



浙江旭腾环境

建设项目环境影响报告表

（污染影响类-正文）

项目名称：临空经济示范区杭州礪中修元科技有限公司年
产 10 台 BNCT 设备项目

建设单位（盖章）：杭州礪中修元科技有限公司

编制日期：2026 年 5 月

中华人民共和国生态环境部制

打印编号：1779172569000

编制单位和编制人员情况表

项目编号	7p9bt3		
建设项目名称	临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产10台BNCT设备项目		
建设项目类别	32—070采矿、冶金、建筑专用设备制造；化工、木材、非金属加工专用设备制造；食品、饮料、烟草及饲料生产专用设备制造；印刷、制药、日化及日用品生产专用设备制造；纺织、服装和皮革加工专用设备制造；电子和电工机械专用设备制造；农、林、牧、渔专用机械制造；医疗仪器设备及器械制造；环保、邮政、社会公共服务及其他专用设备制造		
环境影响评价文件类型	报告表		
一、建设单位情况			
单位名称（盖章）	杭州硼中修元科技有限公司		
统一社会信用代码	91330109MAEJKWRT59		
法定代表人（签章）			
主要负责人（签字）			
直接负责的主管人员（签字）			
二、编制单位情况			
单位名称（盖章）	浙江旭腾环境工程有限公司		
统一社会信用代码	91330106MAD5DFNC1X		
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
2 主要编制人员			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字

目 录

一、建设项目基本情况	1
二、建设项目工程分析	16
三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准	28
四、主要环境影响和保护措施	37
五、环境保护措施监督检查清单	71
六、结论	73
附表	75
辐射专题	76

一、建设项目基本情况

建设项目名称	临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产 10 台 BNCT 设备项目			
项目代码	2507-330109-07-02-772721			
建设单位联系人	***	联系方式	***	
建设地点	浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库			
地理坐标	（120 度 27 分 6.913 秒，30 度 14 分 59.502 秒）			
国民经济行业类别	C3589 其他医疗设备及器械制造/M7340 医学研究和试验发展	建设项目行业类别	三十二、专用设备制造业 35；70、医疗仪器设备及器械制造（其他（仅分割、焊接、组装的除外；年用非溶剂型低 VOCs 含量涂料 10 吨以下的除外））/四十五、研究和试验发展 98.专业实验室、研发（试验）基地——其他（不产生实验废气、废水、危险废物的除外）	
建设性质	☒ 新建（迁建） ☐ 改建 ☐ 扩建 ☐ 技术改造	建设项目申报情形	☒ 首次申报项目 ☐ 不予批准后再次申报项目 ☐ 超五年重新审核项目 ☐ 重大变动重新报批项目	
项目审批（核准/备案）部门（选填）	萧山区经济和信息化局	项目审批（核准/备案）文号（选填）	2507-330109-07-02-772721	
总投资（万美元）	7647.8	环保投资（万元）	110	
环保投资占比（%）	0.2	施工工期	12 个月	
是否开工建设	☒ 否 ☐ 是：_____	用地（用海）面积（m ² ）	租赁建筑面积 6330m ² （含月台、贴建房）	
专项评价设置情况	本报告专项评价设置情况详见表1-1。			
	表 1-1 项目专项评价设置情况一览表			
	专项评价类别	设置原则	本项目情况	
	是否设置			
	大气	排放废气含有毒有害污染物 ¹ 、二噁英、苯并[a]芘、氰化物、氯气且厂界外 500m 范围内有环境空气保护目标 ² 的建设项目	本项目排放废气不含有毒有害污染物、二噁英、苯并[a]芘、氰化物、氯气等因子	不设置
	地表水	新增工业废水直排建设项目（槽罐车外送污水处理厂的除外）；新增废水直排的污水集中处理厂	本项目生活污水经化粪池处理达标后纳管排放，项目生产废水经预处理后纳入市政污水管网，由杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理达标	不设置

一、建设项目基本情况

			后排放，所有废水均不直接排放周边水体	
环境风险	有毒有害和易燃易爆危险物质存储量超过临界量 ³ 的建设项目	本项目危险物质存储量未超过临界量	不设置	
生态	取水口下游 500m 范围内有重要水生生物的自然产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道的新增河道取水的污染类建设项目	本项目供水由当地自来水公司提供，项目不设置取水口	不设置	
海洋	直接向海洋排放污染物的海洋工程建设项目	本项目不属于海洋工程建设项目；不直接向海洋排放污染物	不设置	
注：1.废气中有毒有害污染物指纳入《有毒有害大气污染物名录》的污染物（不包括无排放标准的污染物）。 2.环境空气保护目标指自然保护区、风景名胜区、居住区、文化区和农村地区中人群较集中的区域。 3.临界量及其计算方法可参考《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ 169）附录 B、附录 C。 根据《建设项目环境影响报告表编制技术指南（污染影响类）（试行）》：“土壤、声环境不开展专项评价。地下水原则上不开展专项评价，涉及集中式饮用水水源和热水、矿泉水、温泉等特殊地下水资源保护区的开展地下水专项评价工作。”本项目建设范围内不涉及集中式饮用水水源和热水、矿泉水、温泉等特殊地下水资源保护区，因此无需开展土壤、声环境、地下水专项评价。综上，本项目不设置专项评价。本报告正文不含辐射专项评价，辐射专题见辐射环境影响报告表。				
规划情况	《杭州临空经济示范区总体规划》（杭州临空经济示范区管理委员会编制）			
规划环境影响评价情况	杭州临空经济示范区总体规划环境影响报告书(审查稿)			
规划及规划环境影响评价符合性分析	一、《杭州临空经济示范区总体规划》符合性： 第 5 条 规划范围 规划范围为示范区范围，东至规划头蓬快速路，南至萧山区瓜沥镇界，西至杭州绕城高速，北至杭州大江东产业集聚区界及钱塘江水域，规划范围总面积 142.72 平方公里。包括靖江街道、南阳			

一、建设项目基本情况

街道、红山农场全域，以及瓜沥镇、红垦农场和新街街道部分区域。

第 6 条 规划期限

规划期限为 2022-2035 年。规划基期年为 2021 年，近期至 2027 年，远期至 2035 年。

第 91 条 污水处理厂（站）规划

1. 污水处理厂

示范区污水分属钱江污水处理厂、临江污水处理厂和规划临江污水处理二厂服务范围。

保留现状钱江污水处理厂位于示范区外钱江农场，规模 74 万吨/天。规划新建钱江污水处理厂（新厂）位于杭甬高速以南，规模 30 万吨/天，远景预留 20 万吨/天。现状保留临江污水处理厂，位于钱塘区，规模 50 万吨/天。规划新建临江污水处理二厂，位于钱塘区，规模 55 万吨/天，远景预留 25 万吨/天。

符合性分析：根据杭州临空经济示范区管理委员会《关于修正药业 BNCT 项目用地性质的情况说明》，修正药业 BNCT 项目位于空港片区 XS290706-15 地块，根据已批复的《杭州临空经济示范区单元(XS29)详细规划(启动区外)》，该地块用地性质均为一类工业/二类工业/一类物流仓储兼容用地(M1/M2/W1)，可正常开展项目设备研发、动物实验等业务。本项目主要从事其他医疗设备及器械制造及实验室研发，符合规划用地布局以及三条控制线要求，废水排放在厂区外排水管线建设完毕后可纳管送至杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）集中处理，项目符合《杭州临空经济示范区总体规划》要求。

2、《杭州临空经济示范区总体规划环境影响报告书(审查稿)》

规划范围：西至杭州绕城高速东线，东至头蓬快速路，北至杭州大江东产业集聚区边界及钱塘江水域，南至萧山区瓜沥镇行政边界，规划总面积约 142.7 平方千米，包括杭州萧山国际机场、杭州空港经济区（含南阳街道、靖江街道）、萧山区瓜沥镇头蓬快速路以西的区域及红垦、红山农场绕城高速以东的区域。

一、建设项目基本情况

规划期限：基期年为 2023 年，近期末 2027 年；中期末 2030 年；远期末 2035 年。

空间布局：规划形成“一廊两翼，四链五楔”的空间结构。

一廊：“一廊”为航空都市走廊，西连钱江两岸中心、萧山地区中心，北接钱塘辅城，与城西科创走廊共同构筑杭州的实力中轴，形成“一轴一带”的杭州新格局。

两翼：“两翼”为机场南北两大特色功能组群。北翼，以产兴城，集聚产业创新功能，包括会展新城板块和红山板块。其中，会展新城板块，以会展服务和商业商务功能为导向；红山板块，以研发创新、商务办公和智能制造为导向。南翼，以城促产，侧重城市配套服务功能，包括瓜沥板块、坎山板块和靖江板块。其中，瓜沥板块，以区域服务、新型制造和休闲宜居为导向；坎山板块，以历史文化、新型制造和生活服务为导向；靖江板块，服务贸易港，以突出自贸物流、跨境消费等产业功能，同时强化生活服务功能配套。

四链：“四链”为四条融入区域的交通廊道。

五楔：“五楔”是指五条山水林田为主体、通山链江、板块渗透的生态绿楔，依托郊野公园、城市公园、农田、耕地和林地等要素构成绿楔体系。其中红山通江绿楔，依托狮子山、红山和美女山，襟江带城，具有生态、景观的双重价值；南阳两山绿楔，依托白虎山、青龙山，形成通江望海的生态廊道；航昭山水绿楔，依托航坞山和昭东水乡，发挥萧绍平原江南水乡特点，形成极具水乡特色的生态山水绿楔；机场高速绿楔、瓜沥田园绿楔，以田园生态为本底，东西连通、渗透，形成组团间具有保育价值的生态空间。

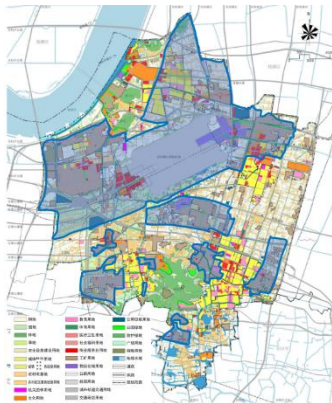
产业发展：衔接《杭州临空经济示范区产业发展规划》，构建“2+3”现代临空产业体系，“2”指生命健康、智能制造两大千亿级临空制造业，“3”指航空服务、数字贸易、会展商务三大千亿级临空服务业。围绕产业体系，重点建设生物科技谷、智能制造园、航空总部区、自贸物流港、会展新客厅五个环绕机场紧密布局的特色产业园区，引导产业专业化集聚，成为示范区产业发展的主要承载空

一、建设项目基本情况

间。

符合性分析：本项目与《杭州临空经济示范区总体规划环境影响报告书（审查稿）》相关符合性分析分别见表 1-2、表 1-3，本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，属于萧山区杭州萧山国际机场产业集聚重点管控单元（ZH33010920007）范围内。本项目主要从事其他医疗设备及器械制造及实验室研发，不属于园区禁止准入类项目；且本项目不属于涉 VOCs 重污染项目，符合生态空间清单管控要求和环境准入条件清单要求，因此，本项目符合该区域规划环评的要求。

一、建设项目基本情况

规划及规划环境影响评价符合性分析	表 1-2 清单 1 生态空间清单						
	规划区块	生态空间名称及编号	生态空间范围示意图	管控要求	现状用地类型	本项目符合性分析	
	重点管控单元	萧山区杭州萧山国际机场产业集聚重点管控单元（ZH33010920007） + 萧山区航坞山经济区产业集聚重点管控单元（ZH330109200012） + 萧山区萧山城区产业集聚重点管控单元 2（ZH33010920014）		空间布局引导： 根据产业集聚区块的功能定位，建立分区差别化的产业准入条件。合理规划居住区与工业功能区，在居住区和工业区、工业企业之间设置防护绿地、生活绿地等隔离带。 在大运河 2000m 核心监控区内项目准入严格执行《浙江省大运河核心监控区建设项目准入负面清单》规定。 在机场远期噪声预测等值线 70 分贝以上噪音线内不新增居住用地。 污染物排放管控： 严格实施污染物总量控制制度，根据区域环境质量改善目标，削减污染物排放总量。所有企业实现雨污分流。 环境风险防控： 强化工业集聚区企业环境风险防范设施设备建设和正常运行监管，加强重点环境风险管控企业应急预案制定，建立常态化的企业隐患排查整治监管机制，加强风险防控体系建设。 资源开发利用： / 重点管控对象： 杭州萧山国际机场产业集聚区（国际化航空货运和快件集散中心）、航坞山经济区产业集聚区、萧山城区产业集聚区。	工业、交通物流、仓储等功能的居住和商业	空间布局引导： 本项目主要从事其他医疗设备及器械制造及实验室研发，项目与最近居住区绿化带隔离。 污染物排放管控： 严格实施污染物总量控制制度，根据区域环境质量改善目标，削减污染物排放总量。同时实现雨污分流。 环境风险防控： 要求企业强化环境风险防范设施设备建设和正常运行监管，编制应急预案制定，加强风险防控。 资源开发利用： / 重点管控对象： /	
表 1-3 清单 5 环境准入条件清单							
区域	行业分类	准入分类	行业清单	工艺清单	产品清单	制订依据	本项目情况
萧山区杭州萧山国际机场产业集聚重点管控单元（ZH33010920007）	二、畜牧业；四、煤炭开采和洗选业；五、石油和天然气采业；六、黑色金属矿采选业；七、有色金属矿采选业；十三、烟草制品业	禁止准入类	二、畜牧业；四、煤炭开采和洗选业；五、石油和天然气采业；六、黑色金属矿采选业；七、有色金属矿采选业；十三、烟草制品业	/	/	规划及产业定位、《杭州市生态环境分区管控	不属于

一、建设项目基本情况

+ 萧山区航坞山经济 区产业集聚重 点管控单元 (ZH3301092001 2)	十四、纺织业	新建、扩建染整精加工 171~175 (喷墨印花和数码印花的除外) (现有染整精加工企业技改以不 增加废水、废气排放总量为前提)	新建、扩建有洗毛、脱 胶、缫丝工艺的和染整 工艺有前处理(丝光、 减碱量等)、染色、湿 法印花工序的	/	动态更新 方 案 》 (2024 年)、《产 业结构调 整指导目 录》、《外 商投资产 业指导目 录》、《长 江经济带 发展负面 清单指南 (试行)	不属于
	十五、纺织服装、服饰业	/	新建、扩建有染色、湿 法印花工艺的(现有企 业技改以不增加废水、 废气排放总量为前提)	/	浙江省实 施细则》、 《杭州市 产业发展 导向目录 与空间布 局 指 引 (2019 年 本)》、 《杭州市 萧山区产 业发展导 向目录与 产业平台 布局指引 (2021 年 本)》、 《浙江省 化工园区 评价认定 管 理 办 法》(浙	不属于
	十六、皮革、毛皮、羽毛及其 制品和制鞋业	/	有鞣制、染色工艺的皮 革鞣制加工/皮革制品 制造/毛皮鞣制及制品 加工	/		不属于
	十九、造纸和纸制品业	纸浆造纸 221、造纸 222 (含废纸 造纸; 不含加工纸制品)	/	/		不属于
	二十二、石油、煤炭及其他燃 料加工业	精炼石油产品制造/煤炭加工(包 括单纯物理分离、物理提纯、混 合、分装; 包括煤制品制造; 包 括其他煤炭加工); 生物质液体燃 料生产	/	/		不属于
	二十三、化学原料和化学制品 制造	化学原料和化学制品制造 261~268 (不构成重大危险源的单 纯物理分离、物理提纯、混合、 分装除外; 工业气体配套企业除 外; 现有企业的安全、环保、节 能和智能化改造项目除外; 经专 家论证确需为本示范区配套建设 的工业气体生产项目除外)	涉及化学合成的工艺 (不涉及危险化学品使 用取证、不涉及重点监 管危险化工工艺或构成 重大危险源的合成生物 学项目除外); 涉及生 产使用危险化学品和铅、 汞、镉、铬、砷、铈、 锑等重点防控重金属的 无机酸、无机碱、无机 盐项目	危险化学品生产		不属于
	二十四、医药制造业	化学药品原料药制造 271 (不含单 纯药品制剂生产、复配、分装); 兽用药品制造 275	涉及化学合成工艺的化 药项目; 涉及危险化学 品使用取证的生物医药 项目; 涉及重点监管危 险化工工艺或构成重大	/		不属于

一、建设项目基本情况

				危险源的生物医药项目、中药提取项目		经信材料（2024）192号）。	
	二十五、化学纤维制造业	纤维素纤维原料及纤维制造 281；新建合成纤维制造 282(单纯纺丝、加弹制造除外)（现有合成纤维制造企业技改、扩建以不增加废水、废气排放总量为前提）	/	/			不属于
	二十六、橡胶和塑料制品	轮胎制造；再生橡胶制造（常压连续脱硫工艺除外）		/			不属于
	二十七、非金属矿物制品	水泥制造（包括水泥粉磨站）；平板玻璃制造（不含玻璃加工）；使用高污染燃料的陶瓷制品制造；石棉制品；含焙烧的石墨、碳素制品；	非烧结、非蒸压粉煤灰砖生产线	/			不属于
	二十八、黑色金属冶炼和压延加工	炼铁 311、炼钢 312；铁合金冶炼 314	/	/			不属于
	二十九、有色金属冶炼和压延加工业	有色金属冶炼 321；贵金属冶炼 322；稀有稀土金属冶炼 323（以上利用单质金属混配重熔生产合金的除外）	/	/			不属于
	十七、木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业；十八、家具制造业；三十、金属制品；三十一、通用设备制造业；三十二、专用设备制造；三十三、汽车制造业；三十四、铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造；三十五、电气机械和器材制造；三十七、仪器仪表制造业；三十八、其他制造；四十、金属制品、机械和设备修理	/	有电镀工艺的、有钝化工艺的热镀锌（工艺配套、兼并重组、不增加废水、废气污染物排放总量的除外；经生态环境部门核准的用于电镀企业搬迁提升的电镀集中区块以及为省、市、区重点项目配套的金属表面处理等必须工艺环节除外；或杭州市今后新的《杭州市产业发展导向目录和产业平台布局指引》文件中不列入禁止、限制类的金属表面处理项目除外）	/			不属于

一、建设项目基本情况

	四十一、电力、热力生产和供应业		新建、扩建燃煤火力发电和热电联产（发电机组节能、减排改造除外、单纯利用余热、余压、余气发电的除外）	/	/		不属于
	四十二、燃气生产和供应业		煤气生产（分装除外）	/	/		不属于
	其它：国家、地方等产业政策禁止的行业、工艺和产品也均列入禁止准入类（如国家发展改革委、商务部最新发布的《市场准入负面清单》禁止准入类的投资项目；不符合国家公布的淘汰机电设备目录和各类设备能效标准的电动机、变压器、锅炉、风机、泵、压缩机等落后低端设备；最新发布的《浙江省制造业产业发展导向目录》规定的禁止和淘汰类项目；最新发布的《浙江省淘汰落后生产能力指导目录》中明确的淘汰的装备、产品、生产线等落后产能；《浙江省人民政府办公厅关于促进建材工业稳增长调结构增效益的实施意见》（浙政办发〔2016〕170号）规定的限制类项目；最新发布的《杭州市产业发展导向目录与产业平台布局指引》规定的禁止和淘汰类项目；《杭州市萧山区工业“低、小、散”整治提升工作实施意见》明确的禁止和淘汰类项目）等						不属于
	十、农副食品加工业	限制准入产业	屠宰技改项目（现有屠宰企业技改以不增加废水、废气排放总量为前提）				不属于
	十一、食品制造业		/	涉及传统发酵工艺	/		不属于
	十二、酒、饮料制造业		/	涉及传统发酵工艺	/		不属于
	十四、纺织业		/	有使用有机溶剂的涂层工艺的	/		不属于
	十六、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业		/	有水洗工艺的羽毛、羽绒加工；有橡胶炼胶、硫化工艺的；年用溶剂型胶粘剂10吨及以上的，或年用溶剂型处理剂3吨及以上的制鞋	/		不属于
	二十四、医药制造业		/	除生物多肽合成、偶联合成、生物大分子合成或半合成、生物大分子与小分子的合成或半合成等生物技术方式外的其它生物合成制药工艺	/		不属于
	二十六、橡胶和塑料制品		/	/	溶剂型氯丁橡胶类、丁苯热塑性橡胶类、药用丁基橡胶塞等	不符合国家节能环保	不属于

一、建设项目基本情况

					保等法律法规要求的橡胶制品		
	二十七、非金属矿物制品		/	/	非规划布局中的商品混凝土生产、砼结构构建制造、水泥制品制造、粘土砖瓦及建筑砌块制造；		不属于
	三十九、废弃资源综合利用业		废电池加工处理（梯次利用的除外）、废油加工处理；进口废旧物资处理、废旧机械产品翻新	废塑料造粒、废钙塑回用	/		不属于
	十七、木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业；十八、家具制造业；三十、金属制品；三十一、通用设备制造业；三十二、专用设备制造；三十三、汽车制造业；三十四、铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造；三十五、电气机械和器材制造；三十七、仪器仪表制造业；三十八、其他制造；四十、金属制品、机械和设备修理		/	涉及酸洗、磷化、湿法发蓝、发黑、电解、铝氧化等金属表面处理（经生态环境部门核准的用于电镀企业搬迁提升的电镀集中区块以及为省、市、区重点项目配套金属表面处理等必须工艺环节除外；或杭州市今后新的《杭州市产业发展导向目录和产业平台布局指引》文件中不列入禁止、限制类的金属表面处理项目除外）。	/		不属于
	五十三、装卸搬运和仓储业		新建独立油库（机场配套除外）				不属于
	其它：国家、地方等产业政策限制的行业、工艺和产品也均列入限制准入类（如国家发展和改革委员会最新发布的《产业结构调整指导目录》规定的限制类项目；《国家鼓励的有毒有害原料（产品）替代品目录（2016年版）》的通告工信部联节〔2016〕398号中的被替代产品；最新发布的《浙江省制造业产业发展导向目录》规定的限制类项目；《浙江省人民政府办公厅关于促进建材工业 稳增长调结构增效益的实施意见》（浙政办 发〔2016〕170号）规定的限制类项目；最新发布的《杭州市产业发展导向目录与产业平台布局指引》规定的限制类项目。《杭州市萧山区工业“低、小、散”整治提升工作实施意见》明确的限制类项目等）						不属于
注：①产业和行业清单按照《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021年版）确定，今后如该版本发生变化，增加部分内容对照国家和地方产业政策即可。②对于限制类，并不意味着不能引进，如果需要引进这类项目，决策由管委会联合发改、经信、环保等部门通过评审论证后再确定是否允许准入。③涉及到的管控单元范围和工业项目类别判定根据《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》（2024年）要求动态调整。							

一、建设项目基本情况

1、“生态环境分区管控”符合性分析

(1) 生态保护红线

本项目拟建地位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库，根据杭州临空经济示范区管理委员会《关于修正药业BNCT项目用地性质的情况说明》，修正药业BNCT项目位于空港片区XS290706-15地块，根据已批复的《杭州临空经济示范区单元(XS29)详细规划(启动区外)》，该地块用地性质均为一类工业/二类工业/一类物流仓储兼容用地(M1/M2/W1)，可正常开展项目设备研发、动物实验等业务。本项目建设单位杭州硼中修元科技有限公司为修正药业子公司。根据《杭州临空经济示范区总体规划》，项目所在地位于城镇开发区域内，不在当地饮用水水源保护区、风景名胜区、自然保护区等生态保护区以及基本农田内，不涉及杭州市萧山区“三区三线”划定成果等相关文件划定的生态保护红线，满足生态保护红线要求。

其他符合性分析

(2) 环境质量底线

本项目拟建区域的环境质量底线目标为：环境空气质量目标为《环境空气质量标准》(GB3095-2026)过渡阶段二级标准浓度限值；水环境质量目标为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III类标准；声环境质量目标为《声环境质量标准》(GB 3096-2008) 3类。

根据环境质量现状监测数据，项目所在地周边的大气环境、地表水环境符合区域所在环境功能区划的要求。本项目废气经处理后均能达标排放，不会改变周边环境空气质量等级。项目废水经预处理后纳入市政污水管网，由杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理达标后排放，水环境功能能维持现状；噪声能达标排放，周边声环境功能能维持现状，各类固废均能得到妥善处理。综上，本项目的实施不会触及环境质量底线，项目区域环境质量能维持现状。

一、建设项目基本情况

采取本环评提出的相关防治措施后，企业排放的污染物不会对周边环境造成明显影响。综上所述，不会突破区域环境质量底线。

（3）资源利用上线

项目选址位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库，项目建成运行后通过内部管理、设备选择、原辅材料的选用和管理、污染治理等多方面采取合理可行的防治措施，以“节能、降耗、减污”为目标，能有效地控制污染。本项目能源采用电能，用水来自市政供水管网，因此不会突破区域的水资源利用上限；本项目不新增用地，不会突破区域土地资源利用上限，符合资源利用上线要求。

（4）生态环境准入负面清单

本项目拟建地位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库，根据《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》，属于“萧山区杭州萧山国际机场产业集聚重点管控单元（ZH33010920007）”。具体生态环境准入清单符合性分析详见表 1-4。

一、建设项目基本情况

其他符合性分析	表 1-4 《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》生态环境准入清单符合性分析			
	萧山区杭州萧山国际机场产业集聚重点管控单元（ZH33010920007）			
	管控要求		本项目情况	是否符合
	空间布局引导	根据产业集聚区块的功能定位，建立分区差别化的产业准入条件。合理规划布局居住、医疗卫生、文化教育等功能区块，与工业区块、工业企业之间设置防护绿地、生活绿地等隔离带。	浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，项目与与居住区之间存在一定隔离带。	符合
	污染物排放管控	严格实施污染物总量控制制度，根据区域环境质量改善目标，削减污染物排放总量。所有企业实现雨污分流。	本项目实施后，污染物排放严格落实总量控制制度，总量控制污染物按相关要求区域削减替代。项目厂区实现雨污分流。	符合
	环境风险防控	重点防控噪声污染对周边居民的影响。	项目实施后，企业加强噪声污染防控，生产设施进行隔声减振处理。	符合
	资源开发效率要求	/	/	/
本项目属于其他医疗设备及器械制造业，符合生态环境准入清单内的空间布局引导、污染物排放管控、环境风险防控、资源开发效率的要求，因此本项目符合杭州市生态环境分区管控动态更新方案要求。				
2、产业政策符合性分析				
(1) 对照《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，本项目不属于限制类及淘汰类项目，且本项目已经在萧山经济技术开发区管委会备案。因此，项目建设符合产业政策要求。				
(2) 杭州市产业政策符合性分析				
对照《杭州市产业发展导向目录》（2024 年本），本项目为C3589 其他医疗设备及器械制造，属于鼓励类项目中的“五、生物医药-F04-27 高端放射治疗设备”。因此，本项目建设符合杭州市产业政策。				

一、建设项目基本情况

（3）杭州市萧山区产业政策符合性分析

对照《杭州市萧山区产业发展导向目录与产业平台布局指引》（2021 年本），本项目为C3589 其他医疗设备及器械制造，属于鼓励类项目中的“二、生物经济产业-（三）医疗器械与健康设备-B18-35 高端制药设备开发与生产。因此，本项目建设符合杭州市萧山区产业政策。

综上所述，本项目建设符合国家、浙江省及地方各级产业政策。

3、《《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022 年版）》浙江省实施细则》

表 1-5 《《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022 年版）》浙江省实施细则》符合性分析

序号	主要内容	本项目情况	是否符合
1	禁止建设不符合《全国沿海港口布局规划》、《全国内河航道与港口布局规划》、《浙江省沿海港口布局规划》、《浙江省内河航运发展规划》以及项目所在地港口总体规划、国土空间规划的港口码头项目	项目不属于码头项目	符合
2	禁止在自然保护地的岸线和河段范围内投资建设不符合《浙江省自然保护地建设项目准入负面清单(试行)》的项目。 禁止在自然保护地的岸线和河段范围内采石、采砂、采土、砍伐及其他严重改变地形地貌、破坏自然生态、影响自然景观的开发利用行为。 禁止在 I 级林地、一级国家级公益林内建设项目	本项目拟建地位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，用地性质为为一类工业/二类工业/一类物流仓储兼容用地(M1/M2/W1)。不涉及自然保护地、I 级林地、一级国家级公益林等	符合
3	禁止在饮用水水源一级保护区、二级保护区、准保护区的岸线和河段范围内投资建设不符合《浙江省饮用水水源保护条例》的项目	本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，项目不在饮用水水源一级保护区、二级保护区、准保护区的岸线和河段范围内	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	项目不涉及水产种质资源保护区	符合

一、建设项目基本情况

	5	在国家湿地公园的岸线和河段范围内：(一)禁止挖沙、采矿；(二)禁止任何不符合主体功能定位的投资建设项目；(三)禁止开(围)垦、填埋或者排干湿地；(四)禁止截断湿地水源；(五)禁止倾倒有毒有害物质、废弃物、垃圾；(六)禁止破坏野生动物栖息地和迁徙通道、鱼类洄游通道，禁止滥采滥捕野生动植物；(七)禁止引入外来物种；(八)禁止擅自放牧、捕捞、取土、取水、排污、放生；(九)禁止其他破坏湿地及其生态功能的活动	项目不涉及国家湿地公园	符合
	6	禁止违法利用、占用长江流域河湖岸线	项目位置不涉及利用、占用长江流域河湖岸线	符合
	7	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、国家重要基础设施以外的项目	项目不涉及岸线保护区和保留区	符合
	8	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	项目不涉及河段及湖泊保护区、保留区	符合
	9	禁止未经许可在长江支流及湖泊新设、改设或扩大排污口	项目不涉及新设、改设或扩大排污口	符合
	10	禁止在长江支流、太湖等重要岸线一公里范围内新建、扩建化工园区和化工项目	项目不属于化工项目	符合
	11	禁止在长江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扩建除外	项目不属于尾矿库、冶炼渣库和磷石膏库项目	符合
	12	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。高污染项目清单参照生态环境部《环境保护综合目录》中的高污染产品目录执行	项目不属于钢铁、石化、化工、焦化、建材、有色、制浆造纸等高污染项目，经查《环境保护综合名录（2021年版）》，本项目不属于高污染项目	符合
	13	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	项目不属于石化、煤化工项目	符合
	14	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，对列入《产业结构调整指导目录》淘汰类中的落后生产工艺装备、落后产品投资项目，列入《外商投资准入特别管理措施(负面清单)》的外商投资项目，一律不得核准、备案，禁止向落后产能项目和严重过剩产能行业项目供应土地	对照《产业结构调整指导目录（2024年本）》，项目不属于限制类及禁止类项目	符合
	15	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。部门、机构禁止办理相关的土地(海域)供应、能评、环评审批和新增授信支持等业务	项目不属于严重过剩产能行业的项目	符合
	16	禁止新建、扩建不符合要求的高耗能高排放项目	项目不属于高耗能高排放项目	符合
	17	禁止在水库和河湖等水利工程管理范围内堆放物料，倾倒土、石、矿渣、垃圾等物质	项目不涉及	不涉及
	18	法律法规及相关政策文件有更加严格规定的从其规定	/	/

二、建设项目工程分析

建设内容：

1.项目报告类别判定

杭州硼中修元科技有限公司为修正药业子公司，成立于 2024 年 11 月 29 日，注册地址位于浙江省杭州市萧山区杭州空港经济区保税路西侧保税大厦 206-2 室，法定代表人为谢世荣。主要经营生物医药配套产业：化学成分限定细胞培养基，新型纯化填料和过滤膜材料，高端药用辅料，疫苗新佐剂的开发和生产，特殊功能性材料等新型药用包装材料与技术，即混即用、智能包装等新型包装系统及给药装置的开发和生产；高端化、智能化制药设备，新型制剂生产设备，大规模生物反应器及附属系统，蛋白质高效分离和纯化设备，药品连续化生产设备；实验动物标准化养殖及动物实验服务。

建设内容

本项目投资 7647.8 万美元，改建面积 6330 平方米（含月台、贴建房），项目用地包括办公区、动物实验室及细胞实验室、机械检讨室和电力检查室区域、BNCT 实验室区域。采用硼中子俘获疗法，购置专业生产与检测设备，预计 2026 年达成首套设备的研发任务形成，2027 年开启量产工厂的筹备组建工作，2028 年开启 BNCT 设备生产，预估设备年度产量可达 10 台，预计实现年产值 25 亿元，并产生 3.5 亿元的税收贡献。

根据《中华人民共和国环境影响评价法》及国务院令第 682 号《建设项目环境保护管理条例》有关规定，该项目须进行环境影响评价。对照《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（2021 年 1 月 1 日起实施），国民经济行业类别属于 C3589 其他医疗设备及器械制造/M7340 医学研究和试验发展，本项目主要进行 BNCT 设备研发及动物实验，本项目不涉及电镀工艺的、年用溶剂型涂料（含稀释剂）10 吨及以上的；属于“三十二、专用设备制造业 35；70、医疗仪器设备及器械制造 358（其他（仅分割、焊接、组装的除外；年用非溶剂型低 VOCs 含量涂料 10 吨以下的除外））”；本项目属于四十五、研究和试验发展 98.专业实验室、研发（试验）基地—其他（不产生实验废气、废水、危险废物的除外）”，因此，项目需编制环境影响报告表。

对照《关于发布〈射线装置分类〉的公告》（环境保护部 国家卫生和计划生育委员会 公告 2017 年第 66 号），本项目 BNCT 装置属于 II 类射线装置；受照小鼠产生感生放射性，其动物实验场所（SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2、解剖室）属于丙级非密封放射性物质工作场所。对照生态环境部《建设项目环境影响评价分类管理名录

二、建设项目工程分析

（2021 年版）》，本项目属于“五十五、核与辐射”-“172、核技术利用建设项目”-“制备 PET 用放射性药物的；医疗使用Ⅰ类放射源的；使用Ⅱ类、Ⅲ类放射源的；生产、使用Ⅱ类射线装置的；乙、丙级非密封放射性物质工作场所（医疗机构使用植入治疗用放射性粒子源的除外）；在野外进行放射性同位素示踪试验的；以上项目的改、扩建（不含在已许可场所增加不超出已许可活动种类和不高于已许可范围等级的核素或射线装置的）”，需进行环境影响评价，因此编制了《临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产 10 台 BNCT 设备项目辐射环境影响专题报告》，见后文。

表 2-1 环境影响评价分类管理表

项目类别	环评类别	报告书	报告表	登记表
三十二、专用设备制造业 35				
70	采矿、冶金、建筑专用设备制造 351；化工、木材、非金属加工专用设备制造 352；食品、饮料、烟草及饲料生产专用设备制造 353；印刷、制药、日化及日用品生产专用设备制造 354；纺织、服装和皮革加工专用设备制造 355；电子和电工机械专用设备制造 356；农、林、牧、渔专用机械制造 357；医疗仪器设备及器械制造 358；环保、邮政、社会公共服务及其他专用设备制造 359	有电镀工艺的； 年用溶剂型涂料（含稀释剂） 10 吨及以上的	其他（仅分割、焊接、组装的除外； 年用非溶剂型低 VOCs 含量涂料 10 吨以下的除外）	/
四十五、研究和试验发展				
98	专业实验室、研发（试验）基地	P3、P4 生物安全实验室；转基因实验室	其他（不产生实验废气、废水、危险废物的除外）	/

2.项目主要工程组成

表 2-2 项目主要工程组成

项目工程组成		项目工程内容
主体工程		活化分析室、分析室、数据处理室、解剖室、细胞实验室、清洁室、清洁设备仓储准备室、CT 室、养殖室、前室、检疫室、风淋室、缓冲室、辐射/危险废物暂存间、一般工业固废仓库、机械/煤气室、仓库、废弃物储藏室、控制室、BNCT 实验室、衰变池等
辅助工程		设置有配电间、茶水区、办公区、会议室、废水处理设施、空调机房等，不设食堂和宿舍
公用工程	供水系统	采用市政给水，可以满足本项目生活用水、生产用水及消防用水等需求
	排水系统	设置厂区雨污分流系统、标准排放口等。厂区实行雨污分流，雨水接入雨水管网；项目生活污水经化粪池预处理后纳管排放；生产废水收集后通过调节池+沉淀池+消毒系统后纳管排放送至杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理达标后排放至钱塘江
	供电系统	项目用电由市政供电部门统一供给
	能源系统	采用市政供电，由当地输电网提供。
环保工程	运营期废气收集及处理系统	（1）试剂挥发废气：废气经收集系统后经配套的活性炭处理装置处理后高空排放（15m）（DA001） （2）细胞实验废气：经生物安全柜高效过滤器系统过滤后通过实验室内新风系统排放

二、建设项目工程分析

	运营期污水处理系统	项目生产废水收集后通过调节池+沉淀池+消毒系统后汇同经化粪池处理后生活污水一并纳管排放送至萧山钱塘污水处理厂进一步处理后排入环境。
	运营期固废收集及处置系统	设 1 个一般工业固废仓库，位于厂房中间，占地面积约 11.1m ² ；设 1 个危废暂存间，位于厂房中间，占地面积约 32.6m ² 。一般工业固废分类收集外卖，并按一般工业固废管理要求做暂时储存管理工作及防雨防渗防尘。危险废物委托有危废处理资质的单位处置，危险废物转移须实行转移联单制；并设置专门的危险废物临时堆放场所，并作防风、防晒、防雨、防渗漏等处理，以免二次污染
储运工程	物料运输储存	原辅料通过卡车运入，储存在仓库内，产品由卡车运出，生活垃圾由环卫清运车清运，一般固废由物资单位回收运走，危险废物由危险废物回收企业负责运输
依托工程	污水处理厂	废水预处理达标后纳管送至杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）。
	危险废物处理	危险废物可就近委有资质单位处理
	生活垃圾处理	项目生活垃圾由环卫清运

3.主要产品及产能和研发方案

项目主要产品及产能具体见表 2-3。

表 2-3 项目主要产品及产能

序号	产品名称	生产规模	备注
1	BNCT 设备	10 台/年	零部件均外购，本项目仅涉及组装

项目研发方案具体见表 2-4。

表 2-4 项目研发方案

序号	实验名称	实验规模	备注
1	动物实验	260 次/年	使用 MeWo 荷瘤小鼠进行的 BPA 皮下持续给药照射试验

4.主要生产设施及设施参数

项目主要生产设施及设施参数清单见表 2-5。

表 2-5 项目主要生产设施及设施参数清单

序号	项目	设施名称	数量	单位	备注
1	生物评价实验设备	生物洁净工作台	1	台	
2		户外排气式安全柜 B2 型	2	台	
3		无氟利昂药品冷藏箱（带冷冻功能的药品冷藏箱）	1	台	
4		CO ₂ 培养箱	1	台	
5		Vi-CELL BLU 自动细胞活力分析仪	1	台	
6		培养显微镜（标配）、显微镜数码相机（标配）套装	1	台	
7		秤	1	台	
8		恒温振荡水浴	1	套	
9		制冰机、片冰机	1	套	
10		多架冷冻离心机	1	套	
11		实验室高压灭菌器	2	套	
12		无氟超低温冰箱	1	台	
13		MicroWave	1	台	

二、建设项目工程分析

建设内容

14		推拉解剖台	1	套	活性炭吸附式室内循环式
15		干式化学分析仪	1	台	
16		全自动血球计数仪（动物用）	1	台	
17		纯净水生产设备	1	台	石英砂过滤→活性炭吸附→软化/阻垢处理
18		超纯水生产设备	1	台	反渗透→电去离子
19		ICP-MS 7900	1	台	
20		风淋室	1	间	
21		饲养架 FRP Bio 2000（特殊型）/风机内置型	4	套	4排×4层，带 FRP 箱体
22		电热水锅炉（简易锅炉）	1	台	ESFE-1100UAX，最高使用压力：0.1MPa 以下，自带自动软化装置
23	放射设备	放射线监测系统	1	套	
24		放射线设施 exit 管理系统	1	套	
25		GM 辐射监测仪	2	套	
26		γ射线用能量补偿 NaI 辐射监测仪	2	套	
27		电离箱式脉冲监测仪	2	套	
28		带屏蔽体的多道分析器（MCA）能谱测量系统	1	套	
29		热外中子测定系统	1	套	
30		玻璃剂量计系统	1	套	
31		测定元件	1	套	
32		中子通道测量仪	2	套	
33		邦纳球（中子谱仪）	1	套	
34		中子多球谱仪	1	套	
35		直线风扇、绿量计	1	套	
36		水模体（定制品）	1	套	
37		校准用平板（定制品）	1	套	
38		高精度电子天平	2	套	
39		手持式光纤镜	1	套	
40		人体等效模体	1	套	
41		高速门系统	1	套	
42		放射线测量用电脑	5	套	
43		金板（试验时测量使用）	1	套	
44		放射线测量仪器的校准	1	套	
45	BNCT 专用设备	空调设备	1	套	
46		空调	20	套	
47		气动工具用压缩机/副储气罐	2	套	
48		空气处理用管道	2	套	
49		接地设备	2	套	
50		变压器	1	套	
51		电源单元（加速器电源用）	1	套	
52		外部基础设置（离合器）	2	套	
53		外部设备用的托架	2	套	
54		建筑物内网络设备	1	套	

二、建设项目工程分析

55		天花板洁净本体	3	套	
56		天花板洁净设备	3	套	
57		风机过滤器机组	2	套	
58		风机过滤器机组用简易窗框	2	套	
59		单元车	1	套	
60		一般机械工具	1	套	
61		BNCT 装置设置时的高度调节螺栓	1	套	
62		油镜	5	套	
63	机器测定器 设备	稳压电源	5	套	
64		数字万用表	5	套	
65		记录仪（含热电偶）	8	套	
66		流量计	30	套	
67		温湿度计	3	套	
68		静电试验机	1	套	
69		EMC 试验设备	1	套	
70		耐压电气试验机及夹具	1	套	
71		泄漏电流试验机及夹具	1	套	
72		跌落试验机	1	套	
73		振动试验机	1	套	
74		恒温槽	2	套	

5.主要原辅材料种类和用量

(1) 主要原辅材料清单

表 2-6 项目主要原辅材料种类和用量消耗

序号	原材料名称	年耗量	最大储存量	单位	备注
1	消毒乙醇 76.9 至 81.4vol%	96	48	L	用于实验期间的消毒
2	无水乙醇/99.5vol%（试剂级）	16	16	L	用于实验期间的消毒
3	二甲基亚砩	0.1	0.1	L	在沸点下长时间加热会分解，本项目用于细胞冷冻的药物溶解/保存溶液，为低温情况，不挥发
4	氩气	4700	47	L	用于 MASS
5	二氧化碳气体	120	40	L	培养箱（用于细胞培养）
6	乙醇/99.5vol%（工业级）	16	16	L	设备维护与清洁
7	D2 气体	40	40	L	发生辐射时的气体供应
8	氮气	40	40	L	清除杂质
9	饲料	100	50	kg	饲料
10	垫料	80	40	kg	垫料
11	加速器	10	10	套	外购
12	CRC 框架(加速器区域 1)	10	10	套	外购
13	CRD 框架(患者区域·加速器区域 2)	10	10	套	外购
14	CRH 框架部屏蔽体	10	10	套	外购
15	纯水冷却·循环单元	10	10	套	外购

二、建设项目工程分析

16	氟利昂冷却·循环单元	10	10	套	外购，购入时生产厂家已预充
17	CQW 真空泵单元	10	10	套	外购
18	其他设备配件	10	10	套	外购
19	硼药	10	10	kg	外购
20	纯净水、超纯水过滤材料	0.4	0.4	t	外购
21	空调过滤器滤芯	0.1	0.1	t	外购
22	活性炭	1	1	t	外购
23	过氧乙酸 20vol%	0.5	0.5	t	用于生产废水的消毒
24	实验小鼠	156	156	只	外购

(2) 主要原辅材料理化性质

表 2-7 项目原辅材料主要理化性质

物料名称	主要理化性质
乙醇	乙醇(Ethyl Alcohol)，俗称酒精、火酒，是醇类化合物的一种，化学式为 C_2H_6O ，结构简式为 CH_3CH_2OH 或 C_2H_5OH 。乙醇呈无色透明液体，有芳香气味，易燃，爆炸极限 3.3%~19%；蒸气压 5.333kPa (19℃)；解离系数 $pK_a=15.9$ (25℃)；粘度 1.074mPa·s (20℃)；气体密度 2.009kg/m ³ ；临界温度 516.2K；临界压力 6.38MPa；相对蒸气密度 1.59(空气=1)；折射率 1.3611(20℃)；熔点-114.1℃ (常压)；沸点 78.3℃；密度 0.7893g/cm ³ ；闪点 14.0℃ (闭杯)，21.1(开杯)；相对密度不大于 0.8129，相当于含酒精不少于 95.0%；与水混溶，可混溶于乙醚、氯仿、甘油、甲醇等多数有机溶剂；
二甲基亚砷	二甲基亚砷是一种含硫有机化合物，分子式为 C_2H_6OS ，常温下为无色无臭的透明液体，是一种吸湿性的可燃液体。具有高极性、高沸点、热稳定性好、非质子、与水混溶的特性，能溶于乙醇、丙醇、苯和氯仿等大多数有机物，被誉为“万能溶剂”。在酸存在时加热会产生少量甲基硫醇、甲醛、二甲基硫、甲磺酸等化合物。在高温下有分解现象，遇氯能发生剧烈反应，在空气中燃烧发出淡蓝色火焰。可作有机溶剂、反应介质和有机合成中间体。也可用作合成纤维的染色溶剂、去染剂、染色载体以及回收乙炔、二氧化硫的吸收剂。
氩气	氩气是一种无色、无味的惰性气体，由氩原子组成。在常温下与其他物质均不起化学反应，在高温下也不溶于液态金属中，在焊接有色金属时更能显示其优越性。可用于灯泡充气和对不锈钢、镁、铝等的电弧焊接，即“氩弧焊”
二氧化碳气体	二氧化碳(carbon dioxide)是一种碳氧化合物，化学式为 CO_2 ，化学式量为 44.0095，常温常压下是一种无色无味或无色无臭而其水溶液略有酸味的气体，也是一种常见的温室气体，还是空气的组分之一（占大气总体积的 0.03%-0.04%）。二氧化碳一般可由高温煅烧石灰石或由石灰石和稀盐酸反应制得，主要应用于冷藏易腐败的食品（固态）、作致冷剂（液态）、制造碳化软饮料（气态）和作均相反应的溶剂（超临界状态）等。关于其毒性，研究表明：低浓度的二氧化碳没有毒性，高浓度的二氧化碳则会使动物中毒。
氘气	氘是普通氢较重的稳定同位素。化学式为 D_2 ，它是无色、无味、无毒的可燃气体。其沸点为-249.5℃。与分子氢一样，双原子氘分子也存在正、仲同分异构现象。室温下，氘正-仲异构体混合物的平衡组成为 2：1，这种氘称为常态氘。降低温度，有利于向正氘转化。在 20.4K 时，平衡混合物含正氘 97.8%，此时的氘称为平衡氘。
氮气	氮气 (Nitrogen)，是氮元素形成的一种单质，化学式 N_2 。常温常压下是一种无色无味的气体，只有在高温高压及催化剂条件下才能和氢气反应生成氨气，在放电的情况下能和氧气化合生成一氧化氮；即使 Ca、Mg、Sr 和 Ba 等活泼金属也只有在加热的情形下才能与其反应。氮气的这种高度化学稳定性与其分子结构有关，2 个 N 原子以叁键结合成为氮气分子，包含 1 个 σ 键和 2 个 π 键，因为在化学反应中首先受到攻击的是 π 键，而在 N_2 分子中 π 键的能级比 σ 键低，打开 π 键困难，

建设内容

二、建设项目工程分析

	因而使 N ₂ 难以参与化学反应。考虑到氮气占大气量的 4/5，即占大气的 78%以上，几乎可以使用无限量的氮气。工业常使用分馏液态空气的方法来获得大量氮气。
硼药	硼药是硼中子俘获治疗治疗时在体内注射含硼-10（10B）的特殊化合物，该药物和癌细胞有很强的亲和力，能短时间浓聚在肿瘤细胞中，但只有少量存留在正常组织细胞中。而后，用中子照射使其在肿瘤细胞中裂变产生高能量的粒子，进而杀伤肿瘤细胞。

6.项目水平衡

项目生活污水收集经化粪池处理达标后纳管，经萧山钱江水处理厂处理达标后排放至钱塘江，项目生产废水收集后经调节池+沉淀池+消毒系统处理工艺处理达标后，纳管排放至杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂），不直接排放周边水体，所有污水均不直接排放至周边水体。

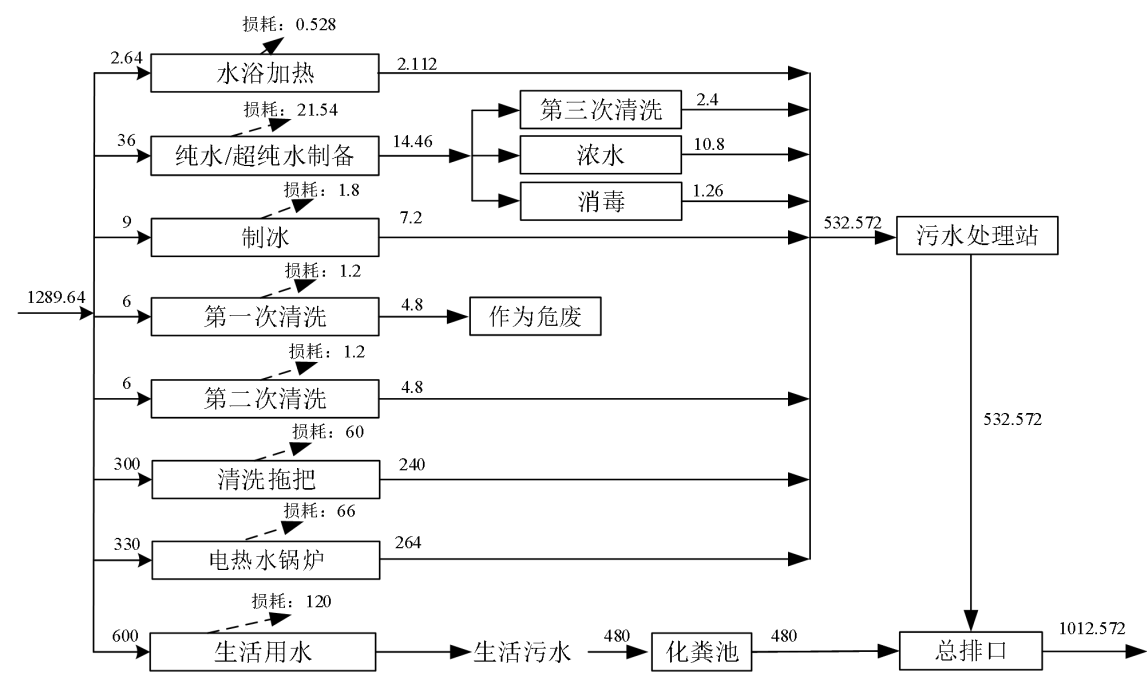


图 2-1 项目水平衡图 (单位: t/a)

7.劳动定员及工作制度

项目劳动定员 40 人，采用白班一班 8 小时制生产，夜间不生产，年工作日按 300 天计，厂内不设食堂和宿舍。

8.项目厂区平面布置

项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，总建筑面积 6330m²（含月台、贴建房）。本项目厂房主要分为动物试验区、办公区、机械检讨区以及 BNCT 实验室，动物试验区和 BNCT 实验室与现状敏感点距离均在 50m 以上。危险物质仓库、危废暂存间、污水处理站、室外声源及废气排气筒等尽可能的布置在远离居民点的区域。项目厂区平面布置图见附图。

建设内容

二、建设项目工程分析

工艺流程和产排污环节：

本项目工艺流程主要包括硼中子俘获治疗系统的销售、生产、调试、实验研究、拆解以及检修。本项目整体工艺及产污流程图见下图。

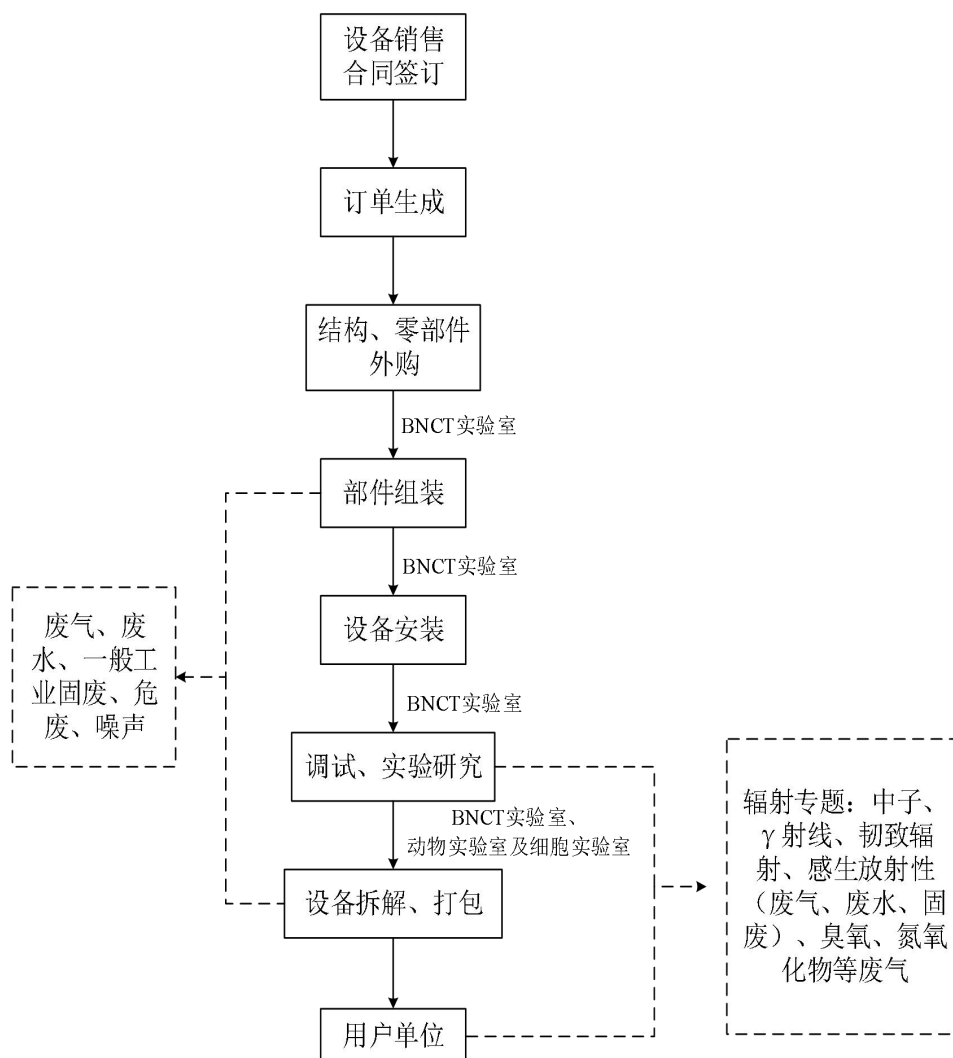


图2-2 整体工艺及产污流程图

1、合同签订

建设单位根据医疗机构提出的需求意向，与用户单位（医疗机构）签订硼中子俘获治疗系统的订购合同，生成订单。

2、硼中子俘获治疗系统的生产、安装

本项目采用零库存订单模式，故建设单位接收用户单位（医疗机构）订单后，将生产硼中子俘获治疗系统所需结构、零部件运至本项目BNCT实验室B进行拆包验收，而后对结构、零部件进行组装，组装完成的部件进一步完成设备安装，并与BNCT实

二、建设项目工程分析

验室B的相关辅助设施、安全防护措施进行关联，完成调试工作后再拆解、打包运输至用户单位（医疗机构）安装。

3、硼中子俘获治疗系统的实验研究

实验内容：

本项目的实验研究主要为将MeWo细胞荷瘤小鼠分为不同组别，在接受BPA给药后，在保持麻醉状态下静置1小时，随后使用BNCT实验室A中的BNCT装置进行中子照射。照射后进行为期4周的观察，研究BNCT的抗肿瘤效果。具体实验流程如下：

（1）荷瘤小鼠制备：购入BALB/c nu/nu雄性5周龄24只，适应环境约1周，将MeWo细胞数调整为每只 2×10^6 个的悬浊液，每只小鼠100 μ L，皮下移植至右侧大腿上部。

（2）小鼠分组：①A群（未给药·未照射）：n=6；②B群（BPA给药·未照射）：n=6；③C群（未给药·照射）：n=6；④D群（BPA给药·照射）：n=6。

（3）小鼠给药：在七氟烷吸入麻醉状态下，使用微量注射器进行持续BPA给药2小时。

（4）中子照射：照射组中，BPA给药的6只小鼠，在给药结束并保持麻醉状态静置1小时后，与其他照射组的6只小鼠一同转移至BNCT实验室A；在麻醉状态下将小鼠放入照射专用固定器中，设置到BNCT上进行中子照射（小鼠麻醉持续至照射结束）；照射结束后，将小鼠从固定器中取出，移回动物实验区养殖室内的饲养架内。

（5）观察：观察外观、体位、呼吸、步态、生殖器/肛门部污渍等，测定体重，测量肿瘤体积。观察时若发现体重急剧下降、消瘦或濒死状态、肿瘤大小显著增大（肿瘤体积 $\geq 1000 \text{ mm}^3$ ）等异常状态，则视为人道终点（HE），实施安乐死。

