
41		13#	氚兼容泵		85		57	159	6	20	59.1	0：00~24：00			
42		14#	真空泵		85		60	150	6	20	59.1	0：00~24：00			
43		15#	氦压缩机		85		70	150	6	20	59.1	0：00~24：00			
44		16#	风机1		85		29	170	6	20	59.1	0：00~24：00			
45		17#	风机2		85		35	170	6	20	59.1	0：00~24：00			

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			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)	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
46		18#	风机3		85		40	170	6	20	59.1	0：00~24：00			
47		19#	风机4		85		22	130	6	20	59.1	0：00~24：00			
48		20#	风机5		85		22	135	6	20	59.1	0：00~24：00			
49		21#	风机6		85		22	139	6	20	59.1	0：00~24：00			

注：总平面布置图中A轴与1轴交叉点设为（0，0）。

3.3.2.5 工程污染物产生量、削减量及排放量统计

（1）废气污染物

本项目正常工况下废气污染物产生量、消减量及排放情况详见下表。

表 3-69 项目有组织废气主要污染物排放情况一览表 单位：t/a

主要污染物	产生量	消减量	排放量
颗粒物	0.062	0.0605	0.0015
HCl	0.01	0.009	0.001
硅氯烷（$SiCl_4$/$SiCl_2$）	0.054	0.0486	0.0054
CH_4、C_2H_4、C_2H_2	0.01	0.009	0.001
有机硅蒸气	0.018	0.0162	0.0018

（2）废水污染物

建设项目废水主要污染物排放情况见下表。

表 3-70 项目废水主要污染物排放情况一览表 单位：t/a

废水种类	主要污染物	产生量	消减量	排放量	排放去向
生活污水+循环冷却废水	废水量	6750	0	6750	接管入望塘污水处理厂处理，达标排放，尾水排入南淝河
	COD	1.35	0	1.35	
	BOD_5	0.69	0	0.69	
	SS	0.95	0	0.95	
	氨氮	0.10	0	0.10	

（3）固体废物

建设项目固体废物排放情况详见下表。

表 3-71 项目固体废物排放情况一览表 单位：t/a

固废名称	产生量	处理处置量	排放量
危险废物	2.70	2.70	0
一般工业固体废物	0.12	0.12	0
生活垃圾	9.0	9.0	0

第四章 辐射安全与防护设施

4.1 场所布局与屏蔽

4.1.1 项目总平面布置

本项目拟建场址位于谭岗路和杨岗路交口东北角，毗邻CRAFT园区，实验室研究功能区块，自BEST园区起，通过CRAFT园区，延伸至项目选址，整体区块完整连续。



图4-1 聚变产业实验基地衔接示意图

本项目拟建场址北侧为大气路，南侧杨岗路，西侧谭岗路，东侧科学院北路，谭岗路为现状次干道，杨岗路为次干道，科学院北路为现状支路，大气路为规划支路。

项目共设置1个机动车出入口，位于西侧谭岗路，兼顾车行次入口与货运入口。氚燃料实验楼位于场地北侧，包层研发楼位于场地南侧，机动车道沿场地红线环通布置，并在氚燃料实验楼与包层研发楼之间联通，使得两栋楼都有环形车道，机动车停车位在地面布置，分别位于氚燃料实验楼北侧以及包层研发楼西侧及北侧，机动车停车位分为三块区域，分别位于场地南侧、北侧及西侧。非机动车集中停车区位于包层研发楼北侧靠东。

项目总平面布置图如下图所示。

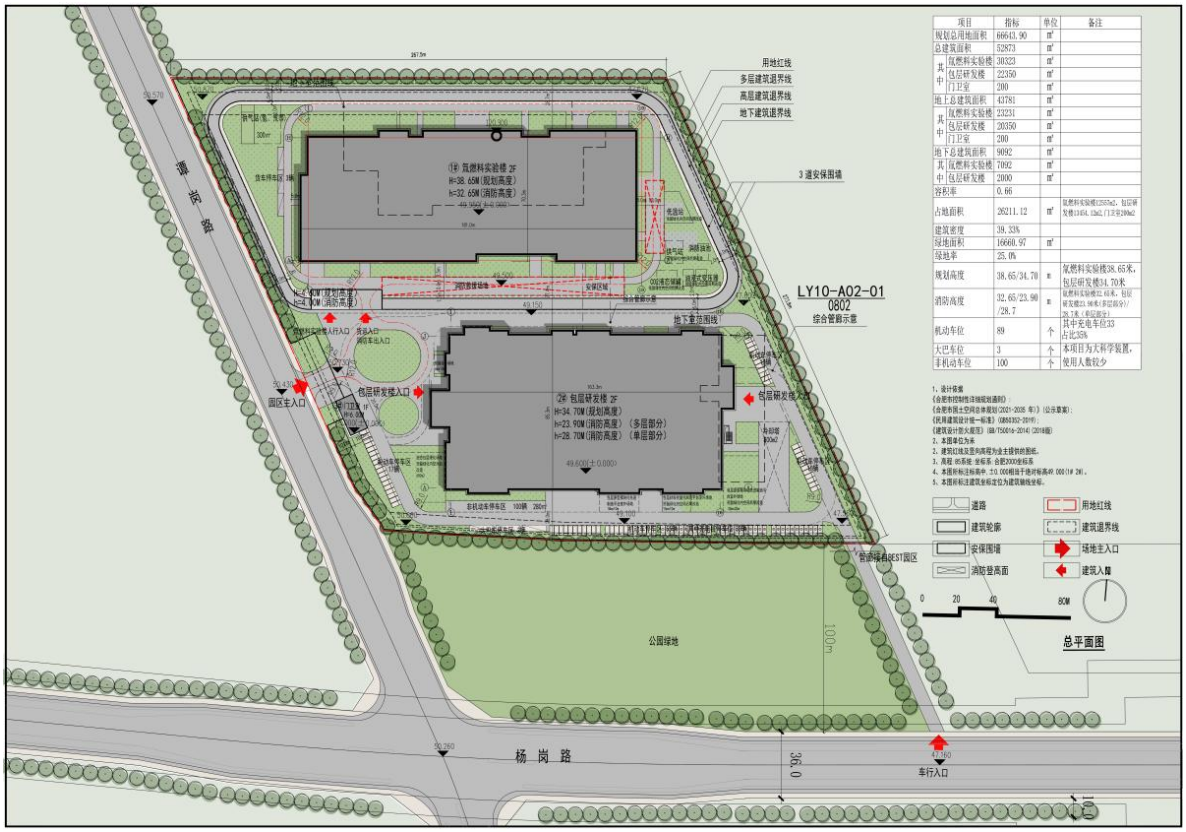


图4-2 项目总平面布置图

4.1.2 氚燃料实验楼布局与屏蔽

在本项目中，只有氚燃料实验楼涉及非密封放射性物质，因此，报告将重点对氚实验楼场所布局等进行详细描述。

氚燃料实验楼为地上2层，地下1层，地上建筑面积23231㎡，地下建筑面积7092㎡，建筑高度为38.65m，消防高度为32.65m。

氚燃料实验楼整体分为涉放区域和非放区域两部分；工艺流程复杂，功能分区较多，具有严格的安全保障与实体保护，功能空间具有不同程度的污染性；具有多种火灾危险性，内部交通流线复杂。非放区域通过卫生通过间进入涉放区域，保证人员的安全性。

地下一层层高为9m，局部（包层涉核性能验证）层高10—12米，主要为工艺储水罐及低位槽、WD+CECE其他、30m高区、中子实验测量分析、包层材料辐照考核、涉

放排水系统、源库、包层涉核性能验证、涉氚材料测试平台及配电、风机和控制室、涉放消防废水收集池等功能区域组成。氚燃料实验楼地下一层平面布置图见附图一。

地上一层层高为16m，主要由设备预装间（门厅）、卫生通过间、气固介质除氚、液体介质除氚、精馏塔、固态包层氚提取、液态包层氚提取、VDS催化+氧化+格栅、ADS催化+氧化+固态GDS格栅、超临界CO_2冷却回路、包层原型扇段、液态锂铅冷却回路、涉氚设备后处理平台、遥操作维护、配电系统、管廊空间等功能区域组成。其中，设备预装间（门厅）、遥操作维护不涉氚操作，为非放区域；超临界CO_2冷却回路、包层原型扇段、液态锂铅冷却回路在前期开展无氚实验，为非放区域；后期载氚操作实验，为涉放区域。氚燃料实验楼地上一层平面布置图见附图二。

地上二层层高为16m，主要由CECE撬装+WD、内燃料循环+GDS格栅平台、燃料贮存、涉放区中控室、实保控制室、辐射测量与防护、安全设备防护、先进放射性氚测量技术研发单元、氚扩散及迁移转化实验单元、涉放水冷系统、非放送排风系统、配电系统、设备用房、管廊空间等功能区域组成。其中，先进放射性氚测量技术研发单元、涉放区中控室、辐射监测设备调试间、实保控制室、非放送排风系统等为非放区域。氚燃料实验楼地上二层平面布置图见附图三。

氚燃料实验楼楼顶布置有消防水箱间、热水箱间、电梯机房、气瓶间、加压送风机房等。氚燃料实验楼楼顶均为非放区域，其平面布置图见附图四。

氚燃料实验楼1-1、2-2、3-3剖面图详见附图五～附图七。

4.1.3 人流物流

⑴人流

氚实验楼主入口设在建筑西南侧。实验人员通过更衣区进入各层辐射工作场所。具体流线如下：

外环境→实验楼西南侧大门→门厅→一层卫生通过间（智能分发柜领取个人剂量监测仪表）→走廊→各层辐射工作场所的实验间→走廊→一层卫生通过间（智能分发柜归还个人剂量监测仪表）→全身表面污染监测→合格后→外部环境。若表面污染监测不合格，则去去污淋浴间清洗去污，直至监测合格后方可离开。

工作人员进出非辐射工作场所，通过普通楼梯、大门进出。

⑵物流

氚燃料实验楼北侧货梯为涉放货梯。氚通过货车由公路运输至项目场址内，从实保大门进入保护区内后，沿氚燃料实验楼周边环形道路东侧行驶至建筑北侧涉放区货梯门口，货物卸载后通过车间引道运输至涉放货梯，转运至相关实验平台所在房间。氚燃料实验楼货物流线、人流路线互不交叉。

进出非放场所的物品，通过普通货运电梯运送。

⑶辐射屏蔽（屏障）

根据源项分析，氚无需考虑外照射防护，氚的内照射防护主要采用多重屏障系统进行系统包容。多重屏障分为第一级包容、第二级包容、第三级包容。第一级包容主要是工艺设备本身，如管道、阀门、泵和工艺容器；第二级包容即工作手套箱与其他外壳；第三级包容为工作手套箱与其他外壳所在的房间和建筑物。通过多重屏障的设置，可有效减少、防止氚的泄漏，降低操作人员受到的辐射剂量。

4.2 辐射安全与防护措施

4.2.1 辐射工作场所分区

为了对辐射源及职业受照的工作人员保持控制，需要对放射性场所进行合理的辐射防护分区管控。根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》，并参考国际放射防护委员会（ICRP）在其第60 号出版物中建议，将本项目氚燃料实验楼(辐射工作场所)分为控制区和监督区。

控制区：该区为项目辐射工作场所的重点。根据工作场所辐射水平、表面污染水平和气载污染浓度设置对应的辐射分区，并相应地规定工作时段和必需的个人防护条件，以及必要的行政管理措施。

监督区：该区的辐射工作人员必须评价其职业受照，评估必须根据所在工作场所监测的结果或个人监测的结果进行。

本项目氚实验楼所有涉氚操作运行的房间及可能沾污的走廊、楼梯等划分为控制区；卫生通过间、冷更、热更，以及淋浴为监督区；配电间、非放送风机房、核材料衡算机房、实保值班室、实保控制室等为非辐射工作场所。

辐射工作场所分区表见表4-1，辐射防护分区图详见图4-3～图4-5。

表4-1 辐射工作场所分区

分区名称	所在楼层	涉及房间
控制区	地下一层	涉氚材料测试平台及其控制室、包层涉核性能验证平台及其控制室与配电室、源库、包层材料辐照考核、中子实验测量分析、涉放排水系统室、涉放消防废水收集池、WD+CECE室、30米高区、工艺储水罐及低位槽
	地上一层	卫生通过单元之淋浴间、气固介质除氚室、液体介质除氚室、VDS催化室、ADS催化室(GDS催化室)、涉氚设备后处理室、精馏塔室、固态包层氚提取室、液态包层氚提取室、货梯间、超临界CO_2冷却回路*、包层原型扇段*、液态锂铅冷却回路*
	地上二层	氚扩散及迁移转化实验室、涉放水冷系统室、涉放通风系统室、内燃料循环室
监督区	地上一层	卫生通过间，含冷更、热更
非辐射工作场所	地上一层	遥操作维护室、设备预装间(门厅)、配电室、柴油发电机房
	地上二层	先进放射性氚测量技术研发室、核材料衡算机房、核材料物保护值班室、涉放区中控室、实保控制室、应急防护设备间、辐射防护设备综合机房、辐射监测设备调试间、非放送排风系统

注：*该房间前期不涉氚实验，属于非辐射工作场所；后期载氚实验，按控制区管理。

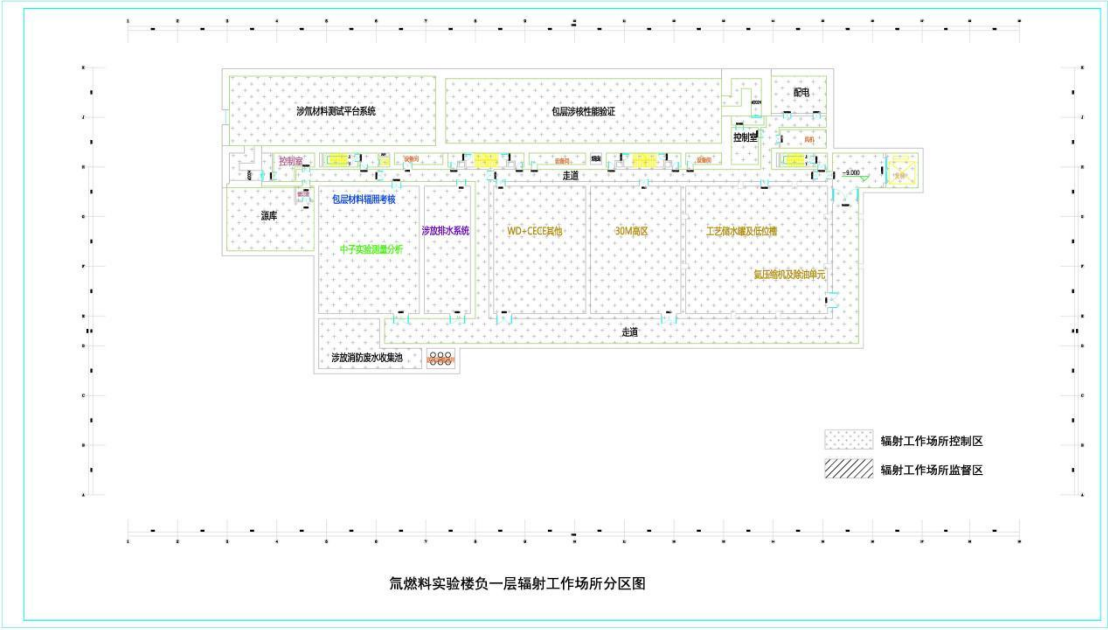


图4-3 氚燃料实验楼地下一层辐射防护分区图

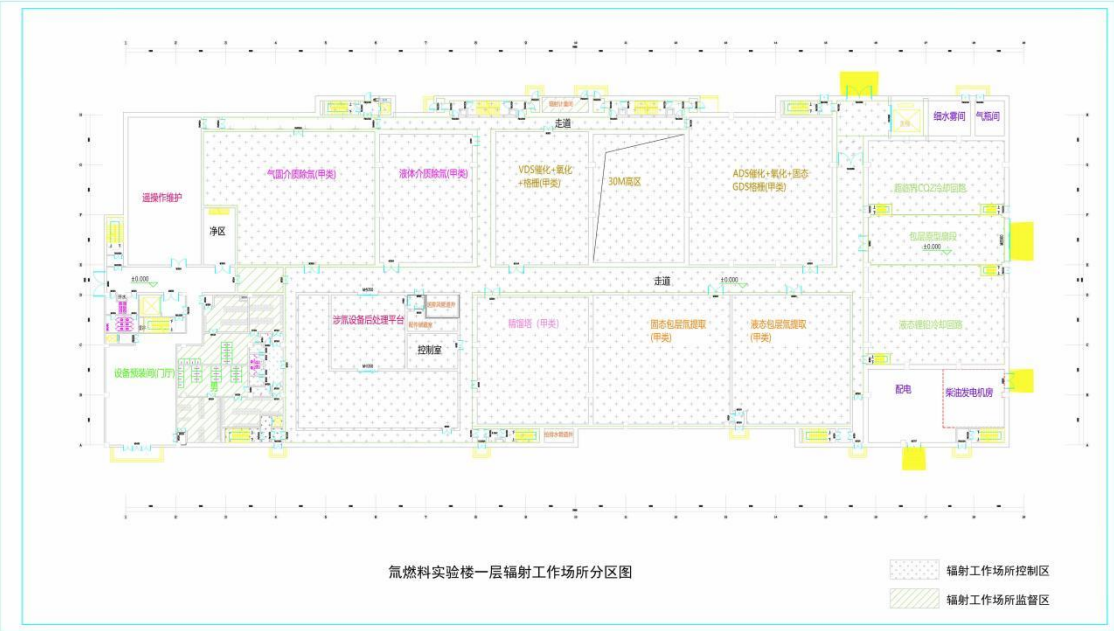


图4-4 氚燃料实验楼地上一层辐射防护分区图

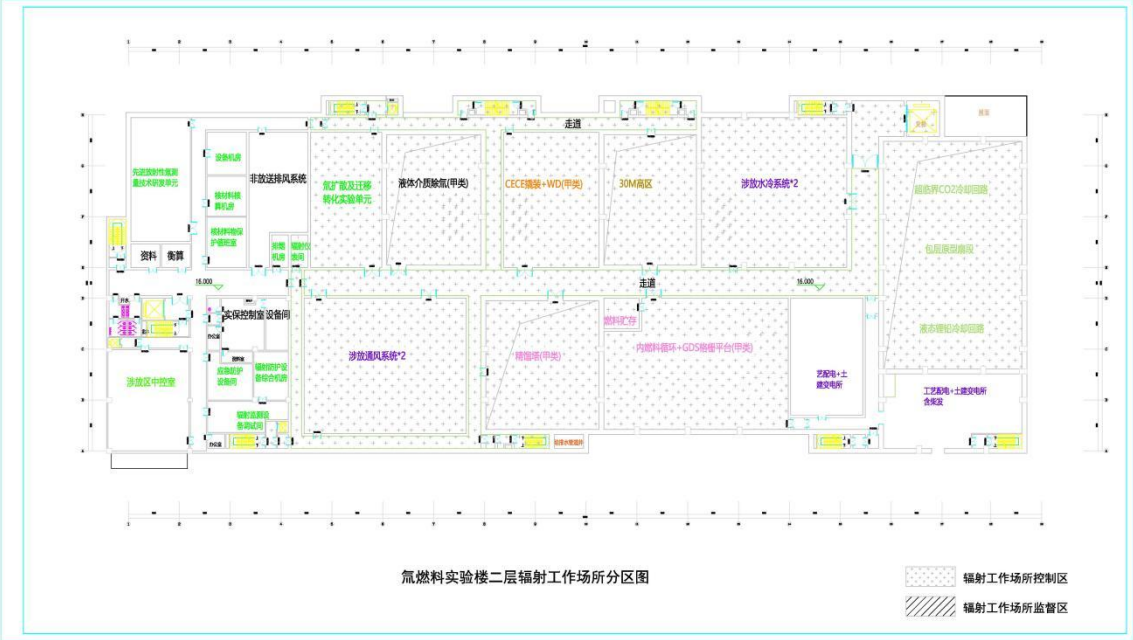


图4-5 氚燃料实验楼地上二层辐射防护分区图

如上表所示，本项目控制区主要包括氚燃料贮存、各涉氚实验验证平台、氚燃料净化与配气系统、氢同位素分离系统、监测与自动控制系统主工艺区、泵房和循环风机区域，需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域，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范围。对于该区域，设

有可靠的个人安全防护和剂量监测措施，且对进入该区域工作的工作人员配备必需防护用品。主要控制措施有：

⑴采用实体隔离将控制区与监督区隔开，并使气流按监督区、控制区的顺序进行组织。

⑵定期对工作场所中设备、地面、墙壁和工作台等进行表面污染水平监测，控制表面污染。

⑶通过分区和集中布置的原则，将含有高浓度氚的工艺系统集中布置，尽可能缩短工艺管道，工艺管道连接尽可能选择焊接；设备、管道和密封件的材质选择低扩散率和防止“氢脆”的材料，连接方式选择焊接，阀门选用金属波纹管阀，减少通过第一道密封屏障释放到工作场所的氚量。

⑷场所中设置氚浓度在线监测。工作场所的部分独立区域内工艺系统内（高氚房间）含有大量氚物质，这些氚物质在正常运行条件下，通过扩散导致工作场所中氚浓度较高，或在潜在事故条件下发生泄漏，在这些房间内设置在线氚浓度监测系统，及时发现异常浓度；对于低氚操作的房间设置有氚监测取样管路，通过剂量监测间内的氚监测设备实现取样监测。

⑸潜在污染区域主要考虑事故和检修导致工作场所氚浓度升高和表面污染水平增大，针对氚泄漏事故设计有预防措施和缓解措施，设置有三级氚包容及剂量监测系统，房间墙壁采用光洁金属包覆面，不采用吊顶。

氚燃料实验楼控制区所采取措施与《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）有关规定符合性分析详见下表。

表 4-2 进入氚实验楼控制区采取的措施

序号	GB 18871-2002 中6.4.1.4 的规定	设计采取的措施
1	采用实体边界划定控制区	分区布置，各区之间采用实体墙作为辐射分区的边界
2	在控制区的进出口及其它适当位置处设立醒目的、符合规定的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平的指示	在辐射工作场所各分区的入口拟设置附录F规定的警告标志；将根据规定在各分区的入口位置设置辐射水平和污染水平的指示
3	制定职业防护与安全措施，包括适用于控制区的规则与程序	拟制定《辐射防护大纲》，并按照大纲要求制定有相关管理程序

序号	GB 18871-2002 中6.4.1.4 的规定	设计采取的措施
4	运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可证制度）和实体屏障（包括门锁和联锁装置）限制进出控制区；限制的严格程度应与预计的照射水平和可能性相适应	利用实物保护的门禁系统控制进入辐射工作场所各区域的工作人员
5	按需要在控制区的入口处提供防护衣具、监测设备和个人衣物贮存柜	设置有卫生出入口，在卫生出入口配置有相关防护用品，如工作服、手套、口罩等
6	按需要在控制区的出口处提供皮肤和工作服的污染监测仪、被携出物品的污染监测设备、冲洗或淋浴设施以及被污染防护衣具的贮存柜	拟在控制区的出口处提供皮肤和工作服的污染监测仪、被携出物品的污染监测设备、冲洗或淋浴设施以及被污染防护衣具的贮存柜
7	定期审查控制区的实际状况，以确定是否有必要改变该区的防护手段或安全措施或该区的边界	设置有场所氚监测、手套箱氚监测。对含有大量氚物质的工作场所和手套箱进行氚在线监测，及时发现异常浓度；对操作氚物料较少的岗位进行定期巡检，切换监测。

分析可知，本工程控制区拟采取的措施符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求。

4.2.2 氚污染防护（包容）措施

如前所述，本项目所涉及到的非密封放射性物质为氚，针对氚高渗透性的特点，在本项目涉放实验和操作中，采取了特别防护措施确保氚不会扩散至氚燃料实验楼以外的环境，以防放射性污染。控制措施包括：

实体隔离：通过物理隔离将控制区与其他区域分开，维持涉放区域的负压状态。

表面污染监测：实验结束后对涉氚工作场所的设备、地面和墙壁进行监测，确保无污染残留。

工艺系统和设备设计：使用低扩散材料和高密封阀门，最小化氚的泄露风险。

氚浓度在线监测：实时监控工作场所的氚浓度，及时应对潜在的泄漏情况。同时拟通过自研的放射性气溶胶空间整场探测系统，提前获取工作场所放射性气溶胶迁移轨迹，实现通风及时动态响应。

事故防控和应急响应：针对可能的氚泄漏事故，制定预防措施和缓解方案；建立应急响应机制，包括立即的人员撤离和快速的事故控制措施。

根据“纵深防御原则”，在任何情况下都应保持至少一个屏障的功能。系统的防护配置通常包括多层防护措施，如静态和动态防护系统，目的是最大限度地减少放射性

或有害物质对外部环境的影响。因此，项目采取了多级氚包容措施，确保放射性物质氚完全被控制在安全区域内。三级防护（包容）系统具体如下：

第一层防护系统：手套箱/单元，是最接近放射性源的防护层，用于直接处理放射性物质。

第二层防护系统：房间/区域，包括手套箱或处理单元的整个房间或区域，用以进一步防止任何可能的放射性物质扩散。

第三层防护系统：建筑，作为整个设施的最外层防护，确保即使内部发生严重的污染事件，也能将影响限制在建筑内部。

图中还展示了进行放射性处理的过程和相关的放射性强度或源项，以及用于评估系统密封性能和可能泄漏速率的泄漏率（LR）和封闭密封性（TF）。图中还标示了不同防护层之间的压力级别（P1, P2, P3, Patm），以确保从内层到外层的压力逐渐降低，帮助控制和限制污染物的移动。

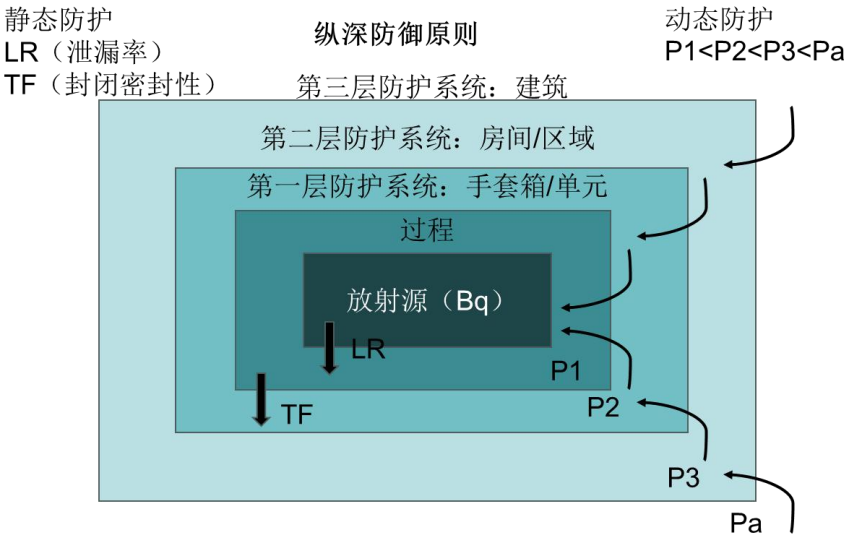


图4-6 项目纵深防御原则示意图

4.2.3 其他辐射安全防护措施

本项目运行期间的辐射防护，主要依靠多级的氚包容（手套箱等），来确保人员和环境的辐射安全。项目所采取的其他辐射安全防护措施主要如下。

4.2.3.1 通风系统

通风系统主要为各涉氚实验验证平台提供空气调节通风及氚包容。其主要功能有：

⑴房间空气调节

对各涉氚实验验证平台提供通风换气，保证换气率和移除非氚相关设备散发的热负荷，排出房间设备所产生的热负荷。为了在合理范围内减少意外的氚水的产生，不在氚污染区域提供空气加湿功能。

⑵负压和污染控制

将各涉氚实验验证平台保持在负压状态，以实现环境空气流向建筑内部。在正常条件下、在没有氚污染的火灾情况下或者当出口处的防火阀在 T_{air}>72°C时未自动关闭时，由 HVAC 系统的排气单元与气流控制器连接来维持负压，以保持恒定的排气量流量。为了避免任何交叉污染，HVAC 系统中没有空气自循环。整个空气流最终通过烟囱进行排放。

灰尘或气溶胶上潜在的放射性污染通过排气单元中的HEPA 过滤器进行过滤去除。这些特定的核过滤器是为核电厂设计的，包括更换受污染滤芯的“安全更换袋”。由于低放射性污染，也可能是在包括批准的防污染保护措施下人工更换过滤器。为进一步保护工人，可使用加压服更换滤芯。

从排出的空气中提取氚（HT 和HTO）是由除氚系统提供的一项附加功能，该系统包括通风除氚（VD）功能和空气除氚（AD）功能。正常情况下，手套箱和包含水箱的水去氚化系统都需要VD 功能。由于这些隔间中的负压，通过DS 的空气流速来自泄漏空气。

⑶非正常运行条件下的氚包容

①氚污染

空气中的氚浓度由在线氚监测器在排风口进行监测。如果氚污染为1×10^6 Bq/m^3 或以上，将立即启动人员疏散。如果氚污染在1×10^6 和3.7×10^7 Bq/m^3 之间，则来自污染室的空气将被排放到释放点，并且 HVAC 系统将污染室进一步保持在-50 Pa 和-100 Pa 的亚大气压。控制室的操作员应根据需要启动事件调查，并进行局部检查。

如果发生氚意外释放（超过预定阈值3.7×10^7 Bq/m^3），受影响的隔间将通过隔离阀自动与 HVAC 系统隔离，并通过打开指定除氚管道中的隔离阀切换至除氚系统。由于除氚系统的作用，该房间内大气压力水平略低于未受影响舱室中 HVAC 系统所控制的大气压力。受影响舱室中的亚大气压由与压力控制器相连的DS 排气扇和与受影响舱室

内DS 回风管中的流量阀来维持。在严重氚污染（>3.7×10^7 Bq/m^3 ）的情况下，通过除氚系统的再循环空气，在空气除氚模式下促进受影响隔室中的空气清洁。

②火灾

在发生火灾的情况下，应采取以下措施：人员立即从消防区域撤离，关闭对应防火区的 HVAC 供气系统，如果未检测到空气中的氚污染，或氚污染水平低于 3.7×10^7 Bq/m^3 的水平，则由控制室的操作员做出灭火命令。

如果排气防火阀自动关闭（由于高空气温度>72°C），则 VD 功能中的 DS 将保持负压。如果起火房间内部的氚污染水平高于 3.7×10^7 Bq/m^{3}的水平，则该分区将自动与 HVAC 系统隔离，并自动连接至除氚系统。可能通向除氚系统的热空气将通过安全冷却器进行冷却。

③设备故障

如果 HVAC 子系统发生故障，则执行以下操作：

疏散建筑物内人员，如果房间监测器未检测到空气污染，则在 HVAC 子系统功能恢复之前，不会采取进一步措施，如果存在氚气溶胶报警，控制室的操纵员决定是否启动由除氚系统控制的负压。如果与 HVAC 系统隔离的隔室空气氚监测器启动（氚污染水平高于3.7×10^7 Bq/m^3），隔间将自动连接至除氚系统，亚大气压控制由除氚系统提供。为了在事故条件下保持氚包容，需要提高除氚系统的可靠性，包括房间隔离设备和监测器/探测器如氚污染监测器、火灾探测器和气体流量探测器等设备。

4.2.3.2 维护维修人员剂量控制措施

对于维护维修人员的操作工位，通过限制在此类区域中工作人员操作时长，来确保工作人员累积受照剂量不超出剂量约束值 5mSv/a 。如果在必须维护的部件局部区域，需要通过进一步缩减维护人员操作时间来进行防护。发生意外事故进行紧急检修时，需要人员进入的区域剂量率可能更高，将对需要人员进入的区域进行剂量监测，优化单次操作时长，以确保工作人员累积受照剂量不超出事故剂量约束值 10mSv/次。

4.2.3.3 真空泵设备的检修防护措施

设备检修过程中的主要危害因素及途径是吸入氚造成的内照射危害，则检修过程中主要防护措施如下：

⑴设备设计时，设备表面光滑、易去污；密封性要求高的设备满足密封要求，密封材料耐腐蚀、耐低温、抗“氢脆”，能有效地将氚物质包容起来；所有需检修的设备能将物料排空，阀门和管道的连接死区少，拆卸方便，易于检修和更换，减少物料的滞留量，以减少维修时氚物质的释放。

⑵按照最少维修原则采用高可靠性设备或增加备用。

⑶重要测量参数的仪表采用冗余设计，当在役系统失效时，立即切换到冗余系统。

⑷工艺系统和设备进行维修前，首先将物料排空，进行多次清洗和吹扫。

⑸在检修操作方面，拆卸的设备、工器具按污染程度分开放置，以减少交叉污染，有利于清洗去污。同时要及时清理现场，保持工作场所整洁，废物分类收集。

4.2.3.4 氚管道的防泄漏措施

氚管道泄漏包括两条路径：一是通过设备和管道壁面的系统氚渗透，由壁温、壁厚、壁面材料、流体中氚的分压等因素确定；二是系统氚泄漏，由系统泄漏率决定。氚防泄漏措施主要包括：

⑴高氚工艺系统设备和器件（如循环泵、阀门、流量控制器等）要求低漏率，且氚兼容，管道接头采用焊接或VCR连接，系统整体漏率＜10^{-8}Pa·m^3/s量级。

⑵超温保护，加热器涉氚部件的温度采用监测专用温度传感器，如果实际温度显著高于设定温度时，自动关闭加热器，并发出报警。

⑶超压保护，涉氚压力部件的压力监测采用专用压力传感器，如果实际压力显著高于设定压力时，系统立即报警，并根据情况启动安全泄压。

⑷为防止氚高温渗透，对高温高氚部件（如贮氚床、钯管净化器等）采用二级包容设计，必要时可对结构材料进行阻氚涂层处理。

⑸本项目设有氚泄漏监控与应急响应系统（LMR）和除氚系统，LMR实时监测涉氚系统的各监测点的氚浓度，一旦超过阈值，及时启动相应的除氚系统对泄漏的氚进行处理。

4.2.3.5 氚泄漏报警措施及紧急撤离路线

本项目在氚燃料实验楼设置了氚泄漏报警装置。发生氚泄漏事故时，地下一层和二层有关辐射工作人员从氚泄露房间进入走廊，经步梯上（下）至一层；一层有关辐射工作人员从氚泄露房间进入走廊，经换衣淋浴后离开氚燃料实验楼。

参照生态环境部甲级非密封放射线物质操作场所监督检查技术程序（NNSA/HQ-08-JD-JP-005），氚燃料实验楼的辐射安全与防护设施情况对标如表 4-6 所示。由表可知，本项目的辐射安全与防护设施符合相关要求。

表 4-3 辐射安全与防护对标情况

甲级非密封放射性物质操作场所			
序号	**检查项目**	**项目拟配置情况**	**符合性**
1*	工作场所功能、设置及分区布局	合理划分控制区、监督区，实施分区管控，控制区拟设置辐射屏蔽和安全防护设施，入口设置明显的电离辐射警告标志，标志图形、颜色、字体等均按照GB18871-2002 规定要求设置。监督区只有经授权的辐射工作人员才能进入进行操作，公众不允许进入。	符合
2*	场所分区的管控措施及标识		符合
3*	电离辐射警告标志	场所均设置电离辐射警告标志	符合
4*	卫生通过间	场所设计了卫生通过间	符合
5*	通风系统完整性及效能	各氚操作场所均设有通风系统，满足通风要求	符合
6*	排风过滤器	排风系统设置了过滤器	符合
7*	密封箱室	涉氚操作均在密封箱室（手套箱）内进行	符合
8*	屏蔽防护设施	操作箱体均设置屏蔽防护设施	符合
9	防过热或超压保护	设置有防过热或超压保护设施	符合
10*	防止放射性液体操作造成污染的措施	项目设置有WDS系统，对氚循环过程中产生的放射性液体（氚化水）进行净化/贫化处理	符合
11*	机械手或其他远距离操作工具	涉氚操作平台均设置有手套箱	符合
12*	火灾报警仪	场所设有火灾报警仪	符合
13*	放射性废水处理系统及标识	放射性废水设置有除氚系统，设置有警示标识、标志	符合
14*	放射性物料与成品暂存场所或设施	设置有氚燃料贮存间	符合
15*	放射性固体废物暂存场所或设施	设置有放射性废物库	符合
16*	安保设施	设有门禁系统、视频监控等安保设施	符合
17	防火设备、应急出口	设置有防火设备及应急出口	符合

甲级非密封放射性物质操作场所			
序号	检查项目	项目拟配置情况	符合性
18*	人员出口污染监测仪	场所人员出口设有污染监测仪	符合
19*	固定式辐射监测报警仪	场所设有固定式辐射监测报警仪	符合
20*	固定式或移动式气溶胶取样监测设备	拟配备固定式和移动式气溶胶取样监测设备	符合
21	气载放射性流出物取样监测设备	配置有气载放射性流出物监测设备	符合
22*	便携式辐射监测仪	配置有便携式辐射监测仪	符合
23*	个人剂量计	辐射工作人员均配置个人剂量计	符合
24	个人剂量报警仪	辐射工作人员均配置个人剂量报警仪	符合
25*	个人辐射防护用品	配备有个人辐射防护用品	符合
26*	去污用品和应急物资	场所配备有去污用品和应急物资	符合
27	合适的灭火器材	配置有灭火器材	符合
28*	放射性同位素应急容器	备有应急容器	符合

注：加*的项目是重点项。

4.3 辐射安全联锁系统

辐射安全联锁系统是在进行含有放射性物质的操作期间，防止人员误入和误照射的关键安全设施，系统通过一系列的物理障碍和程序控制措施，确保实验安全进行。基础联锁措施包括：

门禁联锁：防止未授权人员进入实验区域。

钥匙联锁：只有授权人员持有的钥匙才能启动实验设备。

紧急停止开关联锁：在任何异常情况下允许迅速终止实验。

清场巡检开关联锁：确保实验开始前，所有非必要人员已离开实验区域。操作流程包括：实验前进行全面的安全检查和人员清场；通过紧急停止和巡检系统确认区域安全后，实验方可开始；实验期间，实时监控辐射水平和系统状态，确保一切运行在控制之中。

氚燃料实验楼辐射安全联锁系统涉及工艺辐射安全联锁和氚环境排放安全联锁两大部分。

4.3.1 工艺辐射安全联锁

工艺辐射安全联锁部分主要需实现三方面基本功能：

⑴氚泄漏事故快速监测、甄别和响应，通过合理设置采样点，实时快速监测，及时识别事故状态并报警，同时保证关键数据传输安全。

⑵氚事故房间的有效自动封闭包容，事故发生时，对应操作间的门、窗、通排风、给排水等与外界相连界面自动封闭，实现操作间高气密性以确保氚安全包容。

⑶气氛除氚满足快速除氚要求，在可能发生氚泄漏的手套箱或氚操作间，当发生氚泄漏事故时，启动相应除氚单元进行快速除氚。

上述安全联锁功能由氚监测单元、手套箱气氛除氚单元、房间空气除氚单元、排放气除氚单元、含氚水除氚单元、自动控制单元（根据网络安全等级保护的要求，此处可能包含外部主控系统）共同实现。系统整体架构如下图所示。

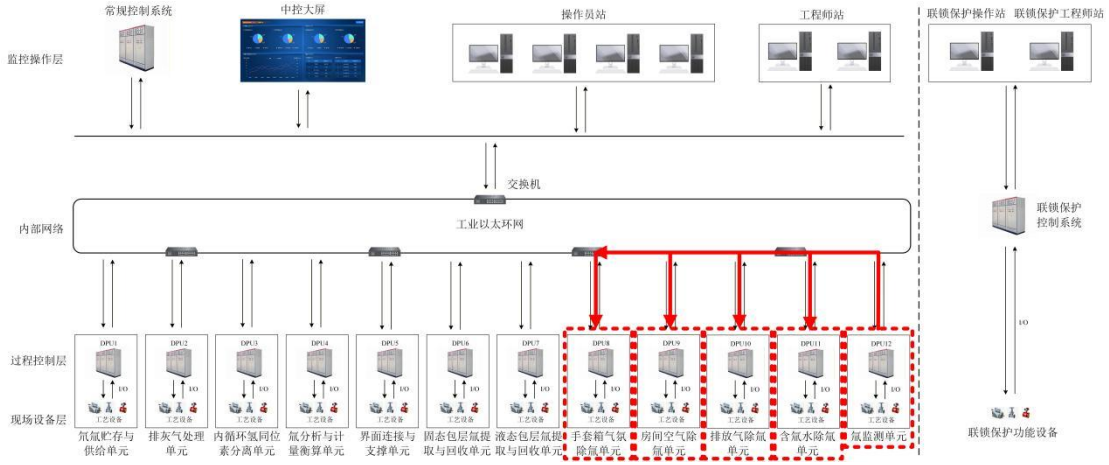


图4-7 系统整体架构

当操作间气氛氚浓度异常上升，立即封闭系统向环境排放的接口（如门、窗、HVAC），封闭相关操作间，并启动报警系统，向操作人员发出工艺系统异常警报，以阻止氚向环境的进一步扩散，将氚源限制在尽可能小的区域。同时判断事故类别，启动相应的除氚单元，将相关操作间内含氚气体引出处理。在短时间内完成大部分氚的捕集，直到处理区域内氚浓度达到控制标准。手套箱氚泄漏时流程类似。在捕集过程中要始终保持处理区域内的负压，控制压力梯度确保氚从高污染区流入低污染区，减小氚的环境释放量。其中，气氛氚监测功能主要由氚监测单元布置在各测量点的氚监测电离室实现，事故判断和信息传递功能由自动控制单元实现，气氛除氚由各除氚单元实现，在此过程中产生的含氚水、泄漏的含氚冷却水和操作空间水蒸气冷凝含氚水的处理由含氚水除氚单元实现。辐射安全联锁工艺流程如下图所示。

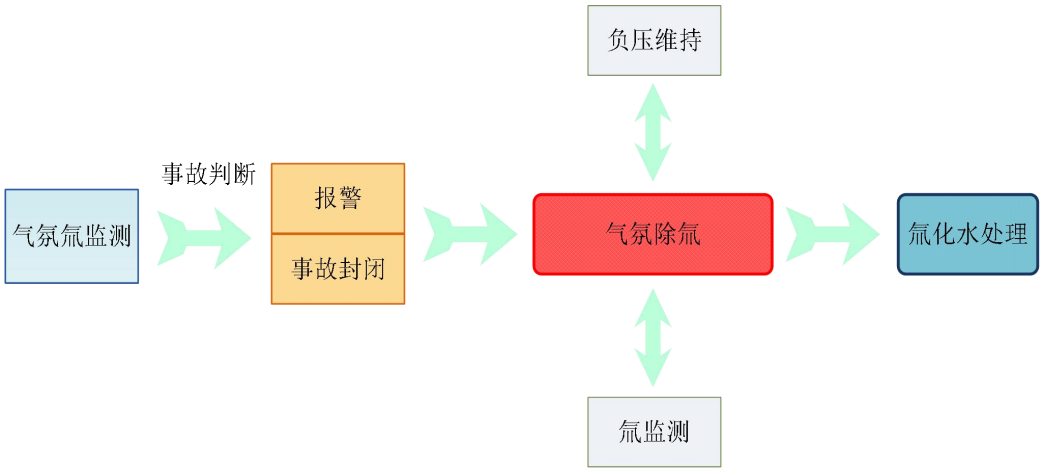


图4-8 工艺辐射安全联锁工艺流程

氚监测单元在操作间氚易聚集区域或氚浓度敏感位点布置氚监测电离室，电离室的监测数据通过数据采集设备传输到自动控制单元内部网络中。通过对监测值的实时判断，确定事故发生地点：

当某区域氚浓度大于$1\times10^{6}Bq/m^{3}$或以上，发出警报，并通知对应区域人员撤离；

当某区域氚浓度在1×10^{6}至$3.7\times10^{7}Bq/m^{3}$时，污染区域压力保持在低于大气压水平，操作员立即调查氚浓度升高原因，进行人工干预；

当某区域氚浓度大于预设阈值（如$3.7\times10^{7}Bq/m^{3}$），通知对应系统关闭房间HVAC通道，关闭房间门、窗、下水（根据网络安全等级保护的要求，关闭HVAC通道、门、窗、下水可能通过外部主控系统实现），通知相应除氚单元进行除氚操作。

通过事故报警响应、数据传输反馈、事故封闭时除氚系统启动模式等响应控制技术优化，提升事故响应速率与系统的联动匹配性，实现事故状态氚的快速回收并减少环境排放。工艺辐射安全联锁控制逻辑如下图所示。

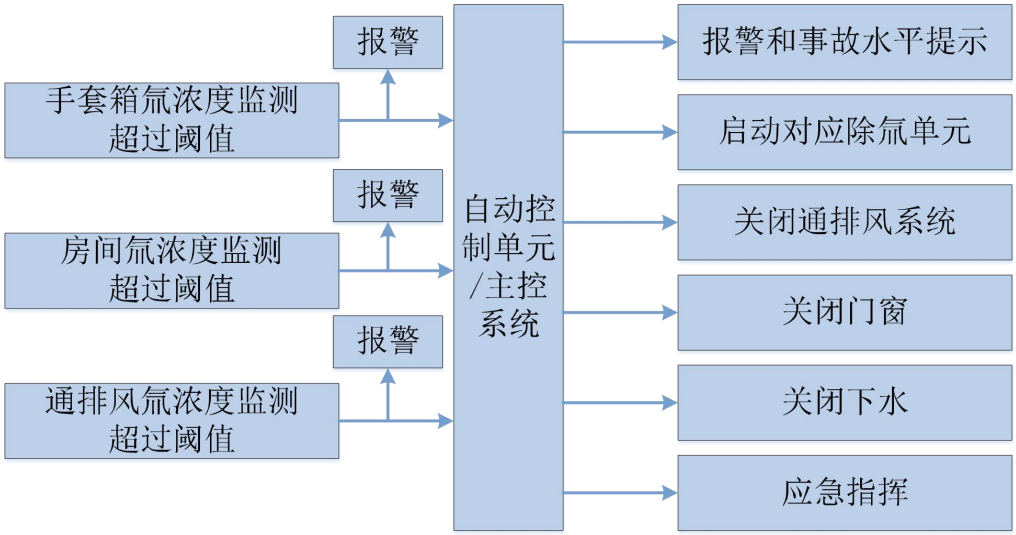


图4-9 工艺辐射安全联锁控制逻辑

4.3.2 氚环境排放安全联锁

针对环境排放安全联锁功能，根据氚循环和辐射安全实验系统构成，氚可能向环境排放的路径有以下几处：

⑴通过排放气除氚单元排放管道：因工艺尾气处理需要，排放气除氚单元与可能操作大量氚的氚工艺系统均有管道阀门直接相连，在极端情景下，绝大部分氚可通过此路径排向环境；

⑵通过含氚水除氚单元：在极端情景下，通过系统控制操作，含氚水除氚单元产生的氢气可不经过除氚处理即向环境排放；

⑶通过HVAC排放：氚通过HVAC向环境非受控排放的前提是氚泄漏至房间，在极端情景下，通过系统控制操作，不启动除氚系统，通过HVAC抽取房间中的含氚气体直接向环境排放。由于氚系统处于核材料实物保护区域内，假定氚系统管路本身不受到破坏，短时间内通过系统控制操作将氚释放到房间的可能性极低，因此通过HVAC向环境非受控排氚是一个潜在风险点，但可以不作为关注重点。

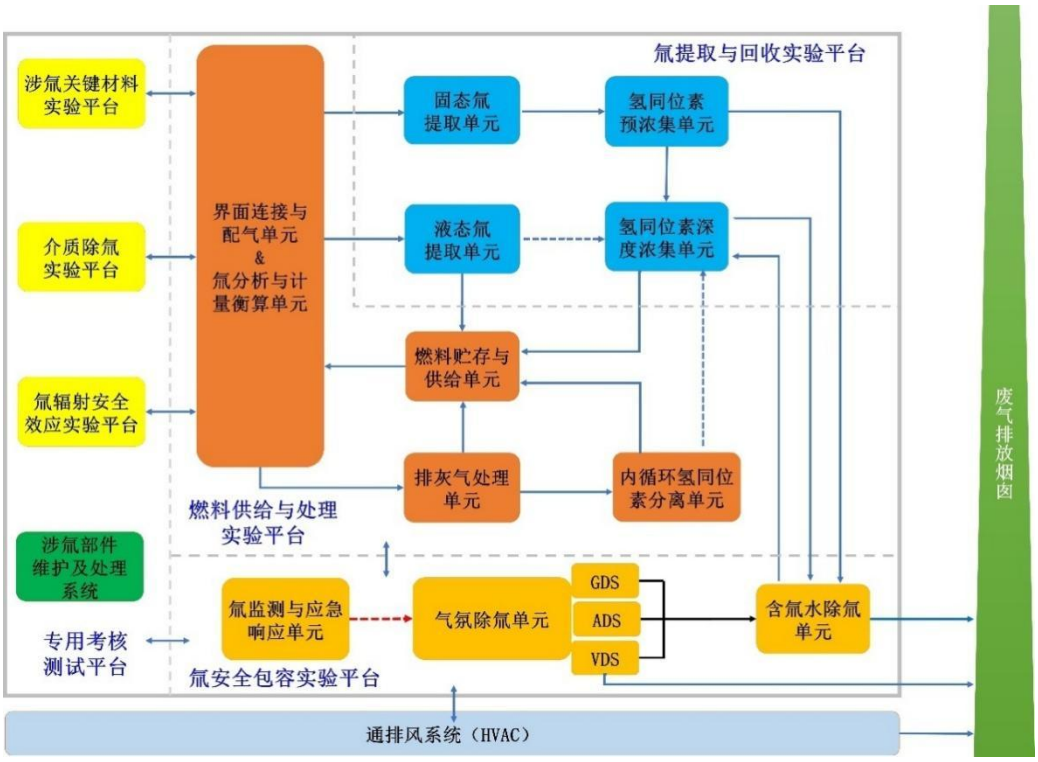


图4-10 氚循环和辐射安全实验系统构成框图

基于上以上分析，为防止氚在恶意或误操作情况下的非受控排放，在上述两处与环境直接连接的管道上分别设置氚监测电离室对排放气体的氚浓度进行实时监测。

联锁保护系统包括联锁保护功能相关设备、联锁保护控制器、联锁保护操作员站和联锁保护工程师站。联锁保护功能相关设备通过专用I/O模块直接接入联锁保护控制器。联锁保护功能相关设备分布在对应的工艺管道处，联锁保护控制器、联锁保护操作员站和联锁保护工程师站集中布置于中控大厅的独立隔间内，与中控大厅内常规控制系统相关的设备相互隔离。其结构如下图所示，图中红色虚线框范围内为联锁控制系统结构，该系统与常规控制系统相互独立。

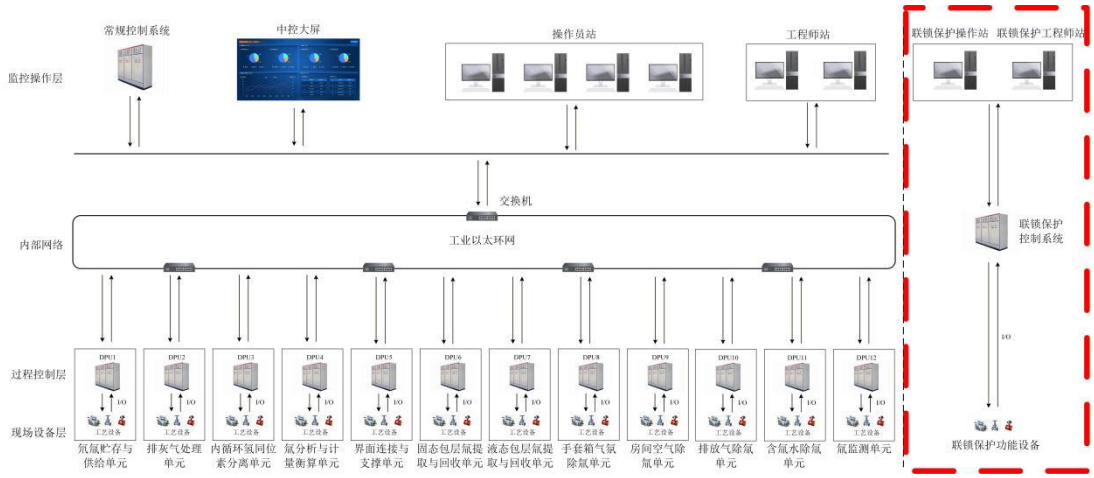


图4-11 联锁保护控制系统结构

联锁保护系统拟采用双通道架构，每个点位的氚监测电离和对应的信号采集设备、联锁保护控制器、安全隔离阀均设置独立且隔离的A/B两路。

表4-4 联锁保护控制功能信息

联锁保护功能名称	器件名称	器件位置	控制逻辑说明
排放联锁保护	氚监测电离室A和B（同时工作）、安全隔离阀、电堆电源柜	含氚水除氚单元氢气排放管道及电堆电源柜安装位置	异常排放（氚浓度大于$3.7\times10^{7}Bq/m^{3}$），关闭电堆电源，关闭该管道上的安全隔离阀
	氚监测电离室A和B（同时工作）、安全隔离阀	排放气除氚单元排放管道	异常排放（氚浓度大于$3.7\times10^{7}Bq/m^{3}$），关闭该管道上的安全隔离阀，打开该管道上阀门进行气体处理循环

由于任何情况下都不允许氚浓度超标的气体向外部环境排放，基于联锁保护控制系统的双通道架构，拟采用1oo2的逻辑判断原则，即两个通道中任何一个通道检测到氚浓度超标发出动作请求，该点位的联锁保护控制功能均会被执行，最大限度地保证外部环境的安全。

4.4 辐射监测系统

本项目辐射监测系统由氚浓度实时监测与巡测、表面放射性污染监测、放射性核素监测与分析、个人剂量监测等部分组成，可为日常的辐射防护和应急监测、应急响应提供基础数据。

根据本项目辐射监测系统的特点，大致可以分为涉氚平台工艺监测单元、场所及个人监测单元。

4.4.1 涉氚平台工艺监测单元

安全防护平台遵循“预防为主、纵深防御、多重屏障、自动响应”的安全原则，确保所有涉氚操作均在受控的包容系统内进行。平台以氚监测单元为输入，联动各净化单元，实现分级、分区、分类的智能化安全控制。氚监测单元覆盖手套箱、房间、管道、排放口的气氛氚监测（量程5×10^{4} ~ 1×10^{10} Bq/m³）进行24小时不间断监测，监测数据实时传输至中央控制室。所有运行操作需严格遵从辐射防护最优化（ALARA）原则。

常规工况运行模式：当实验平台涉氚操作手套箱内气氛氚浓度高于3.7×10^{8} Bq/m³时，手套箱气氛除氚单元自动启动，以≥99%的单程效率持续循环净化手套箱内超标气氛氚直到其氚浓度在安全阈值以下，同时由排放气除氚单元维持手套箱内微负压，防止气载污染物外溢。常规工况排放气除氚单元连续运行，处理工艺尾气并维持操作房间相对负压，净化效率≥99.9%，确保排入烟囱的气体符合环境监管要求。

事故工况运行模式：事故工况主要包括手套箱内工艺系统一级包容或二级包容失效，当一级包容失效时，手套箱气氛除氚单元高于常规工况的处理流量进行循环除氚净化至气氛氚浓度在安全阈值以下；当手套箱等二级包容失效时，房间空气除氚单元联合排放气除氚单元进行应急氚捕集处理至安全阈值以下。

⑴单元功能

氚监测单元是在涉氚手套箱等次级包容结构，以及涉氚房间的三级包容结构配置氚监测设备，对手套箱和相应空间的气氛进行实时氚浓度测量。当出现氚浓度超标和异常氚泄漏时，发出报警用于氚应急响应，用于启动人员应急措施，进行相应房间和空间的封闭，启动除氚系统。

⑵系统功能

根据氚安全包容需求，涉氚系统将按照三级包容原则进行设计。

初级包容系统是气态氚（或氚水）的初级包容系统，由气体输送管道、阀门、泵等构成的氚的实体包容屏障。

次级包容系统是包容初级包容系统的屏障（例如手套箱或通风橱或双包套管道夹层）及其配套的除氚系统，防止放射性物质进入工作区域，需对次级包容系统（如手套箱）中气氛的氚浓度进行监测，在超标时启动手套箱除氚系统进行。

第三级包容系统由动态密封的实验室房间及与其配套的除氚系统构成，旨在防止放射性污染物释放到非辐射工作人员、公众可进入的区域和/或环境。须对第三级包容系统中气氛的氚浓度进行监测，并配备除氚系统去除向环境排出气体中的氚，以保证氚排放量达到安全限值要求。

氚监测单元总体功能：在各实验平台手套箱等次级包容结构，以及涉氚房间的三级包容结构配置氚监测电离室，实时监测氚浓度，当出现异常氚泄漏时，向自动控制单元（ACS）发出报警，以通知对应系统将房间和相应空间进行快速封闭，防止含氚气氛的外排，气氛除氚单元启动，对封闭的房间和空间进行除氚处理。氚监测单元还包括在含氚气氛环境排放前监测，以实现超出排放限值时的应急安全联锁。

氚监测单元需实现三方面基本功能：

① 氚泄漏事故快速监测、甄别和响应，考察各类氚释放模式和氚扩散行为，合理设置采样点，实时快速监测，及时识别事故状态，同时保证关键数据传输安全。

② 与自动控制系统、除氚系统等快速稳定的交互，实现快速报警，空间封闭与除氚响应。

③ 在含氚气氛环境排放前监测，以实现超出排放限值时的应急安全联锁。

⑶主要设计参数

氚监测电离室量程范围$5\times10^{4}Bq/m^{3}$～$1\times10^{10}Bq/m^{3}$：测氚参考响应误差＜±10%。氚监测系统响应时间≤3s。

氚监测布点设计、关键设备器件与材料选型设计、安装集成工艺设计以及安全防护设计应满足安全设计需求。

⑷工艺设计

氚监测单元的界面与工艺流程设计主要包括：

① 界面设计。氚监测单元与其他系统的界面主要涉及：一是对其他实验平台的涉氚手套箱的气氛氚监测；二是氚应急控制涉及的空间封闭和除氚响应。

② 氚监测与响应的控制逻辑设计。氚监测单元应根据氚安全防护平台总体设计，整体平台环境评价和安全评价的要求，根据氚安全防护平台氚泄漏应急响应要求，设计氚监测与应急响应的控制逻辑。氚监测与应急响应的控制逻辑应包括响应动作和响应阈值的具体设计。

③ 运行模式设计和工艺流程设计。对氚监测系统的监测布点和系统运行进行设计。对氚监测系统的整体结构和网络架构进行设计。

氚监测单元的界面包含了内燃料循环平台、外燃料循环平台、氚安全防护平台、介质除氚实验平台、氚辐射安全效应实验平台、包层验证平台、涉氚材料测试平台、涉氚部件维护及处理实验平台的全部涉氚房间、涉氚手套箱等二级包容结构涉氚环境排放位置。氚监测系统需对上述位置完成氚监测布点，并布设监测报警响应系统。

氚监测单元的布局重点在于氚监测的布点。氚监测布点原则与依据，应以氚分区为主要考虑，并包含正常运行工况和事故工况等因素，需结合实际考虑建筑与通风情况布设氚监测电离室。氚监测系统需要对核实物保护区域重点防护，并在存在氚对环境的直接排放点前布设氚排放监测自动安全联锁。

氚监测系统的结构与网络设计主要以完成监测报警的响应时间为核心设计。氚监测单元仪控系统主要包括冗余CPU和远程I/O模块，用于采集氚监测电离室信号。氚监测电离室为离散设备，广泛分布于各涉氚点位，通过网络接口与远程I/O模块相连，为保证系统整体氚监测报警响应时间小于3s，对电离室设备进行分组，为位置较为接近的部分电离室设定虚拟局域网，并优化网络架构与协议，以保证系统运行过程中每一台发现事故时的报警响应时间最小。

⑸安全设计

氚监测系统的安全设计以全流程冗余容错、稳定可靠运行、风险提前预警为核心原则，针对氚监测的实时性、准确性和系统抗干扰性要求，从硬件配置、供电保障、通道负荷、运行防护等维度进行多重安全设计，具体如下：

监测硬件的冗余保障。在所有氚监测点位均配置 A、B 两台电离室，采用双机并行同步工作模式，实现监测数据的实时互校与硬件故障备援，避免单点设备失效导致的监测中断。

供电系统的多重保障。系统供电采用双路市电 + 柴油发电机 + UPS 不间断电源的三级供电架构，层层保障供电连续性，有效规避市电中断、突发停电等情况对监测系统的影响，确保监测设备无间断运行。

监测通道的负荷冗余。氚监测通道总数量不低于系统实际所需测点数的 1.2 倍，预留充足备用通道；同时严格控制满负荷运行时控制台的负荷率不超过 50%，避免通道过载、控制台满负荷运行引发的系统卡顿、数据传输故障等问题。

⑹主要监测仪器

表 4-5 涉氚平台主要监测仪器一览表

序号	名称	型号	主要技术参数	台（套）数	用途	位置	备注
1	场所氚监测电离室	DTC-IC201	测量范围5×10^4Bq/m^3~1×10^{10}Bq/m^3，测氚参考响应误差＜±10%，具备光纤接口和RS-485通讯接口。设备满足电磁兼容要求（GB/T 17626.3-2023，GB/T 17626.8-2006，GB/T 17626.9-2011等标准）。	180台	涉氚房间空气氚监测	各涉氚房间	
2	工艺管路氚监测电离室	DTC-IC101	腔体漏率＜1×10^{-9} Pa·m^3/s，测量范围5×10^4Bq/m^3~1×10^{10}Bq/m^3，测氚参考响应误差＜±10%，具备远程通讯接口，自带泵与流量控制器，漏率需＜1×10^{-8} Pa·m^3 /s	10台	排放气氚监测	工艺排放管道	
3	手套箱氚监测电离室	DTC-IC201-G	测量范围5×10^4Bq/m^3~1×10^{10}Bq/m^3，测氚参考响应误差＜±10%，具备光纤接口和RS-485通讯接口。设备满足电磁兼容要求（GB/T 17626.3-2023，GB/T 17626.8-2006，GB/T 17626.9-2011等标准），具备伽马补偿功能、健康状态监控功能。	68套	氚包容手套箱气氛氚监测	各氚包容手套箱	

4.4.2 场所及个人监测单元

本节所述辐射监测系统主要针对辐射工作场所及个人剂量监测系统。

⑴工作场所剂量监测

在氚燃料实验楼负一层、一层、二层辐射工作场所涉及氚操作的房间内设有固定式氚浓度实时监测；定期采用便携式α、β表面污染测量仪对氚操作房间、走廊的地面、工作台等进行表面污染测量。

⑵个人剂量监测

卫生通过间设有全身表面污染监测仪，对离开辐射工作场所的实验人员的表面污染进行监测，合格后方可离开。

为评估实验人员所受内照射剂量，拟通过定期对涉氚操作的实验人员进行尿氚监测或测定呼气试验中的氚含量。

⑶气载流出物监测

为监测排放尾气中的氚浓度，本项目在70.8m烟囱上设置烟道氚连续监测仪以及氚连续取样仪，用于对排放尾气中的氚浓度的实时监测和取样监测。

本项目新增辐射监测设备仪表见下表。

表4-6 辐射监测设备一览表

序号	设备	参数	单位	数量
1	固定式氚监测仪	取样流量≥2L/min；测量下限≤3.7×10^4Bq/m^3	套	22
2	便携式α、β表面污染测量仪	探测下限：α（^{241}Am）≤0.037Bq/cm^2，β（^{90}Sr-^{90}Y）≤0.37Bq/cm^2 探测效率：α（^{241}Am）≥35%，β（^{90}Sr-^{90}Y）≥35%	台	4
3	全身α、β表面污染测量仪	探测下限：α（^{241}Am）≤0.037Bq/cm^2，β（^{90}Sr-^{90}Y）≤0.37Bq/cm^2； 探测效率：α（^{241}Am）≥35%，β（^{90}Sr-^{90}Y）≥35%	台	6
4	个人剂量报警仪	能量范围：30keV~10MeV； 测量范围：0.1μSv/h~10Sv/h	个	10
5	烟道氚连续监测仪（带过滤器）	取样流量≥2L/min；测量下限≤3.7×10^4Bq/m^3	台	1
6	氚连续取样仪	取样流量≥2L/min；测量下限≤3.7×10^4Bq/m^3	台	1
7	剂量计智能分发柜	至少50个柜位；支持工作卡、指纹、人脸识别	台	2

4.5 放射性三废的治理

4.5.1 放射性废气及其处理措施

本项目涉及的非密封放射性物质主要为氚。为了防止氚扩散造成放射性污染，对这些场所进行了氚包容分区管控，分为C1 、C2 、C3 区，包容区域分级要求见下表。

表4-7 包容区域类别

类别	预料的正常污染和/或偶然污染
C1	在正常运行情况下，不存在表面污染和空气污染风险的区域，仅在特殊情况下，即发生事件或事故时，出现非常低的污染风险。
C2	在正常运行情况下，存在比较低的表面污染和空气污染风险的区域，仅在特殊情况下，即发生事件或事故时，出现污染风险，因此，必须采取适当的防护措施加以控制。

类别	预料的正常污染和/或偶然污染
C3	有一定程度的表面污染，但在正常情况下，无气载污染。在某些情况下，会因事故造成比C2区高的潜在表面污染或气载污染。因此，必须采取适当的防护措施加以控制。

C2 与 C3 区域内进行负压通排风，并配备空气除氚系统。

氚实验楼各楼层的氚包容分区，分别见图 4-11~ 图 4-13。

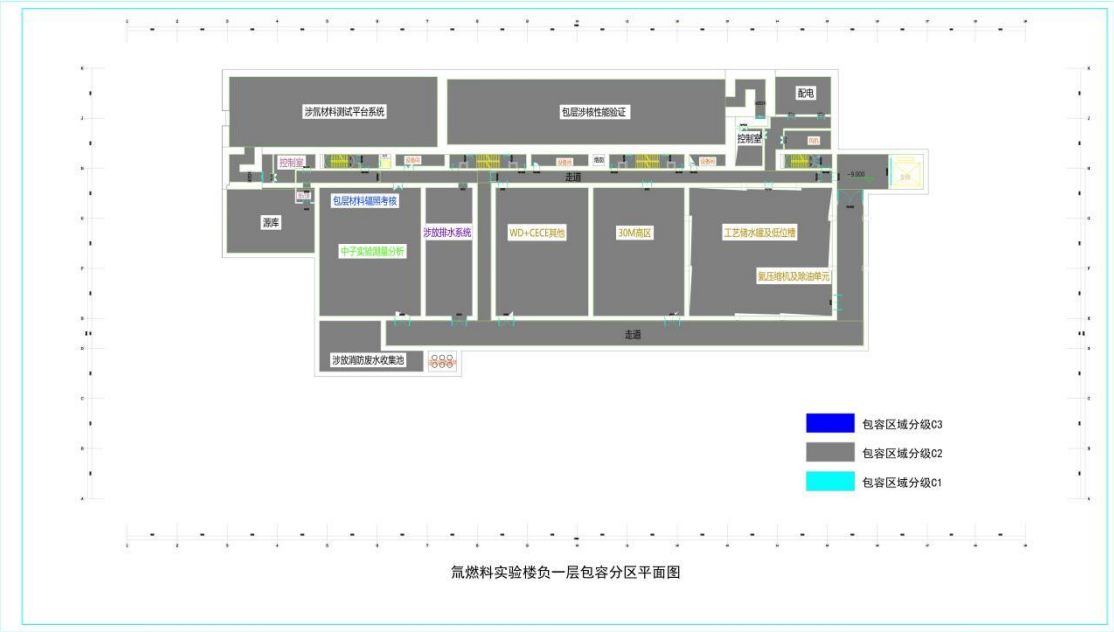


图4-12 氚燃料实验楼地下一层包容分区图

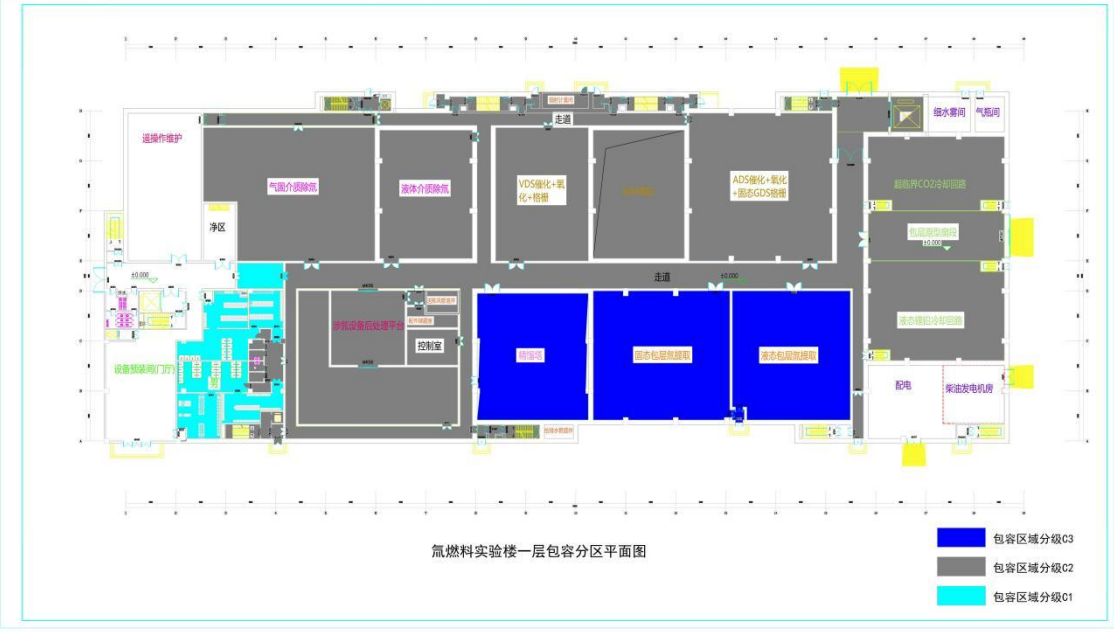
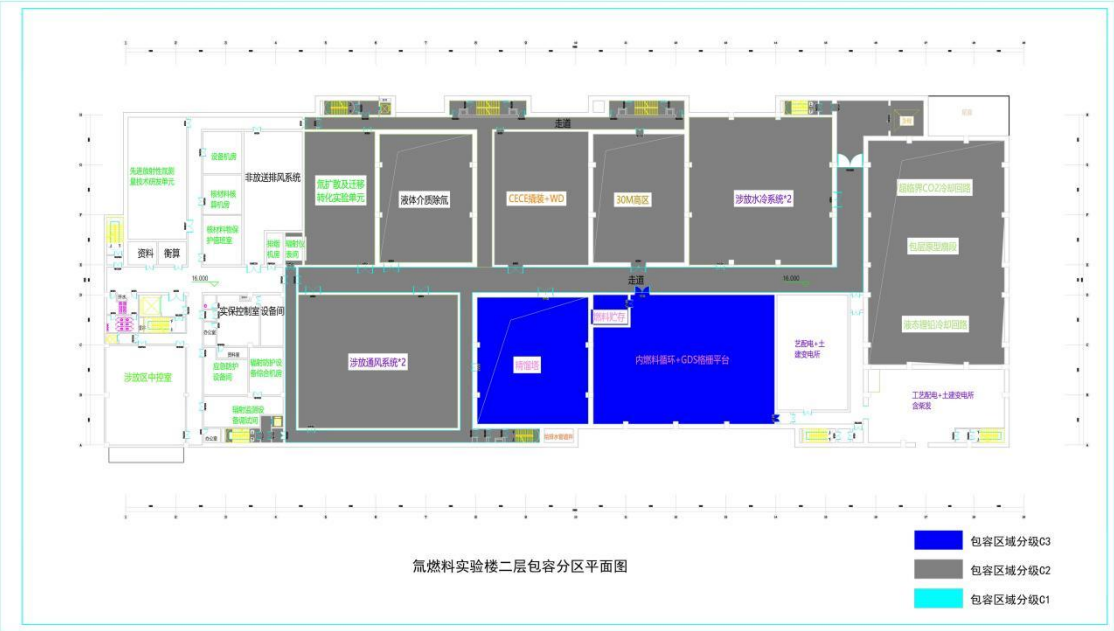