（6）剖检：各器官的剖检所见，所有个体的肿瘤均取材后拍照，必要时进行血液学及生化学检测。

2.产污环节

项目营运期主要产污环节分析具体见表 2-8。

表 2-8 项目主要产污环节分析

类别	产污环节	污染源	主要污染因子	治理措施及排放去向
废气	实验	试剂挥发废气 G1	非甲烷总烃、臭气浓度	废气经收集系统后经配套的活性炭处理装置处理后高空排放（15m）
	实验	细胞实验废气 G2	气溶胶（颗粒物）	经生物安全柜高效过滤器系统过滤后通过实验室内新风系统排放

二、建设项目工程分析

工 艺 流 程 和 产 排 污 环 节	废 水	员工生活	生活污水 W1	COD _{Cr} 、氨氮等	生产废水收集后通过调节池+沉淀池+消毒系统后汇同经化粪池处理后生活污水一并纳管排放送至杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）进一步处理后排入环境。
		水浴加热	水浴废水 W2	SS	
		纯水/超纯水制备	纯水/超纯水制备产生的浓水 W3	COD _{Cr} 等	
		冰块融化	冰块融化废水 W4	SS	
		清洗	清洗废水 W5	COD _{Cr} 、氨氮、SS 等	
		消毒	消毒废水 W6	COD _{Cr}	
		锅炉	锅炉废水 W7	COD _{Cr}	
	噪 声	生产研发设备	生产厂房	等效声级（dB（A））	生产车间隔声降噪措施
	固 废	原材料拆包、包装	普通包装材料 S1	普通包装材料	收集后由物资单位回收处理
		纯水制作	废纯水机老化过滤材料 S2	纯水机老化过滤材料	
		空调运行	废空调过滤器滤芯 S3	废空调过滤器滤芯	
		样品预处理及检测过程	实验废材料 S4	实验废材料	委托有资质单位处置
		实验过程	实验废液 S5	实验废液	
		清洗	首道清洗废液 S6	首道清洗废液	
		废气处理设施	废活性炭 S7	废活性炭	
		污水处理设施	污泥 S8	污泥	
		物品收集、实验、分析	废化学品包装材料 S9	废化学品包装材料	
		实验	废生物安全柜过滤器滤芯 S10	废生物安全柜过滤器滤芯	
		废水处理	S11	紫外消毒废灯管	
		员工生活	生活垃圾 S12	生活垃圾	环卫部门定期清运

二、建设项目工程分析

与项目有关的原有环境污染问题：

企业租赁浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库，该区域无项目生产，故不存在原有污染情况。空厂房照片见图 2-3。



图 2-3 空置厂房现状

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

区域环境质量现状

1.大气环境

(1) 空气达标区判定

项目所在地属环境空气二类功能区，环境空气污染物基本项目执行《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准及其修改单以及《环境空气质量标准》(GB3095-2026)中的过渡阶段二级标准。为了解项目拟建区域大气环境质量现状，根据杭州市生态环境局发布的《杭州市生态环境状况公报（2024 年度）》中的相关资料，监测资料见表 3-1。

表 3-1 2024 年杭州市环境空气质量现状评价表

污染物	年评价指标	现状浓度 /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GB3095-2012 二级标准及其 修改单			GB3095-2026 过渡阶段 级标准		
			标准值/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	占标率/ (%)	达标 情况	标准值/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	占标率/ (%)	达标 情况
PM _{2.5}	年平均质量 浓度	30	35	85.7	达标	30	100.0	达标
PM ₁₀	年平均质量 浓度	47	70	67.1	达标	60	78.3	达标
NO ₂	年平均质量 浓度	28	40	70.0	达标	40	70.0	达标
SO ₂	年平均质量 浓度	6	60	10.0	达标	60	10	达标
CO	第 95 百分 位数日平均 质量浓度	900	4000	25.0	达标	4000	25	达标
O ₃	90%百分位 日最大 8 小 时均值	164	160	103.7	不达 标	160	103.7	不达 标

统计数据表明，2024 年杭州市区空气中 O₃ 的 90%百分位日最大 8 小时均值超出标准限值，其余污染物均未超过标准限值，因此，项目所在区域为环境空气质量不达标区域。出现超标的原因主要有：一是冬季逆温、湍流运动不明显等不利气象造成污染物难于扩散和消除，造成污染天气。二是杭州地处长三角区域，环境空气不仅与本地有关系，而且与大区域范围的传输密不可分。

根据《萧山区大气环境质量限期达标规划》（萧政发〔2019〕53 号），规划目标：到 2025 年，实现全市域大气“清洁排放区”建设目标，大气污染物排放总量持续稳定下降，基本消除重污染天气，PM_{2.5}年均浓度稳定达标的同时，力争年均浓度继续下降，O₃ 浓度出现下降拐点。到 2035 年，大气环境质量持续改善，包括 O₃ 在内的主要大气污染物指标全面稳定达到国家空气质量二级标准，PM_{2.5}年均浓度达到 25 微克/立方米以下，全面消除重污染天气。

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

根据《萧山区“十四五”生态环境保护规划》，以“清新空气示范区”建设为目标，强化多污染物协同控制和全域协同治理，实现细颗粒物和臭氧“双控双减”。根据国家、省、市统一部署，推进夏秋季臭氧防控、秋冬季大气污染综合治理。制定并实施夏秋季臭氧防控、秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案，以减少污染天气为着力点，聚焦重点领域，分解攻坚目标，落实任务措施，狠抓秋冬季大气污染防治。针对秋冬季PM_{2.5}及夏季臭氧（O₃）污染现状，引导涂装、印刷、纺织、汽修企业合理调节产能，在秋冬季及夏季污染易发时段合理安排生产设备轮检轮休，减少大气污染物排放。加强消耗臭氧层物质控制，贯彻落实《消耗臭氧层物质管理条例》及其配套制度，深入开展消耗臭氧层物质（ODS）淘汰工作。强对 ODS 生产、使用、进出口的监管，鼓励、支持 ODS 替代品的生产和使用，大幅减少 ODS 的使用量。到 2025 年，基本消除污染天气，PM_{2.5}、臭氧（O₃）浓度稳定达到上级考核要求。随着区域大气污染减排计划的推进，污染情况整体呈逐渐下降的趋势。萧山区由不达标区逐步向达标区转变。

（2）其他污染物环境空气质量

为了解项目所在区域 TSP 环境空气质量现状，本环评引用《杭州临空经济示范区总体规划环境影响报告书（审查稿）》中浙江瑞启检测技术有限公司于 2023 年 11 月 5 日~11 月 11 日在靖江街道办事处的检测数据。

A、监测点位

大气监测点位详见表 3-2。

表 3-2 其他污染物监测点位基本信息

监测点位 名称	监测点坐标		监测因子	监测时段	相对项目 方位	相对厂界距 离/m
	经度	纬度				
靖江街道 办事处	E120°28'34.33"	N30°13'44.40"	TSP	2023.11.5~2023.11.11 日均值	东南	~2645

B、监测内容和方法

监测项目：TSP。

监测频次：连续监测 7 天，获取 24 小时平均值。

监测方法：按国家标准和原国家环保总局《空气和废气监测分析方法》（第四版）中的有关规定进行，质量保证按《浙江省环境监测质量保证技术规定》执行。

C、监测结果

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

项目周边其他污染物监测结果统计详见表 3-3。

表 3-3 其他污染物监测结果统计一览表

监测点位名称	监测项目	监测结果 (mg/m ³)	标准值 (mg/m ³)	最大浓度占标率 (%)	超标率 (%)	达标情况
靖江街道办事处	TSP	0.064-0.141	0.3	47	0	达标

由监测结果可知，项目所在区域 TSP 能满足《环境空气质量标准》(GB3095-2026)过渡阶段二级标准浓度限值。

2.地表水环境

根据《2024 年杭州市生态环境状况公报》，全市水环境质量状况总体稳定，市控以上断面水环境功能区达标率以及水质达到或优于Ⅲ类标准比例均为 100%。本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，根据《浙江省水功能区水环境功能区划分方案》（2015 年版），项目周边地表水体主要为先锋河，属于钱塘江水系，水环境功能区划为Ⅲ类区，根据公报情况，钱塘江水环境功能达标率为 100%，干、支流水质达到或优于Ⅲ类标准比例为 100%，说明项目周边地表水环境质量现状满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中Ⅲ类标准。

3.声环境

根据《杭州市萧山区声环境功能区划分方案》，项目所在地块未划分声环境功能区，故评价区域根据功能用途并对照《声环境质量标准》（GB 3096-2008）、《声环境功能区划分技术规范》（GB/T 15190-2014）来确定声环境功能区，确定区域内生活片区为 2 类声环境功能区，工业片区为 3 类声环境功能区，因此本项目执行 3 类标准。项目厂界外周边 50m 范围内无声环境保护目标，不进行声环境质量现状监测。

4.生态环境

项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，本项目不新增用地，企业用地范围内不含生态环境保护目标，可不开展生态现状调查。

5.地下水、土壤环境

本项目企业非地下水和土壤重点监督单位，项目厂区地面进行硬化处理，涉水区域、危废暂存间等区域均进行防腐防渗处理，生产过程中不涉及重金属及持久性难降解有机污染物，不存在地下水污染途径，同时结合本项目的污染途径及所在区域地下

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

水环境敏感程度，无需开展地下水和土壤监测。

6.电磁辐射

本项目各室内监测点位的γ辐射剂量率范围为 59nGy/h~101nGy/h，室外监测点位的γ辐射剂量率范围为 51nGy/h~59nGy/h。根据《浙江省环境天然贯穿辐射水平调查研究》可知，杭州市建筑物室内γ辐射剂量率在 5.6×10⁻⁸Gy/h~44.3×10⁻⁸Gy/h 之间，杭州道路上γ辐射剂量率在 3.2×10⁻⁸Gy/h~6.5×10⁻⁸Gy/h 之间。本项目拟建场所及周围敏感点各监测点位γ辐射剂量率在天然辐射本底水平范围内。本项目场址及周围环境均未检测出中子剂量当量率。

此外，根据《浙江省生态环境状况公报（2024 年）》：全省辐射环境质量总体良好。其中环境电离辐射水平处于本底涨落范围内。

环境保护目标

1. 大气环境

本项目厂界外 500m 范围内不存在自然保护区、风景名胜区、文化区等保护目标，但存在居住区和农村地区中人群较集中的区域等大气环境保护目标；其基本情况见表 3-4。

表 3-4 大气环境主要保护目标一览表

保护目标名称	坐标		保护对象	保护内容	环境功能区	相对厂界方位	相对厂界最近距离/m
	经度	纬度					
杭州临空经济示范区党建综合体	120.450897485	30.253325372	办公区	人群	二类区	北侧	315
圆通速递宿舍楼	120.456621320	30.249447569	居住区	人群	二类区	东侧	380
杭州临空经济示范区管理委员会	120.455150128	30.247187137	办公区	人群	二类区	东南侧	315
杭州空港经济区综合巡查中队	120.455025405	30.248347863	办公区	人群	二类区	东南侧	245

2. 声环境

本项目厂界外 50m 范围内无声环境保护目标。

3. 地下水环境

本项目厂界外 500m 范围内不存在地下水集中式饮用水水源和热水、矿泉水、温泉等特殊地下水资源保护目标。

4. 生态环境

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库，本项目不新增用地，企业用地范围内不含生态环境保护目标，可不开展生态现状调查。

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

污染物排放控制标准

1.废气

(1) 废气有组织排放标准

本项目实验废气有组织排放执行《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)中表 1 大气污染物特别排放限值要求。具体见表 3-5。

表 3-5 《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)表 1

序号	项目	工艺废气排放限值(mg/m ³)	污染物排放监控位置
1	非甲烷总烃(NMHC)	60	车间或生产设施排气筒
2	颗粒物 其他颗粒物	20	
	TVOC ^a	100	
3	臭气浓度 ^b	1000(800 ^c)	

a 根据 3.10 和 3.11 的定义筛选计入 TVOC 的有机物,除了所列已经发布监测方法测定的有机物外,其他符合挥发性有机物定义的物质,待国家发布污染物监测分析方法标准后纳入分析;
b 无量纲,为最大一次值;
c 适用于浙江省制药工业。

(2) 厂区边界废气无组织排放标准

厂区边界任何 1 小时大气污染物平均浓度应符合《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)中表 7 的限值要求;对于《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)中未包含的指标,非甲烷总烃、颗粒物执行《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)中表 2 的限值要求,无组织排放标准执行《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996),具体见表 3-6。

表 3-6 企业边界大气污染物浓度限值 单位: mg/m³

序号	污染物项目	适用条件	排放限值(mg/m ³)	污染物排放监控位置
1	非甲烷总烃(NMHC)	周界外浓度最高点	4	《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996)
2	颗粒物	周界外浓度最高点	1	
3	臭气浓度	周界外浓度最高点	20	《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)

(3) 厂区内无组织废气排放标准

企业厂区内挥发性有机物无组织排放应执行《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)中表 6 的限值要求,具体见表 3-7。

表 3-7 厂区内挥发性有机物(VOCs)无组织排放限值 单位: mg/m³

污染物	特别排放限值	限值含义	无组织排放监控位置
-----	--------	------	-----------

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

非甲烷总烃 (NMHC)	6	监控点处 1h 平均浓度值	在厂房外设置监控点
	20	监测点处任意一次浓度值	

2. 废水

生活污水经化粪池处理后，实验废水采用污水处理设施处理后均达到《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中的三级排放标准后纳入市政污水管网，经杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理后排放至钱塘江。排放标准执行《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》（DB33/2169-2018）中表 1 现有城镇污水处理厂主要水污染物排放限值。详见表 3-8。

表 3-8 项目污水纳管及污水处理排放标准（单位：mg/L（pH 除外））

序号	污染因子	纳管标准	排放标准		
			日均值	瞬时值	排放标准
1	pH 值	6~9	6~9 ^②	6~9 ^②	《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》 (DB33/2169-2018) 表 1
2	COD _{Cr}	500	40	/	
3	NH ₃ -N	35 ^①	2 (4) ^③	/	
4	TP	8 ^①	0.3	/	
5	TN	70 ^①	12 (15) ^③	/	
6	SS	400	10 ^②	/	
7	粪大肠菌群	5000 个/L	100 个/L	/	

注：①氨氮、总氮、总磷执行《工业企业废水氮、磷污染物间接排放标准》（DB33/ 887—2025）排放限值；

②《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB33/2169-2018)中没有的指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)(含 2006 年、2025 年修改单)表 1 一级 A 标准；

③每年 12 月 1 日至次年 3 月 31 日执行括号内的排放限值。

3. 噪声

根据《杭州市萧山区声环境功能区划分方案》，项目所在区块未划分声环境功能区，故评价区域根据功能用途并对照《声环境质量标准》（GB 3096-2008）、《声环境功能区划分技术规范》（GB/T 15190-2014）来确定声环境功能区，确定区域内生活片区为 2 类声环境功能区，工业片区为 3 类声环境功能区，因此本项目执行 3 类标准，具体标准值详见表 3-9。

表 3-9 GB12348-2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》（单位：dB）

类别	等效声级 L _{Aeq}	
	昼间	夜间
3 类	65	55

4. 固体废物

固体废物污染防治及其监督管理执行《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020.4.29 修订）。根据《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》（GB 18599-2020），“采用库房、包装工具（罐、桶、包装袋等）贮存一般工业固体废物过程的污染控制，不适用该标准，但其贮存过程应满足相应防渗漏、防雨淋、防扬尘

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

等环境保护要求”；危险废物执行《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597—2023）；危险废物识别标志执行《危险废物识别标志设置技术规范》（HJ 1276-2022）；危险废物贮存场所标志执行《环境保护图形标志一固体废物贮存(处置)场》(GB 15562.2-1995)及修改单。

总量控制指标

为控制环境污染的进一步加剧，推行可持续发展战略，国家提出污染物排放总量控制的要求，并把总量控制目标分解到省。根据《关于印发〈建设项目主要污染物排放总量指标审核及管理暂行办法〉的通知》（环发[2014]197号）、国务院“十四五”期间污染物排放总量控制等要求，需要进行总量控制的指标包括 COD_{Cr}、NH₃-N、VOCs。

根据《杭州市加快生态文明示范创建深化“美丽杭州”建设行动》的通知（杭政函[2019]18号）、《“十四五”节能减排综合性工作方案》（国发[2021]33号）的相关要求，项目当地对 VOCs、烟粉尘排放也提出总量控制要求。本项目纳入总量控制指标的是 COD_{Cr}、NH₃-N、TN 和 VOCs。

根据《关于印发〈杭州市建设项目和排污权交易总量审核管理暂行规定〉的通知》（杭环发〔2015〕143号），建设项目总量指标削减替代比例要求为：

①印染、造纸、化工、医药、制革等化学需氧量主要排放行业的新增化学需氧量排放总量与削减替代量的比例不得低于 1:1.2；印染、造纸、化工、医药、制革等氨氮主要排放行业的新增氨氮排放总量与削减替代量的比例不得低于 1:1.5；其他行业新增化学需氧量和氨氮总量指标削减替代比例均不低于 1:1；

②二氧化硫和氮氧化物新增总量指标削减替代比例为 1:2；

③生态环境功能区规划及其他相关规划明确主要污染物总量削减替代比例的地区，按规划要求执行。其他未作明确规定的地区，新增主要污染物总量削减替代比例不得低于 1:1。生态环境功能区规划及其他相关规划确定的削减替代比例低于本办法其他规定的，从严执行；

④国家或地方有更严格削减替代比例要求的，从其规定。

根据《关于印发杭州市 2021 年环境空气质量巩固提升实施计划的通知》（杭大气办[2021]3号）中“全市新增二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘和 VOCs 排放的工业项目均实行区域内现役源 2 倍削减量替代”。

三、区域环境质量现状、环境保护目标及评价标准

综上所述，本项目 COD_{Cr}、NH₃-N 替代削减比例为 1:1，TN 暂未建立总氮数据库，VOCs 替代削减比例为 1:2。

本环评建议按照项目实施后的企业污染物达标排放量作为本项目的主要污染物总量控制值，即项目总量控制建议值为 COD_{Cr}0.041t/a、NH₃-N0.002t/a、TN0.012t/a、VOCs0.026t/a。本项目实施后全厂总量控制情况见表 3-10。

表 3-10 项目总量控制指标情况 单位：t/a

种类	污染物名称 (申请指标)	总量控制建 议值(本项目 新增排放量)	替代 比例	申请量(交 易量、替代 量)	申请区 域替代 方式	备注
废水	COD _{Cr}	0.041	1 : 1	0.041	区域削 减替代	区域平衡替代削减
	NH ₃ -N	0.002		0.002		
废气	VOCs	0.026	1 : 2	0.052	区域削 减替代	VOCs 替代

污
染
物
排
放
控
制
标
准

四、主要环境影响和保护措施

施工期环境保护措施

项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库，项目不新增用地，用地范围内无生态环境保护目标。本项目施工期主要为室内装修及设备的安装，不涉及土建，施工期对环境产生的影响较小，本报告不对其进行详细分析。

施
工
期
环
境
保
护
措
施

四、主要环境影响和保护措施

运营期环境影响和保护措施

一、废气

1.源强分析

项目废气主要为试剂挥发废气 G1、细胞实验废气 G2。

试剂挥发废气 G1：本项目试剂挥发废气主要由试剂在配置、投加、设备切换、器皿清洗过程中，液体表面受空气扰动而发生质量蒸发形成挥发性废气，主要污染物为乙醇。根据企业提供的资料，76.9 至 81.4vol%（计算时取最大）的消毒乙醇年使用量为 96L，99.5vol%的试剂级无水乙醇年使用量为 16L，99.5vol%的工业级乙醇年使用量为 16L，乙醇年使用量总计约为 110L，乙醇的密度为 0.85g/ml，则乙醇的使用量为 0.094t/a。乙醇在消毒时主要用来擦洗，按乙醇全部挥发计，则乙醇废气（以非甲烷总烃计）产生量为 0.094t/a。本项目涉及有机气体的实验在生物洁净工作台操作，生物洁净工作台自带收集系统，风量为 120m³/h。废气经收集系统（废气收集效率为 90%）后经配套的活性炭包处理装置处理后高空排放（15m），处理效率按 80%计。

细胞实验废气 G2：微生物的操作在生物安全柜内进行，生物安全柜是为操作诊断性标本等具有感染性的实验材料时用来保护工作人员、实验室环境以及实验品，使其避免暴露于上述操作过程中可能产生的感染性气溶胶（颗粒物）而设计的。本项目采用户外排气式安全柜 B2 型，单独设置高效过滤系统，利用送排风风量比维持房间压差，保持该区域洁净度。同时净化空调系统进气管道、排气管道设置了过滤器，防止有害物质外泄。生物安全柜有前窗操作口，操作者可以通过前窗操作口在安全柜内进行操作，前窗操作口向内吸入负压气流保护操作人员的安全；生物安全柜相对实验室内环境处于负压状态，可有效控制生物安全柜内的气流，实现气流在生物安全柜“侧进上排”。此外，生物安全柜还自带紫外消毒灯，可保证生物安全柜排气中的病原微生物被彻底去除，故本环评不予定量分析。细胞实验废气经生物安全柜高效过滤器系统过滤后通过实验室内新风系统排放，对周围大气环境影响较小。

四、主要环境影响和保护措施

表 4-1 项目废气产生源强汇总

产排污环节	污染源	污染物	产污系数	原料用量 (t/a)	产生量 (t/a)	工作时间 (h/a)	备注 (主要原料)
试剂挥发	试剂挥发	非甲烷总烃	100%	0.094	0.094	2400	乙醇

表 4-2 废气治理设施相关参数

产排污环节	污染物种类	风量核算过程	收集效率	治理设施	去除率	排放口编号	处理能力 (m³/h)	是否可行技术
试剂挥发	非甲烷总烃	生物洁净工作台自带收集系统，风量为 120m³/h 环评取值 120m³/h。	90%	活性炭	80%	DA001	120	是，参照排污许可证申请与核发技术规范制药工业—原料药制造》(HJ858.1-2017)和《污染防治可行技术指南编制导则》(HJ2300-2018)，活性炭吸附废气处理工艺属于可行技术

表 4-3 废气产生及排放情况

产排污环节	污染物种类	排放口编号	废气产生量 (m³/h)	产生量 (t/a)	有组织排放			无组织排放		合计排放量 (t/a)
					排放量 (t/a)	排放速率 (kg/h)	排放浓度 (mg/m³)	排放量 (t/a)	排放速率 (kg/h)	
试剂挥发	非甲烷总烃	DA001	120	0.094	0.017	0.007	58.8	0.009	0.004	0.026

表 4-4 项目废气污染源源强汇总 (单位: t/a)

污染物		产生量	削减量	排入环境量
试剂挥发废气	非甲烷总烃	0.094	0.068	0.026
VOCs 合计		0.094	0.068	0.026

四、主要环境影响和保护措施

表 4-5 项目废气排放口基本情况

编号	名称	排气筒地理坐标		排放口类型	排气筒高度/m	排气筒出口内径/m	烟气量/(m³/h)	烟气温度/°C	年排放小时数/h
		X	Y						
DA001	试剂挥发废气排气筒	120.451514488	30.250053039	一般排放口	15	0.25	120	20	2400

表 4-6 项目废气监测要求

项目	监测点位	监测因子	监测频次	执行标准
有组织废气监测计划方案	DA001 试剂挥发废气处理设施出口	非甲烷总烃	1 次/年	《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)
		臭气浓度	1 次/年	
无组织废气监测计划方案	厂区内，车间外	非甲烷总烃	1 次/年	《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)
	厂界	非甲烷总烃	1 次/半年	《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996)

注：根据《排污单位自行监测技术指南 总则》(HJ819-2017) 确定。

表 4-7 项目废气达标排放情况分析

排气筒	污染物名称	废气源强			污染防治措施	排放标准			达标情况
		排放量(t/a)	最大排放速率(kg/h)	最大排放浓度(mg/m³)		排放速率(kg/h)	排放浓度(mg/m³)	排放标准	
DA001 试剂挥发废气排气筒	非甲烷总烃	0.017	0.007	58.8	活性炭吸附	2.0	60	(DB33/310005-2021)	达标

四、主要环境影响和保护措施

根据企业生产工艺特点，在做好废气收集、处理系统日常维护、保养的情况下，本项目非正常情况发生情景主要是“试剂挥发收集系统发生故障，导致废气无法实现有效收集，但末端废气处理设施仍正常运转”这一情形。从收集系统发生故障到工作人员发现并做出响应（车间废气浓度有所增加），预计会耗时 10-30min。

企业非正常情况下的污染源排放情况见表 4-8，从表中数据可知，在非正常工况下，企业污染物的排放量将高于正常情况，故企业需引起充分重视，加强废气处理设施的管理和维护工作，确保废气处理设施的长期稳定运行，切实防止非正常情况的发生，并做好以下工作：严格按照与生产设备“同启同停”的原则提升治理设施运行率；根据处理工艺要求，在处理设施达到正常运行条件后方可启动生产设备，在生产设备停止、残留废气收集处理完毕后，方可停运处理设施；出现污染治理设施故障时的非正常情况，应立即停产检修，待所有生产设备、环保设施恢复正常后再投入生产，并如实填写非正常工况及污染治理设施异常情况记录信息表，且上报当地生态环境部门；因安全等因素生产工艺设备不能停止或不能及时停止运行的，应设置废气应急处理设施或采取其他替代措施。建议企业配备备用风机，一旦发生故障及时进行更换或者维修。

表 4-8 项目废气治理设施非正常工况排放源强

序号	污染源	非正常排放原因	污染物	非正常排放量（kg/次）	非正常排放速率/（kg/h）	单次持续时间/h	年发生频次
1	试剂挥发废气排气筒 DA001	废气收集系统出现故障，废气未经收集直接无组织排放	非甲烷总烃	0.020	0.039	0.5	1 次/3 年 ^①

注：①在做好维护工作的情况下，风机使用寿命一般会在 3~5 年及以上，本环评保守按 3 年计

2.环境影响分析

项目所在区域环境空气能满足二类功能区的要求，属于环境空气质量达标区。项目与周边最近居住区间隔道路绿地。根据工程分析，项目废气主要为试剂挥发废气和细胞实验废气等。本项目废气污染源通过有效收集或处理后均能达标排放，采取处理措施均为技术可行的，污染物排放速率及浓度不大；企业在落实本报告所提出的废气收集处理措施后，大部分工艺废气被收集处理，无组织废气排放量较少，不会对周边环境造成较大影响。因此本项目建成后对周边大气环境的影响可接受。

二、废水

四、主要环境影响和保护措施

1.源强分析

项目废水主要为员工生活污水 W1、水浴废水 W2、纯水/超纯水制备产生的浓水 W3、冰块融化废水 W4、清洗废水 W5、消毒废水 W6 和锅炉废水 W7。项目生活污水收集经化粪池处理达标后纳管，经杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理达标后排放至钱塘江，项目生产废水收集后经调节池+沉淀池+消毒系统处理工艺处理达标后，纳管排放至杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂），不直接排放周边水体。

项目废水产生源强汇总见表 4-9。

四、主要环境影响和保护措施

表 4-9 项目废水产生源强汇总

序号	产污环节	废水类别	污染物种类	污染物浓度 (mg/L)	污染物产生量 (t/a)	废水产生量 (t/a)	源强计算方式
1	员工生活	生活污水	COD _{Cr}	350	0.168	480	项目劳动定员为 40 人，不设食堂及宿舍，员工生活用水按 50L/人·日计，排水量按 80%计，用水量为 600t/a，排水量为 480t/a。
			NH ₃ -N	35	0.017		
			TN	70	0.034		
2	水浴加热	水浴废水	SS	50	0.0001	2.112	根据企业提供数据，恒温振荡水浴设备每月用水量为 20L，2 台恒温槽加热用水量每月用水量为 100L/台，合计用水量为 2.64t/a，以水的消耗率为 20%计算，水浴废水产生量约为 2.112t/a。
3	纯水/超纯水制备	纯水/超纯水制备产生的浓水	COD _{Cr}	50	0.0005	10.8	本项目培养液制备和器具清洗所用的清洗水均为纯水或超纯水，由新鲜水经项目配备的纯水/超纯水制备系统制备。由建设单位提供的资料可知，本项目纯水制备量约为 60L/次，超纯水制备量约为 60L/次，平均每天制备一次，自来水年用量约为 36t/a。根据纯水机和超纯水机设计说明，本项目纯水及超纯水制备率约为 70%，因此，浓水产生量为 10.8t/a。
4	冰块融化	冰块融化废水	SS	50	0.0004	7.2	根据企业提供数据，部分实验需要用冰块降温，冰块使用制冰机制造，用水量约为 30L/次，平均每天制备一次，自来水年用量约为 9t/a。最终冰块融化成水，产污系数按 80%计，则此部分废水产生量约为 7.2t/a。
5	清洗	清洗废水	COD _{Cr}	1000	0.2472	247.2	本项目少量非一次性实验材料和仪器在实验作业完成后进行清洗，产生的首道清洗废液作为危废，通过专门桶接收后作为危废委托处置，暂存于危废暂存间，委托有资质的单位运输、处置。根据建设单位提供的资料，第一次清洗使用自来水，清洗水总量约 0.02t/d (6t/a)，产生的第一次清洗废水按用水量的 80%计，则第一次清洗废水总量为 0.016t/d (4.8t/a)，作为危废；第二次清洗用水使用自来水，清洗水总量约 0.02t/d (6t/a)，产生的第二次清洗废水按用水量的 80%计，则第二次清洗废水总量为 0.016t/d (4.8t/a)；第三次清洗用水使用纯水，纯水用量约 0.01t/d (3t/a)，清洗废水量按用水量的 80%计算，则第三次清洗废水量为 0.008t/d (2.4t/a)。项目
			NH ₃ -N	20	0.0049		
			TN	50	0.0124		
			SS	200	0.0494		

四、主要环境影响和保护措施

							实验室及办公区清洁主要使用拖把，拖把清洗水每天使用量为 1t/d（300t/a），以产污系数为 80%计算，则实验仪器清洗废水产生量为 0.8t/d（240t/a）。 则总计产生清洗废水共约 247.2t/a。
6	消毒	消毒废水	COD _{Cr}	50	0.00006	1.26	项目部分器皿使用高压灭菌器经高温高压消毒灭菌进行消毒，高压灭菌器采用电加热，项目配备 2 台，纯水使用量 3L/次，平均每天使用一次，总计纯水年使用量约为 1.8t/a，以水的消耗率为 30%计算，消毒废水产生量为 1.26t/a。
7	锅炉	锅炉废水	COD _{Cr}	50	0.013	264	电热水锅炉在本项目中的作用主要是提供热水或蒸汽，用于 BNCT 设备清洗、硼药合成过程中的加热或辅助冷却循环，支持生产和研发环节的温度控制（如维持 40-80℃恒温环境）。项目配备 1 台电热水锅炉，自带自动软化装置，自来水使用量 1100L/次，平均每天使用一次，总计纯水年使用量约为 330t/a，以水的消耗率为 20%计算，锅炉废水产生量为 264t/a。
生产废水合计			COD _{Cr}	489.624	0.261	532.572	/
			NH ₃ -N	9.201	0.005		/
			TN	23.283	0.012		/
			SS	93.696	0.050		/
生活污水合计			COD _{Cr}	350	0.168	480	/
			NH ₃ -N	35	0.017		/
			TN	70	0.034		/

表 4-10 废水治理设施基本情况

废水类别	污染物种类	污染物产生浓度和产生量			治理措施			
		废水产生量（t/a）	产生浓度（mg/L）	产生量（t/a）	处理能力 & 治理工艺	治理效率	是否为可行技术	判断依据
生产废水	COD _{Cr}	532.572	489.624	0.261	调节池+沉淀池+消毒系统	30%	是	是，根据《排污许可申请与核发技术规范 水处理通用工序》，沉淀池+消毒系统是可行技术。消毒系统工艺主要为次氯酸钠+紫外线，可有效消
	NH ₃ -N		9.201	0.005		20%		
	TN		23.283	0.012		20%		

四、主要环境影响和保护措施

	SS		93.696	0.050		60%		
生活污水	COD _{Cr}	480	350	0.168	化粪池	/	是	根据《排污许可证申请与核发技术规范铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业》（HJ 1124—2020），确定为可行技术
	NH ₃ -N		35	0.017		/		
	TN		70	0.034		/		

表 4-11 项目废水污染物排放量及浓度

污染物名称		纳管浓度（mg/L）	纳管量（t/a）	环境排放浓度（mg/L）	环境排放量（t/a）
项目综合废水	废水量	/	1012.572	/	1012.572
	COD _{Cr}	346.180	0.351	40	0.041
	NH ₃ -N	20.660	0.021	2	0.002
	TN	43.375	0.044	12	0.012
	SS	19.712	0.020	10	0.010

注：废水污染物纳管量和环境排放量分别以纳管水质标准、污水处理厂出水水质标准×排水量计算。

表 4-12 项目废水间接排放口基本情况表

序号	排放口编号及名称	类型	排放口地理坐标		废水排放量/（t/a）	排放方式	排放去向	排放规律	排放标准
			经度	纬度					
1	DW001/企业总排口	一般排放口	120.451900726	30.250251522	1012.572	间接排放	杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）	间歇排放，排放期间流量不稳定且无规律，但不属于冲击型排放	《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）表 4 三级标准，NH ₃ -N、TP 执行《工业企业废水氮、磷污染物间接排放标准》（DB33/ 887—2025）排放限值

表 4-13 项目生产废水达标排放情况分析

污染物名称	废水源强		污染防治措施	治理效率	纳管排放标准		达标情况
	产生浓度	排放浓度			排放浓度（mg/L）	排放标准	

运营期环境影响和保护措施

四、主要环境影响和保护措施

2.污染治理设施

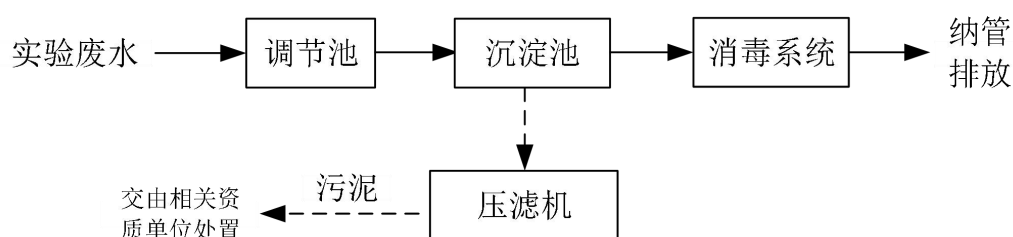


图 4-1 项目生产废水处理工艺流程图

项目生活污水水质属性简单，经化粪池预处理达标后纳管排放。项目生产废水采用调节池+沉淀池+消毒系统池（过氧乙酸）处理工艺处理达标后，纳管排放至杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂），实现达标纳管排放。

3.项目废水监测要求：项目废水自行监测计划详见项目日常污染源监测计划汇总表 4-29。

4.环境影响分析

（1）依托污水处理设施的环境可行性

①工程概况

杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）一期工程始建于 1990 年，采用“高效生物反应器(HCR)”工艺，设计规模为 12 万 m^3/d ，2006 年实施“HCR”工艺改造工程，污水处理采用 A/A/O 工艺，污泥处理采用重力浓缩+带式脱水工艺，一期改造工程于 2006 年投入运行，改造后的设计规模为 10 万 m^3/d 。二期工程设计规模 24 万 m^3/d ，污水处理工艺采用水解酸化+A/A/O 工艺，污泥处理采用带式浓缩脱水工艺，首期 12 万 m^3/d 于 2005 年投入运行，末期 12 万 m^3/d 于 2017 年投入运行。

为改善水体环境，杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）于 2014 年实施了提标改造工程，主要对现有 34 万 m^3/d 规模进行提标改造，改造后出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）一级 A 标准，目前该工程已投入运行并通过三同时竣工验收。

为满足萧山经济发展的需求，杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）四期扩建工程项目通过环评审批，该项目列入中央水污染防治项目储备库项目和杭州市 2022 年亚运会配套项目，四期项目扩建后新增 40 万 m^3/d 污水处理能力，采用地埋式竖向布置型式，出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）一级 A 标准。

根据《杭州市人民政府关于报送城镇污水处理厂主要污染物排放标准执行情况的函》，萧山钱江水处理厂于 2023 年 2 月 21 日起主要污染物出水水质执行《城镇污水

运
营
期
环
境
影
响
和
保
护
措
施

四、主要环境影响和保护措施

《污水处理厂主要水污染物排放标准》（DB33/ 2169-2018）表 1 现有城镇污水处理厂主要水污染物排放限值，其中没有的指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）一级 A 标准。

②设计进出水质标准

根据调查，杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）现有工程设计进出水质情况见表 4-14。

表 4-14 杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）设计进出水水质 单位：mg/L，pH 除外

项目	指标	pH	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
现状一期~四期工程	进水指标	6~9	≤550	≤170	≤300	≤35	50	≤7
	出水指标	6~9	≤40	≤10	≤10	≤2（4）	≤12（15）	≤0.3

注：①括号内数值为每年 11 月 1 日至次年 3 月 31 日执行；②废水排放出水标准执行《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》（DB33/ 2169-2018）表 1 现有城镇污水处理厂主要水污染物排放限值，其中没有的指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）一级 A 标准。

杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）一、二期、三期工程现状提标改造后具体工艺如下图所示：

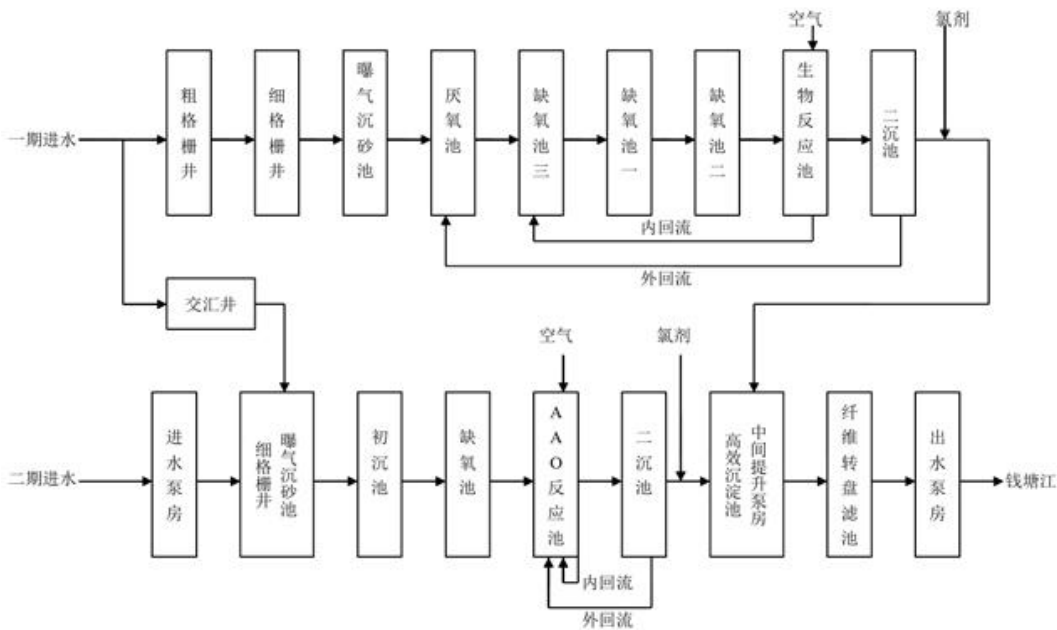


图 4-2 杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）提标改造后污水处理工艺流程图

③实际运行状况

杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）现状运行水质情况见表 4-15，从监测结果看，杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）现状出水各主要指标均能达到《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》（DB33/ 2169-2018）表 1 现有城

四、主要环境影响和保护措施

镇污水处理厂主要水污染物排放限值 and 《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）一级 A 标准。

表 4-15 杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）出水水质情况 单位：mg/L（pH 除外）

排放口	日期	pH 值	COD _{Cr}	氨氮	TP	TN	流量（L/s）
1#排放口	2025/11/3	6.48	6.83	0.0419	0.0822	9.07	736.04
	2025/11/4	6.31	8.59	0.0628	0.1152	9.66	464.13
	2025/11/5	6.27	25.12	0.6777	0.1945	3.88	190.88
	2025/11/6	6.27	9.55	0.0692	0.2074	10.33	88.03
	2025/11/7	6.47	14.41	0.0933	0.1545	9.14	138.87
	2025/11/8	6.43	12.9	0.091	0.1524	9.1	682.74
	2025/11/9	6.45	13.41	0.08	0.1486	7.12	701.45
	出水指标	6~9	40	2（4）	0.3	12（15）	/
2#排放口	2025/11/3	6.323	22.03	0.0271	0.1077	8.785	1785.91
	2025/11/4	6.433	21.48	0.0349	0.1027	8.808	1974.54
	2025/11/5	6.397	20.87	0.0487	0.114	9.907	1739.82
	2025/11/6	6.608	16.59	0.0129	0.0409	4.136	1901.4
	2025/11/7	6.608	17.46	0.046	0.0745	8.224	3013.54
	2025/11/8	6.617	21.97	0.0507	0.1155	5.654	2579.32
	2025/11/9	6.593	20.99	0.0419	0.1221	4.766	2654.79
	出水指标	6~9	40	2（4）	0.3	12（15）	/
4#排放口	2025/11/3	6.06	11.59	0.0425	0.0793	8.998	1938.94
	2025/11/4	6.15	12.21	0.0537	0.0789	8.356	2170.63
	2025/11/5	6.12	10.53	0.0684	0.1005	9.993	1868.06
	2025/11/6	6.26	8.36	0.0744	0.0924	10.217	1876.46
	2025/11/7	6.27	8.18	0.0758	0.0797	8.376	2799.95
	2025/11/8	6.38	9.5	0.0833	0.0839	7.043	2350.25
	2025/11/9	6.35	10.77	0.0744	0.0824	6.86	2480.46
	出水指标	6~9	40	2（4）	0.3	12（15）	/

注：①括号内数值为每年 11 月 1 日至次年 3 月 31 日执行。

杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）近期运行排放总流量约在 42 万 m³/d 之间，运行处理规模为 74 万 m³/d，仍有很大的余量（32 万 t/d）。本项目污水远期排放量约 3.4t/d，占杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理余量的 0.0011%，未超出杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理能力上限，本项目废水不会对现有的污水处理厂处理设施造成水质水量的冲击负荷。

（2）结论

在采取本环评提出的水污染防治措施后，项目所采取的水污染控制和水环境影响减缓措施有效，项目排放废水预处理达标后纳管排入杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理，满足杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）设计进水水质标准要求，同时杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）处理能力仍有很大的余量，可以接纳处理本项目排放的废水，本项目废水水质属性简单，不会对现有的污水处理厂处理设施造成水质水量的冲击负荷，可以经杭州萧山污水处理有限公司（钱江污水处理厂）进一步处理后达到《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》

四、主要环境影响和保护措施

(DB33/ 2169-2018) 表 1 现有城镇污水处理厂主要水污染物排放限值和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准后再排入环境, 具有环境可行性。因此, 项目环境影响符合环境功能区划要求, 项目建成后造成的地表水环境影响可以接受。

三、噪声

1.源强分析

项目工业企业噪声源强调查清单(室内声源)见表 4-16, 工业企业噪声源强调查清单(室外声源)见表 4-17。

四、主要环境影响和保护措施

表 4-16 工业企业噪声源强调查清单（室内声源）

序号	建筑物名称	声源名称	数量	声源源强		声源控措施	空间相对位置 ^② /m			距室内边界距离 ^③ /m	室内边界声级/dB(A)	运行时段	建筑物插入损失 ^④ /dB(A)	建筑物外噪声	
				合计声压级 ^① (dB(A))	距声源距离（m）		X	Y	Z					声压级/dB(A)	建筑物外距离
1	厂房	生物洁净工作台	1	75	1	减振	46	72	1	26	46.7	昼	20	26.7	1
2		户外排气式安全柜 B2 型	2	78	1	减振	48	75	1	24	50.4	昼	20	30.4	1
3		无氟利昂药品冷藏箱	1	75	1	减振	46	80	1	19	49.4	昼	20	29.4	1
4		CO ₂ 培养箱	1	75	1	减振	46	82	1	17	50.4	昼	20	30.4	1
5		恒温振荡水浴	1	80	1	减振	50	80	1	19	54.4	昼	20	34.4	1
6		制冰机、片冰机	1	80	1	减振	55	75	1	17	55.4	昼	20	35.4	1
7		多架冷冻离心机	1	80	1	减振	56	80	1	16	55.9	昼	20	35.9	1
8		实验室高压灭菌器	1	75	1	减振	50	75	1	22	51.2	昼	20	31.2	1
9		实验室高压灭菌器	1	75	1	减振	58	80	1	14	52.1	昼	20	32.1	1
10		无氟超低温冰箱	1	75	1	减振	50	77	1	22	48.2	昼	20	28.2	1
11		纯净水生产设备	1	75	1	减振	50	85	1	14	52.1	昼	20	32.1	1
12		超纯水生产设备	1	75	1	减振	50	87	1	12	53.4	昼	20	33.4	1
13		电热水锅炉（简易锅炉）	1	75	1	减振	58	88	1	11	54.2	昼	20	34.2	1
14		气动工具用压缩机/副储气罐	2	78	1	减振	45	70	1	27	49.4	昼	20	29.4	1
15		跌落试验机	1	75	1	减振	60	85	1	14	52.1	昼	20	32.1	1
16		振动试验机	1	75	1	减振	60	86	1	13	52.7	昼	20	32.7	1

注：①声源源强为对应数量设备等效为 1 个点声源的源强数据；

②空间相对位置以各厂房西南角为起点（0,0,0）；

四、主要环境影响和保护措施

- ③项目仅列出设备距室内边界最近距离和最大噪声示意；
- ④建筑插入损失=墙体（门窗）隔声量+6dB。

表 4-17 工业企业噪声源强调查清单（室外声源）

序号	声源名称	型号	空间相对位置/m			声源源强		声源控制措施	运行时段
			X	Y	Z	声压级（dB(A)）	距声源距离（m）		
1	风机/排风口 DA001	/	60	90	1	70	1	减振消声	昼
注：空间相对位置以厂区西南角为起点（0,0,0）。									

四、主要环境影响和保护措施

2.污染治理设施

为保证企业噪声稳定达标排放，建议企业采取以下噪声污染防治措施：

- (1) 在选型、订货时应予优先考虑选用优质低噪动力设备；
- (2) 各高噪声机械加工设备做好减振、隔声措施；
- (3) 车间生产时须关闭北侧门窗，北侧门窗应选用足够隔声量的隔声门窗；
- (4) 合理安排生产车间设备布局，将高噪声设备布置在远离周边敏感目标侧，增加距离衰减。
- (5) 加强设备的维护，确保设备处于良好的运转状态，杜绝因设备不正常运转而产生的高噪声现象。
- (6) 加强员工环保意识，防止人为噪声影响。

3.环境影响分析

为进一步分析本项目噪声对周围环境影响，本评价对项目噪声采取上述防治措施后对周边环境的影响进行了预测分析。

(1) 室外声源在预测点产生的声级计算模型

户外声传播衰减包括几何发散 (A_{div})、大气吸收 (A_{atm})、地面效应 (A_{gr})、障碍物屏蔽 (A_{bar})、其他多方面效应 (A_{misc}) 引起的衰减。

①在环境影响评价中，可根据声源参考位置处的声压级、户外声传播衰减，计算预测点的声级，按式下式计算。

$$L_p(r) = L_p(r_0) + D_C - (A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc})$$

式中： $L_p(r)$ ——预测点处声压级，dB；

$L_p(r_0)$ ——参考位置 r_0 处的声压级，dB；

D_C ——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 L_w 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。

②几何发散引起的衰减 (A_{div})

室外声源只考虑几何发散时，则：

四、主要环境影响和保护措施

$$L_p(r) = L_p(r_0) - A_{div}$$

无指向性点声源几何发散衰减的基本公式是：

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

$$\text{即： } A_{div} = 20\lg(r/r_0)$$

式中： A_{div} ——几何发散引起的衰减，dB；

r ——预测点距声源的距离；

r_0 ——参考位置距声源的距离。

③障碍物屏蔽引起的衰减（ A_{bar} ）

屏障衰减 A_{bar} 按经验值估算，当声源与受声点之间有厂房或围墙阻隔时，其衰减量为：一排厂房降低 3~5dB，两排厂房降低 6~10dB，三排或多排厂房降低 10~12dB，普通砖围墙按 2~3dB 考虑，为了简化计算并保证一定的安全系数，项目噪声预测不考虑厂界外其他建构物的屏蔽效应及周边树木植被等的吸声、隔声作用，也不考虑空气吸收衰减量和地面吸收衰减量。

（2）室内声源在预测点产生的声级计算模型

声源位于室内，室内声源可采用等效室外声源声功率级法进行计算。设靠近开口处（或窗户）室内、室外某倍频带的声压级或 A 声级分别为 L_{p1} 和 L_{p2} 。若声源所在室内声场为近似扩散声场，则室外的倍频带声压级可按下式近似求出：

$$L_{p2} = L_{p1} - (TL + 6)$$

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；

L_{p2} ——靠近开口处（或窗户）室外某倍频带的声压级或 A 声级，dB；

TL——隔墙（或窗户）倍频带或 A 声级的隔声量，dB。

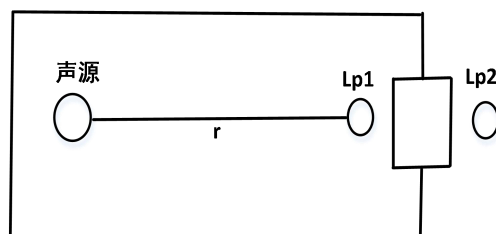


图 4-3 室内声源模型图

也可按下式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：

$$L_{p1} = L_w + 10\lg(Q/4\pi r^2 + 4/R)$$

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；

四、主要环境影响和保护措施

L_w ——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； $R=S\alpha/(1-\alpha)$ ， S 为房间内表面面积， m^2 ； α 为平均吸声系数；

r ——声源到靠近围护结构某点处的距离， m 。

然后按下式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：

$$L_{p1i}(T)=10\lg\left(\sum_{j=1}^N 10^{0.1L_{p1ij}}\right)$$

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；

$L_{p1i}(T)$ ——靠近围护结构处室内 N 个声源 i 倍频带的叠加声压级，dB；

TL_i ——围护结构 i 倍频带的隔声量，dB。

然后按下式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。

$$L_w=L_{p2}(T)+10\lg S$$

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 。

然后按室外声源预测方法计算预测点处的 A 声级。

在厂区东南西北边界处设置预测点，项目生产采取昼间单班制，因此仅预测昼间噪声对环境的影响，各噪声单元预测结果及预测综合结果见表 4-18。

表 4-18 噪声影响预测结果（单位：dB）

预测点		贡献值	标准值	达标情况
编号	位置		昼间	昼间
1	东厂界	57.9	65	达标
2	南厂界	55.0	65	达标

四、主要环境影响和保护措施

3	西厂界	53.4	65	达标
4	北厂界	53.2	65	达标

本项目生产设备噪声级不大，均位于厂房内，距离厂界均有一定的距离，项目生产设施在具备减振隔声等措施的前提下，对项目厂界噪声级的影响不大，能够维持声环境质量现状要求，项目实施后对四周厂界昼间噪声级贡献值的预测值能够满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB 12348-2008）3 类标准。因此，项目对周边声环境影响可接受。

4.噪声监测要求

噪声自行监测计划详见项目日常污染源监测计划汇总 4-29

四、主要环境影响和保护措施

四、固体废物

依据《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020.4.29 修订）、《固体废物鉴别标准 通则》（GB 34330-2025）、《国家危险废物名录（2025 年版）》及《危险废物鉴别标准》（GB 5085.1~7）等进行判定。

表 4-19 项目固体废物产生量核算表（单位：t/a）

序号	固体废物名称	主要成分	产生环节	产生量	源强计算方式	核算依据
1	普通包装材料 S1	普通包装材料	原材料拆包、包装	2	类比法	根据企业提供经验数据，普通包装材料产生量约 2t/a
2	废纯水机老化过滤材料 S2	纯水机老化过滤材料	纯水制作	0.4	类比法	根据企业提供经验数据，纯水机老化过滤材料一般 1 年更换一次，一次更换量每台 200kg，共 2 台，则平均年产生量约为 0.4t/a
3	废空调过滤器滤芯 S3	废空调过滤器滤芯	空调运行	0.1	类比法	根据企业提供经验数据，项目实验室内的空调机组系统更换过滤芯时会产生废滤芯固废，废滤芯产生量约为 0.1t/a
4	实验废材料 S4	实验废材料	样品预处理及检测过程	2	类比法	根据企业提供经验数据，样品预处理及检测过程使用的一次性器具及容器、试纸及被污染的包装物等，产生量约 2t/a
5	实验废液 S5	实验废液	实验过程	2	类比法	根据企业提供经验数据，主要包括实验过程产生的废培养液、废试剂等，年产生量约为 2t/a
6	首道清洗废液 S6	首道清洗废液	清洗	4.8	产污系数法	根据企业提供经验数据，项目少量非一次性实验材料和仪器在实验作业完成后进行清洗，产生的首道清洗废液作为危废，第一次清洗使用自来水，清洗水总量约 0.02t/d（6t/a），产生的第一次清洗废水按用水量的 80%计，则第一次清洗废水总量为 0.016t/d（4.8t/a），通过专门桶接收后作为危废委托处置，暂存于危废暂存间，委托有资质的单位运输、处置
7	废活性炭 S7	废活性炭	废气处理设施	1.07	产污系数法	根据《浙江省分散吸附-集中再生活性炭法挥发性有机物治理体系建设技术指南（试行）》，废气处理设施每运行 500h 更换活性炭，本项目废气处理设施运行时间 2400h，每次更换量 0.2t，则全年更换总量为 1t；活性炭吸附污染物总量为 0.07t，共计 1.07t/a。

四、主要环境影响和保护措施

8	污泥 S8	污泥	污水处理设施	1.611	产污系数法	根据企业经验数据并类比同类企业，项目处理生产废水量约 268.572t/a，污泥产生量约 6kg/t-废水，因此产生量约 1.611t/a
9	废化学品包装材料 S9	废化学品包装材料	物品收集、实验、分析	0.2	类比法	根据企业提供经验数据，废化学品包装材料年产生量约 0.2t/a
10	废生物安全柜过滤器滤芯 S10	废生物安全柜过滤器滤芯	实验	0.1	类比法	根据企业提供经验数据，废过滤器滤芯每年更换一次，年产生量约为 0.1t/a
11	紫外消毒废灯管 S11	紫外消毒废灯管	污水处理设施	0.01	类比法	根据企业提供经验数据，紫外消毒废灯管每年更换一次，年产生量约为 0.01t/a
12	生活垃圾 S12	生活垃圾	员工生活	12	产污系数法	员工生活垃圾按人均 1.0kg/d 计，项目劳动定员 40 人，则生活垃圾产生量约为 12t/a

表 4-20 项目固体废物污染源强汇总表

产生环节	固体废物名称	固废属性	类别代码	固废代码	主要有毒有害物质名称	物理性状	年产生量 (t/a)	贮存方式	利用处置方式和去向	利用或处置量 (t/a)
原材料拆包、包装	普通包装材料	一般工业固体废物	S17	900-099-S17	-	固态	2	一般固废间分类、分区存放	外售资源回收公司	2
纯水制作	废纯水机老化过滤材料	一般工业固体废物	S17	900-099-S17	-	固态	0.4			0.4
空调运行	废空调过滤器滤芯	一般工业固体废物	S17	900-099-S17	-	固态	0.1			0.1
样品预处理及检测过程	实验废材料	危险废物	HW49	900-047-49	有机物	固态	2	危废间分类、分区、桶装存放	委托有资质单位处置	2
实验过程	实验废液	危险废物	HW49	900-047-49	有机物	液态	2			2
清洗	首道清洗废液	危险废物	HW49	900-047-49	有机物	固态	4.8			4.8
废气处理	废活性炭	危险废物	HW49	900-039-49	有机物	液态	1.07			1.07

四、主要环境影响和保护措施

设施										
污水处理设施	污泥	危险废物	HW49	772-006-49	有机物	固态	1.611			1.611
物品收集、实验、分析	废化学品包装材料	危险废物	HW49	900-041-49	有机物	固态	0.2			0.2
实验	废生物安全柜过滤器滤芯	危险废物	HW49	900-041-49	有机物	固态	0.1			0.1
污水处理设施	紫外消毒废灯管	危险废物	HW29	900-023-29	重金属	固态	0.01			0.01
员工生活	生活垃圾	生活固废	/	/	/	固态	12	垃圾分类袋装存放	环卫部门清运	12
合计	一般工业固废	/	/	/	/	/	2.5	/	/	2.5
	危险废物	/	/	/	/	/	11.791	/	/	11.791
	生活固废	/	/	/	/	/	12	/	/	12

表 4-21 项目危险废物基本情况一览表

序号	危险废物名称	危险废物类别	危险废物代码		环境危险特性
1	实验废材料	HW49 其他废物	900-047-49	生产、研究、开发、教学、环境检测（监测）活动中，化学和生物实验室（不包含感染性医学实验室及医疗机构化验室）产生的含氰、氟、重金属无机废液及无机废液处理产生的残渣、残液，含矿物油、有机溶剂、甲醛有机废液，废酸、废碱，具有危险特性的残留样品，以及沾染上述物质的一次性实验用品（不包括按实验室管理要求进行清洗后的废弃的烧杯、量器、漏斗等实验室用品）、包装物（不包括按实验室管理要求进行清洗后的试剂包装物、容器）、过滤吸附介质等	T/C/I/R
2	实验废液	HW49 其他废物	900-047-49	生产、研究、开发、教学、环境检测（监测）活动中，化学和生物实验室（不包含感染性医学实验室及医疗机构化验室）产生的含氰、氟、重金属无机废液及无机废液处理产生的残渣、残液，含矿物油、有机溶剂、甲醛有机废液，废酸、废碱，具有危险特性的残留样品，以及沾染上述物质的一次性实验用	T/C/I/R