图4-13 氚燃料实验楼地上一层包容分区图



氚燃料实验楼二层包容分区平面图

图4-14 氚燃料实验楼地上二层包容分区图

4.5.1.1 手套箱气氛除氚

⑴单元功能

手套箱气氛除氚单元是氚安全防护平台中的重要子系统，主要用于处理聚变堆氚循环与辐射安全实验系统中各涉氚操作系统包容手套箱中浓度超标的气氛氚，在常规运行、维护及事故条件下实现氚高效去除，保持手套箱氚浓度在合理可控范围内，降低工作人员与公众的辐射照射风险，保障实验系统安全、稳定、经济运行。

手套箱气氛除氚单元采用“催化氧化-分子筛吸附”工艺路线，由多套不同处理规模的手套箱气氛除氚子单元组成，子单元根据需要处理手套箱体积确认，保障常规工况下手套箱换气频率～2次/h。各子单元设备组成一致，均由循环除氚系统、分子筛床再生系统和本地控制系统组成。其中循环除氚系统通过催化氧化和分子筛吸附工艺实现氚去除，实现氚浓度控制；分子筛床再生系统负责恢复已饱和分子筛的吸附能力，实现吸附剂的循环使用；本地控制系统采用DCS实现对整个除氚过程的监控、操作与安全联锁。

⑵主要设计参数

本项目的目标是设计建造氚安全防护平台中的手套箱气氛除氚单元，主要用于处理捕集各实验平台涉氚操作系统包容手套箱中的氚，常规工况下处理对象手套箱换气频率不低于2次/h。

其关键技术指标如下：

① 最大处理能力：不超过2200 Nm^3/h（且≥2000 Nm^3/h）；

② 单程除氢同位素效率：≥99%。

⑶工艺设计

当检测到氚浓度超标即启用GDS，拟采用催化氧化+分子筛吸附工艺，其工艺流程为：手套箱气体由循环泵提供动力，依次流经过滤器、电加热器、催化氧化单元、冷凝器、分子筛床，处理后的气体暂存储气罐，经分析达到VDS可接收标准后送往VDS处理，若未达标再次返回至手套箱重复上述操作进行除氚处理，由VDS抽取多余气体以维持手套箱负压。分子筛床再生（DRS）拟采用热N_2吹扫在线再生模式，当某一台分子筛床吸水饱和出现水蒸汽穿透时，由外部系统引入氮气，通过电加热器加热至350℃，自下至上通过需要再生的分子筛床（加热至350℃），载带出分子筛吸附的水，由冷凝器进行初级冷却，后经冷阱进行深度除水，降至1 vppm（-76℃），冷凝下来的液态水在储存罐中暂存，由取样器进行氚活度测量，并根据氚化水活度水平接入WDS进行氚水处理，过程由N-VDS抽取多余气体以维持系统负压。为进一步保障再生后的尾气HTO＜1 vppm，在冷阱后端进行露点监测，如果长时间未能达到要求将进一步通过DRS备用分子筛床进行深度除水。当尾气端HTO＜1 vppm，认为分子筛再生完全，即停止再生操作，降至常温后（自然冷却）进入备用状态。

在GDS系统设计时，不使用含卤素的材料，如电线绝缘层等，避免氚辐照及火灾等极端情况下产生的卤氢化物对设备的腐蚀；同时用于氚初级包容的阀门、管件均采用316L等抗氢钢材料；仪器、仪表、设备均选用氚兼容的材料，且关键设备的漏率不得高于10^{-5} $Pa·m^3·s^{-1}$，包容放射性物质的密封性可以保证。

⑷安全设计

根据500MW规模氚系统对安全的要求，梳理手套箱气氛除氚单元的安全风险点，进行合理的安全设计以确保手套箱气氛除氚单元在各类运行场景下能正常运行，并且

能应对人为或自然因素导致的突发状况，例如地震、用电故障以及温度、压力、流量等参数的监测。

GDS系统在使用过程中涉及危险源包括含氚气氛、含氚废水、高温组件、电气危害等。设计基准事故包括循环泵组损坏或漏率增加；过滤器堵塞；阀门开启失效或漏率增加；管道破裂或漏率增加；催化氧化反应器催化剂失效、加温功能失效、催化剂粉化、床体破裂；分子筛床除水效率降低、床体破裂；传感器失效；冷凝机组冷凝器失效、冷凝水管道破裂；设备操作人员操作不当；地震、火灾等自然灾害。超设计基准事故主要为手套箱负压过低或正压过高引起手套脱落。

为最大限度保障设备运行期间的人员和环境安全，GDS系统安全设计主要基于以下安全设计准则和原则保障系统设计的安全性。对于GDS整体设计，应遵循危险控制优先原则，识别并消除或降低可能存在的风险点。对于泵组、管道、阀门等部件漏率增加、分子筛床除水效率降低，催化氧化效率降低等基准事件，应遵循保守设计原则。对于泵组损坏、阀门开启失效、催化氧化反应器失效、分子筛床失效、冷凝器失效等事故，应遵循多重性和单一故障准则和独立性原则。对于系统传感器失效事件，应遵循多重性和单一故障准则和多样性原则进行设计。考虑到系统或部件可能发生的故障，设计应遵循故障安全原则。考虑到系统调试和运行期间需进行定期检查及部件维修更换，设计应遵循可试验性原则。考虑到手套破裂可能发生的超设计基准事故，应遵循安全支持与保障原则。

4.5.1.2 房间空气除氚单元

⑴单元功能

房间空气除氚单元（ADS）主要用于去除本项目C3区域系统泄漏至房间浓度超标的氚，维持相关环境和房间的氚浓度处于正常水平，实现氚的安全包容。其核心功能为：在含氚泄漏等事故工况下，对氚浓度异常区域空气实施高效封闭循环净化，快速降低氚浓度至安全阈值以下。最终确保实现工作人员辐射防护与设施运行安全，满足国家相关法规及平台安全管理要求。

事故情况下房间环境气氛可能存在含氚气氛，其中主要包括气态氚（T_2，HT，DT）、含氚水蒸汽（T_2O，HTO，DTO）和氚化烃（主要是氚甲烷）。当初级包容和

次级包容同时失效，氚泄漏至操作间内，ADS需要在尽可能短的时间内将房间空气氚浓度降至限值以内。ADS以循环模式对氚浓度超标房间进行除氚，工作时关闭此区域原有通风系统，结合排放气除氚单元（VDS）维持操作间相对建筑物外负压。

⑵主要设计参数

ADS是聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台中辐射安全体系的重要组成部分，专门用于保障涉氚操作间事故应急工况下的空气安全。主要技术指标见下表。

表4-8 ADS运行工况主要条件参数及技术指标

参数类别	参数指标
循环最大流量	不超过6000 Nm^3/h
单程除氢同位素效率	≥99%
循环速率	1—2次/h
气体	空气
入口压力	略低于0.1 MPa
入口温度	10℃~35℃
入口水含量	(40-50) % RH
氚浓度	系统启动浓度：3.7×10^7 Bq/m^3

⑶工艺流程设计

ADS系统气体处理流程如下：

① 房间剂量监测达到控制阈值后，对应房间区域关闭常规通风系统，切换为房间除氚系统，房间气体由循环风机输送至气氛处理设备，先经过滤装置实现气体除尘，再送至催化氧化单元。

② 气体进入催化单元前级热交换器，与已经反应过的气体进行热交换并被加热至所需温度。加热后的气体进入低温催化氧化反应器，T_2和HT被氧化生成氚化水。

③ 低温催化反应后的气体进入后级热交换器，热交换后被加热到400℃，再经加热器进一步被加热到500℃后进入高温催化氧化反应器，气体中含有的氚甲烷等有机成

分被氧化为氚化水。

④ 反应后的气体经两级换热后和冷凝器降温冷却至室温20℃左右，气体中的过饱和氚化水蒸气冷凝为液态水收集到水存储系统。

⑤ 剩余气体进入喷淋洗脱柱进行处理。采用逆流交换的方式，将含高氚水蒸气的空气通入喷淋柱下端，将低氚水注入喷淋柱上端，含氚水蒸气与液态水在喷淋柱内填料表面发生氢同位素交换。反应后的高氚水从喷淋柱底部排出至储水罐，含低氚水蒸气的空气从上端排出，其中的氚水进一步经冷凝后收集。

⑥ 所有ADS产生的氚水均以液体形式在储水罐（含冷凝器储水罐）中储存，须具备安全储存和计量运行过程产生的氚化水的功能。配置液位仪、压力传感器、氧分析仪等对储水罐的压力、液位进行监测。

ADS设备采用模块化设计，每个模块处理量按1500 Nm^3/h设计，彼此之间互为备份。主要由循环风机模块、催化氧化模块、喷淋洗脱模块，以及循环管路构成。

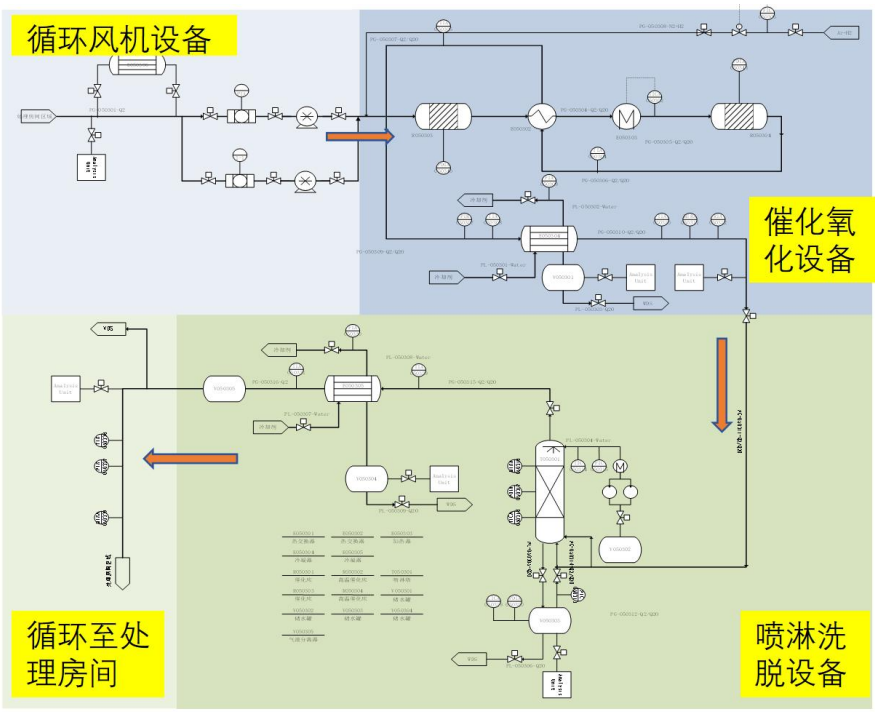


图4-15 房间空气除氚单元工艺流程图

⑷安全设计

①抗震与结构安全设计

依据设备承压部件、板壳支承件、线性支承件及螺栓的应力评定准则进行抗震设计，满足地震设防要求。地脚螺栓孔全约束，支座底板平面约束，综合考虑压力、自

重、接管与地震载荷，通过动力学模型、自振特性及反应谱分析，评估设计工况与事故工况下的应力、位移及地脚螺栓应力。

②系统可靠性与冗余设计

ADS系统设备充分考虑设备成熟设计成熟度、设计余量。从系统设备多重性、多样性保证原则确保系统可靠性。主要设备采用模块化设计，通过管路连接，实现每个模块互为备用，防止某个模块失效，导致系统无法保障运行处理功能情况发生。设备和管路上设计有多个温度、压力等监测仪表，当设备、管路或者房间监测数据异常时，可从多种因素对设备运行参数和状态进行正确判断。循环风机单元、催化氧化单元、喷淋洗脱单元主要设备均采用模块设计，每个单元采用模块化设计，每个设备模块在各功能单元可独立使用，通过管路连接，某模块设备出现问题时，通过切换设备和管路开闭，继续保持系统的正常运行，消除独立设备问题导致设备整体运行失效的情况。

③紧急安全控制机制

具备远程与就地应急控制功能，设备现场设急停按钮，直连安全继电器，触发后切断电源、关闭阀门、复位运动部件。中控系统可远程停机，报警信息显示于控制界面。

④报警功能

支持现场声光报警与远程工控机界面报警。传感器信号由本地控制站采集，阈值可设，数据在中控系统显示与记录。

⑤电控联锁机制

电控系统设置逻辑互锁，实时监控设备状态、压力、温度等参数。环境指标超限时关闭通风、启动除氚单元，并与VDS联控。工艺参数异常或紧急信号触发时，自动启停设备阀门，并联动中央控制系统与相关系统确保安全。

⑥控制系统电源可靠性

采用双路供电与双路UPS，配置电源切换装置，切换时间符合要求。配电柜设电源指示灯，异常时报警并启动联锁流程。

4.5.1.3 排放气除氚单元

⑴单元功能

排放气除氚单元与氚安全防护平台各功能单元的关系如图12所示。

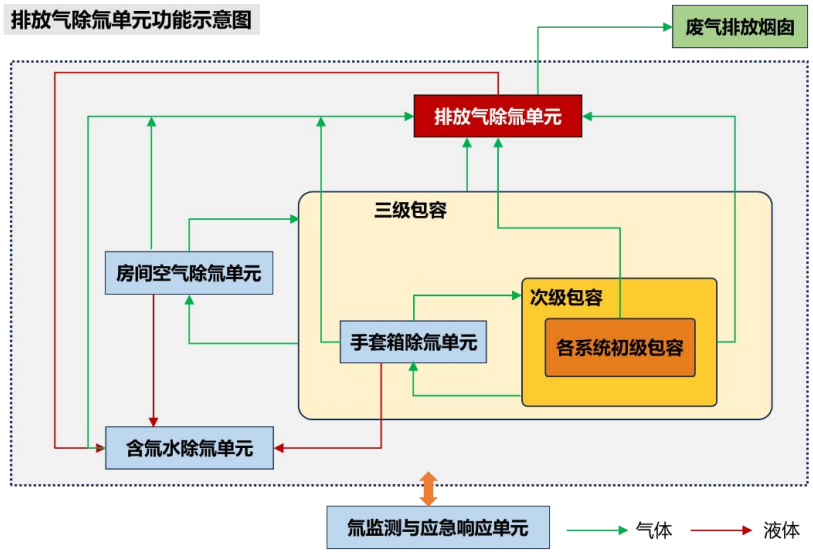


图4-16 排放气除氚单元功能示意图

排放气除氚单元作为聚变堆氚燃料与包层关键技术研发和实验验证平台中含氚气体向环境排放的最后一道关卡，其主要功能为：

① 各涉氚研究平台及氚处理单元的工艺尾气、排出气的深度除氚及排放；

② 各氚处理单元次级包容体吹扫气及减压气的深度除氚及排放；

③ 在维修及氚泄漏工况下，制造相关包容空间的负压，使含氚气从低浓度区域向高浓度区域定向流动，并对抽提气进行除氚排放；

④ 将除氚过程中产生的含氚水输运至含氚水除氚单元进行除氚。

⑤ 通过上述功能，可实现正常工况和氚泄漏工况下，聚变堆氚燃料与包层关键技术研发和实验验证平台的含氚排放气的收集、分级除氚、氚水输运等，使平台排放至环境的含氚气体满足氚排放浓度限值要求，进而实现分级、分类、全链条的氚排放控制及氚回收，并尽可能降低氚排放量，保障操作人员、环境及公众的安全。

⑵主要设计参数

① 排放气单元包括两套系统，其中N-VDS的处理流量不低于800 Nm^3/h；S-VDS处理流量不小于3000 Nm^3/h；

② 单程除氢同位素效率≥99.9%。

⑶工艺设计

聚变堆氚燃料与包层关键技术研发和实验验证平台的排放气主要包括气态氚（T_2、HT、DT）、含氚水蒸汽（T_2O、HTO、DTO）和氚化烃（主要是氚甲烷）。两套排放气除氚单元均采用催化氧化+喷淋洗脱工艺路线，确保气体达标排放。N-VDS与S-VDS主要由气体输运管网、泵输子单元、催化氧化子单元、喷淋洗脱子单元构成，工艺流程如下图所示。

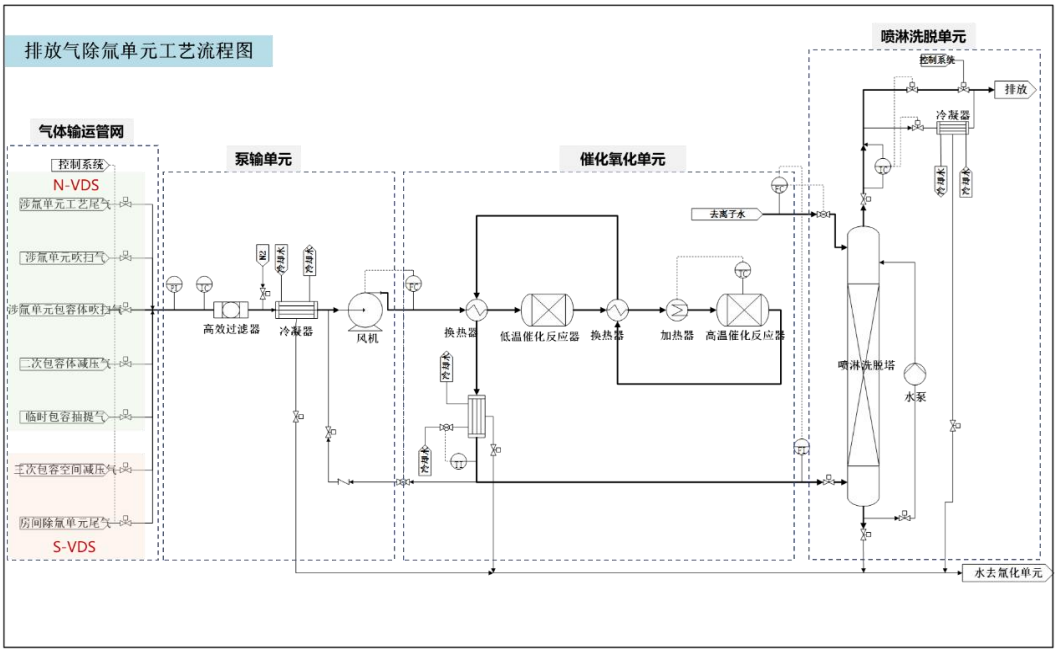


图4-17 排放气除氚单元工艺流程简图

具体工艺流程为：

① 源项管网收集待处理气体：在压力梯度的驱动下，各空间内的待处理气体通过气体输运管网汇集后进入泵输子单元。

② 气体预处理及增压：在泵输子单元，气体首先通过滤器除去粉尘，再经冷凝器降低含水量，而后进入风机增压。

③ 催化氧化除氚：经风机增压后的气体通入催化氧化子单元进行除氚。采用两级催化复合工艺，气体首先进入低温反应器，含氚单质经催化氧化生成氚化水；接着通入换热器与气体加热器实现气体的升温后，再通入高温反应器进行含氚有机物的催化氧化并生成氚化水；最后，气体进入冷凝器冷凝至室温。

④ 喷淋洗脱除氚：气体通入喷淋洗脱塔，其中的氚化水经表面交换反应后被富集浓缩，分析处理后气体的氚浓度，高于排放标准时，气体经冷凝后返回泵输单元进行循环除氚；达到排放标准时，气体通过废气烟囱排放至环境。

⑤ 单元入口及出口气体的氚浓度采用电离室监测，过程中产生的氚化水采用储液罐收集、计量，经液闪分析达到接收标准后，输运至含氚水去氚化单元进行除氚回收。

⑷安全设计

①安全冗余

由于N-VDS处于相对连续运行模式，对其关键部组件，如风机、过滤器、转移泵、真空泵、催化柱、齿轮泵等采用一备一的安全冗余设计。S-VDS为在事故状态下启用的备用系统，采用模块化设计，由三套相同的系统组成，模块间互为备用，但模块内不设计安全冗余。这样的设计同时也可以实现S-VDS与N-VDS的相互备用，可有效保障系统安全可靠运行。

②超压保护

系统运行过程中有可能因为系统阀门突然失效关闭、催化床堵塞、过滤器堵塞等导致系统内压力过高。为避免系统超压引发危险设计了安全联锁功能，针对关键设备如过滤器、催化床等，当压力传感器检测到床体压差超过设定值时，通过信号反馈可自动切换至备用过滤器及床体，或者通过安全阀泄放至另一套系统。此外，在风机侧配备了主动、被动泄压，风机具备出口侧压力监测及控制功能，压力超过预设后主动打开回路将气体返至入口调节出口压力；在主动泄压失效时，当检测到系统压力超过设定值时，超压气体将通过阀门管路泄至另一套系统。

③超温保护

通过软件控制气体加热器的加热功率，设置多点测温，若发生超温现象，控制系统发出警报，并通过安全联锁软件控制加热器的加热功率或切断加热器的电源。

④氚泄漏保护

排放气氛除氚单元的设计整体漏率低于1×10^{-5} Pa·m^3/s，并提高了关键部件的漏率指标，可有效降低氚泄漏风险。

4.5.2 放射性废水及其处理措施

常规工况下除氚系统回收的含氚水的产量约为20 kg/h，储水罐容量为 7.2m^3；维修或检查操作期间，氚实验楼水冷系统回路中部分或全部排入排水罐，如果水质达不到系统的回填要求，对应储罐的水经过脱盐、过滤等处理后被转移至WDS进行处理，达到回填水质要求后将回到主冷却系统继续作为冷却水使用；对于工艺管道破裂产生的含氚水，将收集至储水罐中，容量约 100m^3，储罐的水经过脱盐、过滤等处理后被转移至WDS进行处理，满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入市政污水管网。

所有HVAC冷凝水将根据其来源收集存入储罐，并配备了水质检测接口，可对其水质进行分析以确定相应处理和排放方式。对氚浓度进行取样监测后，满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入污水管网；如果含氚浓度超标，之后将输送至水去氚化（WDS）系统进行除氚处理，处理达标后再受控排放。

对于氚实验楼涉氚操作职业人员洗涤水，项目拟建立废水暂存罐，单个暂存罐设计容量约 15m^3（假设一人单次洗涤使用50 升水，一个批次洗涤人数不超过30 人，一个暂存罐将可供给30 位涉氚操作职业人员洗涤 10 个批次），数量2 个（一用一备），对氚浓度进行监测，满足排放标准时，在监管部门的监督下受控排入污水管网。如果含氚浓度超标，对人员洗涤废水配套消杀和净化系统，进行消杀和净化后输入水去氚化（WDS）系统，在WDS 系统中按照下图工艺废水处置逻辑进行处理，贫化后的水进入工艺系统内循环使用，确保无超标含氚废液排放。

废水暂存罐中氚测量采用超低本底液闪计数器进行测量，测量方法参照《水中氚的分析方法》（HJ1126-2020），要求探测下限≤1.5Bq/L。

中国工程物理研究院材料研究所自主设计建设的1 套含氚废水处理工程装置，已实现连续稳定运行考核1620h，按照10.6kg/h 的处理速录，将约92%的含氚水贫化 ~26826 倍，获得了氚水浓度从 1.8×10^5Bq/L 处理降低至7.5Bq/L 的实验结果。本平台项目氚实验楼拟建氚水处理系统将采用相同工艺和方法，因此将可实现同等处理能力。含氚废液由去氚化（WDS）系统中氚水存储子系统收集储存，氚水存储子系统包括高浓度、中浓度、低浓度和极低浓度四个浓度级的氚水储罐，及250m^3 的应急氚水储罐，主要参数见**下表**，设计中考虑了如下因素：

⑴充分利用重力作用来转移不同区域和不同系统、设备中产生的氚化水，氚水储罐置于建筑物最低层；

⑵尽可能优化减少储罐连接至WDS 系统的管道设计和布局，降低氚水在管道中的滞留；

⑶减少氚化水在储存罐底部的滞留量；

⑷针对氚水储罐，考虑其辐射分解积累氧气和氢气的危险因素，设置氮气吹扫管线，尾气连接到N-VDS。

表 4-9 水去氚化系统氚水储存罐和应急水池的参数

储存罐	容积，m^3	参考氚浓度，Bq/m^3	尺寸，mm
高浓度	2.5	1.85×10^{16} (500 Ci/kg)	内径800，高度2800，2 个
中浓度	5	3.70×10^{15} (100 Ci/kg)	内径 1100，高度2800，2 个
低浓度	10	3.70×10^{10} (0.001 Ci/kg)	内径 1600，高度2800，2 个
极低浓度	20	3.70×10^{7} (10^{-6} Ci/kg)	内径2400，高度2800，2 个
应急	250	3.70×10^{14} (10 Ci/kg)	长4000×宽7000×高4500，2 个

水去氚化主体工艺通过水精馏预处理浓集（WD）、电解耦合催化交换（ CECE）和氢同位素低温精馏（CD）三部分联合进行除氚处理。

项目运行过程各类氚水的处理逻辑如图 4-17所示。

⑴待处理氚水通过泵或重力驱动，经管道进入WDS 的氚水储罐子系统TWHTS；

⑵经过氚测量后将>3.7×10^{8}Bq/L 的氚水输入电解耦合催化交换CECE 单元（包含催化交换子系统LPCES 和电解子系统ES），贫化后达到排放限值的氢气从烟囱排放，氚富集的水返回TWHTS；

⑶浓度 6×10^{4}Bq/L~3.7×10^{8}Bq/L 的氚水输入水精馏预处理子系统 WDPS，绝大部分（>90%）氚水的浓度贫化>100 倍后经TWHTS 中转后返回大厅循环回用，富集的氚水（<10%）浓度增加一个量级后返回TWHTS，再经过氚浓度监测后输入LPCES 和ES进行进一步贫化；

⑷经催化交换子系统LPCES 和电解子系统ES 产生的高浓度含氚氢气进入CD 系统，CD 处理规模约为6.3m^3/h (约280mol/h)。进入CD 的氢气中氚摩尔比为1.19×10^{-7}~1.19×10^{-5}（T/H，下同），通过CD 将待处理的氢气中的氚浓度提升约1000 倍后收集

贮存，可根据需要进一步进行提氚处理。同时，CD 产出的贫氚氢同位素气体（T/H<1×10^{-7}），返回CECE 进行进一步除氚处理后，经过同位素交换和洁净水洗涤后的尾气，在满足排放限值的条件下经烟囱排放。

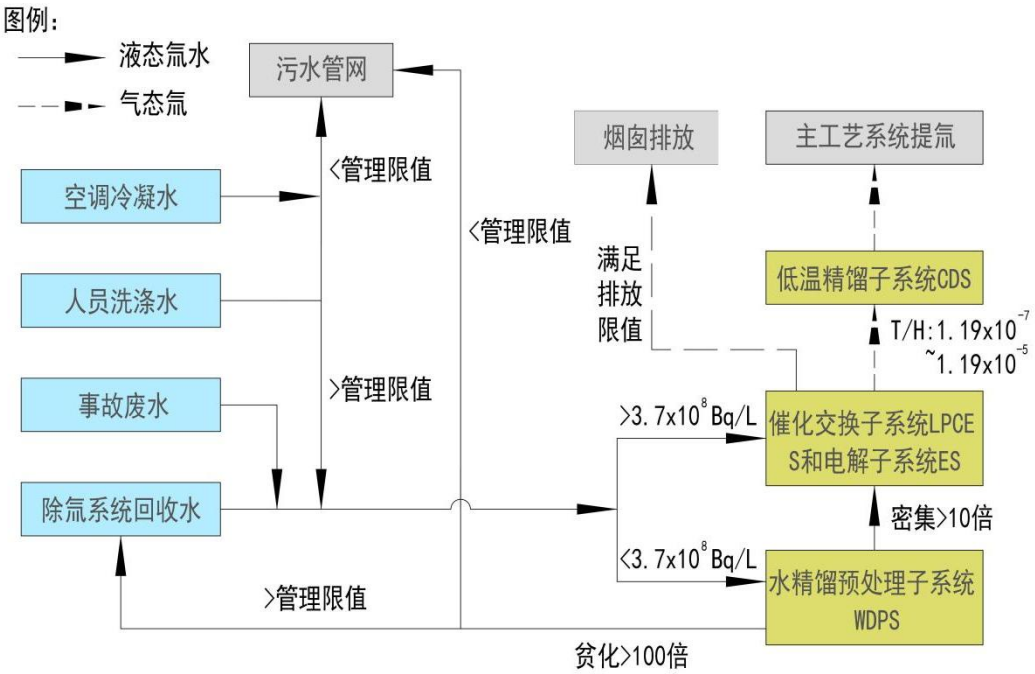


图 4-18 平台项目各类氚水的处理逻辑图

含氚废水经上述方式处理后，预计将可满足项目提出的放射性废液排放限值要求。

本项目放射性废水处理设施主要为含氚水除氚单元，在项目规划中，该单元隶属于氚安全防护子平台。

⑴单元功能

氚循环与辐射安全实验系统各工艺单元在运行和维修期间都会产生大量氚化水。各种气氛除氚系统，包括排放气除氚单元（Ventilation Detriation System，VDS）、房间空气除氚单元（Air Detriation System，ADS）和手套箱气氛除氚单元（Glovebox Detriation System，GDS），经过催化氧化过程都会产生氚化水，这是主要来源；各类涉氚部件维护过程和除氚过程中也会产生含氚水；事故状态，如涉氚管道破裂或装置破损，都会产生大量高浓度含氚水，并最终流入含氚水除氚单元（Water Detriation System, WDS）进行处理。

⑵主要设计参数

水精馏预处理子单元处理能力20 kg/h，贫氚因子≥200；

联合电解催化交换子单元处理能力20 kg/h，氘去污因子≥1000；

低温精馏子单元处理能力6Nm^3/h，氘富集因子≥100。

⑶**工艺设计**

含氚水除氚单元主体采用自回热水精馏预处理浓集（Water Distillation，WD）+联合电解催化交换工艺（Combined Electrolysis Chemical Exchange，CECE）+氢同位素低温精馏（Cryogenic Distillation，CD），分为水精馏预处理子单元、联合电解催化交换子单元和低温精馏子单元。水精馏预处理子单元对低浓度含氚水进行预浓集，富氚水和其他高浓含氚水在CECE子单元中实现进一步分离，CD子单元对CECE子单元产生的含氚氢气进行氚回收。总体工艺方案如下图所示。

水精馏预处理子单元包含储罐模块、前端预处理模块、水精馏模块。储罐模块用于存储不同浓度的氚水，正常工况下氚化水根据氚浓度水平选择临时储罐。前端预处理模块用于去除含氚水中离子、有机杂质，并向水精馏、CECE子单元输入原料水。水精馏模块基于氢同位素氧化物之间微小的蒸气压差，通过气液相间同位素的反复交换使得重组分（HTO）在塔底浓集，而塔顶得到贫氚水，塔底富氚水输入CECE子单元。

CECE子单元包含催化交换模块、电解模块、氢气处理模块和工艺干燥模块。催化交换单元基于疏水催化剂表面HT和H_2O蒸汽的催化交换反应，使得重组分T转移到蒸汽相中形成HTO蒸汽。电解模块主要用于将催化交换柱下端的富氚水进行电解，生成单质态氚，一部分循环进行催化交换，一部分提取后输入低温精馏子单元。氢气处理模块用于提取电解单元产生的氢气，除去H_2（HT）中的杂质。工艺干燥模块用于含氚水除氚单元检查和维护前，除去工艺设备和管道中残留的氚（HTO蒸气和含氚水）。

低温精馏子单元包含氢同位素净化模块、供给回收与超压防护模块、精馏柱模块、冷量分配模块、换热模块、绝热模块以及测控模块。电解产生的含氚氢气体将首先通过氢同位素净化模块除杂处理，经换热预冷后，进入精馏柱1进行精馏分离。经精馏柱1分离得到的重组分产品气将从精馏柱1底部提取，依次通过换热复温、化学平衡转化以及重新换热预冷后，进入精馏柱2进行二次精馏分离。经精馏柱2分离得到的轻组分产品气从精馏柱2顶部提取，依次通过换热复温、化学平衡转化以及重新换热预冷后，返回精馏柱1进行再次精馏分离。最终，CD子单元分离得到的轻组分产品气从精馏柱1顶部提取，经换热复温后，返回LPCE柱，进行进一步除氚处理后排放；分离得到

的重组分产品气将从精馏柱2底部提取，先暂存在一个容积为2m³的氢气暂存罐中，然后批次送往VDS中的热循环吸附装置单元（TCAP）进行进一步同位素富集回收。

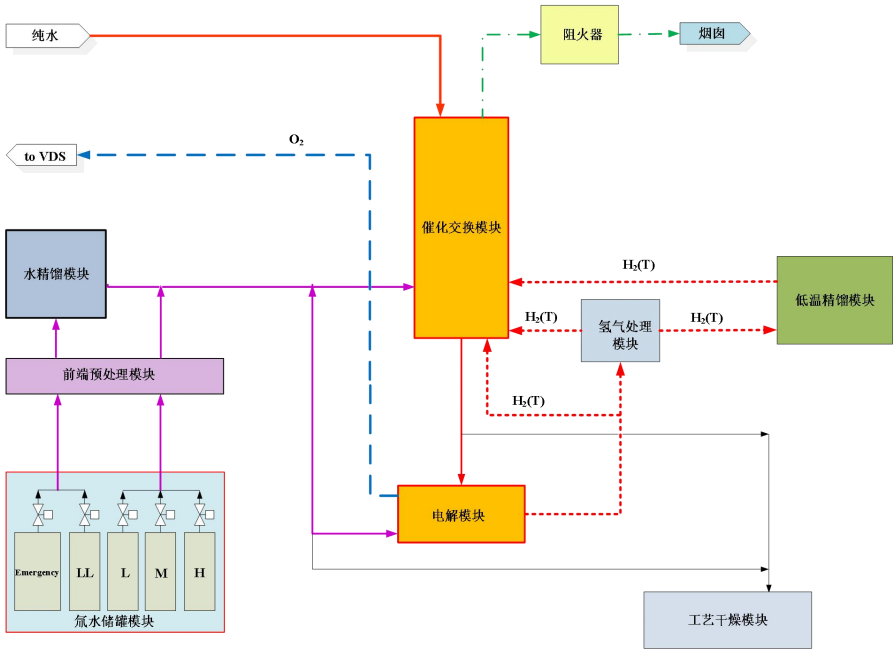


图4-19 水精馏模块工艺流程示意图

⑷安全设计

水精馏预处理子单元

在水精馏预处理子单元运行过程中可能发生机械伤害、触电、火灾、烫伤、氚水泄漏等风险。针对上述安全隐患，水精馏预处理子单元做出如下安全设计：

①机械安全

依据要求，在泵、压缩机组、真空机组的电机转动部位加装了保护罩，可有效防止工作人员受到机械伤害。

②电气安全

装置选用的供配电设备、低压电气设备、线缆均为合格产品；安装完成后进行实际测量接地保护电阻，需满足《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》（GB 50150-2016）中小于4Ω的要求。全部电气设备均设计漏电检测联锁跳闸功能。

③火灾

装置出现大规模火灾的可能性较小，仅可能因电气故障出现火情。装置选用的电气设备、线缆为合格成品，UPS电源经检测合格，电气设计、施工按相关标准、规范实施；在运行期间加强现场5S管理，严格控制火源，定期对电气设备、线路进行检查，可有效防止火灾的发生。同时，装置配备火灾报警系统，且运行期间均有人员24小时值守，出现火情或火险时，可及时发现，并利用现场配备的灭火器及时灭火，避免火情扩大。

④压缩气体爆炸

公用工程中的压缩气体在装置现场设置储气罐，储气罐经第三方检测合格，储气罐设计压力（1.05MPa）均为工作压力（0.5~0.6MPa）的1.5倍及以上，满足《压力容器》(GB 150.1～.4-2024)的要求。储气罐均配有安全阀，安全阀经第三方检测合格。按照压力容器相关管理要求，定期对储气罐、安全阀、减压阀进行校验。

⑤烫伤预防

触碰高温设备表面烫伤预防。装置在精馏柱、部分换热器、导热油管道、部分气液管道部位包覆有保温棉，在运行过程中实测，上述部位表面温度均为环境温度，相关烫伤风险已消除。

导热油泄漏烫伤预防。导热油循环回路涉及的导热油管道、再沸器、导热油膨胀箱设计压力需满足工艺使用要求，在装置运行前，参照《工业金属管道工程施工规范要求》（GB 50235-2010）中压力试验要求对相关管道、容器的气密性检测合格，正常工况下导热油不会泄漏。导热油循环回路中设置导热油膨胀箱，当回路超压时，可通过导热油膨胀箱泄压，避免导热油超压泄漏。导热油循环回路中涉及的管件、阀门耐压程度达1.6MPa，较正常工艺值0.4MPa裕度已达300%。导热油循环回路中设置压力、温度信号异常—连锁关停机制，可避免超温超压时导热油单元继续运行造成导热油泄漏。

⑥含氚水泄漏预防。氚水回路中涉及的管道、精馏柱、换热器、容器设计压力满足工艺使用要求，参照GB 50235-2010中压力试验要求对相关管道、容器的气密性进行检测合格，正常工况下含氚水不会泄漏。在转子输送泵后端设置安全阀，当泵后压力≥0.85MPa时，可泄压至泵前管道避免超压泄漏。氚水回路中涉及的管件、阀门耐压程度达1.6MPa，较正常工艺值0.4MPa裕度已达300%。在氚水回路中多个关键部位，如精

馏柱、管道、换热器部位设置压力监控，便于判断回路有无漏点或超压。设置泵后压力过低触发声光报警、精馏柱塔顶压力信号异常触发连锁关停压缩机组的安全机制，当液相回路因漏点失压时，可报警提示工作人员进行处理或直接关停对应设备，避免装置在存在漏点的情况下继续运行。

⑦共振预防

装置塔区的输送泵、压缩机组的安装按《风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范》（GB 50275-2010）实施、管道安装按GB 50235-2010实施，安装调试完毕后，需对塔区相关设备及其出口管道振动速度进行测试合格，可避免因共振影响设备寿命和造成塔架坍塌。

⑧环境安全分析

装置中所有储罐的设计容积均为最大工艺值的1.25倍，裕度较大，正常工况下不会出现储罐冒槽的现象。储罐设计有磁翻板液位计，用于储罐液位的连续测量，现场与控制室均可读取，便于液位过高时工作人员及时处理。在控制系统中需多次确认方可启泵，可降低因人为误操作导致的储罐冒槽风险。全部储罐均设计连续液位高限（可调）—报警功能；配置高液位开关，高液位开关触发在控制室会触发报警。

联合电解催化交换子单元——氢气安全设计

氢气管路包括PEM电解槽阴极部分、氢气气液分离器、LPCE分离柱、冷凝器、催化氧化床及附属管路，总体积约5 m^3，且大部分（4 m^3）处于微正压状态。尽管PEM电解槽产氢速率为50 Nm^3/h，CECE系统内的氢气总量不超过6 Nm^3。且氢气管路对外连接部分均带有单向阀/阻火阀，有效阻止外界空气进入系统内部，保证了系统内氢气安全GB/T37563-2019《压力型水电解制氢系统安全要求》。此外，为保证氢气安全，采用了如下安全措施：

①实行二级包容。为了防止PEM电解装置内的氢气外泄造成燃爆风险，将对PEM电解槽、LPCE柱及相关连接管道的法兰、接头等连接部位实施全面的二级包容，具体包括：1）PEM电解槽实行整体二次包容，并在系统运行过程中持续通入氮气进行吹扫；2）将二次包容后的电解槽与附属的涉氢储罐设备再进行整体二次包容，并在系统运行过程中持续通入氮气进行吹扫；3）LPCE柱及相关连接管道，法兰、接头等连接部

位，实施氮气保护的二次包容。此外，CECE和CD系统将采用抗震设计，具体抗震等级与建筑要求一致，确保在地震等恶劣工况下系统的结构完整性。

②配备高灵敏且可靠的氢（氚）监测设备，并与工艺系统联锁控制。在CECE系统设备和管路附近上方等泄漏氢气主要扩散路径上将配备多套氢气报警器，氢气检测限可达1 ppm，同时在房间顶部还将配备多套氚监测电离室，检测限达1×10^5 Bq/Nm^3。这些高灵敏度的氢（氚）监测报警设备，能确保操作人员在氢气泄漏发生初始阶段即获知相关信息，及时采取应对措施，以避免大量氢气泄漏导致的燃爆风险，而采用多套监测设备冗余配备的方式，可有效提高氢（氚）监测的可靠性。氢（氚）泄漏监测报警信号将反馈到控制系统中，根据泄漏严重程度，采取不同的联动控制措施，如在氢气泄漏较大的情况下联动关闭电解制氢设备（关闭时间一般不长于30s）等。

③确保该区域通风良好

LPCE柱顶氢气管道排放口高于烟囱2米，保证安全放散，且在排放口位置装有阻火器和单向阀，极端情况下即使发生氢气燃烧情况，也能够有效防止氢气回火，保证系统内氢气安全，满足GB4962-2008《氢气使用安全技术规程》有关要求。同时，管路系统都进行了接地处理。

联合电解催化交换子单元——氧气安全设计

氧气管路包括了PEM电解槽阳极部分、氧气气液分离器、冷凝器及附属管路，总体积约1m^3，均处于微正压状态，且管路系统均按照规范要求除油除脂。氧气经管路系统通入VDS系统，不会产生安全风险。

联合电解催化交换子单元——PEM电解槽安全设计

PEM电解槽存在氢气泄漏、氢氧互混及熔穿或短路等风险，均对设备安全运行产生重要影响。

①氢气泄漏风险。PEM电解槽属于自研设备，为了满足氚化水处理需要，PEM电解槽设计时采取了有效措施，将其漏率降低至10^{-7} Pa m^3/s，远优于国标要求，能够有效防止氢气泄漏。同时，针对氢气泄漏也采取了一系列措施，如二级包容、氢气泄漏监测及良好通风等。

②干烧熔穿风险。PEM电解槽运行功率极大，无水干烧有可能造成膜电极熔穿或阴阳极短路，造成安全风险。为了避免这种情况，通过监测PEM电解槽各小室电压、

进水流量计、水氧分离器液位、氢气侧压力及氧气侧氢气浓度等手段对PEM电解槽进水情况进行监测，发现异常立即停止PEM电解槽。

③氢氧互混风险。对于出现的PEM电解槽质子交换膜穿透造成氢氧互混等极端情况，系统根据PEM电解槽上各小室的电压检测信号及氢中氧和氧中氢浓度信息做出安全互锁逻辑，一旦发生氢氧互混问题，立即停止PEM电解槽，并将电解槽与系统隔离，切断氢氧互混路径。同时，PEM电解槽及涉氢装置周围均安装了氢气传感器，发现氢气向外界泄漏（氢气浓度高于0.5%），将启动应急措施，停止PEM电解槽，避免氢气聚集。

联合电解催化交换子单元——氚安全设计

由于CECE系统处理的源项为3.7×10^{9} ~3.7×10^{10} Bq/L的氚化水，且正常工况下由LPCE柱顶每小时向外界排放50 Nm^3/h的贫氚氢气，对其排出的氢气中的含氚量进行了衡算。正常工况运行时，PEM电解槽电解量40 kg/h，氢气流量50 Nm^3/h，其中送入后级CD子系统流量为6Nm^3/h。CECE-CD初始阶段氚化水浓度为3.7×10^{10} Bq/L，是系统最低氚浓度状态。经过长时间运行达到平衡状态时，是CECE系统中氚化水的最高浓度，也是LPCE柱顶排放氢气中氚含量的最大值，以此作为基准计算。平衡状态时，进入CECE系统的原料氚化水中的氚总量等于送入CD系统的氚总量，由此计算送入CD系统的氢气中的氚浓度为1.23×10^{11} Bq/Nm^3。PEM电解槽电解含氚水的分离因子约为5.5~9.5之间，以6计算可知，达到平衡状态时，进入PEM电解槽的含氚水的浓度为7.4×10^{11} Bq/L，也将一直维持在该浓度状态。正常运行状态时，LPCE双柱串联，实际塔板数能够达到80块。根据以上参数基于稳态模型计算可以得知，LPCE柱顶排放氢气中HT可下降至180 Bq/Nm^3，柱顶氢气经过冷凝器冷凝至15 ℃，排放氢气中以水蒸气状态存在的氚浓度为4.1 Bq/Nm^3。此外，LPCE柱顶装有两台电离室，能够实时监测排放气中的氚含量，联锁工艺系统，超标会关停PEM电解装置，及时查看问题并进行处理。

低温精馏子单元

氢同位素的精馏是在20K左右的低温条件下进行，在该温度下，精馏柱系统中的绝大部分氢同位素以液态形式存在，若发生因停电、低温制冷机故障、冷箱真空破坏等意外事件导致精馏柱失冷，液氢大量蒸发气化会导致精馏柱超压，存在严重的安全隐患。此外，若发生精馏柱或管道破损，导致氢同位素气体泄漏到硬壳包层中，也需将

泄漏的氢同位素气体及时回收转移，以免发生事故。针对上述潜在安全隐患，系统中需设置安全防护组件。两根精馏塔塔顶分别设置超压防护组件，安全阀和防爆片的额定工作压力将由精馏柱系统最高泄压压力Pmax决定。

①精馏柱及相应工艺管道泄压

精馏塔泄压工艺流程如下：精馏柱顶部出口连接工艺管道，当精馏柱内气体压力升高到压力P（低于最大工作压力Pmax），将由基于压力变化的安全互锁系统将阀门自动打开进行泄压至Tank，该阀门也可由操作人员远程手动将其打开。这种操作方式的好处是当由于操作失当或其他异常情况造成精馏柱柱体压力升高，可及时将压力泄放，避免更换爆破片及重新校准安全泄压阀。若阀门因故不能正常工作，当精馏柱及相应工艺管道内的气体压力超过最大工作压力Pmax时，将通过安全阀进行泄压。在安全阀前端设置有爆破片（设定压力不得低于0.55 MPa（绝压）），其作用是避免氢同位素气体与安全阀直接接触，降低工艺气体纯净度。在安全泄压阀与爆破片之间安装有压力传感器，通过监测安全泄压阀与爆破片之间管道内的压力，可以判断爆破片是否破损。另外，在爆破片和安全泄压阀组成的泄压装置前端配备了常开式铅封阀，其在正常工作情况下处于开启状态，仅在需要更换爆破片或安全泄压阀时关闭。

②泄压罐泄压

在进行泄压罐设计时，将确保其容积能满足在正常工作状态下精馏柱内液氢全部气化所需的泄压要求，即精馏柱内液氢全部气化进入泄压罐后，泄压罐中的压力仍低于最大允许工作压力。因此，泄压罐泄压主要针对一些可能超出设计范围事件所导致的系统超压。当泄压罐内的气体压力超过最大工作压力Pmax时，将通过安全阀进行泄压，泄压出口设置有管端阻火器，防止回火。若安全阀出现故障无法正常开启时，通过手动泄压阀进行手动泄压。此外，应避免氧气进入泄压罐中，以防发生氢气泄压时在罐中形成具有爆炸性的氢氧混合物。防止氧气进入泄压罐的常用措施有两种：一是让泄压罐处于真空状态；二是向泄压罐中注入压力为1atm的惰性气体。相比较而言，前一种措施可使泄压罐的体积设计得更紧凑，而后一种措施的可靠性相对更高。从安全角度考虑，在本系统中计划采用后一种措施。

不管是常规工况还是事故工况，含氚水除氚单元一直处于待命状态，随时可为各系统运行产生的不同浓度的含氚水进行净化处理。含氚水除氚单元各子单元操作流程如下：

⑴水精馏预处理子单元

①整体装置系统的使用包括开车准备、全回流稳定运行、连续进料采出运行、停车等流程。

②开车准备：

1)按照工艺流程，依次检查动设备和静设备状态，确认系统管道连接，阀门按照工艺流程要求开闭；

2)检查控制系统状态，传感器和控制系统连接正常，数据显示符合设备实际条件；

3)确保系统储罐和管道残留水处理充分；

4)待处理源水净化，净化原料水存入原料缓冲罐；

5)对照工艺流程图和各轮次试验计划，调节系统管路阀门，确保满足开展试验对应的工艺需求。

③全回流运行流程：

1)原料水加入T1和T2至塔釜形成稳定足量液位；

2)开启制冷单元，冷却水温度降至设定值，并通入用冷设备；

3)启动电加热，系统内产生蒸汽；

4)启动螺杆压缩机；

5)启动真空泵，将换热器、罐体和柱体内的不凝气排出体系，并维持回流罐和储罐稳定的压力；

6)系统逐渐升温，调控压缩机转速和频率，形成稳定的柱内温度和压力分布，冷凝液计量后全部输入塔顶，同时减少补热量；

7)根据系统内各持液点液位控制加料确保形成足量的液位高度；根据运行情况（温度分布和回流液量），调整补热量；

8)采集塔顶塔底物料，定时（~6h）测量产物浓度，至塔顶浓度一致时，此时系统内各处温度、压力、流量也相对稳定，体系达到稳定状态，并可切换进入连续进料采出流程；

9)运行监控，关注设备和仪表工作状况，根据液位、温度、压力和采样浓度等控制设备参数（包括压缩机转速、补热功率、回流流量、温度等）和阀门开度，预防异常工况出现（如水箱贮满、压力和温度分布不稳定、压降异常、蒸汽减少等）；

10)T01和T02启动全回流流程一致。

④连续进料采出运行流程

1)在全回流运行塔顶产水浓度稳定时，启动塔底水泵，按预设流量将釜液水输入T2进料口；

2)T2塔顶回流罐按设定流量输入T1循环物料进口；

3)根据系统内各持液面液位控制加料确保形成足量的液位高度；根据运行情况（温度分布和回流液量），调整补热量；

4)采集塔顶塔底物料，定时（~6h）测量产物浓度，至塔顶浓度一致时，此时系统内各处温度、压力、流量也相对稳定，体系达到稳定状态；

5)运行监控，关注设备和仪表工作状况，根据液位、温度、压力和采样浓度等控制设备参数（包括压缩机转速、补热功率、回流流量、温度等）和阀门开度，预防异常工况出现（如水箱贮满、压力和温度分布不稳定、压降异常、蒸汽减少等）；

6)持续运行直至完成含氚废水处理任务。

⑤停车流程

1)关闭原料水供应和原料预热器；

2)关闭补热再沸器；

3)关闭压缩机；

4)真空泵持续抽空，管路伴热增至最大，将填料充分干燥，蒸汽在再冷器中冷凝，结束后关闭伴热；

5)使用真空泵将系统内压力降至最低后关闭；

6)系统充入微正压氩气/氮气进行气氛保护；

7)完成冷凝和抽空任务后，关闭制冷机组和冷却水循环泵，再关闭相应冷却水管路阀门；

8)至系统降至常温后，按试验计划将贫化氚水和富集氚水输入对应的储罐，同时排尽储罐、管路和柱内的液体（按照工艺区别管路氚水浓度，存入对应储罐），排尽后关闭排空阀门；

9)确认设备正常关闭，仪表状态正常无误后，关闭控制系统；

10)清洁和整理试验场所，设备配件和工具及时归位，及时处置试验过程中产生的废品，并开展试验总结工作。



图4-20 水精馏子单元操作流程

⑥长期停车。在完成正常停车的流程后，需定期巡查，确保系统内氚水处理充分，惰性气氛维持微正压，并按照系统和设备的详细维护规程（主要为定期对连接件和紧固件检查、动静设备进行功能检查、耗材更换），对系统各部件进行定期维护，计量器具按照管理规定进行检定。

（2）联合电解催化交换子单元

①调试前准备工作

按照如下标准检查，确认系统状态完好。

系统连接检查：全面检查CECE系统的管路连接及仪控系统连接，确保连接正确，仪控功能正常；

系统气密性测试：首次使用时，将系统打压至0.9MPa以上，保持24小时以上，要求系统压力降低不高于2kPa；再次使用时，将系统打压至0.5MPa，保持2小时，要求系统压力降低不高于0.5kPa。

电力供应确认：确认电力供应正常，能够满足系统开启要求。

供水确认：确认供水装置正常工作，制水量能够满足系统运行需要。

气动阀门供气正常：确认空压机处于工作状态，且汇流排内压力达到0.5MPa。

LPCE分离柱水浴加热装置确认：确认加热水浴装置正常，装满循环用水；确认加热状态正常，能够远程设定加热温度和开关水浴循环。

真空泵状态确认：确认真空泵正常工作，能够满足换气要求，抽速不低于10m^3/h，最低真空度低于10kPa。

惰性气体供应确认：确认有足够的氮气或者氩气对氢气端进行气体置换。

制冷机组状态确认：确认制冷机组正常工作，冷却液灌注完毕，温度降低至10℃以下，且能够开启循环。

氢气传感器/报警器状态确认：确认系统内外安装的所有氢气传感器/报警器经过检定且处于有效期内，能够正确显示氢气浓度，超过限值及时报警。

氧中氢传感器状态确认：确认氧中氢气传感器经过检定且处于有效期内，能够正确显示氢气浓度，超过限值及时报警。

排风设施状态确认：确认通排风系统正常运转。

管路阀门确认：制定管路阀门开关确认表，检查各阀门的开关状态，确认阀门开关符合当前试验要求。

配制原料水：根据需要，配制一定浓度的原料水。

天然水准备：向天然水储罐里注满去离子水。

氮气置换：采用真空泵将系统内空气抽空后，通入氮气置换，重复1—2次，并用氧气传感器检测，满足氧含量低于2000ppm的要求。

②CECE子单元调试

冷却液循环：开启制冷机组，设定冷却温度，开启冷却液循环，冷却液温度需低于10℃。

水浴循环：开启LPCE分离柱内加热水浴，设定恒温温度60℃，并开启循环。

设备初始进料：储水罐、氧气气液分离器、两根LPCE分离柱持液段分别进料，达到预定水位线。

水质确认：确认系统内水质达标，氧气气液分离器中水的电导率低于50μS/cm。

安全互锁逻辑状态确认：确认安全互锁处于正常运行状态，保证试验过程中极端情况下的安全，包括储罐补水逻辑、PEM电解槽防干烧逻辑、PEM电解槽关停逻辑等。

开启加湿循环：两根LPCE柱底循环加湿通道开启，设置循环流量；加热器开启，设置出口温度。

开启PEM电解槽水循环：PEM电解槽进水泵开启循环，确认进入电解槽的水流量正常，流量值均不低于2000kg/h；

开启PEM电解槽：通电后，设置直流电源输出电流，从100A开始，达到相对稳定后（约1min），每次提高200A，直至目标电流。控制系统设置了安全联锁逻辑，当电解槽各小室电压、PEM电解槽整堆电压、氧气气液分离器液位及电导率、氢气气液分离器液位、氧中氢浓度、系统内外氢气报警器/氢气传感器、进入电解槽的液体流量等参数出现异常时，控制系统均会报警、自动处理，直至关停PEM电解槽。在整个电解槽开启过程中，均需要留意上述参数变化，出现异常及时处理。

开启进料：原料水进料开启，设置相应流量，开启加热器，设定出口温度；纯水进料开启，设定相应流量，开启加热器，设定出口温度。

达到稳定状态：通过流量计调节LPCE柱顶纯水进料流量，使得系统内物料平衡；观察LPCE柱顶氢气流量及氧气冷凝器出口端氧气流量；观察LPCE柱底液位、氧气气液分离器液位、氢气气液分离器液位；观察氧气气液分离器的电导率；观察储罐液位；当以上参数稳定或周期性变化时，表明系统处于稳定运行状态。

间歇取样测试：分别取样测量LPCE柱顶氢气中的重氢元素丰度、氧气气液分离器中水的重氢元素丰度、氢气气液分离器中水的重氢元素丰度以及柱底水的重氢元素丰度。

调试完毕后，按照如下顺序暂时关机：

关闭PEM电解槽，关闭加热器，设置各进水流量计数值为0，关闭水浴加热及水浴循环，关闭冷却液循环和制冷机组。

将系统氢气容器及管路内的氢气排空，采用氮气吹扫置换方式充满氮气。关闭所有显示仪表、上位机、气动阀门，关闭所有电源。

清洁和整理试验场所，设备配件和工具及时归位，及时处置试验过程中产生的废品，并开展试验总结工作。

（3）低温精馏子单元

为确保低温精馏子单元状态满足开展运行的要求，需对系统状态进行全面检查与维护保养，其中氢气纯化模块需要完成模块中安全阀的拆卸、检定、回装与检漏；系统中温度、压力信号显示是否正常；吸附床和除杂床的活化再生处理；模块保压检漏工作等工作。

氢气供给与回收模块主要涉及硬壳包容体中的系统管路，需要完成两台循环泵的接电；管路的抽空置换；系统保压检漏等工作。

低温制冷模块主要涉及氦压缩机、除油系统、透平冷箱、液氮贮槽、氦气储罐、氦气外置纯化器、氦气纯度分析仪、水冷机组以及相应的连接管路组成，需要完成上述设备、管路上安全阀的拆卸、检定、回装与检漏；应急仪表气供气系统安装；检查确认氦压缩机机油是否需要更换；水冷机组水箱的清洗与冷却水更换；水冷机组泵油更换；透平冷箱抽空处理；氦气外置纯化器活化再生处理；氦气纯度分析仪管路抽空置换等工作。

冷量分配模块主要涉及冷量分配阀箱及与透平冷箱相连的低温管路需要完成安全阀的拆卸、检定、回装与检漏；冷量分配阀箱腔室抽空处理，真空度达到10^{-2}Pa；低温管道夹层抽空；低温管道连接部位的紧固处理；开关/调节阀性能测试等工作。

绝热模块主要涉及真空冷箱、液氮冷屏以及附属的分子泵组，需要完成分子泵组及水冷机状态检查确认；真空冷箱抽空处理，真空度达到10^{-2}Pa。

换热单元与精馏柱模块主要涉及回热换热器、冷凝器、精馏柱、压力/压差测量管路以及再沸器加热器等，需要完成系统管路保压测试；测温传感器显示情况检查；压差传感器调零；加热器加热功能检查测试；系统管路抽空等工作。

分析采样模块需完成泵、阀门、流量控制器等的控制功能测试；与色谱连接；完成常温色谱的氧、氮标定等工作。

安全防护模块主要涉及硬壳包容体内的泄压管路、泄压罐以及中间的连接管路，需完成：相关管路（包括界面系统泄压管路上的）阀门开闭状态检查处理；相关管路及泄压罐抽真空等工作。

测量与自动控制模块需检查测试温度、压力等信号显示是否正常；泵的启停、调节阀/流量控制器的调控功能是否正常等。

界面系统模块主要涉及汇流排相关设备管路，需完成检查温度、压力等信号显示是否正常；完成相关管路系统保压检漏；完成真空泵的运行性能测试等工作。

完成上述开始系统降温运行工作，首先进行低温制冷与冷量分配单元除杂处理。采用氦气外置纯化器对低温制冷单元及冷量分配单元管路系统及氦气储罐中的氦气进行除杂处理，确保氦压缩机正常运行状态下低温制冷管路系统中氦气中主要杂质含量不高于规定限值（H_2O/N_2 /C_xH_y合计≤5vpm；油：<10ppb）。在进行除杂处理时，应先完成氦压缩机－除油系统段管路氦气的纯化处理，待氦气中杂质含量达标后，再连通透平冷箱和冷量分配单元进行除杂处理。

在开始进行系统降温前，需将低温制冷机与冷量分配单元调试至氦气温度和压力输出稳定的待机状态，即氦气出口温度稳定在15K±0.1K，压力≥270kPa±5kPa。当低温制冷系统中氦气温度降至15K，冷量大于2000W时，降温结束。之后，将开始氢气纯化系统的系统铺底和降温运行。当氢气纯化系统吸附床降至液氮温度且吸附床吸附饱和后，即可开始精馏柱降温运行操作。

当精馏柱降至设定温度后，原料气通过汇流排进入界面连接系统缓冲罐，通过压力联锁控制，将罐中的压力控制在200 kPa～250kPa范围内。通过设置在管路上的取样点对原料气进行取样分析，获得原料气氢同位素组成与氧、氮等杂质含量信息。之后，原料气进入CD的氢气纯化系统进行除杂处理。经除杂处理后的氢同位素气体在进入精馏柱系统前，还将通过采样系统进行取样分析，获得原料气氢同位素组成与氧、氮等杂质含量信息。通过除杂前后氢同位素组成与氧、氮等杂质含量信息对比，可获得氢气纯化系统在同位素富集分离及除杂性能数据。

接着，氢同位素气体进入精馏柱系统进行冷凝液化。为确保系统降温过程平稳，进料速率将控制在10L/min，且在柱体完成降温前，单次进料不超过500L，进料间隔不低于1h。根据前期实验数据，精馏柱1中需累积8m^3～9m^{3}的氢同位素气体方可满足实验运行操作要求。

在完成系统降温后，设定塔底再沸器功率，当连续4个小时内的取样分析结果变化小于5%时，可认为全回流已达平衡态，开启柱体采出阀门，完成氢同位素分离工作。

在完成上述预定实验任务后，将结束实验，进行系统关机。系统关机操作程序如下：

①调节再沸器加热功率和冷凝器调节阀开度，确保精馏柱内压力在100kPa~130kPa之间；

②精馏柱中气体从顶部排出，通过伴热带加热来确保低温气体复温完全，流量控制在15L/min左右；

③待精馏柱内液氢排空后，关闭低温制冷机透平，但氦压缩机持续运转，直至低温制冷机与换热单元组件内氦气复温至200K以上；

④关闭氢气纯化系统的加热与液氮供给，保持液氮阀处于开启状态；

⑤关闭氦压缩机、水冷机组等附属设备。

氚实验楼所涉及的GDS排气、VDS排气、WDS排水管路走向如下图所示。

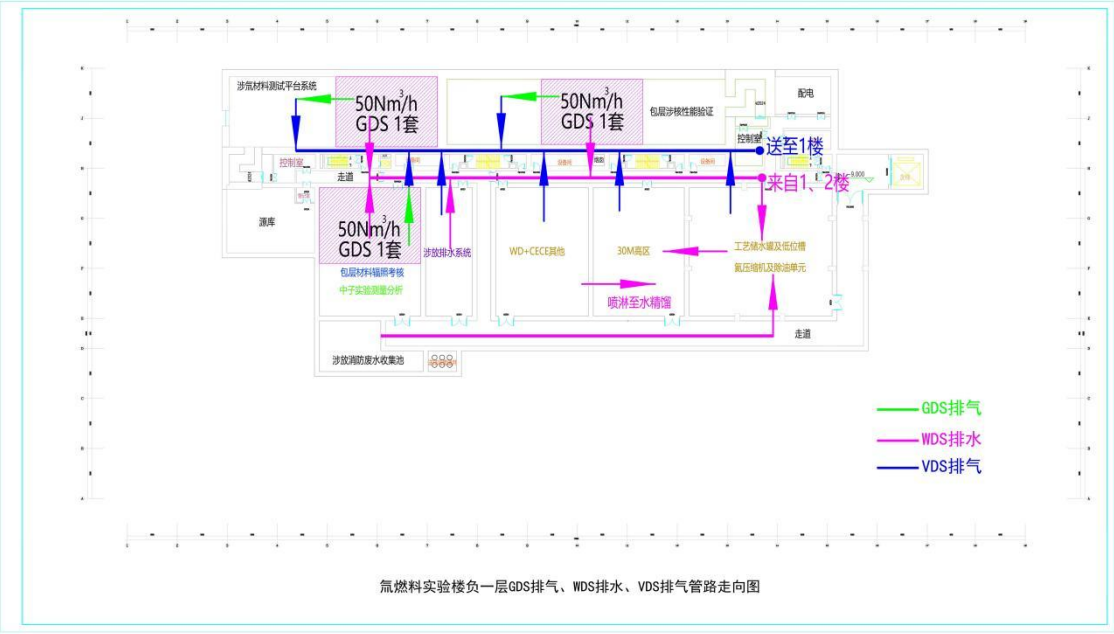
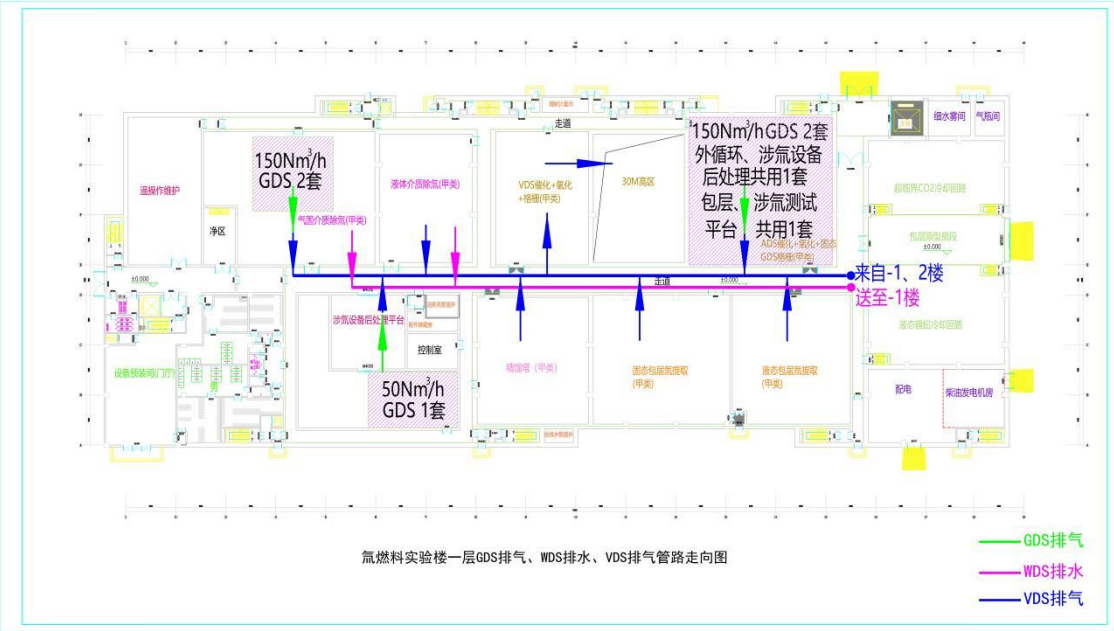
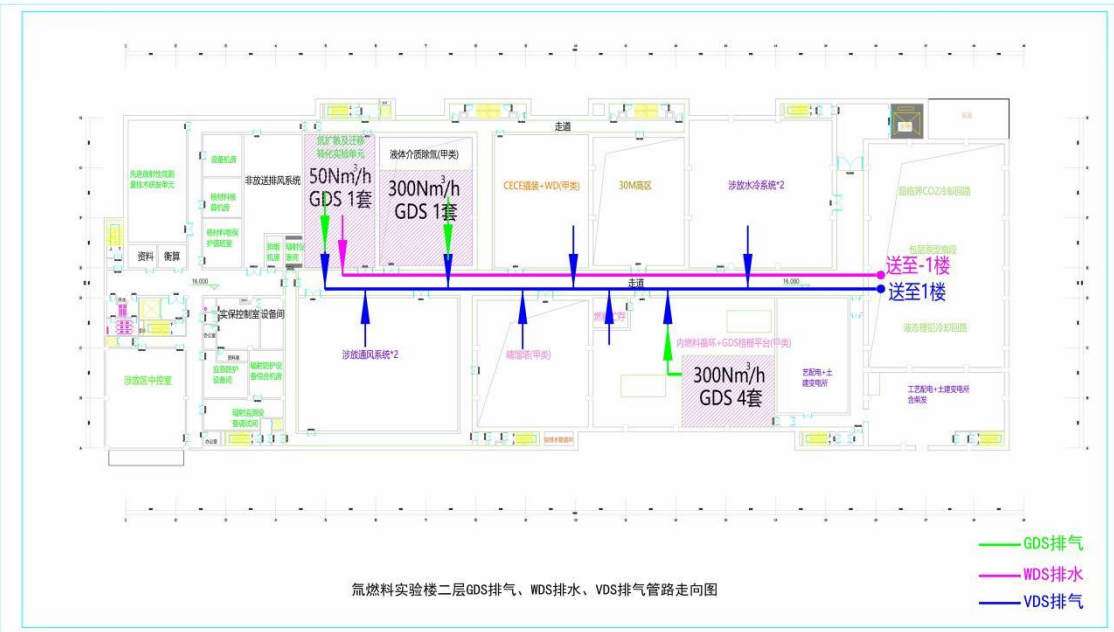


图4-21 氚燃料实验楼地下一层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图



氚燃料实验楼一层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图

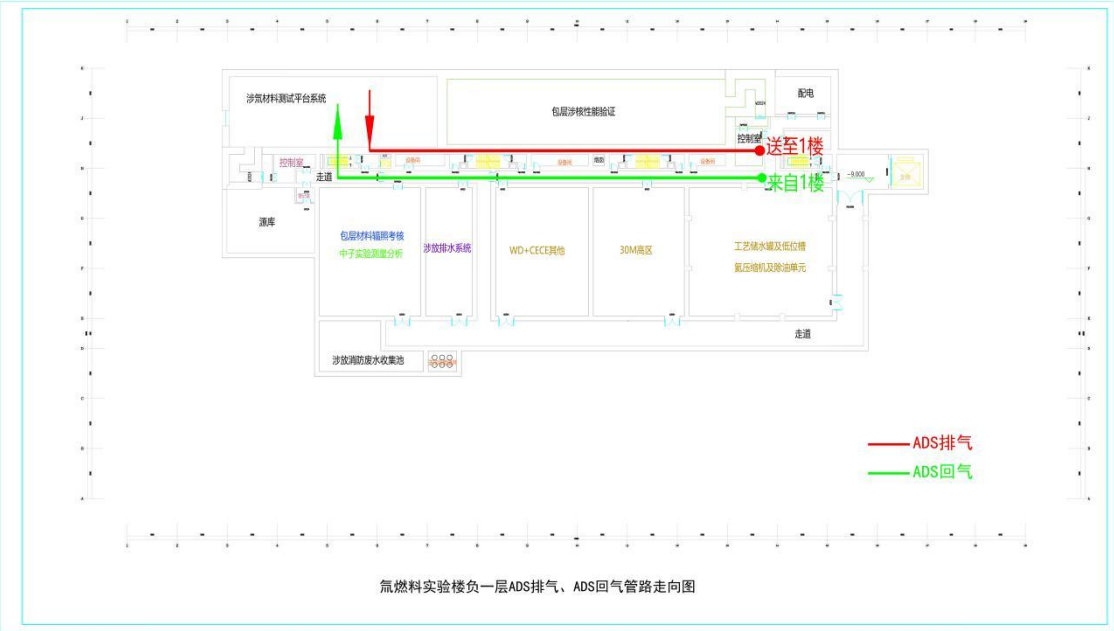
图4-22 氚燃料实验楼地上一层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图