四、主要环境影响和保护措施

				品（不包括按实验室管理要求进行清洗后的废弃的烧杯、量器、漏斗等实验室用品）、包装物（不包括按实验室管理要求进行清洗后的试剂包装物、容器）、过滤吸附介质等	
3	首道清洗废液	HW49 其他废物	900-047-49	生产、研究、开发、教学、环境检测（监测）活动中，化学和生物实验室（不包含感染性医学实验室及医疗机构化验室）产生的含氰、氟、重金属无机废液及无机废液处理产生的残渣、残液，含矿物油、有机溶剂、甲醛有机废液，废酸、废碱，具有危险特性的残留样品，以及沾染上述物质的一次性实验用品（不包括按实验室管理要求进行清洗后的废弃的烧杯、量器、漏斗等实验室用品）、包装物（不包括按实验室管理要求进行清洗后的试剂包装物、容器）、过滤吸附介质等	T/C/I/R
4	废活性炭	HW49 其他废物	900-039-49	烟气、VOCs 治理过程（不包括餐饮行业油烟治理过程）产生的废活性炭，化学原料和化学制品脱色（不包括有机合成食品添加剂脱色）、除杂、净化过程产生的废活性炭（不包括 900-405-06、772-005-18 、261-053-29 、265-002-29 、384-003-29、387-001-29 类废物）	T
5	污泥	HW49 其他废物	772-006-49	采用物理、化学、物理化学或者生物方法处理或者处置毒性或者感染性危险废物过程中产生的废水处理污泥和废水处理残渣（液）	T/In
6	废化学品包装材料	HW49 其他废物	900-041-49	含有或者沾染毒性、感染性危险废物的废弃的包装物、容器、过滤吸附介质	T/In
7	废生物安全柜过滤器滤芯	HW49 其他废物	900-041-49	含有或者沾染毒性、感染性危险废物的废弃的包装物、容器、过滤吸附介质	T/In
8	紫外消毒废灯管	HW29 含汞废物	900-023-29	生产、销售及使用过程中产生的废含汞荧光灯管及其他废含汞电光源，及废弃含汞电光源处理处置过程中产生的废荧光粉、废活性炭和废水处理污泥	T

四、主要环境影响和保护措施

固体废物环境管理要求

项目固废包括一般固废和危险废物，应分类收集处理，按照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020.4.29 修订）的相关要求进行管理、贮存、处置。

（1）一般固废管理措施

一般工业固废按照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020.4.29 修订）要求执行，并参照《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》（GB 18599-2020）中的相关环境保护要求执行。

项目产生的一般工业固废在一般工业固废暂存间暂时集中存放，做好防扬散、防流失、防渗漏措施。一般工业固废收集后应按《浙江省工业固体废物电子转移联单管理办法（试行）》要求规范转移到回收单位或有能力的处置单位，生活垃圾由环卫部门统一清运处理。

（2）危险废物管理措施

项目危险废物处置应严格按照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020.4.29 修订）中有关危险废物的管理条款执行，危险废物按法规要求应委托有资质的单位进行处理。考虑企业危险废物难以保证及时外运处置，企业应设置有危废仓库，对危险废物进行收集及临时存放，然后集中由有资质单位收集处理。危险废物进行临时存放时，需按《危险废物贮存污染控制标准》、《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的相关要求，使用密封容器进行贮存，且须采用防漏措施。

根据《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597），危险废物具有长期性、隐蔽性和潜在性，应具体从以下几方面加强对危险废物的管理力度：

①贮存设施应根据危险废物的形态、物理化学性质、包装形式和污染物迁移途径，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，不应露天堆放危险废物。

②贮存设施应根据危险废物的类别、数量、形态、物理化学性质和污染防治等要求设置必要的贮存分区，避免不相容的危险废物接触、混合。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。

③在贮存库内或通过贮存分区方式贮存液态危险废物的，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）；用于贮存可能产生渗滤液的危险废物的贮存库或贮存分区

运
营
期
环
境
影
响
和
保
护
措
施

四、主要环境影响和保护措施

运营期环境影响和保护措施

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。

④易产生粉尘、VOCs、酸雾、有毒有害大气污染物和刺激性气味气体的危险废物应装入闭口容器或包装物内贮存。

⑤危险废物存入贮存设施前应对危险废物类别和特性与危险废物标签等危险废物识别标志的一致性进行核验，不一致的或类别、特性不明的不应存入。

⑥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。

⑦作业设备及车辆等结束作业离开贮存设施时，应对其残留的危险废物进行清理，清理的废物或清洗废水应收集处理。

⑧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。

根据《危险废物转移管理办法》，必须从以下几方面加强对危险废物的转移管理：

①对承运人或者接受人的主体资格和技术能力进行核实，依法签订书面合同，并在合同中约定运输、贮存、利用、处置危险废物的污染防治要求及相关责任；

②制定危险废物管理计划，明确拟转移危险废物的种类、重量（数量）和流向等信息；

③建立危险废物管理台账，对转移的危险废物进行计量称重，如实记录、妥善保管转移危险废物的种类、重量（数量）和接受人等相关信息；

④填写、运行危险废物转移联单，在危险废物转移联单中如实填写移出人、承运人、接受人信息，转移危险废物的种类、重量（数量）、危险特性等信息，以及突发环境事件的防范措施等；

⑤及时核实接受人贮存、利用或者处置相关危险废物情况；

⑥禁止将危险废物以副产品等名义提供或者委托给无危险废物经营许可证的单位或者其他生产经营者从事收集、贮存、利用、处置活动。

（3）危险废物贮存场所影响分析

项目计划设置 1 个危险废物暂存间，基本情况见表 4-22。

四、主要环境影响和保护措施

表 4-22 项目危险废物贮存场所基本情况

序号	贮存场所名称	危险废物名称	位置	占地面积	贮存方式	贮存能力	贮存周期
1	危废暂存间	实验废材料、废活性炭、污泥等	厂房中间设有一间危险废物仓库	32.6m ²	密闭桶装或防水编织袋袋装	10t	3 个月

根据《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597）及其修改单的要求，结合区域环境条件可知，项目危险废物贮存间选址地质构造稳定，非溶洞区等地质灾害区域，设施场所高于最高的地下水位，项目距离居民点较远，其选址可行。

根据工程分析，本项目危险废物产生量约为 11.791t/a，危险废物至少每三个月委托处置一次，危险废物贮存场所（设施）的能力可以满足企业危险废物贮存要求。

根据本项目危险废物特性，为固态和液态，液态危废可装在废桶内，在企业按要求做好危险废物管理的前提下，本项目危险废物对周边大气、地表水、地下水、土壤环境等不会产生污染；危险废物贮存场所具备防风、防雨、防渗、防辐射、防盗等功能，因此危险废物贮存期间对周边环境的影响可接受。

综上，项目所产生的固体废弃物按相应的方式进行处置，各类固体废弃物均有可行的处置出路。只要建设单位落实以上措施，加强管理及时清除，则项目产生的固废不会对周围环境产生不良影响。

五、地下水、土壤

（1）污染影响识别

表 4-23 地下水、土壤环境影响源及影响因子识别表

污染源	工艺流程节点	污染影响途径	污染物类型	污染物指标	备注
危险物质仓库、危废仓库、事故应急池、污水处理站	原料泄漏、危废泄漏	地面漫流垂直入渗	生产废水、危险物质等	COD _{Cr} 、石油类等	事故

（2）地下水、土壤污染防治措施

地下水、土壤污染防治主要是以预防为主，防治结合。

项目废气废水处理后均能达标排放，不涉及重点管控重金属、持久难降解有机污染物排放，正常工况下不存在土壤、地下水环境污染途径。入渗污染主要产生可能性来自事故排放。本项目土壤、地下水潜在污染源来自于废水处理设施等，针对厂区各工作区特点和岩土层情况，提出相应的分区防渗要求。

四、主要环境影响和保护措施

表 4-24 项目地下水、土壤分区防渗及技术要求

防渗级别	工作区	防渗技术要求
重点防渗区	危险物质仓库	等效黏土防渗层厚≥6.0m，渗透系数≤1.0×10 ⁻⁷ cm/s，或者参考 GB 18598 执行
	事故应急池	
	污水处理站	
	危废暂存间	按照《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597-2023）执行
一般防渗区	化粪池	等效黏土防渗层厚≥1.5m，渗透系数≤1.0×10 ⁻⁷ cm/s；或者参考 GB16889 执行
	一般工业固废仓库	
	实验室	
	原料仓库	
简单防渗区	办公区	一般地面硬化
	配电房	

本项目各功能区均采用“源头控制”、“分区防控”的防渗措施，可以有效保证污染物不会进入地下水、土壤环境；而且厂区内地面已经完成硬化防渗建设，因此，本项目运营期不可能对拟建地土壤、地下水环境造成污染，项目建成后造成的地下水、土壤环境影响可以接受。

(3) 跟踪监测要求

根据《排污单位自行监测技术指南 总则》（HJ 819-2017），项目土壤、地下水环境无需跟踪监测。

六、环境风险

(1) 建设项目环境风险识别

根据《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ 169-2018）附录 B，项目涉及的主要危险物质为乙醇、二甲基亚砷、氟利昂、实验废材料、废活性炭、污泥等。环境风险识别结果见表 4-25。

表 4-25 建设项目环境风险识别表

序号	危险单元	风险源	主要危险物质	环境风险类型	环境影响途径	可能受影响的最近环境敏感目标
1	废气处理设施	废气处理设施	非甲烷总烃等	泄漏、火灾、爆炸	大气、地表水、地下水、土壤环境污染	周边居民点、河流、地下水、土壤
2	污水处理站	污水处理站	生产废水	泄漏	地表水、地下水、土壤	河流及地下水
3	危险物质仓库	危险物质仓库	乙醇等	泄漏、火灾、爆炸	大气、地表水、地下水、土壤	周边居民点、河流、地下水
4	固废存贮设施	危废暂存间	危险废物	泄漏	地表水、地下水、土壤	河流及地下水
5	实验室	实验室	乙醇等	泄漏、火灾、爆炸	大气、地表水、地下水	周边居民点、河流、地下水
6	事故应急池	事故应急池	事故废水	泄漏	地表水、地下水、土壤	河流及地下水

(2) 环境风险物质 Q 值计算

根据项目原辅料及产品情况，对照《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ

四、主要环境影响和保护措施

169-2018) 附录 B 重点关注的危险物质及临界量表, 项目主要危险物质贮存情况表 4-26。

计算所涉及的每种危险物质在厂界内的最大存在总量与其在《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ 169-2018) 附录 B 中对应临界量的比值 Q。在不同厂区的同一种物质, 按其在厂界内的最大存在总量计算。对于长输管线项目, 按照两个截断阀室之间管段危险物质最大存在总量计算。

项目涉及的主要危险物质 Q 值计算见表 4-26。

表 4-26 项目涉及的主要危险物质贮存情况

序号	名称	储存方式	厂区最大贮存量 (t)
1	消毒乙醇/76.9 至 81.4vol%/	4L 瓶装, 最大储存 12 桶	0.031
2	无水乙醇/99.5vol% (试剂级)	4L 瓶装, 最大储存 4 桶	0.013
3	乙醇/99.5vol% (工业级)	4L 瓶装, 最大储存 4 桶	0.013
4	实验废液	桶装, 每 3 个月委托处置一次	1.2
5	危险废物 (除实验废液)	桶装或防水编织袋装, 每 3 个月委托处置一次	1.75
6	二甲基亚砩	瓶装, 最大储存 0.1L	0.0001
7	过氧乙酸 20vol%	25L 瓶装, 最大储存 4 桶	0.023
合计	乙醇	/	0.057
	实验废液	/	1.2
	危险废物 (除实验废液)	/	1.75
	二甲基亚砩	/	0.0001
	过氧乙酸	/	0.023

表 4-27 建设项目 Q 值确定表

序号	危险物质名称	CAS 号	最大存在总量 q_n/t	临界量* Q_n/t	该种危险物质 Q 值
1	乙醇	64-17-5	0.057	50	0.00114
2	实验废液	/	1.2	10	0.12
3	危险废物 (除实验废液)	/	1.75	50	0.035
4	二甲基亚砩	67-68-5	0.0001	10	0.00001
5	过氧乙酸	79-21-0	0.023	10	0.0023
项目 Q 值 Σ					0.15845

根据项目 Q 值计算结果小于 1 判断可知, 项目涉及的有毒有害和易燃易爆危险物质存储量均未超过临界量, 无须设置环境风险专项评价。

(3) 环境风险防范措施

四、主要环境影响和保护措施

运
营
期
环
境
影
响
和
保
护
措
施

①贮存、生产使用过程等环境风险防范

原料设置专门的原料仓库并定期检查，原料暂存处建议安装可燃气体报警仪以及按规范配置消防设施，原料暂存处均应采用防爆电器（防爆灯、防爆风扇等），并在原料暂存处进出口安装防静电装置，张贴醒目的显示牌。危废设置专门的暂存场所，针对危废类别选用合适的包装容器，危废暂存前需检查包装容器的完整性，严禁将危废暂存于破损的包装容器内，以免物料泄漏污染周围环境，同时对危废暂存区域进行定期检查，以便及时发现泄漏事故并进行处理。

企业应根据《国家发展改革委办公厅关于印发应急保障重点物资分类目录（2015年）的通知》（发改办运行[2015]825号）、《危险化学品单位应急救援物资配备要求》（GB 30077-2013）等文件要求设置应急设施（备）与物资，如黄沙、灭火器、防毒面罩、消防水带等。生产过程事故风险防范是安全生产的核心，要严格采取措施加以防范，尽可能降低事故概率。项目生产和安全管理中要密切注意事故易发部位，必须要做好运行监督检查与维修保养，防祸于未然。必须组织专门人员每天每班多次进行周期性巡回检查，发现异常现象的应及时检修，必要时按照“生产服从安全”原则停车检修，严禁带病或不正常运转。为操作工人提供服装、防尘口罩、安全帽、安全鞋、防护手套、耳塞、护目镜等防护用品。

②火灾爆炸事故环境风险防范

加强原料仓库、使用车间、成品仓库的管理维护。企业应建立微型消防站，组建兼职应急消防队伍，配备一定数量的应急消防设备并开展定期应急演练。企业应在原料仓库建议按规范配置消防设施，原料仓库应采用防爆电器（防爆灯、防爆风扇等），并在原料仓库进出口安装防静电装置，张贴醒目的显示牌。企业应对生产设备、电线线路、废气处理设备及管道的维护，定期检查维护及更新，防止发生火灾、爆炸的可能。

③洪水、台风等风险防范

由于项目拟建地易受台风暴雨的袭击，一旦发生大水灾，可能导致原料、产物等积水浸泡等，造成污染事故。因此在台风、洪水来临之前，密切注意气象预报，搞好防范措施。如将车间电源切断，检查车间各部位是否需要加固，将危险物质仓库、固废贮存场所用栅板填高以防水淹，从而消除对环境的二次污染。

④环境风险应急应对

当发生厂区火灾等事故，在消防过程将产生大量消防废水，部分未燃烧液体将混

四、主要环境影响和保护措施

入消防废水中。参照中国石油化工集团公司《石化企业水体环境风险防控技术要求》（Q/SH 0729-2018）：企业应设置能够储存事故排水的储存设施，储存设施包括事故池、事故罐、防火堤内或围堰内区域等。

$$V_{\text{总}} = (V_1 + V_2 - V_3)_{\text{max}} + V_4 + V_5$$

注： $(V_1 + V_2 - V_3)_{\text{max}}$ 是指对收集系统范围内不同装置分别计算 $V_1 + V_2 - V_3$ ，取其中最大值。

V_1 ——收集系统范围内发生事故的一套装置的物料量（假设 1 个危废桶发生泄漏，取最大 0.5m^3 ）。

V_2 ——发生事故的装置的消防水量， m^3 ；

$$V_2 = \sum Q_{\text{消}} t_{\text{消}}$$

$Q_{\text{消}}$ ——发生事故的装置的同时使用的消防设施给水流量， m^3/h ；消防设计流量 10L/s ，即 $36\text{m}^3/\text{h}$ 。

$t_{\text{消}}$ ——消防设施对应的设计消防历时， h ；火灾延续时间取 1h 。

V_3 ——发生事故时可以转输到其他储存或处理设施的物料量， m^3 ；取 0m^3 。

V_4 ——发生事故时仍必须进入该收集系统的生产废水量， m^3 ；取 0m^3 。

V_5 ——发生事故时可能进入该收集系统的降雨量， m^3 ；计算得 5m^3 。

$$V_5 = 10qF$$

q ——降雨强度， mm ；按平均日降雨量；

$$q = q_a/n$$

q_a ——全年平均降雨量，杭州市多年平均降雨量为 1500mm ；

n ——年平均降雨日数，杭州市多年平均降雨天数为 150 天；

F ——必须进入事故废水收集系统的雨水汇水面积，取 0.05ha ；

则：

$$V_{\text{总}} = (V_1 + V_2 - V_3)_{\text{max}} + V_4 + V_5$$

由以上估算可知，本项目应配备的事故应急池的总容量至少为 37m^3 。

本次环评要求企业新建一个事故应急池。考虑事故应急池的有效容积，预留一定的余量，本环评建议企业需在厂区设置 40m^3 的事故应急池（或事故应急罐），能够满足事故废水的最大容量。

若生产车间和仓库区发生火灾爆炸，伴有消防用水时，立即关闭该区域内雨水管道切断阀，若该切断阀遭到破坏或无法靠近时，则立即关闭厂区雨水总排放口附近切

四、主要环境影响和保护措施

断阀，杜绝事故情况下消防水进入河道污染水环境，确保所有废水进入事故池。

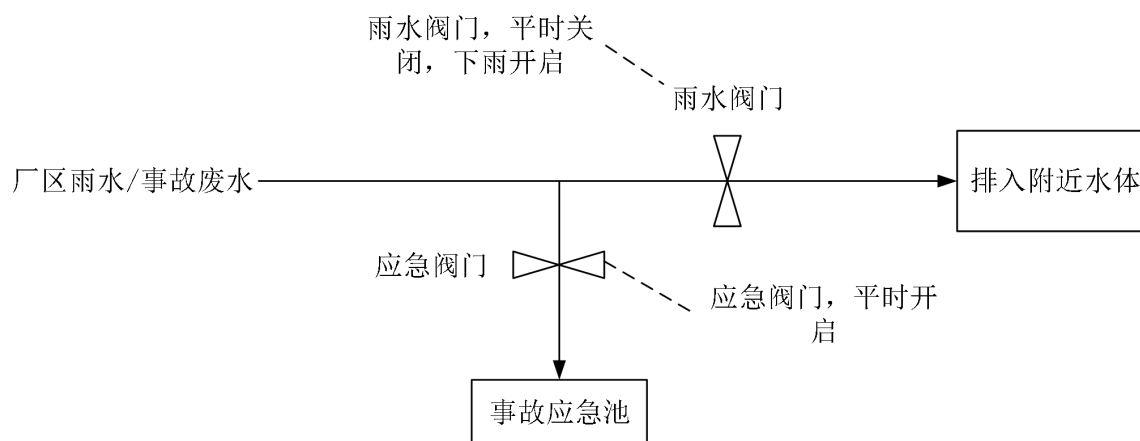


图 4-5 厂区事故废水（消防废水）收集系统示意图

⑤环保设施处理过程环境风险防范

根据《浙江省应急管理厅 浙江省生态环境厅关于加强工业企业环保设施安全生产工作的指导意见》（浙应急基础[2022]143 号），企业在项目建设和生产过程中认真贯彻落实《中华人民共和国安全生产法》、《中华人民共和国环境保护法》等法律规定，在营运过程中须建立完善的危险作业、环保设施运维等管理制度，加强职工劳动保护，确保员工身体健康和生命安全，保证废气、废水等末端治理设施日常正常稳定运行，避免超标排放等突发环境污染事故的发生，加强对重点环保设施的安全管理，减少和预防事故发生。

根据《浙江省安全生产委员会成员单位安全生产工作任务分工》（浙安委〔2024〕20 号）文件要求：“在环评工作中提醒督促企业委托有相应资质的设计单位对建设项目重点环保设施进行设计、自行（或委托）开展安全风险评估”。

1) 加强环保设施源头管理

企业应当委托有相应资质设计单位对建设项目的环保设施进行设计，落实安全生产相关技术要求；施工期企业应要求施工方严格按照设计方案和相关施工技术标准、规范施工；建设项目竣工后企业应及时按照法律法规规定的标准和程序，对环保设施进行验收。

2) 落实安全管理责任

企业须建立环保设施台账管理制度，对环保设施操作人员开展安全培训，定期对环保设施进行维护；严格执行吊装、动火、登高、有限空间、检维修等危险作业审批制度，落实安全隔离措施，实施现场安全监护，配齐应急处置装备，确保厂内各环保

四、主要环境影响和保护措施

设施安全、稳定、有效运行。

3) 严格执行治理设施运维制度

废气、废水等末端治理措施必须确保正常运行,如发现人为原因不开启治理设施,责任人应受行政和经济处罚,并承担事故排放责任。若末端治理措施因故不能运行,则生产必须停止。建立事故排放事先申报制度,未经批准不得排放,便于相关部门应急防范,防止出现超标排放。建立废水、废气重点监测记录及汇报制度,确定企业废水排放口、废气排放口监测频次、监测指标,做好记录,按照早发现、早报告、早处置的原则,对重点排污口进行例行监测,分析汇总数据。

七、监测计划

根据《固定污染源排污许可分类管理名录》(2019年版),本项目管理类别判定见下表 4-28。

表 4-28 企业排污许可管理类别归类表

序号	行业类别	重点管理	简化管理	登记管理
三十、专用设备制造业 35				
54	采矿、冶金、建筑专用设备制造 351,化工、木材、非金属加工专用设备制造 352,食品、饮料、烟草及饲料生产专用设备展备制造 353,印刷、制药、日化及日用品生产专用设备制造 354,纺织、服装和皮革加工专用设备制造 355,电子和电工机械专用设备制造 356,农、林、牧、渔专用机械制造 357,医疗仪器设备及器械制造 358,环保、邮政、社会公共服务及其他专用设备制造 359	涉及通用工序重点管理的	涉及通用工序简化管理的	其他
五十、其他行业				
108	除 1-107 外的其他行业	涉及通用工序重点管理的,存在本名录第七条规定情形之一的	涉及通用工序简化管理的	涉及通用工序登记管理的

目前企业暂未纳入重点排污单位名录,根据上表判定可知,本项目属于医疗仪器设备及器械制造 358 及五十、其他行业 108,不涉及通用工序登记管理,属于简化管理类。根据《排污单位自行监测技术指南 总则》(HJ 819-2017)、《排污许可证申请与核发技术规范 总则》(HJ 942-2018)中相关自行监测管理要求,本项目的监测计划建议见表 4-29。企业可根据自身条件和能力,利用自有人员、场所和设备自行监测,也可委托其它有资质的检(监)测机构代其开展自行监测。企业应建立自行监测质量管理体系,按照相关技术规范要求做好监测质量保证与质量控制,并做好与监测

四、主要环境影响和保护措施

相关的数据记录，按照规定进行保存，并依据相关法规向社保公开监测结果。

表 4-29 项目监测计划表

项目	监测点位	监测因子	监测频次	执行标准
有组织废气监测计划方案	DA001 试剂挥发废气	非甲烷总烃	1 次/年	《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)
		臭气浓度	1 次/年	
无组织废气监测计划方案	厂区内，车间外	非甲烷总烃	1 次/年	《制药工业大气污染物排放标准》(DB33/310005-2021)
	厂界	非甲烷总烃	1 次/半年	《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996)
废水监测计划方案	废水总排口 DW001	pH、COD _{Cr} 、NH ₃ -N、TN、SS 等	1 次/年	《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)表 4 三级标准，其中 NH ₃ -N、TP 执行《工业企业废水氮、磷污染物间接排放标准》(DB33/ 887—2025)排放限值
噪声监测	各厂界	LAeq	1 次/季度 ^①	《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)中 3 类标准

注：①项目夜间不生产，噪声仅监测昼间即可

八、环保投资估算

项目主要环保设施一次性投资费用见表 4-30。由表可知，环保设施投资费用估计为 110 万元，占项目总投资 7647.8 万美元的费用 0.2%。

表 4-30 项目环保投资一览表

序号	运营期污染防治措施	环保投资估算（万元）
1	污水处理站	50
2	废气处理设备及管道铺设	40
3	噪声防治措施	5
4	固体废物暂存间	5
5	土壤、地下水防渗措施	3
6	环境风险防范措施	7
合计		110

五、环境保护措施监督检查清单

内容 要素	排放口(编号、名称)/ 污染源	污染物项目	环境保护措施	执行标准
大气环境	DA001 试剂挥发废气	非甲烷总烃、臭气浓度	废气经收集系统后经配套的活性炭处理装置处理后高空排放（15m）	《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）
	细胞实验废气	气溶胶(颗粒物)	经生物安全柜高效过滤器系统过滤后通过实验室内新风系统排放	《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）
	无组织排放	非甲烷总烃、臭气浓度	（1）加强废气收集和通风换气。 （2）含 VOCs 产品的使用过程采用密闭设备或在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。 （3）通风生产设备、操作工位、车间厂房等应在符合安全生产、职业卫生相关规定的前提下，根据行业作业规程与标准、工业建筑及洁净厂房通风设计规范等的要求，采用合理的通风量	《大气污染物综合排放标准》（GB 16297-1996）、《制药工业大气污染物排放标准》（DB33/310005-2021）
地表水环境	DW001/ 企业总排口	pH、COD _{Cr} 、NH ₃ -N、TN、SS 等	生产废水收集后通过调节池+沉淀池+消毒系统后汇同经化粪池处理后生活污水一并纳管排放送至萧山钱塘污水处理厂进一步处理后排入环境。	标准执行《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）表 4 三级标准，NH ₃ -N、TP 执行《工业企业废水氮、磷污染物间接排放标准》（DB33/887—2025）排放限值
声环境	生产设备	噪声	企业选用高效低噪声设备，在源强上减少噪声的影响，同时加强车间管理，定期润滑并检修设备，避免非正常运行噪声，加强员工环保意识，防止人为噪声影响	各厂界满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）中 3 类标准
电磁辐射	BNCT 实验室、放射性废物储存间	辐射	企业设计足够厚度的屏蔽体，可保证屏蔽体外周围剂量当量率满足辐射防护的要求	《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）
固体废物	一般工业固废分类收集后，出售给回收公司综合利用，或委托有能力处置的单位处置；危险废物厂区规范化暂存后委托有资质单位处置；生活垃圾委托环卫部门清运。			
土壤及地下水污染防治措施	加强车间管理，危险物质随用随取，不得随便放置在车间内，危险物质在车间专用仓库集中存储，设置集液池、围堰等防泄漏收集措施，地面硬化不得有缝隙并铺设防渗层，做好分区防渗；定期检查。			
生态保护措施	/			

五、环境保护措施监督检查清单

环境风险防范措施	①强化风险意识、加强安全管理。②危险物质设置专门仓库，危废选用合适的包装容器并设置专门的暂存场所，防止泄漏事故发生；加强管理并定期检查，以便及时发现泄漏事故并进行处理。③生产过程中密切注意事故易发部位，必须要做好运行监督检查与维修保养，配备消防设施及报警装置，防止火灾爆炸事故发生。 ④在台风、洪水来临之前做好防台、防洪工作。
其他环境管理要求	项目建成后企业需持证排污、按证排污，严格执行排污许可制度；需根据《排污单位自行监测技术指南 总则》（HJ 819-2017）、《排污许可证申请与核发技术规范 总则》（HJ 942-2018）定期进行例行监测；需保证处理设施能够长期、稳定、有效地进行处理运行，不得擅自拆除或者闲置污染治理设施，不得故意不正常使用污染治理设施。

六、结论

一、环评审批原则符合性分析

根据《浙江省建设项目环境保护管理办法》（浙江省人民政府令第388号第三次修正），本项目的审批原则符合性分析如下：

1. 建设项目符合生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单管控的要求

本项目不在《杭州市“三区三线”划定方案》划定的生态保护红线内，满足生态保护红线要求。项目采取本环评提出的相关防治措施后，企业排放的污染物不会对周边环境造成明显影响，不会突破区域环境质量底线。项目建成运行后通过内部管理、设备选择、原辅材料的选用和管理、废物回收利用、污染治理等多方面采取合理可行的防治措施，以“节能、降耗、减污”为目标，有效地控制污染，符合能源资源利用上线要求。《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》，属于“萧山区杭州萧山国际机场产业集聚重点管控单元（ZH33010920007）”，本项目的建设符合该管控单元的环境准入清单要求。

2. 排放污染物符合国家、省规定的污染物排放标准和重点污染物排放总量控制要求

根据工程分析和影响分析，项目产生的各污染物采取相应的污染防治措施后均能达标排放，因此，只要建设单位加强管理，可确保本项目废气、废水、噪声等达标合规排放，固废能够得到妥善贮存和合理处置。

本项目新增排放的污染物总量控制指标建议值为： COD_{Cr} 0.041t/a、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 0.002t/a、 TN 0.012t/a、 VOCs 0.026t/a。

本项目 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 替代削减比例为1:1，需要区域替代削减量为 COD_{Cr} 0.041t/a、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 0.002t/a； TN 暂未建立总氮数据库； VOCs 替代削减比例为1:2，需要区域替代削减量为 VOCs 0.052t/a。

因此，项目符合总量控制要求。

3. 建设项目符合国土空间规划的要求

根据杭州临空经济示范区管理委员会《关于修正药业BNCT项目用地性质的情况说明》，修正药业BNCT项目位于空港片区XS290706-15地块，根据已批复的《杭州临空经济示范区单元(XS29)详细规划(启动区外)》，该地块用地性质均为一类工业/二类工业/一类物流仓储兼容用地(M1/M2/W1)，可正常开展项目设备研发、动物实验等业务。因此，符合当地主体功能区规划、土地利用总体规划及城乡规划的要求。

六、结论

4. 建设项目符合国家和省产业政策的要求

(1) 对照《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，本项目不属于限制类及淘汰类项目，且本项目已经在萧山经济技术开发区管委会备案。因此，项目建设符合产业政策要求。

(2) 杭州市产业政策符合性分析

对照《杭州市产业发展导向目录》（2024 年本），本项目为 C3589 其他医疗设备及器械制造，属于鼓励类项目中的“五、生物医药-F04-27 高端放射治疗设备”。因此，本项目建设符合杭州市产业政策。

(3) 杭州市萧山区产业政策符合性分析

对照《杭州市萧山区产业发展导向目录与产业平台布局指引》（2021 年本），本项目为 C3589 其他医疗设备及器械制造，属于鼓励类项目中的“二、生物经济产业-（三）医疗器械与健康设备-B18-35 高端制药设备开发与生产。因此，本项目建设符合杭州市萧山区产业政策。

综上所述，本项目建设符合国家、浙江省及地方各级产业政策。

二、总结论

临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产 10 台 BNCT 设备项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，项目符合杭州市生态环境分区管控动态更新方案要求，符合国家、省规定的污染物排放标准，符合国家、省规定的主要污染物排放总量控制指标，符合建设项目所在地环境功能区确定的环境质量要求；环境风险可控；符合国土空间规划；符合国家、省和地方产业政策和环保政策等的要求；项目符合环境准入条件要求，项目符合生态环境分区管控动态更新方案要求。

项目实施后，企业应加强环境质量管理，认真落实环境保护措施，采取相应的污染防治措施，能使废气、废水、噪声达标排放，固废得到妥善处置。因此，从环境保护角度看，项目的实施是可行的。

附表

附表

建设项目污染物排放量汇总表 单位：t/a

项目分类	污染物名称	现有工程排放量 (固体废物产生量) ①	现有工程许可 排放量②	在建工程排放量 (固体废物产生量) ③	本项目排放量(固 体废物产生量)④	以新带老削减量(新建 项目不填) ⑤	本项目建成后全厂排 放量(固体废物产生 量) ⑥	变化量⑦
废气	VOCs	0	0	0	0.026	0	0.026	0.026
废水	废水量	0	0	0	1012.572	0	1012.572	1012.572
	COD _{Cr}	0	0	0	0.041	0	0.041	0.041
	氨氮	0	0	0	0.002	0	0.002	0.002
	总氮	0	0	0	0.012	0	0.012	0.012
	SS	0	0	0	0.010	0	0.010	0.010
一般工业固体废物		0	0	0	2.5	0	2.5	2.5
危险废物		0	0	0	11.781	0	11.781	11.781
生活垃圾		0	0	0	12	0	12	12

注：⑥=①+③+④-⑤；⑦=⑥-①；表中，废水量的单位为“吨/年”。

临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司
年产 10 台 BNCT 设备项目
辐射环境影响专题报告

杭州硼中修元科技有限公司

2026 年 5 月

目 录

表 1 项目基本情况	78
表 2 放射源	87
表 3 非密封放射性物质	87
表 4 射线装置	88
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）	89
表 6 评价依据	91
表 7 保护目标与评价标准	934
表 8 环境质量和辐射现状	117
表 9 项目工程分析与源项	123
表 10 辐射安全与防护	153
表 11 环境影响分析	180
表 12 辐射安全管理	210
表 13 结论与建议	217

表 1 项目基本情况

建设项目名称		临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产 10 台 BNCT 设备项目					
建设单位		杭州硼中修元科技有限公司					
法人代表		***	联系人	***	联系电话	***	
通讯地址		浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）					
项目建设地点		浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库					
立项审批部门		萧山区经济和信息化局		批准文号	2507-330109-07-02-772721		
建设项目总投资（万元）		55064.16	辐射环保投资（万元）	100	投资比例（环保投资/总投资）	0.18%	
项目性质		■新建 □改建 □扩建 □其他			占地面积（m ² ）	6330（含月台、贴建房）	
应用类型	放射源	□销售	□I类 □II类 □III类 □IV类 □V类				
		□使用	□I类（医疗使用） □II类 □III类 □IV类 □V类				
	非密封放射性物质	□生产	□制备 PET 用放射性药物				
		□销售	/				
		□使用	□乙 □丙				
	射线装置	■生产	■II类 □III类				
		■销售	■II类 □III类				
		■使用	■II类 □III类				
	其他	/					
	1.1 项目概述						
1.1.1 建设单位情况							
杭州硼中修元科技有限公司于 2025 年 5 月 20 日注册成立，注册资金为柒仟万美元，法定代表人为谢世荣，经营范围为工程和技术研究、通用设备制造、养生保健、第二类医疗器械租赁与销售、机械设备的研发、医学研究、健康咨询、人工智能及物联网应用、制药专用设备制造与销售、技术开发与转让、货物及技术进出口、电子元器件制造、第三类医疗设备租赁、第二/三类医疗器械生产与经营、药品相关业务、药物临床试验、特种设备检验检测与设计。							
1.1.2 项目建设目的和任务由来							
硼中子俘获疗法（BNCT，Boron Neutron Capture Therapy）作为国际前沿的							

精准放疗技术，备受医学界和广大患者的关注。BNCT 利用热中子与稳定同位素硼-10 发生中子俘获反应，释放出短程高能重离子射线，在细胞层级实现精准击杀肿瘤的效果，是一种新兴的肿瘤治疗方案，被称为继手术、传统放射治疗、化疗、免疫治疗之后的“第五疗法”。该技术具有细胞级精准靶向、高放射生物效应、短疗程、正常组织损伤小等多重优势，为癌症治疗提供了新的选择和希望。

为了完善我国癌症治疗手段，给肿瘤患者提供更高质量的放疗服务能力，杭州硼中修元科技有限公司租用杭州空港新城保税物流中心有限公司 3 号保税仓库实施“临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产 10 台 BNCT 设备项目”（以下简称“本项目”），主要布置硼中子俘获治疗系统实验区、动物实验区以及办公生活区。该项目采用零库存订单模式，预计硼中子俘获治疗系统生产规模不超过 10 台/年。

对照《关于发布〈射线装置分类〉的公告》（环境保护部 国家卫生和计划生育委员会 公告 2017 年第 66 号），本项目 BNCT 装置属于 II 类射线装置；受照小鼠产生感生放射性，其动物实验场所（SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2、解剖室）属于丙级非密封放射性物质工作场所。对照生态环境部《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》，本项目属于“五十五、核与辐射”-“172、核技术利用建设项目”-“制备 PET 用放射性药物的；医疗使用 I 类放射源的；使用 II 类、III 类放射源的；**生产、使用 II 类射线装置的；乙、丙级非密封放射性物质工作场所**（医疗机构使用植入治疗用放射性粒子源的除外）；在野外进行放射性同位素示踪试验的；以上项目的改、扩建（不含在已许可场所增加不超出已许可活动种类和不高于已许可范围等级的核素或射线装置的）”，应编制辐射环境影响报告表。

为保护环境，保障公众健康，杭州硼中修元科技有限公司委托我单位对本项目进行辐射环境影响评价。我单位开展了现场踏勘、委托检测、收集资料等工作，并依据《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）的相关要求，编制完成了本项目的辐射环境影响专题报告。

1.1.3 建设内容及规模

本项目位于杭州空港新城保税物流中心有限公司 3 号保税仓库，建筑面积约

6330m²（含月台、贴建房），建筑面积约 6000m²，主要包括办公区、动物实验室及细胞实验室、机械检讨室和电力检查室区域、BNCT 实验室区域，各区域功能布局见表 1.1-1。

表 1.1-1 各区域功能布局情况

建筑物	区域	建筑高度 (m)	面积 (m ²)	功能布局
3 号保税仓库	办公区	2.6/3.8	925	公共办公区工位 50 个、7 间独立办公室、两间会议室、休息室、茶水区、接待大厅展示、打印区、储藏区、备用办公室等
	动物实验室及细胞实验室	2.8	1218	污染检查室、换鞋、一更、二更、风淋、退更、接收、检疫、前室、SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2、清洁设备仓储准备室、污物走廊、控制室、解剖室、分析室、数据处理室、细胞实验室（万级）、废弃物储藏室、公共走廊、活化分析室、备用间、空调机房、水处理间、锅炉房、仓库、饲料垫料、强电及 UPS、弱电、机械/煤气室、一般垃圾储存
	机械检讨室和电力检查室区域	4	1128	机械检讨室和电力检查室
	BNCT 实验室区域	7.5	1063	控制室 A、控制室 B、前室、BNCT 实验室 A、BNCT 实验室 B、配电、放射性废物储存间、精密空调水冷间等

本项目生产、销售和使用硼中子俘获治疗装置主要技术参数见表 1.1-2。

表 1.1-2 本项目生产、销售和使用硼中子俘获治疗装置主要技术参数表

序号	装置名称	加速粒子	产量	类别	最大能量	最大电流强度	中子最大产额	工作场所	用途
1	BNCT 装置	D ₂	1 台/a	II 类	0.30MeV	40mA	3.384×10 ¹¹ n/sec	BNCT 实验室 A	使用（实验研究）
2	BNCT 装置	D ₂	10 台/a	II 类	0.30MeV	40mA	3.384×10 ¹¹ n/sec	BNCT 实验室 B	生产、销售、使用（调试、维修）

1.1.4 劳动定员及工作负荷

本项目拟配备辐射工作人员 6 人，负责 BNCT 实验室 A 的实验研究（2 人）、BNCT 实验室 B 及用户单位（医疗机构）调试以及维修工作（2 人）和动物实验场所动物实验（2 人）。

1、BNCT 实验室 A 实验研究辐射工作人员的工作负荷

①辐射工作人员在控制室受照时间

本项目硼中子俘获治疗系统出束实验研究过程中，辐射工作人员均在控制室

内工作，预计开展实验研究单次出束时间不超过 3h，一周 5d、一年 52 周，则实验研究过程中硼中子俘获治疗系统出束时间约 780h。

表 1.1-3 辐射工作人员在控制室的受照时间表

工作内容	辐射工作人员受照时间 (h)		工作场所
	单次出束时间	全年出束时间	
实验研究	3	780	BNCT 实验室 A

②辐射工作人员在实验室内受感生放射性照射时间

硼中子俘获治疗系统停止出束后，辐射工作人员进入 BNCT 实验室时将受到感生放射性照射。根据建设单位提供的资料，辐射工作人员在实验室内受感生放射性照射时间详见下表。

表 1.1-4 辐射工作人员在实验室内受感生放射性照射时间表

工作内容	辐射工作人员受感生放射性照射时间 (h)		工作场所
	单次受感生放射性照射时间	全年受感生放射性照射时间	
硼中子俘获治疗系统实验研究（小鼠摆位、取出等）	1	260	BNCT 实验室 A

③辐射工作人员在小鼠转运时受小鼠感生放射性照射时间

小鼠经中子照射后，由 BNCT 实验室 A 控制室辐射工作人员取出，移交给动物实验场所的辐射工作人员。转运过程包括取出小鼠、装入转运容器等操作，单次转运操作时间按 0.5 小时考虑。每年转运次数按 260 次估算（一周 5d，一年 52 周），则转运过程辐射工作人员年受感生放射性照射时间为 130h。

2、BNCT 实验室 B 辐射工作人员的工作负荷

BNCT 实验室 B 辐射工作人员主要负责 BNCT 实验室 B 及用户单位（医疗机构）硼中子俘获治疗系统的安装、调试、拆解、打包以及维修工作。

①辐射工作人员在控制室受照时间

本项目年产 10 台 BNCT 设备，单台 BNCT 设备在 BNCT 实验室 B 内调试出束时间不超过 3h，在用户单位（医疗单位）的硼中子俘获治疗系统使用场所内首次安装后的调试出束时间不超过 3h。

硼中子俘获治疗系统出束调试过程中，辐射工作人员均在控制室内工作，辐射工作人员在控制室的受照时间详见下表。

表 1.1-5 辐射工作人员在控制室的受照时间表

工作内容	辐射工作人员受照时间 (h)		工作场所
	单台设备出束时间	全年出束时间	
BNCT 调试	3	30	BNCT 实验室 B
	3	30	用户单位 (医疗机构)

②辐射工作人员在实验室内受感生放射性照射时间

硼中子俘获治疗系统停止出束后, 辐射工作人员进入 BNCT 实验室 B 或用户单位 (医疗机构) 的硼中子俘获治疗系统使用场所工作 (拆解、打包、安装) 时将受到感生放射性照射。根据建设单位提供的资料, 辐射工作人员在实验室内受感生放射性照射时间详见下表。

表 1.1-6 辐射工作人员在实验室内受感生放射性照射时间表

工作内容	辐射工作人员受感生放射性照射时间 (h)		工作场所
	单台设备受感生放射性照射时间	全年受感生放射性照射时间	
硼中子俘获治疗系统拆卸、打包	30	300	BNCT 实验室 B
硼中子俘获治疗系统拆包、安装	30	300	用户单位 (医疗机构)

③运维人员的工作负荷

此外, 本项目生产、销售的硼中子俘获治疗系统在用户单位 (医疗单位) 使用场所正式投运后, 建设单位委派运维人员负责用户单位 (医疗单位) 设备日常维护, 预计日常维护过程中单台硼中子俘获治疗系统整机出束时间不超过 6h, 则日常维护过程中运维人员年受照时间为 60h。此外, 硼中子俘获治疗系统停止出束后, 运维人员还将进入用户单位 (医疗机构) 的硼中子俘获治疗系统使用场所内进行日常维护, 将受到感生放射性照射, 预计运维人员年受感生放射性照射时间不超过 30h。

3、动物实验场所辐射工作人员的工作负荷

(1) 运输过程操作时间

受照小鼠需从 BNCT 实验室 A 转移至 SPF 养殖室。每次照射结束后, 需将当日照射的小鼠 (12 只) 进行转运。根据操作流程, 每次运输操作包括搬运至养殖室、放入饲养架等环节, 单次运输操作时间按 1 小时考虑。每年照射次数按 260 次估算 (一周 5d, 一年 52 周), 则运输过程年累计操作时间为 260h。

(2) 养殖过程操作时间

本项目每个实验周期中，小鼠经中子照射后需在 SPF 养殖室继续养殖 1 个月（约 4 周）。养殖期间，工作人员每日需进入养殖室进行巡查、喂食、换水、更换垫料等操作。根据实验动物房管理规范及建设单位提供的资料，每日接触小鼠时间约 2 小时，则养殖过程年累计操作时间 520h。

（3）解剖过程操作时间

每个实验周期结束后，需对养殖的小鼠进行解剖取样。每只小鼠的解剖操作时间按 5 分钟计。每个周期解剖受照射小鼠 12 只，每年约 13 个周期，则解剖过程年累计操作时间为约 13h。

1.2 周围环境概况及选址合理性分析

1.2.1 项目地理位置

本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库。物流中心东北侧为空地和中石化加油站；东南侧为杭州临空经济示范区管理委员会；西南侧为萧山机场；西北侧为空地 and 杭州临空经济示范区党建综合体。本项目地理位置见附图1，周围环境概况见附图2。

1.2.2 项目周边环境关系

本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库。3 号仓库东北侧为物流中心内部道路，隔道路为 4 号仓库；东南侧为物流中心道路，隔道路为 1 号仓库；西南侧为物流中心内部道路，隔道路为萧山机场；西北侧为物流中心内部道路，隔道路为 5 号仓库。

3 号仓库共 1F，无地下层。本项目位于 3 号仓库东侧，整体呈矩形布局，采用模块化分区设计，共分四个区域，分别为：办公区、动物实验室及细胞实验室、机械检讨室（备用间）和电力检查室区域、BNCT 实验室区域。

BNCT 实验室区域位于建筑东南角，主要包括 BNCT 实验室 A 和 BNCT 实验室 B，周边设有控制室、前室、配电、放射性废物储存间、精密空调水冷间等配套支持系统。

动物实验室及细胞实验室位于建筑西北侧，主要包括：SPF 养殖室、解剖室、细胞实验室（万级）、废弃物储藏室、公共走廊、活化分析室等，整体区域为负压设计，防止病原体外泄。

总平布置图见附图 9。

1.2.3 选址合理性分析

本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库，辐射工作场所周围 50m 范围内无医院、居民点、学校等环境敏感区分布，无环境制约因素。此外，本项目 BNCT 实验区相对独立，均未与办公区等人流量较大的区域紧邻，且 BNCT 实验室、放射性废物储存间均拟建设足够的实体屏蔽设施，并拟采取完善的辐射安全防护措施。因此，从辐射防护角度，因此本项目的选址是合理的。

1.3 产业政策符合性分析与实践的正当性分析

1.3.1 产业政策符合性分析

根据《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，本项目属于“第一类鼓励类 六、核能—4、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”和“第一类鼓励类 十三、医药-4、高端医疗器械创新发展：新型基因、蛋白和细胞诊断设备，新型医用诊断设备和试剂，高性能医学影像设备，高端放射治疗设备，急危重症生命支持设备，人工智能辅助医疗设备，移动与远程诊疗设备，高端康复辅助器具，高端植入介入产品，手术机器人等高端外科设备及耗材，生物医用材料、增材制造技术开发与应用”，符合国家产业政策。

1.3.2 实践的正当性分析

硼中子俘获治疗作为最先进的肿瘤治疗手段，大大提高了患者的治愈率，“硼中子捕捉治疗系统及其靶向药物”列入《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》（2016 版）生物医学工程产业的“先进治疗设备及服务”条目。本项目实施后可推动国内加速器硼中子俘获治疗的发展，为国内癌症病人提供更多更优质的治疗选择。

本项目在实践过程中采取了可靠的辐射防护措施，对周围环境、本项目辐射工作人员和公众造成的辐射影响满足国家辐射防护安全标准的要求，其所获利益远大于可能因辐射实践所造成的损害及项目辐射安全与防护投入的代价，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于辐射防护“实践正当性”的要求。

1.4“杭州市生态环境分区管控动态更新方案”符合性分析

1、生态保护红线

根据《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》：杭州全市划定生态保护红线 4693.50 平方公里，占全市总面积的 27.85%。根据“杭州临空经济示范区三区三线示意图”，本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心，不涉及生态保护红线，符合生态保护红线的要求。

2、环境质量底线

本项目运营期会产生少量臭氧和氮氧化物，对周围大气环境的影响较小。因此，本项目建设不会导致周围大气环境质量下降，符合大气环境质量底线要求。

本项目运营期产生的少量废水接入市政污水管网，不外排。本项目建设不会导致周围地表水环境质量下降，符合水环境质量底线的要求。

本项目不会导致土壤环境质量下降，符合土壤环境风险管控底线的要求。

此外，本项目拟建场所及周围敏感点各监测点位的 γ 辐射剂量率在天然辐射本底水平范围内。综上所述，在落实本环评提出的各项污染防治措施后，不会对周围环境产生不良影响。因此，本项目建设符合环境质量底线要求。

3、资源利用上线目标

本项目运营期使用电能，不涉及煤等能源使用，不会突破区域能源利用上线。

本项目用水量较少，不会突破区域水资源利用上线。

本项目在浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心实施，不会突破区域土地资源消耗上限。

因此，本项目符合资源利用上线的要求。

4、环境管控单元分类准入清单

根据《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》，本项目所在地属于萧山区萧山城区产业集聚重点管控单元 2（ZH33010920014），属于重点管控单元，具体符合性分析见表 1.4-1。

表 1.4-1 管控方案及符合性分析

管控单元分类	要求		本项目情况	是否符合
一般管控单元	空间布局引导	根据产业集聚区块的功能定位，建立分区差别化的产业准入条件。合理规划布局居住、医疗卫生、文化教育等功能区块，与工业区块、工业企业之间设置防护绿地、生活绿地等隔离带。	本项目为核技术利用建设项目，不属于工业类项目；本项目辐射工作场所周围 50m 范围内无医	符合

			院、居民点、学校等环境敏感区分布。	
	污染物排放管控	严格实施污染物总量控制制度，根据区域环境质量改善目标，削减污染物排放总量。所有企业实现雨污分流。	本项目属于核技术利用建设项目，不涉及污染物排放总量。	符合
	环境风险防控	强化工业集聚区企业环境风险防范设施设备建设和正常运行监管，加强重点环境风险管控企业应急预案制定，建立常态化的企业隐患排查整治监管机制，加强风险防控体系建设。	本项目主要为辐射影响，建立完善的辐射安全措施和辐射事故应急预案，环境风险可控。	符合
	资源开发效率要求	/	/	/

综上，本项目建设符合《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》准入清单要求。

1.5“三区三线”符合性分析

浙江省国土空间总体规划“三区三线”成果完成质检并经中华人民共和国自然资源部批准，已于 2022 年 9 月 30 日起正式启用。“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，以保障农业空间、生态空间，限制城镇空间。

根据“杭州临空经济示范区三区三线示意图”，项目所在地在城镇开发边界范围内，不涉及生态保护红线及永久基本农田。本项目的建设符合“三区三线”管控要求。

1.6 原有核技术利用项目许可情况

本项目为新建项目，建设单位无原有核技术利用项目。

表 2 放射源

序号	核素名称	总活度（Bq） / 活度（Bq）×枚数	类别	活动种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
	以下空白							

注：放射源包括放射性中子源，对其要说明是何种核素以及产生的中子流强度（n/s）。

表 3 非密封放射性物质

序号	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
	以下空白									

注：日等效最大操作量和操作方式见《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）。

表 4 射线装置

(一) 加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	装置名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量 (MeV)	额定电流 (mA) / 剂量率 (Gy/h)	用途	工作场所	备注
1	BNCT	II类	1 台/a	/	D ₂	0.30MeV	40mA	使用 (实验研究)	BNCT 实验室 A	本次评价
2	BNCT	II类	10 台/a	/	D ₂	0.30MeV	40mA	生产、销售、使用 (调试、维修)	BNCT 实验室 B、 各用户单位	

(二) X 射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	装置名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途	工作场所	备注
	以下空白								

(三) 中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大靶电流 (μA)	中子强度 (n/s)	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度 (Bq)	贮存方式	数量	
	以下空白												

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
臭氧和氮氧化物	气态	/	/	少量	少量	少量	不暂存	通过机械排风系统引至车间顶部高空排放。
活化废气	气态	^3H 、 ^{14}C 、 ^{16}N 、 ^{19}O 、 ^{41}Ar 等	/	少量	少量	/	/	经专用的抽风管排到楼顶，排风口高于楼顶 2m。
活化冷却水	液态	^3H 等	/	/	120L	^3H 活度低于 1ALImin ($1.11 \times 10^9 \text{Bq}$)	暂存于桶内	排至储存桶进行收集暂存，放射性废液在排放前进行取样检测，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中相关规定，方可排放。
废活化中子发生器	固态	^{64}Cu 、 ^{66}Cu 、 ^{28}Al 等	/	/	180kg	/	暂存在放射性废物储存间的铅容器内	低于清洁解控水平后作为一般固体废物，交物资公司回收处理；待核技术利用工作场所退役时，放射性固废仍未低于清洁解控水平，则交有资质的单位处置。
废活性炭	固态	^{41}Ar 等	/	/	60kg	/	/	作为一般固体废物，交物资公司回收处理
放射性废水	液态	^{24}Na 、 ^{38}Cl 、 ^{49}Ca	/	/	25m ³	^3H 活度低于 1ALImin ($1.11 \times 10^9 \text{Bq}$)	暂存于桶内	排至储存桶进行收集暂存，放射性废液在排放前进行取样检测，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中相关规定，方可排放。
手套、口罩、一次性垫纸、注射器、吸水纸、棉签、棉球以及含有放射性核素的	固态	^7Be 、 ^{64}Cu 、 ^{66}Cu 、 ^{28}Al 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 等	/	/	100kg	/	暂存在衰变桶内	低于清洁解控水平后作为医疗废物处置；待核技术利用工作场所退役时，放射性固废仍未低于清洁解控水平，则交有资质的单位处置。

小白鼠排泄物等								
动物尸体	固态	^7Be 、 ^{64}Cu 、 ^{66}Cu 、 ^{28}Al 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 等	/	/	4.68kg	/	暂存在冰柜中， 暂存至其放射性 比活度低于相应 核素的解控水平	

注：1、常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/L，固体为 mg/kg，气态为 mg/m³；年排放总量为 kg。

2、含有放射性的废物要注明，其排放浓度、年排放总量分别用比活度（Bq/L 或 Bq/kg 或 Bq/m³）或活度（Bq）。

表 6 评价依据

法规文件	(1) 《中华人民共和国环境保护法（2014 年修订）》，2015 年 1 月 1 日起施行； (2) 《中华人民共和国环境影响评价法（2018 年修订）》，2018 年 12 月 29 日起施行； (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月 1 日起施行； (4) 《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； (5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例（2019 年修改）》，国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日起施行； (6) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，2021 年 1 月 4 日经生态环境部令第 20 号修改并实施； (7) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，原环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行； (8) 《关于发布射线装置分类的公告》，原环境保护部、国家卫生计生委公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日起施行； (9) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 版）》（生态环境部令第 16 号），自 2021 年 1 月 1 日起施行； (10) 《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》，原国家环境保护总局环发〔2006〕145 号，2006 年 9 月 26 日起施行； (11) 《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，2020 年 1 月 1 日起施行； (12) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》，生态环境部公告 2021 年第 9 号，自 2021 年 3 月 15 日起施行； (13) 《浙江省建设项目环境保护管理办法》，2021 年 2 月 10 日修订；
------	---

	(14) 《浙江省生态环境保护条例》，2022 年 8 月 1 日起施行； (15) 《浙江省辐射环境管理办法》，2021 年 2 月 10 日修订； (16) 《关于印发浙江省辐射事故应急预案的通知》，浙政办发〔2018〕92 号，浙江省人民政府办公厅，2018 年 9 月 28 日起施行； (17) 《关于发布<省生态环境主管部门负责审批环境影响评价文件的建设项目清单>（2024 年本）的通知》，浙环发〔2024〕67 号，2025 年 2 月 2 日起施行； (18) 《杭州市生态环境局关于印发杭州市生态环境分区管控动态更新方案的通知》（杭环发〔2024〕49 号，2024 年 7 月 10 日）； (19) 《产业结构调整指导目录（2024 年本）》中华人民共和国国家发展和改革委员会第 7 号令，2024 年 2 月 1 日起施行； (20) 《浙江省生态环境厅关于印发<浙江省生态环境分区管控动态更新方案>的通知》，浙环发〔2024〕18 号，2024 年 3 月 28 日发布。
技术标准	(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) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）； (3) 《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-85）； (4) 《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）； (5) 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）； (6) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）； (7) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）； (8) 《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）； (9) 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）； (10) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）； (11) 《危险废物贮存污染控制标准》（GB 18597-2023）； (12) 《医疗废物分类目录（2021 年版）》； (13) 《国家危险废物名录（2025 年版）》。
其他	(1) 环评委托书；

	(2) 建设单位提供的其他相关技术资料。
--	----------------------

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）对核技术利用建设项目环境影响报告书项目评价范围的相关规定：“放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围”，结合本项目特点，本次评价内容包括II类射线装置和丙级非密封放射性物质工作场所，本次评价范围保守性取 BNCT 实验室实体边界外延 50m 范围、SPF 养殖室 1 和 SPF 养殖室 2 实体边界外延 50m 范围、解剖室实体边界外延 50m 范围。评价范围示意图见附图 11 和附图 12。

7.2 保护目标

根据本项目周边环境情况调查，本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，50m 评价范围内的环境保护目标为 3 号仓库其他区域、4 号仓库及物流中心内部道路，具体情况见表 7.2-1。

表 7.2-1 本项目环境保护目标一览表

辐射工作场所	方位	场所名称	最近距离	人员属性	估计人数(人)	备注	辐射剂量约束值
BNCT 实验室	西北侧	控制室 A、控制室 B、仪器室、前室	紧邻	职业人员	4 人	全居留	5mSv/a
		精密空调室、配电室	紧邻	公众	流动人员	偶然居留	0.1mSv/a
		车间内部通道	7.6m		流动人员	偶然居留	
		放射性废物储存间、固体废物暂存间、UPS 间、机械/煤气室、一般垃圾储存间、配电室	10.7m		流动人员	偶然居留	
		车间内部通道	17.7m		流动人员	偶然居留	
		休息间、备用间	20.4m		流动人员	偶然居留	
		动物实验室（细胞实验室、清洁室、养殖室、分析室、数据处理室等）	24.4m		约 10 人	部分居留	
		办公区	21.4m		约 17 人	全居留	
	东北侧	车间内部区域	紧邻		流动人员	偶然居留	
		物流中心内部道路	3.8m		流动人员	偶然居留	
		4 号仓库	13.8m		流动人员	偶然居留	

SPF 养殖室 1/SPF 养殖室 2	东南侧	车间内部区域	紧邻		流动人员	偶然居留	
		物流中心内部道路	6.2m		流动人员	偶然居留	
	西南侧	车间内部通道	紧邻		流动人员	偶然居留	
		备用间	3.7m		约 10 人	偶然居留	
		车间内部区域	31.7m		流动人员	偶然居留	
	内部	/	/	职业人员	4 人	全居留	5mSv/a
	西北侧	污物走廊、预留控制室	紧邻	公众	流动人员	偶然居留	0.1mSv/a
		分析室 2、数据处理室、预留 CT 室	2.0m		约 10 人	部分居留	
		锅炉房、污水处理房等	8.7m		流动人员	偶然居留	
		物流中心内部道路	21.0m		流动人员	偶然居留	
	东北侧	仓库	紧邻		流动人员	偶然居留	
		物流中心内部道路	5.3m		流动人员	偶然居留	
		4 号仓库	15.3m		流动人员	偶然居留	
	东南侧	前室	紧邻		流动人员	偶然居留	
		检疫室、污染检查室、公共走廊	2.0m		流动人员	偶然居留	
		休息间、备用间	7.5m		流动人员	偶然居留	
		车间内部通道	11.0m		流动人员	偶然居留	
		放射性废物储存间、固体废物暂存间、UPS 间、机械/煤气室、一般垃圾储存间、配电室	14.1m		流动人员	偶然居留	
		车间内部通道	21.0m		流动人员	偶然居留	
		精密空调室、配电室	23.9m		流动人员	偶然居留	
		仪器室、前室、控制室	23.9m	职业人员	4 人	全居留	5mSv/a
		BNCT 实验室	31.6m	职业人员	4 人	全居留	
	西南侧	清洁设备、仓储准备室	紧邻	公众	流动人员	偶然居留	0.1mSv/a
		清洁室	5.9m		流动人员	偶然居留	
		空调机房、备用间、活化分析室、解剖室、细胞实验室等	13.1m		约 10 人	部分居留	
		车间内部通道	25.3m		流动人员	偶然居留	
		办公区等	29.0m		约 17 人	全居留	
解剖室	内部	/	/	职业人员	4 人	全居留	5mSv/a
	西北侧	活化分析室	紧邻	公众	约 10 人	部分居留	0.1mSv/a
		空调机房、备用间等	3.9m		流动人员	偶然居留	

	东北侧	物流中心内部道路	8.3m		流动人员	偶然居留	
		分析室 2、清洁室	紧邻		约 10 人	部分居留	
		清洁设备和仓储准备室、SPF 养殖室、数据处理室、预留 CT 室、污水处理房、锅炉房等	7.0m		约 10 人	部分居留	
		仓库	22.8m		流动人员	偶然居留	
		物流中心内部道路	30.0m		流动人员	偶然居留	
		4 号仓库	40.0m		流动人员	偶然居留	
	东南侧	细胞实验室	紧邻		约 10 人	部分居留	
		前室、检疫室、污染检查室、公共走廊	9.8m		流动人员	偶然居留	
		休息间、备用间	15.9m		流动人员	偶然居留	
		车间内部通道	19.8m		流动人员	偶然居留	
		放射性废物储存间、固体废物暂存间、UPS 间、机械/煤气室、一般垃圾储存间、配电室	22.5m		流动人员	偶然居留	
		车间内部通道	29.6m		流动人员	偶然居留	
		精密空调室、配电室	32.6m		流动人员	偶然居留	
		仪器室、前室、控制室	32.6m	职业人员	4 人	全居留	5mSv/a
		BNCT 实验室	40.3m	职业人员	4 人	全居留	
	西南侧	车间内部通道	紧邻	公众	流动人员	偶然居留	0.1mSv/a
		办公区等	4.3m		约 17 人	全居留	
		车间内部区域	31.7m		流动人员	偶然居留	

注：3 号仓库下方为土层，无地下室；3 号仓库为 1 层建筑物，无上方。

7.3 评价标准

7.3.1 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）

本标准适用于实践和干预中人员所受电离辐射照射的防护和实践中源的安全。

4.2.4 豁免

4.2.4.1 如果源符合下列条件之一，并经审管部门确认和同意，则该源或利用该源的实践可以被本标准的要求所豁免：

- 符合本标准附录 A（标准的附录）中所规定的豁免要求；
- 符合审管部门根据本标准附录 A（标准的附录）规定的豁免准则所确定

的豁免水平。

4.2.4.2 对于尚未被证明为正当的实践不应予以豁免。

4.2.5 解控

4.2.5.1 已通知或已获准实践中的源（包括物质、材料和物品），如果符合审管部门规定的清洁解控水平，则经审管部门认可，可以不再遵循本标准的要求，即可以将其解控。

4.2.5.2 除非审管部门另有规定，否则清洁解控水平的确定应考虑本标准附录 A（标准的附录）所规定的豁免准则，并且所定出的清洁解控水平不应高于本标准附录 A（标准的附录）中规定的或审管部门根据该附录规定的准则所建立的豁免水平。

附录 A（标准附录） 豁免

A2 可豁免的源与豁免水平

A2.2 表 A1 给出的放射性核素的豁免活度浓度和豁免活度，是根据某些可能还不足以可无限制使用的照射情景和模式、参数推导得出的，仅可作为申报豁免的基础。考虑豁免时，审管部门应根据实际情况逐例审查，某些情况下，也可以要求采用更为严格的豁免水平。应用表 A1 所给出的豁免水平时，还应注意以下各点：

c) 如果存在一种以上的放射性核素，仅当各种放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免活度或豁免活度浓度之比的和小于 1 时，才可能考虑给予豁免；

表 A1（本报告表 7.3-1）作为申报豁免基础的豁免水平：放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度（四舍五入为整数）。

表 7.3-1 放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度（摘取）

核素	活度浓度 (Bq/g)	活度 (Bq)
^3H	1×10^6	1×10^9
^{14}C	1×10^4	1×10^7
^{41}Ar	1×10^2	1×10^9
^{66}Cu	1×10^2	1×10^6
^{38}Cl	1×10^1	1×10^5
^{24}Na	1×10^1	1×10^5
^{82}Br	1×10^1	1×10^6
^{56}Mn	1×10^1	1×10^5

^{42}K	1×10^2	1×10^6
^{64}Cu	1×10^2	1×10^6

4.3.2 剂量限制和潜在照射危险限制

4.3.2.1 应对个人受到的正常照射加以限制，以保证本标准 6.2.2 规定的特殊情况外，由来自各项获准实践的综合照射所致的个人总有效剂量和有关器官或组织的总当量剂量不超过附录 B（标准的附录 B）中规定的相应剂量限值。不应将剂量限值应用于获准实践中的医疗照射。

附录 B

B1.1 职业照射

B1.1.1.1 应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

- a) 由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv。
- b) 任何一年中的有效剂量，50mSv。

B1.2 公众照射

实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：

- a) 年有效剂量，1mSv。

6.2 职业照射的剂量控制

6.2.1 正常照射的剂量控制

正常照射的剂量控制应符合 4.3.2 的规定，并应遵循 4.3.3 中对辐射防护最优化的有关要求。

6.2.3 表面放射性污染的控制

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（标准的附录）B2 所规定的限制要求。

附录 B

B2 表面污染控制水平

B2.1 工作场所的表面污染控制水平如表 B11（本报告表 7.3-2）所列。应用这些控制水平时应注意：

- a) 表 B11（本报告表 7.3-2）中所列数值系指表面上固定污染和松散污染

的总数。

b) 手、皮肤、内衣、工作袜污染时,应及时清洗,尽可能清洗到本底水平。其他表面污染水平超过表 B11 (本报告表 7.3-2) 中所列数值时,应采取去污措施。

c) 设备、墙壁、地面经采取适当的去污措施后,仍超过表 B11 (本报告表 7.3-2) 中所列数值时,可视为固定污染,经审管部门或审管部门授权的部门检查同意,可适当放宽控制水平,但不得超过表 B11 (本报告表 7.3-2) 中所列数值的 5 倍。

d) β 粒子最大能量小于 0.3 MeV 的 β 放射性物质的表面污染控制水平,可为表 B11 (本报告表 7.3-2) 中所列数值的 5 倍。

e) ^{227}Ac 、 ^{210}Pb 、 ^{228}Ra 等 β 放射性物质,按 α 放射性物质的表面污染控制水平执行。

f) 氟和氟化水的表面污染控制水平可为表 B11 (本报告表 7.3-2) 中所列数值的 10 倍。

g) 表面污染水平可按一定面积上的平均值计算:皮肤和工作服取 100 cm^2 ,地面取 1000 cm^2 。

B2.2 工作场所中的某些设备与用品,经去污使其污染水平降低到表 B11 (本报告表 7.3-2) 中所列设备类的控制水平的五十分之一以下时,经审管部门或审管部门授权的部门确认同意后,可当作普通物品使用。

表 7.3-2 工作场所的放射性表面污染控制水平 单位: Bq/cm^2

表面类型		α 放射性物质		β 放射性物质
		极毒性	其他	
工作台、设备、 墙壁、地面	控制区 ⁽¹⁾	4	4×10	4×10
	监督区	4×10^{-1}	4	4
工作服、手套、 工作鞋	控制区 监督区	4×10^{-1}	4×10^{-1}	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-2}	4×10^{-2}	4×10^{-1}

注: ⁽¹⁾ 该区内的高污染子区除外。

6.4 辐射工作场所的分区

应把辐射工作场所分为控制区和监督区,以便于辐射防护管理和职业照射控制。

6.4.1 控制区

6.4.1.1 注册者和许可证持有者应把需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。

6.4.2 监督区

6.4.2.1 注册者和许可证持有者应将下述区域定为监督区：这种区域未被定为控制区，在其中通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价。

8.5 放射性废物管理

8.5.1 注册者和许可证持有者应确保在现实可行的条件下，使其所负责实践和源所产生的放射性废物的活度与体积达到并保持最小。

8.5.2 注册者和许可证持有者应按照本标准和国家其他有关法规与标准的要求，对其所负责实践和源所产生的放射性废物实施良好的管理，进行分类收集、处理、整备、运输、贮存和处置，确保：

- a) 使放射性废物对工作人员与公众的健康及环境可能造成的危害降低到可以接受的水平；
- b) 使放射性废物对后代健康的预计影响不大于当前可以接受的水平；
- c) 不给后代增加不适当的负担。

8.5.3 注册者和许可证持有者进行放射性废物管理时，应充分考虑废物的产生与管理各步骤之间的相互关系，并应根据所产生废物中放射性核素的种类、含量、半衰期、浓度以及废物的体积和其他物理与化学性质的差别，对不同类型的放射性废物进行分类收集和分别处理，以利于废物管理的优化。

8.6 放射性物质向环境排放的控制

8.6.2 不得将放射性废液排入普通下水道，除非经审管部门确认是满足下列条件的低放废液，方可直接排入流量大于 10 倍排放流量的普通下水道，并应对每次排放作好记录：

- (a) 每月排放的总活度不超过 $10\text{ALI}_{\min}$ ($\text{ALI}_{\min}$ 是相应于职业照射的食入和吸入 ALI 值中的较小者，其具体数值可按 B1.3.4 和 B1.3.5 条的规定获得)；
- (b) 每一次排放的活度不超过 $1\text{ALI}_{\min}$ ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

7.3.2 《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-2025）

本标准规定了粒子加速器辐射安全与防护的通用要求。

本标准适用于能量不低于 1 MeV 的粒子加速器的辐射安全与防护。

本标准不适用于像密封型中子管之类的可移动加速器和货物/车辆辐射检查系统用加速器。

4 总体要求

4.1 粒子加速器设施设计、运行和退役期间，都应遵循实践的正当性、剂量限制和潜在照射限制、防护与安全的最优化原则。

4.2 职业照射和公众照射的年剂量限值应符合 GB 18871 中剂量限值的相关规定。

4.3 应结合粒子加速器特点和应用场景合理确定剂量约束值，一般情况下，职业照射剂量约束值不超过 5 mSv/a，公众照射剂量约束值不超过 0.1 mSv/a。

4.4 应定期开展粒子加速器辐射工作场所和周围环境辐射水平监测并评估辐射安全与防护措施的有效性。

4.5 应规范收集、妥善贮存和处理粒子加速器运行和退役期间产生的放射性废物，并遵循放射性废物管理原则，实现废物最小化。

5 辐射安全与防护设计要求

5.2 辐射工作场所分区

5.2.1 粒子加速器辐射工作场所应分为控制区和监督区。应把需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，主要包括加速器室、束流终端室和放射性废物贮存区域等。与控制区相邻的、通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区。

5.2.2 控制区、监督区的入口应设置控制区和监督区标识，控制区出入口和其他适当位置还应设置明显的电离辐射警告标志。

5.3 辐射屏蔽

5.3.1 加速器室、束流终端室应设置足够的屏蔽体以达到辐射屏蔽设计目标，并确保人员受照剂量满足 4.3 的要求。

5.3.2 应充分利用周边现有环境条件，综合考虑粒子种类、能量、功率、靶材料、工作负荷和周围环境等因素，按可能达到最大运行工况下的辐射源项进行

辐射屏蔽设计，同时应充分考虑各种类型的瞬发辐射对周围邻近场所的影响。

5.3.3 确定辐射源项时不仅要考虑正常运行工况，还应考虑异常工况。

5.3.4 选择屏蔽材料时，应根据辐射防护最优化原则，综合考虑所选材料的结构性能、防护性能和稳定性等因素。

5.3.5 风管、电缆和水管等需要贯穿屏蔽体时，贯穿开口宜避开束流前向和全居留场所，采用 S 型或 U 型等非直通方式，必要时应增设局部屏蔽体以达到辐射屏蔽设计目标。

5.4 辐射安全联锁系统

5.4.1 加速器室和束流终端室出入口应设有出入管控措施以防止人员未经授权进入。

5.4.2 粒子加速器主要控制系统应利用开关钥匙或具有类似功能的装置控制，并设置控制系统操作人员的权限，确保开关钥匙或装置处于受控状态。

5.4.3 加速器室和束流终端室出入口的门应设置门-机联锁，某区域联锁门未完全关闭时该区域不能供束。

5.4.4 加速器室和束流终端室内部及其各出入口、控制室/台的显著位置，应设有必要数量的急停装置。急停装置周围应设有醒目标识及文字显示。

5.4.5 粒子加速器出束前应对加速器室和束流终端室内人员可达区域进行清场巡检。对于设置清场巡检按钮的场所，应设定清场巡检的顺序和响应时间，未按规定顺序或超出响应时间的清场无效。对于设置分区清场的情况，各分区出入口门应纳入联锁，确保清场完成且联锁门关闭后相应分区联锁方可生效。

5.4.6 粒子加速器工作场所应设置工作状态指示装置。其中，加速器室、束流终端室内部应设有工作状态指示及警示装置，在加速器准备运行前发出警示信号。加速器室和束流终端室出入口应设置与区域内束流状态联锁的工作状态指示装置并配有中文说明。

5.4.7 加速器室和束流终端室内应设紧急开门装置。

5.4.8 辐射安全联锁系统被触发时（如联锁门被打开），应立即切断联锁被触发区域的束流和可能的暗电流，确保区域安全。

5.4.9 辐射安全联锁系统被触发后，必须按照规程查明原因，复核故障设备或恢复系统功能后并通过控制系统才可重新启动束流。

5.5 区域辐射监测系统

5.5.1 应结合粒子加速器特点和辐射安全与防护需要，设计区域辐射监测系统，遵循的原则如下：

a) 粒子加速器屏蔽体外相邻场所内人员全居留场所且剂量率可能超过辐射屏蔽设计目标的区域应安装固定式区域辐射监测仪。当监测数据超过设定阈值时，发出报警信号。

b) 为了解加速器室和束流终端室内的束流状态和辐射水平，必要时可在束流运行区域内安装固定式区域辐射监测仪。

5.5.2 对于设置多束流终端室的情况，当束流终端室内居留因子较大($T \geq 1/2$)时，考虑相邻束流终端室的影响，可在各束流终端室内设置固定式区域辐射监测仪。

5.6 通风系统

5.6.1 可能产生感生放射性气体或臭氧等有害气体的粒子加速器工作场所应设置通风系统，通风系统的设计应确保气流方向由低污染区流向高污染区，并根据放射性气体或臭氧等有害气体的产生量和工作需要确定换气次数。

5.6.2 应合理布置粒子加速器工作场所内进风口和排风口的位置，室外进风口应避免受到排风的污染。排风口的位置和高度应结合放射性气体或有害气体排放量、周围建筑的高度、当地气象条件等综合考虑后确定，避免设置在门、窗和人流较大的过道等位置。

5.7 冷却水系统

5.7.1 对于可能产生活化冷却水的粒子加速器，应考虑循环冷却水系统中位于屏蔽体外的冷却水管、热交换器等对人员的照射，对冷却水管和其他部件进行合理布局或附加屏蔽体，必要时应将其所在区域作为控制区管理。

5.7.2 可能产生活化冷却水的粒子加速器冷却水系统设计时，应考虑活化冷却水收集、暂存和排放措施。

6 运行的辐射安全与防护要求

6.1 粒子加速器调试、运行和维修应遵循相应的操作规程并采取相应的辐射防护措施，确保调试、运行和维修期间的辐射安全。

6.2 应按照计划定期对辐射安全与防护设施进行功能检查和验证，并做好记

录，确保束前辐射安全与防护设施功能正常。

6.3 针对粒子加速器可能发生的异常工况，应制定相应的应对方案，包括异常工况下的响应程序、措施、后果评估等内容。

6.4 无特殊理由不得旁路辐射安全联锁系统。针对因工作需要旁路辐射安全联锁系统的情况，应制定并执行相应的工作程序，补充必要的安全措施。

6.5 任何人员未经授权或允许不得进入控制区。工作人员需在确认加速器室、束流终端室的束流已经终止的情况下方可进入其内部工作，且需佩戴个人剂量计，必要时携带个人剂量报警仪或便携式辐射监测仪器。

6.6 应对因工作需要进入粒子加速器辐射工作场所的短期或流动工作人员进行管理，确保其具备辐射风险认知和辐射安全与防护知识后方可开展工作，采取措施限定其活动范围，必要时进行个人剂量监测并记录存档。

6.7 进入加速器室等辐射水平较高的区域开展维修作业前，应监测拟进入区域的辐射水平。从事近距离接触活化部件的工作时，应对活化部件的辐射水平进行监测，根据监测结果制定工作计划，必要时采取增加局部屏蔽或个人防护用品等措施。工作结束后，应对工作人员的体表和衣服、工具以及工作地面等进行表面污染监测，发现污染应及时去污。

6.8 维修期间更换下来的活化部件，无法继续使用的应作为放射性废物管理。可以继续使用的应根据监测结果分类存放在专门的场所/区域，并确保暂存期间的辐射安全。

8 放射性废物管理

8.1 放射性固体废物管理要求

8.1.1 粒子加速器运行期间产生的放射性固体废物应暂存在加速器室等控制区内或单独的固体废物暂存间内。对于暂存在加速器室内的放射性固体废物，应在加速器室内划定专门的区域，并采取适当的实体屏障进行物理隔离。

8.1.2 放射性固体废物的暂存容器、区域和场所应按规定设置电离辐射警告标志和中文警示说明，并采取防丢失、防盗和防射线泄漏等措施。

8.1.3 应建立放射性固体废物台账，记录废物名称、数量、表面和 1 m 处 γ 剂量率、监测日期、去向等相关信息。

8.1.4 满足解控要求的放射性固体废物可回收后重复利用或作为非放射性固

体废物处理，不能满足解控要求的放射性固体废物最终送交有资质单位收贮。

8.2 液态流出物管理要求

循环冷却水系统在事故或检修期间排出的活化冷却水应妥善收集贮存，经监测满足 GB 18871 中的排放要求后作为非放射性废水处理。

8.3 气态流出物管理要求

通过增加排放高度、增加排放口与周围公众的距离、降低放射性气体排放量等措施，确保气态流出物所致公众受照剂量低于公众照射剂量约束值。

7.3.3 《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）

本标准规定了医疗机构开展放射治疗过程中的辐射安全与防护要求。

本标准适用于医疗机构放射治疗相关活动中的辐射工作人员和公众的辐射安全与防护管理。

本标准不适用于放射性核素治疗、敷贴治疗、放射性粒籽植入治疗、硼中子俘获治疗和放射治疗模拟诊断。

放射治疗设备生产、调试、维修维护活动和科研活动可参照本标准执行。

6 放射治疗场所辐射安全与防护要求

6.1 屏蔽要求

6.1.1 放射治疗室屏蔽设计应按照额定最大能量、最大剂量率、最大工作负荷、最大照射野等条件和参数进行计算，同时应充分考虑所有初、次级辐射对治疗室邻近场所中驻留人员的照射。

6.1.2 放射治疗室屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能，符合最优化要求。使用中子源放射治疗设备、质子/重离子加速器或大于 10 MV 的 X 射线放射治疗设备，须考虑中子屏蔽。

6.1.3 管线穿越屏蔽体时应采取不影响其屏蔽效果的方式，并进行屏蔽补偿。应充分考虑防护门与墙的搭接，确保满足屏蔽体外的辐射防护要求。

6.1.4 剂量控制应符合以下要求：

a) 治疗室墙和入口门外表面 30 cm 处、邻近治疗室的关注点、治疗室房顶外的地面附近和楼层及在治疗室上方已建、拟建二层建筑物或治疗室旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点治疗室房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗室顶外表面 30 cm 处和在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处的周围剂量当量

率应同时满足下列 1) 和 2) 所确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$:

1) 使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子(可依照附录 A 选取), 由以下周剂量参考控制水平($\dot{H}_c$)求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$ ($\mu\text{Sv/h}$):

机房外辐射工作人员: $\dot{H}_c \leq 100 \mu\text{Sv/周}$;

机房外非辐射工作人员: $\dot{H}_c \leq 5 \mu\text{Sv/周}$ 。

2) 按照关注点人员居留因子的不同, 分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,max}$ ($\mu\text{Sv/h}$):

人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所: $\dot{H}_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$;

人员居留因子 $T \leq 1/2$ 的场所: $\dot{H}_{c,max} \leq 10 \mu\text{Sv/h}$ 。

b) 穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射, 以年剂量 $250\mu\text{Sv}$ 加以控制。

c) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶, 机房顶外表面 30 cm 处的剂量率参考控制水平可按 $100 \mu\text{Sv/h}$ 加以控制(可在相应位置处设置辐射告示牌)。

6.2 安全防护设施和措施要求

6.2.1 放射治疗工作场所, 应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等:

a) 放射治疗工作场所的入口处应设置电离辐射警告标志, 贮源容器外表面应设置电离辐射标志和中文警示说明;

b) 放射治疗工作场所控制区进出口及其他适当位置应设电离辐射警告标志和工作状态指示灯;

c) 控制室应设有在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置, 并设置双向交流对讲系统。

6.2.2 质子/重离子加速器大厅和治疗室内、含放射源的放射治疗室、医用电子直线加速器治疗室(一般在迷道的内入口处)应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能, 其显示单元设置在控制室内或机房门附近。

6.2.3 放射治疗相关的辐射工作场所, 应设置防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全联锁措施:

a) 放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置门一机/源联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束/出源照射，出束/出源状态下开门停止出束或放射源回到治疗设备的安全位置。含放射源的治疗设备应设有断电自动回源措施；

b) 放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置室内紧急开门装置，防护门应设置防夹伤功能；

c) 应在放射治疗设备的控制室/台、治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁、质子/重离子加速器大厅和束流输运通道内设置急停按钮；急停按钮应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发；

d) 质子/重离子治疗装置安全联锁系统还应包括清场巡检系统、门钥匙开关（身份识别系统）。质子/重离子治疗室、加速器大厅和束流输运通道应建立分区清场巡检和束流控制的逻辑关系，清场巡检系统应考虑清场巡检的最长响应时间和分区调试情况的联锁设置。日常清场巡检时，如超出设定的清场巡检响应时间，需重新进行清场巡检；

e) 质子/重离子治疗装置应考虑建立调试、检修、运行维护人员的人身安全联锁系统，将调试、检修、运行维护人员的受照剂量与进入控制区的权限实施联锁管控；

f) 安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位并通过控制台才能重新启动放射治疗活动；安装调试及维修情况下，任何联锁旁路应通过单位辐射安全管理机构的批准与见证，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试。

7 操作的辐射安全与防护要求

7.1 医疗机构应对辐射工作场所的安全联锁系统定期进行试验自查，保存自查记录，保证安全联锁的正常有效运行。

7.2 治疗期间，应有两名及以上人员协调操作，认真做好当班记录，严格执行交接班制度；加速器试用、调试、检修期间，控制室须有工作人员值守。

7.3 任何人员未经授权或允许不得进入控制区。工作人员须在确认放射治疗或者治疗室束流已经终止的情况下方可进入放射治疗室，进入含放射源或质子/重离子装置的治疗室前须携带个人剂量报警仪。检修人员进入质子/重离子加速器大厅和束流输运通道区域前，应先进行工作场所辐射监测，在单位辐射安全管

理机构批准后方可进入。进入质子/重离子加速器大厅和束流输运通道区域的参观人员须在辐射工作人员带领下进入。

7.5 质子/重离子加速器调试、检修期间，应对进入质子/重离子加速器大厅和束流输运通道、治疗室区域的人员加强管理。在出束的情况下严禁调试、检修人员滞留在控制区；对辐射水平热点区域（如回旋加速器、降能器、束流偏转及引出部位等）应考虑进行屏蔽；接入人身安全联锁系统的受照剂量监测设备宜采用直读式的仪器。

8 放射性废物管理要求

8.1 总体要求

医疗机构应尽量减少放射性废物的产生；对产生的放射性废物按核素的种类、活度、半衰期、理化性质等分类收集处理。

8.2 固体废物管理要求

8.2.2 其他固体废物管理要求

8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固体废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。

8.2.2.2 低水平的活化部件如质子/重离子加速器治疗头器件、磁铁等，以及处理质子/重离子加速器冷却水的废树脂，集中放置在固体废物暂存间暂存衰变，经衰变后仍超出清洁解控水平的（放射性废物豁免的活度、活度浓度见附录 B（本报告表 7.3-4））送交有资质的单位收贮。

表 7.3-4 部分含人工放射性核素固体物质的豁免水平和解控水平

核素	活度浓度 ^a (Bq/g)	活度浓度 ^b (Bq/g)	活度 ^b (Bq)
氢-3	1E+02	1E+06	1E+09
碳-14	1E+00	1E+04	1E+07
锰-54	1E-01	1E+01	1E+06
铁-55	1E+03	1E+04	1E+06
铁-59	1E+00	1E+01	1E+06
钴-58	1E+00	1E+01	1E+06
钴-60	1E-01	1E+01	1E+05
镍-59	1E+02	1E+04	1E+08
镍-63	1E+02	1E+05	1E+08

^a 固体物质的解控水平以及批量固体物质的解控水平。

b 小批量固体物质的豁免水平（通常适用于小规模使用放射性物质的实践，所涉及的数量最多为吨量级）。

含多种人工放射性核素的废物，每种放射性核素的活度浓度与其对应活度浓度上限值的比值之和，应满足下列公式：

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

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

8.2.2.3 建立放射性固体废物台账，存放及处置前进行监测，记录部件名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息，低于清洁解控水平的可作为一般固体废物处置，并做好存档记录。

8.3 液态废物管理要求

事故或检修状况下质子/重离子加速器的活化冷却水按照放射性废液管理要求妥善收集贮存，暂存衰变至低于豁免水平后可作为普通废液处理，并做好存档记录。

8.4 气态废物管理要求

8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于4次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。

8.4.2 质子/重离子加速器停机后，加速器大厅应加强通风排气，采取措施使人员延时进入，以降低活化空气的感生放射性水平，减少人员受照剂量。

7.3.4 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）

本标准规定了医疗机构利用放射性药物开展临床核医学诊疗、实验研究以及放射性药物制备活动中的辐射防护与安全要求。

本标准适用于医疗机构核医学工作场所的设计、建设及开展核医学相关活动的辐射防护与安全管理。

4.2 辐射工作场所分级

应按照 GB 18871 的规定，将辐射工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分为甲级、乙级和丙级。核医学常用放射性核素的毒性与操作方式修正因子可参考附录 A。

4.3 辐射工作场所分区

4.3.1 应按照 GB 18871 的要求将核医学工作场所划分出控制区和监督区，

并进行相应的管理。

4.3.2 核医学工作场所的控制区主要包括回旋加速器机房、放射性药物合成和分装室、放射性药物贮存室、给药室、给药后候诊室、扫描室、核素治疗病房、给药后患者的专用卫生间、放射性废物暂存库、衰变池等区域。

4.3.3 核医学工作场所的监督区主要包括回旋加速器和显像设备控制室、卫生通过间以及与控制区相连的其他场所或区域。

4.3.4 控制区的入口应设置规范的电离辐射警告标志及标明控制区的标志，监督区入口处应设置标明监督区的标志。

4.4 剂量限值与剂量约束值

4.4.2 剂量约束值

4.4.2.1 一般情况下，职业照射的剂量约束值不超过 5 mSv/a；

4.4.2.2 公众照射的剂量约束值不超过 0.1 mSv/a。

4.4.3 放射性表面污染控制水平

核医学工作场所的放射性表面污染控制水平按照 GB 18871 执行。

6 工作场所的辐射安全与防护

6.1 屏蔽要求

6.1.1 核医学场所屏蔽层设计应适当保守，按照可能使用的最大放射性活度、最长时间和最短距离进行计算。

6.1.2 设计核医学工作场所墙壁、地板及顶面的屏蔽层时，除应考虑室内的辐射源外，还要考虑相邻区域存在的辐射源影响以及散射辐射带来的照射。

6.1.5 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10 $\mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25 $\mu\text{Sv/h}$ 。

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

率小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.8 放射性物质贮存在专门场所内，并应有适当屏蔽。

6.2 场所安全措施要求

6.2.1 核医学工作场所的放射性核素操作设备的表面、工作台台面等平整光滑，室内地面与墙壁衔接处应无接缝，易于清洗、去污。

6.2.4 放射性物质应贮存在专门场所的贮存容器或保险箱内，定期进行辐射水平监测，无关人员不应入内。贮存的放射性物质应建立台账，及时登记，确保账物相符。

6.2.5 应为核医学工作场所内部放射性物质运送配备有足够屏蔽的贮存、转运等容器，容器表面应张贴电离辐射标志，容器在运送时应有适当的固定措施。

6.2.9 扫描机房外门框上方应设置工作状态指示灯。

7 放射性废物的管理

7.2 固体放射性废物的管理

7.2.1 固体放射性废物收集

7.2.1.1 固体放射性废物应收集于具有屏蔽结构和电离辐射标志的专用废物桶。废物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物。

7.2.1.2 含尖刺及棱角的放射性废物，应预先进行包装处理，再装入废物桶，防止刺破废物袋。

7.2.1.3 放射性废物每袋重量不超过 20 kg。装满废物的塑料袋应密封后及时转送至放射性废物暂存间贮存。

7.2.2 固体放射性废物贮存

7.2.2.1 产生少量放射性废物和利用贮存衰变方式处理放射性废物的单位，经审管部门批准可以将废物暂存在许可的场所和专用容器中。暂存时间和总活度不能超过审管部门批准的限制要求。

7.2.2.2 放射性废物贮存场所应安装通风换气装置，放射性废物中含有易挥发放射性核素的，通风换气装置应有单独的排风管道。入口处应设置电离辐射警告标志，采取有效的防火、防丢失、防射线泄漏等措施。

7.2.2.3 废物暂存间内应设置专用容器盛放固体放射性废物袋（桶），不同类别废物应分开存放。容器表面应注明废物所含核素的名称、废物的类别、入库

日期等信息，并做好登记记录。

7.2.2.4 含放射性的实验动物尸体或器官应装入废物袋做好防腐措施（如存放至专用冰柜内），并做好屏蔽防护。不需要特殊防护措施即可处理的尸体含放射性常用核素的上限值见附录 C。

7.2.2.5 废物暂存间内不得存放易燃、易爆、腐蚀性物品。

7.2.3 固体放射性废物处理

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 表面污染小于 0.08 Bq/cm^2 、 β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：

a) 所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；

b) 所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍。

7.2.3.2 不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1 mSv/h ，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 4 Bq/cm^2 、其他 α 发射体应小于 0.4 Bq/cm^2 。

7.2.3.3 固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息。

7.3 液态放射性废物的管理

7.3.1 放射性废液收集

7.3.1.1 核医学工作场所应设置有槽式或推流式放射性废液衰变池或专用容器，收集放射性药物操作间、核素治疗病房、给药后患者卫生间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液。

7.3.1.2 核医学工作场所放射性药物标记、分装、注射后的残留液和含放射性核素的其他废液应收集在专用容器中。含有长半衰期核素的放射性废液应单独收集存放。盛放放射性废液的容器表面应张贴电离辐射标志。

7.3.1.3 核医学工作场所的上水需配备洗消处理设备（包括洗消液）。控制区和卫生通过间内的淋浴间、盥洗水盆、清洗池等应选用脚踏式或自动感应式的

开关,以减少场所内的设备放射性污染。头、眼和面部宜采用向上冲淋的流动水。

7.3.1.4 放射性废液收集的管道走向、阀门和管道的连接应设计成尽可能少的死区,下水道宜短,大水流管道应有标记,避免放射性废液集聚,便于检测和维修。

7.3.2 放射性废液贮存

7.3.2.1 经衰变池和专用容器收集的放射性废液,应贮存至满足排放要求。衰变池或专用容器的容积应充分考虑场所内操作的放射性药物的半衰期、日常核医学诊疗及研究中预期产生贮存的废液量以及事故应急时的清洗需要;衰变池池体应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性、内壁光滑和具有可靠的防泄漏措施。

7.3.3 放射性废液排放

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

7.3.5 《污水综合排放标准》(GB8978-1996)

根据《污水综合排放标准》(GB8978-1996)中的要求:总 α 不超过 1Bq/L,总 β 不超过 10 Bq/L。

7.3.6 本次核技术利用项目限值要求汇总

1、年剂量管理约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-2025)《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021),确定辐射工作人员年有效剂量不超过 5mSv,公众成员年有效剂量不超过 0.1mSv。

2、屏蔽体外剂量率控制水平

(1) BNCT 实验室

《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-2025)未对粒子加速器机房屏蔽体外的剂量率控制水平提出要求,参照《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)的要求确定 BNCT 实验室的屏蔽体外的剂量率参考控制水平。

周围剂量当量率应同时满足下列 1) 和 2) 所确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$:

1) 使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子（可依照附录 A 选取），由以下周剂量参考控制水平（ $\dot{H}_c$ ）求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$ （ $\mu\text{Sv/h}$ ）：

机房外辐射工作人员： $\dot{H}_c \leq 100 \mu\text{Sv/周}$ ；

机房外非辐射工作人员： $\dot{H}_c \leq 5 \mu\text{Sv/周}$ 。

2) 按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,max}$ （ $\mu\text{Sv/h}$ ）：

人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所： $\dot{H}_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ ；

人员居留因子 $T \leq 1/2$ 的场所： $\dot{H}_{c,max} \leq 10 \mu\text{Sv/h}$ 。

b) 穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量 $250\mu\text{Sv}$ 加以控制。

c) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 30 cm 处的剂量率参考控制水平可按 $100\mu\text{Sv/h}$ 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。

（2）动物实验场所

参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的要求确定动物实验场所的屏蔽体外的剂量率参考控制水平，距动物实验场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ，固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

3、表面污染控制水平

放射性物质污染表面的水平应低于表 7.3-2 所列数值。

4、放射性废水

年摄入量限值（ALI）是指参考人员在一年时间内经吸入、食入或通过皮肤所摄入的某种给定放射性核素的量，其所产生的待积剂量等于相应的剂量限值。ALI 用活度的单位表示。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 B 中 B1.3.4 提供的计算公式计算放射性核素 j 的年摄入量限值（ I_{il} ）：

$$I_{il} = \frac{D_L}{e_j} \dots\dots\dots \text{（式 7.3-2）}$$

式中：

D_L ——相应的有效剂量的年剂量限值，Sv。

e_j ——核素 j 的单位摄入量所致的待积有效剂量的相应值，Sv/Bq。

查 GB18871-2002 表 B3： ^3H 食入 e (g) 为 $1.8 \times 10^{-11} \text{Sv/Bq}$ ，则 $\text{ALI}_{\min}$ 为 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ， $10\text{ALI}_{\min}$ 为 $1.11 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。因此，本项目每月排放的 ^3H 总活度不超过 $1.11 \times 10^{10} \text{Bq}$ ，每一次排放的 ^3H 活度不超过 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

同时根据《污水综合排放标准》（GB8978-1996），总 α 不超过 1Bq/L，总 β 不超过 10 Bq/L。

5、放射性固废

（1）BNCT 实验室

放射性固废暂存在放射性废物储存间，待其活度低于清洁解控水平后作为一般固废处置，并做好存档记录。核技术利用工作场所退役时，放射性固废仍无法清洁解控，则送至有资质单位处置。各放射性核素的清洁解控水平参照其豁免活度执行，详见前文表 7.3-1 和表 7.3-3。

（2）动物实验场所

固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 0.8 Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：

a) 所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；

b) 所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍。

不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1 mSv/h ，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 4 Bq/cm^2 、其他 α 发射体应小于 0.4 Bq/cm^2 。

6、本次核技术利用项目限值要求汇总

综上所述，结合本项目实际情况，辐射环境标准限值如下。

表 7.3-5 相关限值要求汇总

项目	限值/要求
人员年受照剂量	辐射工作人员不大于 5mSv/a；公众人员不大于 0.1mSv/a。
剂量率限值	(1) 机房外辐射工作人员：$\dot{H}_c \leq 100 \mu\text{Sv}/\text{周}$；机房外非辐射工作人员：$\dot{H}_c \leq 5 \mu\text{Sv}/\text{周}$； (2) 人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所：$\dot{H}_c, \text{max} \leq 2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}$；人员居留因子 $T \leq 1/2$ 的场所：$\dot{H}_c, \text{max} \leq 10 \mu\text{Sv}/\text{h}$； (3) 对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 30 cm 处的剂量率参考控制水平可按 $100 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）； (4) 动物实验场所屏蔽体外关注点的剂量率控制水平为 $2.5 \mu\text{Sv}/\text{h}$。
表面污染控制水平	放射性物质污染表面的水平应低于表 7.3-2 所列数值。
废水	(1) 活化冷却水活度低于豁免水平，建设单位保守考虑，在冷却水收集桶内暂存 30d 后，取样监测，并做好存档记录。 (2) 每月排放的总活度不超过 $10\text{ALI}_{\text{min}}$，每次排放的活度不超过 1ALI_{min}，即每月排放的 ^3H 总活度不超过 $1.11 \times 10^{10} \text{Bq}$，每一次排放的 ^3H 活度不超过 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。 (3) 总 α 不超过 $1 \text{Bq}/\text{L}$，总 β 不超过 $10 \text{Bq}/\text{L}$。
固废	(1) 放射性固废暂存在放射性废物储存间，待其活度低于清洁解控水平后作为一般固废处置，并做好存档记录。核技术利用工作场所退役时，放射性固废仍无法清洁解控，则送至有资质单位处置。各放射性核素的清洁解控水平参照其豁免活度执行，详见前文表 7.3-1 和表 7.3-3。 (2) 固体放射性废物暂存时间满足要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平，β 表面污染小于 $0.8 \text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理；不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 $0.1 \text{mSv}/\text{h}$，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 $4 \text{Bq}/\text{cm}^2$、其他 α 发射体应小于 $0.4 \text{Bq}/\text{cm}^2$。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理位置和场所位置

本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库。物流中心东北侧为空地和中石化加油站；东南侧为杭州临空经济示范区管理委员会；西南侧为萧山机场；西北侧为空地 and 杭州临空经济示范区党建综合体。

本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3号仓库。3号仓库东北侧为物流中心内部道路，隔道路为4号仓库；东南侧为物流中心内部道路，隔道路为1号仓库；西南侧为物流中心内部道路，隔道路为萧山机场；西北侧为物流中心内部道路，隔道路为5号仓库。

3号仓库共1F，无地下层。本项目位于3号仓库东侧，整体呈矩形布局，采用模块化分区设计，共分四个区域，分别为：办公区、动物实验室及细胞实验室、机械检讨室（备用间）和电力检查室区域、BNCT实验室区域。

BNCT实验室区域位于建筑东南角，主要包括BNCT实验室A和BNCT实验室B，周边设有控制室、前室、配电、放射性废物储存间、精密空调水冷间等配套支持系统。

动物实验室及细胞实验室位于建筑西北侧，主要包括：SPF养殖室、解剖室、细胞实验室（万级）、废弃物储藏室、公共走廊、活化分析室等，整体区域为负压设计，防止病原体外泄。

建设单位地理位置见附图1，周围环境概况见附图2。

8.2 环境现状评价的对象、监测因子和监测点位

8.2.1 环境现状评价的对象

本项目周边场所环境辐射现状水平。

8.2.2 监测因子

环境 γ 辐射剂量率、中子周围剂量当量率。

8.2.3 监测点位

根据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）中5.1.1“测量点位应依据测量目的布设，并结合源和照射途径以及人群分布和人为活动情况仔细选

择”。根据上述布点原则，结合本项目情况，本次共布点 24 个，具体监测点位详见图 8.2-1 和图 8.2-2。

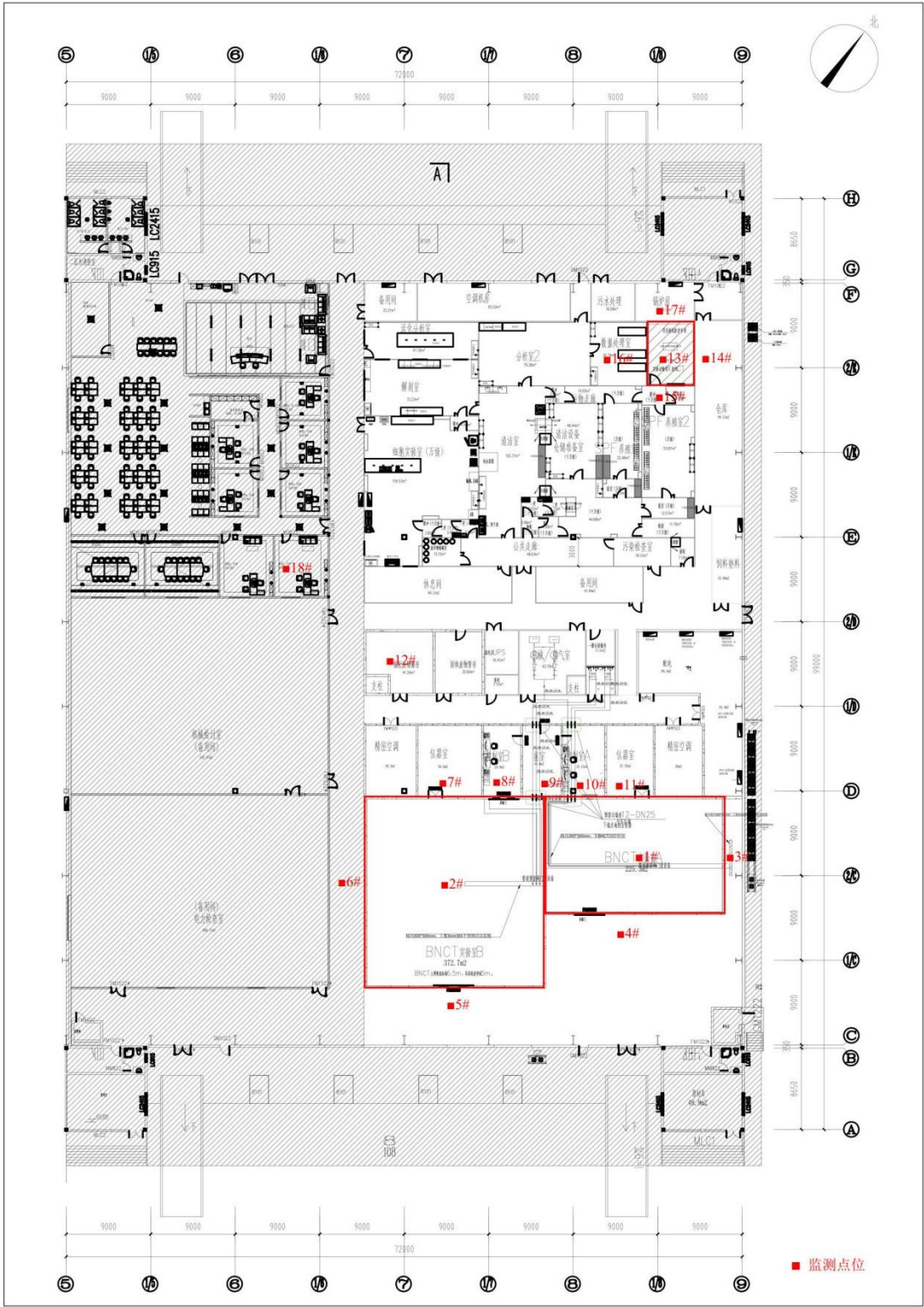


图 8.2-1 监测点位布置示意图 1



图 8.2-2 监测点位布置示意图 2

8.3 监测方案、质量保证措施和监测结果

8.3.1 监测方案

- (1) 监测单位：杭州旭辐检测技术有限公司
- (2) 监测日期：2025 年 10 月 20 日
- (3) 监测方式：现场监测
- (4) 监测条件：环境温度：15~19℃，环境湿度：66~67%，天气：阴，
风速：1.9~2.1m/s
- (5) 监测频次：依据 HJ 1157-2021 标准予以确定。
- (6) 监测工况：辐射环境本底。
- (7) 监测依据
依据《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）和《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）的要求和方法进行现场监测。
- (8) 监测仪器

表 8.3-1 γ辐射剂量率监测仪器相关信息

仪器名称	便携式 X、γ辐射周围剂量当量率仪
仪器型号	JC-NAI-300
仪器编号	JC185-10-2024

能量响应	25keV~30Mev
量程	0.01μSv/h~100mSv/h
检定（校准）机构	上海市计量测试技术研究院
检定（校准）证书编号	2024H21-20-5562119001
有效期	2024 年 10 月 30 日-2025 年 10 月 29 日

表 8.3-2 中子剂量率监测仪器相关信息

仪器名称	中子周围剂量当量仪
仪器型号	BH3105E
仪器编号	JC15-09-2018
能量响应	热中子~14MeV
量程	0.1μSv·h ⁻¹ ~100.0mSv·h ⁻¹
检定（校准）机构	中国计量科学研究院
检定（校准）证书编号	DLjs2025-00033
有效期	2025 年 01 月 06 日-2026 年 01 月 05 日

8.3.2 质量保证措施

- ①结合现场实际情况及监测点的可达性，在项目拟建场址内和项目周围工作人员活动区域、人流量相对较大的区域布设监测点位，充分考虑监测点位的代表性和可重复性，以保证监测结果的科学性和可比性。
- ②监测仪器每年经有资质的计量部门校准，校准合格后方可使用。
- ③每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常。
- ④本次监测委托杭州旭辐检测技术有限公司开展，监测实行全过程的质量控制，严格按照公司《质量手册》《程序文件》及仪器作业指导书的有关规定执行，监测人员经考核合格并持有合格证书上岗。
- ⑤监测报告严格实行三级审核制度，经校核、审核，最后由授权签字人批准。

8.3.3 监测结果

本项目辐射工作场所周围的γ辐射剂量率、中子周围剂量当量率背景水平检测结果见表 8.3-3，环境本底检测报告见附件 13。

表 8.3-3 监测结果一览表

检测点序号	检测点位描述	γ辐射剂量率修正后检测结果（nGy/h）	中子周围剂量当量率检测结果	备注
		平均值		
1#	BNCT 实验室 A	68	< 0.1	室内
2#	BNCT 实验室 B	59	< 0.1	室内
3#	BNCT 实验室 A 东侧	76	< 0.1	室内

4#	BNCT 实验室 A 东南侧	76	< 0.1	室内
5#	BNCT 实验室 B 东南侧	59	< 0.1	室内
6#	BNCT 实验室 B 南侧	68	< 0.1	室内
7#	仪器室 B	76	< 0.1	室内
8#	控制室 B	59	< 0.1	室内
9#	前室	68	< 0.1	室内
10#	控制室 A	76	< 0.1	室内
11#	仪器室 A	101	< 0.1	室内
12#	放射性废物储存间(辐射废物储存间)	101	< 0.1	室内
13#	实验动物用 X 射线 CT 室(预留)	68	< 0.1	室内
14#	CT 室东侧	68	< 0.1	室内
15#	CT 室南侧	76	< 0.1	室内
16#	CT 室西侧	68	< 0.1	室内
17#	CT 室北侧	84	< 0.1	室内
18#	办公区	76	< 0.1	室内
19#	项目所在地西侧-3 号仓库内	68	< 0.1	室内
20#	项目所在地东侧-4 号仓库内	68	< 0.1	室内
21#	项目所在地东侧-物流中心内部道路	51	< 0.1	室外
22#	项目所在地南侧-物流中心内部道路	51	< 0.1	室外
23#	项目所在地南西侧-物流中心内部道路	59	< 0.1	室外
24#	项目所在地南北侧-物流中心内部道路	51	< 0.1	室外

注：1、测量时探头距离地面约 1m；

2、环境 γ 辐射空气吸收剂量率=读数平均值 $\times$ 校准因子 $k_1 \times$ 仪器检验源效率因子 $k_2 \div$ 空气比释动能和周围剂量当量的换算系数-屏蔽修正因子 $k_3 \times$ 测量点宇宙射线响应值 D_c ，校准因子 k 为 0.99，仪器使用 ^{137}Cs 进行校准，效率因子 k_2 取 1，换算系数为 1.20Sv/Gy ， k_3 楼房取 0.8、平房取 0.9、原野和道路取 1，仪器对宇宙射线的响应值为 $0.03\mu\text{Sv/h}$ ；

3、1#~20#检测点为平房， k_3 取 0.9， $\blacktriangle 21 \sim \blacktriangle 24$ 为道路， k_3 为 1；

4、每个检测点的环境 γ 辐射空气吸收剂量率测量 10 个数据取平均值，以上检测结果均已对宇宙射线的响应值修正；

5、中子剂量当量率仪的最小探测下限为 $0.1\mu\text{Sv/h}$ 。

8.3.4 辐射环境现状评价

由表 8.3-3 可知，本项目各室内监测点位的 γ 辐射剂量率范围为 $59\text{nGy/h} \sim 101\text{nGy/h}$ ，室外监测点位的 γ 辐射剂量率范围为 $51\text{nGy/h} \sim 59\text{nGy/h}$ 。根据《浙江省环境天然贯穿辐射水平调查研究》可知，杭州市建筑物室内 γ 辐射剂量率在 $5.6 \times 10^{-9}\text{Gy/h} \sim 44.3 \times 10^{-8}\text{Gy/h}$ 之间，杭州道路上 γ 辐射剂量率在

$3.2 \times 10^{-8} \text{Gy/h} \sim 6.5 \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ 之间。本项目拟建场所及周围敏感点各监测点位 γ 辐射剂量率在天然辐射本底水平范围内。

由表 8.3-3 可知，本项目场址及周围环境均未检测出中子周围剂量当量率。

此外，根据《浙江省生态环境状况公报（2024 年）》：全省辐射环境质量总体良好。其中环境电离辐射水平处于本底涨落范围内。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 施工期工程分析

本项目租赁现有标准厂房作为硼中子俘获治疗系统生产、调试以及办公场所，本次施工主要进行 BNCT 实验室的建设、厂房内部装修以及设备安装，施工期污染物主要包括：

（1）废气

主要为 BNCT 实验室改造时机械敲打、钻洞墙体等产生的粉尘和装修废气。

（2）废水

施工期产生的废水主要包括施工人员的生活污水。

（3）噪声

施工期噪声包括 BNCT 实验室的建设、厂房内部装修以及设备安装过程中的施工设备噪声。本项目各施工设备在施工过程中噪声源强约为 75~115dB（A）。

（4）固体废物

主要为建筑垃圾（主要为现有墙体拆除产生的废弃物、新墙砌筑产生的多余建材）、装修垃圾以及施工人员产生的生活垃圾。

9.2 工程设备和工艺分析

9.2.1 设备组成及工作方式

1、设备组成

本项目生产的硼中子俘获治疗系统主要由六台 DD 中子发生器构成，其中 DD 中子发生器由离子产生与注入系统（包括 ECR 等离子体离子源、D₂ 气体供给线路）、粒子加速系统（包括加速器气缸、高压连接插座）、真空与压力监测系统（包括压力传感器、涡轮泵）、束流轰击与中子产生系统（包括 PE 板材、靶冷却系统）、辅助与控制系统（Sairam KMS-450（冷却液循环单元）、MKS 切换阀）等几个部分组成。本项目硼中子俘获治疗系统布局效果见图 9.2-1，DD 中子发生器系统示意图见图 9.2-2。