氚燃料实验楼二层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图

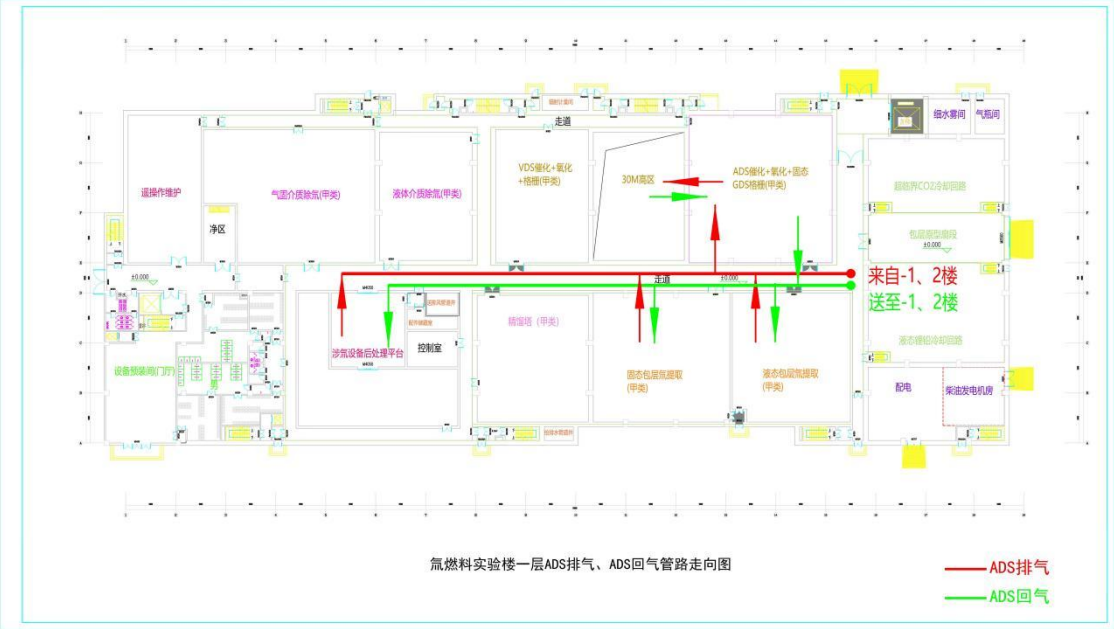
图4-23 氚燃料实验楼地上二层GDS排气、WDS排水、VDS排气管路走向图

氚燃料实验楼所涉及的ADS排气及回气管路走向如下图所示。



氚燃料实验楼负一层ADS排气、ADS回气管路走向图

图4-24 氚燃料实验楼地下一层ADS排气、ADS回气管路走向图



氚燃料实验楼一层ADS排气、ADS回气管路走向图

图4-25 氚燃料实验楼地上一层ADS排气、ADS回气管路走向图

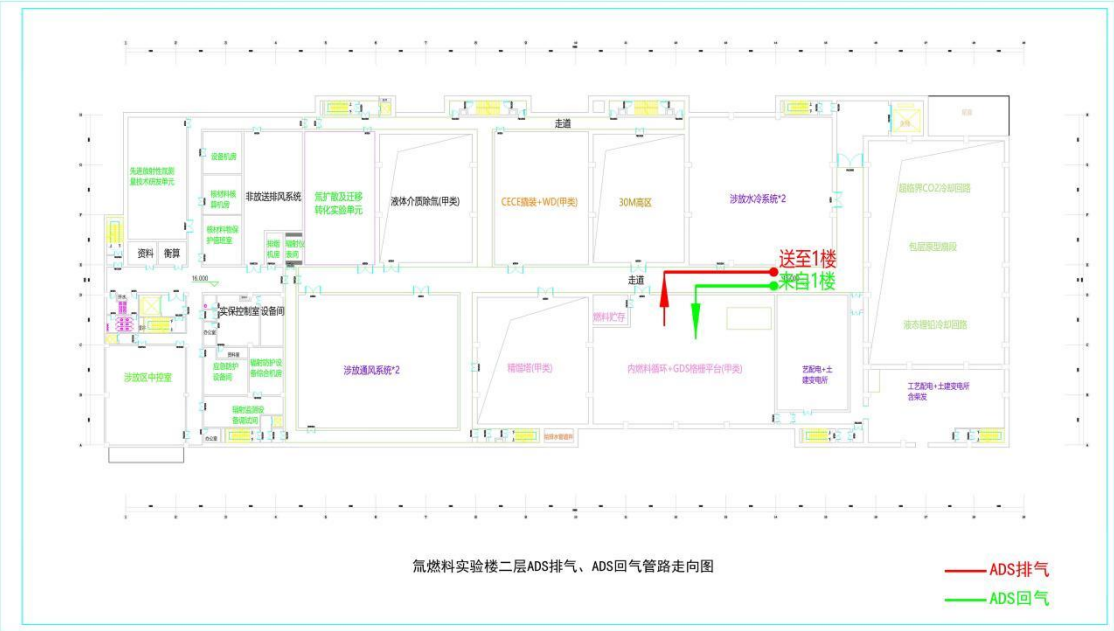


图4-26 氚燃料实验楼地上二层ADS排气、ADS回气管路走向图

表4-10 放射性废气废水处理主要工艺设备一览表

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途
1	变频风机	非标	出口压力0.3MPa（绝压），流量不低于1000 Nm^3/h，流量调节范围20%～100%，漏率≤1×10^{-5}Pa m^3/s	5	气体输运
2	过滤器	非标	非标定制，过滤效率99.9%，流量：1200 Nm^3/h，配备监测功能	4	过滤粉尘
3	冷凝器	非标	非标定制，列管管壳式冷凝器，包括储液罐、阀门等	4	气体冷却
4	真空泵	nXDS35i	极限真空10Pa，抽速>20L/s	2	系统抽空
5	低温反应器	非标	非标定制，316不锈钢，带保温层，φ950mm，带漏率低于10-8 Pa·m^3/s	5	氚催化氧化
6	高温反应器	非标	非标定制，316不锈钢，带保温层，φ1250mm，漏率低于10^{-8} Pa·m^3/s	5	氚及氚化物的催化氧化
7	冷凝器	非标	列管管壳式冷凝器，90m^2	4	气体冷却
8	换热器1	非标	列管管壳式冷凝器，80m^2	4	气体换热
9	换热器2	非标	列管管壳式冷凝器，150m^2	4	气体换热
10	加热器	非标	电加热功率90 kW	4	气体加热
11	喷淋洗脱塔	非标	304不锈钢材质，φ600mm，总高30m	4	氚化水喷淋洗脱富集
12	输送泵	ZCQ25	流量：不小于1000L/h	8	氚化水输运
13	计量泵	琼森MRB12/16	流量：不小于100L/h，变频调节，含变频器	8	去离子水输运

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途
14	精馏塔	初级柱内径DN1500，次级柱DN600，高度30m	工作压力：-80~-90kPa；工作温度：30~70℃；工作介质：水/水蒸气；一体式焊接；内含表面特殊处理的规整填料及液体分布器	6	用于水精馏
15	再沸器	塔釜再沸器	开车短期使用，列管换热器；管程－工作压力0.5MPa，温度85~150℃，工作介质，导热油；壳程－工作压力0.15MPa，温度55~70℃，工作介质：水	2	开车短期使用
16	再沸器	塔釜再沸器	稳定运行使用，列管换热器；管程－工作压力2MPa，温度85~150℃，工作介质，氟利昂；壳程－工作压力0.15MPa，温度55~70℃，工作介质：水；	2	稳定运行使用
17	输运泵	/	用于物料回流和采出等输运过程，1备1用	26	水运输
18	真空泵	抽速1000L/s，极限真空3.5kPa.a	抽速：1000L/s；水环泵；机组功率60kW	2	提供真空
19	导热油机组	功率500kW	温度范围80~200℃	1	提供
20	热泵	高温螺杆压缩机	闭式热泵系统，配套塔顶物料1200kg/h和260kg/h蒸汽，调节范围60%～120%，配备独立控制系统	2	节能设备
21	PEM电解槽	单个电解槽处理量40kg/h	共计两个单元，每个单元功率320kW（两个），自带350kW直流电源（两个），电源可以远控启停、调节输出电压和电流	1	电解水
22	LPCE分离柱	内径361mm，高度26.4m	材质SS304；内含表面特殊处理的催化填料及液体分布器	2	液相催化交换场所
23	催化床	Φ159×1550 mm	设备工作电压380V，加热功率12kW，自带自控柜，远控加热启停、工作温度、升温速率	1	氢气催化氧化
24	再沸泵	防爆型，最大流量9L/min，扬程大于50m	380V自带ABB变频器，泵体材质316L	4	水运输
25	转液泵	防爆型，最大流量9L/min，扬程大于50m	380V自带ABB变频器，泵体材质316L	3	水运输
26	转液泵	防爆型，最大流量15L/min，扬程大于50	380V，自带ABB变频器，泵体材质316L	2	水运输
27	纯水泵	防爆型，最大流量9L/min，扬程大于50m	380V自带ABB变频器，泵体材质316L	2	水运输

序号	名称	型号	主要技术指标	台（套)数	用途
28	输送泵	防爆型，最大流量9L/min，扬程大于50m	380V自带ABB变频器，泵体材质316L	2	水运输
29	电解循环泵	防爆型，最大流量20m3/h，扬程大于50m	380V自带ABB变频器，泵体材质316L	2	电解水循环
30	钯膜净化器	非标	单套钯膜面积0.6m^2，漏率≤$1\times10^{-9}Pa\cdot m^3\cdot s^{-1}$	4	用于氢同位素与杂质气体分离
31	转移泵	/	抽速≥80NL/min，漏率≤$1\times10^{-8}Pa\cdot m^3\cdot s^{-1}$	3	气体转移
32	循环增压泵	/	指定流量下可增压至0.2MPa，漏率<10^{-8} $Pa\cdot m^3\cdot s^{-1}$；	5	气体增压
33	真空泵	涡旋式真空泵	额定抽速≥20m^3/h，极限真空＜10Pa	1	提供真空
34	平衡反应器	非标	非标加工，装填有催化剂	2	用于使通过的氢同位素气体达到化学平衡
35	加热器	非标	非标加工，电加热	3	用于出料气体恢复至常温
36	精馏柱	非标	316L不锈钢内抛光管制成，内装填处理后的不锈钢散装填料，漏率优于1×10^{-9} $Pa\cdot m^3\cdot s$-1	2	精馏汽液传质场所
37	氦气压缩机	T250WPH	非标定制	1	用于产生高压氦气
38	除油系统	FHOR-500	非标定制	1	用于除去氦气中的油蒸气
39	透平冷箱	FHBR-2500	非标定制	1	用于将氦气温度降至15K左右
40	外置氦纯化器	FHCH-25L	流速不低于80Nm^3/h，压降≤2bar	1	用于补充氦气的纯化
41	真空泵组	Scrollvac 15plus, TMP600	1×10^{-3}Pa	1	用于阀箱腔室的真空获得
42	分子泵组	/	粗抽泵抽速为450m^3/h 单台分子泵抽速2200L/s	1	使冷箱获得10-3Pa高真空
43	氢同位素循环泵	IBS	10NmL/min@100Pa （入口压力）	2	气体运输

4.5.3 放射性固体废弃物及其处理措施

本实验验证平台项目日常产生的放射性废物大多为极低放废物，在各自工作区域及放射区出口处（更换防护用品的位置）暂存，金属废物与可燃固体废物分类存放，项目拟选用带盖脚踏式垃圾桶，具备基本密封性，内衬专用垃圾袋，收集满后封口放入废物桶。氚实验楼每层均放置两个分别用于收集可燃及不可燃废物的废物桶即可。废物桶收集满后输送至场所暂存间暂存，场所暂存间位于氚实验楼一层涉氚设备后处理平台。废物桶的类型及壁厚：废物桶按照EJ 1042-2014《低、中水平放射性固体废物容器 钢桶》选定，型号为LID-IIb，壁厚1.2 mm。

平台运行产生的工艺废物如废过滤器芯、分子筛、树脂、活性炭等，以及维修过程中更换的泵、阀、管路等，更换频率较低，且放射性活度相对较高，不在各自工作区域内暂存，产生后根据活度情况使用废物桶或专用容器（3mm壁厚、316L不锈钢、内衬3mm聚乙烯）输送至场所暂存间。

输送至场所暂存间的方式及路径：首先将专用容器运输至废物产生处，然后将废物装入专用容器并密封，对容器表面剂量进行检测，检测合格后使用AGV叉车运输至专用电梯，到达场所暂存间所在楼层（氚实验楼一层），继续运输至场所暂存间进行处理或暂存。放射性固态废物转运逻辑如下图所示。

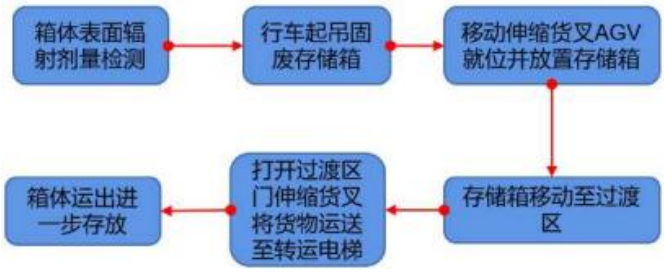


图 4-27 放射性固体废物转运过程示意图

不同类型的固体废物在场所暂存间经过不同的方式（切割、热解吸、同位素交换等）处理后，放入钢箱，对箱体顶部进行封焊，并对钢箱外侧的辐射剂量进行监测，标准按照《低、中水平放射性固体废物包安全标准》（GB12711-2018）。存储钢箱按照中华人民共和国核行业标准《低、中水平放射性固体废物容器 钢箱》（EJ 1076-2014）选定，型号为FA-V型。固废包装完成后，采用吊车码垛的方式堆码在废物存储

空间，存储周期为6个月，再检测固废包装外侧的放射性剂量，放射性剂量满足相关标准后进一步转运出存储区。

表4-11 废物直接包装型钢箱（F 型）

序号	型号	外部长度 mm		外部宽度 mm		外部高度 mm		R（t）
		基本尺寸	允许误差	基本尺寸	允许误差	基本尺寸	允许误差	
1	FA-Ⅰ	6058	0～-6	2438	0～-5	1331	0～-5	30
2	FA-Ⅱ	3070	0～-5	2438	0～-5	1331	0～-5	20
3	FA-Ⅲ	1968	0～-5	2438	0～-5	1331	0～-5	10
4	FA-Ⅳ	1573	0～-5	1565	0～-5	1331	0～-5	8
5	FA-Ⅴ	1573	0～-5	783	0～-5	1331	0～-5	5
6	FB-Ⅰ	6058	0～-6	2438	0～-5	1331	0～-5	30
7	FB-Ⅱ	3070	0～-5	2438	0～-5	1331	0～-5	20
8	FB-Ⅲ	1968	0～-5	2438	0～-5	1331	0～-5	10
9	FB-Ⅳ	1573	0～-5	1565	0～-5	1331	0～-5	8
10	FB-Ⅴ	1573	0～-5	783	0～-5	1331	0～-5	5
注：F—直接包装废物钢箱； R—钢箱额定质量，是钢箱质量T和钢箱内部净载荷Z之和。								

去向：将暂存封装的放射性固废转运至具有相关资质、能力的机构进行进一步处理（焚烧、压缩）、整备（水泥固定）后最终送处置场（飞凤山处置场）处置。

重量：约12.5t/a（正常运行：不可燃废物约10t/a，可燃废物约1.2t/a，事故工况废物约1t/a）。

活度范围：最终外送的固废活度小于5×10^{10}Bq/kg（大部分为10^{4}～10^{5}Bq/kg)，均为低放。

4.6 服务期满后的环境保护措施

氚燃料实验楼(甲级非密封放射性物质工作场所)终止运行后可能产生放射性污染，因搬迁、科研目标达成等原因不再使用时，应编制相应的退役方案、制定退役目标，确保放射性废物得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

第五章　环境影响分析

5.1 正常运行期间辐射环境影响分析

5.1.1 氚辐射环境评价模型

本次氚辐射环境评价覆盖“大气扩散-介质迁移-人群剂量”全链条的评价体系，具体实施路径如图5-1所示。

（1）大气扩散模拟：采用高斯烟羽模型、CFD数值模型与拉格朗日烟团模型进行互补应用。针对平坦地形，采用高斯烟羽模型实现快速评价；针对复杂城市下垫面，采用CFD模型开展精细化模拟；针对变风向条件，采用拉格朗日烟团模型进行动态追踪，以适应不同地形与气象场景。

（2）介质迁移演化：针对HTO分别建立土壤迁移模型、湿沉降冲刷模型及水体沉积模型，完整刻画氚在土壤、降水和水库中的迁移、沉降与累积规律。

（3）公众剂量核算：通过剂量评价模型耦合呼吸暴露与皮肤暴露途径，量化关键人群组的有效剂量，完成公众辐射剂量的定量评估与合规性判定。

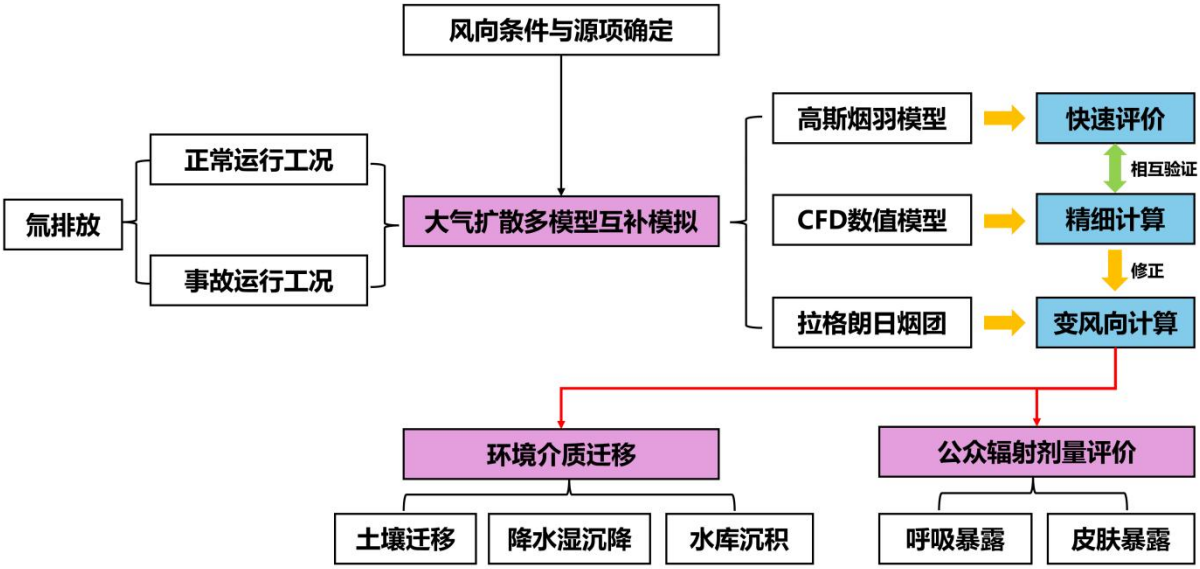


图5-1 辐射环境影响分析技术路线图

5.1.1.1 大气扩散模型

在氚辐射环境评价应用中，不同大气扩散模型的选择需要综合考虑地形条件、评价精度与计算时效性。对于地形平坦的区域，高斯烟羽模型由于其计算简便、响应迅

速，适用于核事故应急中的快速评价。然而，该模型难以充分考虑实际下垫面与动态气象条件的影响，精细化评价能力有限。为此，CFD方法凭借高精度建模与高密度网格划分，可实现对复杂下垫面条件下流场与污染物分布的精细模拟，适用于局部区域的精细化评价。但CFD方法在面对变化风场、尤其是不同风向下的大气扩散时计算成本较高且建模复杂。因此，为有效处理变风向问题，可引入拉格朗日烟团模型，该模型内置风场诊断模块，能够结合下垫面与气象站数据实现风场数据同化，灵活模拟烟团在时间和空间上的迁移轨迹，弥补CFD在变风向条件下计算困难的问题。综上，针对平坦地形可采用高斯烟羽模型实现快速评价，对局部精细化分析优先选用CFD方法，而在需要考虑风向变化时，则宜引入拉格朗日烟团模型，通过多模型组合弥补各自不足，实现更加准确的大气扩散模拟。

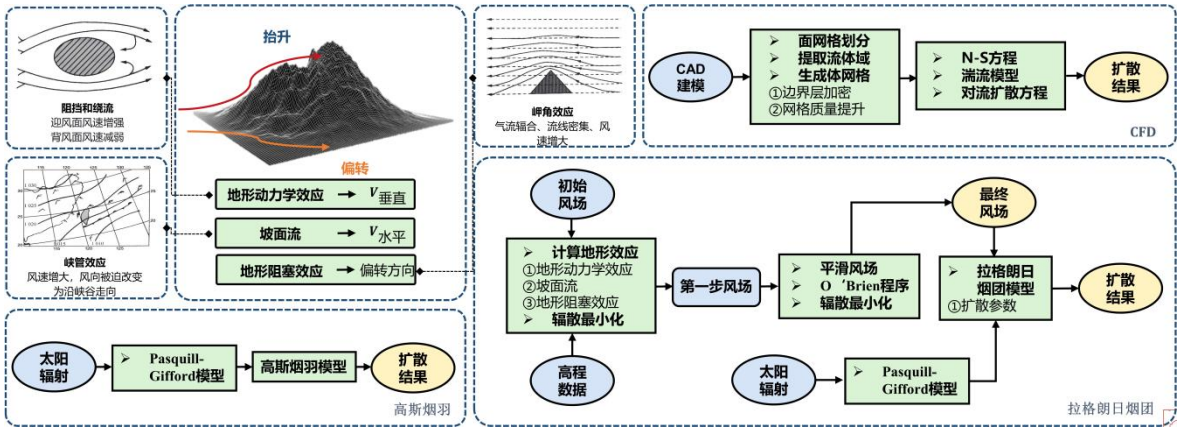


图5-2 常用的三类大气扩散评价方法

5.1.1.1.1 高斯烟羽模型

高斯烟羽模型是计算释放入大气中的放射性气载污染物下风向浓度的应用最广的方法。该模式假定烟羽中污染物浓度分布在水平方向和垂直方向均遵循高斯分布。针对恒定气象条件（指风向、风速、大气稳定度不随时间变化）下的高架点源连续排放，并考虑烟羽在地面的全反射后，下风向任一点污染物浓度可由高斯烟羽模型进行模拟。该模型将污染物视作连续的烟羽，基于一系列假设对三维对流-扩散方程进行了简化，从而得出相关浓度方程。定风向、风速和大气稳定度下的稳态放射性污染物高斯扩散方程如公式5.1所示。

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi u_s\sigma_y\sigma_z}exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left\{exp\left(-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)+exp\left(-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right\} \quad (5.2)$$

其中, $C(x,y,z)$ 为在位置(x,y,z)处的空气中的放射性物质的时均浓度，Bq m^{-3}；Q为放射性物质源项释放率，Bq s^{-1}；u_s为源高处的平均风速，m s^{-1}；σ_y，σ_z为y与z方向的扩散参数，m；H_e为有效释放高度，m。

尽管高斯烟羽模型因其形式简单、计算效率高而得到广泛应用，但其内在假设也带来了一定的局限性，主要体现在以下几个方面：模型假设风场在时间和空间上是均匀、稳定的，这使其更适用于地形平坦、气象条件变化较小的局部区域模拟。当应用于更大空间尺度或气象条件快速变化的场景时，其模拟精度会显著下降。此外，难以充分考虑复杂下垫面（如地形起伏、建筑物遮挡等）对污染物扩散的影响。在实际环境中，地形绕流、街道峡谷效应、热力环流等因素会显著改变污染物的扩散路径与浓度分布，而高斯模型缺乏对这些过程的解析能力。

因此，在需要对复杂下垫面条件下污染物扩散进行高精度模拟，或需考虑风向动态变化时，高斯烟羽模型的应用受到较大限制，需结合其他更精细的模型，如CFD模型进行综合分析，以弥补其固有缺陷。

5.1.1.1.2 CFD数值模型

在CFD数值模拟中，RANS（雷诺应力平均模型）是模拟湍流的主流方法之一。该模型通过对Navier-Stokes方程进行时间和空间平均，将平均过程中遗失的脉动量通过雷诺应力加以模化，从而大幅降低了对网格分辨率与计算资源的需求。RANS模型的算力需求弹性较大，能够适应不同复杂度的工程问题，因此被广泛应用于各类实际流动与扩散模拟中。

本研究区域烟囱周围存在复杂的建筑物分布，建筑物对气流的阻挡、绕流及尾流效应会显著影响污染物的扩散路径与浓度分布，这要求模拟方法能够精细解析近场流场特征。CFD方法凭借其高精度建模与高密度网格划分能力，能够较好地刻画建筑物周围的局部流场细节，因此适用于本研究的模拟需求。

在大气环流工况下，从地表到大气层顶雷诺数跨度可达5个量级，这对湍流模型的适用性提出了较高要求。Realizable k-ε模型作为RANS模型中应用最广泛的湍流模型之一，具有形式简洁、数值稳定性好、计算量适中的优点。该模型通过求解湍动能k方程和湍动能耗散率ε方程来封闭雷诺时均方程，结合标准壁面函数，能够较为合理地描述高雷诺数下的湍流输运过程，满足当前大气扩散模拟的精度需求。

因此，本次CFD数值模拟选用Realizable k-ε模型及标准壁面函数。所采用的控制方程包括连续性方程、动量方程及能量方程，通过求解三大方程，获得计算域内的压力场与速度场，进而实现污染物扩散的数值模拟。其中连续性方程、动量方程以及能量方程如下所示。

$$\nabla\cdot(\rho\vec{v})=0 \tag{5.2}$$

$$\nabla\cdot(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla\cdot(\bar{\bar{\tau}})+\rho g \tag{5.3}$$

$$\nabla\cdot\left(\rho\vec{v}c_pT\right)=\nabla\cdot k_T\nabla T \tag{5.4}$$

其中，ρ为流体密度，kg m^{-3}；$\vec{v}$为在(x,y,z)方向下的速度矢量(u,v,w)，m s^{-1}；梯度算子$\nabla=\left(\frac{\partial}{\partial x},\ \frac{\partial}{\partial y},\ \frac{\partial}{\partial z}\right)$；$p$为压力，Pa；$\bar{\bar{\tau}}$剪切应力，Pa；$g$为重力加速度，m s^{-2}；$c_p$为比热，J (kg·K)$^{-1}$；$T$为温度，K；$k_T$为热导率，W (kg·K)$^{-1}$。

除上述方程外，湍流的模拟需要额外的湍流模型方程进行表征，湍流模型采用Realizable k-ε，其方程形式如下所示，各项的空间离散格式采用二阶迎风，松弛因子先采用默认值并根据计算情况进行适当的调整。

Realizable k-ε与传统的k-ε基本形式相似：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho k u)=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{5.5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho\varepsilon u)=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{v\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon \tag{5.6}$$

其中，u为对x，y和z方向下的流体速度矢量(u,v,w)，m s-1；ρ为混合气体密度，kg m^{-3}；μ为流体动力粘度，Pa s；μ_t为湍流粘性，m^2 s^{-1}；k湍动能，J；ε为湍流耗散率，m^2 s^{-3}；k和ε的湍流普朗特数σ_k=1，σ_ε=1.2；v为流体运动粘性，m^2 s^{-1}；G_k表示由于平均速度梯度而产生的湍动能，J；G_b表示因浮力产生的湍动能，J，Y_M表示可压缩湍流中波动膨胀对总体耗散率的贡献，C_1和C_2是常数，σ_k和σ_ε是k和ε的湍流普朗特数，S_k和S_ε表示源项，J。

组分输运模式采用的是求解组分输运方程，这个方程的守恒形式通常写为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i Y_i)=\frac{\partial}{\partial x_J}\left[\left(\rho D_i+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial Y_i}{\partial x_j}\right]+S_i \tag{5.7}$$

其中, Y_i是第i组分的质量分数，S_i为源项， D_i是混合物中i组分的扩散系数， m^2 s^{-1}，Sc_t为湍流施密特数，其数值可有下述公式计算：

$$Sc_t=\frac{\mu}{\rho D_i} \tag{5.8}$$

然而，CFD方法在处理变风向问题时存在明显不足，CFD方法对计算域内的气象边界条件要求较高，变风向过程中伴随的风速变化、湍流结构的动态调整等都增加了模拟的复杂性，限制了其在事故应急快速响应中的应用。为弥补CFD方法在变风向条件下的不足，引入拉格朗日烟团模型。该模型不依赖于固定网格描述整个流场，而是通过释放大量烟团，追踪其在空间中的运动轨迹，烟团的移动由风场驱动，能够自然适应风向的变化。

5.1.1.1.3 拉格朗日烟团模型

拉格朗日烟团模型内置风场诊断模块，可结合下垫面特征与气象站实测数据实现风场数据同化，较为迅速地模拟出变风向条件下烟团的时空演化过程。因此，在需要兼顾复杂下垫面精细化模拟与变风向动态扩散分析时，可采用CFD与拉格朗日烟团模型相结合的策略，前者用于获取典型风向下高精度流场与浓度分布，后者用于快速评估风向变化下的污染物输运过程，实现优势互补。

拉格朗日烟团模型将污染物假设为烟团，通过计算烟团的运动以及烟团内部污染物的分布获得污染物的扩散情况。烟团对受体点浓度的贡献可由以下公式表示。

$$C=\frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y}g\ \exp[-d_a^2/(2\sigma_x^2)]\exp[-d_c^2/(2\sigma_y^2)] \tag{5.9}$$

$$g=\frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\exp\left[-(H_e+2n\mathrm{h})^2/(2\sigma_z^2)\right] \tag{5.10}$$

其中，C是地表污染物浓度，Bq m^{-3}；Q是烟团中污染物的活度，Bq；$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$是下风向，侧风向以及垂直方向上的扩散系数，m；$d_a, d_c$是烟羽中心距离浓度估计点的距离，分别按照笛卡尔坐标系分解为下风向和侧风向，m；g是高斯公式中的垂直项，m；H_e代表烟羽中心到地面的有效高度，m；h是混合层高度，m。

5.1.1.2 HTO土壤迁移模型

HTO在土壤中的环境行为受降水、蒸发和根系吸收的影响，需综合考虑水分运移、溶质运移及根系吸水过程。在数学描述上，基于有限元法求解Richard水分运移方程（式5.11）和溶质对流-弥散方程（式5.12），可对土壤中水流、溶质及HTO的迁移过程进行模拟。

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[K\left(\frac{\partial\mathrm{h}}{\partial x}+cos\alpha\right)\right]-S_1 \tag{5.11}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\theta D_s\frac{\partial C_s}{\partial x}\right)-\frac{\partial(qC_s)}{\partial x}-\lambda\theta C_s-S_2 \tag{5.12}$$

式中：θ为体积含水量；h为压力水头，cm；S1为源和汇项；t为时间，d；α为流动方向与垂直轴之间的角度（向下流即为0°）；k(h)为非饱和土壤水力传导函数；Cs为土壤水中HTO浓度，Bq L^{-1}；Ds为水力扩散系数；q为体积通量密度，$cm\cdot d^{-1}$。

在模拟地下水分运移过程中，需要确定所模拟土壤的水力特性，利用VanGenuchten-Mualem的单孔隙模型描述土壤特征水分曲线。

$$\theta(\mathrm{h})=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{[1+(\alpha\mathrm{h})^n]^m}, & \mathrm{h}<0\\ \theta_s, & \mathrm{h}\geq 0\end{cases} \tag{5.13}$$

$$k(\mathrm{h})=k_s S_e^l\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \tag{5.14}$$

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} \tag{5.15}$$

式中，θ_r和θ_s分别为残余含水量和饱和含水量($cm^3\cdot cm^{-3}$)；n为孔径分布指数；M=1-1/n为孔隙连通性参数，估计为0.5左右，是许多土壤的平均值；α为进风值(cm^{-1})的倒数；K_s为饱和水导率($cm\cdot d^{-1}$)；S_e为有效饱和度；$\alpha(\mathrm{h},x)$为根系水分吸收水分胁迫响应函数；$\beta(x)$为空间根分布函数(cm^{-1})。

5.1.1.3 HTO湿沉降冲刷模型

湿沉降是大气中HTO向地表输送的重要途径之一。降水过程中，云下雨滴对大气中的HTO进行捕获与冲刷，导致大气HTO浓度随时间呈指数衰减。基于前期工作，本研究采用指数衰减型湿沉降冲刷模型来描述降水过程中大气HTO浓度的变化规律，模型表达式如下：

$$C_t=C_0\cdot e^{-\Lambda t} \tag{5.16}$$

其中，C_t为t时刻的大气氚浓度，Bq/L；C_0为降水开始前的初始大气氚浓度，Bq/L；Λ为冲刷常数，s^{-1}；R_i为降水强度，mm/h。

该模型考虑了以下关键因素：一是降水强度对冲刷效率的影响，降水强度越大，单位时间内雨滴对大气HTO的捕获能力越强，冲刷常数Λ相应增大；二是冲刷过程的连

续性，模型以指数衰减形式反映了HTO浓度在降水持续过程中的动态变化；三是模型参数的物理可解释性，冲刷常数Λ与降水强度R_i 相关联，可根据实测降水数据率定。该模型形式简洁、参数明确，适用于核事故应急情况下对HTO湿沉降过程的快速评估。

5.1.1.4 HTO水体沉积模型

HTO经排放进入大气后在不同类型下垫面情境下沉积情况存在差异，如常规平原、山地丘陵、水体等。其中HTO对于水库、湖泊等水体下垫面的沉积与常规下垫面存在差异。在此，基于实验建立的沉积速度模型建立系统动力学模型表征HTO水体沉积，如下所示。

$$\frac{dC}{dt}=\frac{v_s\ C_{air}\ A}{V}-\lambda C-\frac{f\ C}{V} \tag{5.17}$$

$$v_s=1.75u-2.29 \tag{5.18}$$

其中，C为水体氚浓度，Bq/m^3；t为时间，s；v_s为沉积速度，m/s；C_{air}为空气氚浓度，Bq/m^3；A为水库表面积，m^2；V为水库容积，m^3；λ为衰变率；f为换水量，m^3/s; u为平均风速，m/s。

5.1.1.5 剂量评价模型

个人全年有效剂量为不同形态氚经不同暴露途径所致剂量的总和。本次剂量评价仅考虑呼吸暴露与皮肤暴露两种途径，其中皮肤暴露剂量按呼吸暴露剂量的 0.5 倍估算。暴露所致剂量由下列公式计算，分别适用于正常运行工况与事故工况。

$$Dose_{inh}=1.5g_a\cdot\ C\cdot\ I_{inh}\cdot\ DCF \tag{5.19}$$

$$Dose_{inh}=1.5g_a\cdot\ I_{inh}\cdot\ DCF\cdot\ \int C\,dt \tag{5.20}$$

其中，g_a为呼吸消耗含氚的空气部分占总呼吸量的百分比(默认1)；C为空气中氚的浓度，Bq/m^3；I_{inh}为呼吸率，m^3/a；DCF为氚的剂量转换因子，Sv/Bq；

呼吸速率I_{inh}参照相关参数手册，如《中国人群暴露参数手册》中对应地区的成人呼吸率常为 15 m³/d，约 5500 m³/a。剂量转换因子严格采用GB/T 16148-2009规定值：HTO吸入剂量系数取1.8e-11 Sv/Bq，HT吸入剂量系数取1.2e-15 Sv/Bq。

关键人群组依据规范要求，选取评价范围内距离排放点最近的常住居民。完成剂量核算后，将关键人群组个人年有效剂量（呼吸暴露剂量与皮肤暴露剂量之和）与本项目设定的公众年有效剂量限值（0.10 mSv/a）进行对比，形成完整的评价结论。

5.1.2 计算工况设置依据

5.1.2.1 周围人群分布特征

由图5-3氚工厂厂址周围5公里主要人群密集区分布图可知，氚工厂厂址周围的主要人群分布在聚变堆主机关键系统综合研究设施园区（下简称CRAFT园区）、合肥综合性国家科学中心能源研究院（下简称能源研究院）、中国科学院研究生教育基地（下简称科学岛）、东瞿大郢、三十岗乡、岗集镇、衡安学校片区等。



图5-3 氚工厂厂址周围5公里主要人群密集区分布图

其中，CRAFT园区、能源研究院及科学岛为科研教育类聚集区；东瞿大郢、三十岗乡、岗集镇为周边乡镇居民聚居区，常住人口集中，分布广泛且稳定；衡安学校片

区则以学生和教职工为主，人口密度较高。以上各区域共同构成了氚工厂厂址周边5公里范围内的人口密集分布格局，如表5-1所示。

表 5-1 氚工厂厂址与周围主要人群密集区的间距汇总表

区域	距离 (m)
CRAFT 园区	600
能源研究院	1400
科学岛	3000-5000
东瞿大郢	1200
三十岗乡	2400
岗集镇	3700
衡安学校片区	3100

5.1.2.2 气象特征

根据项目建单位提供的地面气象站风速风向数据，得到的氚燃料实验楼拟建场址的年平均和四季风向风速玫瑰图如下图所示。2023年合肥10米风场总体以低风速为主，年平均风速为2.27 m/s，静风频率为1.64%。从全年风向分布来看，盛行风向为NNW（北西北），频率为9.18%；其次为NNE（北东北）和NE（东北），频率分别为8.97%和8.79%。

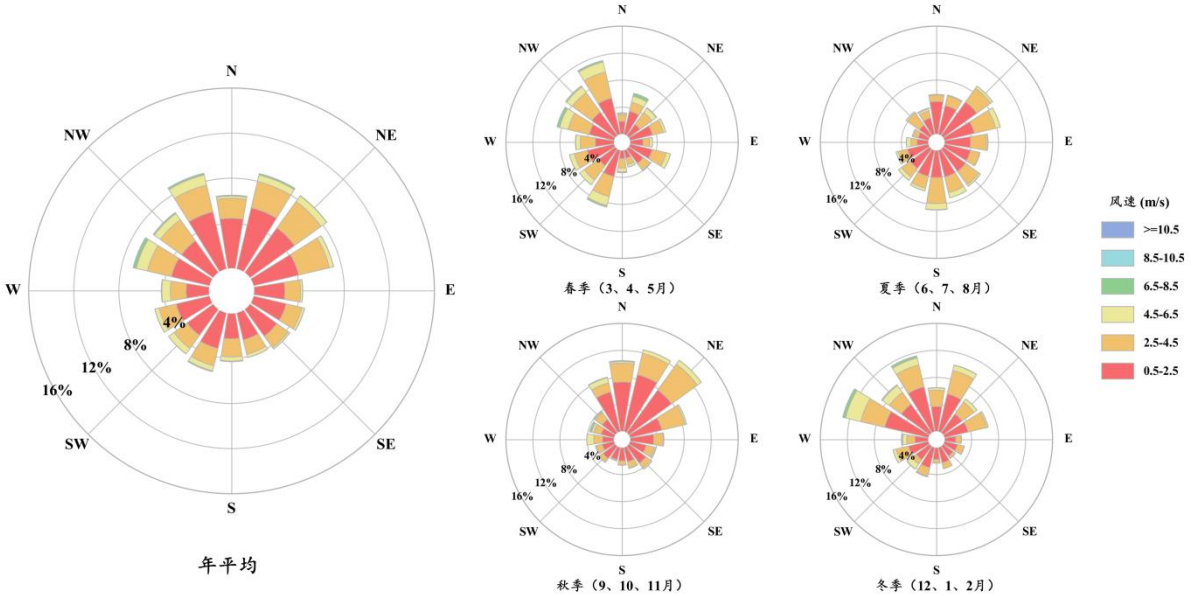


图5-4 氚燃料实验楼场址的2023年平均风向风速玫瑰图和四季风向风速玫瑰图

总体而言，近北向来流（包括NNW、NNE、NE等方向）占比较高，说明该地区受偏北气流影响较为显著。这一风向特征对氚排放的扩散路径具有重要指示意义，偏北风将携带污染物向南输送，影响位于下风向的敏感区域。结合四季风向风速玫瑰图可见，春夏季东南向气流影响较为明显，体现出亚热带季风气候背景下季节性风向转换

的特征。综上所述，2023年实验验证平台拟建场址风场具有明显的季风性特征，全年以偏北气流为主导，春夏季受东南季风影响显著。这一风场特征为后续氚扩散模拟与剂量评价提供了基础气象依据。

表 5-2 实验验证平台拟建场址2023年平均风速及风向频率

风向	频次（次）	平均风速（m/s）	风向频率（%）
N	630	1.874762	7.191781
NNE	786	2.216921	8.972603
NE	770	2.312597	8.789954
ENE	663	2.290498	7.568493
E	408	2.077451	4.657534
ESE	432	2.115509	4.931507
SE	404	1.981931	4.611872
SSE	382	2.16178	4.360731
S	409	2.367726	4.66895
SSW	502	2.186853	5.730594
SW	456	2.284868	5.205479
WSW	465	2.226022	5.308219
W	393	2.662595	4.486301
WNW	641	2.702184	7.317352
NW	615	2.450407	7.020548
NNW	**804**	**2.344527**	**9.178082**

5.1.2.3 氚释放源项

本次氚辐射环境评价分为两种类型的计算工况，根据甲方提供资料，烟囱直径为1.6m，高度为70.8m。根据甲方提供的正常工况下气态氚排放量估算信息如下表所示。

表 5-3 正常工况下气态氚排放量估算表

系统	设定的尾气排放限值 (Bq/m^3)	排放流量 (m^3·h^{-1})	年氚排放量(g/a)	排放方式	备注
N-VDS	3.7×10^7	800	0.0318	连续	正常工况：年运行 4000 h，实际控制浓度按 3.7×10^6 Bq/m^3 计。
WDS		50	6.2×10^{-6}	连续	正常工况：CECE 按年运行 4000h 计，HT 和 HTO 形式分别为 1×10^4 Bq/Nm^3 和 1×10^3 Bq/Nm^3 。
HVAC	3.7×10^7	124100	0.0096	连续	正常工况：按年运行 8000h 计，实际控制浓度按 3.7×10^3 Bq/m^3 计。

对正常运行工况下气态氚排放量进行汇总，得到汇总表如下所示。总体来看，在正常运行工况下氚以0.0414062 g的年总量持续释放，烟囱排放流量为124950 m^3/h，该工况用于评估正常生产活动下氚对周边环境及公众的长期辐射影响。

表 5-4 正常运行工况下气态氚排放量汇总表

工况	年排氚总量	排放流量	烟囱出口速度	单位时间氚排放率
正常运行工况	0.0414062 g	124950 m^3/h	17.26 m/s	2.54E-9 g/s

5.1.2.4 正常运行工况分类

本次氚辐射环境评价选择NNW（北西北）作为主风向方向，同时将NE、S、WSW作为次风向，采用各风向的年平均风速进行模拟，主要基于以下考虑。

一方面，从表5-2气象统计特征来看，NNW方向在研究区域全年风向频率中占比最高（9.18 %），是该地区的主导风向，能够最大程度反映正常工况下氚输送的主要路径，符合辐射环境评价的保守性与代表性原则。另一方面，从保护目标的空间分布来看，CRAFT园区、能源研究院以及科学岛等重要敏感目标均位于排放点NNW下风向的直线上，人员活动密集，是关键人群组所在地。以NNW作为主风向方向，便于准确评估氚沿该方向输送时对上述敏感目标及关键人群组的辐射剂量影响。

同时，为全面覆盖周边人口密集敏感区，将NE、S、WSW设置为次风向：

（1）NE风向：下风向覆盖东瞿大郢、三十岗乡，为周边重要居民聚居区；

（2）S风向：下风向覆盖衡安学校片区，人口密度高，以学生及教职工为主要敏感人群；

（3）WSW风向：下风向覆盖岗集镇，为乡镇及社区集中居住区。

为丰富氚剂量评价情景、提升结果保守性与代表性，在NNW主风向下增设不同风速对照工况，用于分析全年风速差异对氚扩散及人群剂量的影响。其中P25、P75、P90为基于NNW风向全年逐小时风速序列统计得到的风速百分位数：

（1）P25：NNW风向内25%的小时风速低于该值(1.10 m/s)，代表低风速静稳扩散状态；

（2）P75：NNW风向内75%的小时风速低于该值(3.20 m/s)，代表中等偏强风速通风状态；

（3）P90：NNW风向内90%的小时风速低于该值(4.70 m/s)，代表强风速通风状态。

引入上述百分位数工况，可覆盖弱扩散、常规扩散、强扩散三类典型情景，有效弥补仅采用平均风速无法体现全年风速分布特征的不足，使剂量评价更全面、更保守。

综合气象条件与敏感保护目标分布，本次评价具体工况如下表所示，确保评价结果完整、保守且具有针对性。

表 5-5 正常运行工况分类

	工况	风向	风速 (m/s)	下风向关键人群组
不同风向平均风速	工况 1	NNW 风向	2.34	CRAFT 园区、能源研究院及科学岛
	工况 2	NE 风向	2.31	东瞿大郢、三十岗乡
	工况 3	S 风向	2.37	衡安学校片区
	工况 4	WSW 风向	2.23	岗集镇
同风向不同风速	工况 5	NNW 风向-低风速	1.10	CRAFT园区、能源研究院及科学岛
	工况 6	NNW 风向-中等偏强风速	3.20	
	工况 7	NNW 风向-强风速	4.70	

5.1.3 结果与讨论

5.1.3.1 高斯烟羽模型计算结果

实验验证平台位于安徽省合肥市西北部的庐阳区，合肥市地处江淮之间，境内虽有丘陵岗地、低山残丘、低洼平原三种地貌，以丘陵岗地为主，江淮分水岭自西向东横贯全境，全市海拔多在15～80米之间。以氚工厂为中心、半径160公里范围内，地势总体平缓，无明显起伏。仅在西南方向分布有紫蓬山国家森林公园，其最高海拔约为748 m，但该山体距离厂址较远，对厂址附近局部流场影响有限。厂址周围地形如下图所示。

总体而言，氚工厂周边地形开阔平坦，大气流动受地形扰动较小，有利于采用形式简洁、计算高效的高斯烟羽模型进行污染物的扩散模拟与剂量评价。

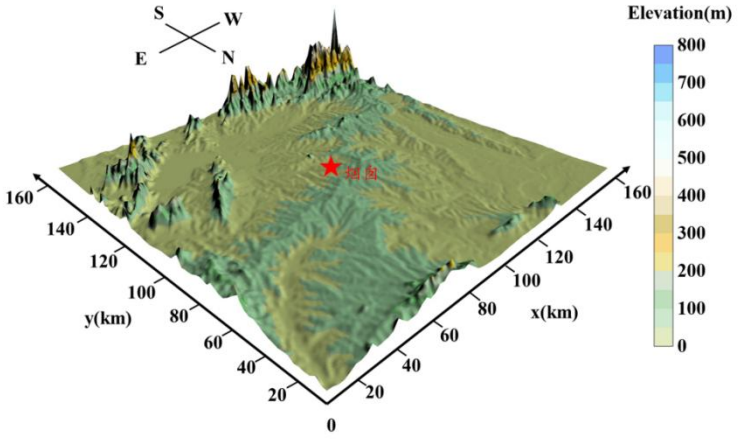


图5-5 实验验证平台拟建场址周围160 km内的地形分布

基于高斯烟羽模型对不同风向的4组工况进行计算，结果如下表所示。

表 5-6 不同工况下高斯模型计算结果汇总表

工况	风向	峰值浓度 (Bq/m³)	峰值浓度的下风向距离 (m)
工况 1	NNW 风向	3.72	2000
工况 2	NE 风向	3.67	2000
工况 3	S 风向	3.75	2000
工况 4	WSW 风向	3.60	2000

四个风向下氚的落地峰值浓度范围在3.60–3.75 Bq/m³之间，最大值出现在S风向下（3.75 Bq/m³），最小值出现在WSW风向下（3.60 Bq/m³），两者仅相差0.15 Bq/m³，相对偏差小于5%，说明在平均风速、连续稳定排放及平坦地形的条件下，风向本身对氚峰值浓度的影响极小，扩散规律具有高度一致性。同时，各风向下峰值浓度均出现在下风向2000米处，位置高度重合，表明在排放高度、平均风速与大气稳定度相同的条件下，烟羽的最大落地浓度距离基本固定，与风向无关，如下图所示。从风向选取的合理性来看，主风向NNW对应CRAFT园区、能源研究院、科学岛，次风向NE、S、WSW分别对应东瞿大郢/三十岗乡、衡安学校、岗集镇，这四个风向完整覆盖了厂址周边5公里内的所有关键敏感区，确保了剂量评价的全面性与保守性。

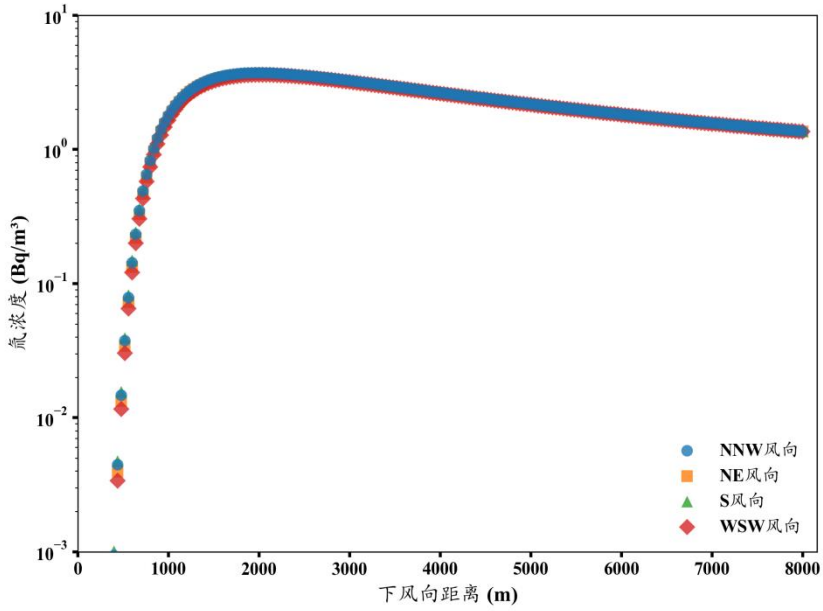


图5-6 高斯烟羽模型计算烟囱正常运行工况排放在四个不同风向下氚浓度变化

5.1.3.2 CFD数值模型计算结果

尽管实验验证平台拟建场址地形相对平坦，但场址周边近距离范围内存在较为密集的建筑群构筑物，与理想平坦下垫面条件存在明显差异。若忽略建筑群对局地流场的影响，传统的高斯烟羽模型和拉格朗日烟团模型虽适用于开阔地形下的宏观扩散模拟，但难以精细刻画建筑物绕流、尾流及局部涡旋等复杂流动特征。因此，为探究建筑群体对局地尺度流场和氚扩散的影响，有必要采用CFD方法进行高精度的局地流场与氚扩散模拟。

具体而言，实验验证平台拟建场址南偏东30°方向约600 m处为聚变主机关键系统综合研究设施（CRAFT）园区；南偏东15°方向约1400 m处为合肥综合性国家科学中心能源研究院；南偏东15°方向3~5 km范围内分布着科学岛的大量建筑。此外，场址周围2 km范围内还分布有其他建筑物（如图5-6所示）。上述建筑群均位于场址近距离下风向区域，对氚排放后的初期扩散路径可能产生显著影响。其中，CRAFT园区与能源研究院是距离场址最近的科研办公敏感目标，科学岛则为建筑密集、人口集中的关键剂量评估区域。

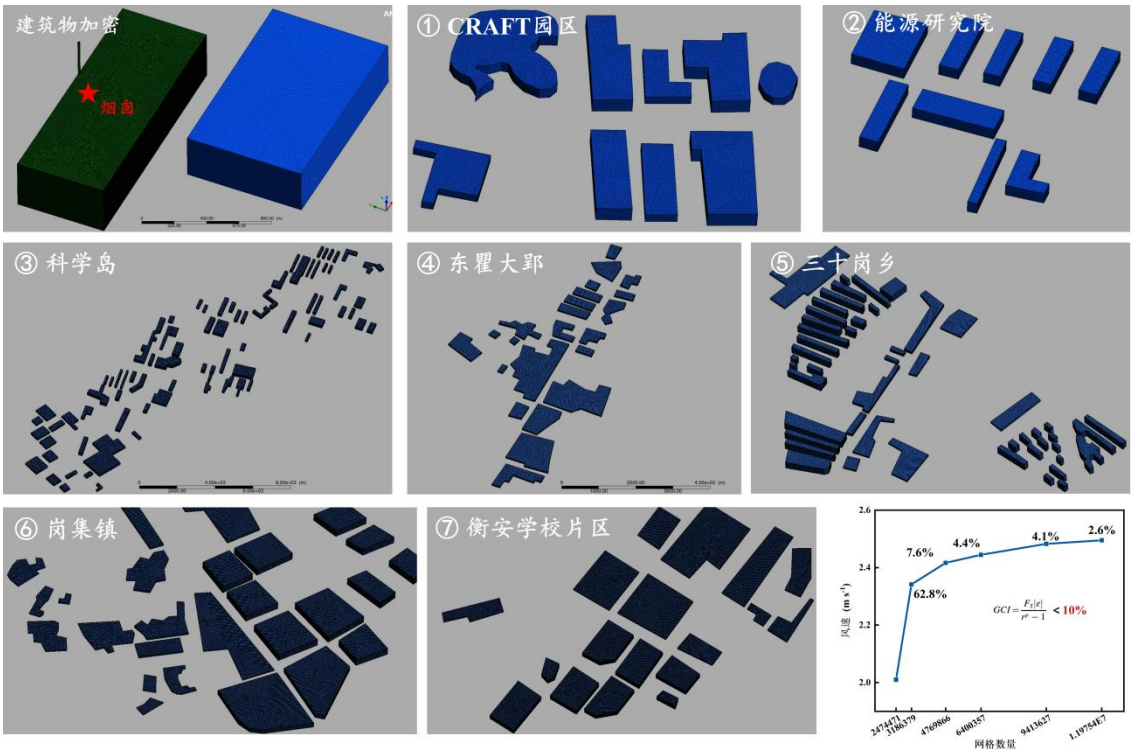


图5-7 网格划分和网格无关性验证

为确定合适的网格分辨率，开展了网格无关性分析。选取不同数量的网格方案进行对比。基于网格收敛指数（GCI）的判定准则，结合计算域出口风速随网格数量的变

化趋势，当网格数量达到四百万时，计算结果已趋于稳定，能够满足精度要求；同时，该网格规模避免了因网格过密导致的计算时间过长。因此，本研究选用四百万网格方案进行后续的CFD计算与分析。

在建立CFD模型时，需明确计算域内的关键建筑物分布。以NNW主风向为例，氚工厂厂址南偏东30°方向约600 m处为聚变主机关键系统综合研究设施（CRAFT）园区；南偏东15°方向约1400 m处为合肥综合性国家科学中心能源研究院；南偏东15°方向3~5 km范围内分布着科学岛的大量建筑。此外，厂址周围5 km范围内还分布有其他建筑物（如图5-8所示）。上述建筑群均位于厂址近距离下风向区域，对氚排放后的初期扩散路径可能产生显著影响。其中，CRAFT园区与能源研究院是距离厂址最近的科研办公敏感目标，科学岛则为建筑密集、人口集中的关键剂量评估区域。



图5-8 氚工厂周围主要建筑物分布：①CRAFT园区（南偏东30度600米）；②合肥综合性国家科学中心能源研究院（南偏东15度1400米）；③科学岛（南偏东15度3-5公里）

为模拟不同风向下氚浓度的空间分布，本研究选取NNW主风向及NE、S、WSW三个次风向，采用CFD方法进行详细模拟。考虑到CFD方法难以直接处理逐时变化的风场，研究基于年均风向风速玫瑰图，提取各风向对应的年平均风速，建立风速廓线作为入流边界条件，生成稳态风场。该方法在保留主导气象特征的同时，有效实现了复杂风场下的浓度分布模拟。

基于上述模拟设置，图5-9展示了基于CFD方法模拟得到的不同风向下、地表以上1.5 m高度处空气氚浓度的空间变化曲线。总体而言，在烟囱排放口的下风向轴线上，空气氚浓度随距离呈现先升高后降低的变化趋势。在各主导风向下，由于下风向区域内的建筑群（如科学岛、衡安学校片区、岗集镇）对大气流场和污染物扩散过程产生

显著扰动，浓度曲线在这些位置出现明显的下降，而在经过建筑群区域后，浓度分布逐渐恢复原有的变化趋势。

以NNW风向为例，最大落地浓度出现在下风向约1500 m处，对应合肥综合性国家科学中心能源研究院所在区域，浓度值达到13.31 Bq/m³，是整个评价范围内关键人群所在地的最高氚浓度值。该峰值点成为后续关键人群组识别以及个人年有效剂量核算的重要参考依据。其余各风向下，峰值浓度在10.09–14.25 Bq/m³范围内波动，整体差异不大。

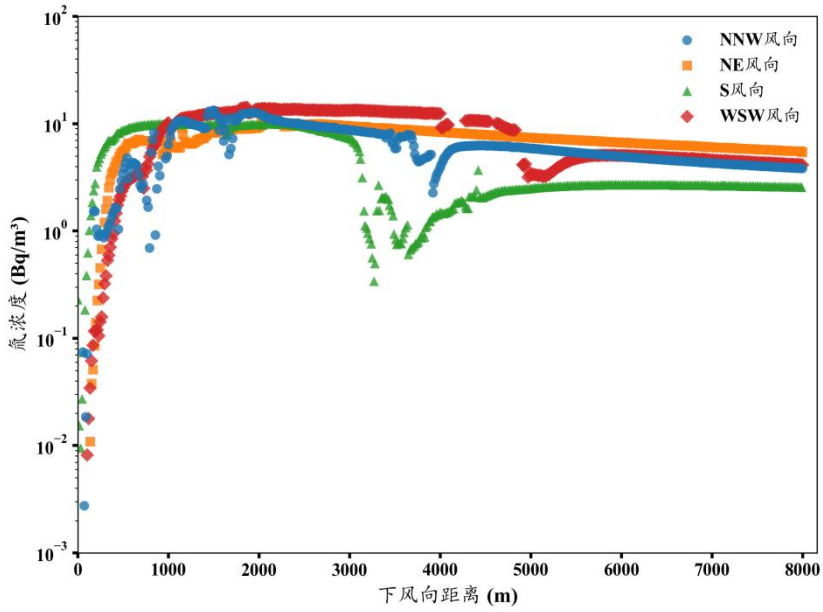


图5-9 不同风向下氚浓度变化曲线

为进一步验证CFD模拟结果的可靠性，将其与高斯烟羽模型下风向氚浓度分布结果进行对比分析。结果表明，两种模型在浓度峰值出现位置、峰值浓度量级以及整体浓度随距离变化的分布趋势方面，均表现出较好的一致性。具体而言，CFD方法获得的峰值位置与高斯模型结果较为接近；在峰值浓度方面，两者相差小于一个数量级，其中CFD方法给出的峰值浓度范围为10.09–14.25 Bq/m³，高斯模型结果为3.6–3.75 Bq/m³。两种模型结果之间的相互印证，一方面验证了CFD模拟结果的可信度，另一方面也突显了高斯烟羽模型在宏观尺度大气扩散趋势分析中的适用性，以及CFD方法在局部复杂流场与建筑群扰动的精细刻画方面所具有的互补优势。综上，两种方法的结合为本项目大气弥散评价提供了稳健、多维度的技术支撑。

为评估来流风速对氚浓度空间分布的影响，本研究针对主风向NNW，进一步开展了不同风速条件下的模拟分析。依据年均风速分布统计特征，选取了年均风速（2.34 m/s）、低风速（1.1 m/s）、高风速（3.2 m/s）及强风速（4.7 m/s）四种典型来流工况。

模拟结果如图5-10所示，总体而言，随着来流风速的增大，下风向空气氚的峰值浓度逐渐降低，且峰值浓度出现的位置向烟囱方向（即上风向）移动。

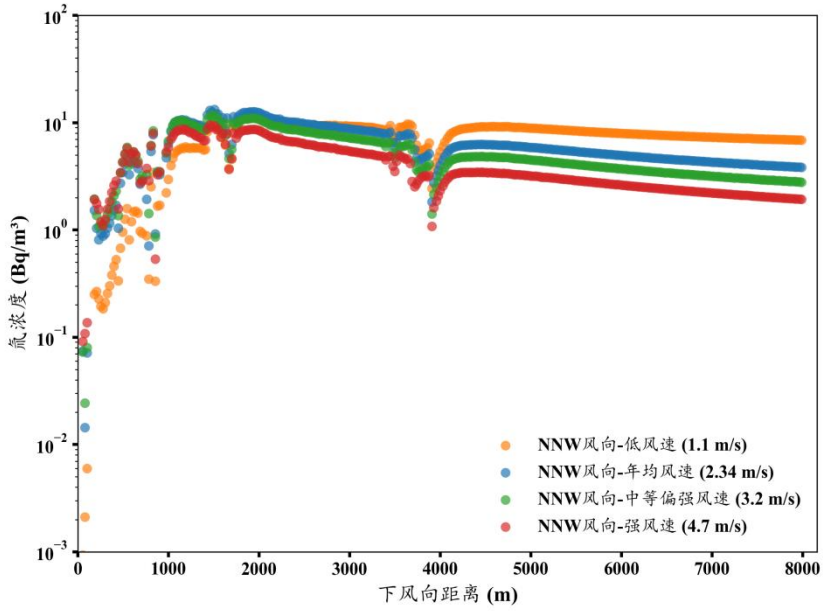


图5-10 相同NNW风向不同风速时氚浓度变化曲线

总的来看，不同风速条件下，氚浓度峰值及其出现位置存在明显差异。低风速（1.1 m/s）时，峰值浓度为11.24 Bq/m³，出现在下风向约1930 m处，扩散范围最远；在年均风速（2.34 m/s）条件下，峰值浓度升高至整个模拟工况中的最高值，达13.31 Bq/m³，对应峰值距离缩短至下风向约1500 m；随着风速进一步增大，峰值浓度转而下降：中等偏强风速（3.2 m/s）时降至约11.82 Bq/m³，峰值距离仍约为1500 m；强风速（4.7 m/s）时浓度最低，约为9.52 Bq/m³，峰值距离最近，约为1450 m（详见表5-7）。

上述结果表明，风速是影响氚浓度峰值及其空间位置的关键气象参数。低风速条件不利于污染物的稀释扩散，易导致局部浓度升高且峰值距离较远；而高风速则有利于污染物的快速输移与稀释，使峰值浓度降低且更靠近排放源。

表 5-7 不同工况下CFD模型计算结果汇总表

工况	风向	峰值浓度 (Bq/m³)	峰值浓度的下风向距离 (m)
工况 1	NNW 风向	13.31	1500
工况 2	NE 风向	10.93	2150
工况 3	S 风向	10.09	1170
工况 4	WSW 风向	14.25	1910
工况 5	NNW 风向-低风速	11.24	1930
工况 6	NNW 风向-中等偏强风速	11.82	1500
工况 7	NNW 风向-强风速	9.52	1450

下图展示了基于CFD数值模拟获得的不同风向条件下垂直截面的氚浓度分布云图。模拟结果显示，氚释放后在流场驱动下沿下风向形成明显的高浓度迁移轨迹。由于计算域内CRAFT园区、能源研究域、东瞿大郢及三十岗乡所处空间位置均位于烟囱下风向2500m范围以内，这一距离正处于烟羽抬升后的主沉降区，因此上述区域在垂直方向上截获了较高的氚浓度贡献。相较之下，科学岛、衡安学校片区以及岗集镇则位于烟囱下风向约3000米以外的区域，烟羽在传输过程中经历了更充分的大气扩散、湍流混合与垂直稀释过程，导致到达上述地点的氚烟羽沉降浓度显著降低，这在云图上表现为对应色阶向低值区间明显偏移。

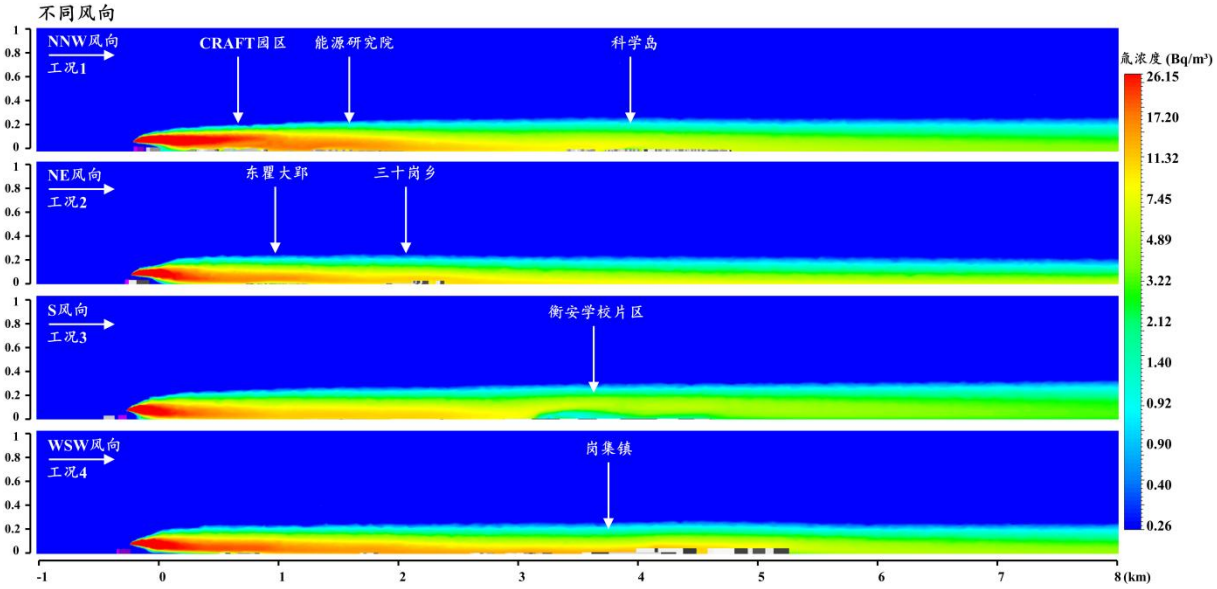


图5-11 不同风向垂直截面氚浓度分布云图

图5-12呈现了不同风向下距地表1.5米高度处水平截面的氚浓度分布云图。通过对比各风向模拟结果可以发现，地表建筑物的空间布局对烟羽的传输与扩散产生了显著的阻挡效应。尤其当烟羽流经科学岛、三十岗乡、衡安学校片区以及岗集镇时，由于这些区域以居民社区为主，建筑楼层普遍在20米至40米之间，且分布较为密集，连续的建筑体形成了对近地面气流的物理屏障，迫使烟羽在绕流与抬升过程中发生局部涡旋滞留，从而在云图上呈现出明显的浓度梯度变化。

以NNW主风向为例分析：氚自烟囱排出后，首先受到CRAFT园区内部建筑物的直接阻挡，导致近场浓度分布不均。然而，当烟羽传输至下风向约1400米以外的区域，即合肥综合性国家科学中心能源研究院所在地段时，由于前方开阔地带缺乏大型建筑物遮挡，建筑物造成的扰动显著减弱，烟羽扩散条件得到明显改善，浓度随之出现一个回升峰值，最高浓度值可达13.31 Bq/m³。在1400米至3000米的传输区间内，下垫面开阔平坦，无大规模建筑群阻挡，烟羽得以在较为自由的流场中充分扩散与稀释。当

烟羽继续向前推移至科学岛附近时，受岛上局部建筑群及地形起伏的二次扰动影响，近地面浓度再次出现小幅波动，其浓度水平大致维持在6.14 Bq/m³至8.51 Bq/m³的区间内。随着输送距离的进一步增大，当烟羽最终抵达距排放源约5公里外的董铺水库上方时，经过长距离的大气弥散作用以及水面上方微气象条件的进一步稀释，氚浓度已稳定回落至5.85 Bq/m³以下。

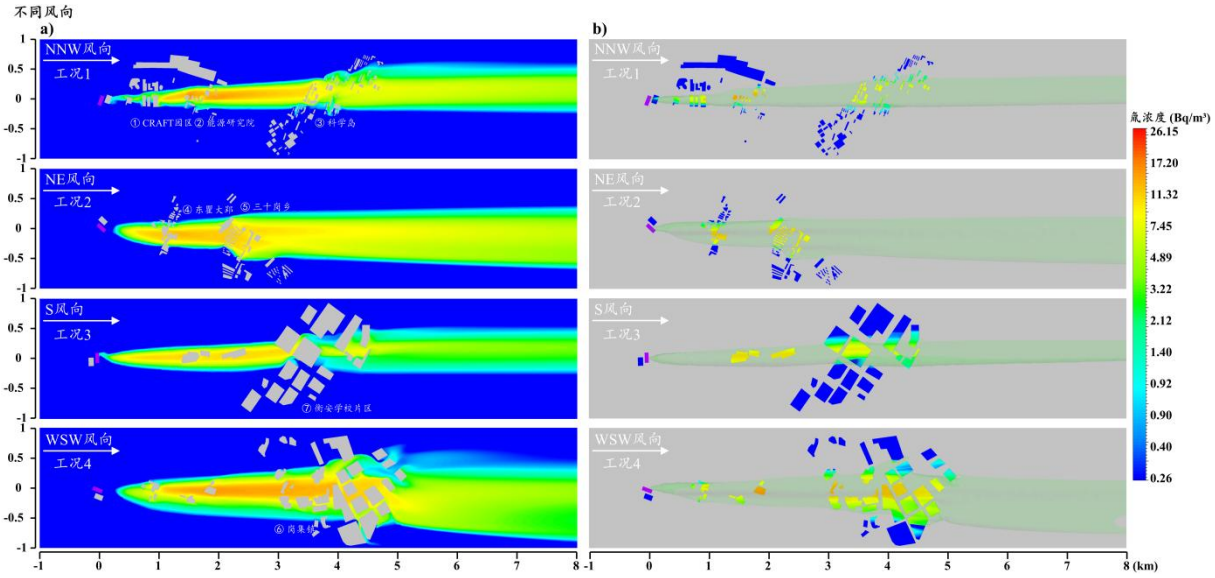


图5-12 不同风向地表1.5m处水平截面氚浓度分布云图

图5-13展示了相同NNW风向、不同风速条件下垂直截面的氚浓度分布云图。从图中可以直观观察到，随着风速的增大，烟羽的垂直抬升高度呈现明显下降趋势，高浓度烟羽的轴向延伸距离也随之缩短。这一现象表明，较大的来流风速显著增强了水平方向的输送作用，抑制了烟羽的向上扩散，将其压制在更贴近地面的高度层内快速迁移。与此同时，高风速带来的强湍流混合加速了烟羽内部与周围空气的交换，使得污染物无法在下风向长距离聚集，高浓度区域迅速稀释，与高斯模型计算结果吻合，在物理机制上互为印证。

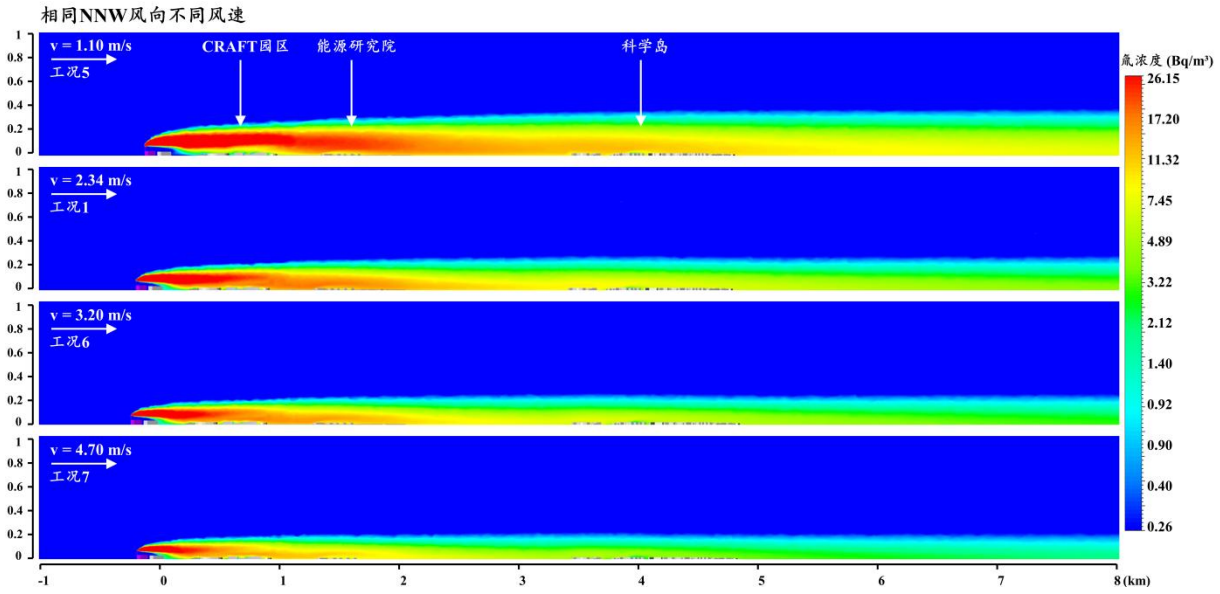


图5-13 相同NNW风向不同风速下垂直截面氚浓度分布云图

与垂直截面相对应，图5-14展示了相同NNW风向条件下，不同风速等级距地表1.5米处水平截面的氚浓度分布云图。值得注意的是，尽管风速的增大能够显著提升大气的稀释与扩散能力，但地表密集建筑物对近地面烟羽流场的机械阻挡作用并未因风速的增加而发生本质改变。无论是在小风还是大风条件下，建筑物背风面形成的尾流区及侧向绕流区仍然清晰可见，这些区域的浓度分布形态与低风速时保持高度相似性。这一现象表明，建筑物对氚污染物扩散路径的阻碍效应是一个由城市冠层几何结构主导的物理过程，即便在较大的背景风速下，近地面气流在穿越建筑群时仍会因摩擦和形体阻力产生局部分离与涡旋，从而导致烟羽在建筑物后方的浓度分布呈现出类似的空间格局。因此，风速的提高主要作用于远距离的总体稀释过程，却无法消除局部建筑群引起的微观浓度波动与空间异质性。