本项目 DD 中子发生器系统是一个集成度极高的紧凑型加速器中子产生装置。其核心功能是：将 D₂ 气体电离，产生氘离子并加速至 MeV 级能量，随后轰

击含靶材，通过核反应产生中子束流。整个系统在一个高度集成的真空腔体内完成离子产生、加速、聚焦和轰击的全过程。

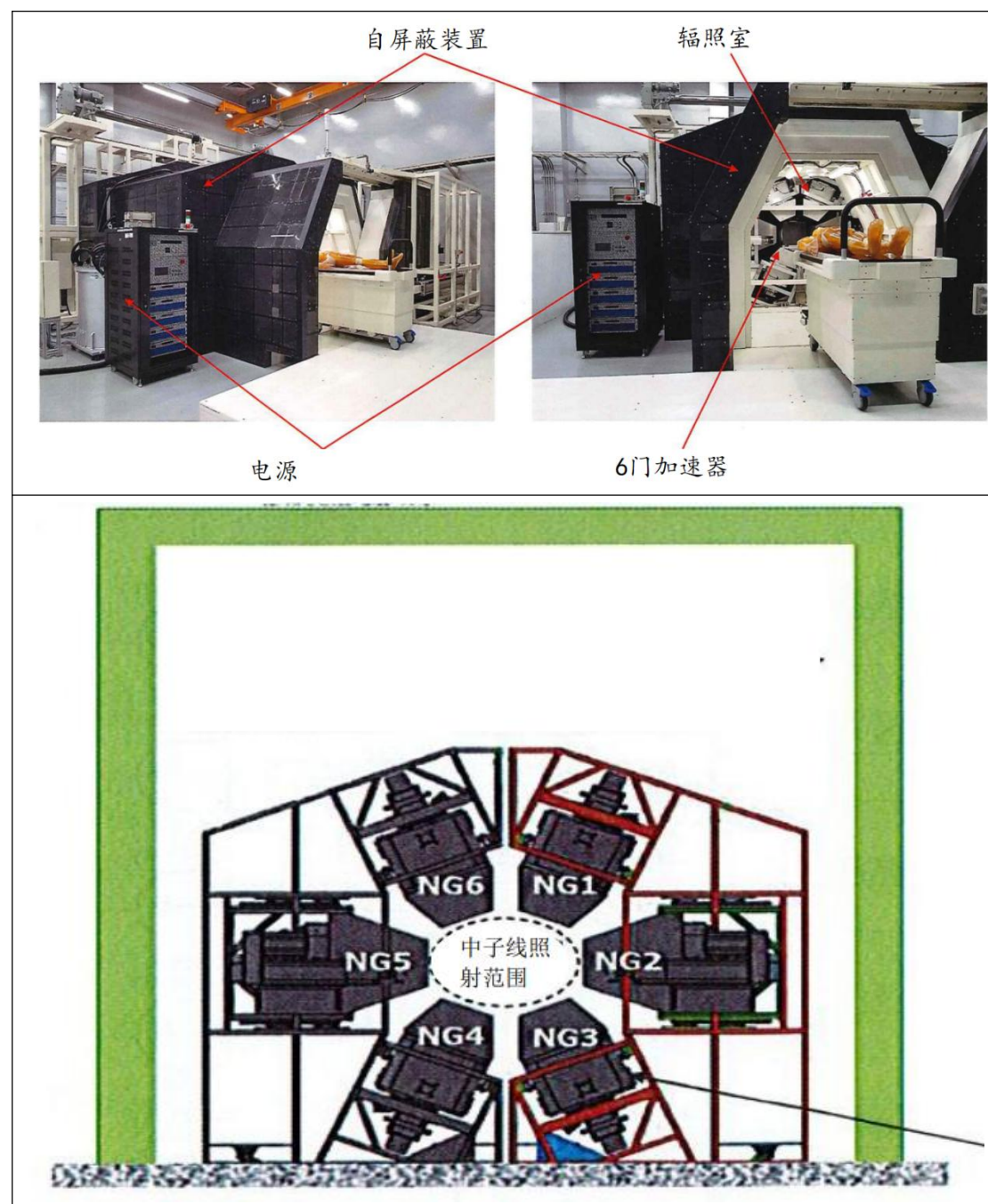
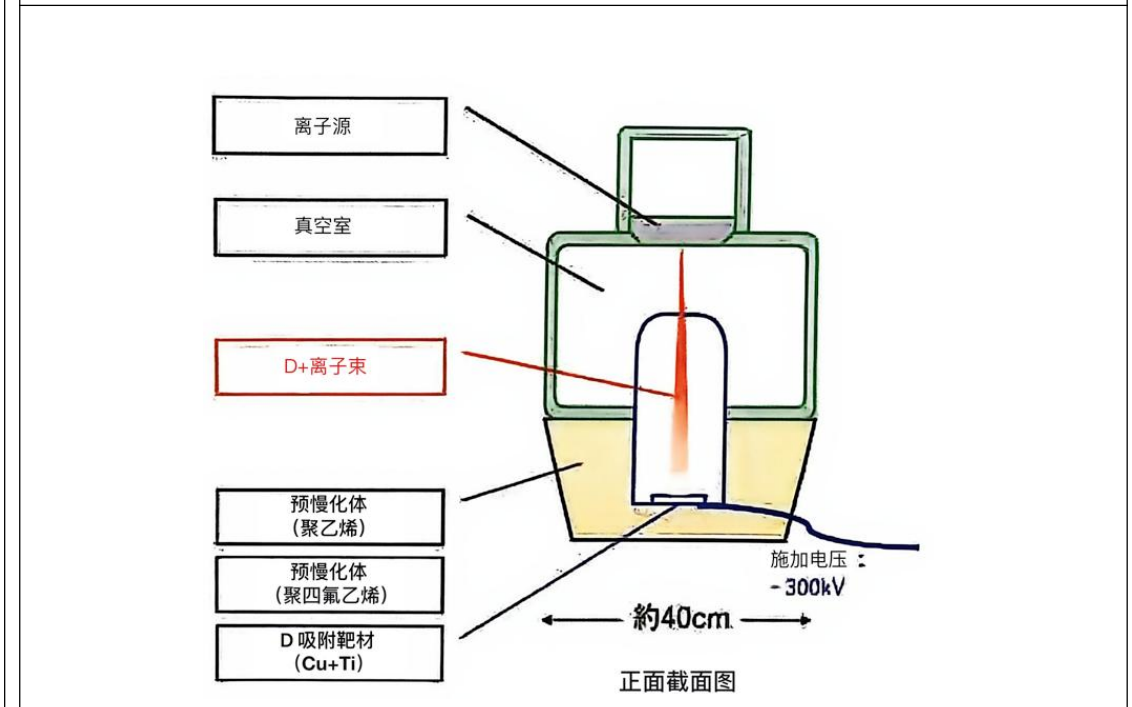
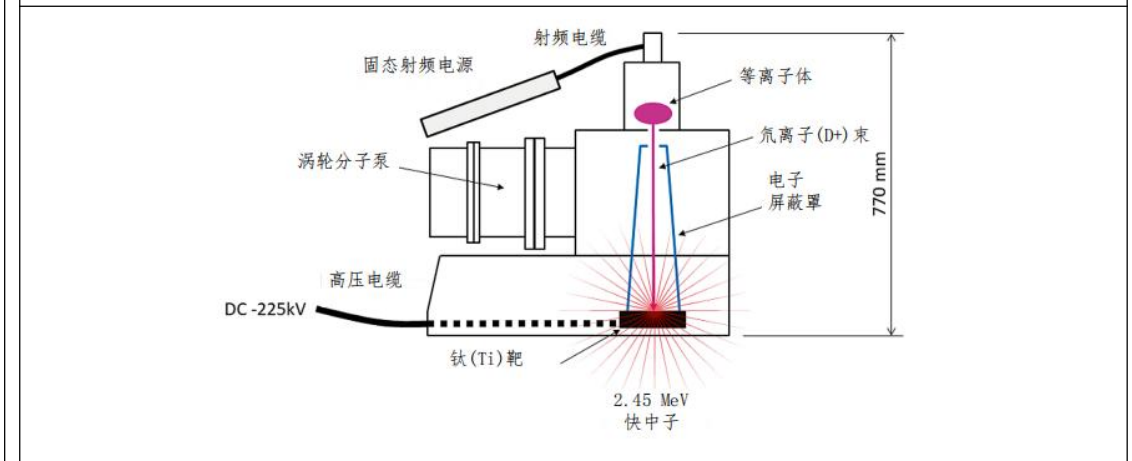
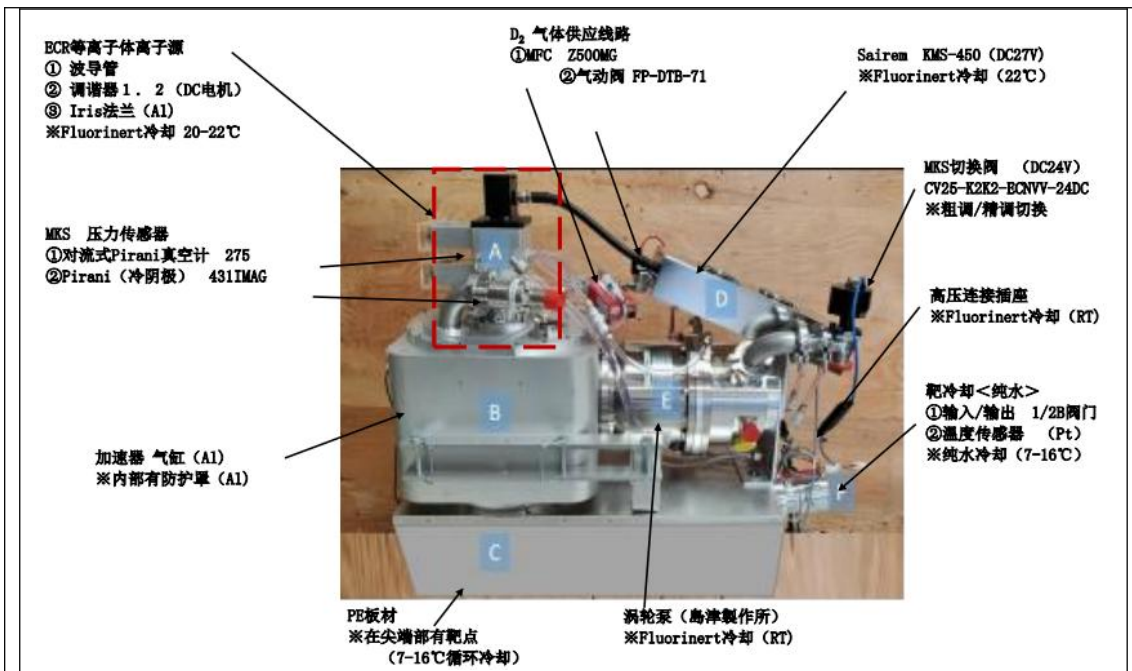


图9.2-1 硼中子俘获治疗系统的整机布局效果图



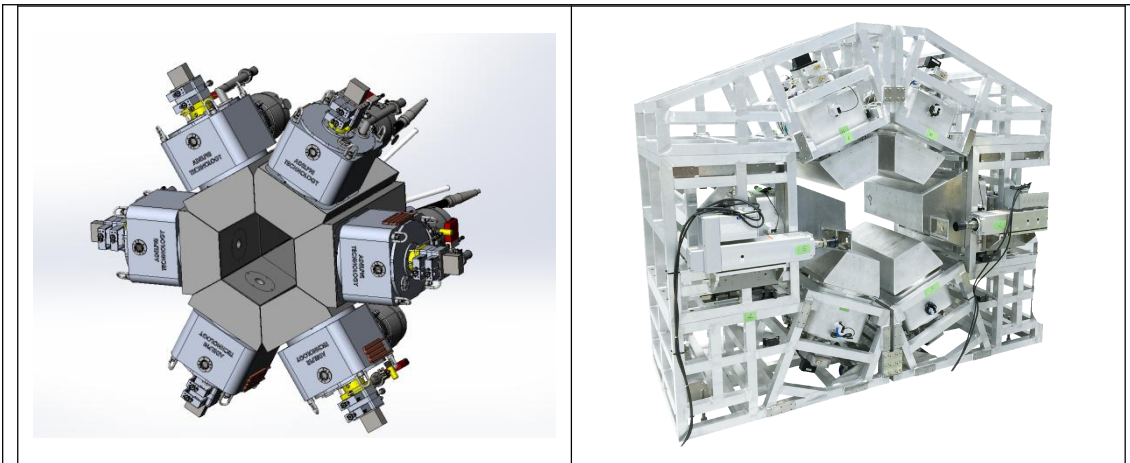


图9.2-2 DD中子发生器的系统组成示意图

（1）离子产生与注入系统

硼中子俘获治疗系统的离子产生与注入系统主要由ECR等离子体离子源、 D_2 气体供给线路构成。 D_2 气体供给线路包括MPC 2500MG和气动阀，MPC 2500MG精确控制注入离子源的 D_2 气体的流量，气动阀是受电信号控制的快速开关阀，用于开启或切断气体供应。

ECR等离子体离子源是整个系统的“起点”和心脏之一，通过输入微波能量，并在特定的轴向磁场条件下，使电子发生共振并获得极高能量，从而高效地通入的 D_2 气体电离，形成高密度、高电荷态的纯净等离子体，并从中引出氘离子(d^+)，为后续加速提供高品质的束流源。

（2）粒子加速系统

粒子加速系统包括加速器气缸、高压连接插座，将离子加速到高能量的核心区域。

①加速器气缸

加速器气缸通常由铝(Al)制成的主加速腔体或漂移管，其内部为高真空，并建立起强大的加速电场，氘离子在其中被加速至最终能量。在整个加速和漂移过程中，束流管道被内置防护罩所包围。此罩的作用是捕获因散射或电荷交换而损失的束流粒子，防止其直接轰击主真空腔壁，从而最大限度地减少腔内活化、气体释放和二次电子发射，保障长期运行的真空稳定性和辐射安全。

②高压连接插座

将外部高压电源(直流高压，可达数百kV)安全引入加速电极的关键绝缘连接部件，采用氟化液冷却以防止高压击穿和过热。

（3）真空与压力监测系统

真空与压力监测系统包括压力传感器、涡轮泵，创造并监控加速器运行所必需的高真空环境。压力传感器用于初始抽真空阶段和预真空监测、监测加速器主腔体运行时的核心工作真空度。涡轮泵是核心抽真空设备，通过高速旋转的叶片将气体分子定向排出，可从粗真空快速抽至 10^{-4} Pa以下的高/超高真空，同样需要氟化液冷却。

（4）束流轰击与中子产生系统

束流轰击与中子产生系统包括PE板材、靶冷却系统，该系统是离子束的终点，核反应发生地。加速完成的高能氦离子束流被精确导向靶材，靶材的基底材料为铜-钛，其表面镀有或吸附了核反应层（氘）。离子束轰击靶材，发生核反应（ $D(d,n)^3He$ ），产生能量不高于2.45MeV的快中子（平均能量为300keV）。紧邻靶材的预慢化体材料将核反应产生的快中子慢化为能量不大于2.45MeV次级中子束流（平均能量为4~5keV），同时将各向同性发射的中子向治疗或应用方向反射，提高中子利用效率。

此外，靶冷却系统通过实时监控冷却水温度，确保靶材温度被有效控制，防止因过热而损坏。

根据建设单位提供的资料，本项目生产的硼中子俘获治疗系统的中子靶站系统的主要参数见下表。

表9.2-1 束流轰击与中子产生系统技术指标一览表

源项位置	打靶材料	束流种类	最大能量 (MeV)	平均能量 (keV)	单个氘核产生的中子数 (n/ 氘核) *
束流轰击与 中子产生系 统	Ti、Al、Cu	氦离子	0.3	300	1.35×10^{-6}
		初级快中子	2.45	300	
		次级中子	2.45	4~5	

注：根据建设单位提供的技术规格书，该装置在氦束能量 0.3 MeV、束流强度 40 mA 时，总中子产额为 3.384×10^{11} n/s。束流强度 40 mA 约产生 2.50×10^{17} 氘核/s，则单个氘核中子产额约 1.35×10^{-6} n/氘核（理论模拟值）。

（5）辅助与控制系统

辅助与控制系统包括Sairam KMS-450（冷却液循环单元）、MKS切换阀，是为系统中多个发热部件提供集中冷却的单元。

2、工作方式

本项目仅开展硼中子俘获治疗系统的生产、调试、实验研究、检修以及销售，

不涉及患者治疗。

建设单位接受用户单位（医疗机构）的订单后，将硼中子俘获治疗系统所需的构件、零部件运至本项目场地（BNCT实验室B）完成硼中子俘获治疗系统各部件的安装、调试，而后再拆解、打包后运至用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所再次安装、调试，最终正式投入使用。此外，配备1台硼中子俘获治疗系统在本项目场地（BNCT实验室A）内开展实验研究工作。

硼中子俘获治疗系统使用前，在完成硼中子俘获治疗系统的巡检后，按照调试、实验研究的需求设置运行参数，测量中子束流品质。此外，BNCT实验室A中的BNCT装置对小鼠进行照射，进而完成相关实验研究。

9.2.2 工作原理

硼中子俘获治疗系统工作原理示意图见下图。

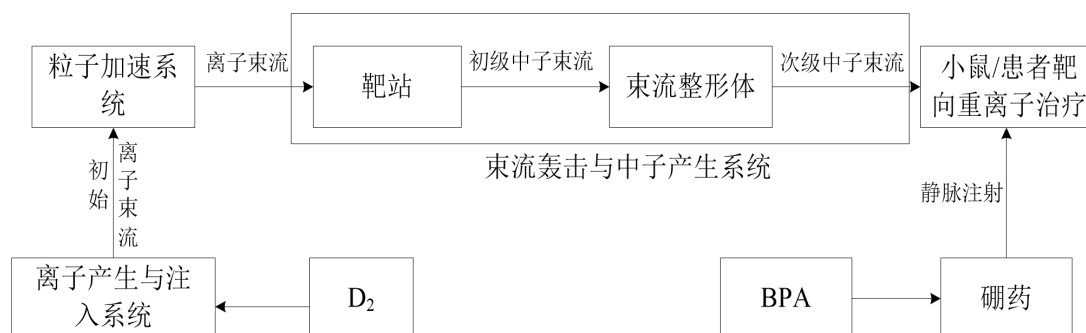


图9.2-3 硼中子俘获治疗系统工作原理

1、硼中子俘获治疗系统出束工作原理

（1）初始离子束流

在硼中子俘获治疗（BNCT）系统的离子源中，通过电弧放电方式电离 D_2 气体是产生氘离子的关键步骤。其核心工作原理如下：

在真空放电室内，于阴极和阳极之间施加一个强大的直流电压，形成加速电场。从阴极热发射或场致发射的电子，在该电场作用下被剧烈加速，从而获得很高的动能。

这些高能电子随后与中性的 D_2 气体分子发生碰撞，主要引发以下两类反应：

1）初级电离：高能电子将能量传递给 D_2 分子的一个轨道电子，使其克服原子核的束缚而脱离，从而生成带正电的氘分子离子（ D_2^+ ）和一个次级电子。

2）解离电离：另一个高能电子进一步撞击 D_2^+ 分子离子或另一个 D_2 分子。此

次碰撞传递的能量不仅足以完成电离，更能打破两个氘原子间的化学键，最终生成我们所需的氘原子离子（ D^+ ）。

通过上述碰撞过程的持续进行，放电室内最终形成一种包含电子、 D^+ 、 D_2^+ 、中性原子及分子的导电气态混合物，即等离子体。随后，通过施加特定的引出电场，可将其中带正电的氘离子（ D^+ ）高效地提取出来，生成以 D^+ 为主的等离子体。

（2） $\leq 300\text{keV}$ 离子束流

粒子加速系统是将离子源产生的初始离子束流加速至额定出口能量 300keV 、 40mA ，以供后续中子生成靶使用。其核心工作原理基于静电加速机制，具体实现如下：

1）高压生成与维持

加速器系统核心为高压电极，通过绝缘传动带（或输电链）构成的电荷输送系统，将电荷持续传输并积累于该金属球形电极，从而在电极与接地参考点之间建立并维持一稳定、高精度的直流高压电势场。

2）粒子加速与能量获得

初始氘离子（ D^+ ）束流于接地电位端注入加速管。在高压电极所建立静电场的作用下，带电粒子穿越其间的电势差，电场力对其做功，将电势能直接转化为粒子的动能。通过精确控制高压电势值，确保出口束流能量精确达到设计值 300keV 。

3）束流动力学与传输控制

在加速过程中，为实现束流的高效传输，系统集成实施了准绝热聚束技术。通过特定设计的电场分布，对束流施加连续的横向聚焦力，有效抑制其空间电荷效应导致的发散趋势，同时实现对束流纵向相空间的优化，确保束流在获得能量的同时保持高的相空间密度和传输效率。

4）系统输出

经上述过程，粒子加速系统出口处可获得能量为 300keV 、束流光学特性优良、满足打靶要求的氘离子束流。

（3） $\leq 2.45\text{MeV}$ 快中子束流

硼中子俘获治疗系统的加速器加速产生的 300keV 氘离子束流轰击靶中静止

的氘原子（D）产生能量不大于2.45MeV的快中子束流，核反应如下：



能量为 300keV、束流强度 40mA 的离子轰击靶材，初级中子能量不大于 2.45MeV，平均能量约 300keV。

（4）快中子慢化

300keV 氘离子束流轰击钛靶产生能量不大于 2.45MeV 的中子束流通过束流整形体进行慢化和整形得到小鼠/患者治疗所需的次级中子束流。慢化即让高能中子通过一系列慢化剂材料，通过与这些材料的原子核碰撞，将能量降低到理想的“超热中子”范围；整形即使用屏蔽和准直器，过滤掉不需要的伽马射线和热中子，形成一束纯净的、方向性好的超热中子束。

能量不大于 2.45MeV 的快中子束流通过束流整形体进行慢化和整形得到次级中子束流能量不大于 2.45MeV，平均能量约 4keV~5keV。

2、硼中子俘获治疗系统治疗原理

^{10}B 与肿瘤具有特异性亲合力，对热中子的俘获截面远高于 C、H、O、N 等元素，且是稳定的、无毒性的、自然界同位素丰度高。硼中子俘获治疗系统的治疗原理是先将 ^{10}B 化合物（BPA）注入患者体内，含 ^{10}B 化合物选择性富集于肿瘤细胞内。

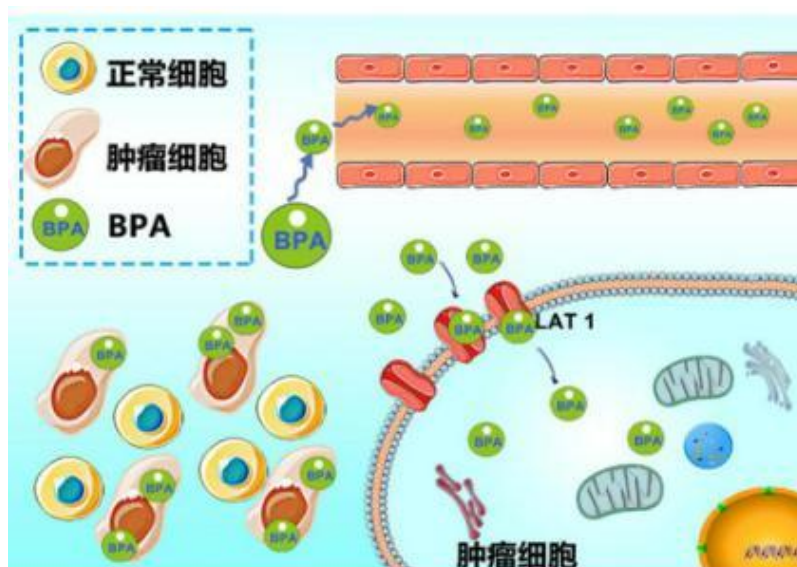


图 9.2-4 BPA 在人体组织内的分布示意图

硼中子俘获治疗系统运行产生的中子束照射肿瘤区域时，肿瘤细胞内的 ^{10}B 可俘获大量中子，俘获核进入激发态，激发态核衰变释放能量，产生高传能线密

度（linear energy transfer, LET）的 α 粒子（ ^4He ）和反冲锂核（ ^7Li ）并释放能量，中子治疗原理见下图。

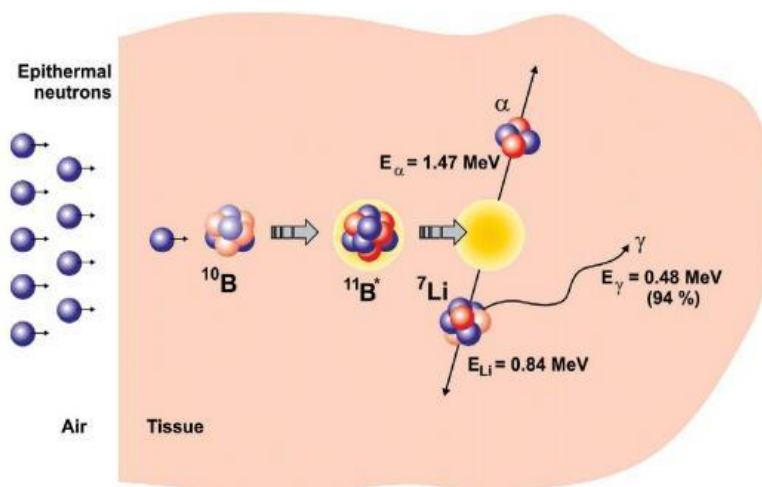


图 9.2-5 硼、中子反应示意图

α 粒子（ ^4He ）和反冲锂核（ ^7Li ）的射程分别约为 $9\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$ ，与肿瘤细胞的尺度相近（细胞直径约 $10\mu\text{m}$ ），故其杀伤作用仅限于肿瘤细胞及邻近的细胞，可在破坏肿瘤细胞的同时几乎不影响正常细胞。

9.2.3 工艺流程及产污环节

本项目工艺流程主要包括硼中子俘获治疗系统的销售、生产、调试、实验研究、拆解以及检修。本项目整体工艺及产污流程图见下图。

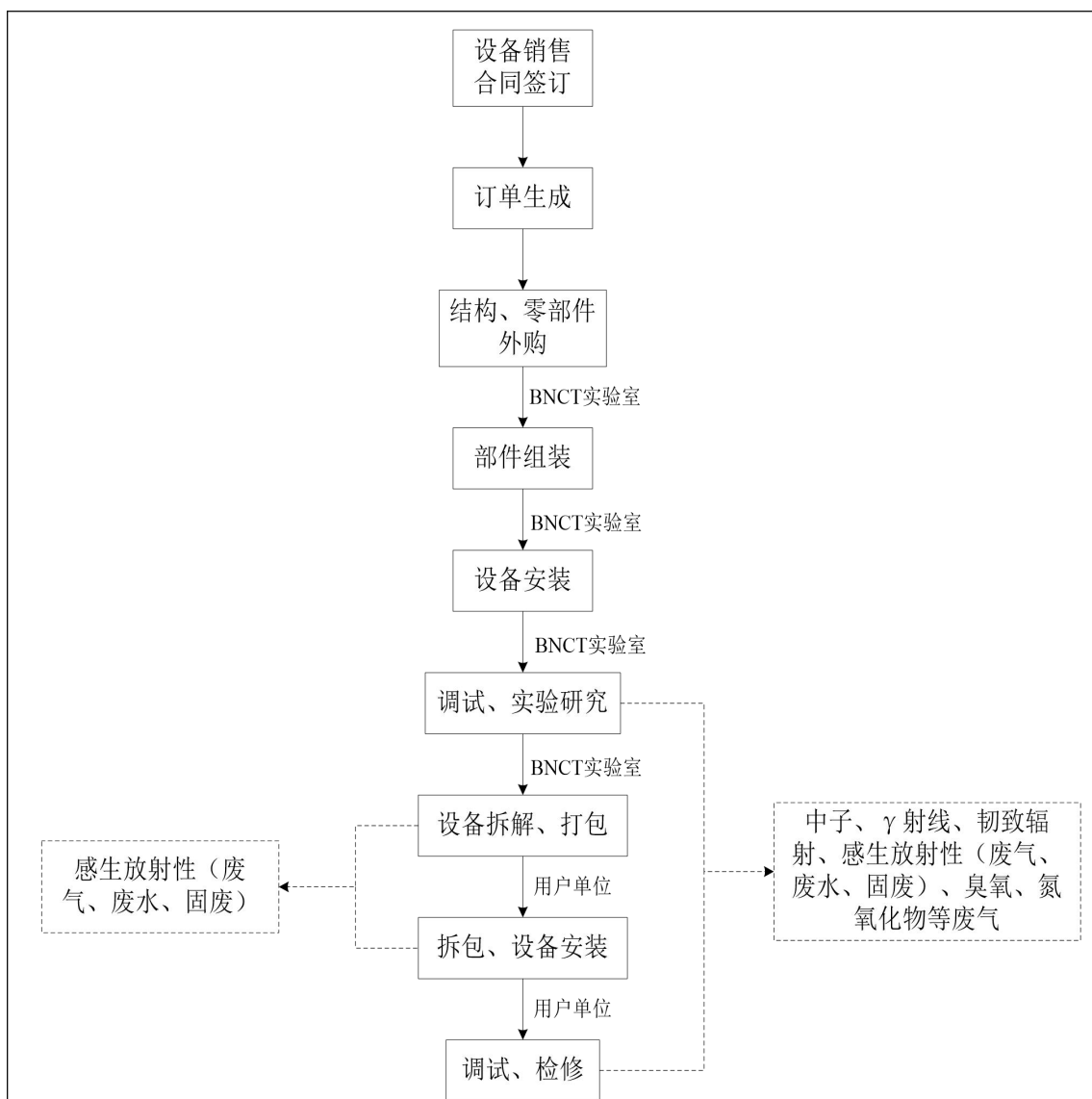


图9.2-6 整体工艺及产污流程图

1、合同签订

建设单位根据医疗机构提出的需求意向，与用户单位（医疗机构）签订硼中子俘获治疗系统的订购合同，生成订单。建设单位同时对用户单位（医疗机构）规模、核技术利用项目开展情况、硼中子俘获治疗系统使用场所以及配套设施等条件进行考察，并根据考察结果为用户单位（医疗机构）提供标准的硼中子俘获治疗系统工作场所样图作为参考，协助用户单位（医疗机构）设计最终建筑图纸，为用户提供前期技术解决方案以及相关建议。同时协助用户单位（医疗机构）完成硼中子俘获治疗系统使用场所的环境影响评价工作。

2、硼中子俘获治疗系统的生产、安装

本项目采用零库存订单模式，故建设单位接收用户单位（医疗机构）订单后，

将生产硼中子俘获治疗系统所需结构、零部件运至本项目BNCT实验室B进行拆包验收，而后对结构、零部件进行组装，组装完成的部件进一步完成设备安装，并与BNCT实验室B的相关辅助设施、安全防护措施进行关联，完成调试工作后再拆解、打包运输至用户单位（医疗机构）安装。

建设单位将硼中子俘获治疗系统相关设备、结构部件委托有资质的单位分批运至硼中子俘获治疗系统使用场所，安排相关技术人员进行现场安装。硼中子俘获治疗系统相关设备、结构部件的运输前提条件如下：

（1）用户单位（医疗机构）取得硼中子俘获治疗系统及使用场所的建设项目环境影响评价批准书；

（2）硼中子俘获治疗系统使用场所的水、电、通风等基础设施齐备，场地和墙整洁、设备起吊与运输顺畅，不存在安全隐患，通过土建和消防等部门的验收；

（3）建设单位从事硼中子俘获治疗系统调试的辐射工作人员均已经过辐射安全与防护培训并通过考核取得合格证书。

硼中子俘获治疗系统的生产工艺简单，生产过程中的污染物主要以设备噪声和结构、零部件包装固废为主。此外，在本项目BNCT实验室B完成调试的硼中子俘获治疗系统在拆解、打包过程及用户单位（医疗机构）的拆包、安装过程中还将产生感生放射性（部件）。

3、硼中子俘获治疗系统的调试

调试过程中离子源及LEBT系统工作、加速器及HEBT系统工作、中子靶站系统工作，则硼中子俘获治疗系统调试有离子源运行产生的氘离子（ D^+ ）束流、加速器加速引出的能量不大于300keV离子束流、离子束流轰击靶材产生的能量不大于2.45MeV 中子束流（平均能量为300keV），中子束流慢化处理产生的能量不大于2.45MeV 的中子束流（平均能量为4~5keV）。

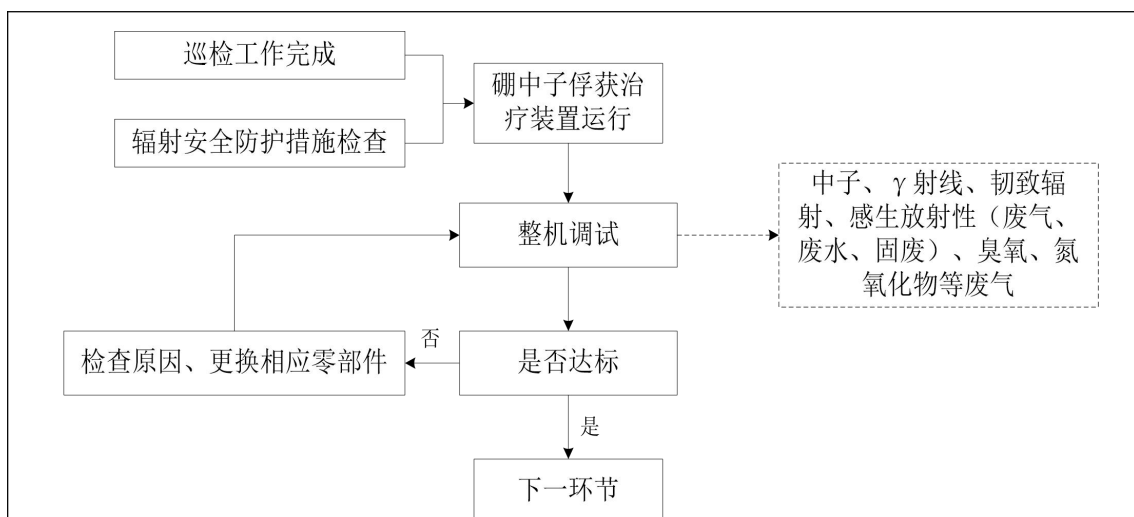


图9.2-7 硼中子俘获治疗系统调试流程示意图

硼中子俘获治疗系统的调试工作开展前必须对BNCT实验室B的辐射安全防护措施进行检查，确保其能正常运行；另硼中子俘获治疗系统开机运行前必须对BNCT实验室B进行巡检，确保实验室内无人滞留，并关闭防护门，禁止人员进入。

在本项目BNCT实验室B或用户单位（医疗机构）取得硼中子俘获治疗系统使用场所进行调试的前提条件如下：

（1）辐射工作人员核对辐射安全防护设施及措施是否齐备、能否正常运行，如工作状态指示灯、门机联锁、急停按钮、监控摄像头、辐射监测系统、联锁系统等；

（2）辐射安全防护设施及措施与建设项目环境影响评价文件一致；

（3）固定式辐射监测系统（中子、光子）安装测试完成；

（4）通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成；

（5）硼中子俘获治疗系统所有结构部件、系统、软件等准备完成，测试通过；

（6）硼中子俘获治疗系统使用场所的屏蔽体均满足建设项目环境影响评价、设计文件的要求，安装到位、质量合格；

（7）监测仪器仪表配备到位，包括便携式X-γ剂量率仪、个人剂量计、个人剂量报警仪等，监测仪器仪表质量及检定合格；

（8）参与硼中子俘获治疗系统调试工作的辐射工作人员均参加生态环境部门辐射安全与防护培训，并通过考核取得合格证书。

4、硼中子俘获治疗系统的拆解、打包、运输

硼中子俘获治疗系统在本项目的BNCT实验室B内完成调试，再运至用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所内开展下一步工作。由于硼中子俘获治疗系统的尺寸较大，不便于长途运输，且运输过程中不能完全保证设备性能。因此，在BNCT 实验室B内完成调试工作的硼中子俘获治疗系统进行拆解打包后再运输，并在用户单位（医疗机构）拆包、安装完成后再进行调试。

调试完成的硼中子俘获治疗系统的拆解、打包均由建设单位的辐射工作人员负责，运输委托第三方单位负责，其工作流程详见下图。

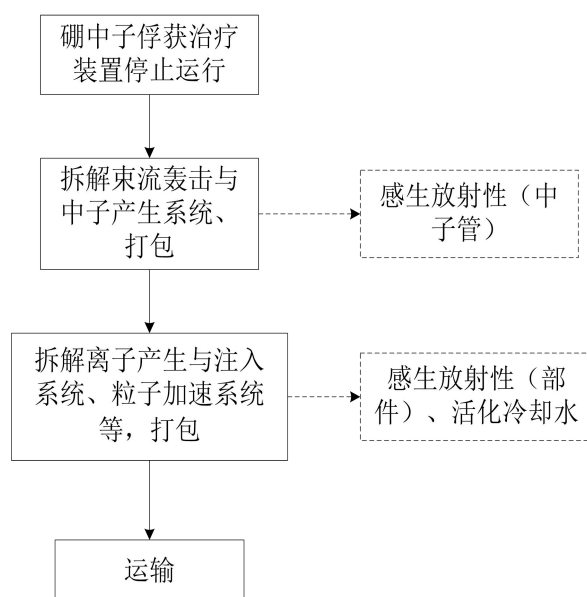


图9.2-8 硼中子俘获治疗系统拆解、打包流程示意图

硼中子俘获治疗系统主要拆解为束流轰击与中子产生系统、离子产生与注入系统、粒子加速系统、辅助与控制系统等部件，其拆解工作分段进行，先拆解束流轰击与中子产生系统，再拆解离子产生与注入系统、粒子加速系统、辅助与控制系统。

（1）辐射工作人员在确认BNCT实验室B内部剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后，佩戴个人剂量计，携带个人报警仪、便携式X- γ 剂量率仪进入BNCT实验室B，拆解放入铅容器内并锁上铅盖进行打包，而后进行其他部件的拆解。

（2）硼中子俘获治疗系统的人工拆解工作必须在硼中子俘获治疗系统停止出束1d后，且BNCT实验室B内部剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后方可启动。辐射工作人员在拆解过程中持续对各部件进行表面巡测，若表面剂量高于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，则停止拆解，离开BNCT实验室B。间隔1d进入BNCT实验室B对硼中子俘获治疗系统的部

件表面进行巡测，其监测结果低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后再进行设备、打包。

(3) 硼中子俘获治疗系统的各部件打包完成后委托第三方单位运输至用户单位（医疗机构），建设单位再进行拆包、安装、调试。

硼中子俘获治疗系统在BNCT实验室B内进行拆解、打包过程中产生的污染物主要为活化冷却水、感生放射性（部件）。

5、硼中子俘获治疗系统售后检修

硼中子俘获治疗系统的售后检修包括设备检修、中子发生器更换。

(1) 设备检修

硼中子俘获治疗系统交付用户单位（医疗机构）使用后，建设单位将会委派辐射工作人员定期对硼中子俘获治疗系统进行日常维护。遇到无法解决的故障，由辐射工作人员和用户单位（医疗机构）共同发起检修申请，再对硼中子俘获治疗系统进行维修。

硼中子俘获治疗系统的日常维护包括使用场所的屏蔽效能监测，故硼中子俘获治疗系统的日常维护以及大型维修均会涉及整机出束，且大型维修还可能涉及部件拆卸、组装。

硼中子俘获治疗系统日常维护产生的污染物主要有中子、 γ 射线、韧致辐射、感生放射性废气以及氮氧化物、臭氧等废气。大型维修产生的污染物主要有设备噪声、中子、 γ 射线、韧致辐射、感生放射性（废水、废气、固废）以及氮氧化物、臭氧等废气。

辐射工作人员在检修及大型维修过程中均按照要求佩戴个人剂量计，进入实验室内必须携带便携式个人剂量仪、便携式 X- γ 剂量率仪，辐射剂量监测结果异常，立马退出机房。

(2) 中子发生器更换

本项目硼中子俘获治疗系统整机调试、实验研究过程中轰击靶材的束流强度不大于 40mA ，正常情况下，硼中子俘获治疗系统在 BNCT 实验室内使用过程中无需更换中子发生器。特殊情况下，出现靶材起泡导致束流品质下降，会出现未达到使用寿命的中子发生器非正常更换。

本项目生产的硼中子俘获治疗系统的中子发生器全程由人工更换，更换后的活化中子发生器放置在铅容器内，锁上铅盖，再由辐射工作人员转移至放射性废

物储存间内暂存，不进行回收处理。

6、硼中子俘获治疗系统的实验研究

本项目的实验研究主要为将MeWo细胞荷瘤小鼠分为不同组别，在接受BPA给药后，在保持麻醉状态下静置1小时，随后使用BNCT实验室A中的BNCT装置进行中子照射。照射后进行为期4周的观察，研究BNCT的抗肿瘤效果。具体实验流程如下：

（1）荷瘤小鼠制备：购入BALB/c nu/nu雄性5周龄24只，适应环境约1周，将MeWo细胞数调整为每只 2×10^6 个的悬浊液，每只小鼠100 μ L，皮下移植至右侧大腿上部。

（2）小鼠分组：①A群（未给药·未照射）：n=6；②B群（BPA给药·未照射）：n=6；③C群（未给药·照射）：n=6；④D群（BPA给药·照射）：n=6。

（3）小鼠给药：在七氟烷吸入麻醉状态下，使用微量注射器进行持续BPA给药2小时。

（4）中子照射：照射组中，BPA给药的6只小鼠，在给药结束并保持麻醉状态静置1小时后，与其他照射组的6只小鼠一同转移至BNCT实验室A；在麻醉状态下将小鼠放入照射专用固定器中，设置到BNCT上进行中子照射（小鼠麻醉持续至照射结束）；照射结束后，将小鼠从固定器中取出，移回动物实验区养殖室内的饲养架内。

（5）观察：观察外观、体位、呼吸、步态、生殖器/肛门部污渍等，测定体重，测量肿瘤体积。观察时若发现体重急剧下降、消瘦或濒死状态、肿瘤大小显著增大（肿瘤体积 $\geq 1000 \text{ mm}^3$ ）等异常状态，则视为人道终点（HE），实施安乐死。

（6）剖检：各器官的剖检所见，所有个体的肿瘤均取材后拍照，必要时进行血液学及生化学检测。

中子照射在本项目BNCT实验室A内进行，硼中子俘获治疗系统的实验研究过程与调试过程产生的污染物基本一致，主要有中子、 γ 射线、韧致辐射、感生放射性（废气、冷却水、部件等）以及氮氧化物、臭氧等废气。

照射组在后续养殖、观察、剖检过程中还将产生动物尸体、感生放射性（小鼠）。

9.3 人流物流路径规划

9.3.1 BNCT 实验区

本项目重点关注 BNCT 实验区的人流物流路径，见图 9.3-1。

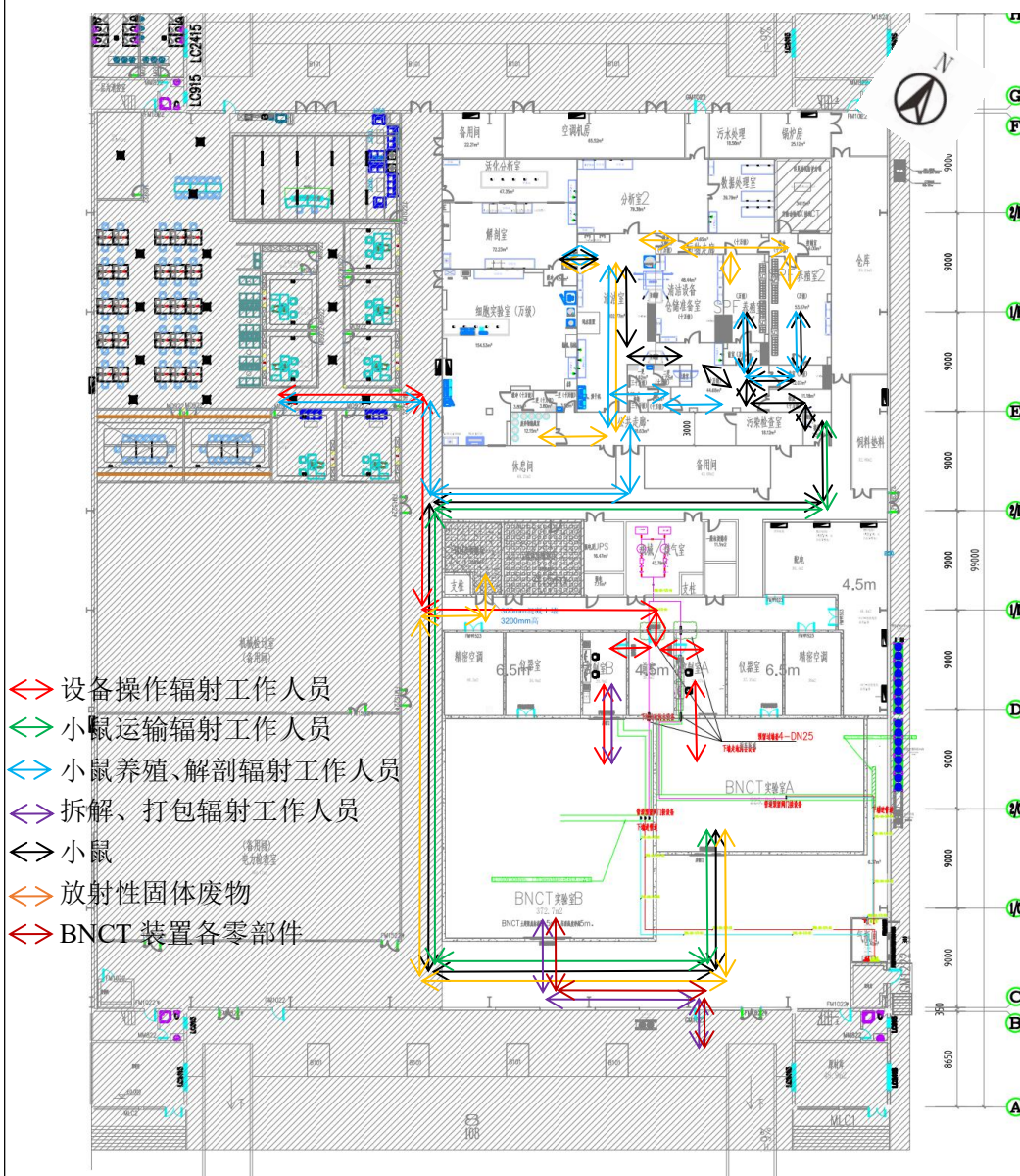


图 9.3-1 人流物流路径图

1、辐射工作人员路径

本项目辐射工作人员拟从办公区进入 BNCT 实验室开展工作。

(1) 设备操作辐射工作人员

设备操作辐射工作人员主要在控制室内工作，由办公生活区的走廊进入 BNCT 实验区走廊，通过前室分别进入控制室 A 和控制室 B。

此外，硼中子俘获治疗系统开机运行前，设备操作辐射工作人员必须对

BNCT 实验室的 BNCT 装置进行巡检，确保内部无人滞留后方可开机运行。巡检路径如下：

控制室→BNCT 实验室 A/B→BNCT 装置处→控制室。

(2) 小鼠运输辐射工作人员

小鼠由动物实验研究辐射工作人员运送，辐射工作人员具体路径如下：动物实验区检疫室传递窗→动物实验区与 BNCT 实验区之间的走廊→BNCT 实验区西南侧走廊→BNCT 实验区东南侧走廊→BNCT 实验室 A 东南侧防护门→BNCT 实验室 A。

(3) 拆解、打包辐射工作人员

控制室→BNCT 实验室 B→BNCT 实验室 B 东南侧防护门→BNCT 实验区东南侧走廊→外运。

2、物流路径

(1) 小鼠

小鼠由动物实验研究辐射工作人员运送至 BNCT 实验室 A 进行中子照射，具体路径如下：动物实验区 SPF 养殖室 1/2→动物实验区检疫室传递窗→动物实验区与 BNCT 实验区之间的走廊→BNCT 实验区西南侧走廊→BNCT 实验区东南侧走廊→BNCT 实验室 A 东南侧防护门→BNCT 实验室 A。

(2) 放射性固体废物

废活化中子发生器：BNCT 实验室 A→BNCT 实验室 A 东南侧防护门→BNCT 实验区东南侧走廊→BNCT 实验区西南侧走廊→BNCT 实验区走廊→放射性废物储存间。

(3) BNCT 装置各零部件

BNCT 实验室 B→BNCT 实验室 B 东南侧防护门→BNCT 实验区东南侧走廊→外运。

9.3.2 动物实验区

1、工作人员路径

工作人员养殖路径：办公生活区→办公生活区的走廊→动物实验区与 BNCT 实验区之间的走廊→公共走廊→清洁室→更衣室→SPF 养殖室 1/2。

工作人员解剖路径：办公生活区→办公生活区的走廊→动物实验区与 BNCT

实验区之间的走廊→公共走廊→清洁室→解剖室。

2、物流路径

(1) 小鼠

小鼠由动物实验研究辐射工作人员运送至解剖室进行解剖，具体路径如下：
动物实验区 SPF 养殖室 1/2→动物实验区检疫室传递窗→清洁室→解剖室。

(2) 放射性固体废物

SPF 养殖室 1/2→污物走廊→清洁室→公共走廊→废弃物储藏室；解剖室→清洁室→公共走廊→废弃物储藏室。

动物实验区人流物流路径见图 9.3-1。

9.4 污染源项描述

9.4.1 硼中子俘获治疗系统放射性污染

硼中子俘获治疗系统运行过程中产生的辐射场包括硼中子俘获治疗系统运行出束期间产生的“瞬发辐射场”和停机后依然存在的“缓发辐射场”。瞬发辐射场主要考虑硼中子俘获治疗系统运行时损失的离子束流以及离子束流轰击靶发生的核反应，其特点是辐射能量较强，但会随着硼中子俘获治疗系统的停机而完全消失。缓发辐射场主要考虑硼中子俘获治疗系统的部件受氦离子束流及其次级粒子轰击产生的活化产物，在硼中子俘获治疗系统停机后依然存在。

本项目生产的硼中子俘获治疗系统的离子源产生的低能量氦离子束流通过加速器加速，引出的氦离子束流能量最大为0.3MeV。该束流被引导轰击特定的靶材，轰击过程中，氦离子与靶核发生核反应。该反应为放热反应，产生瞬发中子并伴随 γ 光子的释放，反应产生的次级带电粒子（如 α 粒子）因其在靶材料中射程极短，通过电离作用迅速损失能量而被阻停。因此，从靶体出来的主要辐射是次级中子与 γ 光子，最终在屏蔽体内、外形成的瞬发辐射场为中子-光子混合场。

上述瞬发辐射（主要是瞬发中子和瞬发辐射 γ ）的产生过程中，靶和周围部件原本稳定的原子核受氦离子及其次级粒子的轰击，在吸收上述辐射（尤其是中子）后，原子核的质子-中子平衡被打破，通过 (n, γ) 、 (n, p) 、 (n, α) 等核反应转变为不稳定的放射性核素，产生感生放射性。系统停机后，瞬发辐射场立即消失。然而，新生成的这些放射性核素会遵循各自的衰变规律，通过发射 β 粒

子及伴随的 γ 射线逐渐衰变至稳定状态，从而成为缓发辐射的来源。

1、粒子加速系统

硼中子俘获治疗系统的离子源产生的氦离子束流在粒子加速系统加速、输运过程中将沿着真空管道损失束流。离子源产生的氦离子束流能量低，在粒子加速系统内氦离子引发核反应的截面极低，因此束流损失的主要辐射产物是韧致辐射。当损失的离子轰击组件材料（如真空管壁）时，其动能通过库伦相互作用转化为连续能谱的X射线。

氦离子束流与加速器系统内的真空管道材料、偏转磁铁等主要发生相互作用，通过捕获或丢失电子，转变为中性的氦原子。这些中性粒子不再受加速电场和导向磁场的约束，将脱离束流核心并撞击到真空管道或组件上。这些损失的粒子（包括离子和中性原子）轰击材料时，除产生韧致辐射外，当其能量高于库仑势垒时，亦可能诱发核反应，从而产生中子与伽马射线。加速器系统的真空管道材料、偏转磁铁主材为铝、铜、铁，氦离子束流入射铝靶、铜靶、铁靶的非弹性散射截面见图 9.4-1~9.4-3。

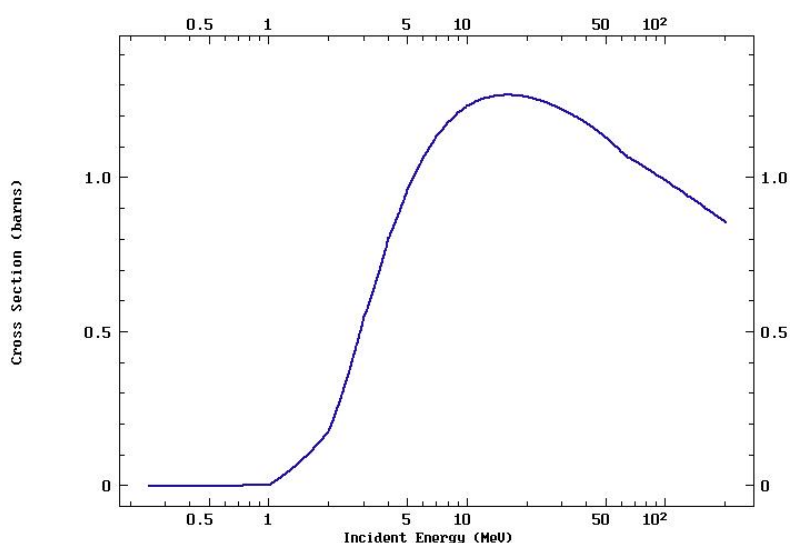


图9.4-1 氦离子与铝 (^{27}Al) 的非弹性散射截面

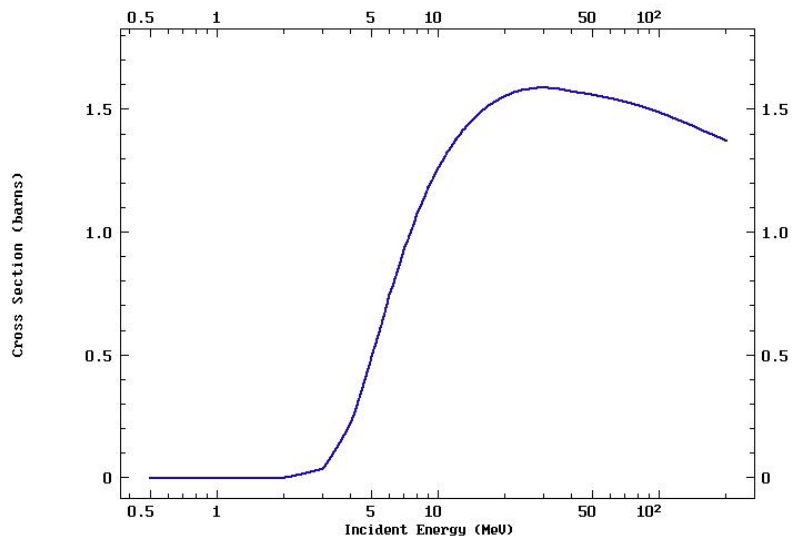


图9.4-2 氦离子与铁 (^{56}Fe) 的非弹性散射截面

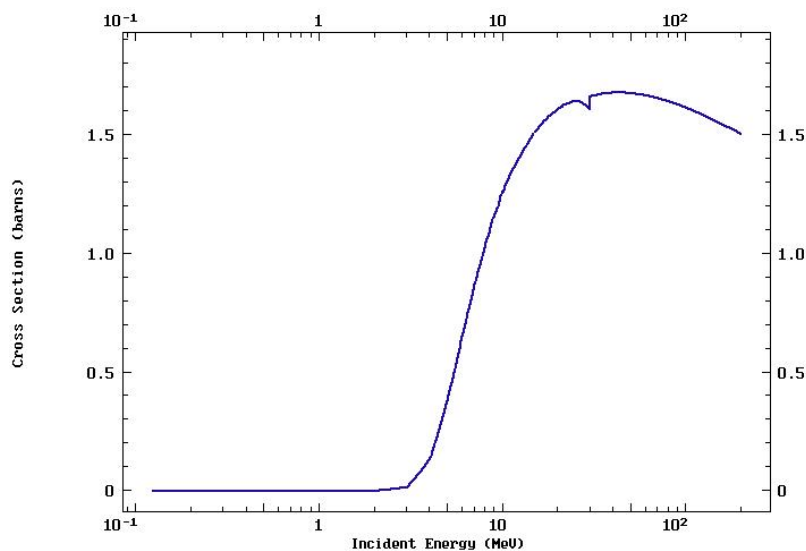


图9.4-3 氦离子与铜 (^{64}Cu) 的非弹性散射截面

从图中可知，300keV的氦离子束流与铝、铁、铜的非弹性散射截面均很小。建设单位通过蒙特卡洛程序模拟，能量300keV、流强400mA 的氦离子束流分别轰击铝靶、铜靶、铁靶，显示未探测到中子产生。因此，300keV氦离子束流偏转与加速器系统加速器真空管道材料、偏转磁铁发生碰撞时，发生核反应的概率极低，束流损失主要产生少量韧致辐射，可忽略不计。

2、束流轰击与中子产生系统

硼中子俘获治疗系统的粒子加速系统引出能量为300keV氦离子束流，被精确导向靶材，通过 $\text{D}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$ 核反应产生中子，其能量不大于2.45MeV。硼中子俘获治疗系统的靶材基底材料为铜-钛。在系统运行期间，除主要的中子产生反应外，氦离子束流及其引发的次级辐射场（特别是产生的中子）会与靶体各组

分材料发生相互作用，导致材料活化。

2.45MeV中子束流入射铜靶、铝靶、钛靶的非弹性散射截面见下图。

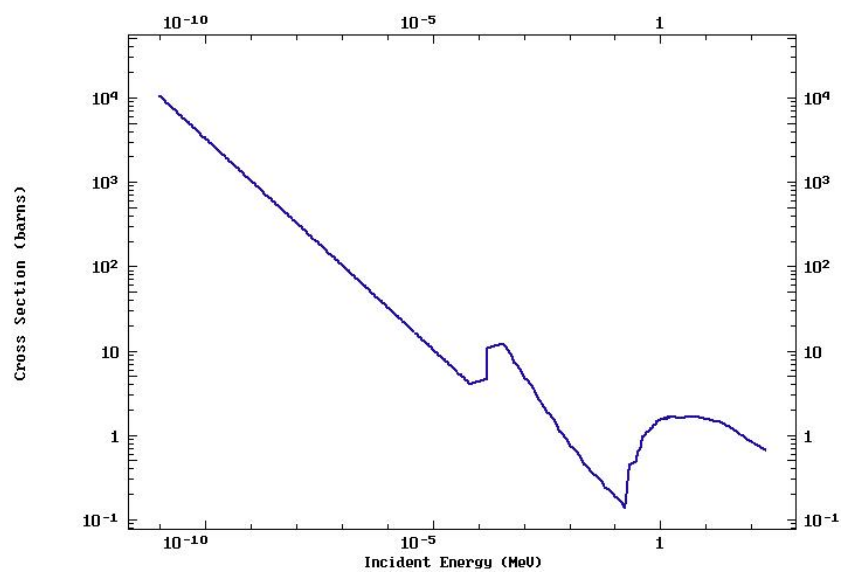


图9.4-4 2.45MeV中子束流与铜（ ^{64}Cu ）的非弹性散射截面

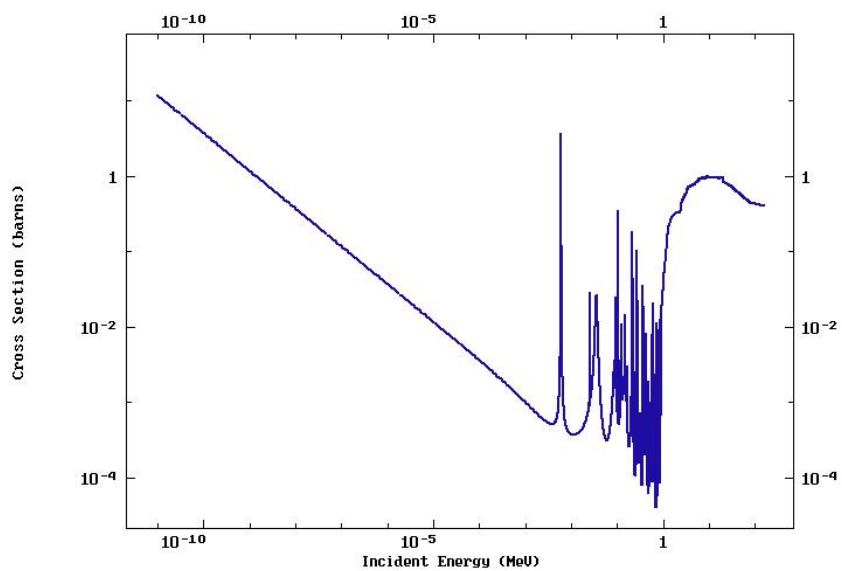


图9.4-5 2.45MeV中子束流与铝（ ^{27}Al ）的非弹性散射截面

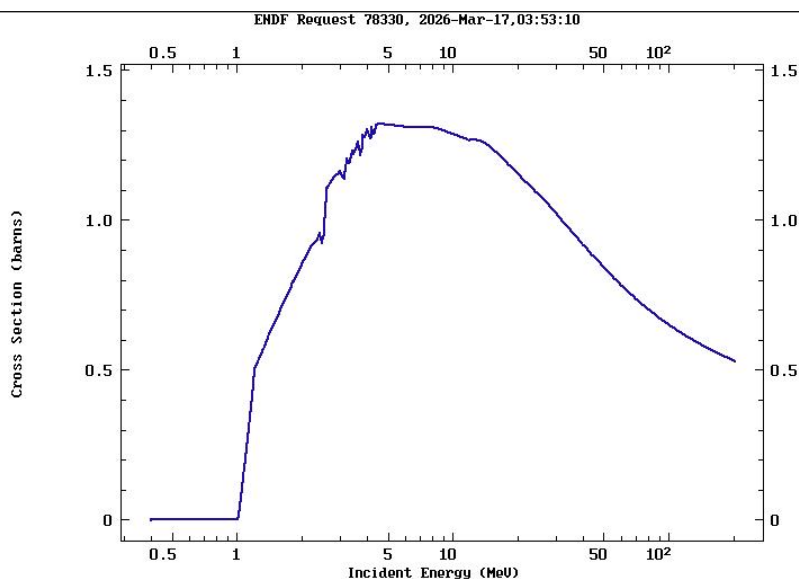


图9.4-6 2.45MeV中子束流与铁 (^{48}Ti) 的非弹性散射截面

采用蒙特卡罗程序FLUKA进行模拟计算能量为2.45MeV、束流强度40mA的氘离子轰击靶材的污染源项进行分析，根据表11中的模拟计算结果可知，BNCT实验室各防护门外、各区域墙外的最大剂量率约 $1.2017\mu\text{Sv/h}$ ，BNCT实验室顶部的最大剂量率约 $2.5086\mu\text{Sv/h}$ 。

3、感生放射性

(1) BNCT装置感生放射性

根据前述分析，在系统运行期间除主要的中子产生反应外，氘离子束流及其引发的次级辐射场（特别是产生的中子）会与靶体各组分材料发生相互作用，导致材料活化。具体而言，这些原子核在俘获中子或其他带电粒子后，其核内质子-中子比例失衡，转变为处于激发态或不稳定的原子核。随后通过诸如 (n,n') ， $(n,2n)$ ， (n,γ) 等一系列核反应，生成具有特定半衰期的放射性核素，此过程即为感生放射性的来源。这些核素将遵循其固有衰变规律，持续发射 β 粒子及伴随的 γ 射线，构成停机后辐射剂量的主要来源之一。

将FLUKA计算得到的数据文件导入可视化软件flair得到BNCT装置运行24h停机不同时间不同区域剂量最大值，根据表11中的模拟计算结果可知，冷却时间5min时，实验室内最大剂量率降至 $9.225 \times 10^{-2}\mu\text{Sv/h}$ ，BNCT装置屏蔽门口降至 $2.252 \times 10^{-2}\mu\text{Sv/h}$ ，装置内最大剂量率降至 $3.535\mu\text{Sv/h}$ 。此时实验室内环境辐射水平已低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，装置内大部分区域剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，仅在中子发生器区域靠近地面位置存在局部热点；冷却时间1 h时，实验室内最大剂量率降至

$8.791 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, BNCT装置屏蔽门口降至 $1.922 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, 装置内最大剂量率降至 $2.474 \mu\text{Sv/h}$, 该值已低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 的剂量率参考控制水平, 此时装置内所有区域剂量率均满足安全限值。

(2) 空气感生放射性

根据前述分析, 在BNCT系统运行期间, 由氘离子轰击靶材产生的中子及其他次级粒子与空气介质及屏蔽结构发生核反应, 导致材料活化。空气中的稳定核素(^2H 、 ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{18}O 、 ^{40}Ar)主要通过热中子俘获反应 $^2\text{H}(\text{n}, \gamma)^3\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)^{14}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}(\text{n}, \gamma)^{16}\text{N}$ 、 $^{18}\text{O}(\text{n}, \gamma)^{19}\text{O}$ 、 $^{40}\text{Ar}(\text{n}, \gamma)^{41}\text{Ar}$ 等核反应产生 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{16}N 、 ^{19}O 、 ^{41}Ar 等放射性同位素。系统停机后, 瞬发辐射场立即终止, 但由材料活化所形成的感生放射性仍然存在。这些放射性核素将按其各自的衰变规律持续释放 β 及 γ 辐射, 构成停机后BNCT实验室内的剩余辐射场。

(3) 小鼠感生放射性

在小鼠接受中子照射过程中, 其体内所含的多种稳定元素(如Na、Cl、K等)会因中子俘获反应而发生活化, 生成相应的放射性核素。BNCT系统停机后, 虽然瞬发辐射场立即消失, 但小鼠体内已生成的感生放射性核素仍会按其各自的衰变规律持续释放 β 和 γ 射线, 构成生物体自身的剩余辐射。

4、放射性三废

(1) 活化废气

硼中子俘获治疗系统运行产生的中子与BNCT实验室内空气中的物质发生 $^2\text{H}(\text{n}, \gamma)^3\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)^{14}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}(\text{n}, \gamma)^{16}\text{N}$ 、 $^{18}\text{O}(\text{n}, \gamma)^{19}\text{O}$ 、 $^{40}\text{Ar}(\text{n}, \gamma)^{41}\text{Ar}$ 等核反应产生 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{16}N 、 ^{19}O 、 ^{41}Ar 等放射性同位素, 经呼吸进入人体可导致内照射影响。 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{16}N 、 ^{19}O 、 ^{41}Ar 的半衰期分别为12.33a、5730a、7.13s、26.91s、109.34min。 ^2H 丰度为0.015%, ^{13}C 丰度为1.1%, ^{15}N 丰度为0.37%, ^{18}O 丰度为0.2%, ^{40}Ar 丰度为99.6%。

基于以上同位素的天然丰度、半衰期及空气中各组分含量进行综合评估, ^{16}N 与 ^{19}O 半衰期极短, 停机后迅速衰变; ^3H 与 ^{14}C 生成率较低; 因此, 硼中子俘获治疗系统运行产生的感生放射性废气主要考虑放射性同位素 ^{41}Ar 。

利用简化公式保守估计放射性同位素 ^{41}Ar 的产生量, 计算公式如下:

$$Q = \lambda \times Y_0 \times R \times N \times \sigma \times t \dots\dots\dots (\text{式9.4-1})$$

式中：

Q ：放射性同位素 ^{41}Ar 的产生速率，Bq/次；

λ ：放射性同位素 ^{41}Ar 的衰变常数， $1.06\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ；

γ_0 ：中子发射率， $3.384\times 10^{11}\text{ n/s}$ ；

σ ：放射性同位素 ^{40}Ar 的活化截面；

R ：房间内空气的有效半径，BNCT实验室A室内空气的有效半径739cm（等效球半径）和BNCT实验室B室内空气的有效半径874cm（等效球半径）；

N ：单位体积空气中的 ^{40}Ar 原子个数， $3.49\times 10^{17}\text{ n/cm}^3$ ；

t ：单次运行时间， $1.08\times 10^4\text{ s}$ （单次整机出束时间不会超过3h）；

中子束流入射氩靶的反应截面见图9.4-7。

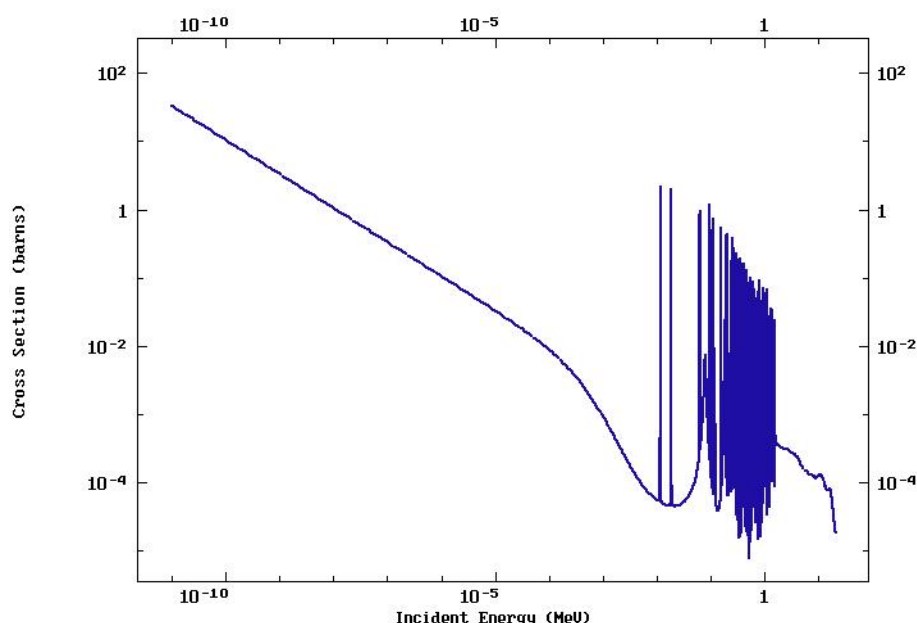


图9.4-7 中子束流与氩（ ^{40}Ar ）的反应截面图

根据上图可知，放射性同位素 ^{40}Ar 的活化截面为0.66barn（ $6.6\times 10^{-25}\text{ cm}^2$ ）。

BNCT实验室内放射性同位素 ^{41}Ar 的产生情况见下表。

表9.4-1 BNCT实验室内 ^{41}Ar 的产生情况一览表

功能房间	λ	γ_0	σ	N	t	R	Q
	S^{-1}	n/s	cm^2	n/cm^3	s	cm	Bq/次
BNCT 实 验室 A	1.06×10^{-4}	3.384×10^{11}	6.6×10^{-25}	3.49×10^{17}	1.08×10^4	739	6.66×10^7
BNCT 实 验室 B						874	7.87×10^7

根据上表可知，BNCT 实验室 A 产生的放射性同位素 ^{41}Ar 活度不大于

$6.66 \times 10^7 \text{Bq}$, BNCT 实验室 B 产生的放射性同位素 ^{41}Ar 活度不大于 $7.87 \times 10^7 \text{Bq}$, 总活度不大于 $1.45 \times 10^8 \text{Bq}$ 。

BNCT 实验室 A 排风量为 2000m^3 , BNCT 实验室 B 排风量为 3000m^3 , 空气密度取 1.29kg/m^3 , 则 BNCT 实验室 A 放射性同位素 ^{41}Ar 活度浓度为 8.60Bq/g , BNCT 实验室 B 放射性同位素 ^{41}Ar 活度浓度为 6.78Bq/g 。

硼中子俘获治疗系统在 BNCT 实验室内运行产生的活化废气最终引至 3 号仓库楼顶, 并高于楼顶 2m 排放。

(2) 活化废水

硼中子俘获治疗系统有 2 套冷却水循环系统, 分别为外循环冷却水系统和内循环水系统, 冷却水均封闭式循环使用, 不外排。外循环冷却水系统独立在 BNCT 实验室, 用于间接冷却水内循环水, 故无放射性。内循环水系统用于加速器、靶材冷却, 硼中子俘获治疗系统由 BNCT 实验室 B 拆解搬运至用户单位 (医疗机构) 时, 必须将硼中子俘获治疗系统内的冷却水排空, 不会搬运至用户单位 (医疗机构)。

硼中子俘获治疗系统的内循环水系统循环使用过程中, 管路以及相关配件不可避免会产生微量的金属物质进入冷却水中, 故内循环水系统配置 2 套过滤系统, 用于处理内循环冷却水中的微量金属离子, 减少活化物质的产生。因此, 硼中子俘获治疗系统运行产生的中子与冷却水中的物质发生 $^2\text{H}(\text{n}, \gamma)^3\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}(\text{n}, \gamma)^{19}\text{O}$ 等核反应产生 ^3H 、 ^{19}O 等放射性同位素, 其中 ^{19}O 为短半衰期核素, 半衰期为 26.91s ; ^3H 为长半衰期核素, 半衰期为 12.33a 。因此, 活化冷却水中的放射性同位素 ^{19}O 仅需放置较短时间就可衰减到可忽略的水平, 故主要考虑活化冷却水中的放射性同位素 ^3H 。

中子束流入射氚靶的非弹性散射截面见图 9.4-8。

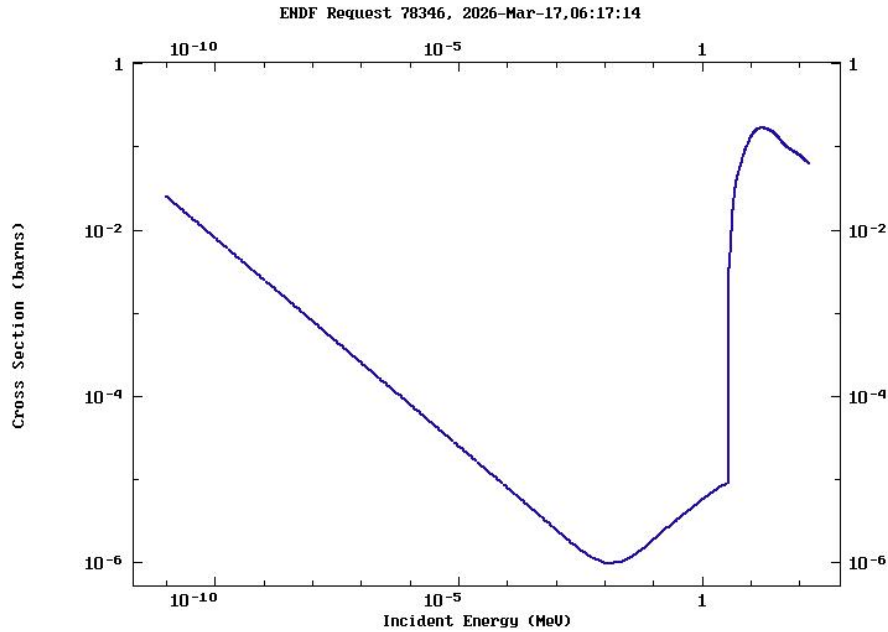


图9.4-8 中子束流与氘 (^2H) 的非弹性散射截面图

根据上图可知，2.45MeV中子束流入射氘靶的活化截面为 8.55×10^{-6} barns ($8.55 \times 10^{-30} \text{cm}^2$)。单台硼中子俘获治疗系统在BNCT实验室B内调试出束时间不超过3h，则内循环水系统的冷却水的受照时间不超过3h。硼中子俘获治疗系统的冷却水中的放射性同位素 ^3H 的活度计算公式见前文式9.4-1，则活化冷却水中放射性同位素 ^3H 的产生情况见下表。

表9.4-2 活化冷却水中 ^3H 的产生情况一览表

λ	γ_0	σ	N	t	R	Q
S^{-1}	n/s	cm^2	n/cm^3	s	cm	Bq/次
8.14×10^{-9}	3.384×10^{11}	8.55×10^{-30}	1.80×10^{20}	1.08×10^4	60	2.75

根据上表可知，硼中子俘获治疗系统的更换的活化冷却水中活化核素 ^3H 的活度不大于2.75Bq。硼中子俘获治疗系统的内循环水量约12L，则活化核素 ^3H 的活度浓度不大于0.229Bq/L。

单台硼中子俘获治疗系统搬迁排空的活化冷却水仅约12L，硼中子俘获治疗系统的活化冷却水全年排放次数不超过10次，则全年排放量约120L，放射性同位素 ^3H 含量约27.5Bq。

(3) 活化固废

①废活化中子发生器

根据前文分析可知，本项目正常情况下不产生废活化中子发生器，仅在特殊情况下，出现靶材起泡导致束流品质下降，会出现未达到使用寿命的非正常更换。

本项目中子发生器运行周期内，最多更换一次（约180kg）。中子发生器靶体为氘化钛靶，氘离子轰击后生成的 ^3He 是一种稳定的核素，不具有放射性；对于氘化钛靶的钛金属基底，在中子辐照下发生 (n,γ) 反应生成的 $^{46}\text{Ti}\sim^{50}\text{Ti}$ 均为稳定性核素，不具备放射性，即使生成其它同位素，半衰期最高的 ^{51}Ti ，其 β -半衰期仅有5.76min，在停机后的几个小时内即可衰变殆尽。另外氘化钛靶的钛金属基底属于轻金属，不属于重金属。建设单位出于偏安全考虑，若运行过程中产生中子发生器更换，废活化中子发生器贮存在铅容器内并转移至放射性废物储存间暂存衰变，直至低于清洁解控水平后作为一般固废交物资公司回收处理。如果放射性固废长时间无法清洁解控，待核技术利用工作场所退役时，送至有资质的单位处置。

②废活性炭

排放系统中安装了过滤用活性炭过滤器，活性炭的使用主要是为了吸附和减少这些放射性物质的浓度，以保护人员和环境，当其吸附饱和或者接近饱和时，就需要进行更换。由于活性炭中吸附了一定量的感生放射性气体，主要是 ^{41}Ar ，产生活度较低。 ^{41}Ar 半衰期只有约109.34min，随着时间推移将快速衰减。活性炭过滤器使用寿命为8~12个月，考虑到 ^{14}C 和 ^{41}Ar 的半衰期，以及活性炭的吸附效率可能随时间降低，本项目保守按每半年更换一次，年产生量约60.0 kg。

9.4.2动物实验放射性污染

1、小鼠感生放射性

经中子照射后的小鼠体内因核反应会产生感生放射性核素（如 ^{24}Na 、 ^{38}Cl 等）。这些核素在衰变过程中释放 β 和 γ 射线，使实验动物本身成为可移动的辐射源，并构成表面污染与内污染的潜在风险。

根据表11分析可知，主要感生放射性核素的母核、活化反应途径、半衰期及累积活度情况见表9.4-3。

表9.4-3 主要感生放射性核素的母核、活化反应途径、半衰期及累积活度情况一览表

核素	母核	中子活化反应	半衰期	射线类型	单位质量的最大饱和放射性活度 (Bq/g)	备注
$^{80\text{m}}\text{Br}$	^{79}Br	$^{79}\text{Br} (n,\gamma) ^{80\text{m}}\text{Br}$	4.42 h	γ (IT)、 β^+	7.58×10^6	同质异能态
^{80}Br	^{79}Br	$^{79}\text{Br} (n,\gamma) ^{80}\text{Br}$	17.7 min	β^- 、 γ	7.58×10^6	基态，极短半衰期
^{82}Br	^{81}Br	$^{81}\text{Br} (n,\gamma) ^{82}\text{Br}$	35.3 h	β^- 、 γ	6.16×10^4	/
^{24}Na	^{23}Na	$^{23}\text{Na} (n,\gamma) ^{24}\text{Na}$	15.0 h	β^- 、 γ	2.80×10^6	/

^{38}Cl	^{37}Cl	$^{37}\text{Cl} (n,\gamma) ^{38}\text{Cl}$	37.24 min	β^- 、 γ	4.46×10^5	/
^{56}Mn	^{55}Mn	$^{55}\text{Mn} (n,\gamma) ^{56}\text{Mn}$	2.58 h	β^- 、 γ	1.70×10^5	/
^{42}K	^{41}K	$^{41}\text{K} (n,\gamma) ^{42}\text{K}$	12.4 h	β^- 、 γ	8.10×10^5	/

2、放射性废水

放射性废水主要为含有放射性核素的小动物排泄物（小动物排泄物分类收集，按照放射性固废处理）、操作过程中去污废水和场所清洗废水。辐射工作人员每日去污共产生废水 $0.05\text{m}^3/\text{d}$ ，动物实验场所每日清洗废水产生量为 $0.05\text{m}^3/\text{d}$ 。则动物实验场所废水产生量为 $0.1\text{m}^3/\text{d}$ ， $25\text{m}^3/\text{a}$ 。

3、放射性固废

（1）手套、口罩、一次性垫纸、注射器、吸水纸、棉签、棉球以及含有放射性核素的小白鼠排泄物等

开展动物实验时，工作人员操作过程会产生手套、口罩、一次性垫纸、注射器、吸水纸、棉签、棉球以及含有放射性核素的小白鼠排泄物等放射性固废，预计日产生量约为 0.4 kg/d ，则年产生量为 100kg 。

（2）小白鼠尸体

本项目预计每年处置经中子照射的小鼠约156只，按平均每只30g计算，则动物尸体年产生量约为 4.68 kg/a 。

9.4.3非放射性污染因素分析

1、废气

硼中子俘获治疗系统调试、实验过程产生的非放射性废气的主要污染物为臭氧、氮氧化物等。

2、废水

本项目不提供食宿，运营期产生的非放射性废水主要为生活污水，本项目拟配置辐射工作人员6人，每年工作260天。生活用水按每人每天50L计，生活污水排放系数按0.80计，则生活污水产生量为 $0.24\text{m}^3/\text{d}$ ， $62.4\text{m}^3/\text{a}$ 。生活污水依托出租房现有化粪池预处理后排入市政污水管网。

3、固体废物

本项目运营期产生的固体废弃物包括生活垃圾、包装废物。

（1）生活垃圾

本项目拟配置辐射工作人员6人，每年工作260天。生活垃圾每天产生量约

0.5kg/人，生活垃圾产生量为3kg/d、0.78t/a。

(2) 包装废物

本项目运营期将产生少量的包装废物，构件、零部件的包装废物产生量约0.05t/a。

9.4.4 事故工况源项

9.4.4.1 硼中子俘获治疗系统

(1) 违规启动误照：在实验室内人员未完全清场的情况下，操作人员违反安全操作规程，通过非法手段（如泄露的登录密码、未注销的登录状态等）绕过安全联锁系统，强行启动 BNCT 装置出束。

(2) 联锁失效误入：当人员通道的安全联锁装置或声光报警系统发生故障时，BNCT 装置在运行期间，无关人员可能误开防护门进入实验室。进入人员将立即受到室内贯穿能力极强的中子及 γ 射线的全方位照射。

(3) 门-机联锁失效：若门-机联锁系统完全失效，即便防护门未完全关闭或被意外开启，BNCT 装置仍能启动或维持出束状态。这将导致中子与 γ 射线通过门缝直接泄漏，对门外通道及相邻区域的活动人员造成定向照射，可能导致非预期区域的剂量率显著升高。

(4) 活化辐射误入：在调试或研究运行结束后，室内因中子活化存在较强的剩余 γ 辐射场。若人员在剂量率未降至预定安全水平前即进入，将接受来自活化结构、设备及空气的持续性 γ 外照射。

(5) 操作权限滥用：因操作人员未及时注销控制室操作界面的登录状态，或被非授权人员获取登录密码，可能导致未经培训或无资质人员违规启动装置，产生误照风险。

在上述事故情景下，辐射污染因子与正常工况相比，基本种类（中子、 β 和 γ 射线）不变，但其空间分布、时间特性及剂量率水平发生异常，人员直接暴露于异常强大的瞬发辐射场或未能及时衰减的剩余辐射场中，在短时间内可能接受超限值的全身有效剂量或局部器官剂量。

9.4.4.2 动物实验

(1) 工作人员体表污染：工作人员在未正确佩戴或未佩戴足够个人防护装备的情况下，长时间近距离操作具有感生放射性的实验动物，可能导致其皮肤、

衣物等受到放射性核素的表面玷污，进而增加内照射的潜在风险。

（2）活体动物逃逸扩散污染：经中子照射后具有感生放射性的活体动物从转运过程、饲养笼或操作区内逃逸，在实验室内或公共区域活动，通过其排泄物、体表接触等途径，将放射性污染扩散至原本洁净的非控制区域。

（3）放射性固体废物泄漏：盛装放射性动物尸体或被污染耗材的包装物（如塑料袋、密封容器）发生破损或意外倾倒，导致其内部放射性物质泄漏，直接污染地面、台面、设备及其他物品表面。

在事故工况下，所涉及的污染因子与正常工况相同，主要为感生放射性核素衰变产生的 β 和 γ 射线。事故工况下的污染途径与暴露风险将发生显著变化：放射性物质可能从受控区域向非控区域迁移，污染范围扩大；人员可能因屏蔽失效或操作失当而受到非常规途径的外照射，或通过吸入、误食及皮肤吸附等途径导致内照射风险急剧增加，对辐射工作人员及周边公众构成严重的潜在辐射威胁。

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全设施

10.1.1 工作场所布局合理性分析

1、BNCT 实验区

BNCT 实验区涉及辐射的功能用房为 BNCT 实验室 A 和实验室 B、放射性废物储存间，均布置在 BNCT 实验区内。BNCT 实验室周围根据 BNCT 的调试、实验研究等需求布置精密空调室、仪器室、控制室、配电室等辅助用房，功能设置齐全。BNCT 实验区独立成区，避开了办公室等人员长期居留的功能房间，减少对周围活动人员的影响；BNCT 的控制室独立布置在 BNCT 实验室外，隔室操作能减少对辐射工作人员的照射。此外，BNCT 实验室 A 和实验室 B、放射性废物储存间等所在区域出入口拟设置门禁，严禁无关人员进入。

综上所述，从辐射防护的角度，本项目平面布局满足要求。

2、动物实验区

动物实验区涉及辐射的功能用房为 SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2、解剖室，均布置在动物实验区内。

本项目 SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2 位于动物实验场所东北侧，避开了公司内部人群较多的办公场所。根据预测分析可知，SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2 工作过程中对周围环境辐射影响是可接受的。因此，从有利于安全生产和辐射防护的角度而言，该项目的平面布置是合理可行的。

10.1.2 辐射防护分区管理

（1）分区依据和原则

为了便于加强管理，切实做好辐射安全防护工作，按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，在辐射工作场所内划出控制区和监督区，在项目运营期间采取分区管理措施。

控制区：在正常工作情况下控制正常照射或防止污染扩散，以及在一定程度上预防或限制潜在照射，要求或可能要求专门防护手段和安全措施的限定区域。在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平指示。运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可证）和实体屏

蔽（包括门锁和联锁装置）限制进出控制区，放射性操作区应与非放射性工作区隔开。

监督区：未被确定为控制区，正常情况下不需要采取专门的防护手段或安全措施，但要不断检查其职业照射状况的区域。在监督区入口处的合适位置张贴电离辐射警告标志；并定期检查工作状况，确认是否需要防护措施和安全条件，或是否需要更改监督区的边界。

（2）本项目分区管理情况

根据分区原则，本项目辐射工作场所分区情况见表 10.1-1、图 10.1-1，红色区域为控制区、黄色区域为监督区。

表10.1-1 分区管理情况表

场所	控制区	监督区
BNCT 实验室	BNCT 实验室 A、 BNCT 实验室 B	配电室紧邻实验室的区域、精密空调室 A、仪器室 A、控制室 A、前室、控制室 B、仪器室 B、精密空调室 B、实验室东北侧 1m 的区域、实验室东南侧 1m 的区域、实验室西南侧 1m 的区域
	放射性废物储存间	固体废物暂存间、放射性废物储存间东南侧 1m 的区域、放射性废物储存间西南侧 1m 的区域、放射性废物储存间西北侧 1m 的区域
动物实验场所	SPF 养殖室 1	前室、清洁设备/仓储准备室、污物走廊
	SPF 养殖室 2	前室、缓冲室、控制室、仓库
	解剖室	活化分析室、细胞实验室、分析室 2、解剖室东侧 1m 的区域、解剖室



(3) 本项目“两区”管控要求

①控制区防护手段与安全措施

a.在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的、符合图 10.1-2 规定的电离辐射警告标志；

b.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；

c.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；

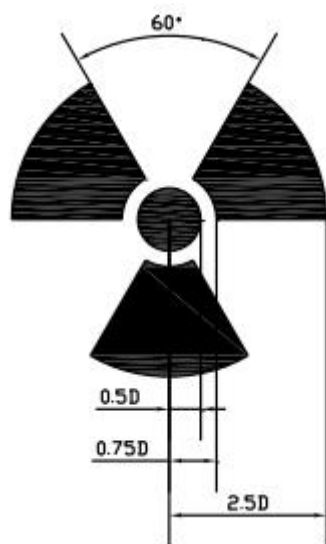
d.定期审查控制区的实际状况，以确定是否有必要改变该区的防护手段或安全措施或该区的边界。

②监督防护手段与安全措施

a.采用适当的手段划出监督区的边界；

b.在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌；

c.定期审查该区的条件，以确定是否需要采取防护措施和做出安全规定，或是否需要更改监督区的边界。



电离辐射标志



电离辐射警告标志

图10.1-2 电离辐射警告标志图

10.1.3 辐射防护屏蔽设计方案

本项目场所内的 BNCT 实验室的屏蔽设计方案见表 10.1-2, 各种屏蔽材料成分如表 10.1-2 所示, 屏蔽设计平面图见图 10.1-3 至图 10.1-4。BCNT 装置自带屏蔽, 屏蔽情况见图 10.1-5。

表10.1-2 屏蔽设计方案

场所	位置	屏蔽设计参数
BNCT 实验 A	四周墙体	300mm 混凝土
	顶棚	300mm 混凝土
	地面	无地下室，不增加防护
	仪器室 A 防护门	6mmPb+150mm 含硼聚乙烯
	控制室 A 防护门	6mmPb+150mm 含硼聚乙烯
	防护门	6mmPb+150mm 含硼聚乙烯
BNCT 实验 B	四周墙体	300mm 混凝土
	顶棚	300mm 混凝土
	地面	无地下室，不增加防护
	仪器室 B 防护门	6mmPb+150mm 含硼聚乙烯
	控制室 B 防护门	6mmPb+150mm 含硼聚乙烯
	防护门	6mmPb+150mm 含硼聚乙烯
放射性废物 储存间	四周墙体	300mm 混凝土
	顶棚	300mm 混凝土
	地面	无地下室，不增加防护
	防护门	6mmPb

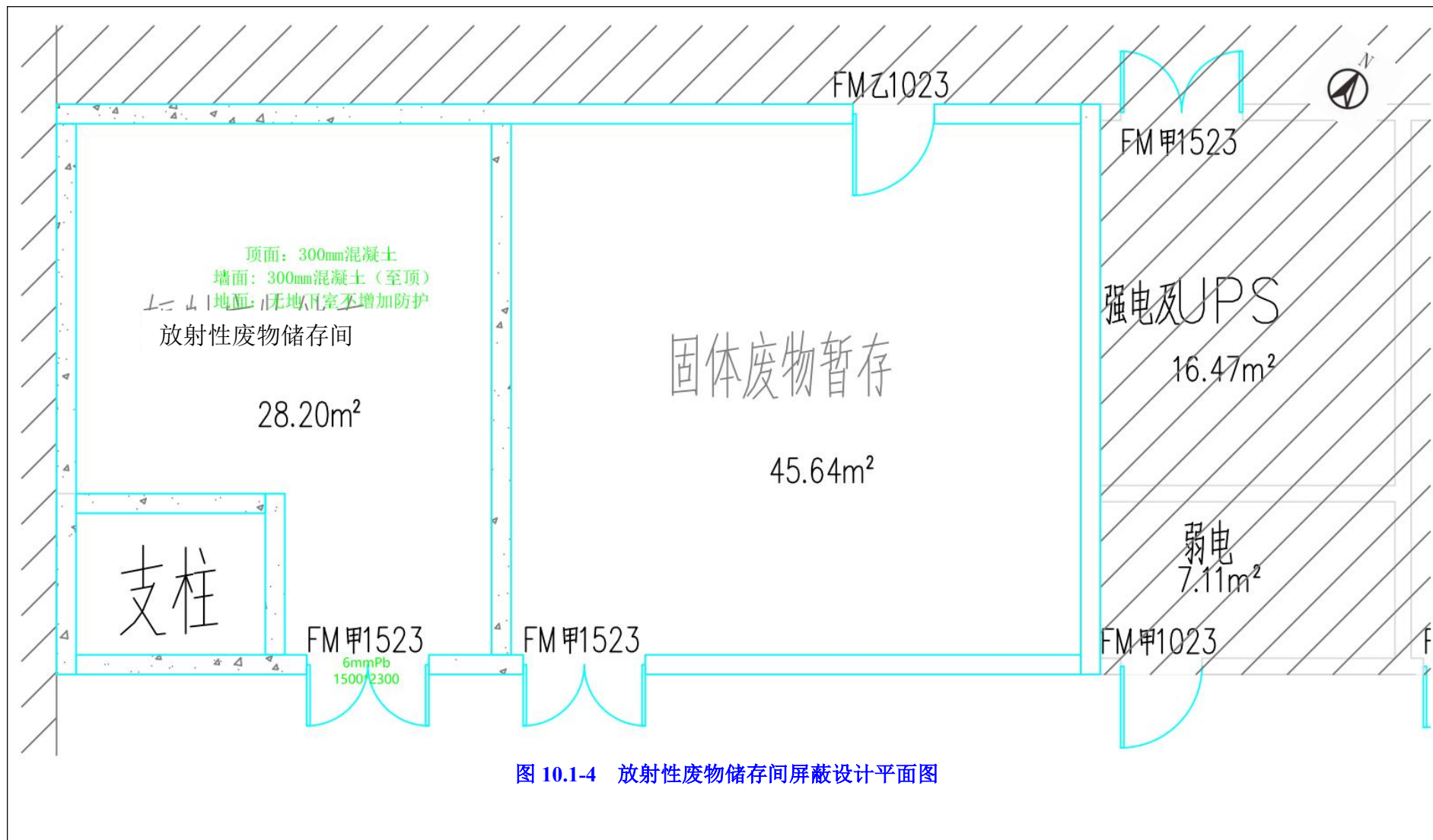
表10.1-3 屏蔽材料成分

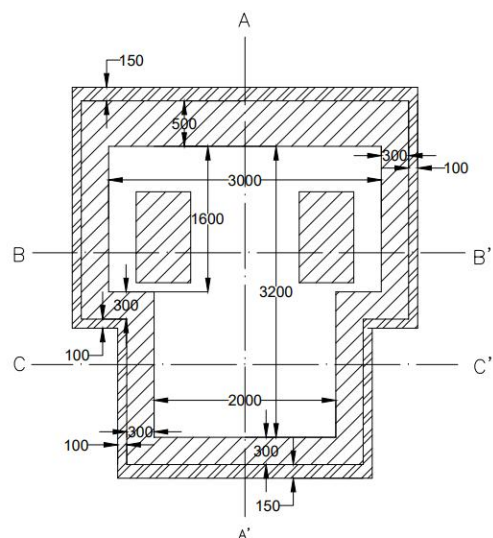
材料	密度 (g/cm ³)	元素构成 (重量百分比)
混凝土	2.35	H (0.6) , O (49.8) , Si (31.5) , Ca (8.30) , Mg (0.30) , Al (4.60) , S (0.10) , K (1.90) , Na (1.70) , Fe (1.20)
硼聚乙烯	1.15	H (11.73) , C (64.79) , B (23.48)
钢结构	7.84	Fe (98.99) , Mn (0.75) , C (0.18) , P (0.04) , S (0.04)
SA		H (0.8) 、 C (3.2) 、 O (2.1) 、 Si (3.7) 、 Pb (90.2)

BNCT 实验室的穿墙管线情况见表 10.1-4 和图 10.1-6 至图 10.1-8。

表 10.1-4 穿墙管线情况一览表

场所	类型	穿墙方式
BNCT 实 验 A、 BNCT 实 验 B	风管	系统气流组织采用上送下排的设计，进风口应设在实验室上部，排风口应设在实验室下部，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换。新风、排风管道经过上方吊顶穿墙，穿墙部分采用 6mm 铅防护罩屏蔽防护，防止射线泄漏。
	电管	电管通过电缆沟穿墙，电缆沟尺寸为 500mm*300mm，电缆沟上方加盖 3mm 不锈钢活动盖板进行屏蔽。
	气管	氮气、氩气气源采用集中供气方式，钢瓶安放在气瓶间内，从气瓶室通过不锈钢管将气体输送至各用气终端。气管经过上方吊顶穿墙或穿墙进入电缆沟，穿墙部分采用 6mm 铅防护罩屏蔽防护，防止射线泄漏。





中子照射装置平面图

注：
1、未标注的尺寸可直接在图上测量。



材料：伽马屏蔽层SA



材料：10%含硼聚乙烯

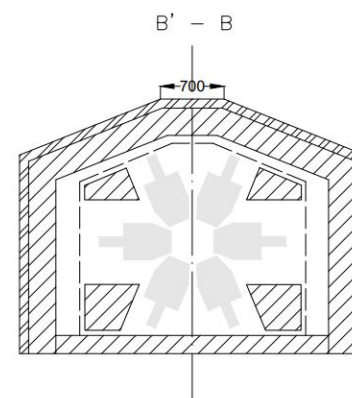
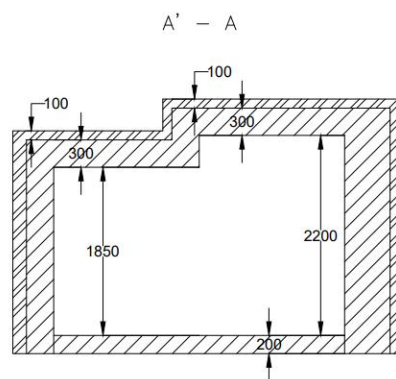
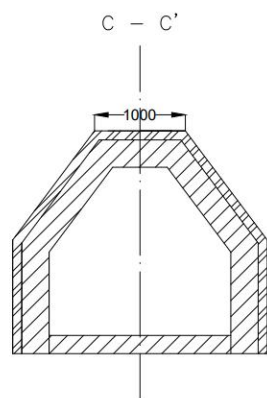


图 10.1-5 BCNT 装置自带屏蔽情况示意图

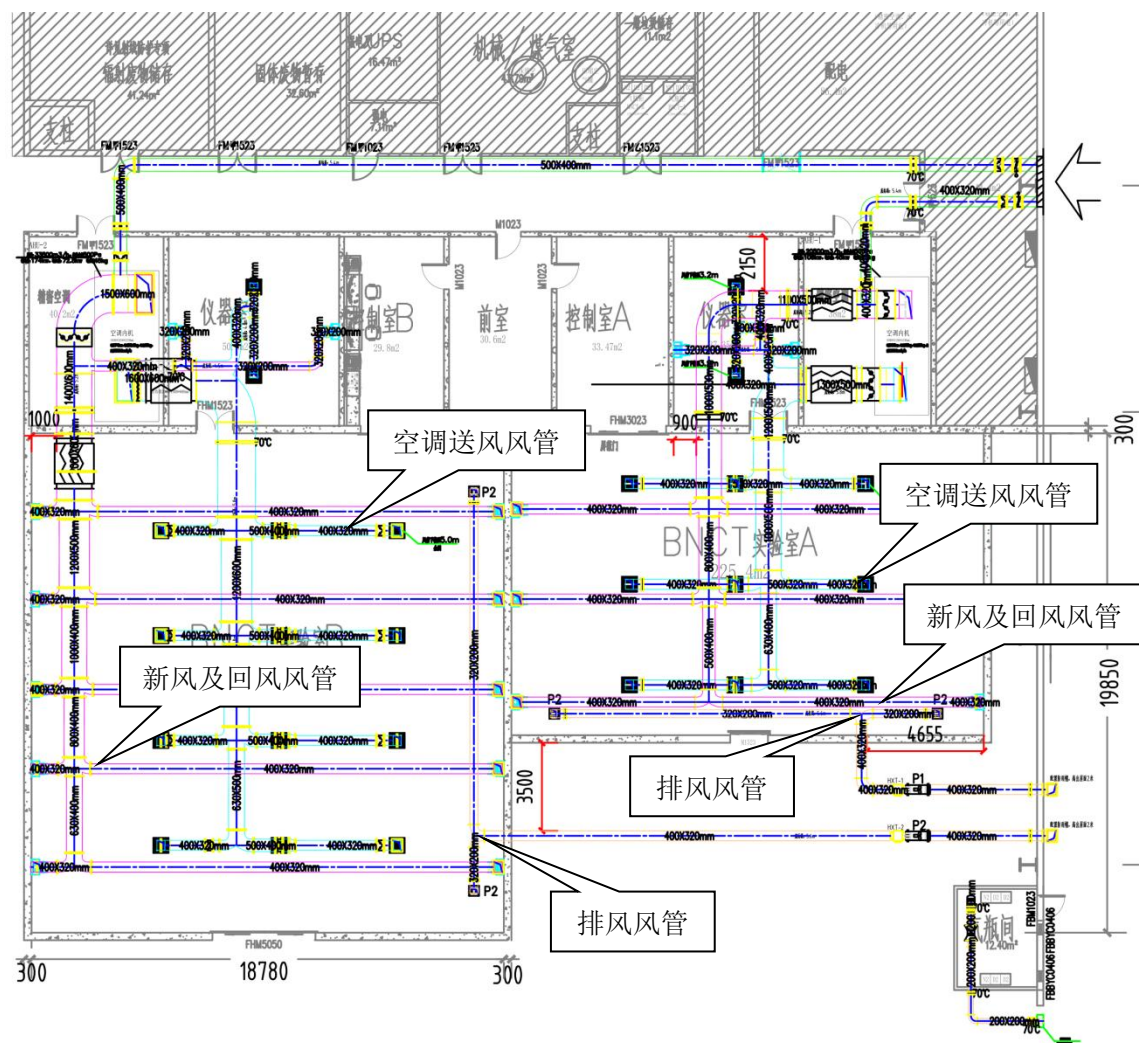
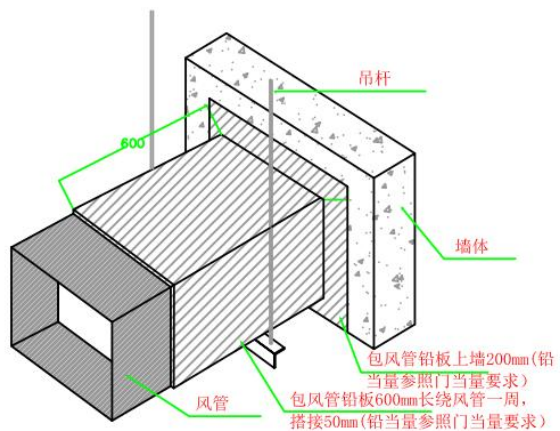
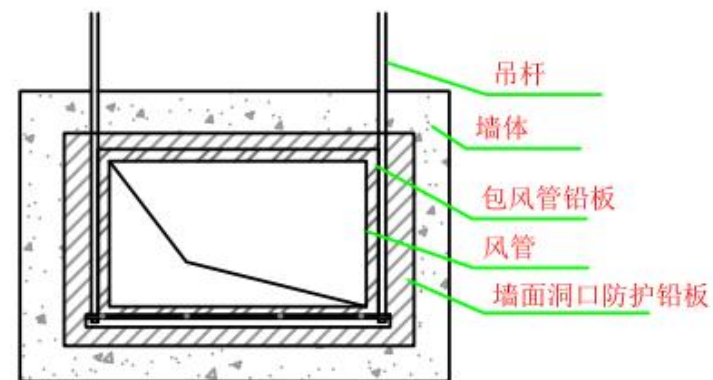


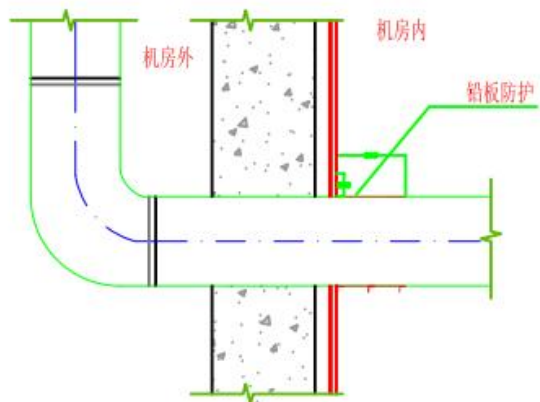
图 10.1-7 风管平面布置图



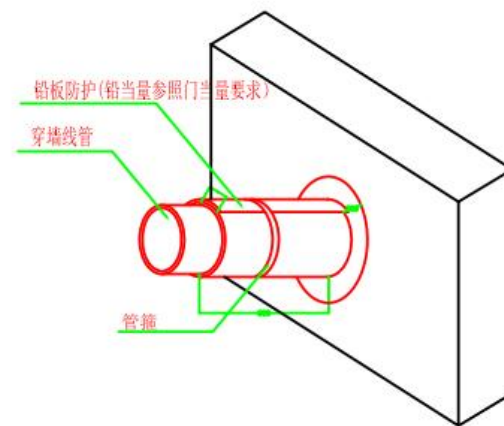
穿墙风管铅板防护节点侧视图



穿墙风管铅板防护节点正视图



穿墙管道铅板防护节点剖面图



穿墙管道铅板防护节点侧视图

图 10.1-8 管道屏蔽防护图

10.1.3 辐射安全与防护措施

10.1.3.1 硼中子俘获治疗系统辐射安全与防护措施

1、辐射安全联锁系统

为确保硼中子俘获治疗装置（BNCT）在运行及维护过程中工作人员的人身安全，本项目配置一套独立的辐射安全联锁系统（Personnel Protection System，简称PPS）。该系统采用可编程逻辑控制器（PLC）作为核心处理单元，通过硬接线方式与加速器控制系统联锁，在加速器控制逻辑中具有最高优先级，用以实现辐射工作场所的出入管制、清场及紧急停机功能，防止发生误照射事故。

（1）设计原则

辐射安全联锁系统由于其独特的应用场合，除了要遵循弱电控制系统的设计规范外，还要符合辐射防护相关规定和标准。综合考虑以上因素，在借鉴国内外安全联锁系统优秀设计和运行经验的基础上，硼中子俘获治疗装置辐射安全联锁系统主要设计原则归纳如下：

①简单可靠：系统设计要力求在简洁的基础上保证运行可靠性及稳定性。

②最优切断：联锁系统在控制逻辑中享有最高优先级，一旦触发联锁条件，能够立即切断加速器束流，保障人身安全。

③失效保护：系统中关键设备（如门磁、急停按钮）发生故障或失效时，系统状态将自动导向安全侧，即无法出束或立即中断出束。

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

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

⑥自我巡检：系统具备在线自诊断功能，能够实时监测各联锁设备的工作状态，异常时在控制室人机界面（HMI）上发出声光报警。

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

（2）辐射安全联锁

辐射安全联锁系统是通过设置在控制站的联锁控制器PLC来处理和交换信

号,通过分布在实验室内的现场设备来采集信号和执行动作。主要现场设备包括:联锁门禁、联锁钥匙(操作顺序联锁)、紧急停机装置、清场按钮、紧急开门装置、断电开门装置、警示装置、联锁剂量检测器、监控对讲装置及电离辐射警告标志等。

①联锁门禁

BNCT装置自带的屏蔽门(一体化设备入口)、BNCT实验室A及实验室B的防护门(3扇)均设置门机联锁装置,所有联锁门均设置门磁开关(冗余配置)、电动门锁及安全防夹装置。任一联锁门被打开时,加速器无法启动出束;只有当所有联锁门均关闭到位后,加速器才具备启动条件。在加速器出束状态下,若任一联锁门被打开,系统将立即切断束流,停止照射。

放射性废物储存间(1扇)设置门禁及读卡器,仅限授权人员进入,不参与主联锁回路,不设置急停按钮。

②联锁钥匙

根据建设单位提供的设计资料,BNCT装置的安全联锁系统不设置独立的物理联锁钥匙,而是通过以下等效安全联锁措施替代物理钥匙的认证功能。系统操作端位于实验室外的控制室,需通过密码登录方可进入操作界面,密码仅授权辐射工作人员知悉。工作人员必须严格按照以下步骤执行,系统方可允许出束:

放置小鼠前:完成实验机侧控制装置、冷却装置、氟油、真空装置、调试模式(逐步升压)单元的检查与启动;

放置小鼠后:完成实验机侧控制装置、冷却装置、氟油、真空装置、调试模式(逐步升压)、校准模式(微调各参数)单元的全流程检查与启动。

开启氦气供应:在上述单元全部检查完毕后,工作人员需打开氦气(D_2)供应阀门,确认氦气流量、压力等参数正常。氦气是 $D(d,n)^3He$ 中子产生反应的关键原料,只有通入氦气后,加速器高压系统才能产生中子束流。

上述步骤全部完成后,操作界面上的“开始照射”按钮方可激活。按下“开始照射”按钮,系统开始中子照射。该操作顺序联锁机制与传统的物理钥匙联锁具有等效的安全功能,确保在未完成前置检查及清场确认前无法启动照射。

③紧急停机按钮

辐射工作场所设置紧急停机装置,在紧急情况下,工作人员按下紧急停机按

钮可立刻切断加速器束流。紧急停机按钮具有明确的外观、操作指示及位置标识，确保在紧急状态下能够被迅速识别和操作。

根据本项目的特点，紧急停机按钮配置如下：

控制室操作台：设置1个紧急停机按钮，供工作人员在监控过程中紧急处置；

BNCT实验室内：在实验室A和实验室B内部四周墙壁显眼位置各设置1个紧急停机按钮，供现场人员在紧急情况下就近操作。

当任一紧急停机按钮被触发时，系统通过硬接线立即停止加速器出束。按钮复位需由授权人员在触发地点进行本地复位，复位后需在控制室操作界面确认，方可重新启动设备。

④清场巡检按钮

BNCT装置本体设置1个“清场完成”按钮。在加速器开机之前，操作人员必须进入实验室进行清场巡检，确认实验室内无人员滞留后，按下清场完成按钮。此时，控制室操作台上的“清场完成”指示灯亮起，系统转入“允许出束”状态。

清场工作流程：操作员进入实验室，按规定的巡检路线（控制室→BNCT实验室A/B→BNCT装置处）对实验室全部区域进行目视巡检；确认实验室内无人滞留后，按下清场完成按钮，系统自动记录清场巡检完成状态；“清场巡检完成”信号传输至控制室操作界面，“管理区域撤离完成”指示灯亮起；控制室操作员通过监控系统复核确认清场状态，系统方允许启动出束。在出束期间，如任何人通过联锁门再次进入实验室，门磁信号自动解除“清场完成”状态，加速器立即切断出束，须重新巡检方可再次出束。

⑤紧急开门装置

BNCT实验室内设置紧急开门装置（玻璃破碎按钮或推杆式开门装置），与安全联锁系统实现硬线联锁。当紧急开门装置被触发时，系统立即切断加速器束流；同时门磁信号检测到联锁门打开时，加速器将保持停止出束状态，确保人员能够安全撤离。

⑥断电开门装置

屏蔽门均设计有断电开门的机械机构（如把手或铰链），确保在断电情况下，门体可从内外两侧手动打开，防止人员被困。

⑦警示装置

BNCT实验室防护门（BNCT实验室A和BNCT实验室B各3扇）上方安装警示语句提示灯牌，具备以下功能：

绿色“预备”指示灯：亮起时表示设备已通电，处于待机状态；

红色“照射”指示灯：亮起并闪烁时表示加速器正在出束；

中文语音警示：与字幕显示文字一致，清晰易懂；

警铃示警：加速器出束时，除语音提示外，同时发出警铃报警，提示实验室内人员撤离。

⑧固定式辐射剂量监测仪

为保证屏蔽体外人员的安全，本项目在控制室安装固定式场所剂量监测仪（场所 γ 探测器、场所中子剂量监测仪），接入安全联锁系统。监测仪具备实时剂量率显示及超阈值声光报警功能，通过硬连线方式接入联锁PLC系统。当监测值超过设定阈值（如 $2.5\ \mu\text{Sv/h}$ ）时，系统自动触发联锁，装置发出声光报警，并自动切断加速器束流。

此外，为了解BNCT实验室室内的辐射水平，在室内安装固定式场所剂量监测仪。

⑨监控和对讲装置

BNCT实验室内安装高清摄像头，可实时观察室内情况，确保操作人员能够在控制室监控实验室状态。监控摄像头自带语音对讲功能，可用于语音广播，提醒现场人员注意和撤离辐射工作场所。

⑩电离辐射警告标志

在实验室实体四周外边缘醒目位置，按照国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）的要求，张贴电离辐射警告标志，并用中文注明“当心电离辐射”。在BNCT实验室、放射性废物储存间防护门醒目位置处设置电离辐射警告标志，告诫无关人员不得靠近。

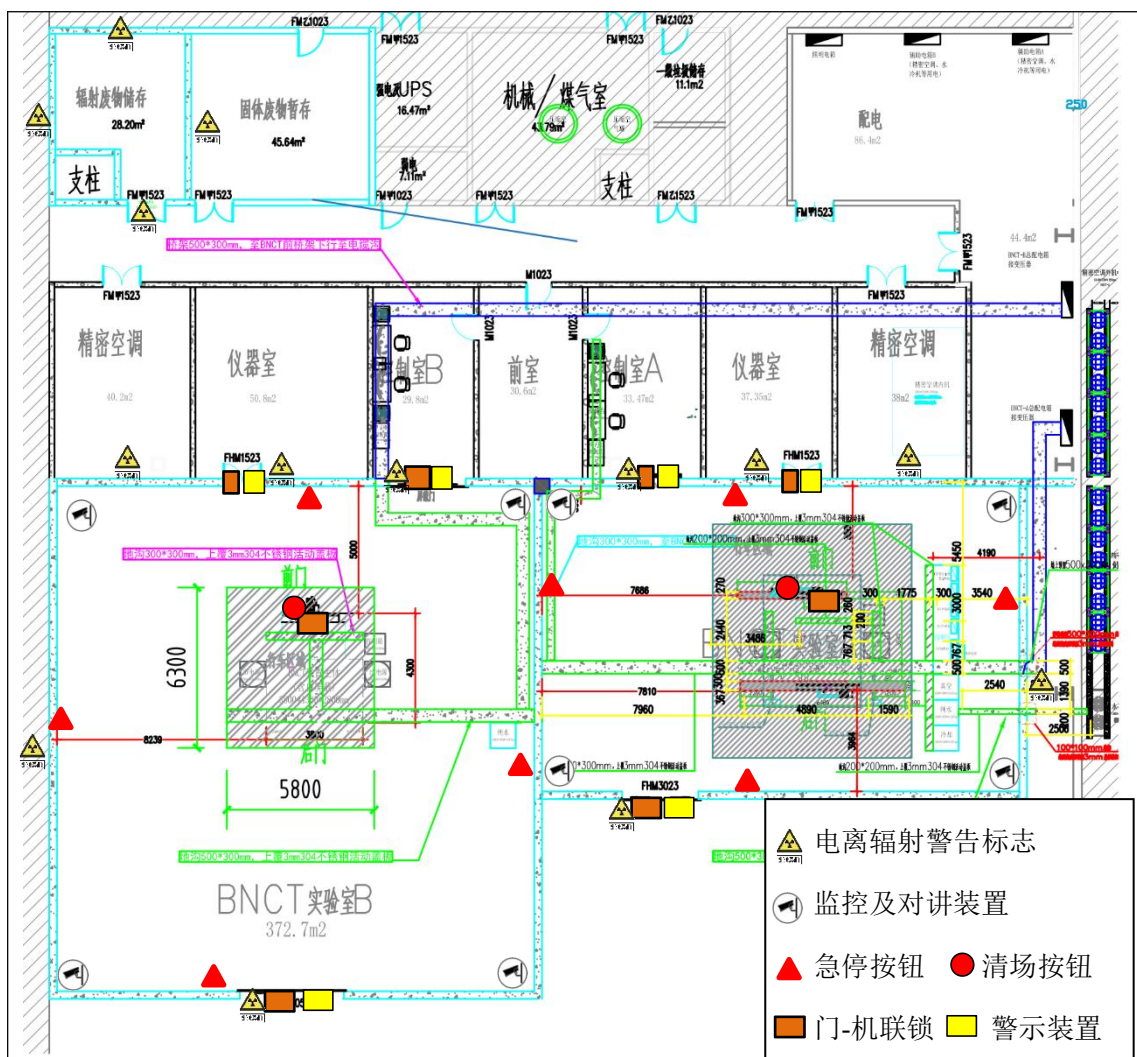


图10.1-10 BNCT实验室、放射性废物储存间的辐射安全和防护设施图

2、场所辐射监测系统

(1) 工作场所实时辐射剂量监测系统组成

工作场所实时辐射剂量监测系统可以准确监测放射性装置工作场所的剂量水平，切实保护放射性装置工作人员的安全，防止辐射事故的发生。系统由中控系统、数据采集网络、场所 γ 探测器、场所中子剂量监测仪等组成部分。

中控系统采用分布式软件架构，包括采集站、数据库、计算站和客户端，各单元独立运行，共同实现软件功能。采集站通过数据网络采集监测器上传的实时数据，并存入数据库。计算站可以实现数据分析、绘图、制作报表等功能。客户端是人机交互界面，功能包括实时剂量显示、异常报警、监测器管理、调用计算站功能、查看原始数据等，用户可以通过在本地计算机上安装客户端实现对系统的远程操作。

(2) 场所监测类型

① γ 辐射实时在线监测：本项目属II类射线装置核技术利用场所，有 γ 光子辐射，建设单位将配置实时在线 γ 辐射监测系统。

②中子实时在线监测：中子作为本项目辐射源项之一，建设单位将配置实时在线中子监测系统。

③表面污染检测：表面污染检测用于实验室内固态流出物以及人员离场检测。

（3）场所监测布设位置

工作场所实时辐射剂量监测系统关注的是工作人员的受照射情况，需要根据工作人员的活动特点和辐射场情况决定监测点的分布。有三类位置是重点监测对象：

一是高辐射水平场所，例如BNCT实验室内，这类位置的监测点可以观察加速器的开启运行状况，以及工作人员在进入高辐射水平场所之前先了解场所内的辐射场强度，避免误进入造成的过量照射；