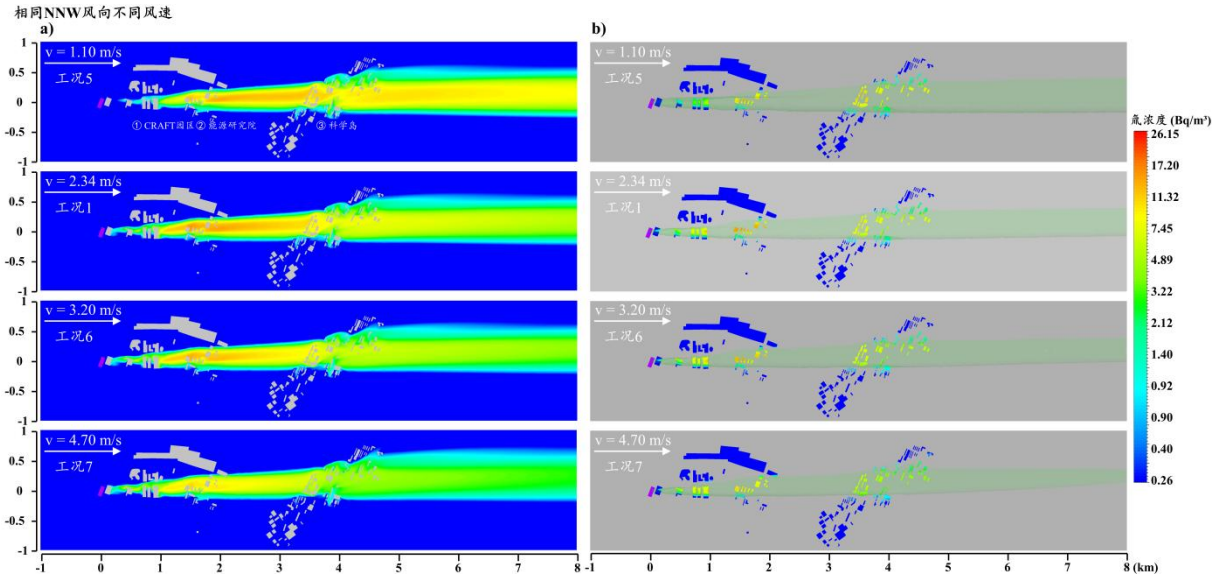


图5-14 相同NNW风向不同风速下地表1.5m处水平截面氚浓度分布云图

5.1.3.3 拉格朗日烟团模型计算结果

为了真实模拟气象条件对氚扩散的影响，本研究采用拉格朗日烟团模型进行大气弥散模拟。该模型的核心优势在于其能够处理变风向条件，内置的诊断风场模块可利用气象站收集的全年真实气象数据，通过求解质量守恒方程插值生成整个计算域的风场信息，实现风场数据同化，从而有效模拟风向随时间变化情景下烟团的时空演化过程。

气象数据的完备程度直接影响诊断风场的真实性，氚工厂厂址周边气象站分布稀少，仅有一个甲方提供的地面气象站。单个地面气象数据无法直接满足拉格朗日烟团模型的计算需求，因此补充选取距离最近的南京市高空气象站数据，具有较好的代表性。气象站分布如下图所示。地面气象数据由项目方提供，包含逐小时的风向、风速观测值。高空气象数据包括每天两次的风向、风速、温度和大气压力的垂直剖面观测值。

通过地面与高空气象数据的结合，能够较为真实地构建计算域内的三维风场，为拉格朗日烟团模型提供可靠的气象输入。氚工厂厂址所在地合肥地处中纬度地带，属亚热带季风性湿润气候，季风明显、四季分明，气候温和、雨量适中。年均气温15.7℃，年均降水量约1000 mm，年日照时间约2000 h，年均无霜期228天，平均相对湿度77%。

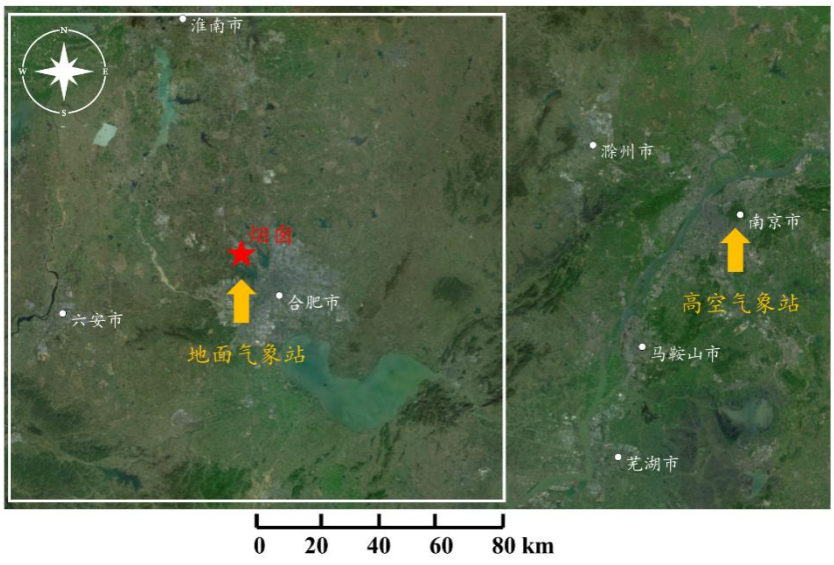


图5-15 氚工厂地面气象站和高空气象站分布

图5-16展示了不同季节条件下的大气氚浓度分布计算结果。结合四季风向风速玫瑰图可以看出，各季节烟羽扩散方向与对应季节的主导风向具有良好的一致性。春季和夏季，区域主导风向不显著，风速较小且风向较为分散，烟羽呈现向四周均匀扩散的态势，无明显偏移趋势，浓度分布相对对称。秋季受东北风主导作用明显，烟羽在东

北风驱动下向西南方向偏移，浓度高值区主要分布于排放点西南侧。冬季则以北风为主，烟羽向南偏移，浓度分布呈现明显的南北向拉长特征。尽管扩散方向差异显著，各季节峰值浓度均处于同一量级。

从全年累计效应来看，由于北向来流（包括北风、东北风等）频率较高，烟羽整体呈向西、向南偏移的分布格局，与全年平均风玫瑰图反映的主导风向趋势高度吻合。

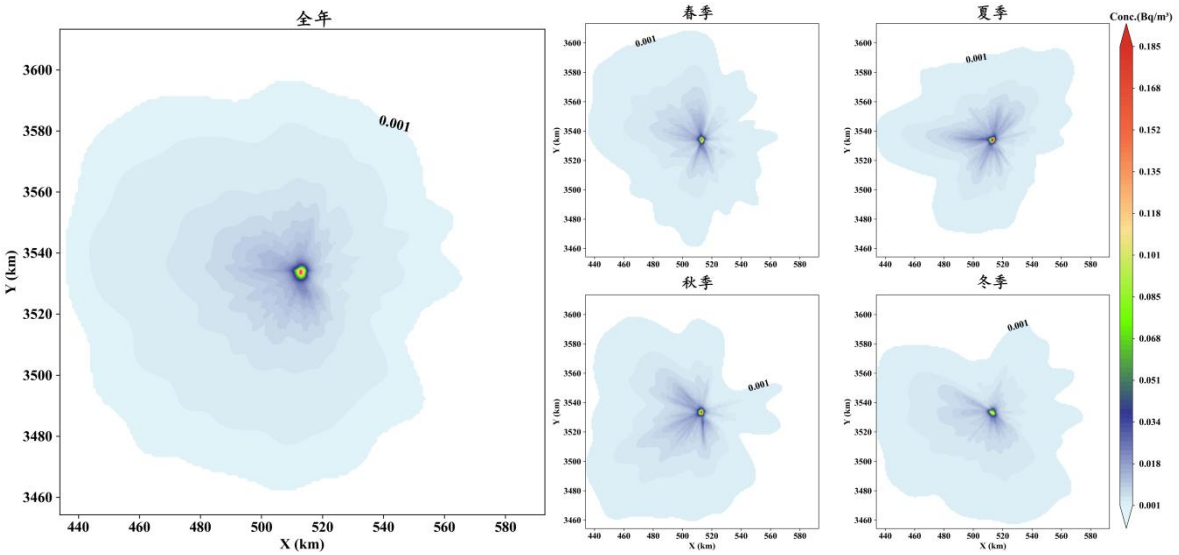


图5-16 2023年不同季节氚工厂正常运行排放的氚平均浓度扩散分布

5.1.3.4 关键区域土壤氚浓度分布特征

评估土壤水中HTO浓度时，首先采用拉格朗日烟团模型计算主风向NNW峰值浓度位置（能源研究院处）的全年日均大气氚浓度。由于拉格朗日烟团模型在局地尺度下对建筑群扰动的解析能力有限，其计算得到的峰值浓度偏低。为此，以CFD方法在该位置计算得到的峰值浓度（13.31 Bq/m³）为基准，对拉格朗日模型计算的全年逐日浓度序列进行等比缩放修正，以校正局地建筑物对近场浓度的影响。经修正后，获得该位置全年空气水分中氚浓度的动态变化曲线，如下图所示，下风向近地表空气中修正后的全年平均氚浓度为1 Bq/m³，峰值浓度经CFD修正后为13.31 Bq/m³。

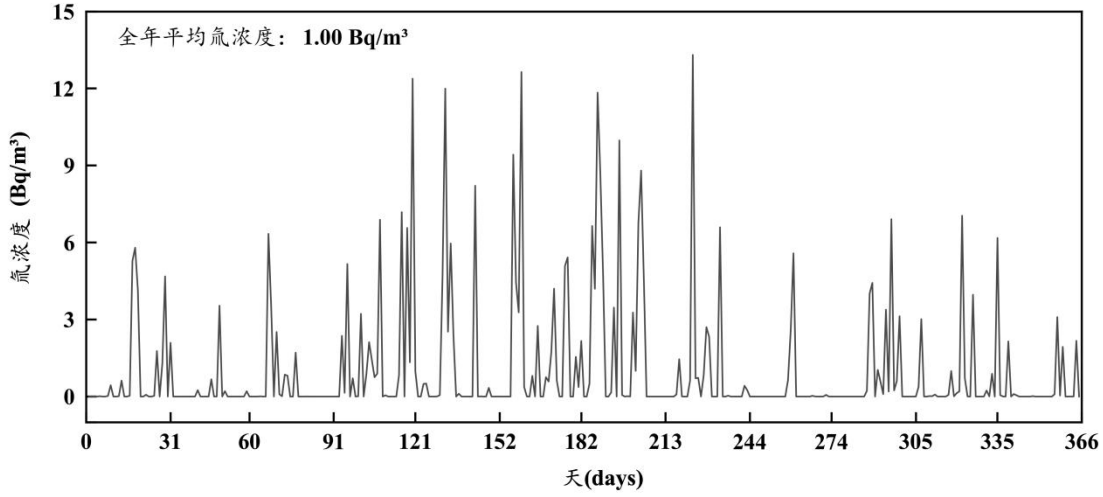


图5-17 NNW下风向峰值浓度处近地表空气中氚浓度变化曲线

土壤上边界条件依据修正后的空气中HTO浓度，结合绝对湿度换算得到全年空气水分中HTO浓度的动态变化。降水与蒸发数据采用2023年合肥市实测值，如下图所示，年降水量为1066.612 mm，年蒸发量为1181.3327 mm。

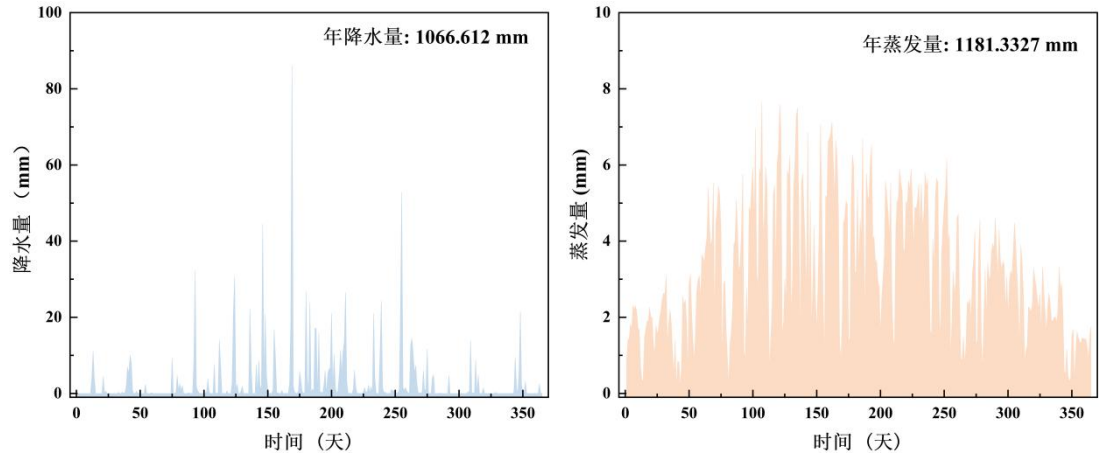


图5-18 降水蒸发气象数据

5.1.3.4.1 常规连续排放稳态情况

作为对比，首先考虑一个简化的稳态情景：忽略降水与蒸发作用。在此情景下，近地表空气中氚浓度年均为1 Bq/m^3，根据下表中的土壤参数，体积含水量约为0.33 cm^3/cm^3，容重约为1.5 g/cm3，颗粒密度为2.65 g/cm^3，可计算得到土壤通气孔隙度为0.104。假设HTO在土壤空气与土壤水分之间达到平衡，结合空气绝对湿度，可估算得到土壤水中HTO浓度约为0.16 Bq/L。

表5-8 土壤参数

深度/cm	容重/g·cm^{-3}	砂土	粉土	粘土	体积含水量/cm^3·cm^{-3}
0-10	1.32	0.113	0.507	0.38	0.336

深度/cm	容重/g·cm^{-3}	砂土	粉土	粘土	体积含水量/cm^{3}·cm^{-3}
10-30	1.49	0.101	0.502	0.397	0.33
30-100	1.53	0.088	0.488	0.424	0.327

*数据来源于**SoilGrids: https://soilgrids.org/**

5.1.3.4.2 常规连续排放考虑动态降水蒸发

下图是不同深度土壤水中HTO浓度的动态变化，表层土壤（5cm）受降水和蒸发等气象因素影响最为显著，土壤水中HTO浓度在0.037 Bq/L至11.1 Bq/L范围内剧烈波动，中位数约为0.37 Bq/L。降水会导致土壤水中HTO被稀释从而浓度降低，而蒸发会促使HTO随水分向上迁移，同时受近地表空气中HTO浓度的影响，表层土壤水中HTO浓度升高。这些过程共同作用，导致表层浓度呈现复杂波动特征。随着土壤深度增加，受降水入渗及土壤阻滞作用的影响，20cm、50cm和100cm深度处的土壤水中HTO浓度分别于第10天、第45天和第161天上升至10^{-5} Bq/L量级。

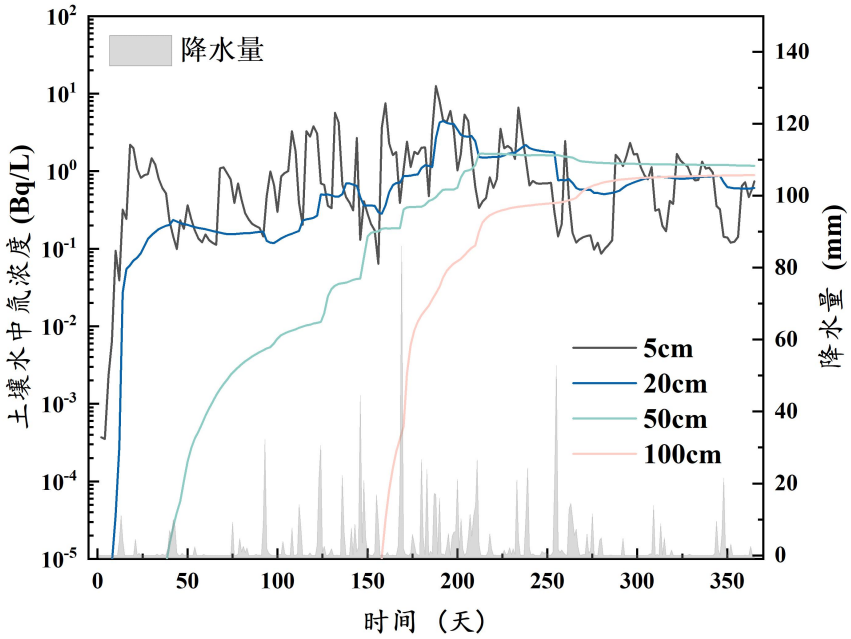


图5-19 不同深度土壤水中氚浓度动态变化

图5-20展示了不同时间土壤水中HTO浓度随深度的动态变化。总体而言，HTO在土壤中的迁移呈现两个显著特征：随深度增加浓度衰减，以及随深度增加迁移时间滞后。结合图5-19和图5-20可以看出，20 cm、50 cm和100 cm深度处的土壤水中HTO浓度分别在第16天、第150天和第250天左右上升至与同期表层浓度相当的水平。这表明，在动态气象条件影响下，HTO需要经历一个完整的气象周期才能贯穿整个研究观测剖面（0–100 cm）。

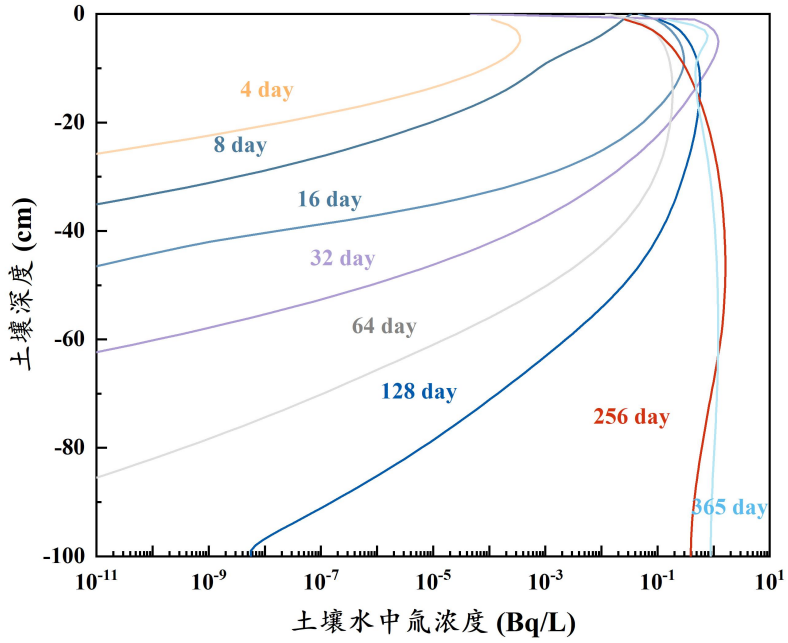


图5-20 不同时间土壤剖面中氚浓度分布

对比考虑稳态情况和动态气象因素影响的情况可以发现，基于年均大气氚浓度（1 Bq/m³）进行简化的稳态估算，土壤水中HTO浓度仅为0.16 Bq/L。而实际动态模拟显示，表层土壤水峰值浓度（11.1 Bq/L）约为稳态估算值的69倍，即使在50 cm深度处，动态模拟的峰值浓度也显著高于稳态估算。这意味着，如果仅采用年均稳态模型进行环境影响评价，将严重低估短期内（尤其是在降水与蒸发交替剧烈的季节）土壤氚致辐射剂量的峰值水平。特别是在评估农作物根系吸收（主要集中于表层土壤）时，动态模型能够提供更准确、更保守的参考依据。

5.1.3.5 关键区域降水氚浓度分布特征

通过CFD模型获取关键人群所在地氚活度浓度的垂直分布廓线，结合氚的大气湿沉降模型，可计算得到特定降水强度与降水持续时间条件下的氚浓度空间分布廓线，以及收集雨水中的氚浓度。依据2023年气象资料，该区域年内最大降水强度为11.442 mm/h，本研究取12 mm/h作为最大降水强度进行分析；最小降水强度取0.1 mm/h（通常为可产生湿沉降的下限值）。基于上述两个降水强度值，分别计算了持续降水1 h条件下的氚浓度廓线，并得出雨水中氚浓度的预测值。

如下图所示，给出了降水强度为0.1 mm/h与12 mm/h、持续降水1 h前后的氚浓度垂直廓线。由图可知，对于不同位置的关键人群所在地，降水强度对大气氚的湿沉降效

果具有显著影响。以12 mm/h的强降水为例，近地表（1.5 m高度处）空气中氚浓度较降水前下降了约50%，表明降水对大气氚具有显著的湿清除作用；而0.1 mm/h的弱降水条件下，浓度下降幅度相对有限。

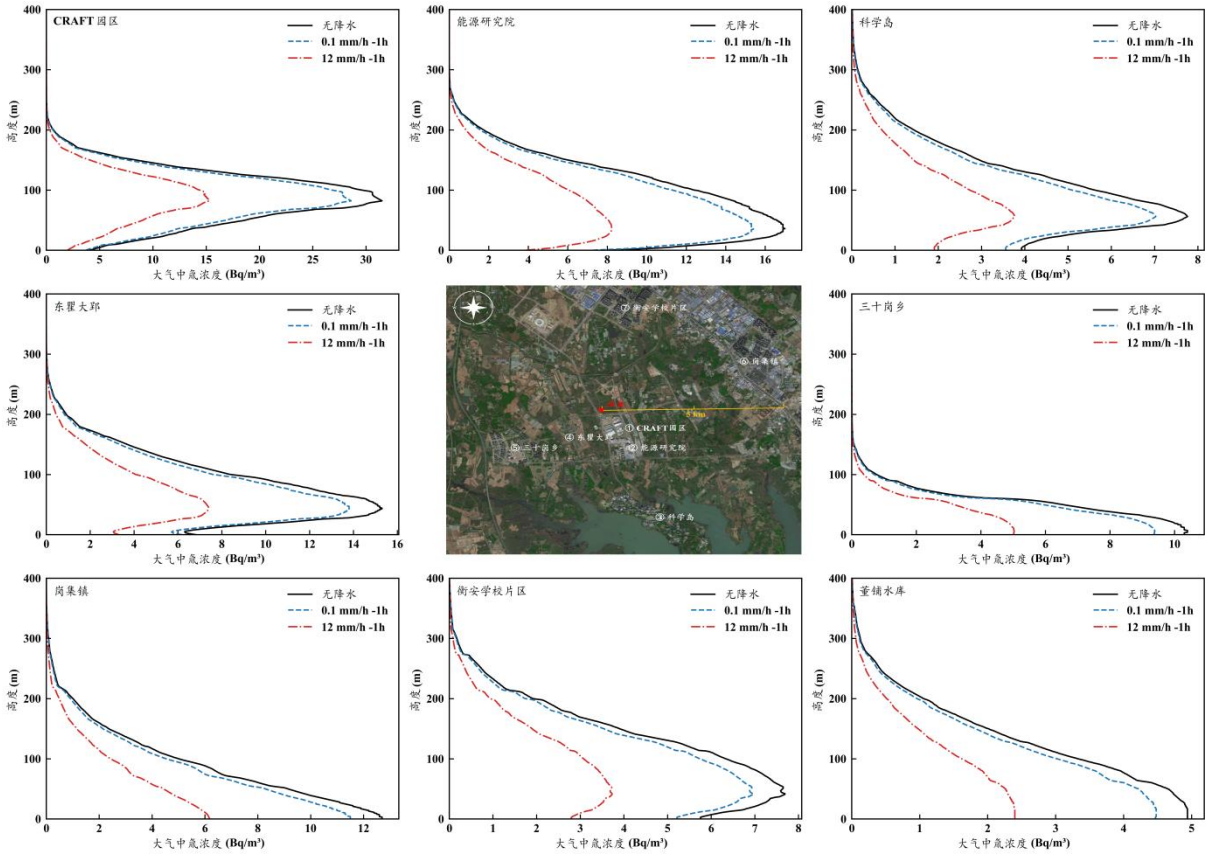


图5-21 各个关键人群所在地降水前后浓度廓线

在持续降水1 h条件下，各观测点收集雨水中的氚活度浓度如下表所示。数据显示，雨水中氚活度浓度较同期空气中氚浓度高出约4-5个数量级，例如在能源研究院，雨水中浓度为93.84 Bq/L，而空气中最高为17 Bq/m³，进一步印证了降水对大气氚的显著湿清除效应。

表5-9 不同关键人群所在地在不同降水强度下的雨水中氚浓度

关键人群所在地	降水强度	
	0.1 mm/h	12 mm/h
CRAFT园区	2842.12 (Bq/L)	129.95 (Bq/L)
能源研究院	2051.09 (Bq/L)	93.84 (Bq/L)
科学岛	944.02 (Bq/L)	43.15 (Bq/L)
东瞿大郢	1510.61 (Bq/L)	69.05 (Bq/L)
三十岗乡	575.76 (Bq/L)	26.40 (Bq/L)

关键人群所在地	降水强度	
	0.1 mm/h	12 mm/h
岗集镇	1124.51 (Bq/L)	51.45 (Bq/L)
衡安学校片区	1118.17 (Bq/L)	51.16 (Bq/L)
董铺水库	658.18 (Bq/L)	30.12 (Bq/L)

5.1.3.6 关键区域水库氚浓度分布特征

评估董铺水库水中HTO浓度时，首先采用拉格朗日烟团模型计算董铺水库位置的全年日均大气氚浓度。与前述土壤水评估方法一致，以CFD方法在该位置的计算结果为基准，对拉格朗日模型计算的全年逐日浓度序列进行等比缩放修正，以校正局地建筑物对近场浓度的影响。经修正后，获得董铺水库位置全年空气水分中氚浓度的动态变化曲线如下图所示。氚工厂正常运行工况下，董铺水库水体表面上方的全年大气平均氚浓度为0.179 Bq/m³。

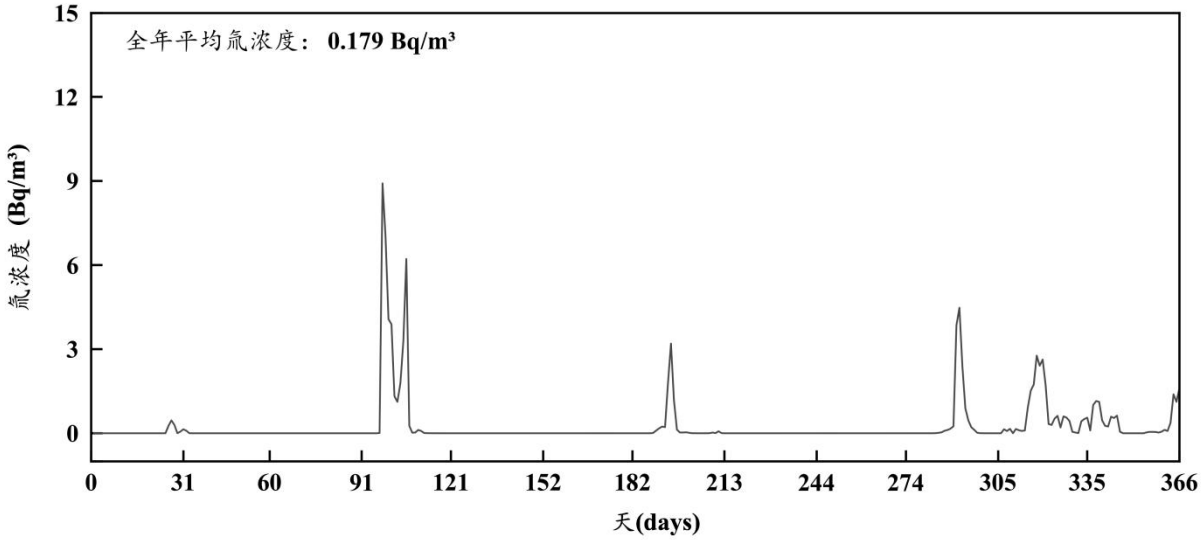


图5-22 NNW下风向董铺水库水体表面上方空气氚浓度变化曲线

采用系统动力学方法对HTO释放后在董铺水库中的沉积过程进行评估。董铺水库的表面积约为207 km²，多年平均库容为2.42亿m³。针对不同的水文情景，分别设置了三种入库流量条件：常规入库流量（2 m³/s）、百年一遇洪水泄洪流量（57.2 m³/s）以及千年一遇洪水泄洪流量（124 m³/s）。基于系统动力学模型考虑空气-水界面HTO交换、水体混合等过程，评估了不同流量条件下水中氚浓度的长期累积动态，结果如下图所示。

根据修正结果，取水库0m高度处全年平均氚浓度（C_{air}=0.179 Bq/m³）。在常规入库流量下，水中氚浓度会由于空气HTO的沉积导致升高，经过几十年的累积可以达到13.67 Bq/L的水平；随着流量的增加，水中氚浓度随之减小，在百年一遇洪水与千年一遇洪水泄流流量的场景下，水中氚浓度仅为1.16 Bq/L与0.54 Bq/L。

根据修正结果，取水库上方0 m高度处全年平均氚浓度为0.179 Bq/m³。在常规入库流量（2 m³/s）条件下，水中氚浓度由于空气中HTO的持续湿沉降而逐渐升高，经过20年的累积可达到13.67 Bq/L。随着入库流量的增加，水中氚浓度显著降低：在百年一遇洪水泄洪流量（57.2 m³/s）情景下，20年累积浓度约为1.16 Bq/L；在千年一遇洪水泄洪流量（124 m³/s）情景下，则进一步降至0.54 Bq/L。需要说明的是，空气中HTO浓度（Bq/m³）与水中HTO浓度（Bq/L）之间的数值差异主要源于气-水界面HTO的分配平衡以及水体的累积效应。

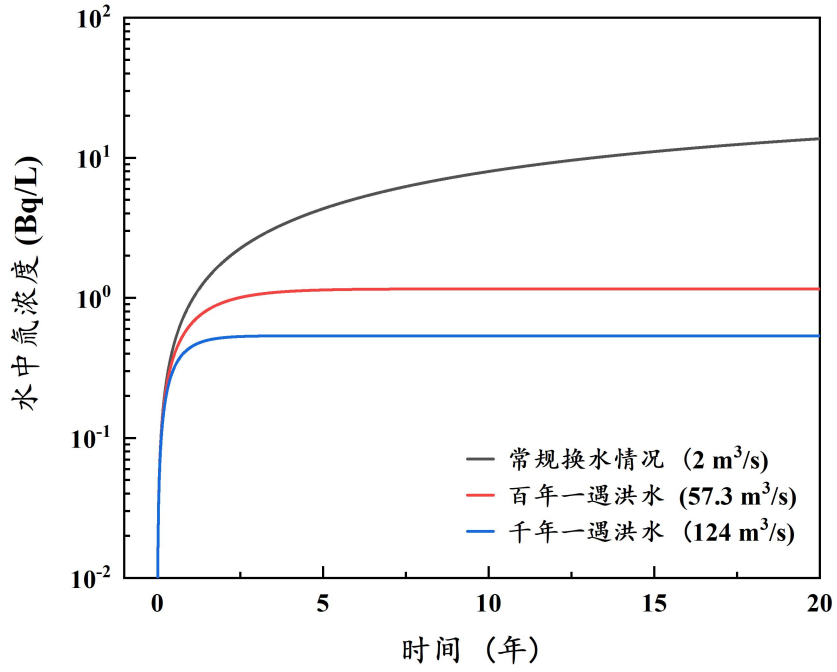


图5-23 不同流量下HTO在董铺水库中随时间的累积量

5.1.3.7 关键区域人群暴露剂量特征

在核设施环境影响评价中，为保守计算，成人呼吸率常取15 m³/d（约5500 m³/a，按365天折算）。除主风向NNW外，其余各风向（NE、S、WSW）在下风向敏感点处的空气氚浓度峰值均位于10.09–14.25 Bq/m³区间，与NNW风向峰值（13.31 Bq/m³）最大偏差不超过8%。鉴于NNW风向下的浓度值在上述风向中属于较高水平，且主导风向

的长期出现频率通常更高，为保守计，本次公众剂量评估以NNW风向下的最大及平均暴露剂量作为代表，其他风向下的公众个人年有效剂量预计不会超过NNW风向的计算结果。

烟囱主风向NNW下风向最大浓度点出现在1500m处的位置，在合肥综合性国家科学中心能源研究院附近，最大浓度达到13.31 Bq/m^3，HTO 吸入剂量系数取1.8E-11 Sv/Bq。根据公式5.24计算得到该位置个人最大暴露剂量为5.42E-6 mSv/day，下图根据图5-17修正后的全年逐日大气氚浓度序列数据计算得到全年个人平均暴露剂量为4.09E-7 mSv/day，远低于峰值暴露剂量，反映了实际气象条件下浓度波动的平均效应。

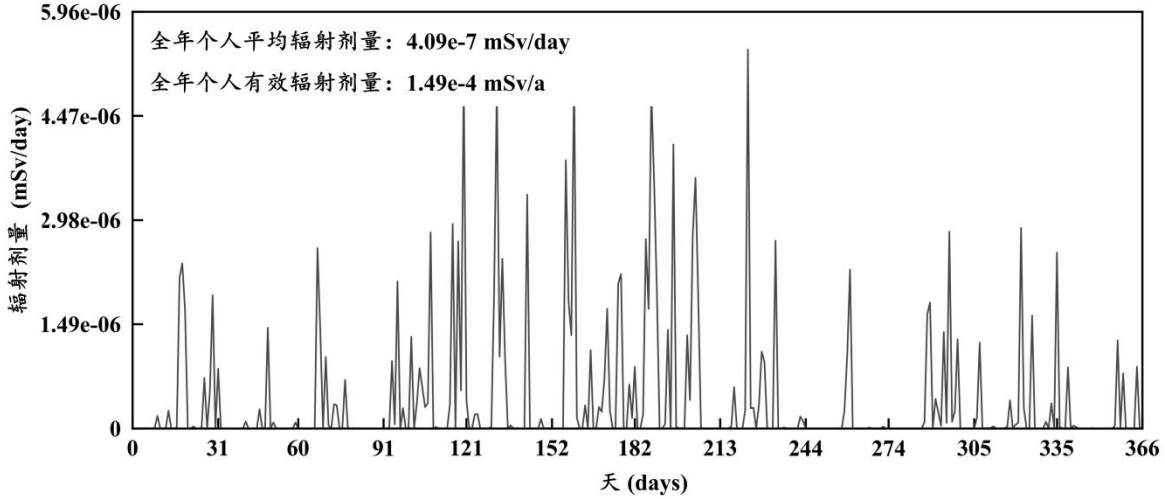


图5-24 NNW下风向峰值位置处（能源研究院园区）全年个人暴露剂量

将全年日均暴露剂量积分得到全年个人有效剂量为1.49E-4 mSv/a。即便按最大日剂量（5.42E-6 mSv/day）进行保守积分估算，全年有效剂量也仅为1.98E-3 mSv/a。两者均远小于GB 6249-2025规定的公众年有效剂量限值（0.25 mSv/a），表明实验验证平台在正常运行工况下对周边公众的辐射影响处于极低水平，具备充分的安全裕度。

5.1.3 屏蔽体外剂量率水平

作为氢的放射性同位素，氚在衰变过程中发射低能β射线，衰变为He-3。氚为纯β辐射体，β粒子的能量大约在0~18.6keV，没有任何γ射线伴随发射。氚不产生外照射危害。β射线比α射线有穿透力，但在穿过同样距离后，其引起的损伤更小。β粒子能被体外衣服消减、阻挡或一张几毫米厚的铝箔完全阻挡。本项目辐射工作人员不会直接接触放射性核素，在操作时会佩戴医用手套，因此β射线对本项目辐射工作人员的影响较小。

氚燃料实验楼结构体系拟采用钢筋混凝土厚墙厚板结构，也可能采用钢框架结构或钢框架支撑结构；地下室结构选型拟采样框剪结构。氚燃料实验楼各墙体足以屏蔽能量大约在0~18.6keV的β粒子，屏蔽体外剂量率完全可以满足相关标准要求。

5.2 事故工况辐射环境影响分析

5.2.1 事故列表

为确保系统安全运行，设计需考虑事故工况可能引发的放射性释放后果。由于系统可迁移源项主要包括含氚气体和含氚水，因此主要考虑可能引发含氚气和含氚水意外释放的相关系统或部件失效为基础的事故，结合国内外已有相关经验，总结了事故的发生原因、可能产生的后果、设计的应急措施和预防措施，获得本项目事故列表，见下表。

表5-10 设计基准事故列表

序号	事故名称	事故描述	可能原因	后果	预防与缓解措施	对工作人员和环境的影响
1	含氚气体泄漏事故	含氚气体在系统内进行传输时发生泄漏	（1）阀门、管道连接法兰密封失效 （2）设备连接处焊点存在缺陷	含氚气体泄漏至手套箱或设备夹层	（1）安装过程中，对系统密封性进行检测，保证法兰连接有效性；对焊点进行检测，保证焊点质量。 （2）手套箱内、物料较多的设备附近设置氚监测报警装置，一旦探测到泄漏，报警提醒现场人员撤离，并联锁开启事故排风。 （3）系统上多处设置压力监测点位，压力异常变化时提醒工作人员排查问题。	工作场所中氚浓度上升，人员吸入导致内照射危害；场所空气中的氚经净化、回收后，排入大气，少量放射性对环境及公众造成影响。
2	含氚水泄漏事故	含氚水传输过程中发生泄漏	（1）阀门、管道连接法兰密封失效 （2）设备连接处焊点存在缺陷	含氚水泄漏至厂房环境	（1）安装过程中，对系统密封性进行检测，保证法兰连接有效性；对焊点进行检测，保证焊点质量。 （2）可能存在泄漏的位置设置氚监测报警装置。 （3）储罐设置液位计，液位异常变化时提醒工作人员排查问题。 （4）合理设置地漏、围堰等，及时汇集泄漏的含氚水，防止四处溢流。	工作场所中氚浓度上升，人员吸入导致内照射危害；场所空气中的氚经净化、回收后，排入大气，少量放射性对环境及公众造成影响。
3	氢气爆炸事故	联合电解催化子单元装置密封性受损，氢气与外界空气混合达到爆炸浓度，遇明火或静电发生爆炸	联合电解催化子单元装置密封性受损，氢气泄漏至厂房环境，与空气混合达到爆炸浓度；	遇明火或静电发生爆炸，装置进一步受损，含氚水与含氚气体释放	（1）涉及氢气的房间采用防爆电气装置。 （2）涉及氢气的房间设置氢气浓度监测报警装置，氢气浓度超标时联锁打开事故排风，及时排出厂房环境中的氢气。 （3）厂房设置抗爆墙，防止爆炸导致厂房密封性受损。	泄漏至厂房环境的氚经净化、回收后，排入大气，少量放射性对环境及公众造成影响。
4	停电事件	发生停电事件，所有设备失电	区域性停电或厂内电路系统故障	含氚气体、含氚水滞留在设备、管道内，不会泄漏至厂房环境	设置UPS系统，发生停电事故时，部分重要系统仍能正常工作，将所有含氚气体、含氚水收集到贮存系统内。	此类事件不存在意外释放，不会对工作人员和外环境造成影响。
5	外部事件	发生地震	发生地震	手套箱外的氚传输管道或贮存设备应能保证密封性不被破坏，手	所有设备、建构筑物均按照能满足设计基准地震的抗震要求，设计基准地震事故条件下，设备及建构筑物仍能承担相应安全功能，确保包容或功能完整。	工作场所中氚浓度上升，人员吸入导致内照射危害；场所空气中的氚经净化、回收后，排入大气，少

序号	事故名称	事故描述	可能原因	后果	预防与缓解措施	对工作人员和环境的影响
				套箱内氚贮存设备、管道破裂，内部的氚气泄漏至手套箱内，手套箱密封性仍保持完好		量放射性对环境及公众造成影响。

5.2.2 事故后果分析

在事故工况下，工作人员所受照射剂量主要来自吸入氚核素引起的内照射；公众所受照射剂量主要来自气载流出物氚的空气浸没外照射和吸入内照射。

5.2.2.1 事故情景及源项

发生设计基准地震，手套箱外的氚传输管道或贮存设备应能保证密封性不被破坏，手套箱内氚贮存设备、管道破裂，内部的氚气泄漏至手套箱内，手套箱密封性仍保持完好。手套箱内氚浓度大幅度上升，手套箱向厂房环境泄漏的氚的量增加。

假设本项目全部的氚泄漏至一个手套箱内，将此事故作为本项目的最大假想事故。手套箱的密封等级为一级，手套箱内的氚浓度探测仪探测到氚泄漏后，现场工作人员立刻撤离，撤离时间为30min，则30min内泄漏至厂房的氚活度为2.61×10^{12}Bq，厂房事故排风过滤效率假设为90%，则泄漏至环境的氚总活度为2.61×10^{11}Bq。

内循环氢同位素分离单元典型事故工况：在运行过程中，氢同位素的精馏过程中在20K左右的低温条件下进行。在该温度下，低温区精馏柱、换热器及其管路等部件的焊接部分可能因为巨大温差产生裂痕，从而导致工艺气体泄漏，造成氚泄漏事故。这种泄漏事故将造成工艺气体内的氚泄漏至真空冷箱中，导致原本不接触氚的部件直接接触氚气，产生大量涉氚固废；同时，大量气体泄漏可能导致冷箱真空度上升，失去绝热效果，从而使精馏柱内液氢汽化大幅提升工艺管路压力，存在超压风险；最后，真空冷箱的真空通过多台分子泵维持，工艺气体泄漏会随着分子泵抽出冷箱外部，导致更大范围泄漏。

为了防止此类事故发生，主要采取如下措施：⑴真空冷箱真空泵组排出气出口安装氚电离室，时刻监控排出气氚浓度以便及时发现事故，同时排出气管路连接至氚安全系统，确保排出氚气不泄漏至环境中；⑵精馏工艺管路设计泄压回路，一旦发生工艺管路失温超压状况，可及时将超压管路泄压至安全罐内；⑶低温温区管路材料选用高品质可靠的管路材料，每个焊接部位需进行低温激冷多次后进行检测，尽可能降低事故发生概率。通过初步估计，泄漏事故产生放射性物质主要包括HT、DT及T_2，最高分压约92%，最多产生氚量约1g。

氘氚贮存与供给单元典型事故工况：单元一级包容失效，氚泄漏至二级包容手套箱，手套箱内氚浓度上升；单元与其他单元连接管道包容失效，房间氚浓度上升。

氢同位素深度浓集单元典型事故为超压超温事故：由高温储油槽加热控制失效且分离柱阀门开启失效同时发生时会发生该事故。在安全设计中在分离柱上安装了泄压阀，分离柱内的氢同位素气体压力超过0.7MPa时会泄压到安全罐中，平衡后压力小于0.2MPa。

液态包层氚提取单元典型事故为锂铅泄漏事故：安装集成时焊接不合格或长时间连续超温运行（大于24 h、550℃）时可能发生该事故。针对上述风险，在设计制造过程中要求液态锂铅接触管道和设备焊接进行100%探伤。所有加热设备或管道均配备2个及以上的温度传感器。通过多根温度传感器的对比，实现对反馈温度传感器正常工作状态的评估。同时，在设备、阀门及管道配置泄漏探测仪表，当相关部件发生介质泄漏时，泄漏探测仪表可及时感知并发出报警并启动排空阀门将单元内液态锂铅排回至锂铅储料罐内。少量泄漏锂铅泄漏至保温层（硅酸铝棉，不可燃料）后快速凝固。

综合以上分析，可梳理出氚实验楼典型事故场景及分析如下：

⑴一级包容事件：氚泄漏至手套箱

事故场景：25g氚（单个贮氚床氚量）泄漏至手套箱（30 m^3），初始压力-300Pa，GDS除氚系统底部进气，顶部抽气，除氚速率2次/h。

事故分析：当电离室探测到氚浓度超过除氚阈值，启动GDS除氚60m^3/h，此时为强制对流过程，根据前期CFD计算结果可知手套箱内大部分区域湍流扰动充分，CFD模拟计算结果与经验公式计算结果吻合较好，可以采用经验公式估算除氚过程中手套箱内氚浓度变化。

$$C=C_0 \exp\left(-\frac{\varepsilon F}{V}t\right)$$

当25g氚泄漏至手套箱时，手套箱初始氚浓度为 3.0×10^{14}Bq/m^3，启动GDS循环除氚约7.0h后，手套箱内氚浓度可达3.7×10^{8}Bq/m^3。

⑵二级包容事故：88g氚泄漏至手套箱（30 m^3），同时手套箱破口0.02 m^2

事故场景：88g氚（总氚量）泄漏至手套箱（30 m^3），初始压力-300Pa，同时手套箱破口0.02 m^2，氚通过破口泄漏至内燃料循环房间（房间尺寸：36.5m×25.7m×13m）

；GDS除氚系统底部进气，顶部抽气，除氚速率2次/h；ADS流量6000 m^3/h，效率99%；S-VDS 处理流量3000 m^3/h，效率99.9%。

事故分析：手套箱发生破口，在大气压力作用下手套箱内负压快速抵消，平衡至大气压。手套箱内氚通过扩散进入房间，初始时刻手套箱氚浓度约1.08×10^{15}Bq/m^3，手套箱内氚在GDS除氚作用下，经过GDS排出，同时在浓度扩散作用下经过破口进入房间。相比而言，GDS排出流量远大于破口扩散气体流量，因此手套箱内氚浓度变化基本上遵循除氚经验公式，约7.5h手套箱内氚浓度达3.7×10^{8}Bq/m^3。GDS换气对流作用下，手套箱内形成定向气流，同时房间在HVAC通风-排风作用下，形成气体流动，相对于气体静置状态下的扩散，在0.02 m^2大的破口在气流扰动下，加速手套箱内气体向外流出，根据CFD计算结果手套箱内绝大部分气流在10^{-2}m/s量级，对流作用引起氚泄漏大于气体扩散引起氚泄漏。进入房间氚量速率在7.5h内进入房间的氚量约3.9×10^{14}Bq，即约1g氚进入房间。

HVAC通风作用和浮力作用下，氚快速扩散至顶部电离室，加上电离室的探测响应时间和HVAC关闭时间，约60s后关闭HVAC。60s内房间平均氚浓度约7×10^{8} Bq/m^3，则HVAC流出氚量最多为2.8×10^{11}Bq，约0.00078g。HVAC关闭后，房间氚浓度在ADS和VDS除氚作用下，约15h房间氚浓度达3.7e5Bq/m^3。S-VDS环境排出氚量分析，氚经过除氚和稀释后低于3.7×10^{7}Bq/m^3的氚经过S-VDS排出（3000 m^3/h），在15h内排出氚量约1.67×10^{12}Bq，即0.0045g。

⑶二级包容事故：氚输运管道及二次包容套管同时破裂，破口尺寸50mm²

事故场景：SDS至液态包层氚提取系统氚输运管道（约40m）及二次包容套管同时破裂，1/2in的管道氚气（100kPa，氚流动速率14.7NL/min，约1g氚），破口尺寸50mm²，泄漏至房间（内燃料循环房间尺寸：36.5m×25.7m×13m）； ADS流量6000 m^3/h，效率99%；S-VDS 处理流量3000 m^3/h，效率99.9%。

事故分析：100 kPa氚通过扩散进入房间，事故初期氚流出速率高于10^{14} Bq/s，随后流出速率逐渐降低，流出速率在 10^{9} Bq/s附近保持稳定。房间流入约1g氚情况下，房间最高平均浓度可达10^{10}Bq/m^3量级，在除氚系统开启后氚浓度逐渐降低，约15h左右房间氚浓度降低至3.7×10^{5}Bq/m^3量级，即除氚时间约15h。

与之前分析相似，氚可在较短的时间内达到房间顶部，考虑响应时间下认为HVAC在事故后60s关闭，60s内房间平均氚浓度约7×10^{8} Bq/m^3，则HVAC排放氚量最多为2.8×10^{11}Bq，约0.00078g。HVAC关闭后，房间氚浓度在ADS和VDS除氚作用下，约15h房间氚浓度达3.7e5Bq/m^3。S-VDS环境排出氚量分析，氚经过除氚和稀释后低于3.7×10^{7}Bq/m^{3}的氚经过S-VDS排出（3000 m^3/h），在15h内排出氚量约1.67×10^{12}Bq，即0.0045g。

典型事故工况下，氚实验楼气载流出物、液态流出物及不可燃放射性固态废弃物产生量分别如表5-11～表5-13所示。

表5-11 典型事故工况下含氚废气排放量估算表

事故	事故处理时间（h）	HVAC流出氚量（g）	VDS流出氚量（g）
一级包容事件：25g氚泄漏至手套箱	7	/	/
二级包容事故：88g氚泄漏至手套箱，同时手套箱破口0.02 m^2	15	0.00078	0.0045
二级包容事故：氚输运管道及二次包容套管同时破裂，破口尺寸50mm^2	15	0.00078	0.0045

表5-12 事故工况含氚水源项源强

来源	水量与氚活度	备注
GDS、VDS ADS	0.57 kg， 4.21×10^{5}Ci/kg	参照BEST，以25g泄漏估算
消防系统废水	TBD	需根据建筑、消防系统 （比如是高压细水雾形式还是普通喷淋水）来确定

表5-13 事故工况不可燃放射性固体废物统计

序号	单元	事故类型	事故概率	产生量kg/a	氚比活度Bq/kg	固废类型
1	氘氚贮存与供给单元	氘氚贮存与供给单元一级包容失效，氚泄漏至手套箱，含氚气体由GDS处理	极低			无固废产生
2	低温精馏单元	低温精馏柱泄漏	极低	70000（每次）	5.00E+09	真空冷箱、换热器、分子泵、排空管路等
3	房间空气除氚单元	二级包容失效，氚泄漏至房间，导致环境氚浓度超标	低	670	1.00E+05	过滤器芯、传感器、管道过滤器、阀门、催化剂填料等
4	房间空气除氚单元	管路损坏，氚化水泄漏	极低	500（每	1.00E+04	管路等

序号	单元	事故类型	事故概率	产生量 kg/a	氚比活度Bq/kg	固废类型
				次）		
5	房间空气除氚单元	阀门外泄漏，氚化水泄漏	极低	500（每次）	1.00E+04	阀门等
6	含氚水除氚单元（WD+CECE+CD）	破口漏水	极低			无固废产生
7	排放气除氚单元	管路损坏，氚化水泄漏	极低	600（每次）	1.00E+04	管路等
8	排放气除氚单元	阀门外泄漏，氚化水泄漏	极低	800（每次）	1.00E+04	阀门等
9	排灰气处理单元	钯管净化器失效	低	200	5.00E+05	钯管
10	排灰气处理单元	转移泵失效	低	25	1.00E+05	转移泵
11	氢同位素深度浓集单元	超压超温事故	低			无额外固废产生
12	手套箱气氛除氚	手套箱内一级包容失效	极低	300（每次）	1.00E+12	分子筛床
13	液态包层氚提取单元	锂铅泄漏事故	低			无额外固废产生
合计：				895		

5.2.2.2 事故工况辐射环境影响分析

在事故工况下，氚可在较短的时间内达到房间顶部，考虑响应时间下认为HVAC在事故后60s关闭，60s内房间平均氚浓度约7×10^{8} Bq/m^3，则HVAC排放氚量最多为2.8×10^{11}Bq，约0.00078g。HVAC关闭后，房间氚浓度在ADS和VDS除氚作用下，约15h房间氚浓度达3.7e5Bq/m^3。S-VDS环境排出氚量分析，氚经过除氚和稀释后低于3.7×10^{7}Bq/m^{3}的氚经过S-VDS排出（3000 m^3/h），在15h内排出氚量约1.67×10^{12}Bq，即0.0045g，如表5-10所示。

表5-14 典型事故工况氚排放量估算表

事故	事故处理时间 (h)	排风量 (m^3/h)	HVAC流出氚量 (g)	VDS 流 出氚量(g)
一级包容事件：25g氚泄漏至手套箱	7	/	/	/
二级包容事故：88g氚泄漏至手套箱，同时手套箱破口0.02 m^2	15	3000	0.00078	0.0045
二级包容事故：氚输运管道及二次包容套管同时破裂，破口尺寸50mm^2	15	3000	0.00078	0.0045

对事故工况下气态氚排放量进行汇总，得到汇总表如下所示。事故工况8 (HVAC)是短时高浓度释放情景，事故工况9 (VDS)是持续较高浓度释放情景。

表 5-15 事故运行工况下气态氚排放量汇总表

工况	氚总量	运行时间	排风流量
事故工况 8 (HVAC)	0.00078 g	60 秒	124100 m^3/h
事故工况 9 (VDS)	0.0045g	15 小时	3000 m^3/h

事故工况用于评估突发事故条件下氚的瞬时排放对周边环境及关键人群组的潜在辐射风险。两种工况均采用NNW作为主风向，风速取2.34 m/s，该风速为甲方提供的地面气象站统计所得的NNW风向下年平均风速值。

表 5-16 事故运行工况分类

工况	风向	风速 (m/s)	下风向关键人群组
事故工况 8 (HVAC)	NNW 风向	2.34	CRAFT 园区、能源研究院及科学岛
事故工况 9 (VDS)	NNW 风向	2.34	CRAFT 园区、能源研究院及科学岛

5.2.2.2.1 CFD数值模型计算结果

（1）事故工况8（HVAC）：短时高浓度释放

在事故工况8（HVAC）情景下，氚在60秒内释放总量为0.00078 g，属于典型的短时高浓度释放。事故释放结束后，氚烟羽随风向下游扩散，对下风向区域产生阶段性影响。根据大气扩散模拟结果，如图5-25所示的事故工况8后4000秒内NNW下风向氚扩散垂直截面云图，释放开始后仅200秒，含氚烟羽即已抵达距离排放源最近的CRAFT园区上空；至500秒时，烟羽已覆盖整个能源研究院区域；约1000秒时，烟羽越过距离约3.8公里的科学岛建筑群；至1500秒，氚烟团主体到达董铺水库上方。

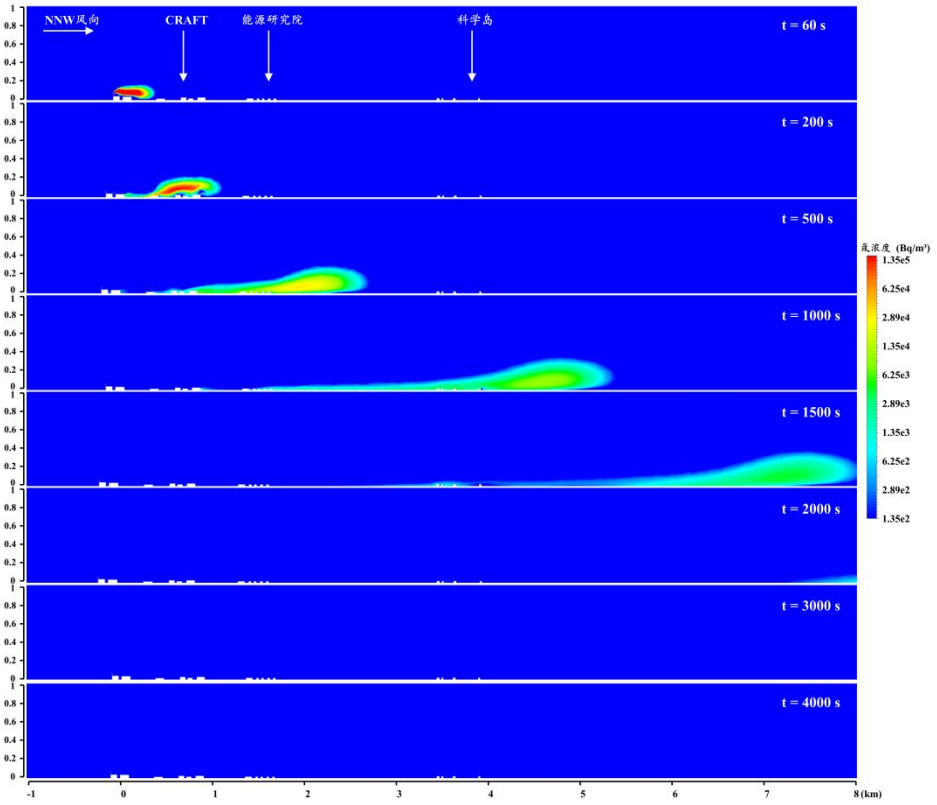


图5-25 事故工况8 (HVAC)后4000秒内NNW下风向氚扩散垂直截面云图

值得注意的是，氚的释放在60秒时已完全停止，此后烟羽的扩散完全依赖大气输送过程，表现为烟团随风整体向下游迁移。至4000秒，含氚空气基本离开董铺水库区域，对当地环境的影响显著减弱。

如图5-26所示的地表1.5米高度处氚扩散云图进一步揭示了地面沉降过程：500秒时，沉降氚烟羽覆盖CRAFT园区与能源研究院；1000秒时覆盖科学岛，并受科学岛建筑群影响发生轨迹偏转；至4000秒时，地面烟羽基本离开研究区域。

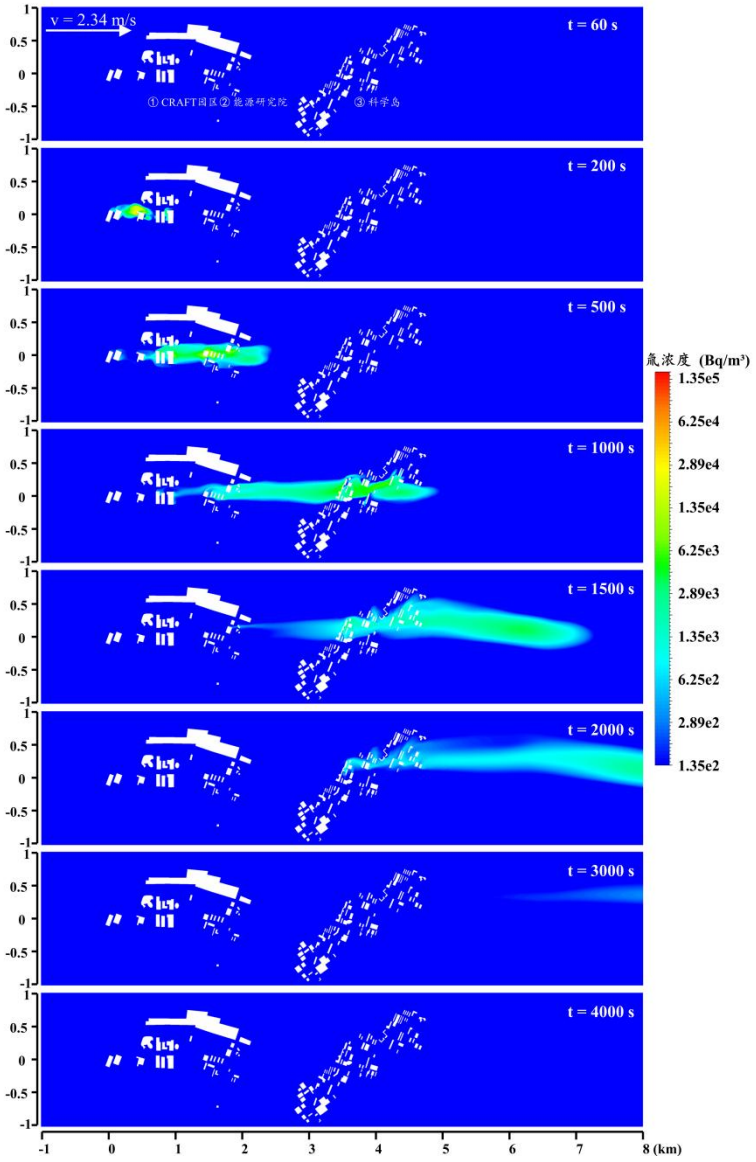


图5-26 事故工况8 (HVAC)后4000秒内NNW下风向地表1.5m高度处氚扩散云图

（2）事故工况9（VDS）：持续较高浓度释放

在事故工况9（VDS）情景下，氚在15小时内释放总量为0.0045 g，属于持续低浓度释放。由于释放时间较长，氚烟羽在模拟时段内持续存在，对环境造成持续影响。

根据大气扩散模拟结果，如图5-27所示的事故工况9后4000秒内NNW下风向氚扩散垂直截面云图，释放开始后200秒，含氚烟羽抵达CRAFT园区上空；500秒时覆盖整个能源研究院区域；1000秒左右越过科学岛建筑群；至2000秒到达董铺水库上方。

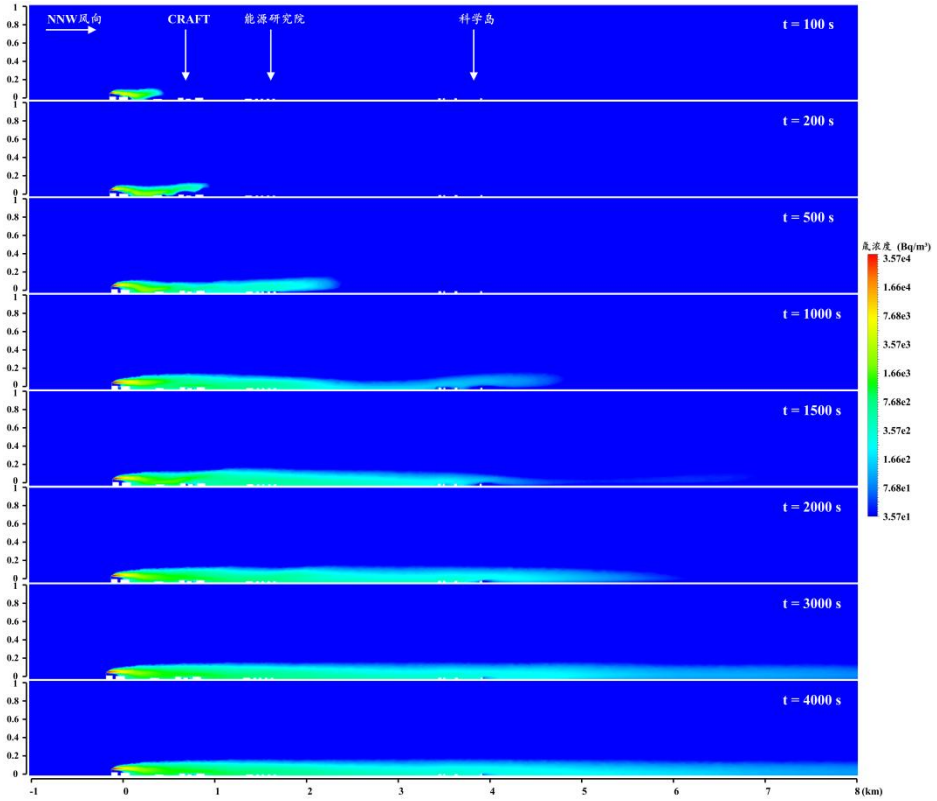


图5-27 事故工况9 (VDS)后4000秒内NNW下风向氚扩散垂直截面云图

与工况8不同，工况9中氚在前4000秒（约1.1小时）内持续排放，因此氚烟羽并未像工况8那样整体迁移，而是在下风向形成持续的浓度分布，对经过区域产生更长时间的暴露风险。

如图5-28所示的地表1.5米高度处氚扩散云图显示，由于工况9的烟囱出口流量低于工况8，地面沉降烟羽的推进速度相对较慢：在500至1000秒之间逐步覆盖CRAFT园区与能源研究院；1500秒时覆盖科学岛，并同样受建筑影响出现轨迹偏离；至3000秒时，地面烟羽覆盖董铺水库区域。

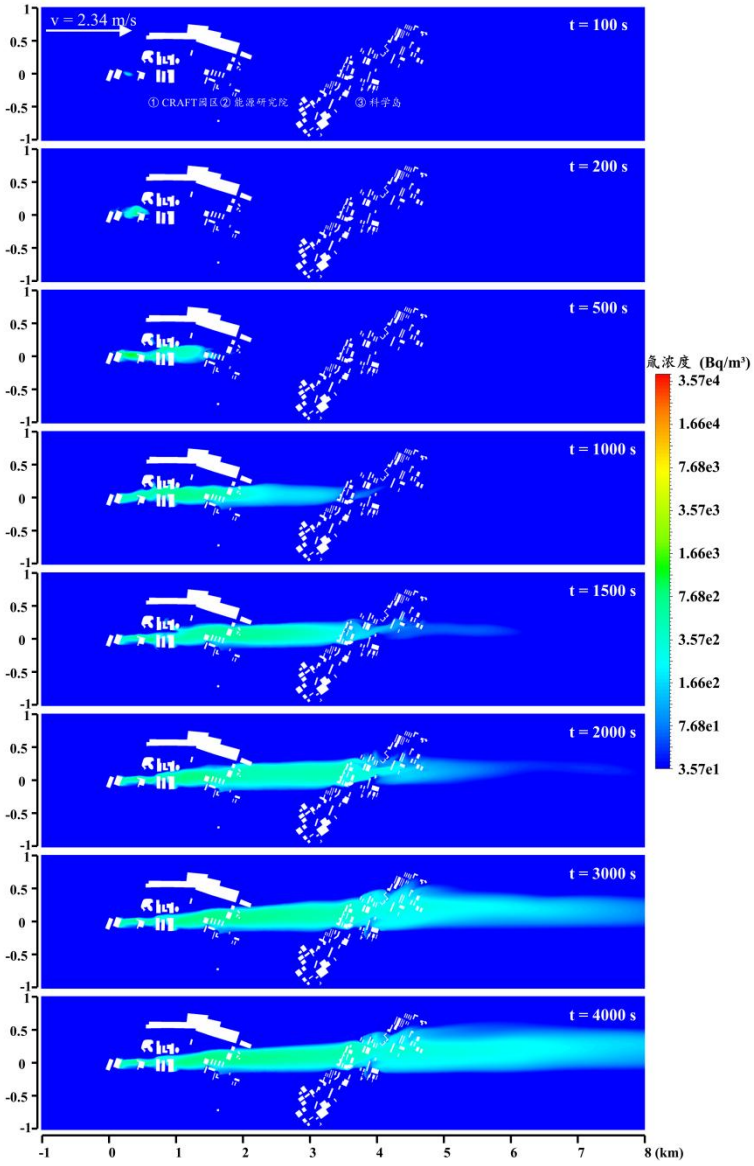


图5-28 事故工况9 (VDS)后4000秒内NNW下风向地表1.5m高度处氚扩散云图

5.2.2.2.2 关键区域人群暴露剂量特征

为系统评估不同事故情景下公众所受的辐射影响，本研究在主风向（NNW）下风向设置了四个典型监测点，分别位于：CRAFT园区（距排放口约843 m）、能源研究院（约1580 m）、科学岛建筑群内部（约3800 m）以及董铺水库水面（约6600 m）。各监测点均记录地表1.5 m高度处空气中氚浓度随时间的变化，并据此计算个人有效剂量。

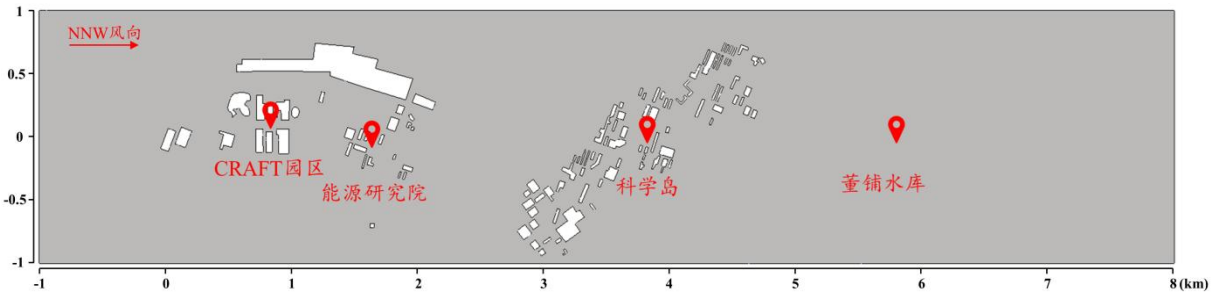


图5-29 NNW下风向监测点位置

（1）事故工况8（HVAC）：短时高浓度释放

HVAC事故情景：氚在60秒内排放完毕，随后5000秒处于扩散过程。四个监测点的个人暴露总剂量计算结果如表5-17所示，在CRAFT园区个人暴露有效剂量为3.44E-06 mSv，能源研究院为3.42E-06 mSv，科学岛建筑群内部为1.71E-07 mSv，董铺水库水面上方为5.07E-06 mSv。所有监测点的剂量值均远低于GB 6249-2025规定的公众年有效剂量限值（0.25 mSv/a）。

表 5-17 两种事故工况下NNW下风向主要人群暴露有效剂量表（事故后5000秒内）

	工况8 (HVAC)	工况9 (VDS)
CRAFT园区	3.44E-06 mSv	6.05E-06 mSv
能源研究院	3.42E-06 mSv	3.41E-06 mSv
科学岛	1.71E-07 mSv	1.91E-06 mSv
董铺水库	5.07E-06 mSv	2.23E-06 mSv

图5-30展示了HVAC事故后5000秒内，NNW风向下不同距离监测点处的氚浓度及个人暴露剂量变化。总体来看，由于短时释放，剂量分布呈现出明显的单峰特征。

事故初期，CRAFT园区因距离排放口最近，最先受到氚烟羽影响。然而，其受到的剂量反而低于下游的能源研究院。主要原因在于：能源研究院恰好位于NNW风向下氚浓度峰值落地点附近（约1500 m），且HVAC事故中氚烟羽为非持续排放，因此该区域在烟羽通过期间承受了较高的瞬时浓度。

董铺水库水面上方的暴露剂量略低于CRAFT园区。值得注意的是，尽管科学岛距离排放口较董铺水库更近，其内部监测点的氚浓度及相应剂量却显著低于董铺水库。这一现象主要归因于科学岛区域内密集的建筑群对气流产生明显的阻挡与扰动作用，显著削弱了含氚烟羽向建筑群内部的渗透能力，从而降低了局部区域的污染物浓度及