二是临近高辐射水平场所人员活动的位置，例如控制室，有人长时间在其中工作，需要实时监测辐射剂量率，确保工作环境安全。

三是在实验室外设置监测点，如放射性废物储存间，能够实时观察实验室外的辐射剂量率，确保工作人员和公众不会受到超剂量照射。

3、辐射监测仪器

本项目拟配备的主要监测设备包括：场所 γ 探测器、场所中子剂量监测仪、X- γ 辐射监测仪、表面污染检测仪、便携式X- γ 剂量率仪、个人剂量计和个人剂量报警仪。具体见下表。

表10.1-5 各防护用品及监测仪器拟配备情况一览表

用品/仪器名称	配备数量
场所 γ 探测器	4台
场所中子剂量监测仪	4台
X- γ 辐射监测仪	1台
表面污染检测仪	1台
便携式X- γ 剂量率仪	1台
个人剂量报警仪	5台
个人剂量计	5台
废物衰变桶	4个

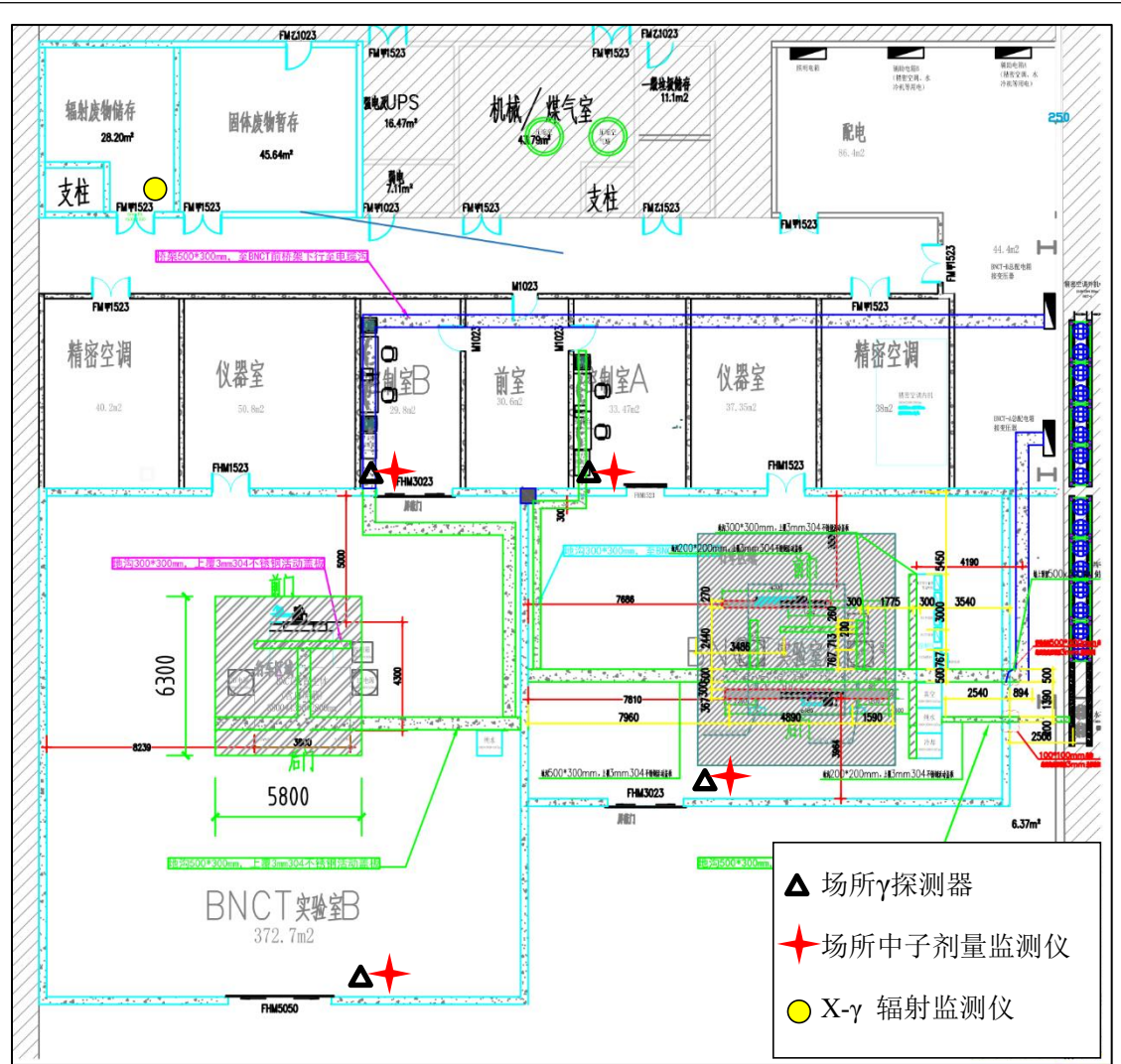


图10.1-11 BNCT实验室、放射性废物储存间的监测仪器分布图

4、通风系统

BNCT实验室排风口和新风口均设置于实验室吊顶，排风口和送风口采用“上进下出”的设计，通风管线穿墙部分采用6mm铅防护罩屏蔽防护，防止射线泄漏。

5、管道穿墙

为了达到较好的辐射剂量衰减效果，采用多阶“L”型管道穿墙，穿墙部位采用6mm铅板进行防护，防止射线泄漏。

10.1.3.2 BNCT 系统使用后进入机房的检测与等候时间要求

BNCT 装置完成中子照射后，为降低装置及其附属部件的中子活化产物（包括中子活化产生空气中感生放射性核素）以及机房内残余γ辐射剂量率，在照射束流完全停止后，规定等候期按以下要求执行：

(1) 使用便携式 X- γ 剂量率仪, 在 BNCT 实验室防护门外 30 cm 处和门缝周边进行 γ 剂量率监测, 确认结果低于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 后方可开启防护门。

(2) 开启防护门后, 立即对 BNCT 实验室内部剂量率进行监测, 确认内部剂量率低于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 后方可全面进入。

(3) 辐射工作人员在确认 BNCT 实验室内部剂量率低于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 后, 佩戴个人剂量计, 携带个人报警仪进入, 将报警阈值设定为 2.5 $\mu\text{Sv/h}$, 进入前检查报警仪工作状态正常, 进入期间若报警仪发出警报, 应立即撤离。

(4) BNCT 实验室 B 的人工拆解工作必须在硼中子俘获治疗系统停止出束 1d 后, 且 BNCT 实验室 B 内部剂量率低于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 后方可启动。辐射工作人员在拆解过程中持续对各部件进行表面巡测, 若表面剂量高于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$, 则停止拆解, 离开 BNCT 实验室 B。

(5) BNCT 实验室 A 的辐射工作人员在硼中子俘获治疗系统停止出束 5min 后可进入装置内部取出小鼠。操作时佩戴个人剂量报警仪, 快速完成小鼠取出及转运; 若个人剂量报警仪在装置内部触发警报, 应暂停接触并报告辐射防护负责人。

(6) BNCT 实验室 A 中子发生器更换必须在硼中子俘获治疗系统停止出束 1d 后, 且内部剂量率低于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 后方可启动。

10.1.3.3 设备拆解运输的辐射安全防护措施

①拆解时机与剂量控制: 拆解工作必须在BNCT装置停止出束后至少5天方可启动, 且启动前需对BNCT实验室B内部进行辐射剂量率巡测, 确认其内部剂量率低于2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。拆卸过程中, 辐射工作人员应持续对设备部件表面剂量率进行监测, 只有当监测结果低于2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 时, 方可继续进行拆解作业。

②包装与运输要求: 拆解完毕并打包好的部件, 其外表面剂量率必须低于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。运输工作应委托具备放射性物品运输资质的第三方专业运输单位承担, 运输过程中的辐射安全责任由该单位全权负责。

10.1.3.4 调试、维修维护阶段辐射安全防护措施

1、调试阶段辐射安全防护措施

(1) 调试出束前提条件

BNCT装置进行首次出束调试前, 必须同时满足以下所有条件:

①用户单位取得使用硼中子俘获治疗装置的辐射安全许可证。

②技术人员与用户单位使用人员共同核实，BNCT装置配套的辐射安全防护设施（包括当心电离辐射警告标志、工作状态指示灯、门机联锁装置、紧急停机按钮、监控摄像头、对讲系统、辐射监测系统等）均已安装到位且运行正常，其配置应与环评文件及装置设计文件一致。

③所有工作场所固定式辐射监测仪器（场所 γ 探测器、场所中子剂量监测仪）已完成安装及测试。

④辅助系统（通风系统、水冷系统、电源系统等）已安装并测试合格。

⑤BNCT装置所有结构部件、控制系统及应用软件已准备就绪，并通过功能测试。

⑥所有屏蔽体（包括墙体、顶棚、防护门）已按环评文件及设计要求安装到位，质量验收合格，屏蔽效果测试满足要求。

⑦所有便携式监测仪器仪表已配备齐全，且经检定/校准合格。

⑧调试场所的出入已实施严格的安保控制，无关人员不得进入。

（2）调试出束前清场

在各项条件确认无误后，值班人员启动联锁区域清场程序：通过广播系统通知所有人员离开联锁区域，确认清场完毕后关闭联锁门，确保处于“就绪”状态。

（3）调试出束时巡检

调试出束期间，所有参与人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。初次联合调试出束时，应至少安排1名辐射工作人员对辐射工作场所相邻区域进行巡测，及时发现异常。出束过程中，状态监控和对讲系统应全程启用，安全联锁系统（门禁、急停按钮、声光报警等）和剂量监控系统必须正常工作，确保任何异常情况均能触发联锁切断束流。

2、维修维护辐射安全防护措施

（1）作业前的准备与准入控制

①维修维护现场应设置明显的维修标识，禁止无关人员靠近BNCT实验室区域。

②维修维护工作必须安排在加速器停机至少1h后进行。进入实验室前，应确认剂量监测系统及安全联锁系统工作正常。

③所有进入人员必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪,并将报警阈值设定为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

④工作人员进入BNCT实验室后,应首先使用手持剂量监测仪从远距离向需维修的部件方向逐步探测,了解辐射剂量率分布情况,并根据剂量率水平估算可停留时间,防止超剂量照射。

(2) 断电与联锁保障

BNCT实验室进行维修维护时,必须确保加速器处于完全断电状态。由于控制室操作界面已退出登录并处于密码锁定状态,且未完成出束前的清场巡检和语音警示播报流程,加速器无法启动出束,从而从源头上杜绝误照射风险。

(3) 人员配置与操作确认

检修现场应至少安排2名辐射工作人员。所采取的各项防护措施须经2人同时确认无误后方可进行下一步操作,避免因单人操作失误造成不必要的辐射影响。

10.1.3.5 放射性废物储存间的辐射安全防护措施

为确保放射性废物暂存期间的辐射安全,放射性废物储存间采取以下防护措施:

(1) 放射性废物储存间设置门禁系统,实行专人管理,严格限制无关人员进入。

(2) 储存间防护门醒目位置张贴符合国家标准电离辐射警告标志和中文警示说明(如“当心电离辐射”),提示经过该区域的人员远离。出入口处设立标明“控制区”的标牌,并设置警示标识和标语;在储存间周围监督区的合适位置设立标明“监督区”的标牌及相应警示标识。

(3) 用于放射性废物暂存的铅容器外表面应张贴电离辐射标志,以明确内部物品性质。

(4) 建立放射性废物出入库台账,定期对储存间进行辐射水平监测,确保储存期间对周围环境的辐射影响可控。

10.1.3.6 动物实验场所辐射安全与防护措施

1、工作场所分级、分类

小鼠经中子照射后,其体内及排泄物中均含有感生放射性核素,存在非密封

辐射源，其养殖、解剖全过程须按非密封放射性物质工作场所要求严格管控。

(1) 工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（18871-2002）附录 C 非密封源工作场所的分级规定，放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量（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。本项目动物实验工作场所日等效最大操作量核算见表 10.1-6。

表10.1-6 动物实验工作场所日等效最大操作量

工作场所	核素名称	日最大动物实验数量	实际日最大操作量 (MBq)	毒性分组	毒性组别修正因子	操作方式	操作修正因子	日等效最大操作量 (MBq)
SPF 养殖室 1/SPF 养殖室 2	^{80m} Br	12 只	2730.3	低毒	0.01	很简单的操作	100.0	0.273
	⁸⁰ Br	12 只	2730.3	低毒	0.01			0.273
	⁸² Br	12 只	22.2	中毒	0.1			0.022
	²⁴ Na	12 只	1006.8	中毒	0.1			1.007
	³⁸ Cl	12 只	160.5	低毒	0.01			0.016
	⁵⁶ Mn	12 只	61.3	中毒	0.1			0.061
	⁴² K	12 只	291.7	低毒	0.01			0.029
解剖室*	^{80m} Br	12 只	2.51E-46	低毒	0.01	简单操作	1.0	2.51E-48
	⁸⁰ Br	12 只	0(可忽略)	低毒	0.01			0(可忽略)
	⁸² Br	12 只	1.61E-05	中毒	0.1			1.61E-06
	²⁴ Na	12 只	3.58E-12	中毒	0.1			3.58E-13
	³⁸ Cl	12 只	0(可忽略)	低毒	0.01			0(可忽略)
	⁵⁶ Mn	12 只	0(可忽略)	中毒	0.1			0(可忽略)
	⁴² K	12 只	9.68E-16	低毒	0.01			9.68E-18

注：解剖室的实际日操作量基于放射性衰变定律计算。

SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2、解剖室的日等效最大操作量约为 1.007MBq，在豁免活度值以上~2×10⁷Bq 之间，均属于丙级非密封放射性物质工作场所。

(2) 工作场所分类

根据《核医学放射防护标准》（GBZ 120-2020）对临床核医学工作场所具体分类办法，操作最大量放射性核素的加权活度（MBq）等于计划的日操作最大活度与该核素毒性权重因子的积除以操作性质修正因子所得的商。

按照《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）的分类依据，加权活度>50000MBq 的属于I类工作场所；加权活度 50MBq~50000MBq 的属于II类工作场所；加权活度≤50MBq 的属于III类工作场所。

按照各核素日操作最大活度以及各核素毒性权重因子、操作性质修正因子核算加权活度，对各功能区场所总加权活度进行计算，核算结果见下表。

表10.1-7 核素制备和动物实验日等效最大操作量

场所	核素名称	日等效最大操作量 (MBq)	毒性权重因子	操作性修正因子	加权活度 (MBq)	场所分类
SPF 养殖室 1/SPF 养殖室 2	^{80m} Br	0.273	1	1	1.681	III
	⁸⁰ Br	0.273	1			
	⁸² Br	0.022	1			
	²⁴ Na	1.007	1			
	³⁸ Cl	0.016	1			
	⁵⁶ Mn	0.061	1			
	⁴² K	0.029	1			
解剖室 *	^{80m} Br	2.51E-48	1	1	1.61E-06	III
	⁸⁰ Br	0	1			
	⁸² Br	1.61E-06	1			
	²⁴ Na	3.58E-13	1			
	³⁸ Cl	0	1			
	⁵⁶ Mn	0	1			
	⁴² K	9.68E-18	1			

注：①^{80m}Br、⁸⁰Br、⁸²Br、²⁴Na、³⁸Cl、⁵⁶Mn、⁴²K虽未在《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）表G.2中直接列出，但根据其物理半衰期、辐射类型及核医学实践中的类比，它们均属于短寿命、中等毒性的核素，与B类核素特征相似。因此，可合理归为B类，毒性权重因子取1。
②操作性修正因子依据GBZ 120-2020表G.3，解剖操作按“配药、分装以及施给药”取1，养殖观察按“治疗病床区”取1。

由上表可知，本项目动物实验工作场所均为III类工作场所。对照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中关于“不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求”，各类工作场所要求见下表。

表10.1-8 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求

种类	分类		
	I	II	III
结构屏蔽	需要	需要	不需要
地面	与墙壁接缝无缝隙	与墙壁接缝无缝隙	易清洗
表面	易清洗	易清洗	易清洗
分装柜	需要	需要	不必须
通风	特殊的强制通风	良好通风	一般自然通风
管道	特殊的管道 ^a	普通管道	普通管道
盥洗及去污	洗手盆 ^b 和去污设备	洗手盆 ^b 和去污设备	洗手盆 ^b
a：下水道宜短，大水流管道应有标记以便维修检测。 b：洗手盆应为感应式或脚踏式等手部非接触开关控制。			

SPF养殖室1、SPF养殖室2、解剖室工作区地面、工作台面拟采用光滑、耐

腐蚀、易去污的材料；工作区应保证良好的通风；含放射性废液的排水管道可采用能满足工作需要的普通管道。

2、辐射安全与防护措施

(1) SPF养殖室1、SPF养殖室2、解剖室出入口处拟设置门禁系统及电离辐射警告标志，防止无关人员误入。

(2) 工作场所地面、工作台面拟采用光滑、耐腐蚀、易去污的材料（如不锈钢、环氧树脂涂层），并且每次操作完成后应当使用表面污染监测仪器对操作台、地面、个人防护用品等进行表面污染监测。

(3) 受照小鼠转运使用专用带盖转运容器，解剖操作拟在不锈钢解剖托盘上进行，减少操作位辐射剂量率。

(4) 操作人员应当定期参加相关专业培训，具备相应的技能与防护知识，并配备有适当的防护用品及检测仪器。

(5) 养殖笼具采用封闭式设计，笼盖设置锁扣，防止小鼠自行打开；在养殖室、解剖室操作时，确保门窗关闭，防止逃逸小鼠外窜。

表10.1-9 动物实验区拟配备以下个人防护用品及检测仪器一览表

防护设施和用品名称	数量
表面污染监测仪	1 台
手脚表面污染监测仪	1台
X-γ 辐射监测仪	7台（其中2台为动物实验CT室和控制室预留）
一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂或喷雾	若干
小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签	若干
废物衰变桶	3 个
个人剂量报警仪	2台
个人剂量计	2台

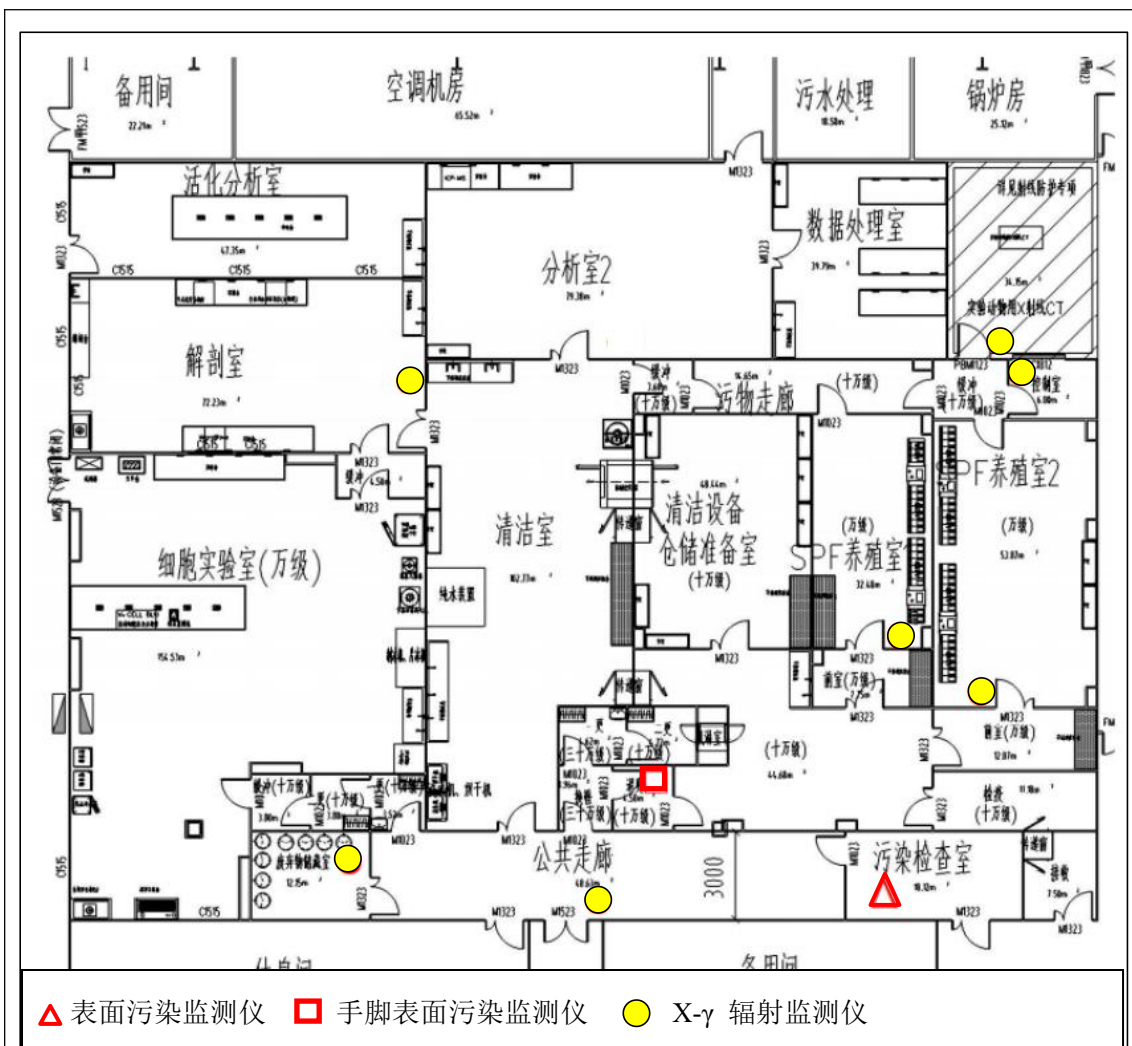


图10.1-12 动物实验场所的监测仪器分布图

3、养殖室和解剖室操作后的去污频率及流程

(1) 去污频率

依据 GB18871-2002 附录 B2.1 款规定的放射性表面污染控制水平（控制区 β 表面污染 $<40 \text{ Bq/cm}^2$ ，监督区 $<4 \text{ Bq/cm}^2$ ），制定本去污方案。

表10.1-10 去污频率一览表

去污类型	去污频率	去污对象
日常去污	每日操作结束后	操作台面、地面、不锈钢解剖托盘、笼具及防护用品表面
每周去污	每周至少 1 次全面去污	养殖室、解剖室墙面、地面、门把手、通风口等可能积存污染的区域
即时去污	发生可见污染或检测超标时立即执行	可疑污染区域

(2) 去污流程

①使用表面污染监测仪对待去污区域进行预检，标识污染范围；

②采用湿式擦拭法处理，从污染较轻区域向污染较重区域逐步去污；

③使用一次性吸水材料（如吸水纸、湿巾）沾取去污剂（1% EDTA 溶液或专用放射性去污剂）重复擦拭污染表面，擦拭后材料立即投入放射性废物桶；

④去污后用表面污染监测仪进行复检，确认 β 表面污染水平：控制区低于 40 Bq/cm²，监督区 <4 Bq/cm²；

⑤若去污不达标，更换去污材料重复以上步骤直至合格。

4、辐射工作人员养殖、解剖等过程中的防护措施

（1）辐射工作人员在照射后小鼠养殖室和解剖室进行作业时，必须规范佩戴个人防护用品（一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、个人剂量计、个人剂量报警仪等）。

（2）操作过程中，手套如有破损或发现明显污染，应立即更换。

（3）工作结束后，按照“污染监测→脱下防护用品→污染检测→手部清洗”的顺序解除防护。使用手脚表面污染监测仪对离开控制区的工作人员进行表面污染检测。

（4）所有从事照射后小鼠养殖、解剖操作的辐射工作人员接受培训后须经考核合格方能上岗。

10.2 放射性三废的治理

10.2.1 BNCT

10.2.1.1 放射性废气

BNCT 实验室 A 和 BNCT 实验室 B 各设置 1 套独立的通风系统，硼中子俘获治疗系统运行产生的活化废气引至杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库楼顶，并高于楼顶 2m 排放。

10.2.1.2 放射性废水

本项目产生的放射性废水主要为活化冷却水。活化冷却水排入专用容器衰变 30d 后取样检测，放射性同位素 ³H 活度浓度小于 1ALI_{min} 后再排入杭州保税物流中心化粪池处理后纳管。

10.2.1.3 放射性固废

本项目产生的放射性固废主要包括废活化中子发生器、废活性炭，均暂存在放射性废物储存间内，待其低于清洁解控水平后作为一般固体废物交物资公司回

收处理；无法清洁解控的放射性固废，待核技术利用工作场所退役时交有资质的单位处置。

10.2.2 动物实验场所

10.2.2.1 放射性废水

操作过程中去污废水和场所清洗废水分别通过专用管道收集至高密度聚乙烯（HDPE）专用容器，废水在专用容器中密闭暂存，暂存时间不少于 30 天，暂存期满后对废水进行取样监测，确认总 β 活度浓度低于清洁解控水平后，作为普通废水排入市政污水管网。

10.2.2.3 放射性固废

放射性废物主要是工作人员操作过程中产生的手套、口罩、一次性垫纸、注射器、吸水纸、棉签、棉球以及含有放射性核素的小白鼠排泄物和小白鼠尸体等，将上述放射性固体废物收集于铅废物桶内专用塑料包装袋，包装袋显著位置要标明废物类型、收贮时间、核素种类及数量等内容。

装满后的专用塑料包装袋应密封、不破漏，及时转运暂存在废弃物储藏室内，待其低于清洁解控水平后作为医疗废物交有资质的单位公司处置；无法清洁解控的放射性固废，待核技术利用工作场所退役时交有资质的单位处置。

10.3 非放射性三废的治理

1、非放射性废气

硼中子俘获治疗系统调试实验过程中产生的非放射性调试实验废气的主要污染物为臭氧、氮氧化物等。

2、废水

生活污水依托现有化粪池预处理后排入市政污水管网。

3、固体废物

生活垃圾和包装废物收集后统一委托环卫清运。

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

本项目施工期主要为 BNCT 实验室的建设、厂房内部装修以及设备安装等工作，主要的污染因子有：扬尘、装修废气、废水、噪声、固体废物等。

施工场地内定期洒水抑尘，选用环保材料等措施，减少扬尘和装修废气的产生和扩散。施工期施工人员生活污水，依托保税物流中心现有污水处理设施处理。施工期噪声主要采取合理安排施工时间，选择低噪声设备和工艺等措施减少施工噪声影响。建筑垃圾、装修垃圾运至市政指定的弃渣场，生活垃圾交环卫部门统一收运处置。

采取上述措施后，施工期对周围环境的影响很小，且施工期产生的影响随着施工的结束而消失，环境可以接受。

11.2 运行阶段对环境的影响

11.2.1 BNCT 辐射环境影响分析

1、BNCT 的计算模型

本项目使用可视化软件 flair 建立几何模型，通过蒙特卡洛（Monte Carlo）模拟程序 FLUKA 进行模拟计算，以 FLUKA 的模拟计算结果为主。

FLUKA 是由意大利国家核物理研究院（INFN）实验室开发，现由 INFN 和 CERN 共同维护改进的一个计算粒子输运以及粒子与物质相互作用的大型通用 Monte Carlo 模拟程序，在质子和电子加速器的靶屏蔽设计、热量测定、活化、放射量测定、探测器设计、宇宙射线、中微子物理、放疗等领域有着广泛的应用。

FLUKA 程序可以模拟 60 多种不同粒子的输运过程，其中中子能量范围可从热中子到 20TeV；电子从 1keV 到 1000TeV；光子从 1keV 到 1000TeV；带电强子及其反粒子为 1keV 到 20TeV；重离子从 10MeV/n 到 1000TeV/n。同时 FLUKA 程序还可以模拟输运极化光子和光量子，且具有较高的精确度。用户可以在 FLUKA 材料库中选择并定义建模区域的材料，程序将根据数据库中各元素及材料的相对原子（分子）质量、密度、射线衰减系数、反应截面、反应阈能

等参数对射线（粒子）与材料的相互作用进行模拟计算。

2、关注点的选取

本项目 BNCT 实验室屏蔽体外的关注点主要包括硼中子俘获治疗系统运行时，BNCT 实验室屏蔽体外 30cm。辐射剂量关注点示意图如图 11.1-1 和图 11.1-2，点位描述如表 11.1-1。

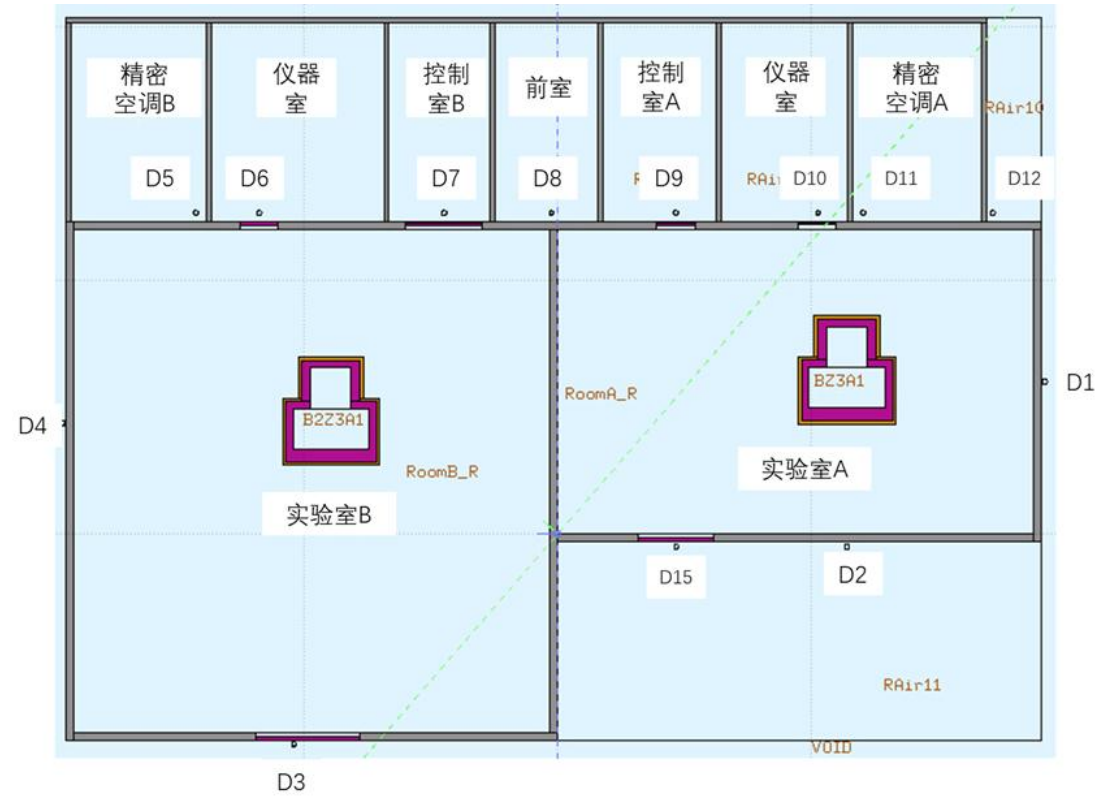


图 11.2-1 关注点示意图（平面）

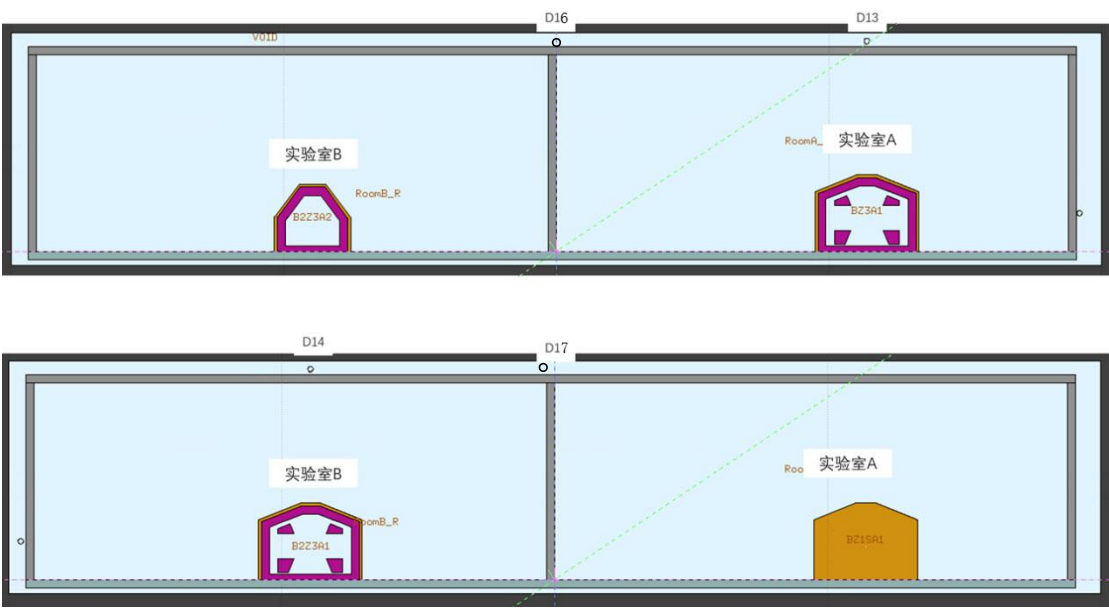


图 11.2-2 关注点示意图（立面）

表 11.2-1 关注点点位描述

关注点	区域描述	墙体设计厚度	人员分类
D1	实验室 A 东北侧墙	混凝土 300mm	公众
D2	实验室 A 东南侧墙	混凝土 300mm	公众
D3	实验室 B 屏蔽门	6mmPb+150mm 含 B 聚乙烯	公众
D4	实验室 B 西南侧墙	混凝土 300mm	公众
D5	精密空调室 B	混凝土 300mm	公众
D6	仪器室 B	6mmPb+150mm 含 B 聚乙烯	辐射工作人员
D7	控制室 B	6mmPb+150mm 含 B 聚乙烯	
D8	前室	混凝土 300mm	
D9	控制室 A	6mmPb+150mm 含 B 聚乙烯	
D10	仪器室 A	6mmPb+150mm 含 B 聚乙烯	
D11	精密空调室 A	混凝土 300mm	公众
B12	精密空调室 A 外墙	混凝土 300mm	公众
D13	实验室 A 顶部	混凝土 300mm	公众
D14	实验室 B 顶部	混凝土 300mm	公众
D15	实验室 A 屏蔽门	6mmPb+150mm 含 B 聚乙烯	公众
D16	实验室 A 和 B 顶部中间 靠近实验室 A 侧	混凝土 300mm	公众
D17	实验室 A 和 B 顶部中间 靠近实验室 B 侧	混凝土 300mm	公众

3、BNCT 实验室的辐射水平

为了直观显示 BNCT 实验室屏蔽体外不同区域的不同剂量率，在使用 FLUKA 进行模拟计算后，将得到的数据文件导入 flair 进行可视化分析处理得出 BNCT 运行状态下的剂量率分布图。

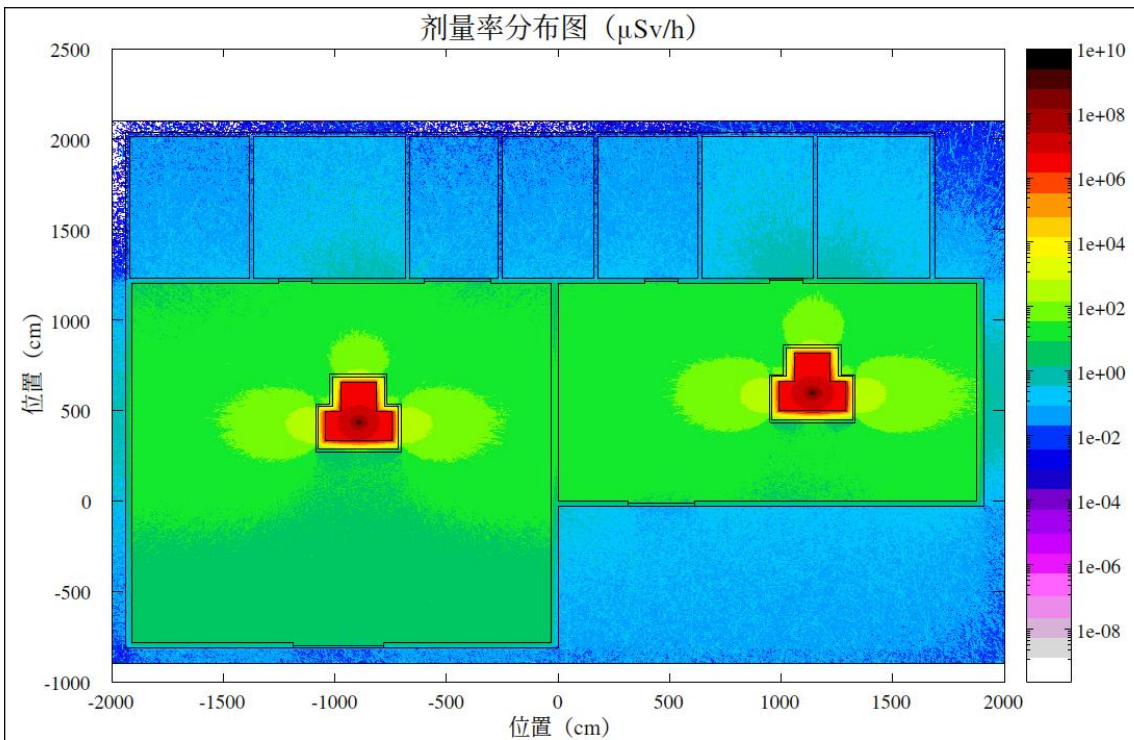


图 11.2-3 水平面总剂量分布图

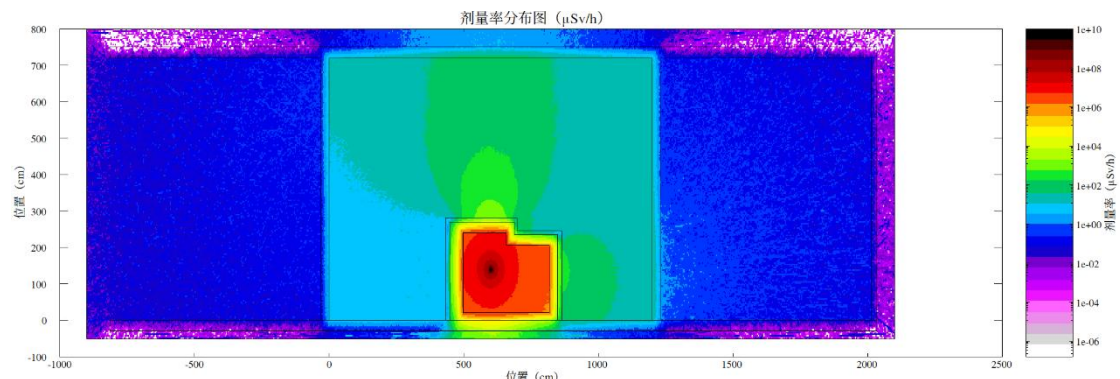


图 11.2-4 实验室 A 垂直方向总剂量分布图

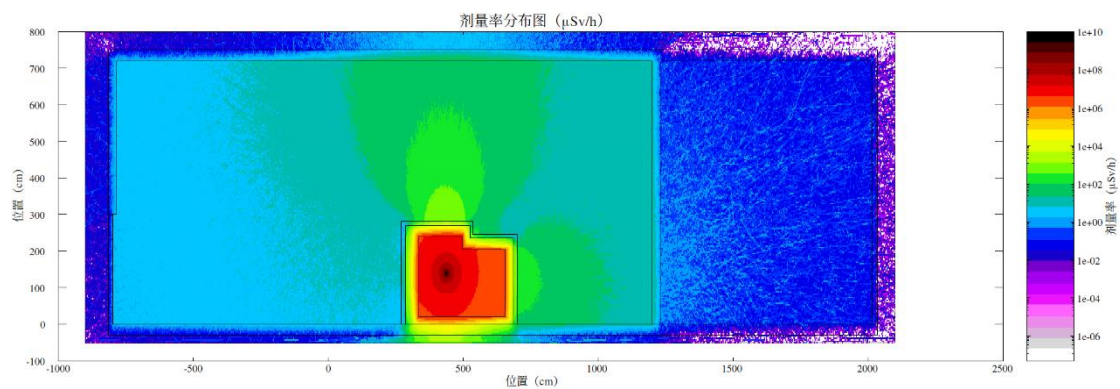


图 11.2-5 实验室 B 垂直方向总剂量分布图

根据预测图，获取 BNCT 实验室屏蔽体外 30cm 处各功能房间内最大预测值见表 11.2-2。

表 11.2-2 各关注点剂量率控制水平

关注点	区域描述	屏蔽体外总剂量率水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	屏蔽体外中子剂量率水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	屏蔽体外光子剂量率水平 ($\mu\text{Sv/h}$)
D1	实验室 A 东北侧墙	1.2017	0.0986	1.1031
D2	实验室 A 东南侧墙	0.1171	0.0447	0.0724
D3	实验室 B 屏蔽门	0.0394	0.0226	0.0168
D4	实验室 B 西南侧墙	0.6412	0.0598	0.5814
D5	精密空调室 B	0.1573	0.0356	0.1217
D6	仪器室 B	0.2469	0.0559	0.1910
D7	控制室 B	0.1494	0.0469	0.1025
D8	前室	0.0996	0.0334	0.0662
D9	控制室 A	0.1193	0.0504	0.0689
D10	仪器室 A	0.4583	0.0835	0.3747
D11	精密空调室 A	0.9210	0.0916	0.8294
B12	精密空调室 A 外墙	0.1752	0.0407	0.1345
D13	实验室 A 顶部	2.5086	0.1726	2.3950
D14	实验室 B 顶部	2.4840	0.1652	2.3188
D15	实验室 A 屏蔽门	0.1479	0.0458	0.1021
D16	实验室 A 和 B 顶部中间靠近实验室 A 侧	0.1983	0.0298	0.1685
D17	实验室 A 和 B 顶部中间靠近实验室 B 侧	0.2284	0.0276	0.2008

根据模型预测结果，周围剂量当量率达标情况见表表 11.2-3。

表 11.2-3 周围剂量当量率达标情况

关注点	区域描述	屏蔽体外总剂量率水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	居留因子	使用因子	周工作时间 (h/周)	屏蔽体外周剂量率水平 ($\mu\text{Sv/周}$)	标准		达标情况
							周剂量参考控制水平 ($\mu\text{Sv/周}$)	最高剂量率参考控制水平 ($\mu\text{Sv/h}$)	
D1	实验室 A 东北侧墙	1.2017	1/16	1	15	1.13	5	10	达标
D2	实验室 A 东南侧墙	0.1171	1/8	1	15	0.22	5	10	达标
D3	实验室 B 屏蔽门	0.0394	1/8	1	15	0.07	5	10	达标
D4	实验室 B 西南侧墙	0.6412	1/8	1	15	1.20	5	10	达标
D5	精密空	0.1573	1/16	1	15	0.15	5	10	达

	调室 B								标
D6	仪器室 B	0.2469	1	1	15	3.70	100	2.5	达标
D7	控制室 B	0.1494	1	1	15	2.24	100	2.5	达标
D8	前室	0.0996	1	1	15	1.49	100	2.5	达标
D9	控制室 A	0.1193	1	1	15	1.79	100	2.5	达标
D10	仪器室 A	0.4583	1	1	15	6.87	100	2.5	达标
D11	精密空调室 A	0.9210	1/16	1	15	0.86	5	10	达标
B12	精密空调室 A 外墙	0.1752	1/16	1	15	0.16	5	10	达标
D13	实验室 A 顶部	2.5086	1/20	1	15	1.88	5	100	达标
D14	实验室 B 顶部	2.4840	1/20	1	15	1.86	5	100	达标
D15	实验室 A 屏蔽门	0.1479	1/8	1	15	0.28	5	10	达标
D16	实验室 A 和 B 顶部中间靠近实验室 A 侧	0.1983	1/20	1	15	0.15	5	100	达标
D17	实验室 A 和 B 顶部中间靠近实验室 B 侧	0.2284	1/20	1	15	0.17	5	100	达标

注：不同场所居留因子的推荐值见《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）附录 A（本报告表 7.3-4）。

根据上表可知，硼中子俘获治疗系统整机运行出束时，BNCT 实验室各防护门外、各区域墙外的最大剂量率和周剂量率均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）中的相关要求。

4、BNCT 装置感生放射性

BNCT 实验室 A 与实验室 B 内配置的 BNCT 装置在设计参数上完全一致：加速器能量均为 0.3 MeV，束流强度均为 40 mA，中子最大通量均为 $3.384 \times 10^{11} \text{n/s}$ ，靶系统及中子产生机制相同，活化反应类型一致，感生放射性核

素种类及单位质量比活度基本相同。			
但两处实验室的空间几何尺寸存在显著差异：实验室 A 建筑面积为 225.3m²，而实验室 B 建筑面积为 372.7 m²。在相同源项条件下，实验室 A 因空间狭小，几何发散不足，γ射线在室内壁面间的散射路径更短、散射次数更密集，导致散射γ辐射场分布更为均匀且剂量率贡献更高；同时，狭小空间内活化空气核素的平衡浓度也更高，感生放射性累积效应更为显著。因此，实验室 A 的辐射安全条件较实验室 B 更为不利，以实验室 A 作为感生放射性模拟及剂量率评价对象，其结果可保守地代表实验室 B 的辐射水平。 基于上述分析，本评价仅针对 BNCT 实验室 A 进行感生放射性源项及剂量率模拟计算，实验室 B 的相应评价结论直接引用实验室 A 的计算结果。将 FLUKA 计算得到的数据文件导入可视化软件 flair 得到 BNCT 装置运行 24h 停机不同时间，BNCT 实验室 A 的剩余辐射剂量水平面分布图，如图 11.2-6 至图 11.2-15 所示。不同冷却时间内实验室 A 不同区域剂量最大值见表 11.2-4。			
表 11.2-4 各关注点剂量率控制水平			
冷却时间	实验室内最大值（μSv/h）	装置内最大值（μSv/h）	装置屏蔽门口（μSv/h）
0 s	9.562E-02	2.183E+02	5.804E-02
5 min	9.225E-02	3.535E+00	2.252E-02
1 h	8.791E-02	2.474E+00	1.922E-02
4 h	7.647E-02	8.317E-01	1.663E-02
8 h	6.352E-02	3.511E-01	1.380E-02
由上表可知：（1）冷却时间 0 s 时，实验室内最大剂量率为 9.562×10⁻²μSv/h，远低于 2.5 μSv/h；但 BNCT 装置内最大剂量率高达 2.183×10²μSv/h，装置屏蔽门口为 5.804×10⁻²μSv/h，此时严禁人员进入 BNCT 装置内。（2）冷却时间 5min 时，实验室内最大剂量率降至 9.225×10⁻²μSv/h，BNCT 装置屏蔽门口降至 2.252×10⁻²μSv/h，装置内最大剂量率降至 3.535μSv/h。此时实验室内环境辐射水平已低于 2.5μSv/h，装置内大部分区域剂量率低于 2.5 μSv/h，仅在中子发生器区域靠近地面位置存在局部热点。（3）冷却时间 1 h 时，实验室内最大剂量率降至 8.791×10⁻²μSv/h，BNCT 装置屏蔽门口降至 1.922×10⁻²μSv/h，装置内最大剂量率降至 2.474 μSv/h，该值已低于 2.5 μSv/h 的剂量率参考控制水平，此时装置内所有区域剂量率均满足安全限值。			

综合以上分析，实验室 B 感生放射性的安全管控可参照实验室 A 的要求执行，即冷却时间达到 5 min 后人员可短时进入实验室操作，冷却 1 h 后装置内所有区域的剂量率均低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 安全限值，允许人员正常进入。