公众暴露剂量。从时间进程来看，氚烟羽经过1500秒后离开CRAFT园区和能源研究院，经过4000秒后离开董铺水库。

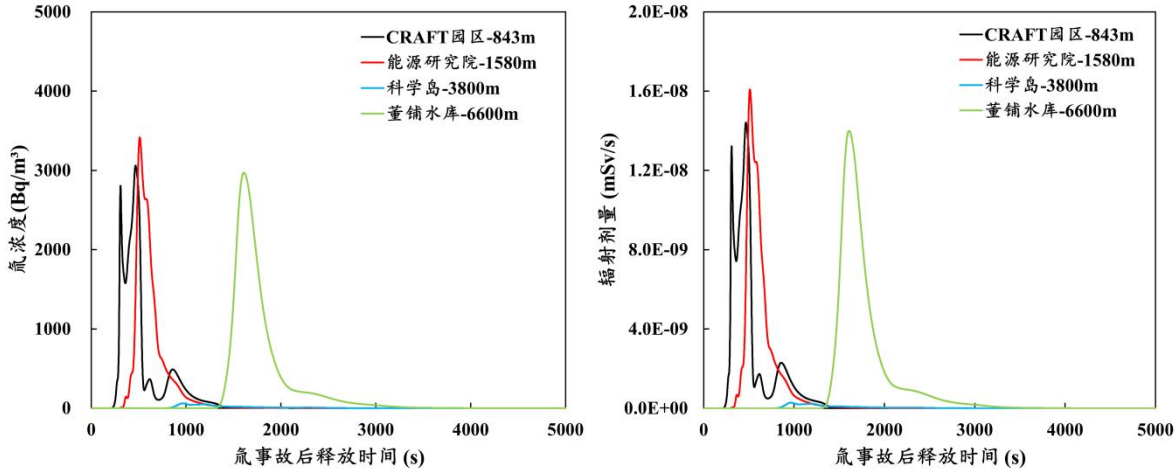


图5-30 HVAC事故后5000秒内NNW下风向距离烟囱不同位置氚浓度及个人暴露剂量

（2）事故工况9（VDS）：持续较高浓度释放

VDS事故情景：氚在15小时内持续排放，在监测的前5000秒过程中始终处于排放状态。如表5-13所示，前5000秒内CRAFT园区个人暴露有效剂量为6.05E-06 mSv，能源研究院为3.41E-06 mSv，科学岛建筑群内部为1.91E-06 mSv，董铺水库水面上方为2.23E-06 mSv。同样，所有监测点的剂量值均远低于GB 6249-2025规定的公众年有效剂量限值（0.25 mSv/a）。

图5-31展示了VDS事故后5000秒内，NNW风向下不同监测点处的氚浓度及个人暴露剂量变化。与HVAC事故不同，VDS事故中氚为持续排放，因此剂量分布呈现出随距离增加而衰减的整体趋势：CRAFT园区因距离排放口最近，所受剂量最高；能源研究院次之；董铺水库水面上方与科学岛建筑群内部的暴露剂量水平相当。

由于氚的持续释放，科学岛建筑群内部在监测时段内始终存在一定程度的氚滞留现象，导致其剂量水平较HVAC事故情景明显升高。值得注意的是，至5000秒时，四处监测点的氚浓度均已趋于稳定，约在10^2 Bq/m³水平，相应的个人剂量稳定在10^{-10} mSv量级，表明在模拟时段内系统已接近动态平衡状态。尽管如此，所有监测点的剂量值仍远低于国家规定的公众年有效剂量限值。

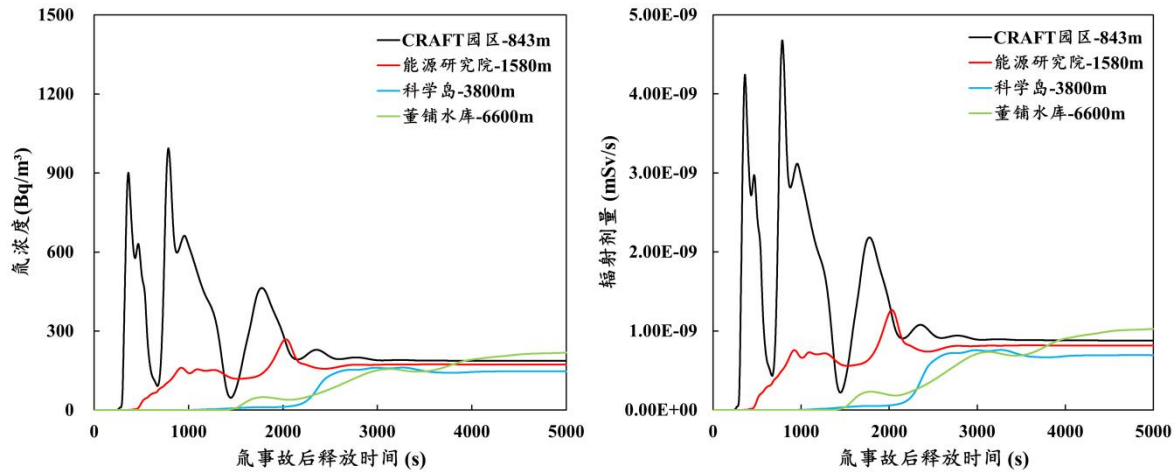


图5-31 VDS事故后5000秒内NNW下风向距离烟囱不同位置氚浓度及个人暴露剂量

在VDS事故情景下，氚以持续低浓度的方式释放，总释放时长为15小时。为便于对长期暴露剂量进行工程化评估，同时保证结果偏于安全，基于图5-31所示的结果，保守假设在事故发生后5000秒至15小时结束的时间区间内，各监测点处的个人瞬时暴露剂量已达到稳定状态，并保持在5000秒时刻的剂量水平不变。通过在此假设基础上对时间积分，得到各关键区域在15小时内的个人有效剂量，详见表5-18。

从计算结果来看，CRAFT园区的15小时有效暴露剂量为4.92E-05 mSv，能源研究院为4.33E-05 mSv，科学岛为3.59E-05 mSv，董铺水库为5.27E-05 mSv。上述剂量值均显著低于GB 6249-2025规定的公众年有效剂量限值（0.25 mSv/a），说明在VDS事故工况下，即便采用保守假设，氚释放对周边重要区域造成的辐射影响仍然很小，环境安全可得到保障。

表 5-18 事故工况9 (VDS)在NNW下风向主要人群有效暴露剂量

	5000秒时刻的瞬时剂量 (mSv/s)	**15小时内有效暴露剂量 (mSv)**
CRAFT园区	8.80E-10 mSv	4.92E-05 mSv
能源研究院	8.15E-10 mSv	4.33E-05 mSv
科学岛	6.93E-10 mSv	3.59E-05 mSv
董铺水库	1.03E-09 mSv	5.27E-05 mSv

综上所述，在两种典型事故情景下，监测点处计算得到的最大个人剂量均远低于国家规定的公众年有效剂量限值（0.25 mSv/a）。这表明，即使在极端瞬时或持续释放条件下，该设施对周边公众造成的辐射风险仍处于极低水平，具备良好的安全裕度。

5.2.3 事故防范措施

事故防范措施主要包括：

⑴涉氚主工艺系统采用三级包容，工艺设备、管路及阀门的选择上选用市面上成熟的产品，且对于高氚系统的设计提升质保等级，防止阀门等连接处受损；

⑵根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中“6.4 辐射工作场所分区”规定，对辐射工作场所分区，并制定严格的分区进入措施；

⑶设置良好的通排风；

⑷设置氚浓度在线监测装置及报警系统；

⑸为了确保系统可靠性，除氚系统关键部件均为一用一备，当出现故障时可立即切换气路以保证系统迅速恢复正常；

⑹安装过程中，对系统密封性进行检测，保证法兰连接有效性；对焊点进行检测，保证焊点质量。

⑺加强人员培训和管理。

事故处理措施主要包括：

当氚监测单元检测到次级包容或涉氚房间内气氛氚浓度异常上升，当出现异常氚泄漏时，向自动控制单元（ACS）发出报警，以通知对应系统将房间和相应空间进行快速封闭，防止含氚气氛的外排，气氛除氚单元启动，对封闭的房间和空间进行除氚处理。

5.3 非放射性环境影响分析

5.3.1 施工期环境影响分析

本工程的施工期内容主要包括：场地平整、桩基工程、实验楼建设、实验及设备安装等几部分。施工过程中排放的污染物会对周围的大气环境、水环境、声环境等产生一定的污染影响。

5.3.1.1 施工期大气环境影响分析和污染防治对策

施工期大气环境影响分析

土建工程阶段，大气污染物主要有施工机械与驱动设备及施工车辆所排放的废气，土方工程、建筑材料装卸、车辆扬尘及施工垃圾堆放和清运过程中产生的扬尘，其中又以粉尘危害较为显著。

⑴废气

施工过程中废气主要来源于施工机械驱动设备（如柴油机等）和运输车辆及施工车辆所排放的废气，此外还有施工队伍因生活使用燃料而排放的废气等。

⑵粉尘和扬尘

本项目在建设过程中，粉尘污染主要来源于：

①土方的挖掘、堆放、清运、土方回填和场地平整等过程产生的粉尘；

②建筑材料如白灰、砂子等在其装卸、运输、堆放等过程中，因风力作用而产生的扬尘污染；

③推土机、翻斗机、混凝土搅拌机往来作业及机械运输车辆运输过程中造成地面扬尘；

④施工垃圾在其堆放和清运过程中将会产生扬尘。

上述施工过程中产生的废气、粉尘及扬尘将会造成周围大气环境污染，其中又以粉尘的危害较为显著。

粉尘污染主要决定因素有：施工作业方式，原材料的堆放形式和风力大小等，其中受风力因素影响最大。一般来说，静态起尘主要与堆放材料粒径及其表面含水率、地面粗糙程度和地面风速等关系密切；动态起尘与材料料径、环境风速、装卸高度、装卸强度等多种因素相关，其中受风力因素影响最大。根据北京市环境保护科研所等单位在市政施工现场的实测资料，在一般气象条件下，平均风速为2.5m/s 时，建筑工地内TSP 浓度为其上风向对照点的2～2.5 倍，建筑施工扬尘的影响范围在其下风向可达 150m，影响范围内TSP 浓度平均值可达 0.49mg/m^3（相当于空气质量标准的 1.6 倍）。当有围栏时，在同等条件下，其影响距离可缩短40%（即缩短60m）。当风速大于5m/s 时，施工现场及其下风向部分区域TSP 浓度将超过空气质量标准中的二级标准，而且随着风速的增大，施工扬尘产生的污染程度和超标范围也将随着增强和扩大。本项目周围大气扩散条件较好，在一定程度上减轻了粉尘对大气的污染程度。

施工期大气环境污染防治对策

在本平台项目施工期间，为减轻其对环境空气的影响，缩小污染影响范围，必须采取合理可行的控制措施，其主要措施有：

（1）施工现场应实行封闭施工，施工工地周围应设置不低于1.8米的围栏或屏障，以缩小施工扬尘扩散范围。

（2）建筑物的四周应加设防护网，既起到防尘的作用，又能起到安全防护的作用。

（3）合理安排施工现场，谨防运输车辆装载过满，不得超出车厢板高度，并采取遮盖、密闭措施减少沿途抛撒、散落，及时扫清散落在路上的泥土和建筑材料，车辆出入施工现场应冲洗轮胎，不得将泥沙带出现场，并指定专人对附近的运输道路定期喷水，使其保持一定的湿度，防止道路扬尘。

（4）对施工现场实行合理化管理，使砂石统一堆放，少量水泥应设专门库房存放，尽量减少搬运环节。

（5）开挖的土方及建筑垃圾及时进行利用，以防因长期堆放表面干燥而起尘，对作业面、建筑垃圾等堆放场地定期洒水，使其保持一定的湿度，以减少扬尘量。

（6）合理安排工期，尽可能地加快施工速度，减少施工时间。

（7）当出现风速大于5级或不利天气状况时应停止易造成扬尘的施工作业，并对堆放的砂石等建筑材料进行遮盖。

（8）水泥浇铸作业，应采用商品混凝土，以减少水泥搅拌时扬尘的产生。确需进行现场搅拌砂浆、混凝土时应尽量做到不洒不漏、不剩、不倒，混凝土搅拌应设置在棚内，搅拌时要有喷雾降尘措施。

（9）建筑工地的路面应当实施硬化，工地出入口外侧10米范围内用混凝土、沥青等硬化，出口处硬化路面不小于出口宽度。

（10）建设单位在工程概算中应包括用于施工过程的环保专项资金，施工单位要保证此专项资金专款专用。

（11）建设单位在施工时应严格执行《安徽省大气污染防治行动计划实施方案》（皖政【2013】89号）、《安徽省建筑工程施工扬尘污染防治规定》（建质【2014】28号）、《安徽省大气污染防治条例》（2015年01月31日安徽省第十二届人民代表大会第四次会议通过）、《安徽省建筑工程施工和预拌混凝土生产扬尘污染防治标准

（试行）》（皖环发【2019】17 号）和《防治城市扬尘污染技术规范》（HJ/T393-2007）中的相应施工要求。

5.3.1.2 施工期废水环境影响分析和污染防治对策

施工期废水环境影响分析

施工现场用水主要由以下四个方面构成：混凝土浇筑、养护用水，占总用水量的90%；环保喷洒水；施工机械设备冲洗水；施工人员生活用水。

施工期中废水主要来自施工生产废水和生活污水。

⑴施工生产废水：包括砂石冲洗水、混凝土养护水、设备车辆冲洗水等。这些废水中主要含泥沙和SS，浓度约600mg/L 左右，另含有少量油污，基本无其他有机污染物。

⑵生活废水：由施工人员生活活动造成，包括食堂用水、洗涤废水和冲厕水等，废水中含有一定量的有机质、细菌和病原体，施工期人数按100 人计，人均排水量按50L/人·d 计，则废水量产生量为 5.0t/d 左右，废水中主要污染物 COD 浓度约300mg/L、SS 浓度约300mg/L；污染物产生量COD：1.2kg/d、SS：1.2kg/d。

以上废水若不妥善处理会对工地周围水环境及施工人员的身体健康产生一定的影响。

施工期废水污染防治对策

（1）在排污不健全的情况下，尽量减少物料流失、散落和溢流现象，以减少废水产生量。

（2）施工现场所有施工废水因泥沙含量较大，施工现场必须建造集水池、砂池、沉淀池、排水沟等水处理构筑物，对废水进行必要的分类处理，并尽可能地将沉淀处理后的中水回用于施工现场洒水降尘，多余部分接管入市政污水管网，严禁排放。

（3）施工场地应设有污水收集和简易处理设施，将施工人员生活污水收集后经化粪池预处理后接管入市政污水管网。

5.3.1.3 施工期噪声影响分析及对策措施

施工期噪声影响分析

建筑施工一般分为三个阶段：土方阶段、结构阶段和装修阶段。不同阶段采用不同施工机械，对环境所造成的噪声和振动的影响也不同。对环境所造成的影响主要是土石方阶段的推土机和挖掘机、结构阶段的混凝土搅拌机和振捣棒，装修阶段短时间使用高噪声设备，以及物料装卸碰撞噪声和施工人员的活动噪声。

根据《环境噪声与振动控制工程技术导则》（HJ 2034-2013）并类比相关资料，本工程主要施工设备振动值见表 5-19。常规建筑施工机械及其噪声级见表 5-20。

表 5-19 主要施工设备振动值 单位：dB(A)

施工机械设备名称	距振源距离	
	5m	10m
振动夯锤	92~100	86~94
风镐	88~92	83~87
挖掘机	82~90	78~86
推土机	83~88	80~85
压路机	80~90	76~86
钻孔一灌浆机	70~75	68~73
砼搅拌机	85~90	82~84

表 5-20 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

施工阶段	声源	噪声级dB(A)
	木工电刨	90-95
	云石机	100-105
	混凝土搅拌机	100
	磨光机	100-110

施工机械的单体噪声级一般均在80dB(A)以上，且各施工阶段均有大量设备交互作业，这些设备在场地内的位置，同时使用率有较大变化，因此很难计算其确切的施工场界噪声。根据本工程施工量，结合上面两表，估算其各施工阶段的昼夜噪声级，见表 5-21。

表 5-21 各施工阶段的昼、夜噪声级估算值 单位：dB(A)

施工阶段	主要噪声源	场界噪声估算值		噪声限值	
		昼间	夜间	昼间	夜间
土方阶段	推土机、挖土机、运输车辆等	75~85	75~85	70	55
结构阶段	混凝土搅拌机、振捣器、电锯等	70~85	65~80	70	55
装修阶段	吊车、升降机、电锤、木工电刨等	60~70	60~70	70	55

由此可见，建设项目施工期间场界噪声一般不能满足《建筑施工厂界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）所规定的施工厂界噪声限值，昼间一般超标 15dB(A)左右，夜间一般超标20～30dB(A)，影响范围约周界120m 距离内。

由于本工程施工机械产生的噪声主要属中低频噪声，因此在预测其影响时可只考虑其扩散衰减，预测模型可选用：

$$L_2=L_1-20\lg r_2/r_1 \quad (r_2>r_1)$$

式中：L_1、L_2 分别为距声源r_1、r_2 处的等效A 声级（dB(A)）；

r_1、r_2 为接受点距源的距离（m）。

由上式可推出噪声随距离增加而衰减的量ΔL；

$$\Delta L=L_1-L_2=20\lg r_2/r_1$$

由此式可计算出噪声值随距离衰减的情况，结果见下表。

表 5-22 噪声值随距离的衰减关系

距离（m）	1	10	50	100	150	200	250	400	600
ΔLdB(A)	0	20	34	40	43	46	48	52	57

若按表 5-22 所列噪声最高的重型卡车计算，施工噪声随距离衰减后的情况见表5-23。

表 5-23 施工噪声随距离的衰减值 （dB(A)）

距离（m）	10	50	100	150	200	250	300	400	500	600
噪声值	82	68	62	59	56	54	53	50	47	45

由计算结果可知，白天施工机械超标在150米范围内，也即在距离施工工地150米范围内的受体将受到施工噪声较明显的影响。本项目200m范围内无声环境保护目标，项目施工期间必须做好噪声消减、防护措施，施工期噪声排放控制应该满足《建筑施工噪声排放标准》（GB12523-2025）要求。

施工期噪声污染防治对策

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，为了减轻施工噪声对周围声环境的影响，建议采取以下控制措施：

（1）施工单位加强施工管理，合理安排施工作业时间，严格按照施工噪声管理的有关规定执行。夜间22:00～次日6:00，禁止施工作业，若确需连续浇注，必须经生态环境部门同意，并以安民告示的方式张贴公告，在中考和高考期间，无论何种情况，夜间一律不许施工。

（2）对产生噪声的施工机械要合理布局并采取降噪措施，应尽可能放置于对场界外造成影响最小的地点。运输车辆尽量选择从场地的东侧出入，高噪施工设备尽量往场地中部布设，尽量远离南侧布设。

（3）尽量压缩施工区汽车数量和行车密度，控制汽车鸣笛。应合理安排运输时段，以减少扰民事件的发生。

（4）施工单位应处理好与施工场界周围居民的关系，避免因噪声污染引发纠纷，影响社会稳定。

（5）施工机械产生的噪声往往具有突发、无规则、不连续和高强度等特点，施工单位应采取合理安排施工机械操作时间的方法加以缓解，并减少同时作业的高噪施工机械数量，尽可能减轻声源叠加影响。

（6）在施工过程中，施工单位应严格执行《建筑施工场界噪声排放标准》（GB12523-2011）中的有关规定，避免施工扰民事件的发生。

（7）要求业主单位在施工现场标明投诉电话，一旦接到投诉，业主单位应及时与当地环保部门取得联系，以便及时处理环境纠纷。

5.3.1.4 施工期固体废物影响分析及对策措施

施工期固体废物影响分析

施工垃圾主要来自施工所产生的建筑垃圾和施工队伍生活产生的生活垃圾。在施工期间进行的土地开挖、道路修筑、管道敷设、材料运输、地基基础、房屋建筑等工程均会产生一定数量的废弃物，如砂石、石灰、混凝土、木材、废砖、土石方等。建设期间必然要有一定的施工人员工作和生活在施工现场，其日常生活将产生一定数量的生活垃圾。建筑垃圾按2kg/m^2计算，项目建筑面积为43781m^2，建筑垃圾总量约为87.56t。生活垃圾以0.5kg/（人·天）计，生活垃圾产生量为50kg/d。

施工中的建筑垃圾若长期堆放，在气候干燥时易产生扬尘；下雨时又易造成冲刷、淋溶，导致水环境污染。施工中生活垃圾如不及时清运处理，则会腐烂变质、滋生蚊虫苍蝇，产生恶臭，传染疾病，从而对周围环境和作业人员的健康带来不利影响。

固体废弃物污染防治对策

为降低和消除上述固体废物对环境的影响，首先应对施工过程中产生的碎石、碎砖等碎建筑材料及场地挖掘产生的土方应尽快利用以减少堆存时间，若在不能确保其全部利用时，需对不能利用部分及时清运出场并按渣土有关管理要求进行处置，以免因长期堆积而产生二次污染；其次现场搅拌砂浆、混凝土时应按用量进行配料，尽量做到不洒、不漏、不剩、不倒；生活垃圾应集中收集，及时清运出场。

5.3.1.5 施工期水土流失影响及对策措施

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，因此土壤流失强度不大。工程可能造成的水土流失主要是厂房及基础设施地基的开挖、管道铺设时开挖造成的。本工程不造成大量的裸露的土壤开挖面，因此基本没有土壤裸露造成的水土流失。由于土石方堆放量本身就不大，因此由于冲刷造成的流失量是很小的。

水土流失的影响分析

（1）造成河水浑浊，影响水质

铺设管道时地面或道路开挖或其他项目中的弃土，如不及时运走或堆放时被覆不当，遇雨时（尤其是强风暴雨时），泥砂流失，通过地面径流或下水管道，也会进入河道，造成河水浑浊，影响水质。

（2）堵塞下水道

给水、污水管道铺设等作业进行时，弃土沿线堆放，如不及时运走或回填，遇雨时，就会随水冲入下水管道。泥沙在管道内沉积，使下水道过水面积减少，就会影响下水管道的输水能力，严重时会堵塞下水管道。

（3）产生扬尘，影响大气质量

回填土如不及时回填或被覆不当，遇雨会随地流淌，有一部分沉积在地面，遇晴天或大风时就会产生扬尘，影响城市大气质量。

（4）破坏景观

回填土如不及时回填，被雨冲散，凌乱分布有风时，造成漫天风沙，影响市容，破坏陆域景观；泥砂进入河道后，使河水能见度降低，也影响水域景观。

水土流失控制措施

（1）工程施工中要做好土石方平衡工作，开挖的土方应尽量作为施工场地平整回填之用。如果有弃土，应妥善处理；如有缺土，应采购宕渣砾料代替。

（2）工程施工应分期分区进行，以缩短单项工期。开挖裸露面要有防治措施，尽量缩短暴露时间，减少水土流失。

（3）借土的临时堆放场地中，若有相对比较集中的地方，其周边应挖好排水沟，避免雨季时的水土流失。堆土的边坡要小，尽量压实，使其少占地且不易被雨水冲刷造成流失。

综上所述，施工期产生的废气、粉尘、噪声、固体废物将会对环境产生一定影响，但不会影响到居民区。只要施工单位认真做好施工组织安排，并进行文明施工，通过采取适当环保措施后，可有效消除、降低工程土建施工期对环境的不利影响。

5.3.1.6 施工期环境管理

根据国家有关规定，建设项目环境管理应由专门机构负责，由业主单位、施工单位联合承担，安排专人负责施工中的环境管理工作。参与工程建设的专业施工单位应配置专业环保人员，要积极配合当地生态环境保护行政管理机构和专职负责人，做好施工中的环境保护工作。环境管理的主要任务如下：

（1）把握、贯彻国家及有关部门的环保方针、政策、法规、条例，落实污染防治规划，对工程施工过程中各项环保措施执行情况进行监督检查，制定施工区环境管理办法，指导、监督实施；

（2）做好施工期各种突发性污染事故的预防，准备好应急处置措施；

（3）组织实施施工期环境质量监测，定期编制施工区环境质量报告，报上级主管部门；虽然本项目对环境的影响程度和范围有限，施工期也要安排专门的环境监测计划。

（4）加强对施工人员的环保宣传教育，增强其环保意识；

（5）在施工后期，组织好施工区生态环境恢复和改善工作，如施工地恢复、绿化等；

（6）制定环境管理计划，并编写进度报告，提交上级主管部门。

综上所述，项目施工期间会对环境产生一定的影响，但只要施工单位做好施工组织设计，进行文明施工，把环境保护纳入承包合同中，制定环保规章制度，严格实施施工期环境监理，就可以把其影响控制在最小程度，而不至于产生明显不利的影响。

5.3.2 营运期环境影响分析

5.3.2.1 地表水环境影响预测及分析

⑴项目排水规划

项目建成运营后，厂内实行雨污分流的排水体制。

根据工程分析结果，拟建项目废水主要为循环冷却废水和生活污水，本项目废水产生量约为5050t/a，其中循环冷却废水产生量约为1000t/a，生活污水产生量约为4050/a。

厂区雨水通过市政雨水管网直接排放；项目循环冷却废水与生活污水一同接管入望塘污水处理厂处理，达标排放，尾水排入南淝河。望塘污水处理厂尾水排放执行《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》（DB34/2710-2016），其中未规定污染物指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级标准中A 标准限值要求。

（2）废水接管可行性分析

本项目废水产生情况详见表 5-24。

表 5-24 建设项目废水产生情况一览表

项目		废水量	pH	COD	BOD_5	SS	NH_3-N
循环冷却废水	产生浓度（mg/L）	/	6~9	50	30	80	/
	产生量（t/a）	1000	/	0.075	0.045	0.120	/
生活污水	产生浓度（mg/L）	/	6~9	300	150	180	25
	产生量（t/a）	4050	/	0.399	0.199	0.239	0.033
总排口	产生浓度（mg/L）	/	6~9	173	89	131	12
	产生量（t/a）	5050	/	0.474	0.244	0.359	0.033
望塘污水处理厂接管标准		/	6~9	320	180	220	30
是否达标		/	是	是	是	是	是

从表 5-6 可以看出：拟建项目废水中主要污染物COD、BOD_5、SS、NH_3-N 的厂内总排口排放浓度可以满足望塘污水处理厂的接管标准要求，项目废水经望塘污水处理厂处理后达标排放，尾水排入南淝河，对区域地表水环境影响较小。

①望塘污水处理厂简介

望塘污水处理厂位于合肥市清溪路中段南侧，南淝河上游，规划总规模20 万m^3/d，其中一期设计处理能力7.5 万m^3/d，二期设计处理能力12.5 万m^3/d，收水范围包括高新区、蜀山产业园、**三十岗乡**、大杨镇及长丰县岗集镇、汽配工业园等区域，服务面积约66 平方公里。望塘污水处理厂于 2018 年 12 月建成运行。二级处理采用 Carrousel 氧化沟工艺，三级深度处理采用反硝化生物滤池+微絮凝+过滤工艺，一期和二期出水全部达标排入南淝河。

望塘污水处理厂处理工艺详见图 5-24。

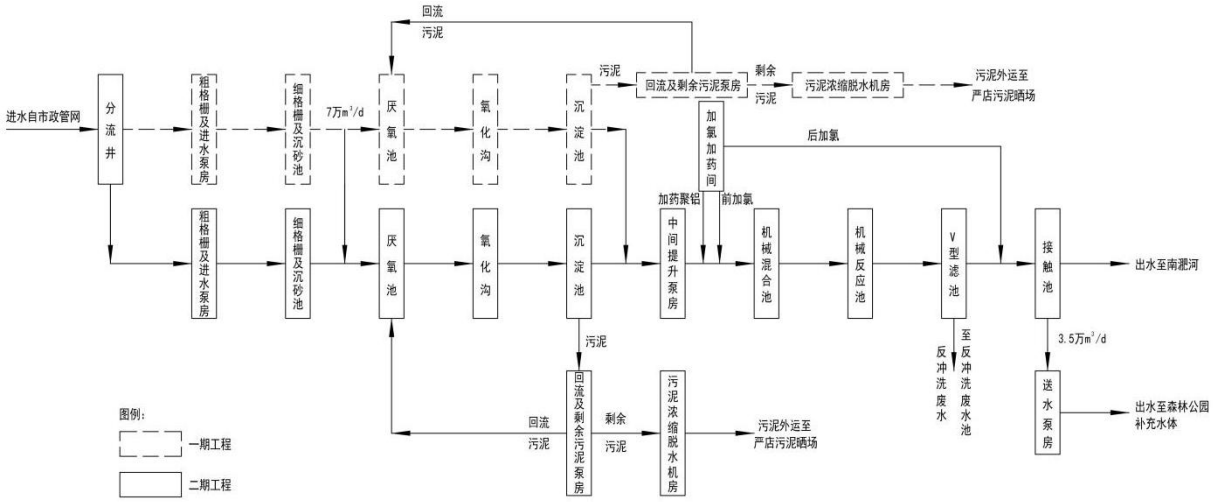


图 5-24 望塘污水处理厂处理工艺流程图

望塘污水处理厂工艺流程说明：

由市政污水管网收集的污水，其中16.5 万m^3/d 污水首先进入污水处理厂的粗格栅井内（一期7.5 万m^3/d，二期9.0 万m^3/d）经粗格栅去除较大的漂浮物后，进入提升泵站的吸水井提升至细格栅；3.5 万m^3/d 污水压力进水直接进入细格栅，细格栅进一步拦截和去除污水中细小悬浮物，再经过旋流沉砂池沉砂，分离并去除污水中砂粒。经预处理后的污水和回流污泥进入厌氧池，进行生物除磷并改善污水沉降性能。厌氧池出水后进入氧化沟的缺氧段，进行硝化反应和反硝化反应，使污染物得到降解。好氧池充分供氧，降解去除大部分有机污染物并将大部分氨氮转化成硝酸盐和亚硝酸盐。

在好氧段与缺氧段间设置内回流门，将硝化液回流至缺氧段实现反硝化。生化处理后的污水经配水井流入二沉池，进行固液分离。二沉池分离出来的上清液通过中间提升泵房提升至磁分离沉淀池，然后进入反硝化深床滤池（深度处理），进一步去除SS、TN、TP 以及COD。滤池出水一部分先进入接触池再进入紫外消毒渠及送水泵房，一部分直接进入紫外消毒渠及送水泵房，经次氯酸钠消毒后的污水达标排放，5万m^3/d 流入森林公园作为景观用水，15 万m^3/d 流入南淝河。二沉池产生的污泥经提升后送贮泥池，对湿污泥进行中转调节、调质调量，进入污泥浓缩脱水间，经离心脱水机脱水后进入污泥料仓，泵入污泥运输车，外运。

②接管范围可行性

望塘污水处理厂收水范围包括高新区、蜀山产业园、三十岗乡、大杨镇及长丰县岗集镇、汽配工业园等区域，服务面积约66 平方公里。

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，属于望塘污水处理厂纳管范围。扩宽改道新建谭岗路已经辐射了生活污水、雨水管网，预留了污雨水井，因此，从纳管可行性上分析，本项目废水可以接管入望塘污水处理厂处理。





图5-32　谭岗路及配套市政排水井

③接管水质可行性

望塘污水处理厂尾水排入南淝河，最终汇入巢湖，设计出水水质在达到《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》（DB34/2710-2016）（其中未规定污染物指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级标准中A 标准），具体进、出水水质见表 5-25。

表 5-25 望塘污水处理厂设计进出水水质一览表

名称	pH	COD	BOD_5	SS	NH_3-N
设计进水	6~9	320	180	220	30
设计出水	6~9	40	10	10	2

从水质上分析，项目废水中主要污染物COD、BOD_5、SS、NH_3-N 的厂内总排口排放浓度可以满足望塘污水处理厂的接管标准要求。

④接管水量可行性

本项目建成运行后本项目废水排放量约为16.83m^3/d。望塘污水处理厂处理能力为20 万m^3/d，本项目建成后外排水量约占其处理能力的0.01%，不会对其处理能力造成冲击，因在其设计考虑处理范围内，接管水量是可行的。

综上所述，从水质、水量和收水管网覆盖方面分析，本项目废水可以接管入望塘污水处理厂处理。

（3）废水污染物排放量核算

①废水类别、污染物及污染治理设施

项目废水类别、污染物及污染治理设施信息详见表 5-26。

表 5-26 废水类别、污染物及污染治理设施信息表

序号	废水类别	污染物种类	排放去向	排放规律	污染治理设施			排放口编号	排放口设置是否符合要求	排放口类型
					污染治理设施编号	污染治理设施名称	污染治理设施工艺			
1	循环冷却废水	COD、BOD_5、SS、氨氮	进入望塘污水处理厂	间断排放，排放期间流量不稳定，但不属于冲击型排放	/	/	/	DW001	是	总排口
2	生活污水	COD、BOD_5、SS、氨氮								

②废水排放口基本情况

建设项目废水间接排放口基本情况详见表 5-27。

表 5-27 建设项目废水间接排放口基本情况表

序号	排放口编号	排放口地理坐标		废水排放量（万t/a）	排放去向	排放规律	间歇排放时段	受纳污水处理厂信息		
		经度	纬度					名称	污染物种类	国家或地方污染物排放标准浓度限值（mg/L）
1	DW001	117°08'28.1870"	31°56'16.3445"	0.5050	城市污水处理厂	间断排放，排放期间流量不稳定，但不属于冲击型排放	0:00~24:00	望塘污水处理厂	pH	6~9
									COD	40
									BOD_5	10
									SS	10
									NH_3-N	2

建设项目废水污染物排放执行标准详见表 5-28。

表 5-28 建设项目废水污染物排放执行标准表

序号	排放口编号	污染物种类	国家或地方污染物排放标准及其他按规定商定的排放协议	
			名称	浓度限值（mg/L）
1	DW001	pH	望塘污水处理厂接管限值	6~9
		COD		320
		BOD_5		180
		SS		10
		NH_3-N		2

建设项目废水污染物排放信息详见表 5-29。

表 5-29 建设项目废水污染物排放信息表

序号	排放口编号	污染物种类	排放浓度（mg/L）	日排放量（t/d）	年排放量（t/a）
1	DW001	COD	238	0.00479	1.436
		BOD_5	120	0.00242	0.725
		SS	155	0.00312	0.936
		NH_3-N	19	0.00038	0.113

5.3.2.2 运营期声环境影响预测与评价

（1）评价范围

建设项目场界外200m 范围。

（2）本项目声源情况

本项目建成后，调查所有声源种类（包括设备型号）与数量、各声源的空间位置、声源的作用时间等，用类比测量法与引用已有的数据相结合确定声源声功率级。

本次噪声评价场界按整个场界计算，坐标原点设在A轴与1轴的交点，X 轴正向为向东方向，Y 轴正向为向北方向。本项目的噪声源情况见表 5-30 和表5-31。

表 5-30 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）			声功率级(dB(A))	声源控制措施	运行时段
			X	Y	Z			
1	1#冷却塔	NTG-900	26	180	4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
2	2#冷却塔	NTG-900	24	170	4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
3	1#循环水泵		26	185	-2.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
4	2#循环水泵		24	175	-2.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
5	1#外循环水泵		77	140	-4.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
6	2#外循环水泵		77	135	-4.5	85	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
7	3#外循环水泵		16	223	-4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00
8	4#外循环水泵		14	227	-4.5	90	消声筒、减震垫、降噪棚等	0：00~24：00

表 5-31 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			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)	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	包层楼	1#	氦风机1	/	90	减振、隔声门窗、墙体隔声等	24	56	1	26	62.1	0：00~24：00	20	59.5	1
2		2#	氦风机2		90		24	58	1	26	62.1	0：00~24：00			
3		3#	氦压缩机		85		24	60	1	26	59.5	0：00~24：00			
4		4#	增压泵		85		24	62	1	26	59.5	0：00~24：00			
5		5#	纳米均质机		85		26	60	1	26	59.5	0：00~24：00			
6		6#	离心烘干机		85		26	62	1	26	59.5	0：00~24：00			
7		7#	水泵	/	85		26	58	1	26	59.5	0：00~24：00			
8		8#	液压泵		85		24	54	1	26	59.5	0：00~24：00			
9		9#	抽气泵组		85		24	57	1	26	59.5	0：00~24：00			
10		10#	冲击试验机		85		22	60	1	26	59.5	0：00~24：00			
11		11#	喷雾造粒机		85		115	18	1	19	60.1	0：00~24：00			
12		12#	离心造粒机		85		120	18	1	19	60.1	0：00~24：00			
13		13#	热等静压机		85		130	20	1	19	60.1	0：00~24：00			
14		14#	冷水机组		85		106	65	6	19	60.1	0：00~24：00			
15		15#	热泵机组		85		110	70	6	19	60.1	0：00~24：00			
16		16#	风冷热泵1		85		110	73	6	19	60.1	0：00~24：00			
17		17#	风冷热泵2		85		107	73	6	19	60.1	0：00~24：00			
18		18#	冷冻水泵		85		105	73	6	19	60.1	0：00~24：00			
19		19#	热水泵1		85		105	70	6	19	60.1	0：00~24：00			
20	包层楼	20#	热水泵2		85	减振、隔声门窗、墙体隔声等	105	68	6	19	60.1	0：00~24：00	20	59.2	1
21		21#	热水泵3		85		105	65	6	19	60.1	0：00~24：00			
22		22#	空气压缩机		85		130	65	1	19	60.1	0：00~24：00			

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			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)	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
23		23#	氮气压缩机		85		130	62	1	19	60.1	0：00~24：00			
24		24#	除盐水水泵		85		130	60	1	19	60.1	0：00~24：00			
25		25#	风机1		90		100	64	1	19	62.1	0：00~24：00			
26		26#	风机2		90		100	60	1	19	62.1	0：00~24：00			
27		27#	风机3		90		100	55	1	19	62.1	0：00~24：00			
28		28#	风机4		90		100	50	1	19	62.1	0：00~24：00			
29	氚实验楼	1#	超碳压缩机		90	减振、隔声门窗、墙体隔声等	86	175	1	19	62.1	0：00~24：00	20	59.2	1
30		2#	锂铅机械泵		90		90	147	1	19	62.1	0：00~24：00			
31		3#	超导磁体		85		86	150	1	19	59.1	0：00~24：00			
32		4#	柴油发动机		90		97	120	1	19	59.1	0：00~24：00			
33		5#	冷水机组1		85		54	185	6	19	59.1	0：00~24：00			
34		6#	冷水机组2		85		54	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
35		7#	热泵机组		85		50	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
36		8#	风冷热泵1		85		56	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
37		9#	冷冻水泵2		85		52	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
38		10#	冷冻水泵		85		48	180	6	19	59.1	0：00~24：00			
39		11#	热水泵1		85		48	183	6	19	59.1	0：00~24：00			
40		12#	热水泵2		85		45	185	6	20	59.1	0：00~24：00			
41		13#	氚兼容泵		85		57	159	6	20	59.1	0：00~24：00			
42		14#	真空泵		85		60	150	6	20	59.1	0：00~24：00			
43		15#	氦压缩机		85		70	150	6	20	59.1	0：00~24：00			
44		16#	风机1		85		29	170	6	20	59.1	0：00~24：00			
45		17#	风机2		85		35	170	6	20	59.1	0：00~24：00			

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			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)	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
46		18#	风机3		85		40	170	6	20	59.1	0：00~24：00			
47		19#	风机4		85		22	130	6	20	59.1	0：00~24：00			
48		20#	风机5		85		22	135	6	20	59.1	0：00~24：00			
49		21#	风机6		85		22	139	6	20	59.1	0：00~24：00			

注：将总平面布置图中A轴与1轴交叉点设为（0，0）。

（3）预测模式

采用《环境影响评价技术导则—声环境》中的工业噪声预测模式。

①室内声源

计算某一室内声源靠近围护结构处产生的倍频带声压级或A 声级，具体如下：

$$L_{p1}=L_w+10\lg\left(\frac{Q}{4\pi r^2}+\frac{4}{R}\right)$$

式中：

L_{p1}——靠近开口处（或窗户）室内某倍频带的声压级或A 声级，dB；

Lw——点声源声功率级（A 计权或倍频带），dB；

Q——指向性因数；通常对无指向性声源，当声源放在房间中心时，Q=1；当放在一面墙的中心时，Q=2；当放在两面墙夹角处时，Q=4；当放在三面墙夹角处时，Q=8；

R——房间常数；$R=S$a/（a/1），S 为房间内表面面积，m^2；α 为平均吸声系数；

计算出所有室内声源在围护结构处产生的i 倍频带叠加声压级，具体按下式计算：

$$L_{p1i}(T)=10\lg\left(\sum_{j=1}^{N}10^{0.1L_{p1ij}}\right)$$

式中：

$L_{p1i}(T)$——靠近围护结构处室内N个声源i 倍频带的叠加声压级，dB；

L_{p1ij} ——室内j 声源i 倍频带的声压级，dB；

N——室内声源总数。

在室内近似为扩散声场时，按下式计算出靠近室外围护结构处的声压级。

$$L_{p2i}(T)=L_{p1i}(T)-(TL_i+6)$$

式中：

L_{p2i}（T） ——靠近围护结构处室外N个声源i 倍频带的叠加声压级，dB；

TL_i——围护结构i 倍频带的隔声量，dB。

将室外声源的声压级和透过面积换算成等效的室外声源，计算出中心位置位于透声面积（S）处的等效声源的倍频带声功率级，具体计算公式如下：

$$L_w=L_{p2}(T)+10\lg S$$

式中：

L_w——中心位置位于透声面积（S）处的等效声源的倍频带声功率级，dB；

L_{p2}（T）——靠近围护结构处室外声源的声压级，dB；

S——透声面积，m^2。

②室外声源

根据声源声功率级、户外声传播衰减，计算预测点的声级，具体计算公式如下：

L_p（r）=L_w+Dc-（A_{div}+A_{atm}+A_{gr}+A_{bar}+A_{misc}）

式中：

L_p（r）——预测点处声压级，dB；

Lw——由点声源产生的声功率级（A 计权或倍频带），dB；

Dc——指向性校正，它描述点声源的等效连续声压级与产生声功率级Lw 的全向点声源在规定方向的声级的偏差程度，dB；

A_{div}——几何发散引起的衰减，dB；

A_{atm}——大气吸收引起的衰减，dB；

A_{gr}——地面效应引起的衰减，dB；

A_{bar}——障碍物屏蔽引起的衰减，dB；

A_{misc}——其他多方面效应引起的衰减，dB。

衰减项的计算详见《环境影响评价技术导则 声环境》（HJ2.4-2021）附录A 中的“A.3 衰减项的计算”小节内容，此处不再赘述。

③预测点的A 声级计算

预测点的A 声级L_A（r）可按下式计算，具体如下：

$$L_A(r)=10\lg\left\{\sum_{i=1}^{8}10^{0.1\left[L_{pi}(r)-\Delta L_i\right]}\right\}$$

L_{pi}（r）——预测点（r）处，第i 倍频带声压级，dB；

$\triangle L_i$——第i 倍频带的A 计权网络修正值，dB。

④预测点贡献值计算

设第i个室外声源在预测点产生的A声级为L_{Ai}，在r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r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：

$$L_{eqg}=10\lg\left[\frac{1}{T}\left(\sum_{i=1}^{N}t_i10^{0.1L_{Ai}}+\sum_{j=1}^{M}t_j10^{0.1L_{Aj}}\right)\right]$$

式中：

L_{eqg}——建设项目声源在预测点产生的噪声贡献值，dB；

T——用于计算等效声级的时间，s；

N——室外声源个数；

t_i——在T时间内i声源工作时间，s；

M——等效室外声源个数；

t_j——在T时间内j声源工作时间，s。

（4）场界噪声环境影响预测及评价

本项目各场界预测结果见表5-32，建设项目噪声预测等值线图见下图。

表5-32 场界噪声环境影响贡献值预测结果 单位：dB(A)

位置	贡献值	背景值	预测值	标准值	达标情况
北侧场界	37.6	/	/	昼间：55 夜间：45	达标
东侧场界	37.7	/	/		达标
南侧场界	39.8	/	/	昼间：70 夜间：55	达标
西侧场界	44.9	/	/		达标

从上表可知，本项目运营后，场区内各种设备所产生的噪声在采取相应措施后，厂界昼、夜噪声贡献值较小，经预测，北侧及东侧场界噪声贡献值能达到《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）1类区标准；南侧及西侧场界噪声贡献值能达到《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）4类区标准要求。

（5）声环境保护目标预测及评价

表5-33 声环境保护目标预测结果一览表 单位：dB（A）

预测点	区间	现状值	贡献值	预测值	标准值	达标情况
CRAFT园区南区	昼间	50	35	50.14	55	达标
CRAFT园区南区	夜间	33	35	37.12	45	达标

由上表预测结果可知，本项目运营后，声环境保护目标—CRAFT园区南区—可以满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）中1类标准值要求。

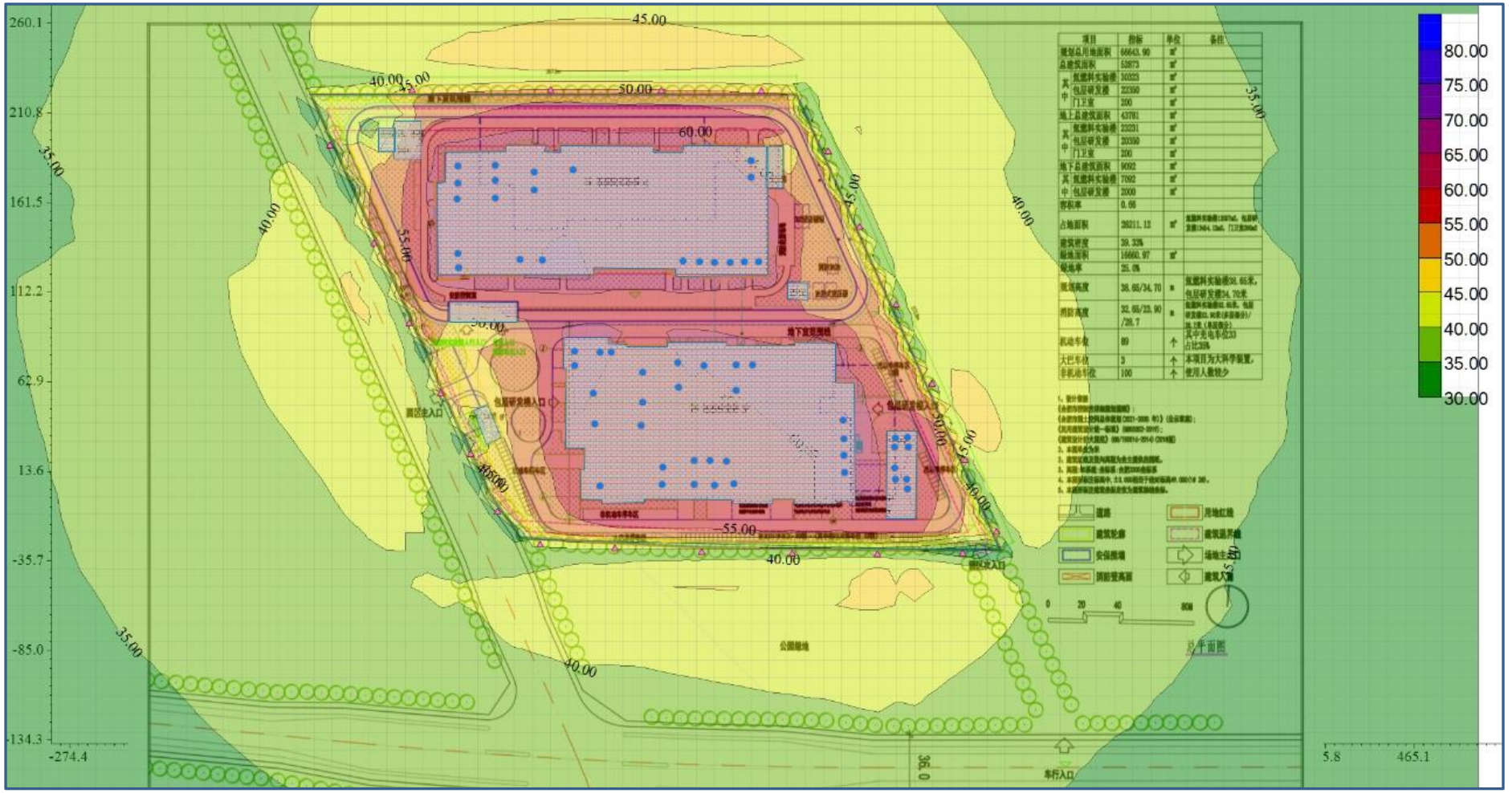


图 5-33 建设项目噪声预测等值线

5.3.2.3 运营期固体废物环境影响分析

（1）危险废物贮存场所环境影响分析

环评要求建设单位应建立严格的危险废物管理制度，应设专人管理。在厂区西北侧建设一座20m^{2}的危废贮存点，用于暂存项目产生的危险废物，定期交由有危废资质的单位处置。

危废贮存点建设和管理要求

①贮存设施或贮存分区内地面、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采用坚固的材料建造，表面无裂缝。贮存设施地面与裙脚应采取表面防渗措施；表面防渗材料应与所接触的物料或污染物相容，可采用抗渗混凝土、高密度聚乙烯膜、钠基膨润土防水毯或其他防渗性能等效的材料。贮存的危险废物直接接触地面的，还应进行基础防渗，防渗层为至少1m厚黏土层（渗透系数不大于10^{-7}cm/s），或至少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危险废物应堆放于封闭的危险废物贮存点内，采取必要的防风、防晒、防雨、防漏、防渗、防腐以及其他环境污染防治措施。

③贮存点内不同贮存分区之间应采取隔离措施。隔离措施可根据危险废物特性采用过道、隔板或隔墙等方式。

④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）；应设计渗滤液收集设施，收集设施容积应满足渗滤液的收集要求。

⑤应定期检查危险废物的贮存状况，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，保证堆存危险废物的防雨、防风、防扬尘等设施功能完好。

⑥贮存设施运行期间，应按国家有关标准和规定建立危险废物管理台账并保存。贮存设施所有者或运营者应建立贮存设施环境管理制度、管理人员岗位职责制度、设施运行操作制度、人员岗位培训制度等。贮存设施所有者或运营者应建立贮存设施全部档案，包括设计、施工、验收、运行、监测和环境应急等，应按国家有关档案管理的法律法规进行整理和归档。

根据《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2023）等文件规定，环评对本工程中危险废物的收集、运输、转移及储存等提出以下要求：

收集

①危险废物要根据其成分，用符合国家标准的专门密闭容器分类收集。危险废物的收集应根据危险废物产生的工艺特征、排放周期、危险废物特性、废物管理计划等因素制定收集计划。

②危废的收集过程中应制定详细的操作规程，危险废物收集和转运作业人员应根据工作需要配备必要的个人防护装备。

③采取相应包括防爆、防火、防中毒、防感染、防泄漏、防飞扬、防雨或其他防止污染环境的措施。

④危废收集时应根据危险废物的种类、数量、危险特性、物理形态、运输要求等因素确定包装形式，包装材质要与危险废物相容，性质不相容的危险废物不应混合包装。

⑤危险废物的收集作业时，应按照根据收集设备、转运车辆以及现场人员等实际情况确定相应作业区域，同时要设置作业界限标志和警示牌。作业区域内应设置危险废物收集专用通道和人员避险通道。收集时应配备必要的收集工具和包装物，以及必要的应急监测设备及应急装备，同时进行记录存档。收集结束后应清理和恢复收集作业区域，确保作业区域环境整洁安全。

暂存

①危废收集由厂内专人负责，危废必须装入符合标准的容器内。禁止将不相容（相互反应）的危险废物在同一容器内混装。无法装入常用容器的危险废物可用防漏胶带等盛装。

②装载危废的容器内必须留有适当的空间，以适应因温度变化等可能引发的收缩和膨胀，防止其导致容器渗漏或永久变形。

③贮存设施或场所、容器和包装物应按 HJ 1276 要求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。

④危险废物贮存前应进行检验，确保同预定接收的危险废物一致，并登记注册。

⑤不得接收未粘贴上述规定的标签或标签填写不规范的危险废物。

⑥盛装在容器内的同类危险废物可以堆叠存放。

⑦每个堆间应留有搬运通道。

⑧做好危险废物情况的记录，记录上须注明危险废物的名称、来源、数量、特性和包装容器的类别、入库日期、存放库位、废物出库日期及接收单位名称；危险废物的记录和货单在危险废物回取后应继续保留三年。贮存点应及时清运贮存的危险废物，实时贮存量不应超过3吨。

⑨必须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，应及时采取措施清理更换。

⑩贮存设施产生的废气（含无组织废气）的排放应符合GB16297和GB37822规定的要求。贮存设施产生的恶臭气体的排放应符合GB14554规定的要求。

转移

①转移危险废物的，应当通过国家危险废物信息管理系统（以下简称信息系统）填写、运行危险废物电子转移联单，并依照国家有关规定公开危险废物转移相关污染环境防治信息。

②危险废物转移联单应当根据危险废物管理计划中填报的危险废物转移等备案信息填写、运行。

③危险废物电子转移联单数据应当在信息系统中至少保存十年。因特殊原因无法运行危险废物电子转移联单的，可以先使用纸质转移联单，并于转移活动完成后十个工作日内在信息系统中补录电子转移联单。

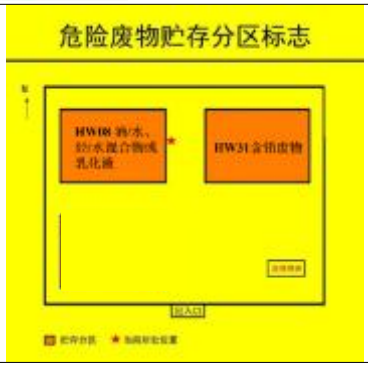
处置

项目所产生的危险废物在危险废物贮存库暂存后（实时贮存量不应超过3吨），定期交由有资质单位合理处置。

⑹管理及台账建设单位按照国家有关规定制定危险废物管理计划；建立危险废物管理台账，如实记录有关信息，并通过国家危险废物信息管理系统向所在地生态环境主管部门申报危险废物的种类、产生量、流向、贮存、处置等有关资料。

⑺标识标牌

表5-34 危险废物标识要求

场合	样式	要求
粘贴于危险废物储存容器或包装物上		1、危险废物标签尺寸颜色： 尺寸：根据容器或包装物的容积，按照HJ1276-2022表1危险废物标签的尺寸要求设置 颜色：背景为醒目的橘黄色，标签边框和字体颜色为黑色； 字体：黑体字，“危险废物”字样应加粗放大
		2、危险特性：按危险废物种类选择，危险特性警示图形如左图所示
室内危险废物贮存分区标志（粘贴、悬挂或柱式）		尺寸：根据对应的观察距离，按照HJ1276-2022表2危险废物贮存分区标志的尺寸要求设置 颜色：背景为黄色，废物种类信息采用醒目的橘黄色，字体为黑色； 字体：黑体字，“危险废物贮存分区标志”字样应加粗放大
室外/室内危险废物贮存设施标志（横版或竖版）（附着式或柱式）		尺寸：根据其设置位置和对应的观察距离，按照HJ1276-2022表3要求设置 颜色：背景颜色为黄色，字体和边框颜色为黑色 字体：黑体字，危险废物设施类型的字样应加粗加大并居中显示

（2）危险废物运输过程环境影响分析

建设项目危险废物全部委托有资质单位处置，厂外运输均由有资质单位负责，运输环节主要关注厂内收集的运输环节。

厂内转运时，危险废物产生后放入专门盛装危险废物的容器或防漏胶袋中，由带有防漏托盘的车辆转运至危废贮存点，转运过程中由于人为操作失误造成的容器倒翻、胶袋破损等情况时，泄漏的危险废物大部分会进入托盘中，极少情况下会出现托盘满溢泄漏情况。由于本项目危险废物产生点距离厂内危废贮存点较近，因此项目建设单位在加强管理的情况下，厂内转运过程中出现散落、泄漏概率很小，不会产生二次污染。

（3）危险废物委托处置环境影响分析

本项目产生的危险废物包括 HW08 、HW11、HW17、HW49 四大类，产生量较小。安徽省生态环境厅于 2026 年 01 月 12 日在安徽省生态环境厅官网（https://sthjt.ah.gov.cn/ztzl/hbztzl/wxfwjyxkxxhz/123248971.html）公布了《安徽省危险废物经营许可证汇总表（更新至2026年1月3日）》。该表中公布了安徽省内危废处置单位的名称、地点、联系方式、证书编号及有效期、危废类别等信息。建设单位可根据自身的危废类别同时考虑距离项目地距离等情况，从中选取相应的危废处置单位，定期地将本项目的危废交由有资质单位进行安全处置。

综上所述，建设项目危险废物可以定期交由有资质单位处置，本项目危险废物委托处置可行。

（4）生活垃圾处置环境影响分析

建设项目厂内职工日常生活产生的生活垃圾，将委托当地的环卫部门统一清运处理。

综上所述，本项目建成运行后，产生的各种固体废物均可以根据各种固废不同的属性，进行相应的处理，从而实现固废的资源化和无害化处理。项目产生的固废不外排，不会对区域环境造成不利影响。

5.3.3 生态环境影响分析

5.3.3.1 生态环境影响调查与分析

⑴生态功能区调查

根据《安徽省生态功能区划》，安徽省地处北亚热带与南温带过渡地带，地形地貌分异明显，其宏观生态系统类型、主要生态过程及人类活动影响具有空间分异特点。生态功能区划过程中，首先按地貌、水热组合等自然条件划分出5 大生态区，即沿淮淮北平原生态区、江淮丘陵岗地生态区、皖西大别山生态区、沿长江平原生态区和皖南山地丘陵生态区。在明确生态大区的基础上，进一步细划为16 个生态亚区，47个生态功能区。

根据《安徽省生态功能区划》，本工程所在区域属于II丘陵岗地生态区—II4 巢湖盆地农业与城镇生态亚区—II4-3合肥城市及城郊农业生态功能区。

该生态功能区位于本生态亚区北部，主要包括合肥市区及肥西县东北部和肥东县的西南地区，面积1233.0km^2。本区气候属亚热带湿润季风气候湿润温暖，雨水较为充沛，阳光充足，四季分明，年平均降水量1000mm，年蒸发量 1500mm，年平均气温15.0℃，年照时数2150 小时，全年无霜期在235 天左右。本区地貌以丘岗和平原相间为特征，岗冲交错。土壤类型以游育水稻土为主，岗地上分布有黄褐土，部分地区有漂洗水稻土分布。农业耕作制度为一年两熟制，农作物以水稻、油菜、蔬菜类为主。

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，项目占地现状为规划平整的科研用地，现状地块表面已无植被。经调查，距离本项目最近的生态保护红线为东侧的王小河，属于董铺水库饮用水水源二级水域保护区，距离本项目场界约为259m，王小河与北侧滁河干渠相接处设有闸口，主要功能是作为董铺水库的清水通道，在必要时将闸口打开，将滁河干渠中的水引入董铺水库。本项目距离南侧的安徽庐阳董铺国家湿地公园约1862m。

⑵安徽庐阳董铺国家湿地公园

安徽庐阳董铺国家湿地公园（以下简称“国家湿地公园”或“湿地公园”)规划区域包括南测河、董铺水库及其水源一、二级保护区范围。西起南漉河支流汇合口，东至董铺水库大坝，北起三国城路，南达水库水源一级保护区南界（其中三国新城遗址公园

和科学岛及北部进岛公路，不包括在范围内）涉及庐阳区大杨镇和三十岗乡，地理坐标东经117°05’48”~117°12’22”，北纬31°51’40”~31’55’33”，湿地公园东西长10.5千米，南北宽度7.5千米。规划总面积4667.43公顷，其中湿地面积2949.79公顷，湿地率63.20%。其主体董铺水库是合肥市一座以城市防洪为主，结合城市供水郊区农业灌溉等综合利用的大型水库，是合肥市饮用水源地。为了加强水源地保护和湿地建设，2012 年8月庐阳区启动水源涵养地村庄搬迁计划，将位于董铺水库一、二级水源保护区内的村庄陆续搬迁，修复生态湿地。2014 年12 月，安徽省林业厅批准建立安徽庐阳三国新城省级湿地公园。2015年成立合肥市庐阳区三国新城湿地管理委员会，负责湿地公园的管理与建设工作随后开展了滨水环境治理工程、初期雨水调蓄池工程、水土涵养林工程、入库河道整治工程、湿地修复与建设工程、隔离防护工程、水质监测信息采集工程、管理维护工程等。

随着生态移民工程和省级湿地公园建设的开展，湿地公园周边环境有了进一步的改善。2016 年，申报国家级湿地公园，并更名为“安徽庐阳董铺国家湿地公园”，成立合肥市庐阳董铺湿地公园管理处，完成了湿地公园总体规划。本项目距离南侧的安徽庐阳董铺国家湿地公园约为1862m。

湿地资源：

安徽庐阳董铺国家湿地公园湿地资源丰富，类型多样。根据《全国湿地资源调查技术规程《试行）》的分类系统，湿地公园内的湿地可划分为河流湿地、人工湿地两大湿地类和永久性河流湿地、洪泛平原湿地、库塘湿地三个湿地型，湿地类型丰富。

①河流湿地

河流湿地主要包括永久性河流和洪泛平原湿地两个湿地型。

1）永久性河流（常年有河水径流的河流，仅包括河床部分）：主要指入董铺水库各河流，包括南溯河、东瞿河、汪堰水库支流、王小河等。

2）洪泛平原湿地（在丰水季节由洪水泛滥的河滩、河心洲、河谷、季节性泛滥的草地以及保持了常年或季节性被水浸润内陆三角洲所组成）：主要指支流河道两侧的滩涂。在谢岗河、王小河、东瞿河接近董铺水库段均有存在。

②人工湿地

人工湿地主要是库塘湿地，即董铺水库和各类池塘。董铺水库为该湿地类型的主要部分，池塘主要分布于毗邻董铺水库周边的低洼处或紧邻入库河流两侧。

安徽庐阳董铺国家湿地公园内湿地总面积2949.79 公顷，湿地率63.2%。各类型湿地所占面积及比例见下表。

表 5-35 安徽庐阳董铺国家湿地公园湿地类型统计表

代码	湿地类	代码	湿地型	面积（公顷）	占湿地总面积百分比（%）	占公园总面积百分比（%）
II	河流湿地	II1	永久性河流湿地	49.37	1.67	1.06
		II3	洪泛平原湿地	196.03	6.65	4.20
V	人工湿地	V1	库塘湿地	2704.39	91.68	57.94
湿地总面积计				2949.79	100	63.20

植被现状：

安徽庐阳董铺国家湿地公园地处江淮分水岭南侧，属长江水系，以丘陵岗地为主。因长期的农业利用，区内生物资源相对贫乏。经调查，湿地公园有高等植物共86科、241 属、331 种，其中类植物4 科4 属4 种、裸子植物4 科6 属6 种、被子植物78 科231 属 321 种。其中，莎草科（Cyperaceae）、禾本科（Gramineae）、菊科（Compositae）、豆科（Leguminosae）、蓼科（Polygonaceae）、参科（Scrophulariaceae）、大戟科（Euphorbiaceae）蔷薇科（Rosaceae）以及科（Amaranthaceae）等种类较多。湿地公园内有国家II 级保护野生植物1 种，为野大豆（Glycine soia）。安徽庐阳董铺国家湿地公园内从水体至陆地由于水分生态因子的显著差异性，形成了从水生植被、沼泽植被到陆生植被的水平群落结构。因局部生境条件的差异造成湿地公园内的植物群落类型非常丰富，共有64 个群丛，其中陆生植被包括8 个群丛、沼泽植被包括39 个群丛、水生植被包括 17 个群丛。不同类型植物群落呈斑块状的镶嵌分布，且各类型植物群落间边界明显。各植物群落优势种明显，多为单优群落或双优群落，少数为三优群落，如半边莲+狗牙根+江南苦菜群丛（Lobelia chinensis+Cynodondactylon+Eleocharis migoana Association）、长芒+牛鞭草+豆茶决明群丛（Echinochloa caudata +Hemarthria altissima+Cassia nomame Association）等。

动物现状：

安徽庐阳董铺湿地公园内浮游动物主要为轮虫类（Rotifera）、枝角类（Cladocera）、桡足类（Copepoda）三个大类的32 属46 种，其中轮虫有17 属30种、枝角类有9 属 10 种、足类有6 属6 种，另外还观察到较多无节幼体。在所调查的浮游动物中梳足类的剑水蚤科（Cyclopidae）、枝角类秀体量属（Diaphanosoma）的长肢秀体（D.leuchtenbergianum）以及轮虫类的单趾轮属（Monostyla）、晶囊轮属（Asplanchna）的前节晶囊轮虫（A.priodonta）、轮虫属（Rotaria）的懒轮虫（Rmacroceros）、列足轮属（Schizocerca）的裂足轮虫（S.diversicomis）等个体较多，为该区域水体中的优势种。底栖软体动物包括 7 科 10 属 11 种，分别为铜锈环棱螺（Bellamvaaeruginosa）、梨形环棱螺（Bellamya purificata）、中华圆田螺（Cipangopaludinacahayensis）、椭圆萝卜螺（RadixswinhoeiRadix swinhoei）、河顿（Corbiculidafluminea）、凸旋螺（Gyraulus convexiusculus）、方格短沟（Semisulcospiracancellata）、背角无齿（Anodonta woodiana woodiana）、三角帆（Hyriopsiscumingii）、圆顶珠（Unio douglasiae）和淡水壳菜（Limnopernalacustris），其中铜锈环棱螺为该区优势种。除上述底栖软体动物外，水生底栖昆虫闪蓝丽大蜻（Epophthalmiaelegans）也广泛地分布于沉积物中。

湿地公园内高等动物以鱼类和鸟类较多，其中鱼类5 目9 科27 属31 种两栖类动物1 目4 科9 种，爬行类动物2 目3 科7 种，鸟类14 目31 科87 种，哺乳动物3 目5科 10 种。其中国家II 级保护动物有2 种，分别是小天鹅和虎纹蛙。

1）鱼类：安徽庐阳董铺湿地公园生活的鱼类共5 目9 科27 属31 种，大部分为常见的广布型种类。在31 种鱼类中以鲤形目鲤科（Cyprinidae）的种类最多共18 属22种，占全部种类的近 71%；其他科的鱼类中除银鱼科（Salangidae）2 属2 种外，多为1 属 1 种。在各种鱼类中，除放养的青（Mylopharyngodonpiceus）、草（Ctenopharyngodon idellus）、鲢（Hypophthalmichthys molitrix）、鳙（Aristichthys nobilis）四大家鱼数量较多外，常见的野杂鱼类主要为鲤科的鲫鱼（Carassiusauratus）、鲹䱗（Hemiculter leucisculus）和鲤鱼（Cyprinuscarpio）等。

2）两栖类：庐阳董铺湿地公园内的两栖动物种类较少。两栖纲动物有1 目4 属9种均为无尾目，其中虎纹蛙（Rana rugulosa）为国家二级保护动物，金线蛙

（Ranaplancyi）是中国广泛分布的特有物种，黑斑蛙（Rananigromaculata）北方狭口蛙（Kaloula borealis）被列为国家“三有”保护动物。

3）爬行类：爬行动物种类较少，共有2 目3 科7 种。其中有鳞目2 科6 种、龟鳖目1 种，其中中华鳖（Tionyx sinensis）被世界自然保护联盟红色名录列为易危（VU）等级。由于长期的人类干扰，尤其是长期的农业耕作，目前爬行动物在此区域的种群数量较低，根据对当地村民的调查，火赤炼 （Dinodonrufozonatum）的数量在有鳞目中的数量相对较多，而乌梢蛇（Zoacysdhumnades）则数量很少。

此外，中华鳖和中华草龟（Chinemys reevesii）的数量也较少。在整个区域内列为安徽省II 级重点保护的爬行动物有乌梢蛇、中国水蛇（Enhvdrischinensis）等。

4）鸟类：庐阳董铺湿地公园共记录到鸟类14 目31 科 87 种，其中古北界鸟类45 种（占51.7%）、东洋种 25 种（占28.7%）、广布种 17 种（占 19.5%），留鸟33 种（占37.9%），夏候鸟 19 种（占21.8%）、冬候鸟21 种（占24.1%），旅鸟 14种（占16.1%）。该区域鸟类在种类数量、保护级别等方面相对较低其中小天鹅（Cygnus columbianus）为国家II 级重点保护动物，安徽省地方重点保护鸟类25 种如普通鸬鹚（Phalacrocorax carbo）、大白鹭（Egretta alba）、小白鹭（Egrettagarzetta）、苍鹭（Ardea cinerea）、池鹭（Ardeola bacchus）、牛背鹭（Bubulcusibis）、绿翅鸭（Anas crecca）、凤头麦鸡（Vanellus vanellus）、灰头麦鸡（Vanellus cinreus）等。目前，由于该区域实施了水源地保护工程，人为干扰已经大大降低，为鸟类的栖息提供了较好的生存环境。

5）哺乳类：根据调查及走访结果，湿地公园范围内哺乳动物种类较少，共有3 目5 科10 种。主要为啮齿目种类共2 科6 种，其次为食肉目1 科2 种，兔形目1 科1 种和食虫目1 科1 种。齿目包括鼠科（Muridae）的黑线姬鼠（ApodemusagrariusPallas）、褐家鼠（Rattus norvegicus）、黄胸鼠（Rattusflavipectus）、小家鼠（Mus musculus）以及仓鼠科（Circetidae）的黑线仓鼠（CricetulusBarabensis）、大仓鼠（Cricetulus triton Winton），上述种类均为害兽但也是维系本区生态系统平衡重要环节；食肉目种类包括鼬科（Mustelidae）的黄鼬（Mustela sibirica）、狗獾（Melesmeles） 2 种，其中黄鼬被列入《世界自然保护联盟》（IUCN）：2008 年濒危物种红色名录属低危（LC）等级；食虫目为猬科（Erinaceidae）的刺猬（Heterothemic）；兔形目为兔科

（Leporidae）的草兔（Lepus capensis），草兔被列入《世界自然保护联盟》（IUCN）：2008 年哺L 纲兔科红色名录，属低危（LC）。

土地利用现状：

湿地公园总面积4667.43 公顷，其中林地面积为1509.00 公顷，占湿地公园土地总面积的32.32%；公共管理与公共服务用地面积为136.12 公顷，占湿地公园土地总面积的2.92%；交通运输用地面积为2.30 公顷，占湿地公园土地总面积的0.06%；水域及水利设施用地面积为2949.79 公顷，占湿地公园土地总面积的63.20%；其他土地面积70.22 公顷，占湿地公园土地总面积的1.50%。

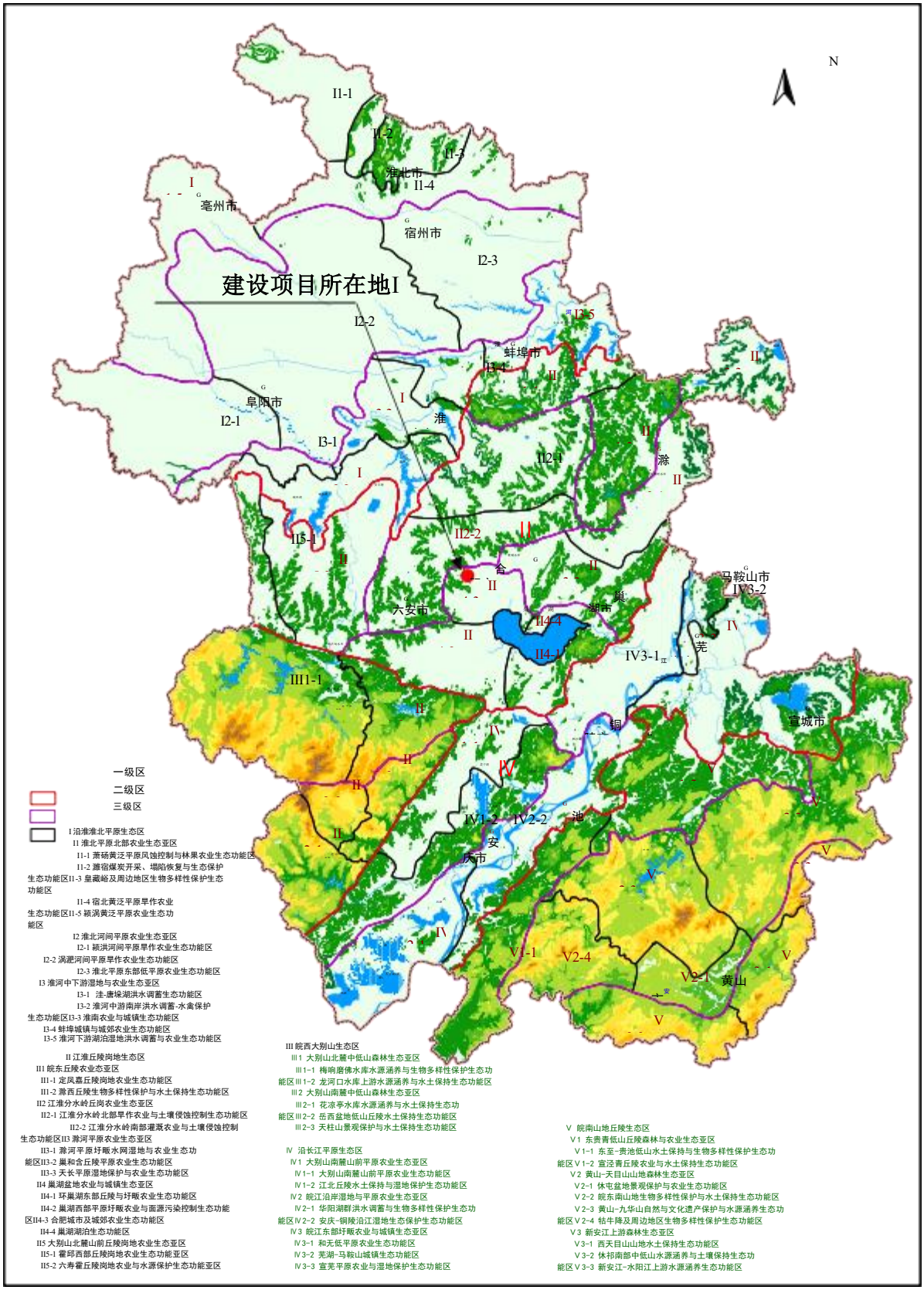


图 5-34 安徽生态功能区划图

5.3.3.2 生态环境影响分析

⑴施工期生态环境影响分析

①施工期对植被的影响分析

根据现场勘查，本项目占地主要为科研用地，占地范围内已基本无植被的存在，工程施工基本不会导致植被生物量的减少。项目主体工程完工后，会对场区进行绿化，可以增加部分植被生物量。

因此，本项目施工期不会对区域生态系统物种的丰度和生态功能产生显著影响。

②施工期对动物的影响分析

由于人类活动频繁，评价区域内野生动物的原始生境也不存在，动物已很难见到。工程永久占地缩小了部分野生动物的栖息空间，影响了部分陆生动物的活动区域、觅食范围，从而对动物的生存产生一定的影响。施工机械噪声对动物有一定的干扰，由于区域有许多动物的替代生境，动物很容易找到新的类似栖息场所。工程施工对野生动物的影响范围和影响时间较短，因此不会对区内野生动物造成大的影响。同时随着施工的结束，植被逐渐恢复，部分种类可回到原处。因此，总体而言影响较小。

③施工期对生态红线及安徽庐阳董铺国家湿地公园影响分析

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，距离本项目最近的生态红线为王小河（董铺水库饮用水水源二级水域保护区），南侧的安徽庐阳董铺国家湿地公园距离本项目场地边界最近距离为1862m。本项目施工活动均在项目占地范围内进行，施工活动不占用生态红线和安徽庐阳董铺国家湿地公园。施工期产生的施工生产废水经场地内设置的沉淀池等装置处理后尽可能的回用于施工场地洒水降尘等，多余部分与施工人员产生的生活污水一同接管入市政污水管网进望塘污水处理厂处理，施工废水和施工人员生活污水均不外排，项目与王小河及安徽庐阳董铺国家湿地公园之间无水力联系，不会对其产生影响。本项目南侧1862m 处再继续往南为安徽庐阳董铺国家湿地公园的合理利用区和宣教展示区，不涉及其湿地保育区，施工噪声不会对保育区内的动物生境产生影响。

综上所述，本项目施工期不会对周边生态红线及安徽庐阳董铺国家湿地公园产生影响。

⑵运营期生态环境影响分析

本项目占地为科研用地，属于董铺水库饮用水水源准保护区，经现场调查，项目占地范围内已规划平整为科研用地，受长期人类活动影响，已无原生植被分布；评价区域野生动物的种类较少。区域生物多样性及其自身调控能力较差，受人为影响较大。随着工程建设的完成，除部分地段被永久性占用外，部分地段植被可通过绿化措施得到恢复。厂区绿化对区域生态环境带来一定有利影响。

绿化在防止污染、保护和改善环境方面，起着特殊的作用。它不仅可美化环境，而且还具有净化空气、减弱噪声等功能，因此必须搞好厂区及厂界周围环境的绿化。本项目运营后地面硬化、厂区及周边绿化工作均已完成，水土流失将得到良好的控制。加强厂区内的绿化，将用地范围内的剩余土地作为绿化用地，裸露的地面应尽快植树种草，进行植物覆盖，防止表土侵蚀；采取乔、灌、草相间的绿化方案。

综上所述，项目经采取以上措施后，本项目运营期对区域的生态环境影响较小。

①运营期对生态红线及安徽庐阳董铺国家湿地公园影响分析

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，不占用生态保护红线和安徽庐阳董铺国家湿地公园，距离项目最近的生态保护红线为东侧的王小河，属于董铺水库饮用水水源二级水域保护区，距离本项目场界约为259m，王小河与北侧滁河干渠相接处设有闸口，主要功能是作为董铺水库的清水通道，在必要时将闸口打开，将滁河干渠中的水引入董铺水库。建设项目所在区域雨水均经市政雨水管网收集后排入王小河，最终汇入董铺水库。本项目距离南侧的安徽庐阳董铺国家湿地公园约为1862m，且其为安徽庐阳董铺国家湿地公园的合理利用区和宣教展示区，不涉及其湿地保育区。

本项目主要从事聚变堆材料与氚燃料关键技术的科研活动。经预测，本项目运营期噪声可以满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）1 类区标准要求，运营期噪声不会对保育区内的动物生境产生影响。

项目运行期无一般空气污染废气产生，废水主要为循环冷却废水和职工生活污水，经市政污水管网进望塘污水处理厂处理，达标排放，尾水排入南淝河。本项目与王小河及安徽庐阳董铺国家湿地公园之间无水力联系，不会对其产生影响。

综上所述，本项目运营期不会对生态红线及安徽庐阳董铺国家湿地公园产生影响。

第六章 辐射安全管理

6.1 机构与人员

6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构及职责

根据《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》，使用射线装置、放射源、非密封放射性物质的单位应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。

中国科学院合肥物质科学研究院自2006年起开展核技术应用以来，便申领了辐射安全许可证，编号为国环辐证[00147]；配备了辐射安全与环保负责人；成立了辐射安全管理委员会作为辐射安全工作的最高管理机构，主要成员为院所两级单位负责人、辐射业务分管领导、安全分管领导以及各相关部门负责人等。

辐射安全管理委员会的主要职责是对以下事宜进行调查、协调、审议、建议和决策：

（1）辐射安全管理工作基本方针的制定；

（2）辐射安全规程的修订；

（3）向上级审管部门申请、汇报或提交相关资料；

（4）在异常或事故情况下，采取紧急措施和进行事故调查；

（5）其他辐射安全相关重大事项。

在辐射安全管理委员会领导下，设置了专门的辐射安全管理部门（安全保密处）负责全院运行期间的安全和防护工作的统一监督管理，其主要职责是：

（1）贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，建立辐射安全规章制度；

（2）辐射安全系统的运行和维护，辐射安全措施的落实；

（3）辐射监测与评价；

（4）放射性废物的监测处理；

（5）放射性废物的辐射安全管理；

（6）辐射工作人员的健康管理；

（7）辐射安全教育和培训；

（8）参与辐射事故应急处置，以及其他与辐射安全相关的工作。

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

（1）认真学习辐射安全相关知识，积极参加主管部门组织的培训；

（2）对本部门工作人员进行放射性防护知识和法规的宣传教育；

（3）协助制订和督促执行本部门的安全操作规程和防护措施；

（4）负责收发本部门人员防护用品和个人剂量计；

（5）规定的其他工作。

6.1.2 辐射工作人员管理

本项目拟对辐射工作人员进行必要的防护知识培训和应急演练，并定期进行个人剂量监测、尿氚监测和放射性职业健康体检，建立个人剂量和体检档案。此外，定期组织开展遥操作、穿着气密服维护操作、表面去污操作和应急辐射监测实践训练，提升操作人员的技能熟练度，以便减少操作时间、降低出错发生的概率，从而减少人员受照剂量，保护环境辐射安全。

本项目拟制定辐射工作人员培训和考核计划，承诺新上岗及调入人员，在上岗前参加生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，考核合格者方可从事辐射工作，以后每五年接受一次再考核。现有辐射工作人员在现有培训合格证书过期前参与考核，不再考核的人员或者考核不合格的人员，不得从事辐射工作。定期安排有资质单位对辐射工作人员进行职业健康体检，并建立健康体检档案。

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发〔2015〕40 号）的规定：

“（二）使用半衰期大于 60 天的放射性同位素且场所等级达到甲级的单位，辐射安全关键岗位两个，分别为辐射防护负责人、辐射环境监测与评价专职人员，每岗最少在岗人数 1 名；（三）生产、使用放射性药物且场所等级达到甲级的单位，非医疗使用 I类源单位，销售（含建造）、使用 I类射线装置单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，最少在岗人数 1 名。同一单位从事以上多种类型工作时，岗位设置和最少在岗人数以其中要求高的为准。”

本项目拟配备 2 名注册核安全工程师作为项目辐射防护负责人、辐射环境监测与评价专职人员。

6.2 辐射安全管理规章制度

为了加强放射性同位素和射线装置的安全和防护管理，根据《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》《放射性废物安全管理条例》等，并结合实际，中国科学院合肥物质院建立了各项安全管理体系和管理制度，其中主要辐射安全和防护制度如下表所示：

表6-1　合肥物质院主要辐射安全管理制度

序号	名称	文号	颁发日期
1	《中国科学院合肥物质科学研究院辐射安全管理规定》	科合院发安字〔2016〕4号	2016.7.18
2	《中国科学院合肥物质科学研究院放射性废物安全管理规定》	科合院发安字〔2019〕2号	2019.2.22
3	《合肥研究院辐射岗位工作人员培训管理规定》	科合院发安字〔2019〕5号	2019.6.21
4	《合肥研究院放射源库房安全管理规定》和《合肥研究院放射源库房事故应急处置方案》	安字〔2021〕24号	2021.12.22
5	《中国科学院合肥物质科学研究院生产安全事故综合应急预案》	科合院发安字〔2025〕5号	2025.9.29

另外，各使用部门根据实际情况，还建立了各实验室辐射安全管理制度和应急处置方案以及各项操作规程。合肥物质院安全保密处根据各项制度规定，每月定期对放射源库和探伤机房进行安全检查，每季度对射线装置进行检查，在重大节日/重大活动前进行辐射安全与防护专项检查，EAST 装置每轮实验前进行联锁装置检查，确保制度贯彻落实。

本项目拟结合所使用放射性核素特性、气载污染物、液态流出物等情况，完善现有一系列辐射安全管理规章制度，内容涵盖辐射安全和防护管理的组织机构、场所的安全与防护措施、设备操作规程、设备检修维护、辐射安全联锁系统旁路管理、放射性同位素和射线装置使用管理、放射性废物的管理、辐射工作人员安全与防护管理、辐射监测、辐射事故应急预案等内容，确保本项目运行过程中的辐射安全。

6.3 辐射监测

本项目辐射监测总体包括个人剂量监测、工作场所监测和环境监测。

6.3.1 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测包括常规监测、任务相关监测和特殊监测。

（1）常规监测

本项目和涉氚操作工作人员主要进行 X/γ 射线和内照射监测；装置维护检修工作人员需要进行 X/γ 射线和内照射监测。内照射监测主要包括尿氚浓度及尿液总放射性活度检测。辐射工作人员在进入控制区工作时正确佩戴剂量计，应避免剂量计单独遗留在控制区受照。

个人剂量计每季度（每三个月）由辐射安全保障人员进行轮换，委托有检测资质的单位进行检测，并安排专人进行存档保管。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

（2）任务相关监测

任务相关监测是为特定操作提供有关操作和管理方面的即时决策而进行的个人监测。本项目辐射工作人员在进入控制区内部时应佩戴个人剂量报警仪，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够实施剂量预警。

（3）特殊监测

特殊监测是为了说明某一特定问题，而在一个有限期内进行的个人监测。本项目在进行辐射事故处理时，应对事故应急处理人员进行特殊监测。

（4）监测档案管理及职业健康体检管理

本项目拟安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。个人剂量档案应终生保存。

此外，定期组织对本项目辐射工作人员进行健康体检，两次体检的时间间隔不超过2 年。建立个人健康档案，档案中详细记录历次体检报告结果及其评价处理意见，并妥善长期保存。

6.3.2 辐射工作场所监测

本项目工作场所监测方案详见3.2.3.5、3.2.7.1小节。

6.3.3 辐射环境监测

本项目辐射环境监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，监测数据记录存档，具体环境监测计划列于表 6-2。

表 6-2 本项目环境监测计划

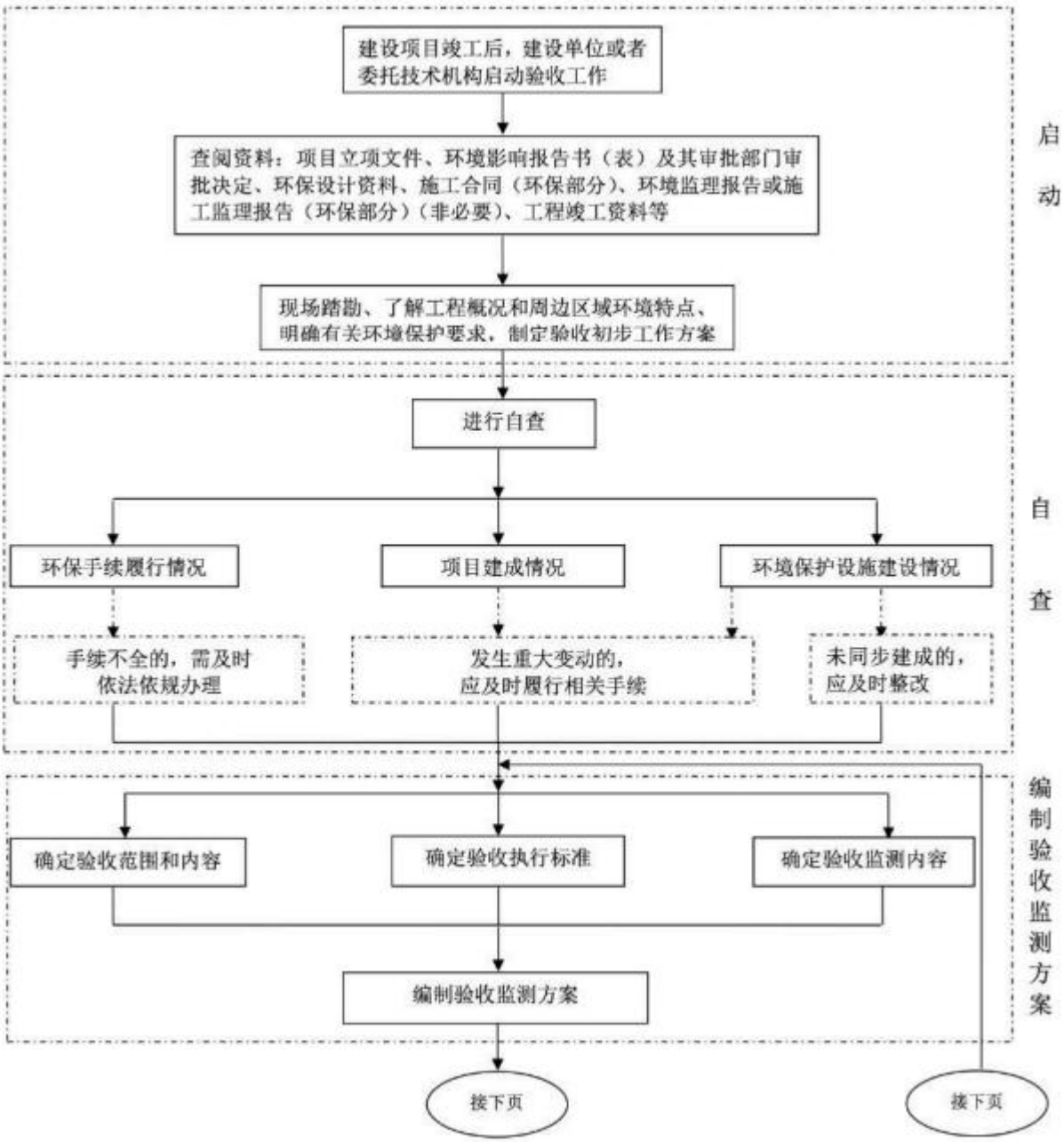
监测类别	监测内容	监测项目	监测方式	监测点位	监测频次
自行监测	外照射	γ 辐射剂量率	固定式仪表监测	拟建场址内外环境敏感点处	实时
			便携式仪表监测	拟建场址内外环境敏感点处	1 次/周
	固体废物外表面	γ 辐射剂量率	便携式仪表监测	放射性固体废物暂存区域	收集及送贮时
	空气	^{3}H 活度浓度	固定式仪表监测	拟建场址内外环境敏感点	实时
	地下水与地表水	^{3}H活度浓度、总β活度浓度	取样分析	地下水监测井、附近地表水	1 次/月
	表面污染	^{3}H、β表面比活度	便携式仪表监测、擦拭法监测	涉氚实验场所及临近区域	每日工作结束
	气态流出物	^{3}H 活度浓度	在线监测	烟囱	实时
			离线取样		根据需要
	液态流出物	^{3}H 活度浓度、总β活度浓度	取样分析	洗涤水暂存罐	每次排放前
委托监测	外照射	γ 辐射剂量率	便携式仪表巡测	同自行监测点位	1 次/年
	土壤	^{3}H、总β活度浓度	取样分析	拟建场址东、南、西、北四侧的土壤	1 次/年
	空气	^{3}H 活度浓度	取样分析	烟囱排风口	1 次/年
	地表水与地下水	^{3}H、总β活度浓度	取样分析	附近地表水、地下水监测井	1 次/年

6.3.4 竣工环保验收监测

为有效落实环境保护“三同时”要求，确保环保设施的有效性，根据《建设项目环境保护管理条例》《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》等法规的要求，本项目竣

工后，建设单位应自主开展竣工环保验收工作，对本项目相关环境保护设施的建设、调试、管理及其效果和污染物排放情况开展查验和监测工作，编制验收监测报告。

参照HJ-1326-2023《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》，本项目竣工环保设施验收的工作流程如图 6-1 所示。总体来说，竣工环保设施验收工作主要包括验收自查、验收监测工作和后续工作，其中验收监测工作可分为验收监测、验收监测报告编制两个阶段；后续工作包括提出验收意见、编制“其他需要说明的事项”、形成验收报告、公开相关信息并建立档案四个阶段。



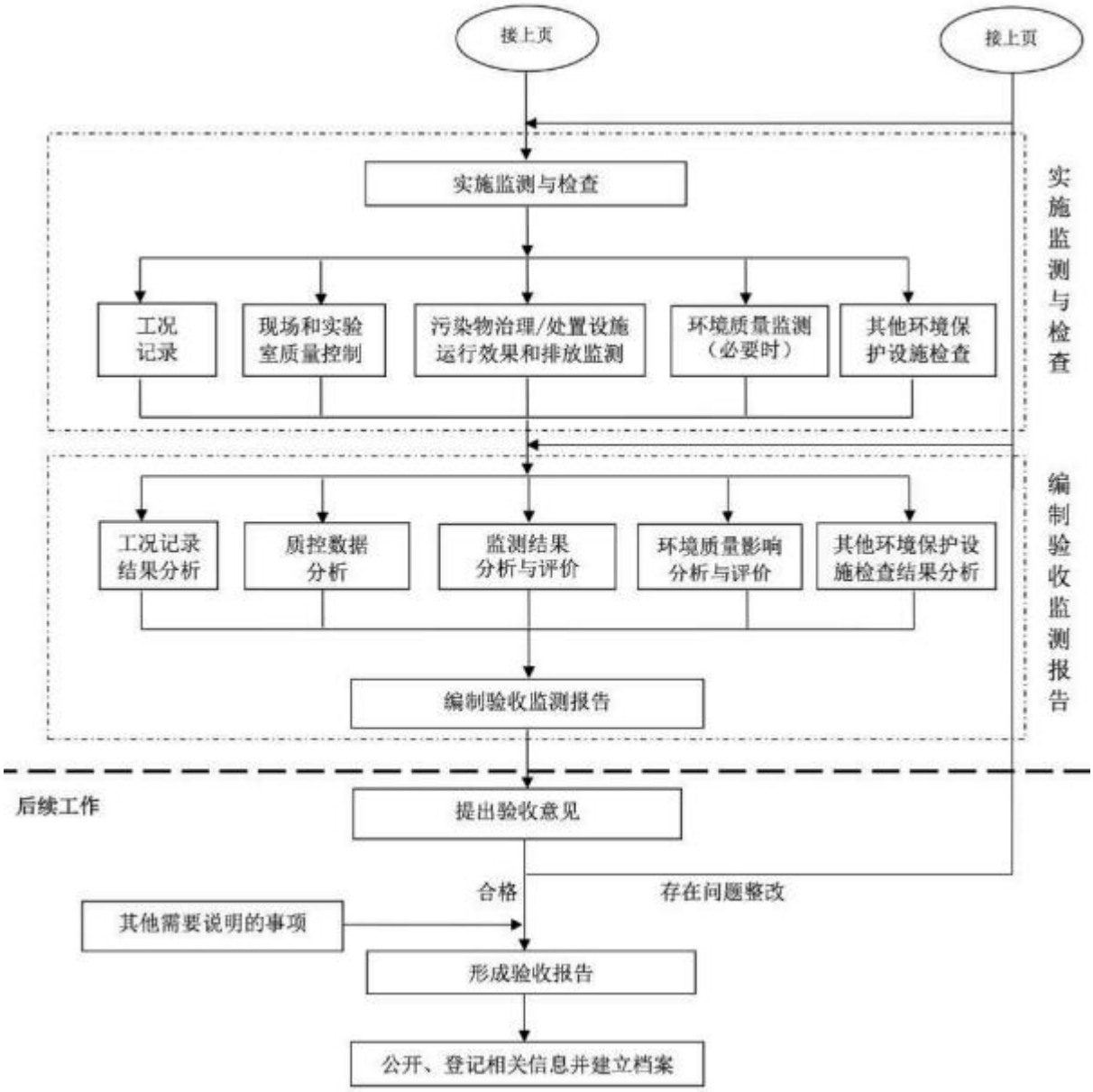


图 6-1 竣工环保验收工作流程

6.4 辐射事故应急

依据《中华人民共和国突发事件应对法》《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》《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等相关法律法规，合肥物质院制定了《中国科学院合肥物质科学研究院生产安全事故综合应急预案》（科合院发安字〔2025〕5 号)，《辐射事故应急预案》作为专项应急预案予以单列，该专项预案内容涵盖辐射事故风险分析、应急指挥机构及职责、处置程序、应急保障、预案的修订与实施、应急联系方式、应急物资清单等，一旦发生辐射事故能快速响应，采取有效措施保护辐射工作人员、公众的健康和安全，

基本满足该院辐射事故应急需求。

2025年度合肥物质院共组织了 4 次辐射事故应急演练，具体如下：

⑴2025 年 9 月 16 日放射源库事故应急演练

地点设置在等离子体所放射源存源库房、源库大院和值班室内，参与此次应急培训人员有所内的辐射工作人员、注册核安全工程师，以及安全保密处人员。应急演练采用了 137Cs伽马射线源、252Cf 中子源丢失在户外，演练人员操作中子、伽马剂量率巡测仪，现场进行监测与寻找放射源，并将放射源转运回储源罐内。

⑵2025 年 9 月 28 日，开展探伤机房辐射事故应急演练

⑶2025 年 9 月 19 日，核能安全所南岗中子基地应急事故演练

⑷2025 年 6 月 10 日，智能所静电加速器应急事故演练

通过演练发现预案完整度较高，涵盖了应急救援机构、应急物资储备、人员组织和职责分工等方面的内容，为应急处置提供了基础保障。

中国科学院合肥物质研究院自开展核技术利用项目以来未发生过辐射安全事故。

6.5 从事辐射工作能力评价

6.5.1 辐射安全与环境保护管理

建设单位已设置有辐射安全管理委员会作为辐射安全工作的最高管理机构，在辐射安全管理委员会领导下设置了专门的辐射安全管理部门拟负责本项目运行期间的安全和防护工作的统一监督管理。本项目运行后，为保障项目工作人员与公众的健康和安全，保护项目所在区域周围环境，结合项目辐射安全与防护工作的实际情况，建设单位将完善有关辐射安全管理制度，建立健全项目辐射安全与环境保护管理机构，将本项目的辐射安全与环保管理完全纳入单位已有辐射安全与环境保护管理体系。

由上可知，项目辐射安全与环境保护管理工作可满足相关要求。

6.5.2 辐射工作人员培训

根据《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），新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活

动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。

建设单位将严格执行已有辐射工作人员培训和考核计划，承诺新上岗及调入人员，在上岗前参加生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，考核合格者方可从事辐射工作，以后每五年接受一次再考核，现有辐射工作人员在现有培训合格证书过期前参与考核，不再考核的人员或者考核不合格的人员，不得从事辐射工作。单位定期安排有资质单位对辐射工作人员进行职业健康体检，并建立健康体检档案。

项目严格落实人员培训计划，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

6.5.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者辐射工作场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用的装置用于科学研究，经预测分析评价，各辐射工作场所的辐射屏蔽设计能确保屏蔽体外剂量率水平满足国家相关标准的要求。项目设计了完备、冗余的安全联锁系统，通过门-机联锁、清场搜索、紧急停机、声光报警、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止工作人员和公众意外照射。本项目的辐射防护设计方案满足辐射防护与安全的要求。

项目应按照辐射防护设计方案进行施工建设，并确保经验收合格后投入使用。在此基础上，各辐射工作场所能满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

6.5.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须正确佩戴个人剂量计，并委托有资质单位监测，监测周期不超过三个月。建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。配备个人剂量报警仪，用于工作人员在控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够实施剂量预警。

本项目在工作场所和周围环境设置固定式监测仪表，能够对工作场所和周围环境的辐射水平进行实时在线监测，并设定了报警阈值。此外，拟配备便携式 X-γ辐射巡测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

项目按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

6.5.5 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》要求，申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

本项目拟在合肥物质院现有一系列辐射安全管理规章制度的基础上，结合本项目实际予以完善，内容将涵盖辐射安全和防护管理的组织机构、场所的安全与防护措施、设备操作规程、设备检修维护、辐射安全联锁系统旁路管理、放射性同位素使用管理、放射性废物的管理、辐射工作人员安全与防护管理、辐射监测、辐射事故应急预案等内容，确保本项目运行过程中的辐射安全。

在按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

6.5.6 辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有辐射事故应急措施。

建设单位拟修订《中国科学院合肥物质科学研究院生产安全事故综合应急预案》（含辐射事故专项应急预案），将结合本项目实际，从辐射事故风险分析、应急指挥机构及职责、处置程序、应急保障、预案的修订与实施、应急联系方式、应急物资清单等方面予以修订和完善，一旦发生辐射事故能快速响应，采取有效措施保护辐射工作人员、公众的健康和安全。

在按要求全部修订完成并严格落实的基础上，本项目的辐射事故应急预案能够满足相关要求。

6.5.7 放射性三废治理

本项目运行期间产生的放射性三废主要来自实验验证平台的科研过程。

项目设置了放射性三废处理设施，按要求建成后可以满足要求。

6.6 环保投资一览表

本项目辐射安全与防护设施及环保投资如下表所示。

表 6-3 项目辐射安全与防护设施及环保投资一览表

序号	项目	主要性能参数或规格型号	单位	数量	单价（万元）	总计（万元）
一、	主要辐射防护及环保设施					
1	辐射安全连锁	非标定制	套	1	250	250
2	气密屏蔽门	非标定制（气密门50樘、防中子、伽马屏蔽门2樘）	批	1	755	755
3	场所氚浓度监测仪	测量范围为1×10^5 Bq/m^3 ~1×10^{11} Bq/m^3，不确定度≤±5%	台	20	25.00	500.00
4	空气中氚快速取样仪	基于冷冻法，流量可调范围覆盖0~60 L/min，HTO捕集效率≥95%，HT催化效率≥95%	台	4	30.00	120.00
5	空气中氚取样仪	基于鼓泡法，流量可调范围覆盖0~60 L/h，HTO捕集效率≥96%，HT催化效率≥95%	台	4	20.00	80.00
6	HTO解吸装置	温度可调范围覆盖0-500℃	台	2	15.00	30.00
7	便携式氚浓度监测仪	测量范围覆盖3.7×10^5 Bq/m3~3.7×10^9 Bq/m3	台	5	25.00	125.00
8	氚表面污染测量仪	测量范围覆盖1 Bq/cm^2~1000 Bq/cm^2，不确定度≤±10%	台	5	15.00	75.00
9	氚表面污染测量仪	测量范围覆盖 10^2 Bq/cm^2 ~10^8 Bq/cm^2，不确定度≤±5%	台	4	25.00	100.00
10	激光磷屏成像仪	空间分辨率≤10 μm	台	1	95.00	95.00
11	体表氚污染水平测量仪	氚污染水平测量下限≤1 Bq/cm^2	台	4	20.00	80.00
12	通风气衣	正压，4个排气阀，全景面罩，净化箱：4254L/min，同时提供8个输出接口	套	20	1.00	20.00
13	全面罩式吸器及配套设备	全面罩，便携式风机最大供气时间大于3 h	套	20	4.00	80.00
14	洗消与风淋装置	匹配场所要求	套	1	30.00	30.00
15	全氚取样仪	氚化水收集效率≥90%，催化氧化效率≥95%，最长连续取样时间≥28天	台	4	20.00	80.00
16	低浓度氚	测量量程覆盖1×104	台	4	48.00	192.00

序号	项目	主要性能参数或规格型号	单位	数量	单价（万元）	总计（万元）
	在线测量仪	Bq/m3~1×10^8 Bq/m^3，响应时间≤15 min，不确定度≤±10%				
17	排放流量测量仪	精度≤±5%，不确定度≤±10%	台	4	12.00	48.00
18	液态排放流出氚在线监测仪	探测下限≤1000 Bq/L，固体闪烁法快速测量	台	2	230.00	460.00
19	控制系统	配合监测系统	套	1	40.00	40.00
20	超低本底液闪分析仪	本底≤2.0 cpm，非淬灭氚测量效率≥60%	台	2	162.00	324.00
21	大气氚采样器	HT催化效率≥95%，CH_3T催化效率≥80%；流量范围0~10 L/min可调	套	5	15.00	75.00
22	HTO解吸装置	温度可调范围覆盖0-500℃	套	2	15.00	30.00
23	SPE电解浓集装置	浓集倍数≥10倍，电解时间≤60 h，最大处理量≥1 L	套	2	48.00	96.00
24	有机氚制样装置	最高温度≥900℃，氚回收率≥90%	套	2	15.00	30.00
25	自由水氚制样装置	最高温度≥180℃，氚回收率≥90%	套	2	11.00	22.00
26	现场辐射侦测机器人	最大行驶速度≥2 m/s，支持无线通讯功能，连续工作时间≥2 h	台	2	48.00	96.00
27	便携式空气中氚化水快速取样装置	装置使用时无需供电，单点取样时间≤15 min，质量≤8 kg	台	2	5.00	10.00
28	移动式氚净化装置	装置处理流量≥10 m^3/h，总体漏率≤1×10^{-4} Pa·L/s，单程除氚效率≥95%	台	2	348.80	697.60
29	通风气衣	正压，4个排气阀，全景面罩，净化箱：4254L/min，同时提供8个输出接口	套	20	1.00	20.00
30	全面罩式吸器及配套设备	全面罩，便携式风机最大供气时间大于3 h	套	20	4.00	80.00
31	高压气瓶充气泵	流量≥100 L/min，柴油驱动	台	2	10.00	20.00
32	中压气源泵	供恒流式供气长管呼吸器使用，3/4马力，2人用空气	台	5	4.00	20.00
33	涉氚场所辐射监测系统	监测仪台架及线缆桥架定制	套	1	304.60	304.60
34	流出物监系统本地控制	本地控制系统定制	套	1	79.40	79.40

序号	项目	主要性能参数或规格型号	单位	数量	单价（万元）	总计（万元）
35	流出物监系统取样	取样代表性比例模型验证系统	套	1	191.30	191.30
36	数据集中监控系统	集中监控系统	套	1	151.80	151.80
37	个人剂量监测与安全防护系统	人员氚监测与洗消卫生通过间定制	套	6	45.00	270.00
38	外环境监测系统	室外环境监测站点集成定制	套	5	48.00	240.00
39	场所氚监测电离室	测量范围$5\times10^4Bq/m^3$~$1\times10^{10}Bq/m^3$，测氚参考响应误差＜±10%，具备光纤接口和RS-485通讯接口。设备满足电磁兼容要求（GB/T 17626.3-2023，GB/T 17626.8-2006，GB/T 17626.9-2011等标准），具备伽马补偿功能、健康状态监控功能。腔体内壁沉积低吸附疏水阻氚层（SiO_2）。	台	180	34.00	6120.00
40	手套箱氚监测电离室	测量范围$5\times10^4Bq/m^3$~$1\times10^{10}Bq/m^3$，测氚参考响应误差＜±10%，具备光纤接口和RS-485通讯接口。设备满足电磁兼容要求（GB/T 17626.3-2023，GB/T 17626.8-2006，GB/T 17626.9-2011等标准），具备伽马补偿功能、健康状态监控功能。腔体内壁沉积低吸附疏水阻氚层（SiO_2）。	台	68	25.00	1700.00
41	工艺管路排放氚监测电离室	腔体漏率＜1×10^{-9} Pa·m^3/s，测量范围$5\times10^4Bq/m^3$~$1\times10^{10}Bq/m^3$，测氚参考响应误差＜±10%，具备远程通讯接口，自带泵与流量控制器，漏率需＜1×10^{-8} Pa·m^3 /s。腔体内壁沉积低吸附疏水阻氚层（SiO_2）。	台	10	34.00	340.00
二、	**主要辐射防护管理措施**					
1	完善有关辐射安全管理制度	制定各实验验证平台操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案等，完善辐射事故应急预案等	/	/	/	0
2	人员培训与考核	根据辐射工作人员实际情况，安排参加辐射安全与防护培训/再培训及考核	/	/	/	0
合计						**14077.7**

由上表可知，本项目辐射安全与防护设施及环保投资约为14077.7万元，约占项目总投资376423万元的3.7%。

第七章 利益-代价分析

7.1 利益分析

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目的建设，其重要意义主要体现在以下方面：

⑴创新科技攻关组织管理方式

聚变堆氚循环和增殖问题已经成为聚变堆工程化道路上的最关键制约因素，为了抢占国际聚变能发展制高点，加速聚变能应用，拟加强国内外核聚变研究的交叉融合力度，强化专业科研院所、高校和企业之间的互助协作，依托中国科学院合肥物质研究院，联合中国工程物理研究院等国内优势研究力量，通过建立目标集中、协同攻关、成果集成的定向性建制化科研组织新模式，瞄准聚变堆氚燃料循环和辐射安全、包层关键技术，开展有组织、体系化的科学技术研发，确保聚变堆结构整体性能和安全，为氚循环和自持提供关键技术预研和安全验证及保障，积累未来聚变堆所需科学和工程技术经验，加快聚变能源研发进程。

为提升科研任务的组织效率和管理水平，将在重大科技任务组织管理方面进行改革创新。首先，全面梳理核心、关键和卡脖子等技术难题，根据其重要性设置优先级和时效性，有序有效开展攻关。紧跟氚燃料及包层技术前沿，针对突发性、紧迫性科研任务，建立动态快速响应机制，确保及时启动研究。其次，明确项目责任人的全过程管理职责，要求负责人从项目申报启动、建设实施、中期考核到结题验收，全面把控科研进度和质量，确保目标任务的顺利完成。同时，注重培育和支持青年骨干力量，为他们提供更多牵头重要科学任务的机会。通过“揭榜挂帅”“赛马制”等方式遴选项目和课题负责人，大胆选拔优秀青年人才担任重要岗位和核心骨干，激发创新活力。通过上述改革措施，将进一步优化项目科研管理机制，推动重大科技任务的高效实施，为我国核聚变能开发事业提供有力支撑。

除了国家财政部提供经费支持外，结合平台重大科研任务，申请国家科技部、中国科学院、国家自然科学基金委等国家部委，以及大型企事业单位合作研发课题资金的支持，保证科研课题的持续发展。同时，积极争取合肥综合性国家科学中心配套支

持，如安徽省重大攻关专项、省级创新基地及平台等，为新布局的研究方向提供持续支撑。

⑵ 构建聚变核安全技术标准体系

目前，我国甚至国际上聚变领域的核安全标准规范等尚不成熟，相应规模氚燃料循环和处理技术成熟度亟须加强。本项目建设过程中将在安全目标、安全功能、源项控制、放射性包容、辐射防护与监测、建筑分区、排放要求、放射性及危险废物处置、职业安全等方面提出安全技术和管理要求。加强与国际标准化组织、全国核能标准化技术委员会核聚变分技术委员会等国内外标准化组织合作，建立聚变堆辐射安全及监测标准体系。加强与国内外顶尖科研机构的合作，共同开展关键材料和技术的研发。定期举办国际学术会议或联合工作坊，推动技术标准、研究数据的共享与互认，提升我国在聚变堆氚燃料领域的国际影响力。

⑶ 推动科技成果转化应用

①以聚变产业联盟为纽带，以项目为牵引，加强与企业联合技术攻关。为进一步促进聚变领域资源整合，健全“沿途下蛋”机制，壮大培育聚变未来产业，推动我国尽早实现聚变能商业化应用目标。中国科学院合肥物质科学研究院联合合肥合锻智能制造股份有限公司、上海电气核电集团有限公司、浙江久立特材科技股份有限公司、中国第一重型机械股份公司、二重（德阳）重型装备有限公司、西部超导材料科技股份有限公司等15家国内热心于聚变产业的相关企业、科研院校、服务机构等于2023年11月16日自愿发起成立非营利性社会组织——聚变产业联盟，目前联盟成员203家。充分发挥联盟的优势企业作用，以企业为主体，成立工作组或联合实验室，加强与科技企业间联合技术攻关，深化产学研用协同创新，聚焦制约产业发展的关键共性技术难题，推进涉氚聚变关键装备和器件如氚循环分子泵、涡旋泵等国产化研发，开展定向研发和技术服务，促进涉氚材料及关键部件自主化国产化生产。

②推进概念验证平台/中试基地建设：根据项目特点和需求，联合企业探索包层关键材料制备概念验证与中试平台机制。概念验证平台重点服务于早期科技成果，降低企业对新技术试验的风险；中试基地则通过放大试验规模和技术验证，评估技术的商业化可行性，推动氚增殖剂陶瓷微球和铍基中子倍增剂等包层材料规模化、批量化生

产。同时，建立灵活的先行先试政策体系，支持创新成果快速迭代和产业化落地，加速科技成果转化应用的速度和效率。

⑷ 培育壮大核聚变研发人才队伍体系

党的二十大报告中强调“人才是第一资源”，等离子体物理研究所经过四代大科学装置的建设和运行，培养和锻炼了一支能打硬仗的大科学工程设计和技术支撑队伍，未来继续针对我国可控核聚变发展战略和部署，培育壮大核聚变研发人才队伍体系。

加强聚变堆氚燃料和包层关键技术研发相关领域的高层次人才引进和青年人才培养计划。如深化与高校开展科教融合，在学科布局上，补齐短板，贯通相关领域的学科链条，通过共享A+学科资源、设立英才班等，加强聚变领域优质后备力量的选拔培养，后期采用国际联合培养的方式培养博士、博士后。建立院士工作站或专家团队指导机制，培养一批具有国际竞争力的创新领军人才。选派优秀青年人才前往国际组织工作，担任国际组织重要职位；组织国际招聘，选拔引进杰出青年人才和优秀博士后；借助合肥综合性国家科学中心的招才引智计划，选择性地引进需要的人才等。同时，通过短期访问学者、联合培养等方式，提升人才队伍的整体水平和国际化程度。

综上所述，本项目的建设具有良好的社会性效益和经济性效益。

7.2 代价分析

（1）社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面，项目用地面积约6.64万平方米，占用一部分土地资源。

能源方面，项目运行期间需用水、电等能源。

（2）经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等方面的成本。

（3）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的放射性气体进入大气环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，项目运行期间对环境的影响均低于国家标准中规定的限值。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于国家、造福于广大人民。因此，本项目的实施是正当的。

第八章 结论和建议

8.1 结论

8.1.1 项目工程概况

中国科学院合肥物质科学研究院拟在安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角实施聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目建设，在新建氚燃料实验楼与包层研发楼内开展聚变堆材料与氚燃料两大方向的关键技术研发、实验验证及中间规模试验活动。建设总投资为376423万元，其中科研设备购置费363583.64 万元，工程建设其他费2260.78万元，预备费为10578.58万元，全部由超长期特别国债资金支持。环保投资约14077.7万元，占总投资的3.70%。

为顺利推进验证平台项目的顺利实施，中国科学院合肥物质科学研究院同步实施了配套工程，该配套工程只涉及园区土建及配套基础设施建设，不含实验工艺、设施。具体建设内容为：总占地面积约100亩，总建筑面积约52873㎡，其中地上总建筑面积约43781㎡，包括氚燃料实验楼23231㎡、包层研发楼20350㎡和门卫室200㎡；地下总建筑面积约9092㎡，包括氚燃料实验楼7092㎡，包层研发楼2000㎡，并配套建设室外给排水、电气、道路、广场、绿化、停车场等工程。项目总投资估算65339.49万元（含土地购置费10350万元），其中30000万元由地方财政支持，剩余部分由项目建设单位多渠道筹措解决。

8.1.2 实践的正当性

项目运行期间的辐射污染源主要是聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证过程中产生的放射性三废。

本项目装置的设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽可能降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响满足国家相关标准要求。本项目属于《产业结构调整指导目录》（2024 年本）中“鼓励类”中第六项第 4 条 “核能——核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”，项目的实施可为聚变堆氚循环和自持提供关键技术预研和安全保障，为未来聚变堆氚增殖包层工程化应用奠定基础。本项目对国家和社会所带来的利益大于可能引起的辐射危害。因此，本项目核技术利用实践活动是正当的。

8.1.3 选址、布局合理性分析

本项目拟建于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角，与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的区域，并设置物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目布局考虑了场所功能需要，便于辐射工作场所的辐射防护和安全管理。从辐射防护与环境保护的角度，项目选址可行，平面布局合理。

8.1.4 辐射安全与防护措施

（1）辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。

（2）氚包容：为防止氚扩散造成放射性污染，对氚燃料实验楼进行了氚包容分区管控，分为 C1 、C2 、C3 区。

（3）辐射安全联锁系统：辐射工作场所设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括门禁控制、门机联锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器、工作状态指示灯、视频监控以及电离辐射警告标志和中文警示说明，可有效防止工作人员和公众受到意外照射。

（4）通风系统：辐射工作场所设有独立的通风系统，其排风量、排风高度等设计能够确保排入环境的放射性废气对环境的影响满足相关标准的要求。

（5）工作场所辐射监测系统：本项目工作场所和周围环境均设有固定式辐射监测仪表，对场所内剂量率水平进行实时监测和显示，确保工作人员和公众的安全。

8.1.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，工作人员的年最大有效剂量低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值；公众所受年最大有效剂量低于本次评价确定的 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

8.1.6 放射性三废排放和处理

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证过程。

项目设置了放射性三废处理设施，能够保证放射性三废得到妥善控制和管理。

8.1.7 辐射安全管理

中国科学院合肥物质科学研究院自2006年起，便开展了核技术应用项目，已成立了辐射安全管理委员会作为辐射安全工作的最高管理机构，并基于人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面内容建立了一系列的辐射安全管理制度；制定了辐射工作人员培训/再培训制度，可确保辐射工作人员在参加辐射安全与防护考核，并考核合格后方可上岗。项目建设单位将结合本项目实际，进一步修订完善一系列辐射安全管理制度。本项目目前制定的辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

8.1.8 公众参与

本项目按照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络公示、报纸媒体公示、现场张贴公告等方式进行了公众参与，公示期间未收到其他社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈意见。本项目公众参与的开展情况详见《聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目环境影响评价公众参与说明》。

8.1.9 总结

综上所述，建设单位拟开展的聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和环境的影响符合环境保护的要求，该项目对环境的影响是可以接受的。建设单位及使用单位在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，故从辐射防护和环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。

8.2 建议

（1）建设单位在本项目施工过程中必须加强监督，保证建筑材料和施工质量，混凝土施工时要确认成型密度、均匀、表观密度符合设计要求。

（2）落实环评中提出的管理措施和辐射防护措施要求，在实践中建立和不断完善各项辐射管理规章制度和事故应急预案，并采取切实措施保证各种规章制度的有效执行。

附件一

委 托 书

中核第七研究设计院有限公司：

为贯彻执行《中华人民共和国环境影响评价法》、《建设项目环境保护管理条例》等法律法规，认真搞好项目建设的环保工作，保护环境。现根据有关规定特委托贵公司就 聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目 进行环境影响评价，请按有关法规尽快开展工作。

委托单位：

中国科学院合肥物质科学研究院

受托单位：

中核第七研究设计院有限公司

2025 年 10 月 13 日

附件二

国家发展和改革委员会文件

发改高技〔2025〕811号

国家发展改革委关于聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台、万焦耳级高能皮秒激光装置建设项目可行性研究报告的批复

中国科学院：

报来《关于报送氘氚燃烧和激光聚变等领域项目可行性研究报告的函》（科发函字〔2025〕81号）及有关材料收悉。经研究，现批复如下。

一、根据《强化应用基础研究和前沿研究“两重”建设实施方案（2025—2028年）》《关于印发〈通过“两重”建设支持核聚变加速突破方案〉的通知》，原则同意所报聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台、万焦耳级高能皮秒激光装置建

设项目可行性研究报告。

二、聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台总投资控制规模暂定为38.9800亿元，万焦耳级高能皮秒激光装置建设项目总投资控制规模暂定为7.8445亿元，具体金额待核算项目初步设计概算后确定，全部由超长期特别国债资金支持。

三、项目法人单位、“硬投资”建设内容和验收指标、“软建设”改革举措和验收指标、科学和工程目标、建设地点、项目投资及建设周期等详见附件1，请严格按要求开展项目建设。

四、请认真抓好项目建设资金监督管理，做到单独核算、专款专用，严禁截留、挤占或挪作他用。

五、请加强对项目的日常监管、监测调度和监督检查，及时掌握项目进展情况，协调解决项目推进过程中的问题，重大问题及时上报。请督促项目单位严格落实主体责任，建立“一把手”负责制和相应工作机制，确保实现任务目标。

六、请据此抓紧组织开展项目初步设计工作，进一步落实具体建设方案，具备条件报我委核定概算后，由你院审批项目初步设计。请严格控制项目概算，如有超支，其超支部分由你院和项目法人单位协商解决。

七、请严格落实安全生产有关规定，防范杜绝安全生产事故。

附件：1.项目信息表

2. 项目招标事项核准意见



国家发展改革委

2025 年 6 月 25 日

附件 1

项目信息表

项目名称	法人单位	“硬投资”建设内容和验收指标	“软建设”改革举措和验收指标
聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台	中国科学院合肥物质科学研究院	**建设内容：**建设氚循环和辐射安全实验、产氚包层关键技术研发和综合验证以及辅助与智控等 3 大系统。购置设备 548 台（套），国产化率为 96%。氚循环和辐射安全实验系统包括内燃料循环、外燃料循环、氚的安全防护、涉氚材料测试等实验平台建设；产氚包层关键技术研发和综合验证系统包括包层材料批量化制备、包层原型模块先进制造及综合性能测试等实验平台建设；辅助与智控系统为整个平台的运行提供供电、冷却、通排风、公用技术和智能控制。 **验收指标：**建成氚燃料循环和辐射安全实验系统，实现聚变功率 500 兆瓦所需氚量燃料循环和处理过程；增殖材料中氚提取效率不低于 95%；氚循环系统内氚计量衡算准确度达到±5%；含氚固体的除氚效率不低于 90%。建成聚变堆包层关键技术研发和综合验证系统，固态包层氚增殖剂陶瓷微球生产能力不小于 2 吨/年，铍基中子倍增剂验证生产能力不小于 2 吨/年，表观密度不小于理论密度的 95%；液态包层 SiCf/SiC 流道插件长度达米级，密度≥2.5 克每立方厘米。完成米级全尺寸固态、液态包层原型件；固态包层氦气出口最高温度不小于 500 摄氏度、工作压力不小于 8 兆帕；可进行服役条件下的真空高温高压氦检漏，在不低于 500 摄氏度/8 兆帕下的系统灵敏度优于 1×10^{-11} 帕立方米每秒；液态锂铅出口最高温度达 500-600 摄氏度；在不低于 500 摄氏度下的液态包层结构承压不低于 8 兆帕。具备包层多物理场与热工安全测试能力，其中液态锂铅测试温度达 500-600 摄氏度；包层第一壁测试热负荷不小于 1 兆瓦每平方米。	建立聚变堆辐射安全标准体系，放射性包容、辐射防护与监测等方面制定安全技术和管理要求。在辐射源项分析控制等方面制定核安全技术导则 5 项，管理制度 2 项；在氚安全包容防护、辐射剂量评估等方面，申请核技术利用与辐射防护领域的行业/地方标准 2 项，国际标准 1 项；推动技术标准与研究数据共享互认，非涉密研究数据共享率≥50%。打造产业导向的聚变联盟，充分发挥联盟 200 余家单位的资源优势，推进氚转移泵等核心涉氚装备的国产化，培育 2 家以上涉氚装备专精特新企业。加强氚燃料技术领域高层次人才引进培养，鼓励青年人才“挑大梁”，45 岁以下青年骨干占比 60%以上，形成 500 人以上涉氚技术国际化人才队伍。

项目名称	科学目标	工程目标	建设地点和周期	总投资
聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台	面向聚变示范堆需求，研究规模化、连续运行的氚循环相关科学技术问题，完善核安全标准体系，为未来聚变堆设计与建造提供规范依据。突破产氚包层核心材料的国产化、批量化制备技术，国际上首次实现聚变堆规模全尺寸产氚包层的工程制造，验证其在聚变堆服役环境下的综合性能与可靠性。	建成氚燃料循环和辐射安全实验系统，实现燃料循环、提取和回收处理效率满足聚变功率500兆瓦聚变堆安全运维要求，实现涉氚场所测量、维护和除污远程控制和操作。建成聚变堆包层关键技术研发和综合验证系统，实现包层结构、功能及屏蔽材料批量制备，达到中试规模；实现聚变堆包层运行参数的综合集成测试和验证。	项目建设地点为安徽省合肥市未来大科学城合肥综合性国家科学中心大科学装置集群——聚变堆主机关键系统综合研究设施（CRAFT）园区内。项目建设周期4年。	389800万元

附件 2

项目招标事项核准意见

类别	招标范围		招标组织形式		招标方式		不采用招标方式
	全部招标	部分招标	自行招标	委托招标	公开招标	邀请招标	
勘　　察	√			√	√		
设　　计	√			√	√		
建筑工程	√			√	√		
安装工程	√			√	√		
监　　理	√			√	√		
工艺设备	√			√	√		
重要材料	√			√	√		
其　　他							

审核部门核准意见：

核准。请严格按照《中华人民共和国招标投标法》《必须招标的工程项目规定》等法律法规和相关部门规章，规范招标投标行为。

国家发展和改革委员会

项目代码：26K-3193

中国科学院基建批复

科发建复字〔2026〕21号

中国科学院关于合肥物质科学研究院聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目可行性研究报告的批复

合肥物质科学研究院：

你单位《关于报请审批聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程可行性研究报告的函》（科合院发函字〔2026〕5号）和《关于调整聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目投资估算的函》收悉。经审核，同意你单位按照评审意见优化调整后的项目可行性研究报告。现批复如下。

一、建设地点

项目建设地点位于安徽省合肥市庐阳区谭岗路和杨岗路交口东北角。

二、建设内容及规模

项目建设内容为新建氚燃料实验楼、包层研发楼、门卫室等，同步实施室外配套工程。项目总占地面积约100亩，新建建筑面积约52873平方米，其中地上建筑面积43781平方米，地下建筑面积9092平方米。

三、建设周期

项目建设周期38个月。

四、投资及经费来源

项目总投资估算65339.49万元（含土地购置费10350万元），其中30000万元由地方财政支持，剩余部分由你单位多渠道筹措解决。

五、其他说明及要求

1. 请根据国家及地方有关规定和要求，尽快落实项目建设条件，进一步细化项目建设方案和投资来源方案，抓紧编制项目初步设计和投资概算，条件具备后按要求尽快报院审批。在项目初步设计和实施过程中，请严格控制投资规模。

2. 本批复有效期两年。如在有效期内项目初步设计和投资概算未能获得批准，本批复文件自动失效。

附件：聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目招标投标事项核准意见

中国科学院

2026年3月20日

（此件依申请公开）

附件

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目招标投标事项核准意见

	招标范围		招标组织形式		招标方式		不采用招标方式
	全部招标	部分招标	自行招标	委托招标	公开招标	邀请招标	
勘　察	√			√	√		
设　计	√			√	√		
建筑工程	√			√	√		
安装工程	√			√	√		
监　理	√			√	√		
主要设备	√			√	√		
重要材料	√			√	√		
其　他	√			√	√		

审批部门核准意见说明：

核准。请严格按照《中华人民共和国招标投标法》《中华人民共和国政府采购法》等法律法规和相关部门规章，规范招标投标行为。

中国科学院

附件四

辐射安全许可证

根据《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的规定，经审查准予在许可种类和范围内从事活动。

单 位 名 称： 中国科学院合肥物质科学研究院

统一社会信用代码： 121000007178068020

地　　址： 安徽省合肥市蜀山区董铺岛

法定代表人： 刘建国

证 书 编 号： 国环辐证[00147]

种类和范围： 使用Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类放射源；使用Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所（具体范围详见副本）。

有 效 期 至： 2028年09月30日

发证机关： 生态环境部

（公章）

发证日期： 2026年01月29日

中华人民共和国生态环境部监制

扫描全能王 创建

附件五

版次：A

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台建设项目

辐射环境本底调查

调查报告

中国辐射防护研究院

核工业太原环境分析测试中心

二〇二五年十二月

项目负责人：王瑞俊

报告编写人：宋沁楠

主要参加人员(以拼音字母排序)：

保　莉	白晓东	杜　柯	郭　琛	苟荣霞
韩玉虎	姜　瑞	李晋浩	李鹏翔	李苑艺
李　昂	刘王东	刘娟娟	刘泽晖	卢凯特
路　帅	马旭媛	师琦琦	宋海龙	宋沁楠
田旭敏	王美美	徐　萌	吴海洋	易武静
杨海兰	张　峰	张　玥		

审　核：保　莉

批　准：王瑞俊

目 录

1 场址概况.....1
1.1 场址建设内容.....1
1.2 地理位置.....1
1.3 人口分布.....1
1.4 气象条件.....2
1.5 水文条件.....2
2 调查目的与内容.....3
2.1 调查目的.....3
2.2 调查内容.....3
3 调查方法.....4
3.1 调查依据.....4
3.2 现场测量、样品采集和预处理.....4
3.3.1 环境辐射场监测.....4
3.3.1.1 γ 辐射空气吸收剂量率.....4
3.3.1.2 宇宙射线.....5
3.3.1.3 中子剂量当量率.....5
3.3.2 气溶胶样品的采集与预处理.....5
3.3.3 空气氚样品的采集与预处理.....6
3.3.4 地表水样品的采集与预处理.....6
3.3.5 土壤、地表水沉积物样品的采集与预处理.....7
3.3.5.1 土壤样品的采集.....7
3.3.5.2 土壤样品的预处理.....8
3.3.5.3 地表水沉积物样品的采集和预处理.....8
3.3.6 生物样品的采集与预处理.....8
3.4 样品运输.....8
3.5 分析方法.....9
3.5.1 气溶胶 ^{7}Be 的分析测量.....9

3.5.2 环境介质中总α、总β分析.....9
3.5.2.1 气溶胶中总α、总β分析.....9
3.5.2.2 水中总α、总β分析.....10
3.5.2.3 土壤/沉积物中总α、总β分析.....11
3.5.2.4 生物中总α、总β分析.....12
3.5.3 环境介质中 ^{3}H 活度浓度分析.....12
3.5.3.1 空气中 ^{3}H 的分析.....12
3.5.3.2 水中 ^{3}H 的分析.....13
3.5.3.3 土壤/沉积物中 ^{3}H 的分析.....14
3.5.3.4 生物中有机氚、组织自由水氚的分析.....14
3.5.4 各分析项目的探测下限.....16
3.6 仪器设备.....18
4 调查结果与分析.....19
4.1 环境γ辐射空气吸收剂量率.....19
4.1.1 点位布设.....19
4.1.2 监测结果.....19
4.2 中子剂量当量率.....22
4.2.1 点位布设.....22
4.2.2 监测结果.....22
4.3 气溶胶和空气.....24
4.3.1 点位布设.....24
4.3.2 监测结果.....25
4.4 土壤.....27
4.4.1 点位布设.....27
4.4.2 监测结果.....28
4.5 地表水及其沉积物.....30
4.5.1 点位布设.....30
4.5.2 监测结果.....31
4.6 生物.....32
4.6.1 点位布设.....32

4.6.2 监测结果.....33
5 质量保证.....34
5.1 质量管理体系.....34
5.1.1 中辐院质量程序.....35
5.1.2 中辐院分析测试中心质量管理手册和程序.....38
5.2 组织机构和人员.....42
5.2.1 组织结构.....42
5.2.2 质量职责与分工.....42
5.2.3 人员配备与培训.....44
5.3 仪器设备的质量控制.....48
5.3.1 现场采样设备的控制.....48
5.3.2 测量装置的检定.....48
5.3.3 α/β测量仪的刻度和性能检验.....52
5.3.4 高纯锗γ谱仪的刻度和性能检验.....58
5.3.5 液闪γ谱仪的刻度和性能检验.....59
5.4 样品的质量控制.....60
5.4.1 样品采集、预处理及运输过程的质量控制.....60
5.4.2 空白样品的测量.....60
5.5 质量保证核查.....61
5.5.1 内部核查.....61
5.5.2 外部核查.....61
5.6 实验室间比对及能力验证.....62

1 场址概况

1.1 场址建设内容

本次拟在安徽省合肥市庐阳区实施聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目建设，在新建氚燃料实验楼与包层研发楼内开展聚变堆材料与氚燃料两大方向的关键技术研发、实验验证及中间规模试验活动。

项目总占地面积约 100 亩，总建筑面积约 52873 ㎡，其中地上总建筑面积约 43781 ㎡，包括氚燃料实验楼 23231 ㎡、包层研发楼 20350 ㎡和门卫室 200 ㎡；地下总建筑面积约 9092 ㎡，包括氚燃料实验楼 7092 ㎡，包层研发楼 2000 ㎡，并配套建设室外给排水、电气、道路、广场、绿化、停车场等工程。

1.2 地理位置

中国科学院合肥物质科学研究院聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台拟建场址位于合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北区域，场址地理位置见图 1.1-1。

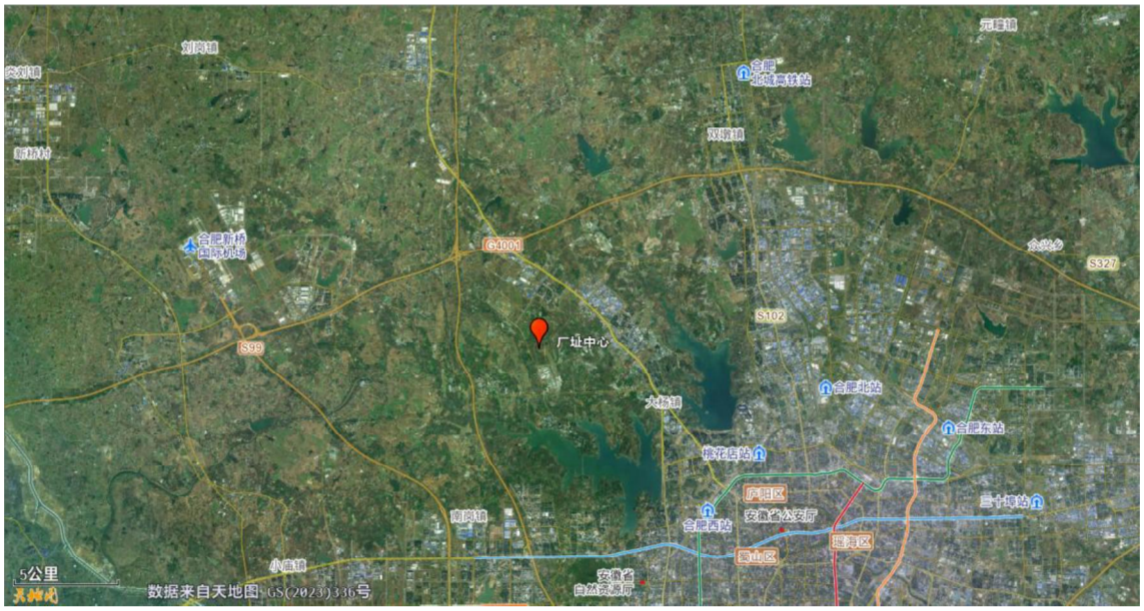


图1.1-1 场址地理位置示意图

1.3 人口分布

本项目拟建场址位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北区域。三十岗乡隶属于安徽省合肥市庐阳区，地处合肥市西北部，董铺水库北岸，东与大杨镇相连，南邻董铺水库与蜀山区井岗镇相望，西与肥西县高刘镇接壤，北隔

滁河干渠与长丰县岗集镇毗邻。

2024年，庐阳区常住人口74.4万人，比上年增加1.1万人，常住城镇化率99.44%。2024年，庐阳区户籍人口 55.2713 万人。少数民族约 37 个，户籍少数民族约 0.66 万人，少数民族流动人口约0.6万人。

1.4 气象条件

合肥市地处北亚热带北缘，属亚热带湿润季风气候。气候特征为四季分明，气候温和，雨量充沛，日照充足，无霜期长，冰冻期短。具有亚热带湿润温和的气候特征。春季冷暖空气活动频繁，常导致天气时晴时雨；夏季季节最长，天气炎热，雨量集中，降水强度大，雨量集中在5～6月的梅雨季节；秋季最短，气温下降块，晴好天气多；冬季天气较寒冷，雨雪天气少，晴朗天气多。全市年多年平均气温16℃，年平均降水量900mm。合肥属于季风性气候区，夏季盛行东南风，冬季盛行东北风。全年平均风速为2.82m/s。

合肥市全年风向以东~东北风为主，其中本次调查的春季以东风(E，风频11.1%)为主，因此本次调查的下风向为场址西。

1.5 水文条件

拟建场地地势起伏较大，场地地表水主要经地表径流后在低洼处汇集，形成局部积水，部分地表水经地表径流汇入市政雨水管网。本场地地表水主要由场地外地表水径流及降雨补给。场地地表水排泄主要以地表径流、下渗和蒸发为主。经现场踏勘，仅在场地北侧发现一条河流——滁河干渠。

本场地地下水条件一般，拟建场地地下水类型为上层滞水及风化岩中的裂隙水、孔隙水。经现场踏勘，场址周边未发现地下水井分布。

2 调查目的与内容

2.1 调查目的

本次放射性本底调查的目的是：

（1）获得项目建设前周围环境γ辐射水平及主要介质中天然和人工放射性核素的活度浓度水平，为编写该工程环境影响报告书提供相关数据；

（2）为后续编写该工程运行期间辐射环境监测大纲提供技术依据。

2.2 调查内容

电离辐射的调查范围和内容主要参考 HJ61-2021 中应用非密封放射性物质辐射环境监测方案，并根据场址特征和项目特点，将调查范围适当扩大至场址半径1km。调查内容见表 2.2-1。

表 2.2-1 南岗氚验证测试实验室建设项目辐射环境本底调查方案

序号	调查对象	监测项目	监测频度	调查范围	点位数量	平行样品数量	样品个数
1	陆地环境γ辐射	瞬时γ剂量率	1 次	1km	32	0	32
2	中子剂量当量率	中子剂量当量率	1 次	拟建场址周边	5	0	5
3	气溶胶	总α、总β、^{7}Be	1 次	1km	4	0	4
4	空气	^{3}H	1 次		4	0	4
5	地表水	总α、总β、^{3}H	1 次	1km	2	1	3
6	土壤	总α、总β、^{3}H	1 次	1km	9	1	10
7	地表水沉积物	总α、总β、^{3}H	1 次	1km	2	0	2
8	植物	总α、总β、有机氚、自由水氚	1 次	1km	3	1	4

3 调查方法

3.1 调查依据

（1）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）；

（2）《电离辐射监测质量保证通用要求》（GB 8999-2021）；

（3）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；

（4）《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》（HJ 1149-2020）；

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

（6）《水质 总α放射性的测定 厚源法》（HJ898-2017）；

（7）《水质 总β放射性的测定 厚源法》（HJ899-2017）；

（8）《水中氚的分析方法》（HJ1126-2020）；

（9）《食品安全国家标准 食品中放射性物质氢-3 的测定》（GB14883.2-2016）；

（10）《大气中 HTO 和 HT 的测定方法》（EJ/T20269-2021）；

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

除上述标准规范外，还须执行相关国家或行业标准规定的各种介质或核素的采样、制样、测量及数据处理方法。

3.2 现场测量、样品采集和预处理

3.3.1 环境辐射场监测

3.3.1.1 γ辐射空气吸收剂量率

依据标准 HJ 1157-2021《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》。野外测量的测量时间的具有代表性，降水后 6h 内不开展测量。测量点位距附近高大建筑物的距离大于 30m，点位地势平坦、开阔，无积水、有裸露土壤或有植被覆盖，避免选择周围有天然或人为因素对测量结果的影响的位置（如湖海边，砖瓦、矿石和煤渣等堆置场附近等），同时避免选择环境中表层土壤改变的位置（如污垢、砾石、混凝土和沥青等）。野外测量的点位包括原野和道路，原野点位可选择在城市中的草坪，公园中的草地以及某些岛屿、山脉、原始森林等不易受人为活动影响的地方，道路点位应选择在道路中心线进行测量。测量时将仪器开机预热 2 分钟以

上，将仪器固定在三脚架上，保持仪器探头中心距离地面（基础面）为1m，待仪器读数稳定后，以约10s的间隔读取/选取10个数据，记录在测量原始记录表中，并记录测量地表状况。

γ辐射瞬时剂量率测量结果按下式计算:

$$D_\gamma = （R_\gamma - k_3 D_c）k_1 k_2$$

式中：

D_r——测点处的环境γ辐射吸收剂量率值，Gy/h；

D_c——测点处宇宙射线响应值；

k_1——仪器检定/校准因子；

k_2——仪器检验源效率因子；

k_3——建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子；

R_γ——仪器测量读数值均值，Gy/h。

3.3.1.2 宇宙射线

宇宙射线使用高气压电离室进行测量，测量点选择在水深大于 3 m，距岸边大于 1km 的淡水水面上，测量船只材料为塑料，船体内无压舱石。测量时将仪器开机预热 2 分钟以上，到达测量位置后，将仪器固定在船舱中，待仪器读数稳定后，以约10s的间隔读取/选取50个以上的数据，记录在测量原始记录表中。

3.3.1.3 中子剂量当量率

γ辐射累积剂量测量依据标准HJ 1157-2021《环境γ辐射剂量率测量技术规范》和 GB/T 10264-2014《个人和环境监测用热释光剂量测量系统》，使用 LiF（Mg·Cu·P）热释光剂量计进行测量。测量点位选择尽可能代表总的被测环境，合格的地点应在物理上是均匀的，空旷的地区，不受邻近建筑物的屏蔽，累积剂量测量点位一般与同点位的 γ 辐射瞬时剂量率测量点位相隔不远。热释光剂量计应尽可能远离可引起辐射入射方向反常或干扰辐射场的高大密集的物体，剂量计可以挂在铁栅栏、小树或轻质木柱上。一批次累积剂量的监测时间一般为 2~3 个月。

3.3.2 气溶胶样品的采集与预处理

空气中气溶胶样品的采样依据标准HJ 61-2021进行，采样器选用青岛崂应公司生产的2031型大流量采样器，滤膜采用PP滤膜，其规格为20cm×25cm，采样

高度选在距地面约 1.5m 处，保持取样系统进气口和出气口之间有足够大的距离，防止形成部分气流自循环。采样位置选择在空旷地面或远离烟囱的居民楼顶，避免选择在异常微气象情况或其他由于人为因素的影响可能导致空气浓度偏高或偏低的地点（如公路旁或高大建筑物附近）。采样前，首先检查并确认滤膜完好无裂缝，仪器工作状态正常。采样时保证气候良好，遇降水、沙尘暴等异常天气时及时停止采样。采样器瞬时流量为 1.05m^3/min，连续采集 7~8 天，采样总标况体积不低于 10000m^3。采样期间根据环境条件，随时观察滤膜采集情况，出现采样器声音异常或瞬时流量下降等情况时及时更换新滤膜后再继续采样。采样完成后将采集完成的滤膜向内对折后装入封口袋内，避免滤膜表面附着的样品掉落，在袋上注明样品编号、采样地点、采样时间、标况体积等信息并填写对应的采样记录表，采集好的样品由人员随身携带回实验室后进行样品交接。

3.3.3 空气氚样品的采集与预处理

氚样品的采集依据标准 HJ 61-2021，采集的是空气中水蒸气的氚，使用干燥剂法进行采集。采样器为中辐院自制的空气氚采样器，由空气泵、过滤器、硅胶吸附瓶、时间控制开关、转子流量计和质量流量计组成，使空气中的水蒸气经过粒子过滤器后被硅胶完全捕集。采样点选择在四周空旷的地面，采样器的采样高度为 1m，遇降雨天气停止采样。采样开始前，挑选出足量的粒度为 1.98～2.36mm 的干燥硅胶并称重，同时记录采样点的温湿度和大气压力，以及质量流量计上显示的初始体积。采样时，将干燥硅胶装入串联的 2 路硅胶吸附瓶中，在时间控制开关上设置采样时间，调节转子流量计，使单路的流量为 4.5~5L/min。采样期间要随时观察采样情况，避免出现因湿度过大导致硅胶被穿透的情况。采样完成后，将硅胶吸附瓶取下，装入硅胶瓶中并密封，再次记录采样点的温湿度和大气压力，以及质量流量计上显示的体积。在瓶上注明样品编号和采样体积等信息，填写采样记录表。样品装箱后由专车运回实验室。

3.3.4 地表水样品的采集与预处理

本次地表水样品采集河流水。分别在不受设施排放影响的上游和可能受设施排放影响的下游各布设 1 个采样点。

采样时，一般选择水流中心的部位（断面流速最大的部分）采集表面水。水断面宽≤10 m 时，在水流中心采样；水断面宽＞10 m，在左、中、右三点采样后

混合。当河流有排放水和支流汇入处时，则选在其汇合点的下游，使两者充分混合的地方（一般为汇合点下游 1km 处）进行采集。当河川涨水或有浊流等情况出现时，原则上暂停取样，必须要采样时应在采样记录表上注明。

采样方法：使用 5L 亚克力采水器采集水样，水样用 5L 塑料桶盛装（分析 ^{3}H 样品用棕色玻璃瓶）。采样器和样品容器用盐酸洗涤后，再用蒸馏水冲洗干净。到达采样位置后，首先用待采水样洗涤采样器和样品容器三次后开始采集。采样时，让取样器开口向着上游方向采集，尽量防止扰动水体和杂物进入。取样器取得水样后再移入样品容器中。分析总放的样品每个样品采集 5L，分析 ^{3}H 的样品每个采集 2L。

现场预处理：取样以后，首先确认样品是否浑浊，样品过于浑浊时，需要进行澄清或过滤操作，并在采样记录表上记录清楚。再向澄清的水样中加入浓硝酸，使样品 pH＜2，然后密封。分析 ^{3}H 的样品不加酸。填写采样记录表。

样品容器注明样品编号和样品种类等信息，装箱后专车运回实验室。

3.3.5 土壤、地表水沉积物样品的采集与预处理

3.3.5.1 土壤样品的采集

土壤样品的采样依据标准 HJ 61-2021，使用表层土壤采样器进行采集。土壤样品选择在能代表该地区总体状况的地点进行，采集没有受到人为干扰的土壤，对于农耕地，考虑作物种类、施肥培植管理等情况，采集田埂地头不被耕种的表层土壤。对未耕地，选在有草皮（植皮）等受人类活动影响较小的区域和无表面流失等引起的侵蚀和崩塌，周围没有建筑物和人为干扰的地点。确认采样点位后，采用梅花布点法采集 10 m×10m 范围内的土壤，采样点位不少于 5 个，在田埂等无法采用梅花布点的地形采样时，使用蛇形布点法采样，采样点位不少于 5 个。

采样时，首选对采样点进行编号，去除散在表面上的植物，杂草石等；把土壤采样器垂直于取样点表面放置，用锤子或大木锤把采样器冲打到预定深度（0～10cm）；用铁锹，移植镘刀等把采样器前端的开口部位堵住后再回收上来，并去除外围附着的土壤。采样结束后填写采样记录表，把采集到的土壤放入封口袋内，封口袋上注明样品编号和采样量等信息，再放置于布袋中，每个点位采样量不少于 500g。采样器用净水洗净后可用于后续采样。

样品统一装箱后，专车运回实验室。

3.3.5.2 土壤样品的预处理

（1）将采集的土壤样品取 500~1000g，平铺在搪瓷盘中，剔除杂草、碎石、贝壳等异物，土壤样品放在台秤或天平上称湿重；

（2）将样品放入干燥箱中 100℃烘干至恒重，计算土壤样品的含水率；

（3）用粉碎机粉碎样品，粉碎过的样品过 100 目筛，将筛好的样品充分混合，按照四分法取 100~200g，装入封口袋内密封待用。

3.3.5.3 地表水沉积物样品的采集和预处理

沉积物采样位置与对应的水体采样断面保持一致，浅层部位的沉积物使用土壤采样器直接进行采集，深水部位的沉积物使用斗式采泥器进行采集。斗式采泥器使用方法如下：（1）采样前首先测量水深；（2）将斗式采泥器匀速放至距水底 3~5m，再全速放到水底，拉动采泥器钢丝绳，采集表层样品；（3）慢速提升采泥器，离底后快速提升至水面；（4）将采泥器上部的积水缓慢倒出后，取出内部的样品。采集上的样品放入盘中以后静置一段时间，除去上面的澄清液和异物，将样品中粒度较细（直径小于 2 mm）的成分装入封口袋内，注明样品名称、编号和采样时间等信息，再装入布袋中。每个样品采样量不少于 500g。采样器用净水洗净后可用于后续采样。样品统一装箱后，专车运回实验室。

沉积物样品的预处理方案与土壤相同。

3.3.6 生物样品的采集与预处理

生物样品使用碳化灰化法进行处理。将样品切碎，放入干燥箱中 200℃烘干，称样品干重并计算干鲜比。将烘干后的样品碾碎，放入炭化炉中在 450℃以下进行碳化，碳化过程中要经常翻动样品，使其受热均匀，防止底面温度过高，待样品全部变成焦炭状且无黑烟冒出时，认为碳化完全。

将碳化好的样品移入马弗炉内在 450℃下灰化，同时打开马弗炉的通风孔加速灰化速度，直至灰分呈白色或灰白色疏松颗粒状为止。灰样冷却至室温后转移至封口袋内，密封称重，计算灰鲜比。

测量 ^{3}H 的样品直接取鲜样进行放化处理，不进行碳化灰化。

3.4 样品运输

由于现场离实验室较远，本次调查过程中采集的水样、土壤、沉积物和生物样品采用专车公路运输回实验室。水样需根据塑料桶的尺寸做好木架，防止水桶

发生倾倒或遗漏；土壤样品统一放到箱子中，防止丢失；生物样品应冷冻后置于泡沫箱中，防止腐败。应关注样品运输和保存环境条件，避免样品交叉污染。

3.5 分析方法

3.5.1 气溶胶 ^{7}Be 的分析测量

测量方法依据标准 HJ 1149-2020《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》进行分析。测量仪器均为高纯锗γ谱仪。

气溶胶样品将多张滤膜的受尘面向上依次叠加整齐后平放在工作台上进行折叠，折叠后的滤膜放入压膜机中，用 10t 压力连续压实 2min，取出压好的滤膜，装入Φ75mm×10mm 样品盒内密封进行测量。

样品测量时间一般为 80000s，样品中核素活度的计算公式如下：

$$A = \frac{\frac{Area}{t} - n}{\lambda \cdot \eta \cdot m}$$

式中：A——样品中放射性核素的活度浓度，Bq/m^3；

Area——核素在该能量处的净峰面积；

t——样品测量时间，s；

n——本底计数率；

λ——核素在该能量处的发射概率；

η——核素在该能量处的探测效率；

m——样品体积，m^3。

3.5.2 环境介质中总 α、总 β 分析

3.5.2.1 气溶胶中总 α、总 β 分析

测量方法参考标准 HJ 898-2017《水质总α放射性的测定 厚源法》和 HJ 899-2017《水质总β放射性的测定 厚源法》进行分析，采用流气式低本底 α/β 测量仪进行测量。

（1）将气溶胶样品剪碎置于 100mL 已称重的瓷坩埚内，在 350℃的马弗炉内灼烧，放入干燥器内冷却，冷却后准确称量，根据和瓷坩埚的差重求得灼烧后残渣的总质量；

（2）将残渣全部转移到研钵中，研磨成细粉末状，准确称取 0.2000g-

0.2005g的残渣粉末到测量盘中央，用滴管吸取无水乙醇，滴到残渣粉末上，使浸润在无水乙醇中的残渣粉末均匀平铺在测量盘内，可用一端平整的玻璃棒辅助铺平，摇晃且不能摇到边沿和测量盘外，然后将测量盘在烘箱内不超过 80℃烘干或自然晾干，制成样品源；

（3）样品源烘干或晾干后应立即在低本底 α、β 测量仪上测量计数率 n_S（cpm）并记录计数时刻，时间间隔和日期。

（4）按下式计算气溶胶样品中总α、β放射性浓度：

$$A = \frac{(n_s - n_b) \cdot (W_2 - W_1) \cdot R}{60 \cdot E \cdot W \cdot V}$$

式中：

A——样品中总 α、总 β 的放射性浓度，Bg/m^3；

n_s——样品的总 α、总 β 计数率，cpm；

n_b——仪器本底的总 α、总 β 计数率，cpm；

W_2——瓷坩埚+样品残渣重，g；

W_1——空瓷坩埚重，g；

R——校正系数，气溶胶校正系数为 1；

E——探测效率；

W——测量用量，g；

V——样品总量，m^3;

60——将 dpm 变为 Bq 的转换系数。

3.5.2.2 水中总 α、总 β 分析

测量方法依据标准 HJ 898-2017《水质总 α 放射性的测定 厚源法》和 HJ 899-2017《水质总 β 放射性的测定 厚源法》进行分析，采用流气式低本底 α/β 测量仪进行测量。

（1）取 2~5L 水样于烧杯中，加入一定量的浓硫酸（若需要，可加入适量氯化钙固体），置于电热板上缓缓加热，蒸发浓缩至一定体积后，将样品转入已称重的坩埚中；

（2）将坩埚置于红外灯下将样品烤干，转入马弗炉 350℃灼烧 1h，置于干燥器中冷却至室温并称重；

（3）样品全部转入研钵内，研细并确保均匀，准确称取 0.2g 于样品盘中，用无水乙醇铺成厚薄均匀的样品源，红外灯下烤干；

（4）在α、β测量仪上总 α、β计数道上测量样品源的计数，计算样品中总 α、β放射性浓度；

（5）按下式计算水样品中总α、β放射性浓度：

$$C = \frac{W_t(N_x - N_0)}{60 \cdot W_X \cdot E \cdot V}$$

式中：

C----水中总 α 或总β放射性浓度，Bq/L；

E ----仪器对 α 或β的探测效率，%；

W_t----浓缩后残渣的总重量，g；

W_x----样品源的重量，g；

N_x----样品源的计数率，cpm；

N_0----仪器的本底计数率，cpm；

V----制样所用样品溶液体积，L。

3.5.2.3 土壤/沉积物中总 α、总 β 分析

测量方法参考标准 HJ 898-2017《水质总 α 放射性的测定 厚源法》和 HJ 899-2017《水质总 β 放射性的测定 厚源法》进行分析，采用流气式低本底 α/β 测量仪进行测量。

（1）经过预处理后的土壤/沉积物等固体物样品在铺盘前在烘箱中105℃烘干恒重后，用研钵研磨，研磨成细粉末状，称取不少于 0.1A mg 的样品到测量盘中中央，用滴管吸取无水乙醇，滴到残渣粉末上，使浸润在无水乙醇中的残渣粉末均匀平铺在测量盘内，可用一端平整的玻璃棒辅助铺平，摇晃且不能摇到边沿和测量盘外，然后将测量盘在烘箱内不超过 80℃烘干或自然晾干，制成样品源。

（2）样品源晾干后应立即在低本底 α、β 测量仪上测量计数率，并记录计数时刻，时间间隔和日期。

（3）按下式计算土壤/沉积物样品中总α、β放射性浓度：

$$A = \frac{n_s - n_b}{60 \times E \times W} \times 1000$$

式中：

A_α——土壤/沉积物等固体物样品中总α、总 β 的浓度，Bq/kg；

E——探测效率；

n_s——样品源的计数率，cpm；

n_b——仪器的本底计数率，cpm；

W——土壤/沉积物等固体物样品的测量取样品量，g；

60——将 dpm 变为 Bq 的转换系数；

1000——g 换算到 kg。

3.5.2.4 生物中总 α、总 β 分析

测量方法参考标准 HJ 898-2017《水质总 α 放射性的测定 厚源法》和 HJ 899-2017《水质总 β 放射性的测定 厚源法》进行分析，采用流气式低本底 α/β 测量仪进行测量。

（1）将灰化后得到的生物灰在烘箱中 105℃烘干至恒重，粉碎到 100 目。

（2）将样品全部转移到研钵中，研磨成细粉末状，准确称取 0.2000g-0.2005g 的残渣粉末到测量盘中央，用滴管吸取无水乙醇，滴到残渣粉末上，使浸润在无水乙醇中的残渣粉末均匀平铺在测量盘内，可用一端平整的玻璃棒辅助铺平，摇晃且不能摇到边沿和测量盘外，然后将测量盘在烘箱内不超过 80℃烘干或自然晾干，制成样品源。

（3）样品源烘干或晾干后应立即在低本底 α、β 测量仪上测量计数率 n_S（cpm）并记录计数时刻，时间间隔和日期。

（5）按下式计算生物样品中总α、β放射性浓度：

$$A=\frac{(n_s-n_b)\cdot X}{60\cdot E\cdot W}\cdot 1000$$

式中：

A——生物灰中总 α、总 β 的放射性浓度，Bg/kg；

n_s——样品的总 α、总 β 计数率，cpm；

n_b——仪器本底的总 α、总 β 计数率，cpm；

X——生物灰的灰鲜（干）比；

E——探测效率；

W——测量用量，g；

60——将 dpm 变为 Bq 的转换系数。

3.5.3 环境介质中 ^3H 活度浓度分析

3.5.3.1 空气中 ^3H 的分析

（1）干燥剂吸附样品的解吸

将现场带回的吸湿硅胶放入高温管式电炉内，加热解吸。加热温度保持在120℃～150℃之间。

（2）解吸出的水按下节“水中 ^3H 的分析测定”步骤分析测定。

（3）分析结果计算

空气中氚的放射性浓度公式为：

$$C_a = \frac{(n_s - n_b) \cdot m_2}{60 \cdot E \cdot m_1 \cdot K \cdot V}$$

式中：C_a----空气中 HTO 浓度，Bq/m^3；

n_s----样品总计数率，cpm；

n_b----本底计数率，cpm；

m_1----液闪制样水重，g；

m_2----解析的水重，g；

E----仪器对氚的探测效率；

K----电解浓集倍数；

V----空气体积，m^3。

3.5.3.2 水中 ^3H 的分析

（1）取 300mL 水样，放入 500mL 蒸馏烧瓶中，加入 1g 高锰酸钾，加热蒸馏，将收集到的蒸馏液进行二次蒸馏；

（2）将 250mL 的二次蒸馏液分别加入电解浓集装置的 2 个 500mL 的储液瓶中，接通电解系统的半导体致冷器电源，在电解过程中注意检查电解电流与半导体冷阱的温度指示。电解的时间约为 3 天。当电解池的液面下降到输液管三通交叉点位置时，停止电解。收集浓集液，称重，并做好记录；

（3）取 8mL 浓集液，加入 12mL 闪烁液，振荡混合均匀后放入仪器内测量；

（4）分析结果的计算

计算水中氚的放射性浓度公式为：

$$C = \frac{(n_s - n_b) \cdot 1000}{60 \cdot V_m \cdot K \cdot E}$$

$$K = \frac{N_f}{N_i}$$

式中：C----水中氚的放射性活度，Bq/L；

n_s----样品总计数率，cpm；

n_b----本底计数率，cpm；

V_m----测量时所用水样体积，mL；

K----电解前后标样氚浓度比；

N_f----电解后标记氚水的活度浓度，cpm/mL；

N_i----电解前标记氚水的活度浓度，cpm/mL；

E----液闪谱仪对 ^3H 的计数效率，%。

3.5.3.3 土壤/沉积物中 ^3H 的分析

（1）土壤等固体物经剔异物后，需要过筛的样品过筛，取 20.0~100.0g 土壤等固体样品放于燃烧舟，将燃烧舟放入氧化燃烧装置，关闭阀门。

（2）打开气路，打开高温氧化区和高温催化剂区的开关，通入氧气和氮气，高温氧化区程序升温（最高温度至 800℃），用惰性气体氮气将氧化产生的 H_2O 吹出，水分通过冷阱收集于水分吸收瓶内。

（3）称量水分吸收瓶内冷凝的水分质量，用氢氧化钠调节 pH 至 7 左右，转入蒸馏烧瓶内，加入 0.1g 高锰酸钾，常压蒸馏，收集馏出液供氚分析测定。

（4）取 8.00g 纯化后的水和 12mL 闪烁液混合于聚乙烯计数瓶中，旋紧瓶盖，混合均匀后用酒精棉擦拭计数瓶瓶身及瓶底，放入液闪谱仪中避光后测量。

（5）按下式计算土壤等固体样品中氚的活度浓度：

$$A_2 = \frac{(N_X - N_b)\cdot 1000\cdot V}{60\cdot E\cdot W\cdot Vt\cdot Y}$$

式中：A_2—土壤等固体样品中氚放射性活度浓度，Bq/kg；

N_X—样品计数率，min^{-1}；

N_b—本底计数率，min^{-1}；

E—探测效率，%；

W—烧样样品重量，g；

Y—氧化燃烧装置对土壤等固体样品中氢的回收率，%；

V—烧出水重/捕集水重，(g)；

Vt—液闪测样体积(mL)，g。

3.5.3.4 生物中有机氚、组织自由水氚的分析

（1）称取 300~500g 生物鲜样，装入生物样品真空冷冻装置内。真空冷冻至样品恒重。分别收集冻干的生物样品干样和冻出的液态水并称量。用生物样品电动粉碎机磨粉后备用。

（2）量取 200ml 液态水装入蒸馏烧瓶内，按每升样品 1.0g 的比例加入高锰酸钾，接入蛇形冷凝管，常压蒸馏气去前 10ml 馏出液，用电导率仪测量馏出液电导率。用棕色磨口玻璃瓶收集电导率低于 10μS/cm 的中间部分馏出液，密封保存备用。

（3）称取 0.50~25.00g 生物干样或有机物样品于燃烧舟中，将燃烧舟置于管式炉的高温氧化区，关闭阀门，打开气路，打开高温氧化区和高温催化剂区的开关，通入氧气和氮气，高温氧化区程序升温（最高温度至 750℃），用惰性气体氮气将氧化产生的 H_2O 吹出，水分通过冷阱收集于水分吸收瓶内。称量冷凝吸收后的水分质量，用氢氧化钠调节 pH 至 6~7 左右，转入蒸馏烧瓶内，加入 0.1g 高锰酸钾，常压蒸馏，收集馏出液供氚分析测定。

（4）取 8.00g 纯化后的水和 12mL 闪烁液混合于聚乙烯计数瓶中，旋紧瓶盖，混合均匀后用酒精棉擦拭计数瓶瓶身及瓶底，放入液闪谱仪中避光后测量。

（5）按照下式计算生物样品中组织自由水氚的活度浓度：

$$C_{TFWT} = \frac{(N_X - N_b) \times w}{60 \times E_H \times m_H} \times 1000$$

式中：C_{TFWT}—生物样品中组织自由水氚放射性活度浓度，Bq/kg；

N_X—样品计数率，min^{-1}；

N_b—本底计数率，min^{-1}；

E_H—探测效率，%；

w—生物样品的含水率，%；

m_H—液闪测量水重，g。

（6）按照下式计算生物样品中有机氚的活度浓度：

$$C_{OBT} = \frac{(N_X - N_b) \times (1 - w) \times m_{OBT}}{60 \times E_H \times m_H \times M \times Y_H} \times 1000$$

式中：C_{OBT}—生物样品中有机 ^3H 放射性活度浓度，Bq/kg；

N_X—样品计数率，min^{-1}；

N_b—本底计数率，min^{-1}；

E_H—探测效率，%；

M—烧样样品重量，g；

Y_H—氧化燃烧装置对生物干样及有机物中氢的回收率，%

w—生物样品的含水率，%；

m_{OBT}—烧出水重，g；

m_H—液闪测量水重，g。

3.5.4 各分析项目的探测下限

探测下限是表示测量方法（或装置）所能发现的最小期望放射性水平，即当测量到的计数值≥探测下限时以（1-β）的把握推断样品中含有的最小期望放射性水平。*LLD* 的计算公式为：

$$LLD = \frac{4.66}{\varepsilon \cdot \eta \cdot Y \cdot W}\sqrt{\frac{n_b}{t_b}}$$

式中：n_b 为 t_b 时间内的本底计数率，ε为探测效率，η为探测核素发射该能量的几率，Y为化学回收率，W为测量样品的重量或体积。

本报告提供的探测下限是特定的具体条件下的估计值。其主要条件是：α=β=0.05；在低水平计数时样品加本底的总计数与本底计数相近；样品测量时间与本底测量时间应足够长。

各环境介质的γ谱测量探测下限和放化分析方法探测下限计算方法如下：

（1）气溶胶样品中 ^{7}Be 探测下限根据下式计算：

$$LLD = \frac{4.66 \cdot \sqrt{N_b}}{\varepsilon \cdot \eta \cdot t \cdot m}\text{，Bq/kg}$$

式中：

N_b----测量时间为 *t* 时的本底计数；

ε----γ 谱仪对核素发射某一能量 γ 光子的探测效率；

η----核素发射该能量光子的几率；

t----测量时间，s；

m----被测样品的体积，m^3。

（2）氚的探测下限按下式计算：

$$LLD = \frac{4.66 \cdot \sqrt{\frac{n_b}{t}} \cdot m_2}{60 \cdot E \cdot K \cdot m_1 \cdot V};$$

式中：

n_b----本底计数率，cpm；

t----样品测量时间，min；

m_1----液闪制样水重，g；

m_2----解析的水重，g；

E----仪器对氚的探测效率；

K----电解浓集倍数；

V----样品量。

（3）总 α、总 β 方法探测下限的计算公式为：

$$LLD = \frac{4.66}{\varepsilon \cdot \eta \cdot Y \cdot W} \sqrt{\frac{n_b}{t}}$$

式中：

n_b----t 时间内的本底计数率；

ε ----探测效率；

η ----为探测核素发射该能量的几率；

Y ----化学回收率；

W----为测量样品的重量或体积。

根据上式计算出的探测下限的结果见表 3.5-1。

表 3.5-1 各类样品分析方法的探测下限

序号	调查对象	样品用量	分析核素	测量时间	探测限
1	气溶胶	1000m^3	总 α	1000min	15μBq/m^3
		1000m^3	总 β	1000min	5μBq/m^3
		10000m^3	γ 谱分析	80000s	^{7}Be：0.1mBq/m^3
2	空气	10m^3	^{3}H	1000min	8.0mBq/m^3
3	土壤、地表水沉积物	0.2g	总 α	1000min	2.0mBq/L
		0.2g	总 β	1000min	5.0mBq/L
		/	^{3}H	1000min	0.15Bq/kg
4	地表水	3L	总 α	600min	2.0mBq/L
		3L	总 β	600min	5.0mBq/L
		250mL	^{3}H	1000min	0.14Bq/L
5	生物	0.2g 灰	总 α	1000min	66Bq/kg 灰
		0.2g 灰	总 β	1000min	21Bq/kg 灰
		20g 鲜样	有机氚	400min	1.10Bq/kg 鲜
		/	自由水氚	400min	1.84Bq/kg 鲜

3.6 仪器设备

本次调查中所使用的仪器设备清单见表 3.6-1。

表 3.6-1 使用的仪器设备清

序号	仪器设备名称	型号规格	数量	用途
1	HPGeγ 谱仪	GR3019	1	γ 谱测量
2	低本底 α/β 测量仪	LB770	2	总放测量
3	低水平液闪谱仪	Quantulus 1220	1	^{3}H 测量
4	低水平液闪谱仪	Tri-Carb 3170TR/SL	1	
5	便携式 X-γ 剂量率仪	RP3000B	1	γ 剂量率测量
6	大流量 TSP 采样器	2031	5	气溶胶采样
7	空气氚采样器	定制	1	空气氚采样

5 质量保证

5.1 质量管理体系

中国辐射防护研究院积极推行和开展质量管理，建立了质量管理体系。1994年10月通过了核工业总公司质量保证体系考核，1995年5月取得《军工产品质量保证体系合格书》；在此基础上，本院不断提高质量保证能力，根据本院承担的科研任务、专业方向及能够特点，全面贯彻ISO9000族标准，从2000年开始，先后通过了GB/T 19001-1994、GB/T 19001-2000质量体系认证；在本院深化改革过程中，为不断改进、完善本院质量体系，按照 GB/T 19001-2008-ISO9001:2008《质量管理体系要求》标准要求，对科研、技术服务、研制产品全过程进行有效控制，以保证符合顾客与使用的法律法规要求，增强顾客满意，并适应市场经济的发展，为核工业和国民经济建设做出更大贡献。

中辐院有着完善的质量保证管理体系，已通过 GB/T19001-2000-ISO 9001：2000 标准的认证，并获得相关证书；拥有经国防科学技术委员会组织认定计量认可评定的《计量认可证书》，可提供计量器具的计量认可；拥有经国家环境评价与监测中心颁发的《建设项目环境影响评价资格证书》（甲级），业务范围包括核反应堆及核技术应用。

中辐院通过了兴原认证中心有限公司 GB/T 19001-2008-ISO 9001:2008 质量体系认证。该体系适用于环境影响评价、核安全评价与辐射防护等相关专业内容。具备完善的质量管理组织机构和管理程序与质量手册。

根据中辐院质量管理体系的要求，我院项目在合同签订后即编制项目质量保证大纲，经安全质量部审核通过后由院长批准发布，项目组成员严格按照质保大纲要求，履行各自的质量职责；安全质量部专职人员 8 人，其中高级职称 3 人、中级职称 4 人，初级职称 1 人，负责全院质量管理体系运行和管理；下设所级质量管理小组，人员 3-5 人不等，负责质量体系在各所的运行、开展各所项目的日常监督检查，并将检查情况报安全质量部。

中国辐射防护研究院核工业太原环境分析测试中心设有质量管理办公室，共有 3 人，由负责质量的副主任进行领导，有专职质量管理员。在本项目中主要负

责项目现场和实验室分析过程的质量监督，人员能力的的评定等，对院质量体系审查提出的意见进行整改。

5.1.1 中辐院质量程序

（1）程序文件

中国辐射防护研究院《质量、环境和职业健康安全程序文件》（Q/G/E/S•CX•A/2-2025）。

（2）主要管理程序

中国辐射防护研究院质量体系主要管理程序包括：

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 01　组织环境控制管理程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 02　相关方控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 03　各部门、各类人员职责

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 04　风险和机遇管理控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 05　环境因素识别和评价程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 06　危险源辨识、风险评价和确定控制措施程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 07　法律法规和其他要求控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 08　目标管理与控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 09　人力资源控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 10　设备、设施与过程运行环境控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 11　监视和测量资源控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 12　知识管理控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 13　文件控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 14　记录控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 15　产品和服务要求控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 16　设计和开发控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 17　软件管理控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 18　新产品试制控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 19　技术状态管理控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 20　外部提供的过程控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 21　生产和服务提供过程控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 22　监视测量控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 23　不合格输出控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 24　产品售后服务控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 25　顾客满意测评程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 26　质量信息及数据分析控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 27　环境管理体系运行控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 28　职业健康安全管理体系运行控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 29　应急准备和响应控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 30　合规性评价程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 31　内部审核控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 32　质保监察控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 33　管理评审控制程序

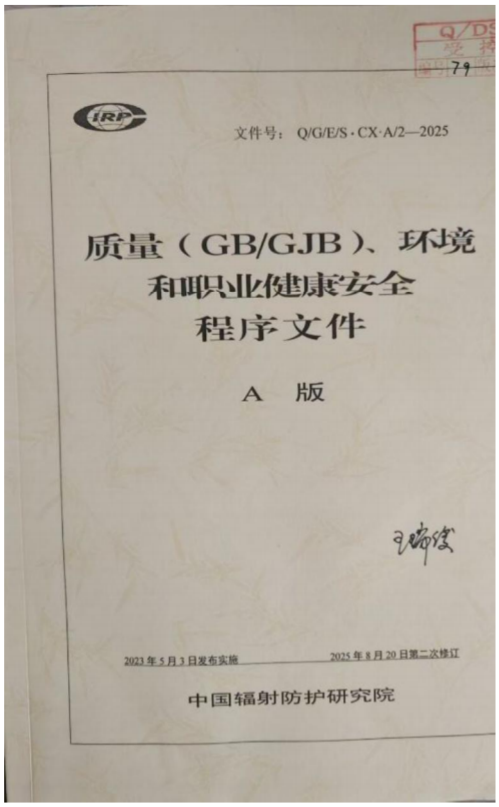
Q/G/E/S•CX•A/2-2025 34　质量计划/质量保证大纲控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 35　改进、纠正和纠正措施控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 36　双归零管理控制程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 37　质量诚信及防造假管理程序

Q/G/E/S•CX•A/2-2025 38　科研项目质量管理程序



Q/DS
受控
79

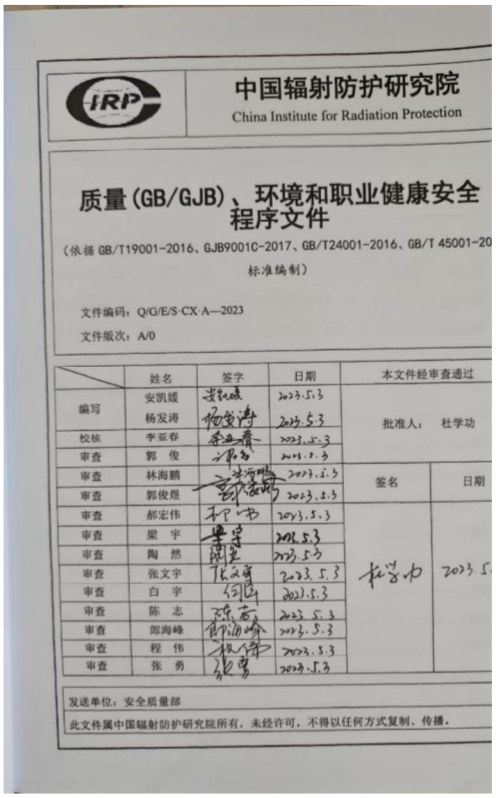
文件号：Q/G/E/S·CX·A/2—2025

质量（GB/GJB）、环境和职业健康安全程序文件

A 版

2023年5月3日发布实施　　2025年8月20日第二次修订

中国辐射防护研究院



中国辐射防护研究院
China Institute for Radiation Protection

质量(GB/GJB)、环境和职业健康安全程序文件

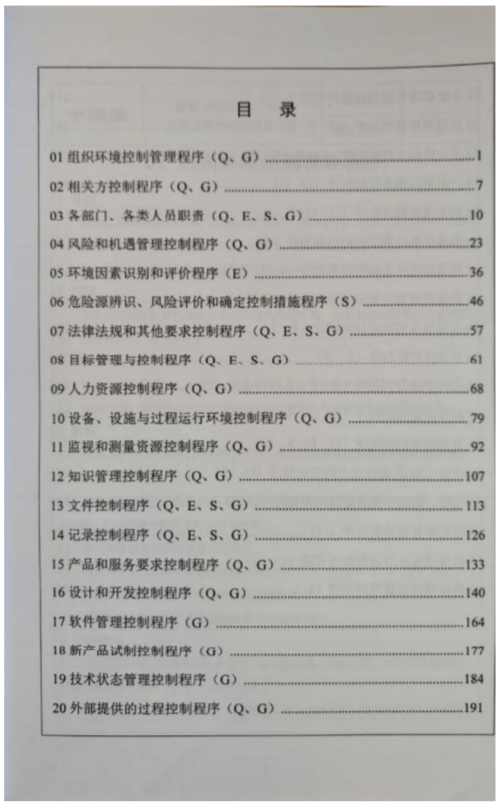
（依据 GB/T19001-2016、GJB9001C-2017、GB/T24001-2016、GB/T 45001-20
标准编制）

文件编码：Q/G/E/S·CX·A—2023
文件版次：A/0

	姓名	签字	日期	本文件经审查通过	
编写	安凯媛		2023.5.3		
	杨发涛		2023.5.3	批准人： 杜学功	
校核	李亚春		2023.5.3		
审查	郭 俊		2023.5.3		
审查	林海鹏		2023.5.3	签名	日期
审查	郭俊煜		2023.5.3		
审查	郝宏伟		2023.5.3		
审查	梁 宇		2023.5.3		
审查	陶 然		2023.5.3		
审查	张文宇		2023.5.3		
审查	白 宇		2023.5.3		
审查	陈 志		2023.5.3		
审查	郎海峰		2023.5.3		
审查	程 伟		2023.5.3		
审查	张 勇		2023.5.3		

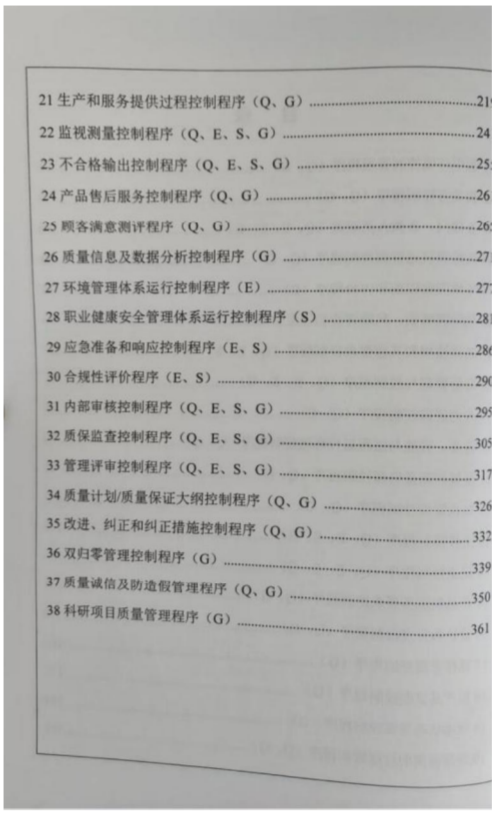
发送单位：安全质量部

此文件属中国辐射防护研究院所有，未经许可，不得以任何方式复制、传播。



目 录

01 组织环境控制管理程序（Q、G）.....1
02 相关方控制程序（Q、G）.....7
03 各部门、各类人员职责（Q、E、S、G）.....10
04 风险和机遇管理控制程序（Q、G）.....23
05 环境因素识别和评价程序（E）.....36
06 危险源辨识、风险评价和确定控制措施程序（S）.....46
07 法律法规和其他要求控制程序（Q、E、S、G）.....57
08 目标管理与控制程序（Q、E、S、G）.....61
09 人力资源控制程序（Q、G）.....68
10 设备、设施与过程运行环境控制程序（Q、G）.....79
11 监视和测量资源控制程序（Q、G）.....92
12 知识管理控制程序（Q、G）.....107
13 文件控制程序（Q、E、S、G）.....113
14 记录控制程序（Q、E、S、G）.....126
15 产品和服务要求控制程序（Q、G）.....133
16 设计和开发控制程序（Q、G）.....140
17 软件管理控制程序（G）.....164
18 新产品试制控制程序（G）.....177
19 技术状态管理控制程序（G）.....184
20 外部提供的过程控制程序（Q、G）.....191



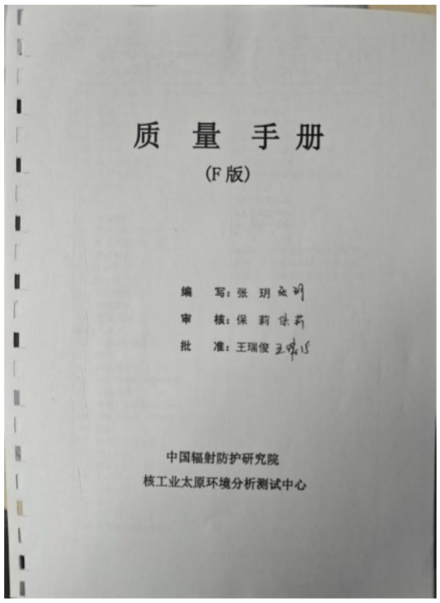
21 生产和服务提供过程控制程序（Q、G）.....21
22 监视测量控制程序（Q、E、S、G）.....24
23 不合格输出控制程序（Q、E、S、G）.....25
24 产品售后服务控制程序（Q、G）.....26
25 顾客满意测评程序（Q、G）.....26
26 质量信息及数据分析控制程序（G）.....27
27 环境管理体系运行控制程序（E）.....27
28 职业健康安全管理体系运行控制程序（S）.....28
29 应急准备和响应控制程序（E、S）.....28
30 合规性评价程序（E、S）.....29
31 内部审核控制程序（Q、E、S、G）.....29
32 质保监查控制程序（Q、E、S、G）.....30
33 管理评审控制程序（Q、E、S、G）.....31
34 质量计划/质量保证大纲控制程序（Q、G）.....32
35 改进、纠正和纠正措施控制程序（Q、G）.....33
36 双归零管理控制程序（G）.....33
37 质量诚信及防造假管理程序（Q、G）.....35
38 科研项目质量管理程序（G）.....36

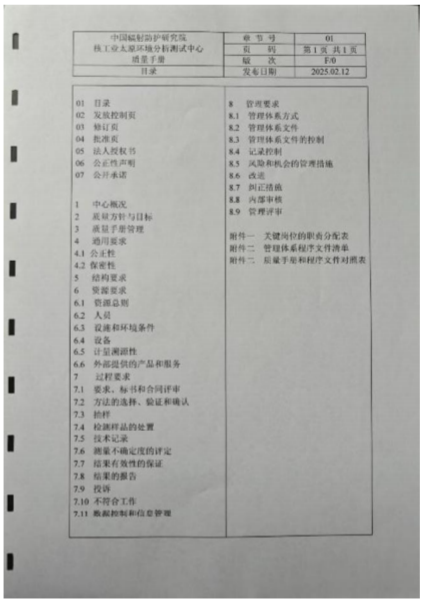
5.1.2 中辐院分析测试中心质量管理手册和程序

中国辐射防护研究院核工业太原环境分析测试中心通过了国家级 CMA 和 CNAS 的认证，建立了完善的质量手册、程序文件和作业指导书，质量体系完善。

（1）质量手册

中国辐射防护研究院核工业太原环境分析测试中心 F 版《质量手册》（QM/F/2025）。

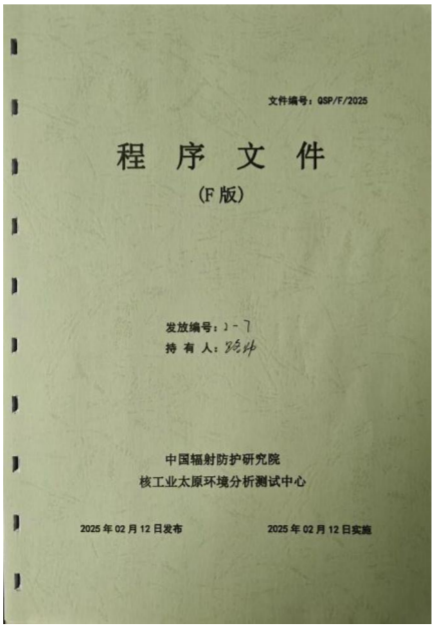

质 量 手 册
(F 版)
编 写：张 玥
审 核：保 莉
批 准：王瑞俊
中国辐射防护研究院
核工业太原环境分析测试中心

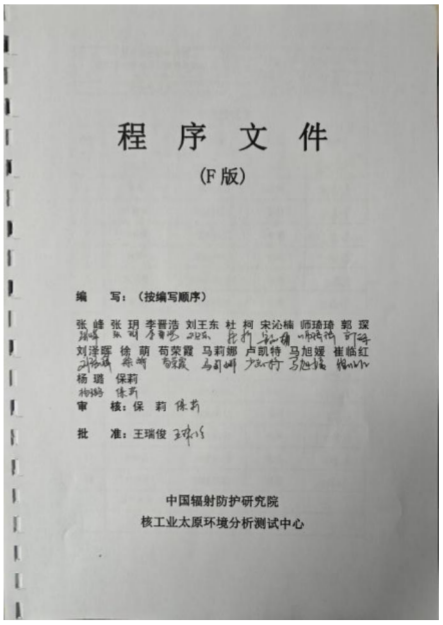


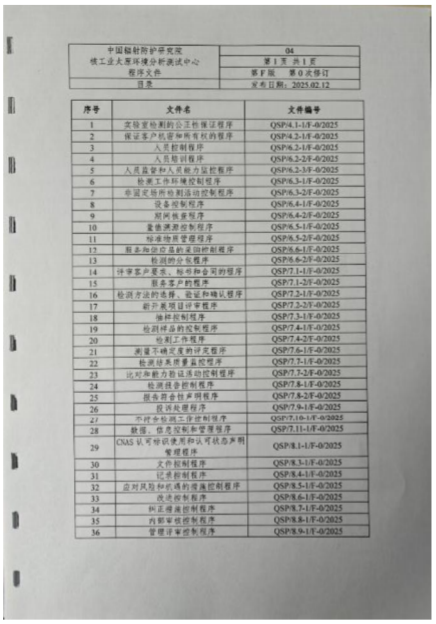
中国辐射防护研究院 核工业太原环境分析测试中心 质量手册 目录
章节号 01
页码 第1页 共1页
版次 F/0
发布日期 2025.02.12
01 目录
02 发放控制页
03 修订页
04 批准页
05 法人授权书
06 公正性声明
07 公开承诺
1 中心概况
2 质量方针与目标
3 质量手册管理
4 通用要求
4.1 公正性
4.2 保密性
5 结构要求
6 资源要求
6.1 资源总则
6.2 人员
6.3 设施和环境条件
6.4 设备
6.5 计量溯源性
6.6 外部提供的产品和服务
7 过程要求
7.1 要求、标书和合同评审
7.2 方法的选择、验证和确认
7.3 抽样
7.4 检测样品的处置
7.5 技术记录
7.6 测量不确定度的评定
7.7 结果有效性的保证
7.8 结果的报告
7.9 投诉
7.10 不符合工作
7.11 数据控制和信息管理
8 管理要求
8.1 管理体系方式
8.2 管理体系文件
8.3 管理体系文件的控制
8.4 记录控制
8.5 风险和机会的管理措施
8.6 改进
8.7 纠正措施
8.8 内部审核
8.9 管理评审
附件一 关键岗位的职责分配表
附件二 管理体系程序文件清单
附件二 质量手册和程序文件对照表

（2）程序文件

中国辐射防护研究院核工业太原环境分析测试中心 F 版《程序文件》（QSP/F/2025）。


文件编号：QSP/F/2025
程 序 文 件
(F 版)
发放编号：1-7
持 有 人：
中国辐射防护研究院
核工业太原环境分析测试中心
2025 年 02 月 12 日发布 2025 年 02 月 12 日实施


程 序 文 件
(F 版)
编 写：（按编写顺序）
张 峰 张 玥 李晋浩 刘王东 杜 柯 宋沁楠 师瑞瑞 郭 琛
刘泽哥 徐 萌 苟荣霞 马莉娜 卢凯特 马旭媛 崔临红
杨 璐 保莉
审 核：保 莉 张玥
批 准：王瑞俊
中国辐射防护研究院
核工业太原环境分析测试中心

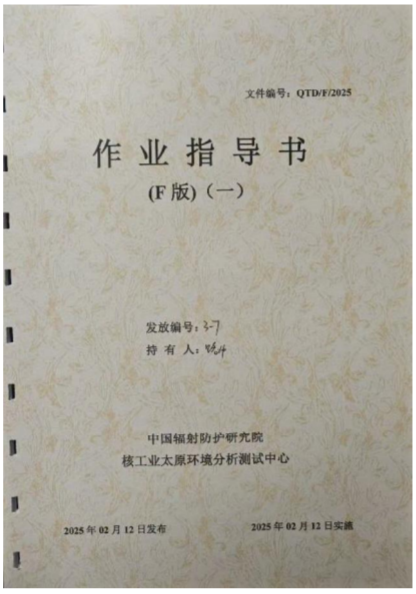


中国辐射防护研究院 核工业太原环境分析测试中心 程序文件 目录	04 第 1 页 共 1 页 第 F 版 第 0 次修订 发布日期：2025.02.12

序号	文件名	文件编号
1	实验室检测的公正性保证程序	QSP/4.1-1/F-0/2025
2	保证客户机密和所有权的程序	QSP/4.2-1/F-0/2025
3	人员控制程序	QSP/6.2-1/F-0/2025
4	人员培训程序	QSP/6.2-2/F-0/2025
5	人员监督和人员能力监控程序	QSP/6.2-3/F-0/2025
6	检测工作环境控制程序	QSP/6.3-1/F-0/2025
7	非固定场所检测活动控制程序	QSP/6.3-2/F-0/2025
8	设备控制程序	QSP/6.4-1/F-0/2025
9	期间核查程序	QSP/6.4-2/F-0/2025
10	量值溯源控制程序	QSP/6.5-1/F-0/2025
11	标准物质管理程序	QSP/6.5-2/F-0/2025
12	服务和供应品的采购控制程序	QSP/6.6-1/F-0/2025
13	检测的分包程序	QSP/6.6-2/F-0/2025
14	评审客户要求、标书和合同的程序	QSP/7.1-1/F-0/2025
15	服务客户的程序	QSP/7.1-2/F-0/2025
16	检测方法的选择、验证和确认程序	QSP/7.2-1/F-0/2025
17	新开展项目评审程序	QSP/7.2-2/F-0/2025
18	抽样控制程序	QSP/7.3-1/F-0/2025
19	检测样品的控制程序	QSP/7.4-1/F-0/2025
20	检测工作程序	QSP/7.4-2/F-0/2025
21	测量不确定度的评定程序	QSP/7.6-1/F-0/2025
22	检测结果质量监控程序	QSP/7.7-1/F-0/2025
23	比对和能力验证活动控制程序	QSP/7.7-2/F-0/2025
24	检测报告控制程序	QSP/7.8-1/F-0/2025
25	报告符合性声明程序	QSP/7.8-2/F-0/2025
26	投诉处理程序	QSP/7.9-1/F-0/2025
27	不符合检测工作控制程序	QSP/7.10-1/F-0/2025
28	数据、信息控制和管理程序	QSP/7.11-1/F-0/2025
29	CMA 认可标识使用和认可状态声明管理程序	QSP/8.1-1/F-0/2025
30	文件控制程序	QSP/8.3-1/F-0/2025
31	记录控制程序	QSP/8.4-1/F-0/2025
32	应对风险和机遇的措施控制程序	QSP/8.5-1/F-0/2025
33	改进控制程序	QSP/8.6-1/F-0/2025
34	纠正措施控制程序	QSP/8.7-1/F-0/2025
35	内部审核控制程序	QSP/8.8-1/F-0/2025
36	管理评审控制程序	QSP/8.9-1/F-0/2025

（3）作业指导书

中国辐射防护研究院核工业太原环境分析测试中心 F 版《作业指导书》（QTD/F/2025）。



文件编号：QTD/F/2025

作 业 指 导 书

(F 版)（一）

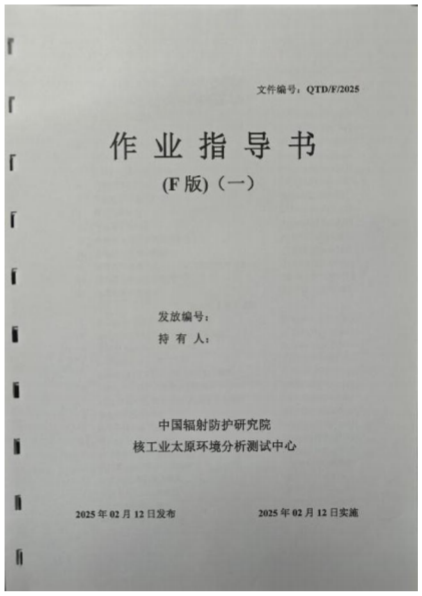
发放编号：3-7

持 有 人：晓升

中国辐射防护研究院

核工业太原环境分析测试中心

2025 年 02 月 12 日发布　　2025 年 02 月 12 日实施



文件编号：QTD/F/2025

作 业 指 导 书

(F 版)（一）

发放编号：

持 有 人：

中国辐射防护研究院

核工业太原环境分析测试中心

2025 年 02 月 12 日发布　　2025 年 02 月 12 日实施

作业指导书目录

一、管理工作制度

1	实验室管理制度	QTD/GL01/F-0/2025
2	公章管理制度	QTD/GL02/F-0/2025
3	分析测试结果审核制度	QTD/GL03/F-0/2025
4	数据管理制度	QTD/GL04/F-0/2025
5	实验室仪器设备管理制度	QTD/GL05/F-0/2025
6	内部工作文件制定、颁发和修改制度	QTD/GL06/F-0/2025
7	实验室人员健康管理制度	QTD/GL07/F-0/2025
8	样品管理制度	QTD/GL08/F-0/2025
9	气瓶室管理制度	QTD/GL09/F-0/2025
10	实验室内化学试剂使用管理制度	QTD/GL10/F-0/2025
11	实验室安全操作制度	QTD/GL11/F-0/2025
12	有毒有害废液及废旧化学试剂处理管理制度	QTD/GL12/F-0/2025
13	玻璃器皿清洗管理制度	QTD/GL13/F-0/2025
14	标准查新作业指导书	QTD/GL14/F-0/2025

二、仪器设备操作规程

1	Quantulus1220 液闪谱仪操作规程	QTD/GC01/F-0/2025
2	Tri-Carb3170TRSL 液闪谱仪操作规程	QTD/GC02/F-0/2025
3	FD-125 氡钍分析器操作规程	QTD/GC03/F-0/2025
4	LJ 型分光光度计操作规程	QTD/GC04/F-0/2025
5	Quantulus GCT 6220 液闪谱仪操作规程	QTD/GC05/F-0/2025
6	RGD-3D 型热释光剂量仪操作规程	QTD/GC06/F-0/2025
7	TE-2 型水中氚自动电解浓集装置操作规程	QTD/GC07/F-0/2025
8	氡取样器操作规程	QTD/GC08/F-0/2025
9	水中氚样品蒸馏操作规程	QTD/GC09/F-0/2025
10	碘-14 采样器操作规程	QTD/GC10/F-0/2025
11	α、β表面污染测量仪操作规程	QTD/GC11/F-0/2025
12	便携式 X-γ剂量率仪操作规程	QTD/GC12/F-0/2025
13	便携式γ能谱仪操作规程	QTD/GC13/F-0/2025
14	便携式测氡仪操作规程	QTD/GC14/F-0/2025
15	磁力搅拌器操作规程	QTD/GC15/F-0/2025
16	电磁辐射分析仪操作规程	QTD/GC16/F-0/2025
17	多功能声级计操作规程	QTD/GC17/F-0/2025
18	干扰测试接收机操作规程	QTD/GC18/F-0/2025
19	高纯锗γ谱仪操作规程	QTD/GC19/F-0/2025
20	高气压电离室操作规程	QTD/GC20/F-0/2025
21	双通道氡钍及子体测量仪操作规程	QTD/GC21/F-0/2025
22	选频式电磁辐射监测仪操作规程	QTD/GC22/F-0/2025
23	中子周围剂量当量率仪操作规程	QTD/GC23/F-0/2025
24	GR1018 型高纯锗γ谱仪操作规程	QTD/GC24/F-0/2025
25	气相色谱仪操作规程	QTD/GC25/F-0/2025
26	氮-85 自动监测仪操作规程	QTD/GC26/F-0/2025
27	洗瓶器的使用与维护操作规程	QTD/GC27/F-0/2025
28	马弗炉操作规程	QTD/GC28/F-0/2025
29	MUA 微量铀分析仪操作规程	QTD/GC29/F-0/2025
30	化学试剂溶液配制操作规程	QTD/GC30/F-0/2025
31	低本底α、β测量仪操作规程	QTD/GC31/F-0/2025
32	标准溶液的开溶及配制操作规程	QTD/GC32/F-0/2025
33	便携式测氡仪操作规程	QTD/GC33/F-0/2025
34	NexION 5000 电感耦合等离子体质联谱仪操作规程	QTD/GC34/F-0/2025
35	低本底测量装置的检分布检验作业指导书	QTD/GC35/F-0/2025
36	放射性测量装置质控图检验作业指导书	QTD/GC36/F-0/2025

三、不确定度评定

1	氡表面污染测量不确定度评定方法	QTD/PD01/F-0/2025
2	锶-90 分析的不确定度评定作业指导书	QTD/PD02/F-0/2025
3	废气中 3H 测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD03/F-0/2025
4	废水中 14C 测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD04/F-0/2025
5	尿中氚分析的不确定度评定作业指导书	QTD/PD05/F-0/2025
6	水中 226Ra 分析的不确定度评定作业指导书	QTD/PD06/F-0/2025
7	水中 3H 测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD07/F-0/2025
8	水中碘-14 不确定度评定作业指导书	QTD/PD08/F-0/2025
9	水中总铀测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD09/F-0/2025
10	铁-55、镍-63 测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD10/F-0/2025
11	土壤中总钍测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD11/F-0/2025
12	γ核素测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD12/F-0/2025
13	厂界噪声测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD13/F-0/2025
14	氧浓度测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD14/F-0/2025
15	非选频电磁辐射测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD15/F-0/2025
16	工频磁场测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD16/F-0/2025
17	工频电场测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD17/E-1/2019
18	土壤氡析出率测量不确定度评定方法	QTD/PD18/F-0/2025
19	无线电干扰测量不确定度评定作业指导书	QTD/PD19/F-0/2025
20	管道、桶、箱等容器中γ放射性核素分析不确定度评定作业指导书	QTD/PD20/F-0/2025
21	空气中氪-85 分析的不确定度评定方法	QTD/PD21/F-0/2025
22	气溶胶样品锶-90 分析不确定度评定方法作业指导书	QTD/PD22/F-0/2025
23	生物样品铯-137 分析的不确定度评定方法作业指导书	QTD/PD23/F-0/2025
24	α核素分析的不确定度评定作业指导书	QTD/PD24/F-0/2025
25	水中微量铀测定不确定度评定作业指导书	QTD/PD25/F-0/2025
26	土壤中锶-89 不确定度评定方法作业指导书	QTD/PD26/F-0/2025
27	水中氚测量不确定度评定方法作业指导书	QTD/PD27/F-0/2025

四、分析测量技术规范

1	废气中 3H 分析作业指导书	QTD/FX01/F-0/2025
2	废水中 14C 分析技术规范作业指导书	QTD/FX02/F-0/2025
3	固体废物中 14C 分析技术规范作业指导书	QTD/FX03/F-0/2025
4	水、土壤中锶-90 分析作业指导书	QTD/FX04/F-0/2025
5	水中碘-129 分析作业指导书	QTD/FX05/F-0/2025
6	水中镭-228 分析作业指导书	QTD/FX06/F-0/2025
7	水中碘-14 分析作业指导书	QTD/FX07/F-0/2025
8	铁-55、镍-63 分析作业指导书	QTD/FX08/F-0/2025
9	非选频电磁辐射测量作业指导书	QTD/FX09/F-0/2025
10	工频电磁场测量作业指导书	QTD/FX10/F-0/2025
11	无线电干扰测量作业指导书	QTD/FX11/F-0/2025
12	选频电磁辐射测量作业指导书	QTD/FX12/F-0/2025
13	管道、桶、箱等容器中γ放射性核素分析作业指导书	QTD/FX13/F-0/2025
14	空气中氪-85 分析作业指导书	QTD/FX14/F-0/2025
15	特殊样品前处理作业指导书	QTD/FX15/F-0/2025
16	海水中铀的分析作业指导书	QTD/FX16/F-0/2025
17	锕-241、镅-237、锔-242、锔-244 分析作业指导书	QTD/FX17/F-0/2025
18	气溶胶中 210Po 分析作业指导书	QTD/FX18/F-0/2025
19	气溶胶中 U 同位素分析作业指导书	QTD/FX19/F-0/2025
20	生物、气溶胶样品中钚分析技术规范作业指导书	QTD/FX20/F-0/2025
21	生物灰中 U 同位素分析作业指导书	QTD/FX21/F-0/2025
22	生物灰中锶的分析作业指导书	QTD/FX22/F-0/2025
23	气溶胶中 137Cs 分析作业指导书	QTD/FX23/F-0/2025
24	气溶胶中锶-89 分析作业指导书	QTD/FX24/F-0/2025
25	气溶胶总α分析作业指导书	QTD/FX25/F-0/2025
26	气溶胶中锶-90 分析作业指导书	QTD/FX26/F-0/2025
27	气溶胶总β分析作业指导书	QTD/FX27/F-0/2025
28	生物中锶-89 分析作业指导书	QTD/FX28/F-0/2025
29	生物总α分析作业指导书	QTD/FX29/F-0/2025
30	水中锶-89 分析作业指导书	QTD/FX30/F-0/2025
31	土壤中锶-89 分析作业指导书	QTD/FX31/F-0/2025
32	土壤沉积物等固体物中总α分析作业指导书	QTD/FX32/F-0/2025
33	土壤沉积物等固体粉中总β分析作业指导书	QTD/FX33/F-0/2025
34	生物灰中总放射性测量作业指导书	QTD/FX34/F-0/2025
35	废酸、废碱中科分析作业指导书	QTD/FX35/F-0/2025
36	水中氡浓度测量分析作业指导书	QTD/FX36/F-0/2025
37	水中锶-90 电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）测量方法分析作业指导书	QTD/FX37/F-0/2025
38	水中钚和镅的 ICP-MS 分析作业指导书	QTD/FX38/F-0/2025
39	水中锶-90 分析作业指导书	QTD/FX39/F-0/2025
40	生物及有机物中锶-90 分析作业指导书	QTD/FX40/F-0/2025
41	土壤中锶-90 分析作业指导书	QTD/FX41/F-0/2025
42	土壤等固体物中碳-14 分析作业指导书	QTD/FX42/F-0/2025
43	生物及有机物中钚分析作业指导书	QTD/FX43/F-0/2025
44	气溶胶中铁-55 分析作业指导书	QTD/FX44/F-0/2025
45	气溶胶中锶-90 分析作业指导书	QTD/FX45/F-0/2025
46	生物及有机物中铁-55 分析作业指导书	QTD/FX46/F-0/2025
47	生物及有机物中碳-14 分析作业指导书	QTD/FX47/F-0/2025
48	水中氡-222 分析作业指导书	QTD/FX48/F-0/2025

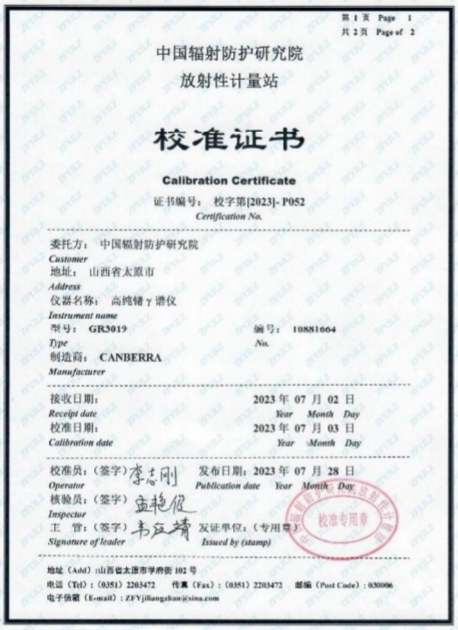
五、样品采集与预处理操作规范

1	沉降灰样品采集和预处理操作规范	QTD/GF01/F-0/2025
2	降水样品采集和预处理操作规范	QTD/GF02/F-0/2025
3	气溶胶样品采集和预处理操作规范	QTD/GF03/F-0/2025
4	生物样品采集和预处理操作规范	QTD/GF04/F-0/2025
5	水样品采集和预处理操作规范	QTD/GF05/F-0/2025
6	土壤、沉积物样品采集和预处理操作规范	QTD/GF06/F-0/2025
7	可疑结果的判断规范	QTD/GF07/F-0/2025

六、期间核查作业指导书

1	RGD-3D 型热释光剂量仪期间核查作业指导书	QTD/HC01/F-0/2025
2	分光光度计期间核查作业指导书	QTD/HC02/F-0/2025
3	液闪谱仪期间核查作业指导书	QTD/HC03/F-0/2025
4	α、β表面污染仪期间核查作业指导书	QTD/HC04/F-0/2025
5	高气压电离室剂量率仪期间核查作业指导书	QTD/HC05/F-0/2025
6	高纯锗γ谱仪期间核查作业指导书	QTD/HC06/F-0/2025
7	便携式γ能谱仪期间核查作业指导书	QTD/HC07/F-0/2025
8	便携式测氡仪期间核查作业指导书	QTD/HC08/F-0/2025
9	电磁辐射测量仪期间核查作业指导书	QTD/HC09/F-0/2025
10	多功能声级计期间核查作业指导书	QTD/HC10/F-0/2025
11	中子剂量当量率仪期间核查作业指导书	QTD/HC11/F-0/2025
12	GR1018 高纯锗γ谱仪期间核查作业指导书	QTD/HC12/F-0/2025
13	气相色谱仪期间核查作业指导书	QTD/HC13/F-0/2025
14	氮-85 自动监测仪期间核查作业指导书	QTD/HC14/F-0/2025
15	MUA 型微量铀分析仪期间核查作业指导书	QTD/HC15/F-0/2025
16	总铀标准工作溶液期间核查作业指导书	QTD/HC16/F-0/2025
17	大面积α、β测量仪期间核查作业指导书	QTD/HC17/F-0/2025
18	低本底α、β测量仪期间核查作业指导书	QTD/HC18/F-0/2025
19	标准物质期间核查作业指导书	QTD/HC19/F-0/2025

			2025.6.25	检字第[2025]-D0291	2 年
4	低本底 α/β 测量仪	LB790	2023.6.26	检字第[2023]-D398	2 年
			2025.6.25	检字第[2025]-D290	2 年
5	低本底液闪谱仪	Quantulus1220	2024.6.5	C 校字第[2024]-S020	2 年
6	低本底液闪谱仪	Quantulus GCT 6220	2024.2.1	C 校字第[2024]-S004	2 年
7	高气压电离室	RP3000B	2025.4.15	C 校字第[2025]-L149	1 年
8	中子剂量当量率仪	6150AD-n	2025.4.9	C 校字第[2025]-N088	1 年



中国辐射防护研究院
放射性计量站

校准证书

Calibration Certificate

证书编号： 校字第[2023]- P052
Certification No.

委托方： 中国辐射防护研究院
Customer
地址： 山西省太原市
Address
仪器名称： 高纯锗γ谱仪
Instrument name
型号： GR3019　　编号： 10881664
Type　　No.
制造商： CANBERRA
Manufacturer

接收日期： 2023 年 07 月 02 日
Receipt date　　Year Month Day
校准日期： 2023 年 07 月 03 日
Calibration date　　Year Month Day

校准员（签字）李志刚　发布日期：2023 年 07 月 28 日
Operator　　Publication date Year Month Day
核验员（签字）金艳俊
Inspector
主 管（签字）韦应靖　发证单位：（专用章）
Signature of leader　　Issued by (stamp)

地址（Add）：山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：（0351）2203472　传真（Fax）：（0351）2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）：ZFYjilongzhan@sina.com



中国辐射防护研究院
放射性计量站

校准证书

Calibration Certificate

证书编号：C 校字第[2025]- P039
Certification No.

委托方： 中国辐射防护研究院
Customer
地址： 山西省太原市
Address
仪器名称： 高纯锗γ谱仪
Instrument name
型号： GR3019　　编号： 10881664
Type　　No.
制造商： CANBERRA
Manufacturer

接收日期： 2025 年 06 月 26 日
Receipt date　　Year Month Day
校准日期： 2025 年 06 月 27 日
Calibration date　　Year Month Day

校准员（签字）李志刚　发布日期：2025 年 06 月 30 日
Operator　　Publication date Year Month Day
核验员（签字）金艳俊
Inspector
主 管（签字）韦应靖　发证单位：（专用章）
Signature of leader　　Issued by (stamp)

地址（Add）：山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：（0351）2203472　传真（Fax）：（0351）2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）：ZFYjilongzhan@sina.com



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

检定证书

Verification Certificate

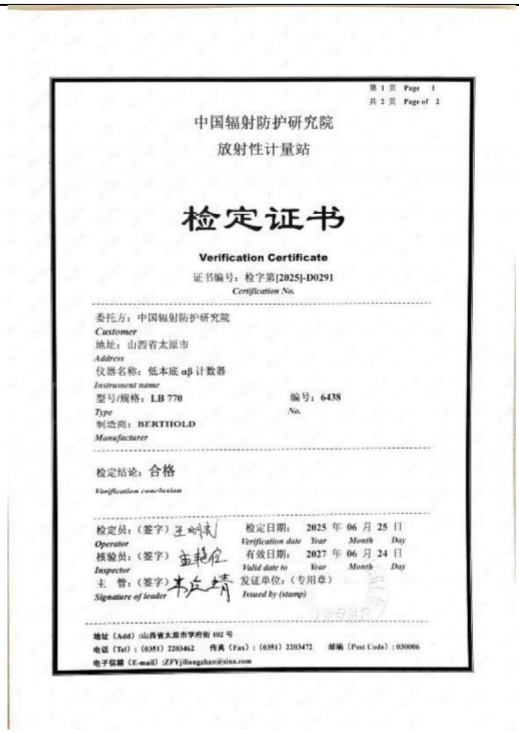
证书编号：检字第[2023]-D1103
Certification No.

委托方：中国辐射防护研究院
Customer
地址：山西省太原市学府街 102 号
Address
仪器名称：αβ 低本底测量仪
Instrument name
型号/规格：LB 770　　编号：6438
Type　　*No.*
制造商：BERTHOLD
Manufacturer

检定结论：合格
Verification conclusion

检定员：（签字）　检定日期：2023 年 09 月 18 日
Operator　*Verification date Year Month Day*
核验员：（签字）　有效日期：2025 年 09 月 17 日
Inspector　*Valid date to Year Month Day*
主　管：（签字）　发证单位：（专用章）
Signature of leader　*Issued by (stamp)*

地址（Add）：山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：（0351）2203462　传真（Fax）：（0351）2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）：ZFYjiangzhan@sina.com



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

检定证书

Verification Certificate

证书编号：检字第[2025]-D0291
Certification No.

委托方：中国辐射防护研究院
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：低本底 αβ 计数器
Instrument name
型号/规格：LB 770　　编号：6438
Type　　*No.*
制造商：BERTHOLD
Manufacturer

检定结论：合格
Verification conclusion

检定员：（签字）王炯炎　检定日期：2025 年 06 月 25 日
Operator　*Verification date Year Month Day*
核验员：（签字）　有效日期：2027 年 06 月 24 日
Inspector　*Valid date to Year Month Day*
主　管：（签字）韦应靖　发证单位：（专用章）
Signature of leader　*Issued by (stamp)*

地址（Add）：山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：（0351）2203462　传真（Fax）：（0351）2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）：ZFYjiangzhan@sina.com



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

检定证书

Verification Certificate

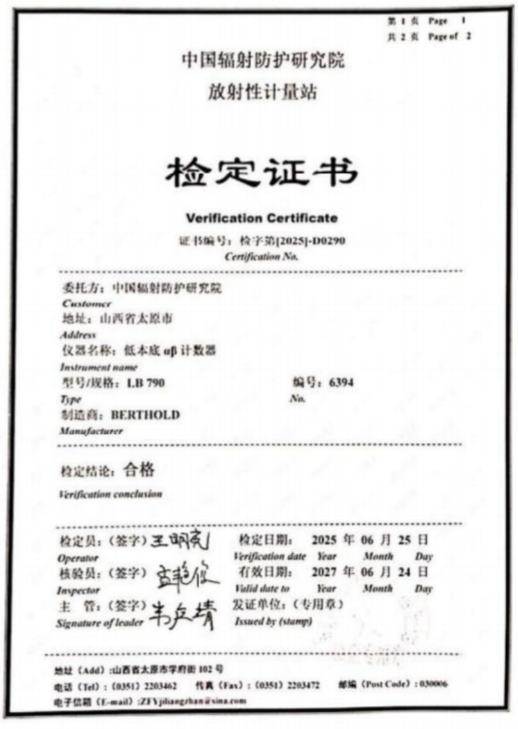
证书编号：检字第[2023]-D398
Certification No.

委托方：中国辐射防护研究院
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：低本底 α、β 测量仪
Instrument name
型号/规格：LB 790　　编号：主机 8667+探测器 6394
Type　　*No.*
制造商：BERTHOLD
Manufacturer

检定结论：合格
Verification conclusion

检定员：（签字）王炯炎　检定日期：2023 年 06 月 26 日
Operator　*Verification date Year Month Day*
核验员：（签字）　有效日期：2025 年 06 月 25 日
Inspector　*Valid date to Year Month Day*
主　管：（签字）韦应靖　发证单位：（专用章）
Signature of leader　*Issued by (stamp)*

地址（Add）：山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：（0351）2203462　传真（Fax）：（0351）2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）：ZFYjiangzhan@sina.com



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

检定证书

Verification Certificate

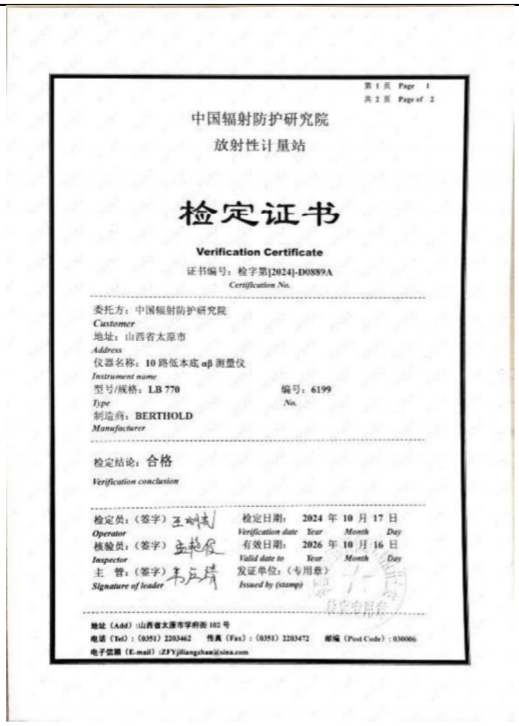
证书编号：检字第[2025]-D0290
Certification No.

委托方：中国辐射防护研究院
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：低本底 αβ 计数器
Instrument name
型号/规格：LB 790　　编号：6394
Type　　*No.*
制造商：BERTHOLD
Manufacturer

检定结论：合格
Verification conclusion

检定员：（签字）王炯炎　检定日期：2025 年 06 月 25 日
Operator　*Verification date Year Month Day*
核验员：（签字）　有效日期：2027 年 06 月 24 日
Inspector　*Valid date to Year Month Day*
主　管：（签字）韦应靖　发证单位：（专用章）
Signature of leader　*Issued by (stamp)*

地址（Add）：山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：（0351）2203462　传真（Fax）：（0351）2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）：ZFYjiangzhan@sina.com



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

检定证书

Verification Certificate

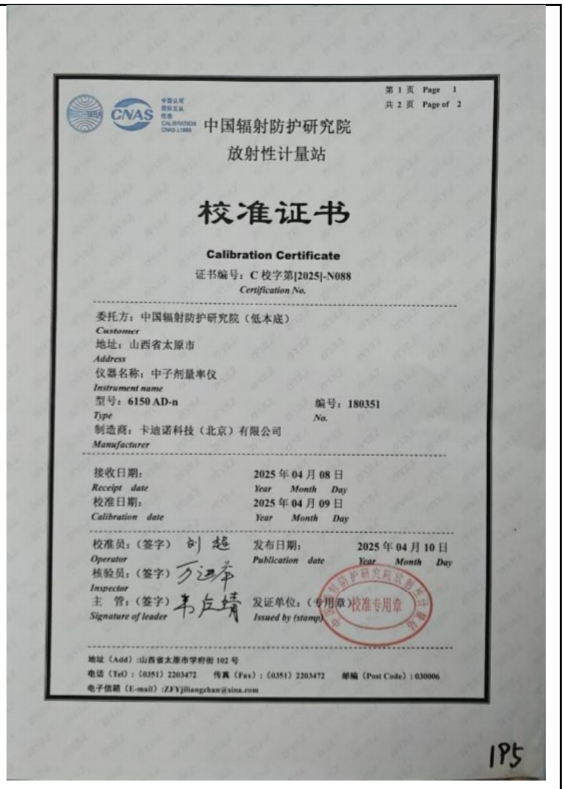
证书编号：检字第[2024]-D0889A
Certification No.

委托方：中国辐射防护研究院
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：10 路低本底 αβ 测量仪
Instrument name
型号/规格：LB 770　　编号：6199
Type　　*No.*
制造商：BERTHOLD
Manufacturer

检定结论：合格
Verification conclusion

检定员：（签字）王斌武　　检定日期：2024 年 10 月 17 日
Operator　　*Verification date Year Month Day*
核验员：（签字）[illegible]　　有效日期：2026 年 10 月 16 日
Inspector　　*Valid date to Year Month Day*
主　管：（签字）韦应靖　　发证单位：（专用章）
Signature of leader　　*Issued by (stamp)*

地址（Add）:山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：(0351) 2203462　传真（Fax）：(0351) 2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）:ZFYjiangzhan@sina.com



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

校准证书

Calibration Certificate

证书编号：C 校字第[2025]-N088
Certification No.

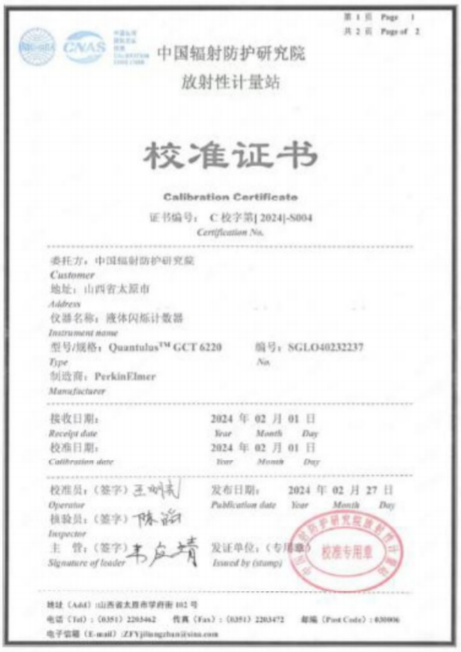
委托方：中国辐射防护研究院（低本底）
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：中子剂量率仪
Instrument name
型号：6150 AD-n　　编号：180351
Type　　*No.*
制造商：卡迪诺科技（北京）有限公司
Manufacturer

接收日期：2025 年 04 月 08 日
Receipt date Year Month Day
校准日期：2025 年 04 月 09 日
Calibration date Year Month Day

校准员：（签字）刘超　　发布日期：2025 年 04 月 10 日
Operator　　*Publication date Year Month Day*
核验员：（签字）[illegible]
Inspector
主　管：（签字）韦应靖　　发证单位：（专用章）校准专用章
Signature of leader　　*Issued by (stamp)*

地址（Add）:山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：(0351) 2203472　传真（Fax）：(0351) 2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）:ZFYjiangzhan@sina.com

185



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

校准证书

Calibration Certificate

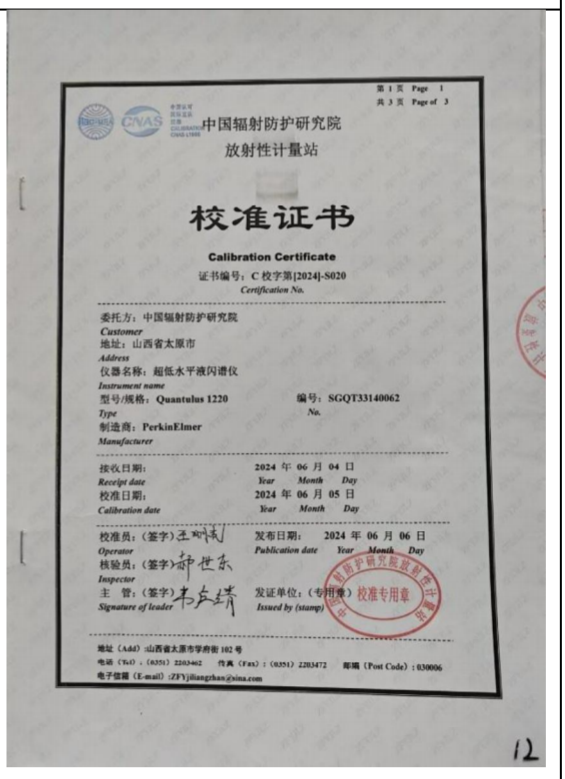
证书编号：C 校字第[2024]-S004
Certification No.

委托方：中国辐射防护研究院
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：液体闪烁计数器
Instrument name
型号/规格：Quantulus™ GCT 6220　　编号：SGLO40232237
Type　　*No.*
制造商：PerkinElmer
Manufacturer

接收日期：2024 年 02 月 01 日
Receipt date Year Month Day
校准日期：2024 年 02 月 01 日
Calibration date Year Month Day

校准员：（签字）王斌武　　发布日期：2024 年 02 月 27 日
Operator　　*Publication date Year Month Day*
核验员：（签字）[illegible]
Inspector
主　管：（签字）韦应靖　　发证单位：（专用章）校准专用章
Signature of leader　　*Issued by (stamp)*

地址（Add）:山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：(0351) 2203462　传真（Fax）：(0351) 2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）:ZFYjiangzhan@sina.com



第 1 页 Page 1
共 3 页 Page of 3

中国辐射防护研究院
放射性计量站

校准证书

Calibration Certificate

证书编号：C 校字第[2024]-S020
Certification No.

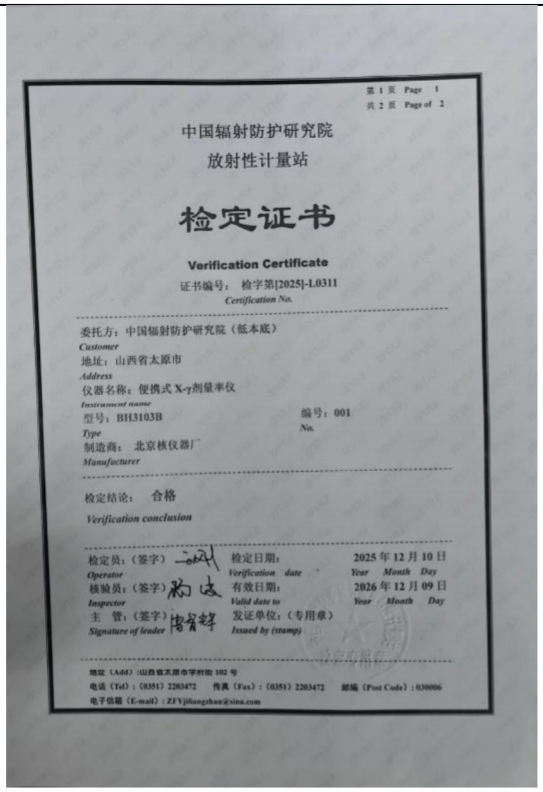
委托方：中国辐射防护研究院
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：超低水平液闪谱仪
Instrument name
型号/规格：Quantulus 1220　　编号：SGQT33140062
Type　　*No.*
制造商：PerkinElmer
Manufacturer

接收日期：2024 年 06 月 04 日
Receipt date Year Month Day
校准日期：2024 年 06 月 05 日
Calibration date Year Month Day

校准员：（签字）王斌武　　发布日期：2024 年 06 月 06 日
Operator　　*Publication date Year Month Day*
核验员：（签字）[illegible]
Inspector
主　管：（签字）韦应靖　　发证单位：（专用章）校准专用章
Signature of leader　　*Issued by (stamp)*

地址（Add）:山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：(0351) 2203462　传真（Fax）：(0351) 2203472　邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）:ZFYjiangzhan@sina.com

12



第 1 页 Page 1
共 2 页 Page of 2

中国辐射防护研究院
放射性计量站

检定证书

Verification Certificate

证书编号： 检字第[2025]-L0311
Certification No.

委托方：中国辐射防护研究院（低本底）
Customer
地址：山西省太原市
Address
仪器名称：便携式 X-γ剂量率仪
Instrument name
型号：BH3103B 编号：001
Type *No.*
制造商： 北京核仪器厂
Manufacturer

检定结论： 合格
Verification conclusion

检定员：（签字）
Operator
核验员：（签字）
Inspector
主 管：（签字）
Signature of leader

检定日期： 2025 年 12 月 10 日
Verification date *Year Month Day*
有效日期： 2026 年 12 月 09 日
Valid date to *Year Month Day*
发证单位：（专用章）
Issued by (stamp)

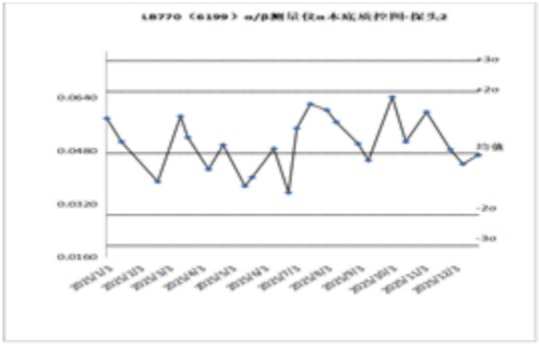
地址（Add）：山西省太原市学府街 102 号
电话（Tel）：（0351）2203472 传真（Fax）：（0351）2203472 邮编（Post Code）：030006
电子信箱（E-mail）：ZFYjiliangzhan@sina.com

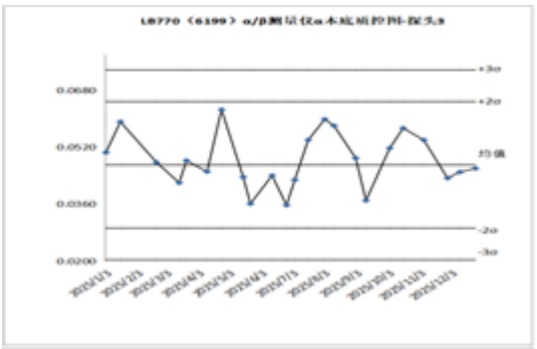
5.3.3 α/β 测量仪的刻度和性能检验

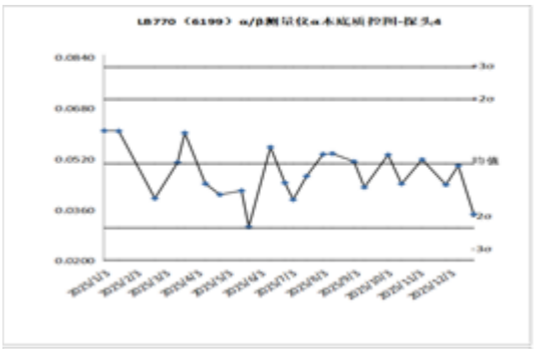
采用中国计量科学研究院提供的 ^{241}Am 粉末标准物质制成与待测样品相同形式的标准源标定仪器的总 α 探测效率；采用中国计量科学研究院提供的 ^{40}K 粉末标准物质制成与待测样品相同形式的标准源标定仪器的总 β 探测效率。

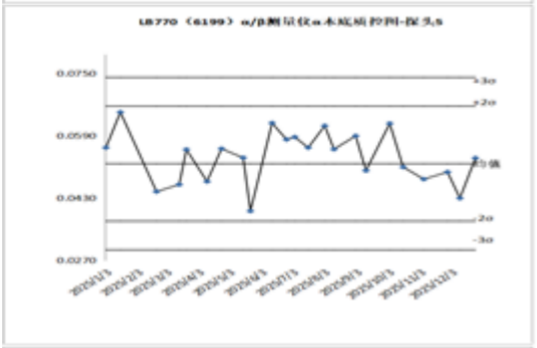
α/β 测量仪连续运行一段时间后，测量本底，并绘制质控图，具体见以下各图。

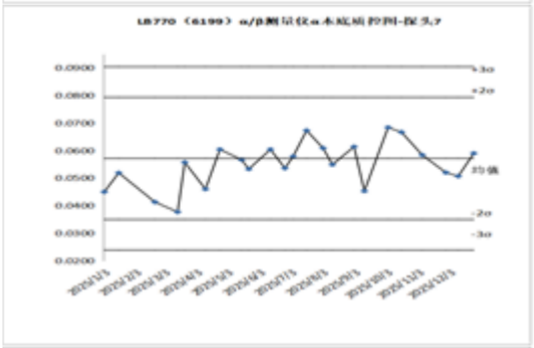


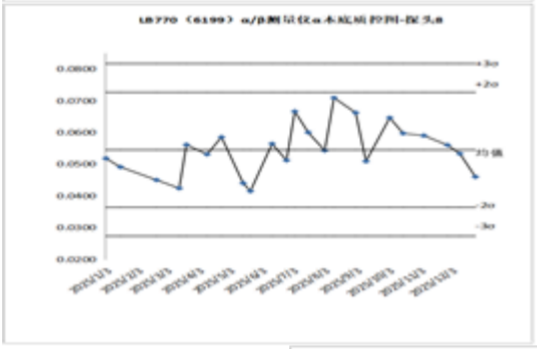


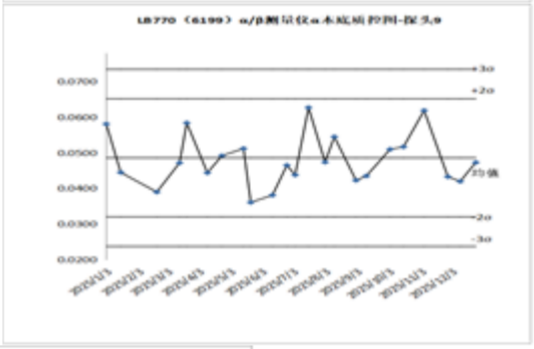


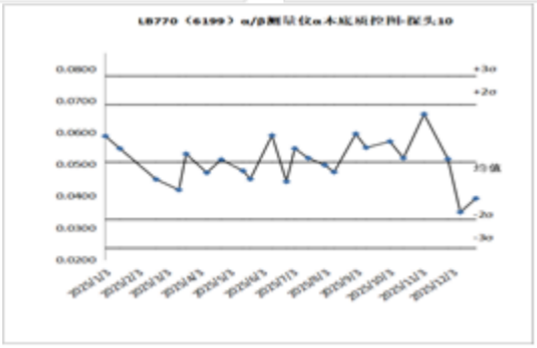




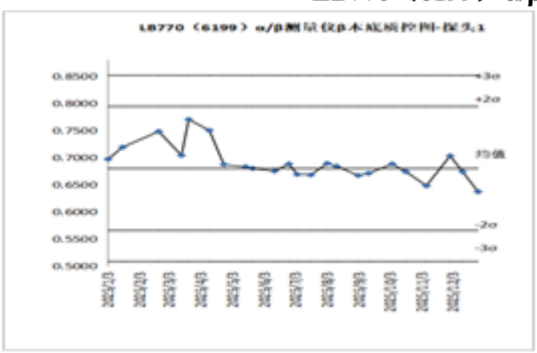


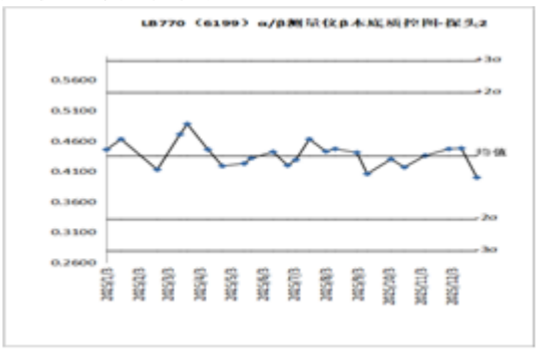


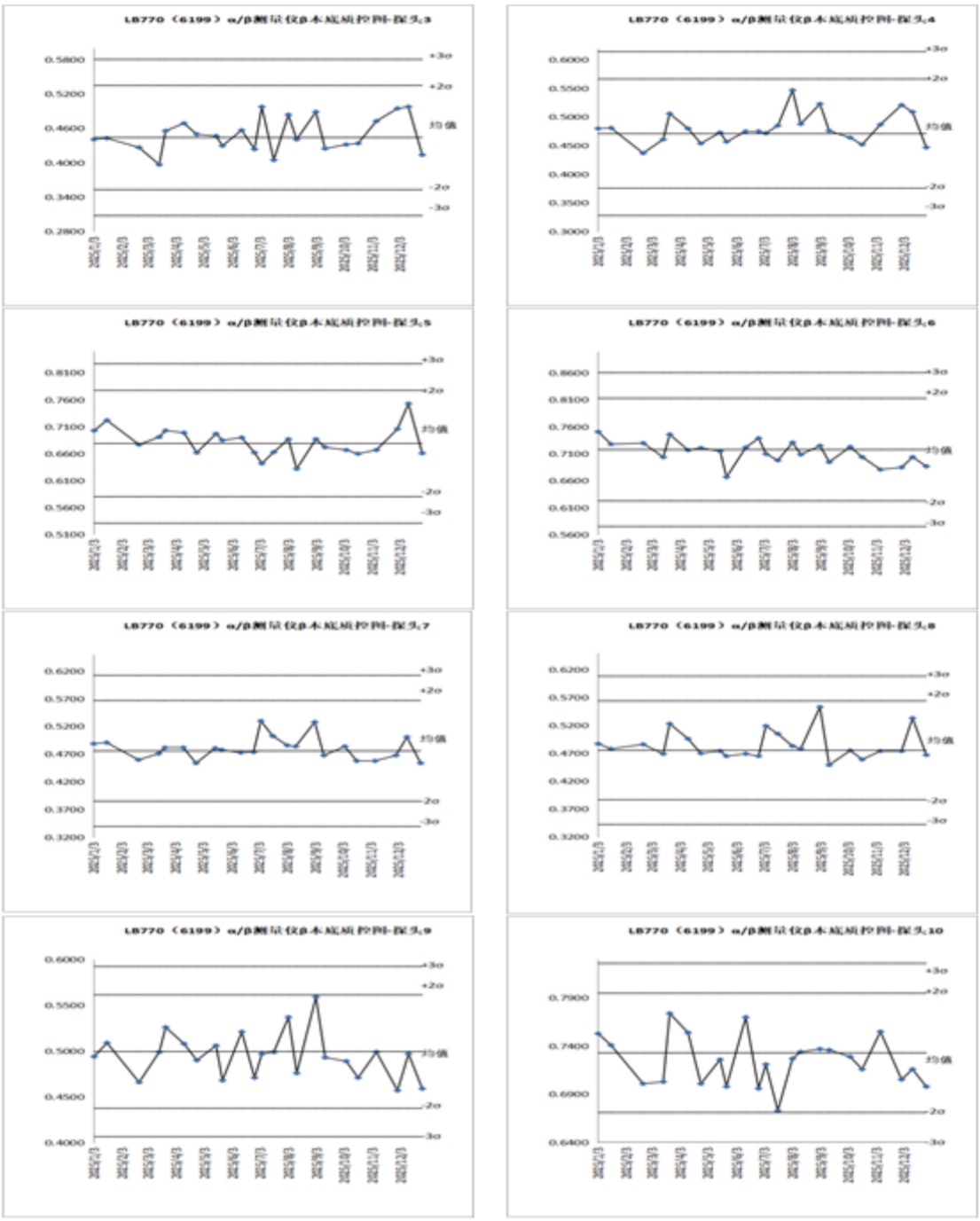




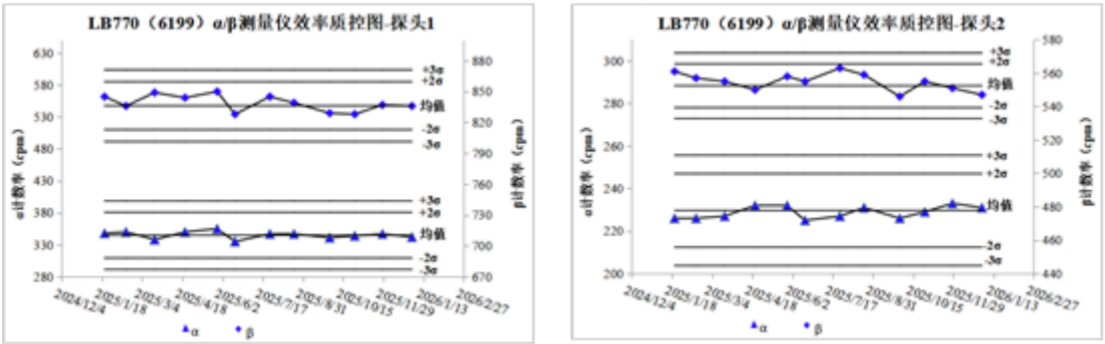
LB770（6199）α/β 测量仪 α 本底质控图

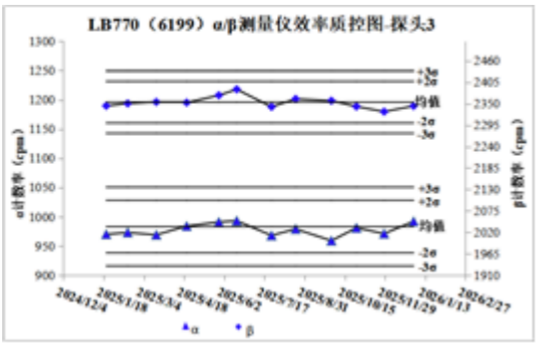


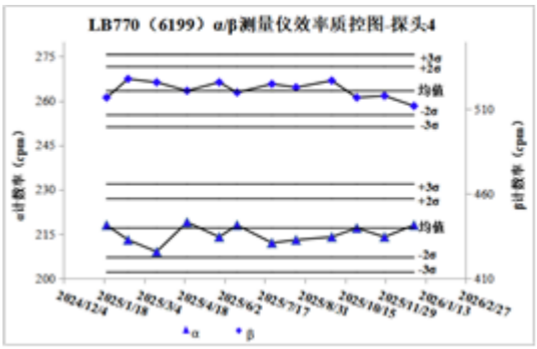


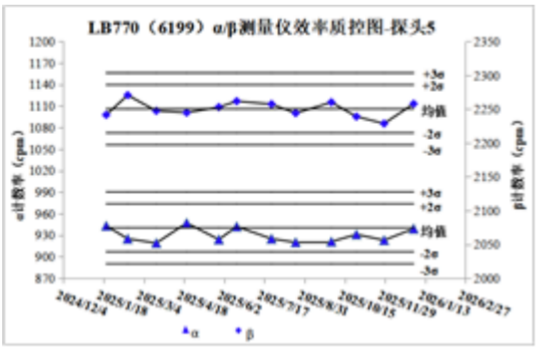


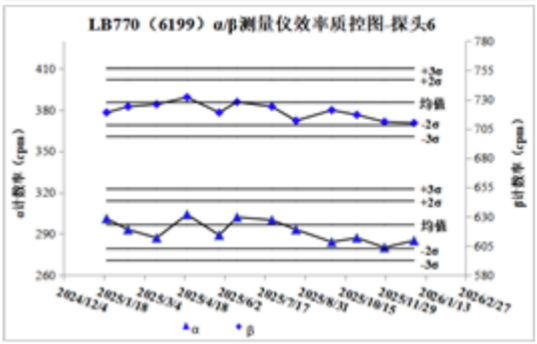
LB770（6199）α/β 测量仪 β 本底质控图

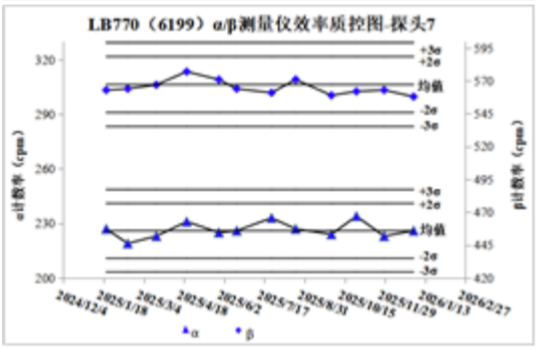


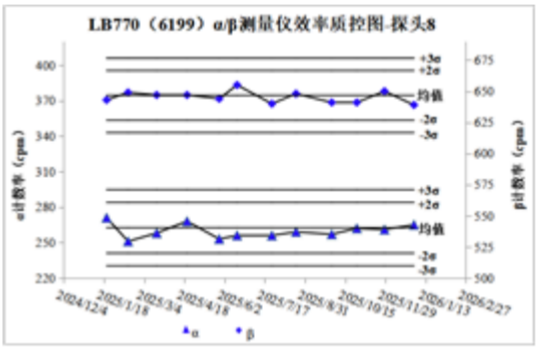


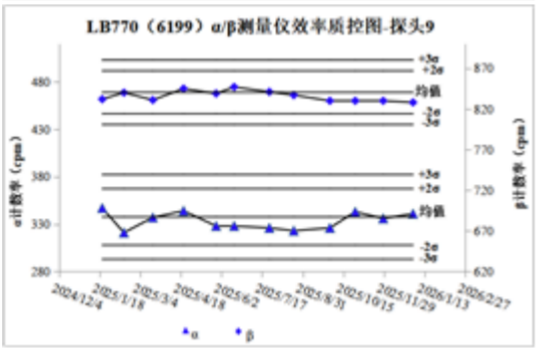


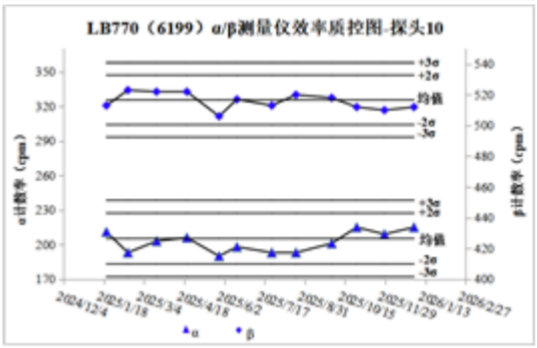




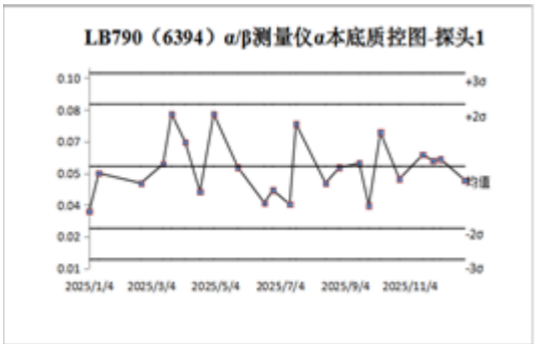


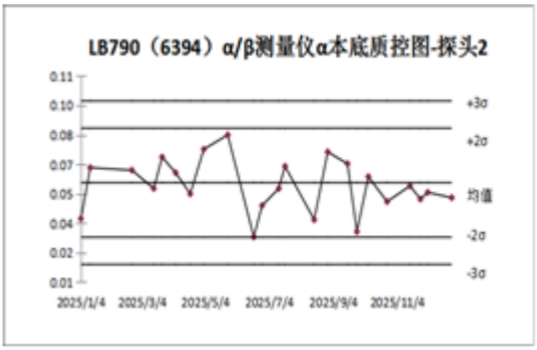


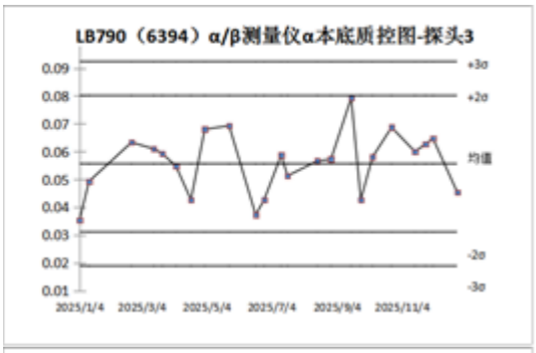


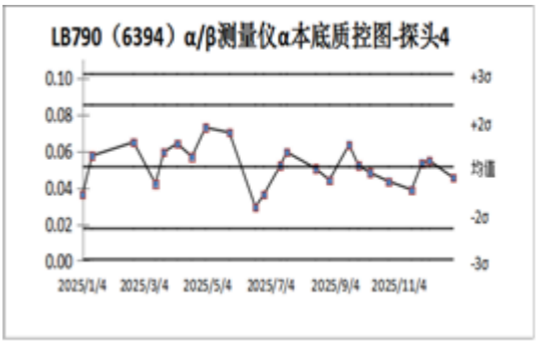


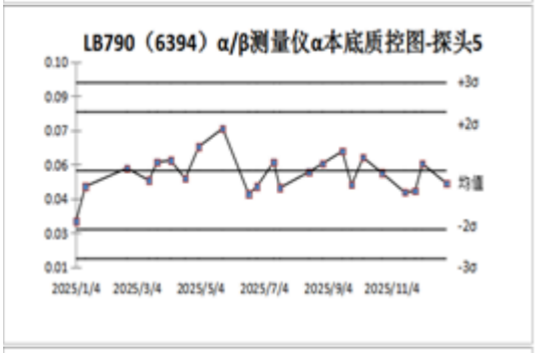
LB770（6199）α/β 测量仪效率质控图

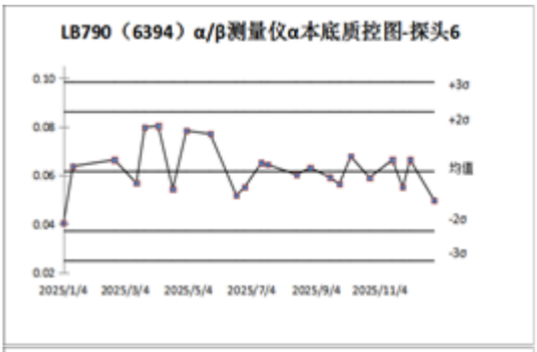


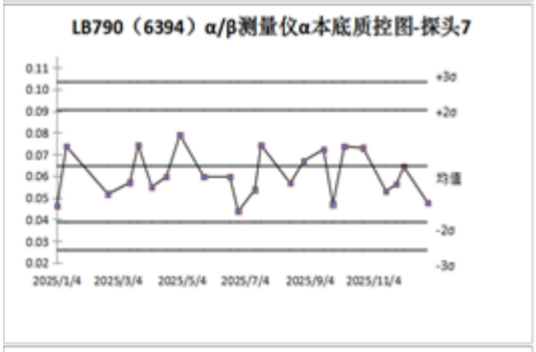


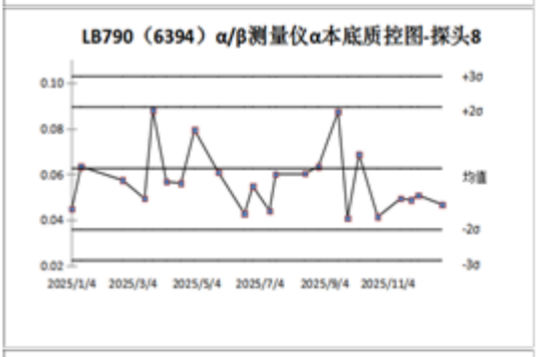


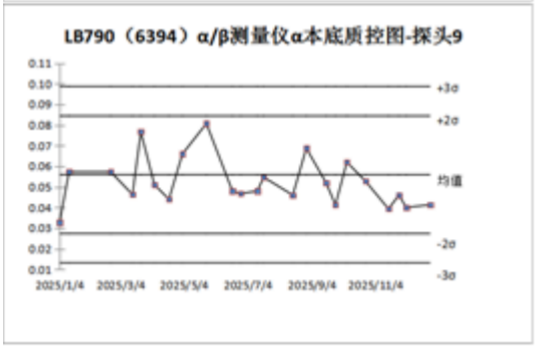


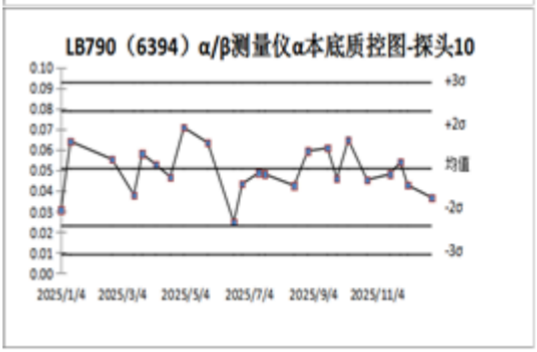




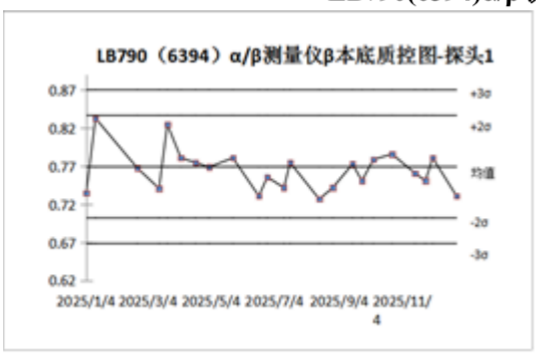


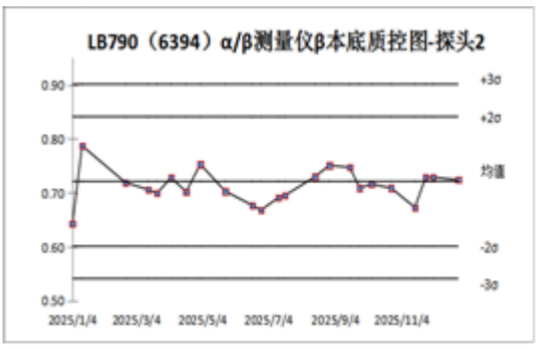


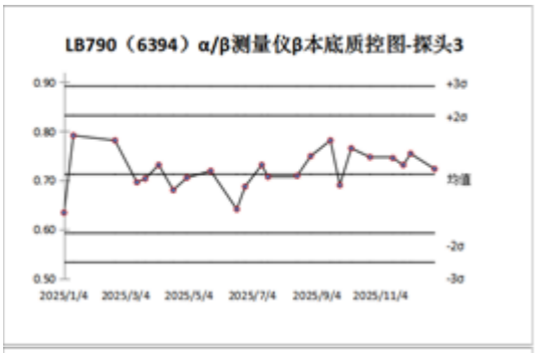


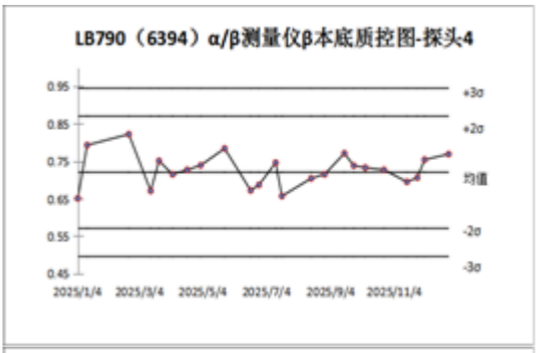


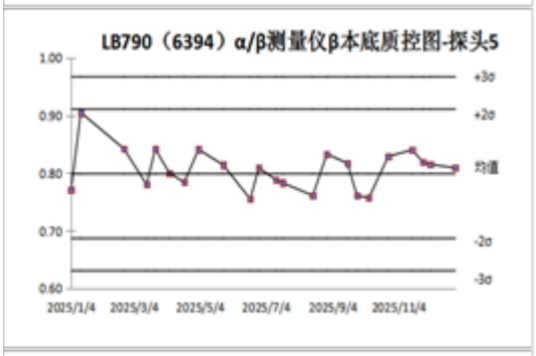
LB790(6394)α/β 测量仪 α 本底质控图

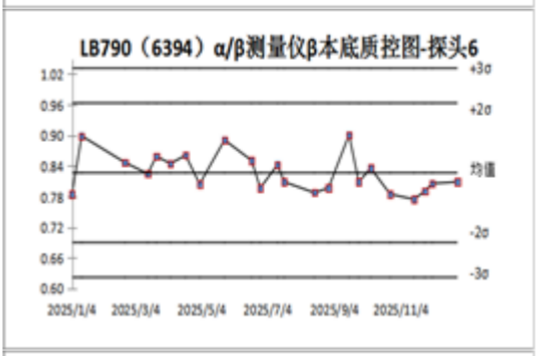


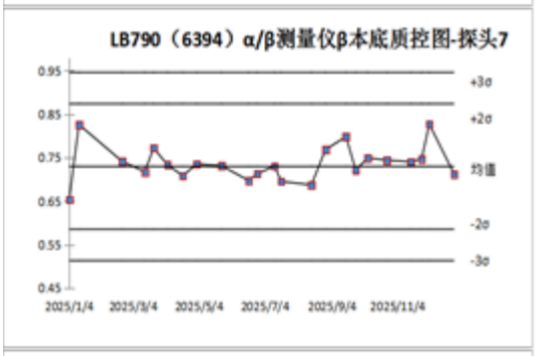


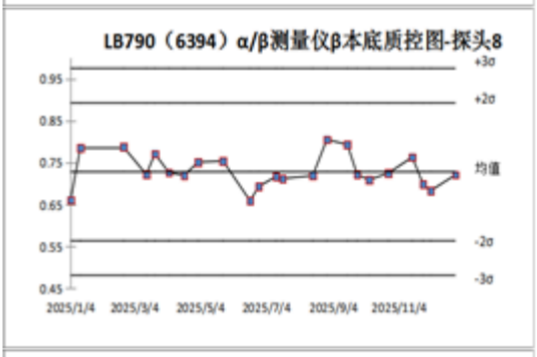


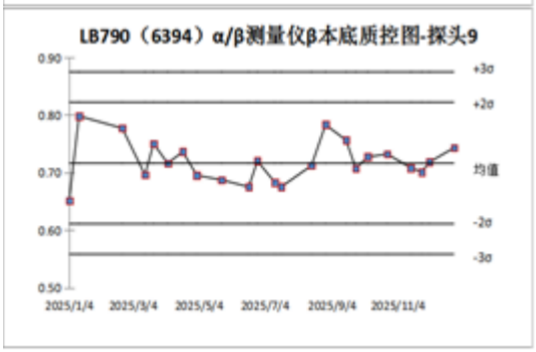


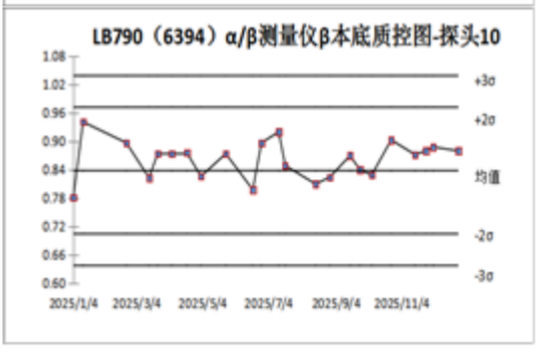




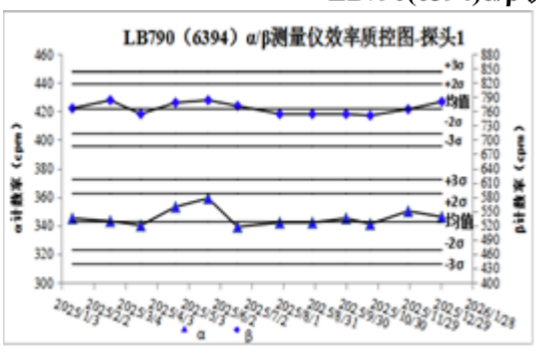


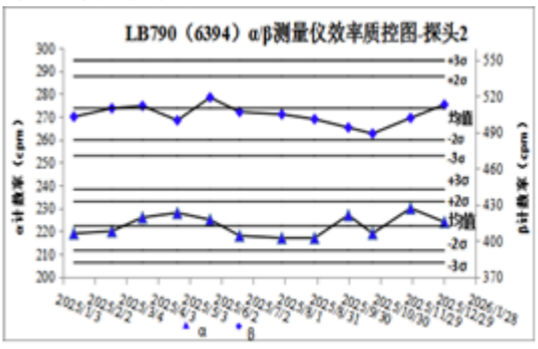


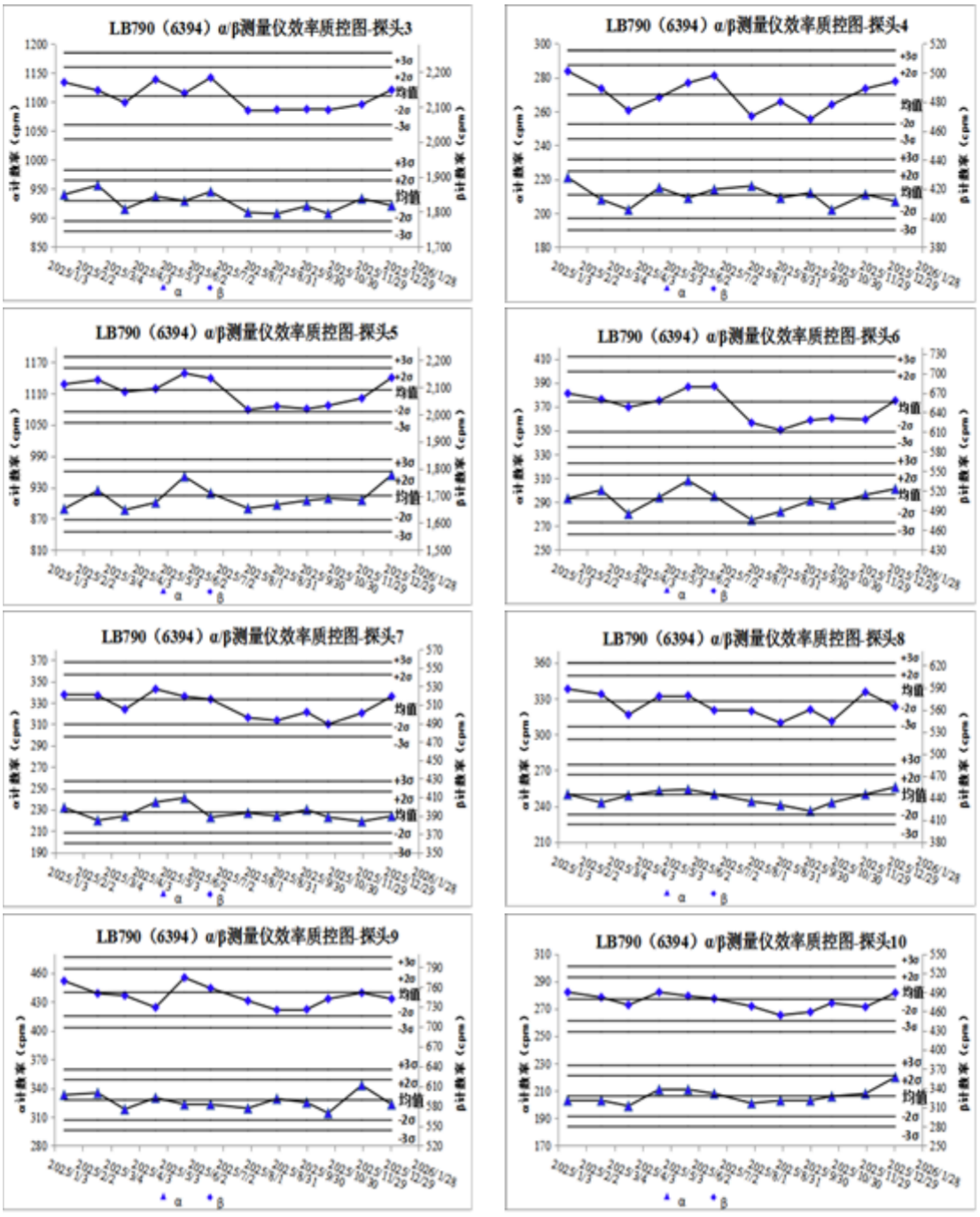




LB790(6394)α/β 测量仪 β 本底质控图







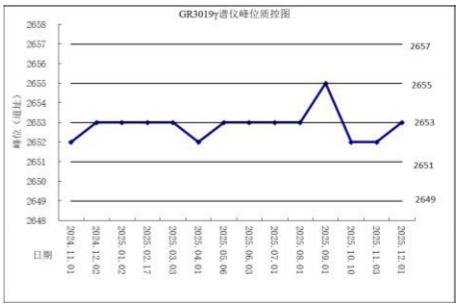
LB790(6394)α/β 测量仪效率质控图

5.3.4 高纯锗 γ 谱仪的刻度和性能检验

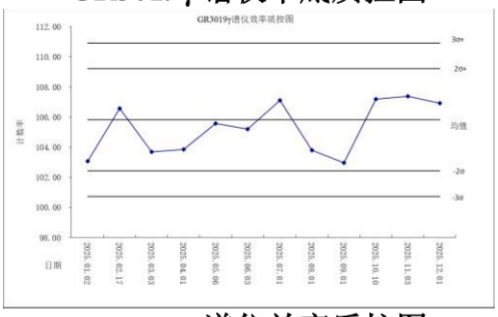
在每次开机后、关机前或仪器连续运行一个月以上时测量 γ 谱仪的本底、效率和稳定性（峰位）并绘制质控图，以确保仪器工作在正常状态下，质控图具体见以下各图。



GR3019γ 谱仪本底质控图



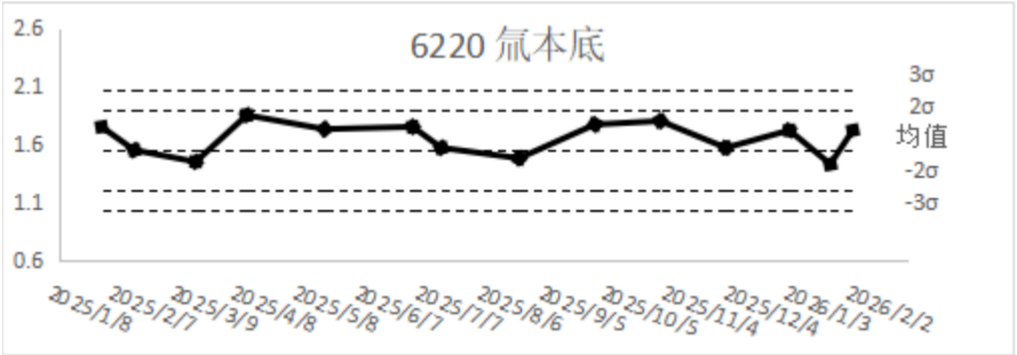
GR3019γ 谱仪峰位质控图

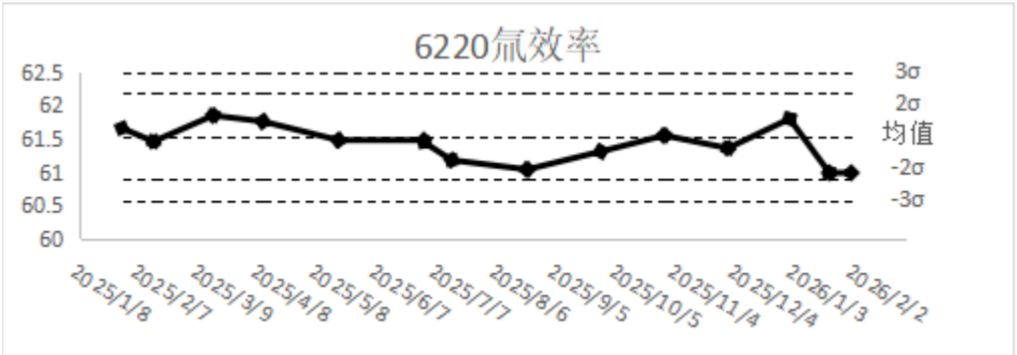


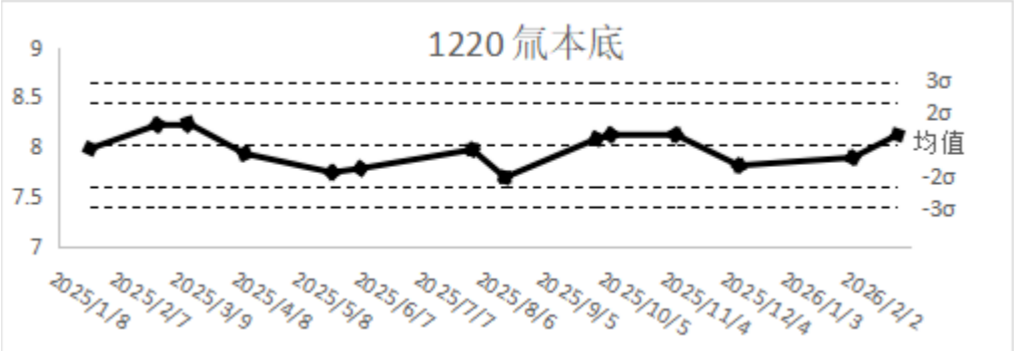
GR3019γ 谱仪效率质控图

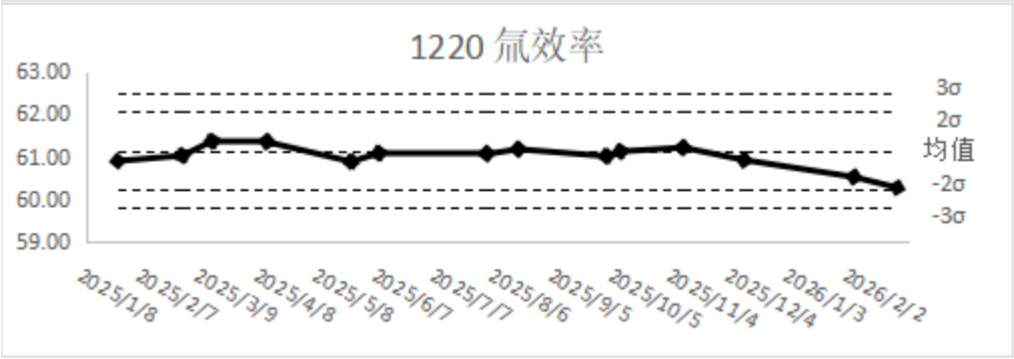
5.3.5 液闪 γ 谱仪的刻度和性能检验

液闪谱仪在测量样品前或仪器运行一段时间后，测量本底和效率，并绘制质控图，从图中可知，仪器处于正常稳定的状态，具体见以下各图。









5.4 样品的质量控制

5.4.1 样品采集、预处理及运输过程的质量控制

本项目涉及到的样品采集和预处理主要按照中国辐射防护研究院核工业太原环境分析测试中心的有关作业指导书进行。采样人员按照相关操作规范采集完成并做好标识的样品按照样品的特性进行适当的包装，在运输前认真填写样品清单，清点样品，并且检查包装是否符合要求，然后用厢式货车公路运输样品到实验室，样品送达实验室后，接样人员和送样人员清点样品，并在样品清单上签字，将样品有条理的放置在样品室的未检区，分析人员按规定领取样品，及时分析测量。

5.4.2 空白样品的测量

使用蒸馏水进行了总 α、总 β 空白样品的测量，测量结果见表 5.4-1，测量结果均小于探测限，符合标准要求。

表 5.4-1 空白样品测量结果

项目	测量结果(mBq)					
	06B-Q-01	06B-Q-02	07B-Q-01	07B-Q-02	09B-Q-01	09B-Q-02
总 α	<14.6	<20.3	<12.3	<14.3	<11.5	<11.5

总 β	<4.74	<7.88	<4.09	<5.52	<4.44	<3.81

5.5 质量保证核查

5.5.1 内部核查

2025 年 7 月，实验室按照内部质量体系文件的要求，对实验室的质量体系运行情况进行了内审，内审共发现 8 处不符合项，已于 2025 年底全部落实整改，不符合项未对本项目的质量控制产生影响。

5.5.2 外部核查

2025 年 8 月，中国核能电力股份有限公司组织专家对分析测试中心承担的中国核电相关技术服务项目开展了外部质保核查，查看了相关质量记录，共发现 7 个不符合项，包括作业指导书中标准未及时更新，γ 谱测量原始记录中未包含仪器名称等，均已落实整改，未对本项目的质量控制产生影响。

2025 年 8 月，国家认证认可监督管理委员会评审组对分析测试中心进行了扩项+变更+复评审现场评审，共发现 4 个不符合项，集中在扩项项目方法验证、不确定度计算等方面，均已落实整改，未对已通过认证项目的质量控制产生影响。

2025 年 9 月，中核清原环境技术工程有限责任公司对分析测试中心承担的龙和处置场环境监测项目进行了现场质保监督检查，共发现 3 个不符合项，包括记录划改后未签字、样品编号与程序文件中编号格式不一致、点位名称表述不准确等问题，均已落实整改，未对本项目的质量控制产生影响。

5.6 实验室间比对及能力验证

（1）2025 年度实验室参加了 IAEA 环境实验室组织的国际能力验证活动（编号 IAEA-TERC-2025-01，实验室代码 525），水中 γ 、氚、锶-90 和铀，固体物中 γ 和铀，生物样中钾-40，表面污染中锶-90 和钡-133 等分析结果均满意。

3 Data Evaluation Tables

Target Values for activity concentration of radionuclides in Sample 1, Spiked Water

TABLE 2. Target values

Sample	Analyte	Technique	Target Value	Uncertainty ($k = 1$)	Unit	MARB in %
1	Po-210	alpha	29.9	1.5	Bq/kg	30
1	H-3	beta	46.8	2.4	Bq/kg	30
1	Sr-90	beta	39.5	2.0	Bq/kg	30
1	Pb-210	beta	29.4	1.2	Bq/kg	30
1	Na-22	gamma	19.9	1.2	Bq/kg	20
1	Co-60	gamma	35.6	1.5	Bq/kg	20
1	Ba-133	gamma	34.3	2.1	Bq/kg	20
1	Cs-134	gamma	24.6	1.0	Bq/kg	20
1	Cs-137	gamma	17.1	0.7	Bq/kg	20

Evaluation Table for Sample 1

TABLE 3. Evaluation Results for Sample 1

Analyte	Technique	Target Value	Unc. of the TV	MARB in %	Reported value in Bq/kg	Reported uncertainty ($k = 1$) in Bq/kg	Relative bias in %	P-Test in %	Trueness evaluation	Precision evaluation	Final Score	Z Score
H-3	Liquid Scintilation counting	46.8	2.4	30	47	2.8	0.4	7.86	A	A	A	0.04
Na-22	Gamma-Ray Spectrometry	19.9	1.2	20	18.9	1.3	-5.0	9.15	A	A	A	-0.75
Co-60	Gamma-Ray Spectrometry	35.6	1.5	20	36.2	2.5	1.7	8.09	A	A	A	0.25
Sr-90	Gas Flow Proportional Counting	39.5	2.0	30	35.7	1.5	-9.6	6.58	A	A	A	-0.96
Ba-133	Gamma-Ray Spectrometry	34.3	2.1	20	34.8	2.2	1.5	8.80	A	A	A	0.22
Cs-134	Gamma-Ray Spectrometry	24.6	1.0	20	25.2	1.6	2.4	7.54	A	A	A	0.37
Cs-137	Gamma-Ray Spectrometry	17.1	0.7	20	17.3	1.1	1.2	7.56	A	A	A	0.18
Po-210	Alpha-Particle Spectrometry	29.9	1.5	30	29.1	1.7	-2.7	7.70	A	A	A	-0.27
Pb-210	Gamma-Ray Spectrometry	29.4	1.2	30	30.7	2.1	4.4	7.97	A	A	A	0.44

7

Target Values for activity concentration of radionuclides in Sample 2, Natural Water

TABLE 4. Target values

Sample	Analyte	Technique	Target Value	Uncertainty ($k = 1$)	Unit	MARB in %
2	Ra-226	alpha	0.0962	0.0058	Bq/kg	30
2	U-234	alpha	0.0891	0.00446	Bq/kg	30
2	U-235	alpha	0.00372	0.00031	Bq/kg	30
2	U-238	alpha	0.0818	0.0041	Bq/kg	30

Evaluation Table for Sample 2

TABLE 5. Evaluation Results for Sample 2

Analyte	Technique	Target Value	Unc. of the TV	MARB in %	Reported value in Bq/kg	Reported uncertainty ($k = 1$) in Bq/kg	Relative bias in %	P-Test in %	Trueness evaluation	Precision evaluation	Final Score	Z Score
U-234	Alpha-Particle Spectrometry	0.0891	0.00446	30	0.0931	0.0059	4.5	8.08	A	A	A	0.45
U-238	Alpha-Particle Spectrometry	0.0818	0.0041	30	0.0831	0.0056	1.6	8.40	A	A	A	0.16

Target Values for Uranium Isotopes by ICP-MS in Sample 2, Natural Water

TABLE 6. Target values

Sample	Analyte	Technique	Target Value	Uncertainty ($k = 1$)	Unit	MARB in %
2	U-235	ICP-MS	0.0470	0.0017	ng/g	20
2	U-238	ICP-MS	6.56	0.21	ng/g	20
2	Total U	ICP-MS	6.60	0.21	ng/g	20

Evaluation Table for Sample 2, Natural Water, Uranium Isotopes by ICP-MS

No data reported.

8

Target values for activity concentration of radionuclides in Sample 3, Soil

TABLE 7. Target values

Sample	Analyte	Technique	Target Value	Uncertainty ($k = 1$)	Unit	MARB in %
3	K-40	gamma	485	11	Bq/kg	20
3	Cs-137	gamma	10.3	0.3	Bq/kg	20
3	Tl-208	gamma	12.9	0.4	Bq/kg	20
3	Pb-210	gamma	43.4	1.7	Bq/kg	20
3	Bi-212	gamma	39.6	1.7	Bq/kg	20
3	Pb-212	gamma	36.8	1.1	Bq/kg	20
3	Bi-214	gamma	47.9	1.3	Bq/kg	20
3	Pb-214	gamma	47.9	1.3	Bq/kg	20
3	Ra-226	gamma	47.9	1.3	Bq/kg	20
3	Ac-228	gamma	36.4	1.7	Bq/kg	20
3	Th-232	gamma	36.4	1.7	Bq/kg	20
3	Pa-234m	gamma	27.0	0.4	Bq/kg	20
3	Th-234	gamma	27.0	0.4	Bq/kg	20
3	U-235	gamma	1.24	0.02	Bq/kg	20
3	U-238	gamma	27.0	0.4	Bq/kg	20

Evaluation Table for Sample 3

TABLE 8. Evaluation Results for Sample 3

Analyte	Technique	Target Value	Unc. of the TV	MARB in %	Reported value in Bq/kg	Reported uncertainty ($k = 1$) in Bq/kg	Relative bias in %	P-Test in %	Trueness evaluation	Precision evaluation	Final Score	Z Score
K-40	Gamma-Ray Spectrometry	485	11	20	496	26	2.3	5.71	A	A	A	0.34
Cs-137	Gamma-Ray Spectrometry	10.3	0.3	20	10.4	0.8	1.0	8.23	A	A	A	0.15
Pb-210	Gamma-Ray Spectrometry	43.4	1.7	20	32.8	5.3	-24.4	16.63	N	A	N	-3.66
Ra-226	Gamma-Ray Spectrometry	47.9	1.3	20	37.6	2.3	-21.5	6.69	N	N	N	-3.23
Th-232	Gamma-Ray Spectrometry	36.4	1.7	20	34.7	1.8	-4.7	6.98	A	A	A	-0.70
U-238	Gamma-Ray Spectrometry	27.0	0.4	20	22.2	3.1	-17.8	14.04	A	A	A	-2.67

Target values for activity concentration of radionuclides in Sample 4, Vegetation

TABLE 9. Target values

Sample	Analyte	Technique	Target Value	Uncertainty ($k = 1$)	Unit	MARB in %
4	K-40	gamma	2029	69	Bq/kg	20

Evaluation Table for Sample 4

TABLE 10. Evaluation Results for Sample 4

Analyte	Technique	Target Value	Unc. of the TV	MARB in %	Reported value in Bq/kg	Reported uncertainty ($k = 1$) in Bq/kg	Relative bias in %	P-Test in %	Trueness evaluation	Precision evaluation	Final Score	Z Score
K-40	Gamma-Ray Spectrometry	2029	69	20	2167	122	6.8	6.58	A	A	A	1.02

Target values for activity of radionuclides in Sample 5, Printed Surface

TABLE 11. Target values

Sample	Analyte	Technique	Target Value	Uncertainty ($k = 1$)	Unit	MARB in %
5	Sr-90	beta	3.22	0.16	Bq/sample	30
5	Ba-133	gamma	10.1	0.51	Bq/sample	30

Evaluation Table for Sample 5 (surface sample)

TABLE 12. Evaluation Results for Sample 5

Analyte	Technique	Target Value	Unc. of the TV	MARB in %	Reported value in Bq/sample	Reported uncertainty ($k = 1$) in Bq/sample	Relative bias in %	P-Test in %	Trueness evaluation	Precision evaluation	Final Score	Z Score
Ba-133	Gamma Ray Spectrometry	10.1	0.51	30	9.56	0.59	-5.3	7.97	A	A	A	-0.53

Intercomparison parameters for activity concentration of radionuclides

TABLE 13. ILC values

Sample	Analyte	Technique	Robust Mean	Robust Standard Deviation	Unit	MARB in %
2	Gross Alpha	alpha	0.319	0.188	Bq/kg	30
2	Gross Beta	beta	0.417	0.294	Bq/kg	30
2	Ra-228	beta	0.656	0.703	Bq/kg	30
4	Cs-137	gamma	0.500	0.382	Bq/kg	30
4	Bi-214	gamma	4.37	3.63	Bq/kg	30
4	Pb-214	gamma	3.50	2.33	Bq/kg	30
4	Ra-226	gamma	4.40	3.59	Bq/kg	30
4	Ac-228	gamma	4.86	4.18	Bq/kg	30

Evaluation Table for Sample 2

TABLE 14. Evaluation Results for ILC

Sample	Analyte	Technique	Robust Mean	Robust SD	MARB in %	Reported value in Bq/kg	Reported uncertainty ($k = 1$) in Bq/kg	Relative bias in %	Z Score	Z Score evaluation	Zeta Score	Zeta Score evaluation
4	Ra-226	Gamma-Ray Spectrometry	4.40	3.59	30	3.22	0.41	-26.8	-0.33	A	-0.33	A

12

（2）2025 年度实验室参加了 IAEA 海洋实验室组织的国际能力验证活动（编号 IAEA-RML-2025-01，样品编号为 S25N009），γ、氚和锶-90 分析结果均满意。

Proficiency Test IAEA–RML–2025–01 Evaluation Report

Created on 2025-February-25

Evaluation Table for Sample Number S25N009 (Values and uncertainties expressed in Bq/kg, k=1)

Reference Date – Time:	01/March/2025 – 12:00

Radionuclide	Assigned Value	Assigned Uncertainty	Reported Value	Reported Uncertainty	Relative Bias	P test	Accuracy	Precision	Trueness	Final Score
^{3}H	3.728	0.067	4.330	0.730	16.1%	17.0%	Pass	Pass	Pass	Accepted
^{22}Na	1.192	0.010	1.220	0.070	2.4%	5.8%	Pass	Pass	Pass	Accepted
^{90}Sr	0.493	0.006	0.483	0.034	-2.0%	7.1%	Pass	Pass	Pass	Accepted
^{133}Ba	0.197	0.002	0.236	0.029	20.1%	12.3%	Pass	Pass	Pass	Accepted
^{134}Cs	0.294	0.002	0.265	0.025	-9.8%	9.5%	Pass	Pass	Pass	Accepted
^{137}Cs	0.905	0.011	0.978	0.045	8.1%	4.8%	Pass	Pass	Pass	Accepted

DISCLAIMER: This report has been generated automatically and is for your personal information only. The official results of the proficiency test will be published in the final report. If you find that any information provided on this form might be incorrect, please contact us as soon as possible. Please refer to the accompanying summary report for information on data evaluation criteria.

Page 2 of 2

附件六

中华人民共和国

建设用地规划许可证

340103202600001

地字第_____号

根据《中华人民共和国土地管理法》《中华人民共和国城乡规划法》和国家有关规定，经审核，本建设用地符合国土空间规划和用途管制要求，颁发此书。

合肥市自然资源和规划局

发证机关

日　期　2026年01月23日

合ZG

用地单位	中国科学院合肥物质科学研究院
项目名称	聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程
批准用地机关	安徽省人民政府
批准用地文号	/
用地位置	庐阳区杨岗路与谭岗路交口东北角
用地面积	66643.92平方米
土地用途	科研用地
建设规模	50300平方米
土地取得方式	划拨
附图及附件名称 用地红线图	

遵守事项

一、本证是经自然资源主管部门依法审核，建设用地符合国土空间规划和用途管制要求，准予使用土地的法律凭证。

二、未取得本证而占用土地的，属违法行为。

三、未经发证机关审核同意，本证的各项规定不得随意变更。

四、本证所需附图及附件由发证机关依法确定，与本证具有同等法律效力。

建设用地规划许可证附件

编号： 340103202600001

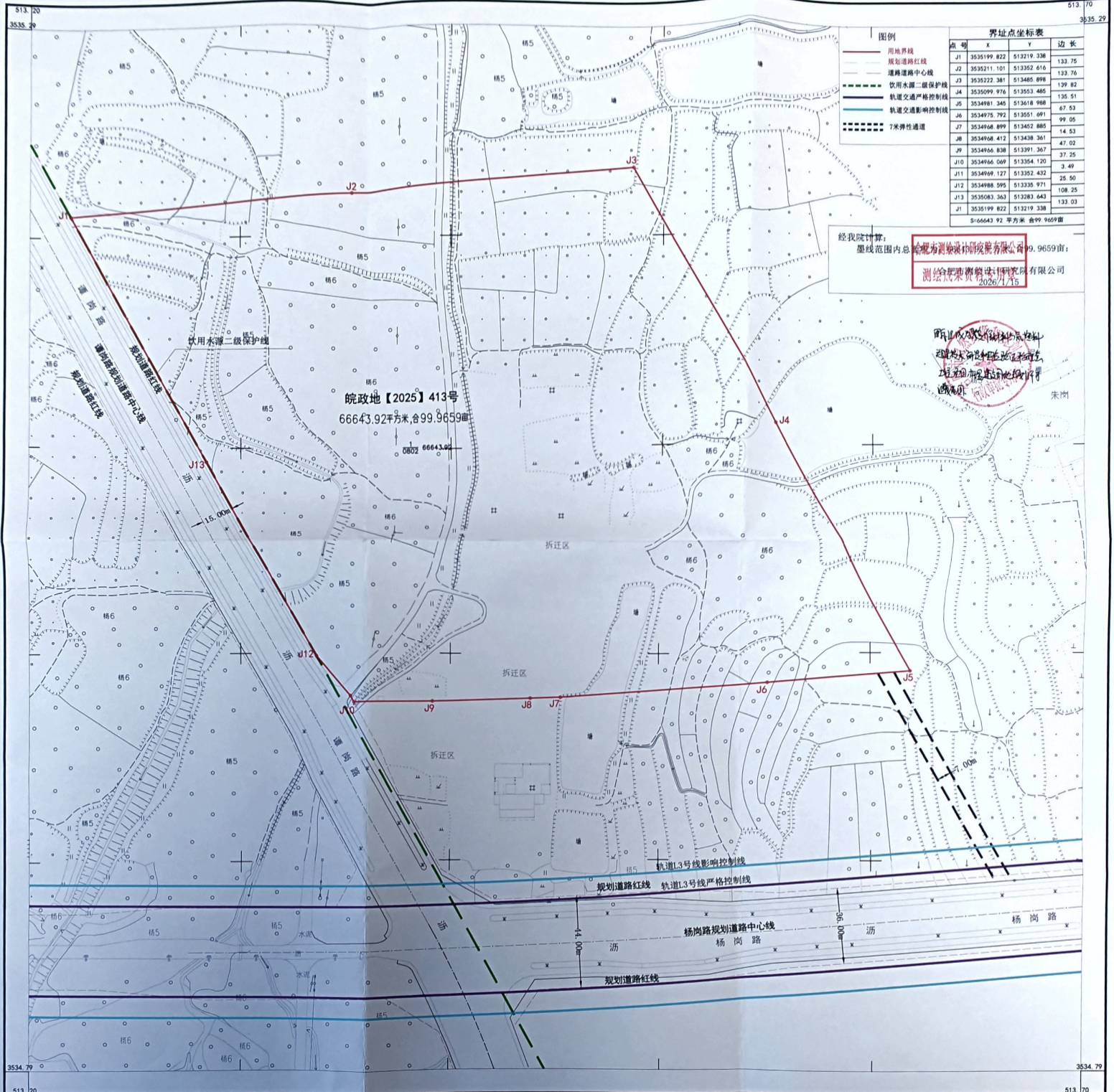
建项目基本情况	建设单位名称	中国科学院合肥物质科学研究院		
	建设项目名称	聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程		
	用地位置	庐阳区杨岗路与谭岗路交口东北角		
	批准用地机关	安徽省人民政府	批准用地文号	/
	项目等级	国家重点	投资性质	
	选址意见书编号	用字第340103202600001号	规划设计条件通知书编号	
建设用地性质		科研用地		
规划用地位置	东至	见附图		
	南至	见附图		
	西至	见附图		
	北至	见附图		
备注				
总用地面积（平方米）		66643.9200	合约（亩）	99.9659
其中含代征（拆）	道路	河道	公共绿地	平方米 亩
已审批规划指标及要求（附表）				
容积率高限（%）		1.20	容积率低限（%）	
建筑高度高限（米）			建筑高度低限（米）	
建筑密度高限（%）		45.00	建筑密度低限（%）	
绿地率高限（%）			绿地率低限（%）	25.00
建筑间距低限（米）			人均集中绿地（㎡）	0.00
现状情况及保留、保护内容				

间距要求	须满足国家相关标准规范及《合肥市控制性详细规划通则》（试行）与《合肥市规划审查暂行规定》等相关要求。
建筑退让道路红线、绿线或地界距离	须满足国家相关标准规范及《合肥市控制性详细规划通则》（试行）与《合肥市规划审查暂行规定》等相关要求。
有关市政道路、微波道路、净空、绿地控制等条件	/
竖向设计要求（地下管网走向）	/
查勘意见	经中国科学院合肥物质科学研究院申请，根据科发建复字〔2025〕65号及市政府批准的《庐阳区杨岗路与谭岗路交口东北角LY10-A02地块控制性详细规划》（合政秘〔2025〕75号）及该项目的用地预审与选址意见书（用字第340103202600001号），原则同意办理“聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目”建设用地规划许可证。 该项目位于庐阳区杨岗路与谭岗路交口东北角，总用地面积约66643.92平方米（合约 99.9659亩），用地性质为科研用地（0802），为国有建设用地（皖政地〔2025〕413号）。具体范围详见附图，准确面积以测绘成果为准。
备注	

合肥市自然资源和规划局　　日期　2026年01月23日

聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台配套工程项目用地红线图

3534.79-513.20



2000国家大地坐标系；
GB/T 20257.1-2017地形图图式；
2026年1月制图。

1:1000

编制：董 飞
检查：张文鹏
审核：陈 旭

合肥市测绘设计研究院有限公司

附件七

220021280291

中国建材检验认证集团安徽有限公司

检 测 报 告

报告编号：FS-20260048

委托单位：中国科学院合肥物质科学研究院

项目名称：中国科学院合肥物质科学研究院聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目噪声质量现状监测

报告日期：2026年4月10日

中国建材检验认证集团安徽有限公司

检　测　报　告

报告编号：FS-20260048　　第 1 页　共 3 页

<table>
<tr><td>受检单位</td><td colspan="5">中国科学院合肥物质科学研究院</td></tr>
<tr><td>委托单位</td><td colspan="5">中国科学院合肥物质科学研究院</td></tr>
<tr><td>委托单位地址</td><td colspan="5">安徽省合肥市蜀山湖路 350 号</td></tr>
<tr><td>检测项目</td><td colspan="5">噪声</td></tr>
<tr><td>检测类别</td><td colspan="5">委托检测</td></tr>
<tr><td rowspan="2">环境条件</td><td>检测时间</td><td>天气情况</td><td>温湿度</td><td colspan="2">检测地点</td></tr>
<tr><td>2026 年 4 月 7 日</td><td>晴</td><td>25.4℃，34%</td><td colspan="2">安徽省合肥市庐阳区三十岗乡谭岗路和杨岗路交口东北角</td></tr>
<tr><td>检测依据</td><td colspan="5">《声环境质量标准》 GB 3096-2008</td></tr>
<tr><td rowspan="3">主要
检测仪器</td><td>仪器名称</td><td>型　号</td><td>仪器编号</td><td colspan="2">仪器检定/校准信息及技术指标</td></tr>
<tr><td>积分声级计</td><td>AWA5688</td><td>ACTC-SB-289</td><td colspan="2">检定单位：中国国检测试控股集团山东有限公司
证书编号：SX26020944002
有效期限：2026.02.09-2027.02.08
频率范围：20Hz~12.5kHz
测量范围：28dBA~133dBA</td></tr>
<tr><td>声校准器</td><td>AWA6021A</td><td>ACTC-SB-184</td><td colspan="2">检定单位：中国国检测试控股集团山东有限公司
证书编号：SX26020944001
有效期限：2026.02.09-2027.02.08
标准声压级：94dB 和 114dB</td></tr>
<tr><td>检测结果</td><td colspan="5">检测结果见第 2 页。
签发日期：2026 年 4 月 10 日</td></tr>
<tr><td>备　　注</td><td colspan="5">/</td></tr>
</table>

编　制：李超　　审　核：丁开凡　　签　发：[illegible]

中国建材检验认证集团安徽有限公司

检　测　报　告

检测结果：

表　聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目
周边噪声环境检测结果

点位序号	测量点位描述	检测结果 dB（A）	
		昼间	夜间
1	项目拟建场址西场界	51	42
2	项目拟建场址北场界	55	38
3	项目拟建场址东场界	48	37
4	项目拟建场址南场界	50	39
5	CRAFT 园区南区	50	33
6	CRAFT 园区 110 千伏变电站	50	40
注：检测示意点位见图。			



备注：▲ 噪声检测示意点位

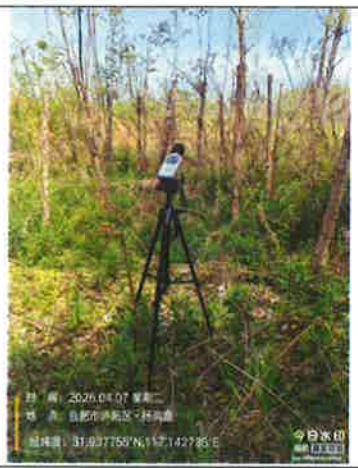
图　聚变堆材料与氚燃料关键技术研发和实验验证平台项目

周边噪声环境检测点位示意图

中国建材检验认证集团安徽有限公司

检　测　报　告

附件：部分现场检测图片

	
噪声检测 1 号点位	噪声检测 2 号点位
	
噪声检测 3 号点位	噪声检测 4 号点位

以下为空。