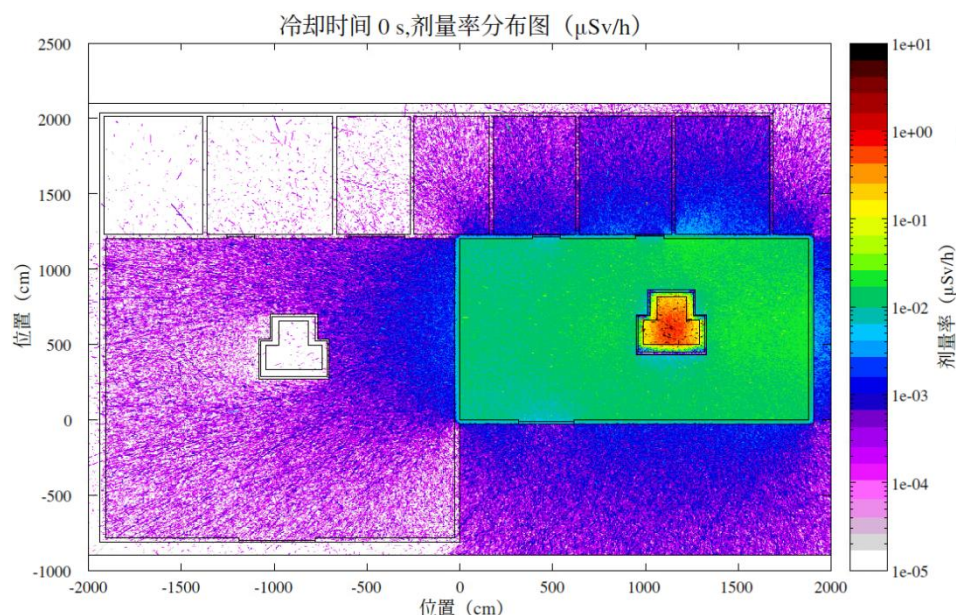


图 11.2-6 BNCT 设备运行 24 小时，停机 0 s 后实验室 A 水平面剂量分布图

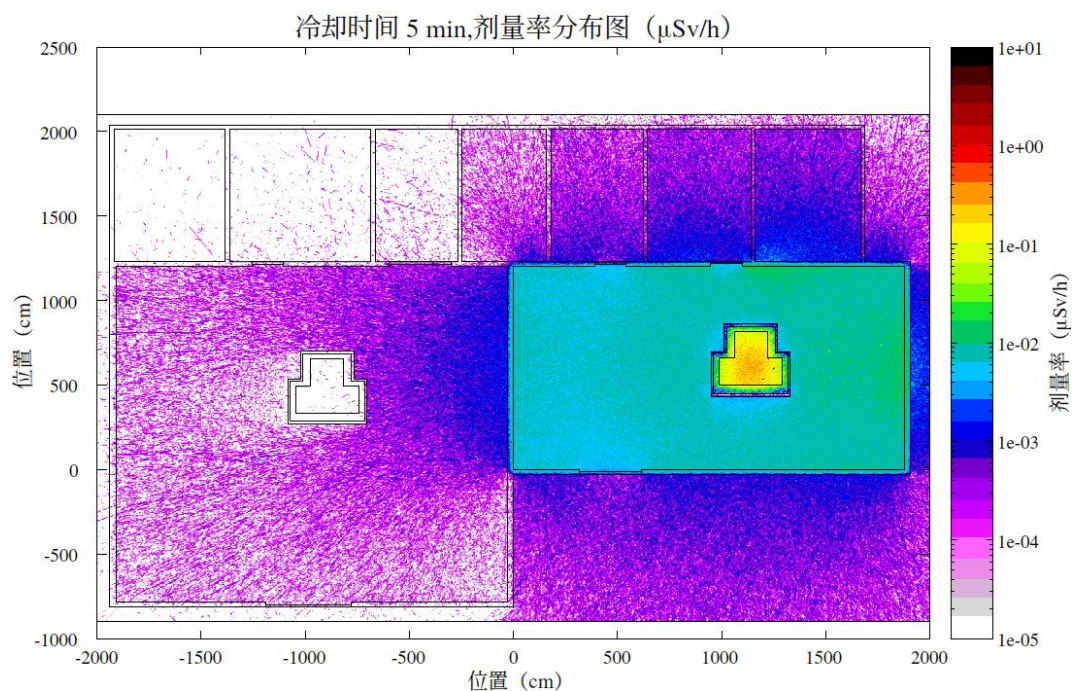


图 11.2-7 BNCT 设备运行 24 小时，停机 5 min 后实验室 A 水平面剂量分布图

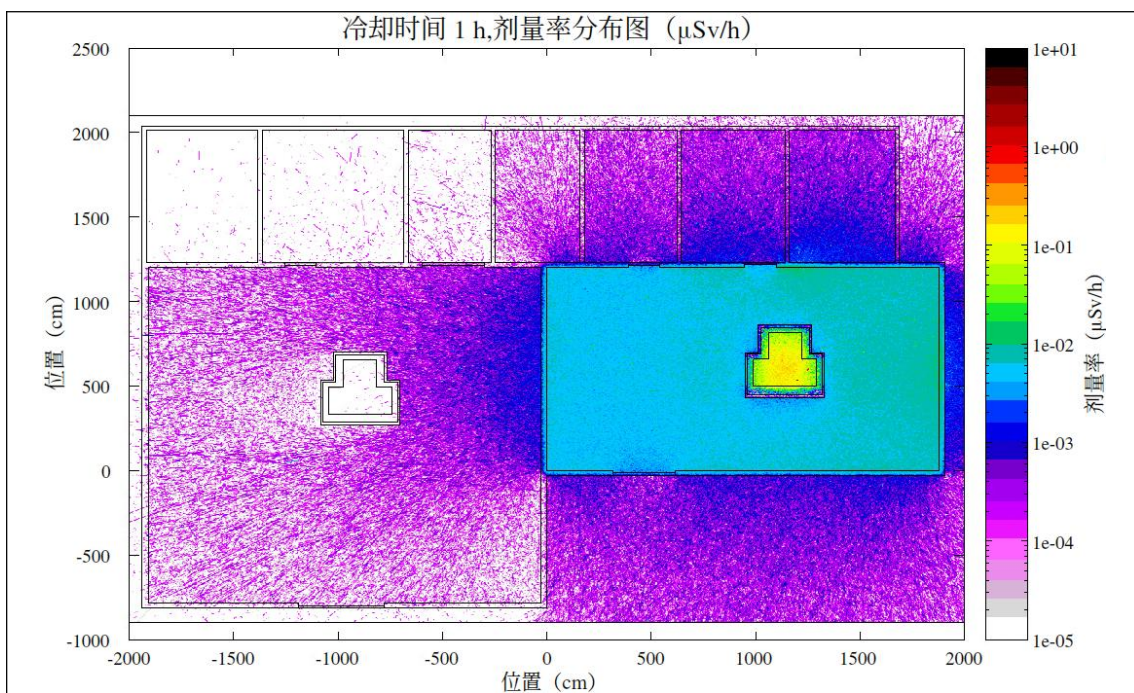


图 11.2-8 BNCT 设备运行 24 小时，停机 1h 后实验室 A 水平面剂量分布图

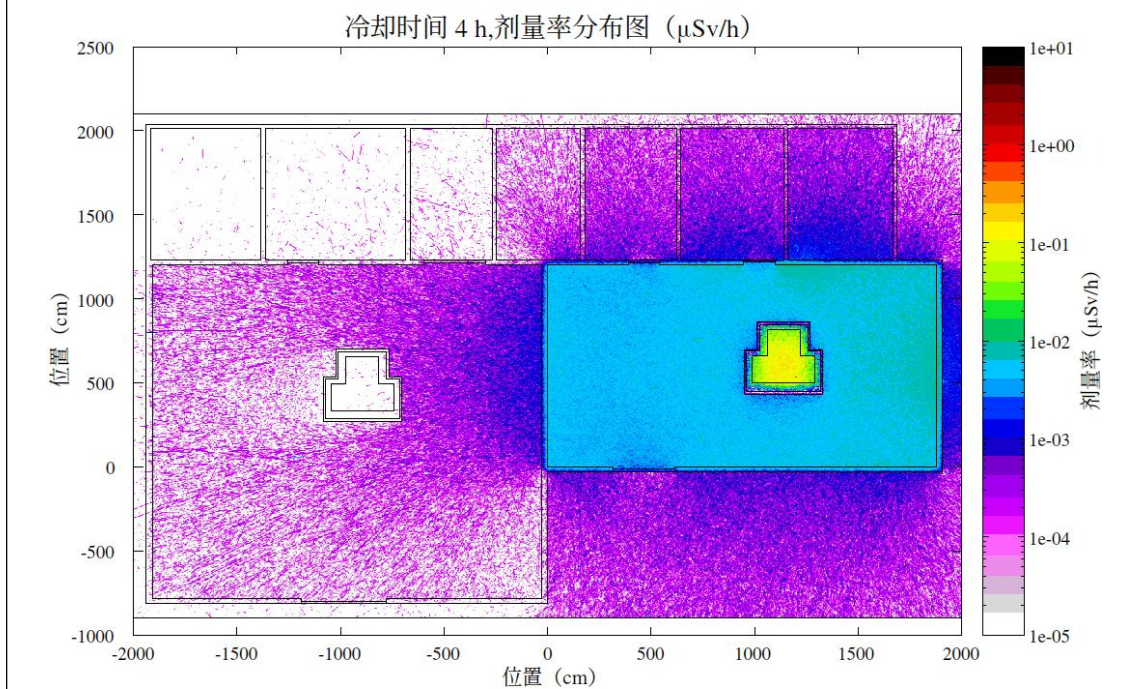


图 11.2-9 BNCT 设备运行 24 小时，停机 4h 后实验室 A 水平面剂量分布图

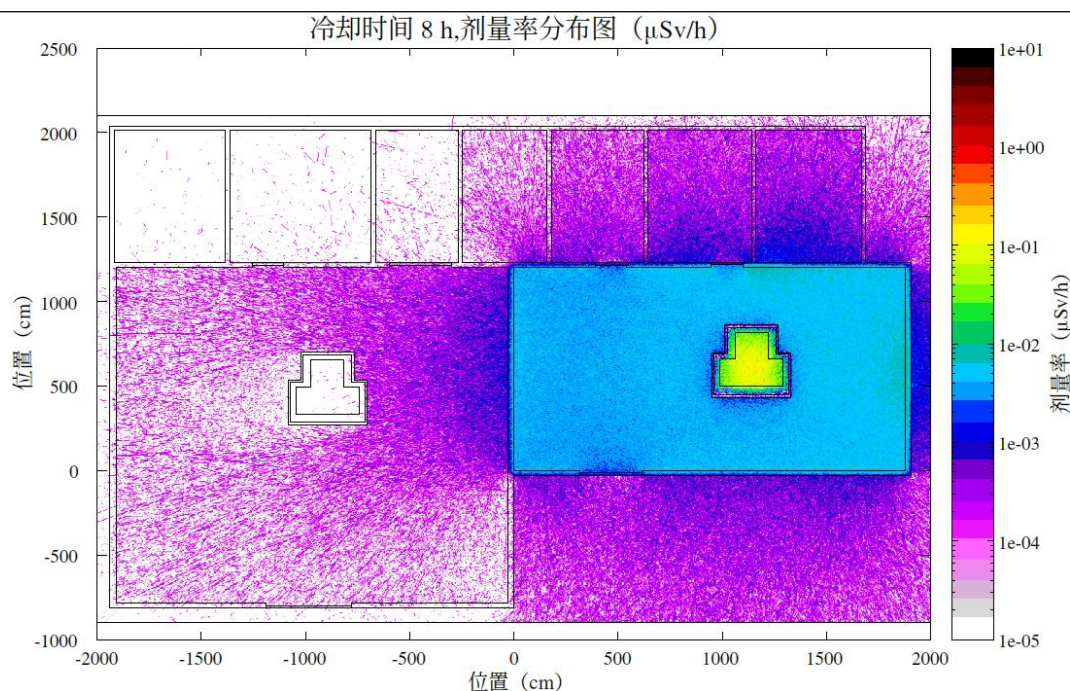


图 11.2-10 BNCT 设备运行 24 小时，停机 8h 后实验室 A 水平面剂量分布图

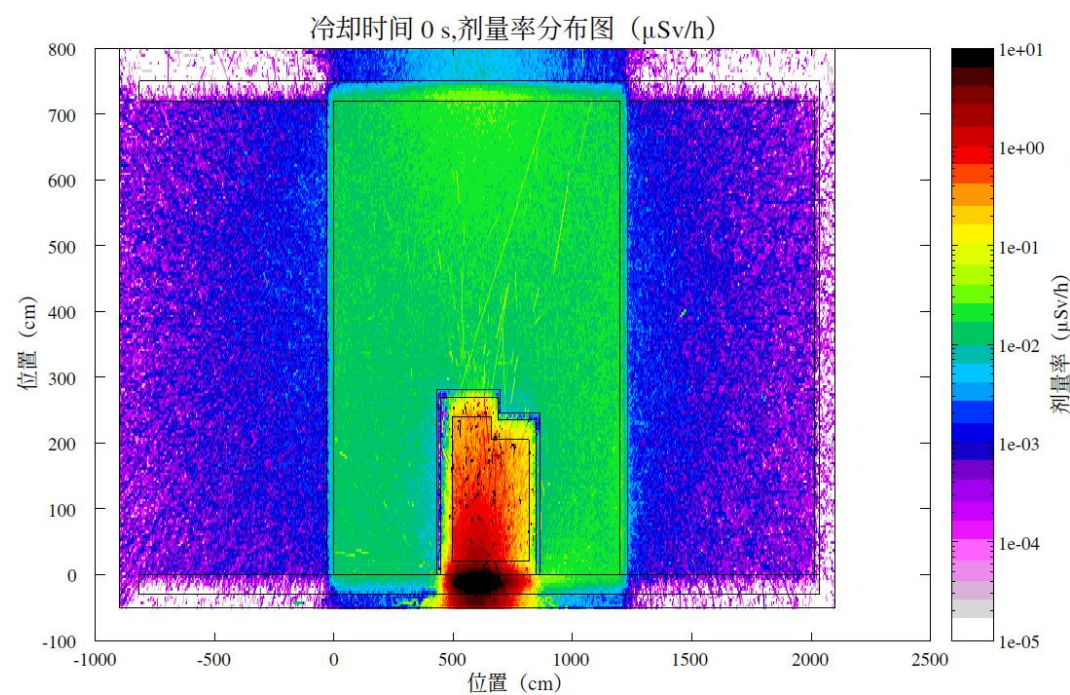


图 11.2-11 BNCT 设备运行 24 小时，停机 0 s 后实验室 A 垂直面剂量分布图

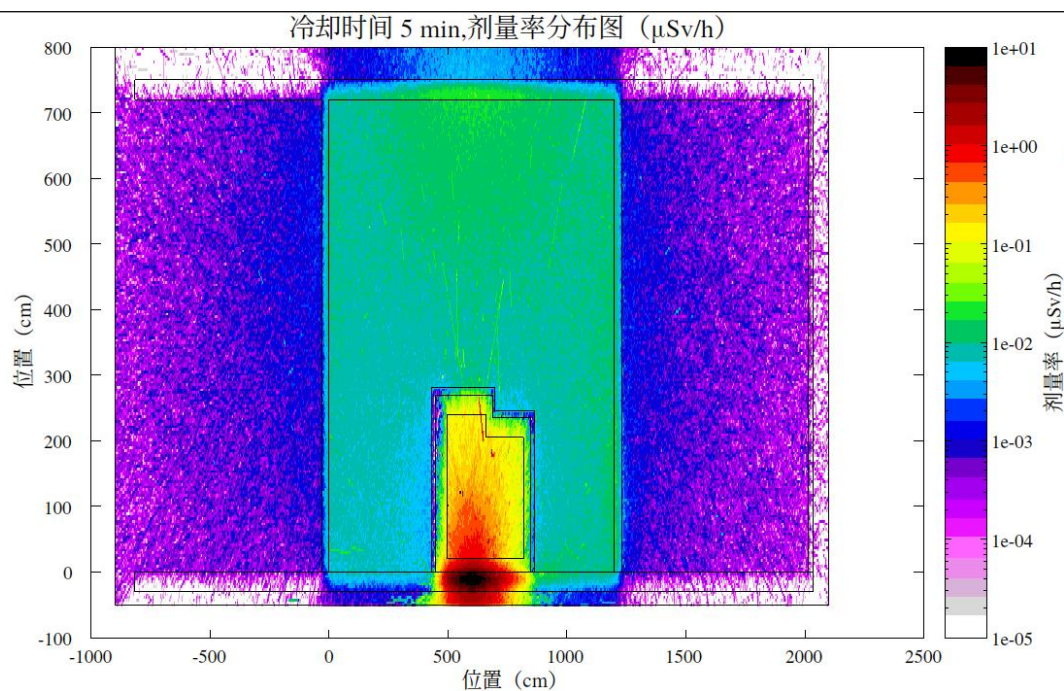


图 11.2-12 BNCT 设备运行 24 小时, 停机 5 min 后实验室 A 垂直面剂量分布图

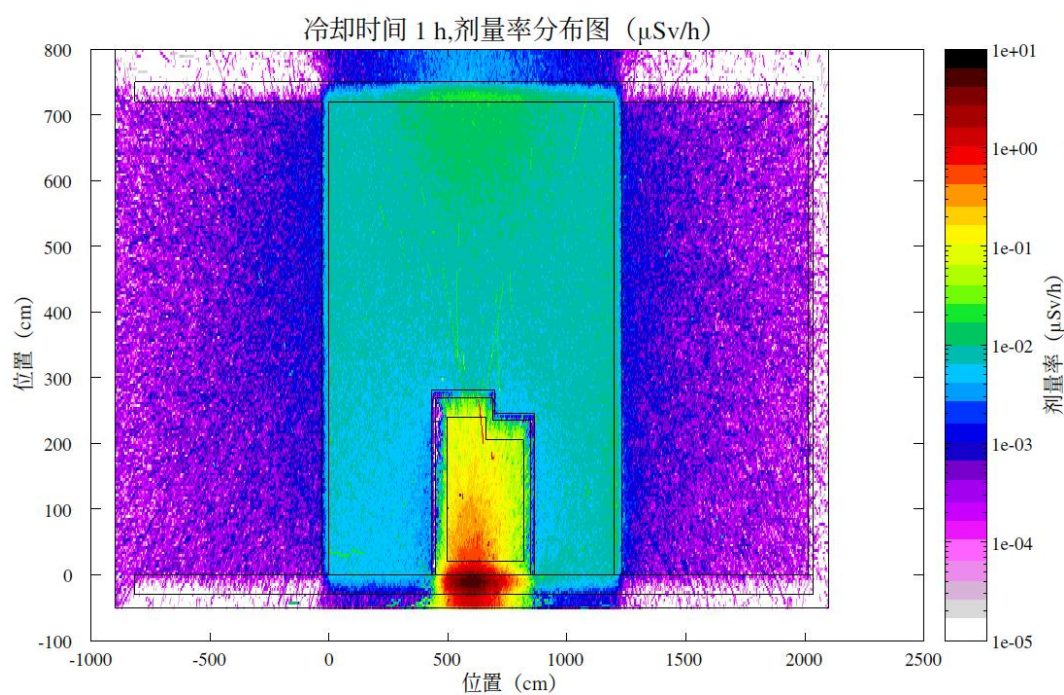


图 11.2-13 BNCT 设备运行 24 小时, 停机 1 h 后实验室 A 垂直面剂量分布图

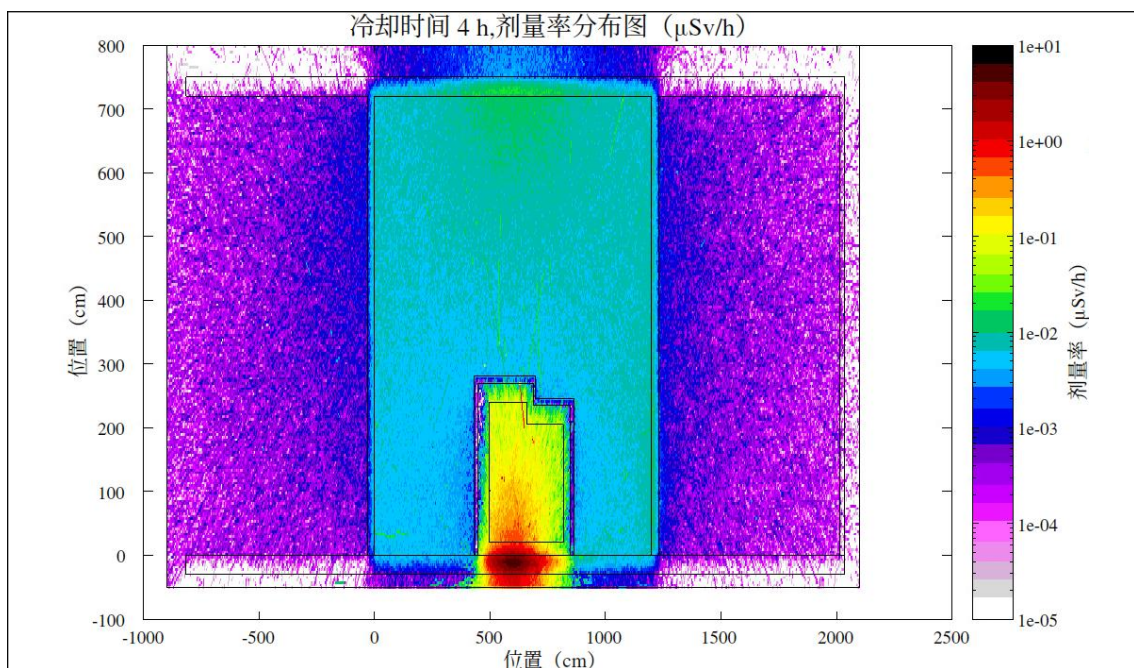


图 11.2-14 BNCT 设备运行 24 小时，停机 4 h 后实验室 A 垂直面剂量分布图

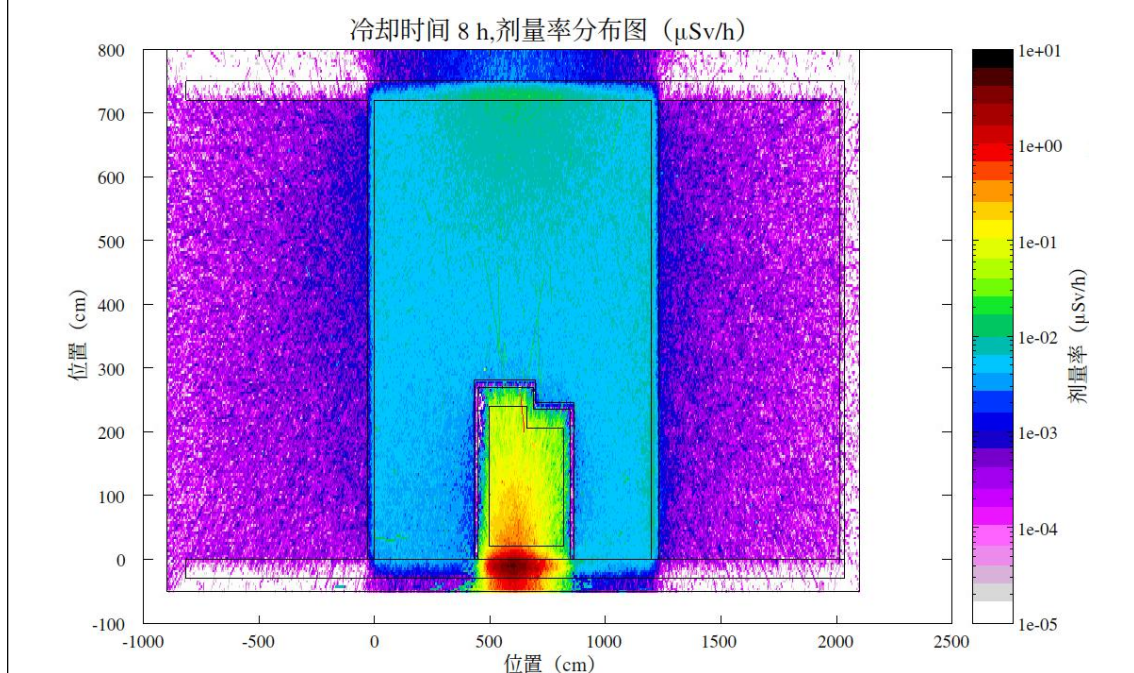


图 11.2-15 BNCT 设备运行 24 小时，停机 8 h 后实验室 A 垂直面剂量分布图

11.2.2 放射性废物储存间辐射环境影响分析

放射性废物储存间主要用于废活化中子发生器、废活性炭的暂存。放射性废物储存间墙体及顶棚屏蔽厚度均为 300mm 混凝土，防护门为 6mmPb。中子发生器在停机至少 1h 后进行更换，根据表 11.2-4 可知，废活化中子发生器其表面周围剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。废活化中子发生器更换后，装入专用铅容器并转移至放射性废物储存间暂存。以铅容器中心为辐射源点进行保守估算，经距离衰减及储

存间墙体、防护门、顶棚的屏蔽作用后，储存间墙外、门外及顶棚外 30cm 处的周围剂量当量率均低于 2.5μSv/h 的剂量率参考控制水平。因此，放射性废物储存间对周围环境的辐射影响可接受。

11.2.3 动物实验场所辐射环境影响分析

1、动物实验场所未密封放射性物质的使用量

当中子照射物质时，若生成的放射性物质原子数为 N ，则在微小时间 dt 内生成的该核素原子数为 $\sigma\phi M dt$ 。同时由于衰变开始，其生成速率 dN/dt 可表示为如下公式：

$$\frac{dN}{dt} = \sigma\phi M - \lambda N \dots\dots\dots \text{(式 11.2-1)}$$

其中：

- σ ：反应截面（ cm^2 ）；
- ϕ ：热中子通量（ $\text{n/cm}^2/\text{sec}$ ）；
- M ：被照射物质的原子数；
- λ ：生成的放射性物质的衰变常数（ sec^{-1} ）；

解此微分方程，并考虑无限照射时间后，产生的放射性活度 R_∞ 可表示为：

$$R_\infty = \sigma\phi M \dots\dots\dots \text{(式 11.2-2)}$$

此 R_∞ 即为饱和放射性活度，与照射时间无关。

《Evaluation of radioactivity in the bodies of mice induced by neutron exposure from an epithermal neutron source of an accelerator-based boron neutron capture therapy system., Proc. Jpn. Acad., Ser. B 93 （2017）》中使用设置于国立癌症中心的 CICS 社制加速器型 BNCT 系统对小鼠进行中子照射，通过高纯度锗半导体探测器测量了所产生的放射性核素。文中报告了中子照射小鼠后生成的核素及其测定值，如表 11.2-5 所示。

表 11.2-5 中子照射小鼠后生成的核素及其活度

核素	^{80m} Br	⁸² Br	²⁴ Na	³⁸ Cl	⁵⁶ Mn	⁴² K
最大饱和放射性活度（Bq）	1.6×10 ⁵	1.3×10 ⁵	5.9×10 ⁴	9.4×10 ³	3.6×10 ³	1.7×10 ⁴
单位质量的最大饱和放射性活度（Bq/g）	7.62×10 ³	6.19×10 ¹	2.81×10 ³	4.48×10 ²	1.71×10 ²	8.14×10 ²

注：表中灰色部分的数据来自文献（最大值为平均值与标准偏差之和）。单位质量的最大饱和放射性活度是将文献中的最大饱和活度除以小鼠的平均体重得到的数值。

动物中子照射引起的放射性核素生成,根据热中子通量来计算放射性核素的生成量。另一方面,如前所述,饱和放射性活度与照射的热中子通量成正比。文献中使用的装置在照射位置的热中子束流为 3.4×10^8 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$),而本项目装置的热中子束流为 3.384×10^{11} 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$),因此中子照射小鼠后生成的核素情况见表 11.2-6。

表 11.2-6 中子照射小鼠后生成的核素情况

核素	$^{80\text{m}}\text{Br}$	$^{80}\text{Br}^*$	^{82}Br	^{24}Na	^{38}Cl	^{56}Mn	^{42}K
单位质量的最大饱和和放射性活度 (Bq/g)	7.58×10^6	7.58×10^6	6.16×10^4	2.80×10^6	4.46×10^5	1.70×10^5	8.10×10^5

注: $^{80\text{m}}\text{Br}$ 通过同质异能跃迁衰变为 ^{80}Br , 两者存在瞬态平衡关系, ^{80}Br 与 $^{80\text{m}}\text{Br}$ 同量生成。

假设每天最多使用 12 只小鼠进行中子照射, 每只小鼠最大体重为 30 克, 据此计算各核素每日最大生成总量, 具体见表 11.2-7。

表 11.2-7 各核素每日最大生成总量

核素	$^{80\text{m}}\text{Br}$	^{80}Br	^{82}Br	^{24}Na	^{38}Cl	^{56}Mn	^{42}K
每日最大生成总量 (MBq)	2730.3	2730.3	22.2	1006.8	160.5	61.3	291.7

本项目受照小鼠在照射后转入 SPF 养殖室养殖, 养殖时间为 1 个月 (按 30 天计, 即 $t=30 \times 24=720\text{h}$)。解剖操作在养殖期满后, 因此需计算解剖期间各活化核素的活度基于放射性衰变定律计算。

放射性核素的活度随时间呈指数衰减规律, 其计算公式为:

$$A = A_0 \times e^{-\lambda t} = A_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}} \dots\dots\dots (\text{式 } 11.2-3)$$

式中:

A ——衰变 t 时间后的放射性活度, Bq 或 MBq;

A_0 ——初始放射性活度, Bq 或 MBq;

λ ——衰变常数, $\lambda=\ln 2/T_{1/2}$;

t ——衰变时间;

$T_{1/2}$ ——物理半衰期。

根据式 11.2-3 可计算得到解剖室各核素每日最大总量, 具体见表 11.2-8。

表 11.2-8 解剖室各核素每日最大总量

核素	A_0 (MBq)	$T_{1/2}$ (h)	t (h)	A (MBq)
^{80m}Br	2730.3	4.42	720	2.51×10^{-46}
^{80}Br	2730.3	0.295	720	0 (可忽略)
^{82}Br	22.2	35.3	720	1.61×10^{-5}
^{24}Na	1006.8	15.0	720	3.58×10^{-12}
^{38}Cl	160.5	0.62	720	0 (可忽略)
^{56}Mn	61.3	2.58	720	0 (可忽略)
^{42}K	291.7	12.4	720	9.68×10^{-16}

2、动物实验场所辐射剂量率预测

按照点源模式进行估算，屏蔽计算公式参考《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)，辐射剂量率估算见下式。

$$H = \frac{A \times \Gamma}{R^2} \times 10^{-X/TVL} \dots\dots\dots (\text{式 11.2-4})$$

式中：

H ——屏蔽体外关注点剂量率，单位为 $\mu\text{Sv/h}$ ；

X ——屏蔽厚度，单位为 mm；

A ——单个患者或受检者所用放射源的最大活度，单位为 MBq；

Γ ——距源 1m 处的周围剂量当量率常数，单位为 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ；

R ——参考点与放射源间的距离，m。

动物实验场所（SPF 养殖室 1、SPF 养殖室 2、解剖室）为III类工作场所，不需要结构屏蔽，本环评不考虑屏蔽厚度，动物实验场所关注点处周围剂量当量率预测结果见表 11.2-9。

表 11.2-9 动物实验场所辐射剂量率预测结果一览表

工作场所	位置	核素	A (MBq)	距离 (m)	周围剂量当量率常数 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$) *	关注点处周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	
SPF 养殖室 1/SPF 养殖室 2	SPF 养殖室 2 东北墙外 30cm 处	^{80m}Br	2730.3	4.8	4.51E-06	5.34E-04	7.72E-03
		^{80}Br	2730.3		3.67E-06	4.35E-04	
		^{82}Br	22.2		1.13E-04	1.09E-04	
		^{24}Na	1006.8		1.37E-04	5.99E-03	
		^{38}Cl	160.5		5.10E-05	3.55E-04	
		^{56}Mn	61.3		6.54E-05	1.74E-04	
		^{42}K	291.7		1.03E-05	1.30E-04	
	SPF 养殖室 2	^{80m}Br	2730.3	0.8	4.51E-06	1.92E-02	2.78E-01
		^{80}Br	2730.3		3.67E-06	1.57E-02	

	东南墙 外 30cm 处	⁸² Br	22.2		1.13E-04	3.92E-03	
		²⁴ Na	1006.8		1.37E-04	2.16E-01	
		³⁸ Cl	160.5		5.10E-05	1.28E-02	
		⁵⁶ Mn	61.3		6.54E-05	6.26E-03	
		⁴² K	291.7		1.03E-05	4.69E-03	
	SPF 养 殖室 1 东南墙 外 30cm 处	^{80m} Br	2730.3	0.9	4.51E-06	1.52E-02	2.20E-01
		⁸⁰ Br	2730.3		3.67E-06	1.24E-02	
		⁸² Br	22.2		1.13E-04	3.10E-03	
		²⁴ Na	1006.8		1.37E-04	1.70E-01	
		³⁸ Cl	160.5		5.10E-05	1.01E-02	
		⁵⁶ Mn	61.3		6.54E-05	4.95E-03	
		⁴² K	291.7		1.03E-05	3.71E-03	
	SPF 养 殖室 1 西南墙 外 30cm 处	^{80m} Br	2730.3	3.3	4.51E-06	1.13E-03	1.63E-02
		⁸⁰ Br	2730.3		3.67E-06	9.20E-04	
		⁸² Br	22.2		1.13E-04	2.30E-04	
		²⁴ Na	1006.8		1.37E-04	1.27E-02	
		³⁸ Cl	160.5		5.10E-05	7.52E-04	
		⁵⁶ Mn	61.3		6.54E-05	3.68E-04	
		⁴² K	291.7		1.03E-05	2.76E-04	
	SPF 养 殖室 1 西北墙 外 30cm 处	^{80m} Br	2730.3	0.8	4.51E-06	1.92E-02	2.78E-01
		⁸⁰ Br	2730.3		3.67E-06	1.57E-02	
		⁸² Br	22.2		1.13E-04	3.92E-03	
		²⁴ Na	1006.8		1.37E-04	2.16E-01	
		³⁸ Cl	160.5		5.10E-05	1.28E-02	
		⁵⁶ Mn	61.3		6.54E-05	6.26E-03	
		⁴² K	291.7		1.03E-05	4.69E-03	
	SPF 养 殖室 2 西北墙 外 30cm 处	^{80m} Br	2730.3	0.5	4.51E-06	4.93E-02	7.12E-01
		⁸⁰ Br	2730.3		3.67E-06	4.01E-02	
		⁸² Br	22.2		1.13E-04	1.00E-02	
		²⁴ Na	1006.8		1.37E-04	5.52E-01	
		³⁸ Cl	160.5		5.10E-05	3.27E-02	
		⁵⁶ Mn	61.3		6.54E-05	1.60E-02	
		⁴² K	291.7		1.03E-05	1.20E-02	
	SPF 养 殖室室 内	^{80m} Br	2730.3	0.2	4.51E-06	3.08E-01	4.45E+00
		⁸⁰ Br	2730.3		3.67E-06	2.51E-01	
		⁸² Br	22.2		1.13E-04	6.27E-02	
		²⁴ Na	1006.8		1.37E-04	3.45E+00	
		³⁸ Cl	160.5		5.10E-05	2.05E-01	
		⁵⁶ Mn	61.3		6.54E-05	1.00E-01	

		⁴² K	291.7		1.03E-05	7.51E-02	
解剖室	解剖室 东北墙 30cm 处	^{80m} Br	2.51E-46	0.3	4.51E-06	1.26E-50	2.02E-08
		⁸² Br	1.61E-05		1.13E-04	2.02E-08	
		²⁴ Na	3.58E-12		1.37E-04	5.45E-15	
		⁴² K	9.68E-16		1.03E-05	1.11E-19	
	解剖室 东南墙 30cm 处	^{80m} Br	2.51E-46	0.3	4.51E-06	1.26E-50	2.02E-08
		⁸² Br	1.61E-05		1.13E-04	2.02E-08	
		²⁴ Na	3.58E-12		1.37E-04	5.45E-15	
		⁴² K	9.68E-16		1.03E-05	1.11E-19	
	解剖室 西南墙 30cm 处	^{80m} Br	2.51E-46	0.3	4.51E-06	1.26E-50	2.02E-08
		⁸² Br	1.61E-05		1.13E-04	2.02E-08	
		²⁴ Na	3.58E-12		1.37E-04	5.45E-15	
		⁴² K	9.68E-16		1.03E-05	1.11E-19	
	解剖室 西北墙 30cm 处	^{80m} Br	2.51E-46	0.3	4.51E-06	1.26E-50	2.02E-08
		⁸² Br	1.61E-05		1.13E-04	2.02E-08	
		²⁴ Na	3.58E-12		1.37E-04	5.45E-15	
		⁴² K	9.68E-16		1.03E-05	1.11E-19	
	解剖室 室内	^{80m} Br	2.51E-46	0.05	4.51E-06	4.53E-49	7.28E-07
		⁸² Br	1.61E-05		1.13E-04	7.28E-07	
		²⁴ Na	3.58E-12		1.37E-04	1.96E-13	
		⁴² K	9.68E-16		1.03E-05	3.99E-18	

注：周围剂量当量率常数取值来源于《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 I），李士骏，辐射防护，第 20 卷第 3 期，2000 年 5 月》。

由上表可知，动物实验场所墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率均小于 2.5μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）相关剂量率要求。

实际上，小鼠在养殖过程中，由于衰变作用导致小鼠体内核素的活度不断减少，因而对墙外或门外的辐射影响也不断降低。

11.2.4 辐射工作人员和公众剂量估算

1、BNCT 辐射工作人员和公众剂量估算

（1）计算模式

辐射工作人员和公众年有效剂量预测可参考联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）-2000 年报告附录 A，人员受照剂量计算公式如下：

$$E = H \times t \times U \times T \times 10^{-3} \dots\dots\dots \text{（式 11.2-5）}$$

式中：

E ——年有效剂量, mSv/a;

H ——关注点处周围剂量当量率, $\mu\text{Sv/h}$;

t ——年照射时间, h/a;

T ——居留因子;

U ——使用因子, 本项目均取 1。

(2) BNCT 辐射工作人员剂量估算

①BNCT 控制室的辐射工作人员受照剂量

硼中子俘获治疗系统运行出束期间, 实验室内无辐射工作人员, 辐射工作人员均在控制室内工作, BNCT 控制室的辐射工作人员受照剂量见下表。

表 11.2-10 BNCT 控制室的辐射工作人员受照剂量一览表

人员类型		关注点处周围 剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年工作 时间 t (h)	居留 因子	年有效剂量 H (mSv)	
BNCT 实验 室 A 辐射工 作人员	实验研究	0.1193	780	1	0.09	
BNCT 实验 室 B 辐射工 作人员	BNCT 实验室 B 中 BNCT 调试	0.1494	30	1	0.0045	0.23
	用户单位 (医疗机 构) BNCT 调试	2.5	30	1	0.075	
	用户单位 (医疗机 构) BNCT 运维	2.5	60	1	0.15	

注: 用户单位 (医疗机构) 硼中子俘获治疗系统的工作场所布局、屏蔽材料及厚度均无法确定。因此, 本评价考虑硼中子俘获治疗系统在用户单位 (医疗机构) 硼中子俘获治疗系统的工作场所进行整机调试和运维运行出束时, 保守考虑控制室内剂量当量率为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

②BNCT 实验室内部活动的辐射工作人员受照剂量

辐射工作人员在 BNCT 实验室 A 内进行小鼠摆位、取出等, 在 BNCT 实验室 B 内进行 BNCT 拆卸、打包, 在用户单位 (医疗机构) 进行 BNCT 拆包、安装, 上述过程中将受到感生放射性核素的照射。根据前文可知, 辐射工作人员在 BNCT 实验室 A 内进行小鼠摆位、取出时, 最大受照剂量为 $3.535\mu\text{Sv/h}$; 在 BNCT 实验室 B 内进行 BNCT 拆卸、打包时, 最大受照剂量为 $2.5\mu\text{Sv/h}$; 在用户单位 (医疗机构) 进行 BNCT 拆包、安装时, 最大受照剂量为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。辐射工作人员在 BNCT 实验室工作的受照剂量见下表。

表 11.2-11 BNCT 实验室内部活动的辐射工作人员受照剂量一览表

人员类型		关注点处周围 剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年工作时 间 t (h)	居留 因子	年有效剂量 H (mSv)	
BNCT 实 验室 A 工 作人员	小鼠摆位、取出等	3.535	260	1	0.92	
BNCT 实 验室 B 辐 射工作人 员	BNCT 实验室 B 中 BNCT 拆卸、打包	2.5	300	1	0.75	1.50
	用户单位（医疗机构） BNCT 拆包、安装	2.5	300	1	0.75	

③小鼠转运过程中辐射工作人员受照剂量

小鼠经中子照射后，由 BNCT 实验室 A 控制室辐射工作人员取出，移交给动物实验场所的辐射工作人员。转运过程包括取出小鼠、装入转运容器等操作，转运过程中辐射工作人员受照剂量见下表。

表 11.2-12 运输过程中辐射工作人员受照剂量一览表

人员类型	关注点处周围 剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年工作时 间 t (h)	居留因 子	年有效剂量 H (mSv)
BNCT 实验室 A 辐射工 作人员	4.45	130	1	0.579

注：周围剂量当量率取 SPF 养殖室室内（距小鼠约 20cm 处）处的剂量率。

④BNCT 辐射工作人员受照剂量汇总

BNCT 辐射工作人员受照剂量见下表。

表 11.2-13 BNCT 辐射工作人员受照剂量一览表

人员类型	年有效剂量 H (mSv)			
	整机出束	感生放射性	小鼠感生放射性	合计
BNCT 实验室 A 辐射工作人员	0.09	0.92	0.579	1.59
BNCT 实验室 B 辐射工作人员	0.23	1.50	/	1.73

根据上表可知，辐射工作人员最大受照剂量约 1.73mSv/a，小于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-2025）规定的年有效剂量管理目标 5mSv/a。

（3）BNCT 实验室周围公众工作人员剂量估算

根据公式 11.2-6，本项目 BNCT 实验室周围区域公众成员及评价范围内代表性环境保护目标年有效剂量估算情况见表 11.2-14。

表 11.2-14 公众年有效剂量估算结果

人员属性	方位	场所名称	最近距离(m)	关注点辐射剂量率($\mu\text{Sv/h}$) *	居留因子	受照时间(h)	年有效剂量(mSv)
公众	西北侧	精密空调室、配电室	紧邻	0.9210	1/16	780	4.49E-02
		车间内部通道	7.6	0.016	1/16	780	7.77E-04
		放射性废物储存间、固体废物暂存间、UPS 间、机械/煤气室、一般垃圾储存间、配电室	10.7	0.008	1/16	780	3.92E-04
		车间内部通道	17.7	0.003	1/16	780	1.43E-04
		休息间、备用间	20.4	0.002	1/16	780	1.08E-04
		动物实验室(细胞实验室、清洁室、养殖室、分析室、数据处理室等)	24.4	0.002	1/4	780	3.02E-04
		办公区	21.4	0.002	1	780	1.57E-03
		车间内部区域	紧邻	1.2017	1/16	780	5.86E-02
	东北侧	物流中心内部道路	3.8	0.083	1/16	780	4.06E-03
		4 号仓库	13.8	0.006	1/16	780	3.08E-04
	东南侧	车间内部区域	紧邻	0.1479	1/8	780	1.44E-02
		物流中心内部道路	6.2	0.004	1/16	780	1.88E-04
	西南侧	车间内部通道	紧邻	0.6412	1/8	780	6.25E-02
		备用间	3.7	0.047	1/16	780	2.28E-03
		车间内部区域	31.7	0.001	1/16	780	3.11E-05

注：*取同侧辐射剂量率最大值后按公式 $H = H_0/R^2$ 计算。

由上表估算结果表明：公众受照的年有效剂量最大为 6.25E-02mSv，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-2025）年有效剂量管理目标 0.1mSv/a。

2、动物实验场所辐射工作人员和公众剂量估算

（1）动物实验场所辐射工作人员剂量估算

①小鼠转运过程中辐射工作人员受照剂量

小鼠经中子照射后，由 BNCT 实验室 A 控制室辐射工作人员取出，移交给动物实验场所的辐射工作人员，工作人员需将 12 只小鼠转运至 SPF 养殖室。转运过程包括搬运至养殖室、放入饲养架等操作，转运过程中辐射工作人员受照剂量见下表。

表 11.2-15 运输过程中辐射工作人员受照剂量一览表

人员类型	周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年工作时间 t (h)	居留因子	年有效剂量 H (mSv)
动物实验场所辐射工作人员	4.45	260	1	1.157

注：周围剂量当量率取 SPF 养殖室室内（距小鼠约 20cm 处）处的剂量率。

②小鼠养殖过程中辐射工作人员受照剂量

本项目每个实验周期中，小鼠经中子照射后需在 SPF 养殖室继续养殖 1 个月（约 4 周）。养殖期间，工作人员每日需进入养殖室进行巡查、喂食、换水、更换垫料等操作。养殖过程中辐射工作人员受照剂量见下表。

表 11.2-16 养殖过程中辐射工作人员受照剂量一览表

人员类型	周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年工作时间 t (h)	居留因子	年有效剂量 H (mSv)
动物实验场所辐射工作人员	4.45	520	1	2.314

注：周围剂量当量率取 SPF 养殖室室内（距小鼠约 20cm 处）处的剂量率。

③小鼠解剖过程中辐射工作人员受照剂量

每个实验周期结束后，需对养殖的小鼠进行解剖取样，解剖过程中辐射工作人员受照剂量见下表。

表 11.2-17 解剖过程中辐射工作人员受照剂量一览表

人员类型	周围剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年工作时间 t (h)	居留因子	年有效剂量 H (mSv)
动物实验场所辐射工作人员	7.28E-07	13	1	9.46E-09

注：周围剂量当量率取解剖室室内（距小鼠约 5cm 处）处的剂量率。

④辐射工作人员受照剂量汇总

辐射工作人员受照剂量汇总见下表。

表 11.2-18 辐射工作人员受照剂量汇总一览表

人员类型	年有效剂量 H (mSv)			
	转运	养殖	解剖	合计
动物实验场所辐射工作人员	1.157	2.314	9.46E-09	3.471

由上表估算结果表明：辐射工作人员的年有效剂量最大为 3.471mSv，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）年有效剂量管理目标 5mSv/a。

（2）动物实验场所公众剂量估算

根据公式 11.2-6，本项目动物实验场所周围区域公众成员及评价范围内代表性环境保护目标年有效剂量估算情况见表 11.2-19。

表 11.2-19 公众年有效剂量估算结果

辐射 工作 场所	方位	场所名称	最近距 离 (m)	关注点辐射 剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$) *	居留 因子	受照时 间 (h)	年有效剂 量(mSv)
SPF 养殖室 1/SPF 养殖室 2	西北侧	污物走廊、预留控制室	紧邻	7.12E-01	1/16	2080	9.26E-02
		分析室 2、数据处理室、预留 CT 室	1.7	1.78E-01	1/4	2080	9.26E-02
		锅炉房、污水处理房等	8.7	9.41E-03	1/16	2080	1.22E-03
		物流中心内部道路	21.0	1.61E-03	1/16	2080	2.10E-04
	东北侧	仓库	紧邻	7.72E-03	1/16	2080	1.00E-03
		物流中心内部道路	5.3	2.75E-04	1/16	2080	3.57E-05
		4 号仓库	15.3	3.30E-05	1/16	2080	4.29E-06
	东南侧	前室	紧邻	2.78E-01	1/16	2080	3.47E-02
		检疫室、污染检查室、公共走廊	2.0	6.95E-02	1/16	2080	8.67E-03
		休息间、备用间	7.5	4.94E-03	1/16	2080	6.42E-04
		车间内部通道	11.0	2.30E-03	1/16	2080	2.99E-04
		放射性废物储存间、固体废物暂存间、UPS 间、机械/煤气室、一般垃圾储存间、配电室	14.1	1.40E-03	1/16	2080	1.82E-04
		车间内部通道	21.0	6.30E-04	1/16	2080	8.20E-05
		精密空调室、配电室	23.9	4.87E-04	1/16	2080	6.33E-05
		仪器室、前室、控制室	23.9	4.87E-04	1	780	3.80E-04
		BNCT 实验室	31.6	2.78E-04	1	300	8.35E-05
	西南侧	清洁设备、仓储准备室	紧邻	1.63E-02	1/16	2080	2.12E-03
		清洁室	5.9	4.68E-04	1/16	2080	6.09E-05
		空调机房、备用间、活化分析室、解剖室、细胞实验室等	13.1	9.50E-05	1/4	2080	4.94E-05
		车间内部通道	25.3	2.55E-05	1/16	2080	3.31E-06
		办公区等	29.0	1.94E-05	1	2080	4.03E-05
解剖室	西北侧	活化分析室	紧邻	6.57E-10	1/4	13	2.14E-12
		空调机房、备用间等	3.9	4.32E-11	1/16	13	3.51E-14
		物流中心内部道路	8.3	9.54E-12	1/16	13	7.75E-15
	东北侧	分析室 2、清洁室	紧邻	6.57E-10	1/4	13	2.14E-12
		清洁设备和仓储准备室、SPF 养殖室、数据处理室、预留 CT 室、污水处理房、锅	7.0	1.34E-11	1/4	13	4.36E-14

		炉房等					
		仓库	22.8	1.26E-12	1/16	13	1.03E-15
		物流中心内部道路	30.0	7.30E-13	1/16	13	5.93E-16
		4号仓库	40.0	4.11E-13	1/16	13	3.34E-16
	东南侧	细胞实验室	紧邻	6.57E-10	1/4	13	2.14E-12
		前室、检疫室、污染检查室、公共走廊	9.8	6.84E-12	1/16	13	5.56E-15
		休息间、备用间	15.9	2.60E-12	1/16	13	2.11E-15
		车间内部通道	19.8	1.68E-12	1/16	13	1.36E-15
		放射性废物储存间、固体废物暂存间、UPS间、机械/煤气室、一般垃圾储存间、配电室	22.5	1.30E-12	1/16	13	1.05E-15
		车间内部通道	29.6	7.50E-13	1/16	13	6.09E-16
		精密空调室、配电室	32.6	6.18E-13	1/16	13	5.02E-16
		仪器室、前室、控制室	32.6	6.18E-13	1	13	8.04E-15
		BNCT实验室	40.3	4.05E-13	1	13	5.26E-15
	西南侧	车间内部通道	紧邻	6.57E-10	1/16	13	5.34E-13
		办公区等	4.3	3.55E-11	1	13	4.62E-13
		车间内部区域	31.7	6.54E-13	1/16	13	5.31E-16

注：*取同侧辐射剂量率最大值后按公式 $H = H_0/R^2$ 计算。

由上表估算结果表明：公众受照的年有效剂量最大为 9.29E-02mSv，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）年有效剂量管理目标 0.1mSv/a。

3、公众剂量叠加估算

根据表 11.2-14 和表 11.2-19，本项目周围区域公众成员年有效剂量叠加估算情况见表 11.2-20。

表 11.2-20 公众年有效剂量叠加估算结果

人员属性	场所名称	年有效剂量（mSv）			
		BNCT 实验室	动物实验场所-养殖	动物实验场所-解剖	合计
公众	精密空调室、配电室	4.49E-02	6.33E-05	5.02E-16	4.50E-02
	车间内部通道	7.77E-04	8.20E-05	6.09E-16	8.59E-04
	放射性废物储存间、固体废物暂存间、UPS间、机械/煤气室、一般垃圾储存间、配电室	3.92E-04	1.82E-04	1.05E-15	5.74E-04
	车间内部通道	1.43E-04	2.99E-04	1.36E-15	4.42E-04

休息间、备用间	1.08E-04	6.42E-04	2.11E-15	7.50E-04
动物实验室（细胞实验室、清洁室、养殖室、分析室、数据处理室等）	3.02E-04	9.26E-02 （取动物实验室最大值）	2.14E-12 （取动物实验室最大值）	9.29E-02
办公区	1.57E-03	4.03E-05	4.62E-13	1.61E-03
BNCT 实验室东北侧车间内部区域	5.86E-02	8.35E-05 （取 BNCT 实验室数据）	5.26E-15 （取 BNCT 实验室数据）	5.87E-02
东北物流中心内部道路	4.06E-03	3.57E-05	5.93E-16	4.10E-03
4 号仓库	3.08E-04	4.29E-06	3.34E-16	3.12E-04
BNCT 实验室东南侧车间内部区域	1.44E-02	/	/	1.44E-02
东南物流中心内部道路	1.88E-04	/	/	1.88E-04
西南车间内部通道	6.25E-02	3.31E-06	5.34E-13	6.25E-02
备用间	2.28E-03	4.03E-05 （取办公区数据）	4.62E-13 （取办公区数据）	2.32E-03
车间内部区域	3.11E-05	/	5.31E-16	3.11E-05
锅炉房、污水处理房等	/	1.22E-03	4.36E-14	1.22E-03
西北侧物流中心内部道路	/	2.10E-04	7.75E-15	2.10E-04

由上表估算结果表明：公众受照的年有效剂量最大为 9.29E-02mSv，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-2025）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）年有效剂量管理目标 0.1mSv/a。

11.2.4 放射性三废环境影响分析

1、活化废气

根据前文表 9 可知，硼中子俘获治疗系统单次连续整机调试出束最长时间不超过 3h，BNCT 实验室 A 放射性同位素 ^{41}Ar 活度不大于 $6.66 \times 10^7 \text{Bq}$ 、活度浓度为 8.60Bq/g ，BNCT 实验室 B 放射性同位素 ^{41}Ar 活度不大于 $7.87 \times 10^7 \text{Bq}$ 、活度浓度为 6.78Bq/g ，均远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中 ^{41}Ar 的豁免活度（ $1 \times 10^9 \text{Bq}$ ）、豁免活度浓度（ 100Bq/g ），对环境的影响可忽略。

本项目 BNCT 实验室内设置机械通排风系统，室内废气经抽排风装置抽排至 3 号仓库屋顶并高出屋顶 2m 的排气筒有组织排放，排放口末端设置活性炭过滤装置。此外，硼中子俘获治疗系统停机运行后持续通风 10min，直至 BNCT 实验室内辐射剂量低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后方可进入，以减少放射性废气对辐射工作人员的影响。

综上，气态放射性废物经排风管道排放口引至 3 号仓库楼顶，并设置有活性炭吸附装置，对周围环境和公众影响很小。

2、放射性废水

（1）活化废水

根据前文表 9 可知，本项目单次排放的活化冷却水中活化核素 ^3H 的活度不大于 2.75Bq ，活化核素 ^3H 的活度浓度不大于 0.229Bq/L ($2.29\times 10^{-4}\text{Bq/g}$)，低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中 ^3H 的豁免活度 ($1.0\times 10^9\text{Bq}$)、豁免活度浓度 ($1\times 10^6\text{Bq/g}$)，对周围环境的影响可忽略。此外，冷却水中产生的活化核素总 β 放射性远小于 10Bq/L ，满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中“第一类污染物最高允许排放浓度，即总 α 放射性 $\leq 1\text{Bq/L}$ ，总 β 放射性 $\leq 10\text{Bq/L}$ ”的排放要求。

活化冷却废水每月最多排放 1 次，每次排放量不超过 12L，则单次排放量、月排放量均低于 2.75Bq （放射性同位素 ^3H ），小于 1ALImin ($1.11\times 10^9\text{Bq}$)、 10ALImin ($1.11\times 10^{10}\text{Bq}$)。因此，本项目产生的活化冷却废水在专用容器中内暂存 30 天后，取样检测，确认废水中各放射性核素满足要求后纳管（活度满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中放射性废液排放活度小于 1ALImin 和单月排放活度小于 10ALImin ，同时满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中排放总 β 浓度不大于 10Bq/L 的要求）。

综上，本项目硼中子俘获治疗系统运行产生的放射性废水对周围环境影响不大，在可接受范围内。

（2）动物实验放射性废水

放射性废水主要为含有放射性核素的小动物排泄物（小动物排泄物分类收集，按照放射性固废处理）、操作过程中去污废水和场所清洗废水。废水分别通过专用管道收集至高密度聚乙烯（HDPE）专用容器，废水在专用容器中密闭暂

存，暂存时间不少于 30 天，暂存期满后对废水进行取样监测，确认废水中各放射性核素满足要求后纳管（活度满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中放射性废液排放活度小于 1ALImin 和单月排放活度小于 10ALImin，同时满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中排放总 β 浓度不大于 10 Bq/L 的要求）。

3、放射性固废

（1）活化固废

根据前文表 9 可知，本项目产生的废活化中子发生器、废活性炭均存放在铅容器内，铅容器放置在放射性废物储存间内，放射性废物储存间屏蔽体外的辐射剂量将更低，对周围活动人员的影响不大。废活化中子发生器、废活性炭在放射性废物储存间内暂存衰变，直至低于清洁解控水平后作为一般固废交物资公司回收处理；若长时间无法清洁解控，待核技术利用工作场所退役时送至有资质的单位处置。

（2）动物实验放射性固废

开展动物实验时，工作人员操作过程会产生手套、口罩、一次性垫纸、注射器、吸水纸、棉签、棉球以及含有放射性核素的小白鼠排泄物等放射性固废，预计日产生量约为 0.4 kg/d，则年产生量为 100kg；本项目预计每年处置经中子照射的小鼠约 156 只，按平均每只 30g 计算，则动物尸体年产生量约为 4.68 kg/a。

动物实验工作场所设置废物衰变桶，手套、口罩、一次性垫纸、注射器、吸水纸、棉签、棉球以及含有放射性核素的小白鼠排泄物等放射性固废收集放置于衰变桶中，暂存至低于清洁解控水平。动物尸体暂存在冰柜中，暂存至其放射性比活度低于相应核素的解控水平。动物实验放射性固废暂存时间超过 30 天，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 0.8Bq/cm²，可对废物清洁解控并作为医疗废物进行处理。

综上所述，本项目硼中子俘获治疗系统运行产生的放射性固废均得到了合理处置，对周围环境影响不大，在可接受范围内。

11.2.4 非放射性污染环境影响分析

1、废气

硼中子俘获治疗系统运行时，加速器产生的束流与空气相互作用会产生臭氧

(O₃)和氮氧化物(NO_x),臭氧和二氧化氮的室内饱和浓度较低。本项目 BNCT 实验室内设置机械通排风系统,室内废气经抽排风装置抽排至 3 号仓库屋顶并高出屋顶 2m 的排气筒有组织排放,排放口末端设置活性炭过滤装置。

臭氧和氮氧化物排入大气环境后,经自然分解,可达标排放,对周围环境影响较小。

2、废水

本项目产生的非放射性废水主要为生活污水,生活污水依托现有化粪池预处理后排入市政污水管网,对周围水体环境影响较小。

3、固体废物

本项目产生的生活垃圾和包装废物收集后统一委托环卫清运,不会对周围环境造成二次污染。

11.3 事故影响分析

11.3.1 辐射事故分级

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例(2019 年修改)》第四十条规定,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,见表 11.3-1。

表 11.3-1 辐射事故等级划分表

事故等级	事故类型
特别重大辐射事故	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	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	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	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。

11.3.2 BNCT 风险识别及防范措施

1、风险识别

BNCT 装置运行过程中,可能发生的辐射环境风险事故主要源于设备自身的安全联锁系统失效或操作失误。根据装置特点及同类项目运行经验,可能的风险情景包括:

①违规启动误照：在实验室内人员未完全清场的情况下，操作人员违反安全操作规程，通过非法手段（如泄露的登录密码、未注销的登录状态等）绕过安全联锁系统，强行启动 BNCT 装置出束。此时滞留在室内的人员将直接暴露于高强度的瞬发中子与 γ 混合辐射场中，可能在极短时间内接受超过年剂量限值的大剂量外照射。

②联锁失效误入：当人员通道的安全联锁装置或声光报警系统发生故障时，BNCT 装置在运行期间，无关人员可能误开防护门进入实验室。进入人员将立即受到室内贯穿能力极强的中子及 γ 射线的全方位照射。

③门-机联锁失效：若门-机联锁系统完全失效，即便防护门未完全关闭或被意外开启，BNCT 装置仍能启动或维持出束状态。这将导致中子与 γ 射线通过门缝直接泄漏，对门外通道及相邻区域的活动人员造成定向照射，可能导致非预期区域的剂量率显著升高。

④活化辐射误入：在调试或研究运行结束后，室内因中子活化存在较强的剩余 γ 辐射场。若人员在剂量率未降至预定安全水平前即进入，将接受来自活化结构、设备及空气的持续性 γ 外照射。

⑤ 操作权限滥用：因操作人员未及时注销控制室操作界面的登录状态，或被非授权人员获取登录密码，可能导致未经培训或无资质人员违规启动装置，产生误照风险。

2、防范措施

为避免误照射事故的发生及发生后能采取有效的防范措施，建设单位需做好以下防范措施：

（1）定期测试和维护辐射防护安全系统，确保其正常运行；每次开机出束前，都需确认安全联锁设施的有效性。同时加强对工作人员的辐射安全宣传教育，确保各项操作规程得到有效地贯彻和落实。

（2）辐射工作人员做好 BNCT 的稳定性和状态检测，使 BNCT 始终保持在最佳状态下工作。

（3）辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。

(4) BNCT 发生故障而紧急停机后,在未查明原因和维修结束前,不得重新启动装置。检查系统停止运行时,操作人员应立即注销控制室操作界面的登录账号,并确保密码未泄露。如需临时离岗,应锁定操作界面,防止他人误操作。

(5) 调试和维修时,应确保 BNCT 装置处于断电状态,并经控制室操作人员确认已退出操作界面。调试和维修人员进入实验室前,应确认控制室操作界面处于注销或锁定状态,防止远程误启动。维修工作结束后,由辐射安全负责人重新授权登录方可恢复运行。

(6) 出入 BNCT 实验室或用户单位(医疗机构)的硼中子俘获治疗系统使用场所,必须佩戴有效的剂量报警仪,超过报警阈值报警时第一时间离开工作场所。

(7) 辐射工作场所应设置明显的警示标识。加强工作人员的教育与培训,正确佩戴个人剂量计,并定期检测。如发现超剂量,应进行调查,或改善防护条件或措施。

11.3.3 动物实验风险识别及防范措施

1、风险识别

动物实验场所(SPF 养殖室、解剖室)涉及受照小鼠的饲养、转运、解剖等环节,可能发生的辐射环境风险主要包括:

①工作人员体表污染:工作人员在未正确佩戴或未佩戴足够个人防护装备的情况下,长时间近距离操作具有感生放射性的实验动物,可能导致其皮肤、衣物等受到放射性核素的表面玷污,进而增加内照射的潜在风险。

②活体动物逃逸扩散污染:经中子照射后具有感生放射性的活体动物从转运过程、饲养笼或操作区内逃逸,在实验室内或公共区域活动,通过其排泄物、体表接触等途径,将放射性污染扩散至原本洁净的非控制区域。

③放射性固体废物泄漏:盛装放射性动物尸体或被污染耗材的包装物(如塑料袋、密封容器)发生破损或意外倾倒,导致其内部放射性物质泄漏,直接污染地面、台面、设备及其他物品表面。

(2) 防范措施

①养殖笼具采用封闭式设计,笼盖设置锁扣,防止小鼠自行打开;转移小鼠时使用专用带盖转运容器;在养殖室、解剖室操作时,确保门窗关闭,防止逃逸

小鼠外窜。

②解剖操作在不锈钢托盘上进行，操作台面铺设一次性防污垫，操作结束后连同污染物一并收集作为放射性废物处理。

③解剖操作人员佩戴一次性手套、口罩、防护服、鞋套等个人防护用品，必要时佩戴双层手套。

④每日操作前、后对养殖室、解剖室的工作台面、地面、门把手等进行表面污染监测，表面污染控制水平参照 GB 18871-2002 附录 B；发现污染时立即进行去污处理，去污后复测确认达标。

⑤制定小鼠逃逸应急预案，配备捕捉工具（如捕鼠网、手套）和表面污染监测仪，一旦发生逃逸立即启动应急响应。

⑥工作人员均佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

11.3.4 应急处置预案

对以上可能发生的事风险，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和防护管理办法》等有关规定，建设单位应制定辐射事故应急方案，并定期进行演练，及时整改，同时还应配置必要的应急装备、器材以及应急资金。当发生或发现辐射事故，当事人应立即向单位的辐射安全负责人和法定代表人报告。当事故发生时，项目部应立即启动本单位的辐射事故应急预案，采取必要防范措施，并填写《辐射事故初始报告表》，向生态环境主管部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向卫生主管部门报告。如发生放射源被盗的事故，则还须向公安部门报告。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十五条、第十六条第一款：设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

12.1.1 机构设置情况

建设单位为首次开展核技术利用项目，应根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规的要求成立辐射安全与环境保护管理机构，管理工作主要涉及以下几个方面：

①全面负责辐射安全防护管理工作，制定辐射防护安全管理制度。

②负责环保手续办理及相关事项，如许可证申领、人员培训、个人剂量送检、职业健康体检等，并做好个人剂量计监测档案、健康体检档案、培训档案的管理。

③负责日常防护设备维护，制定辐射事故应急预案，编制并按要求报送辐射安全年度评估报告。

12.1.2 辐射工作人员管理

1、个人剂量监测

本项目拟配备辐射工作人员 6 名。建设单位为辐射工作人员配置个人剂量计。个人剂量计常规监测周期一般为 1 个月，最长不应超过 3 个月送检，并建立个人剂量档案，加强档案管理。按照《放射工作人员职业健康管理辦法》第二十七条规定，放射工作单位应当为放射工作人员建立并终生保存职业健康监护档案。

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》的要求，自 2020 年 1 月 1 日起，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当在国家核技术利用辐射安全与防护培训平台（网址：<http://fjsh.mee.gov.cn>）报名并参加考核，考核合格者可取得核技术利用辐射安全与防护考核成绩报告单，报告单全国有效，有效期 5 年。2020 年 1 月 1 日前

已取得的原培训合格证书在有效期内继续有效。

本项目辐射工作人员上岗前，应参加辐射安全与防护培训，取得辐射安全培训合格证书（BNCT 辐射工作人员考核类别：放射治疗；动物实验工作场所辐射工作人员考核类别：科研、生产及其他），持证上岗。

3、辐射工作人员职业健康体检

辐射工作人员上岗前，应当进行上岗前的职业健康检查，符合辐射工作人员健康标准的，方可参加相应的辐射工作。上岗后辐射工作人员应定期进行职业健康检查，两次检查的时间间隔不超过 2 年，必要时可增加临时性检查。辐射工作人员脱离放射工作岗位时，放射工作单位应当对其进行离岗前的职业健康检查。

本项目辐射工作人员在上岗前，建设单位应组织其进行岗前职业健康检查，并建立个人健康档案，符合辐射工作人员健康标准的，方可参加相应的辐射工作。

12.1.3 年度评估情况

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》中第十二条规定，建设单位应对本单位射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向原发证机关提交上一年度的评估报告，并在全国核技术利用辐射安全申报系统（网址：<http://rr.mee.gov.cn/rsmsreq/login.jsp>）进行网上申报。

安全和防护状况年度评估报告应当包括下列内容：

- （一）辐射安全和防护设施的运行与维护情况；
- （二）辐射安全和防护制度及措施的制定与落实情况；
- （三）辐射工作人员变动及接受辐射安全和防护知识教育培训情况；
- （四）射线装置台账；
- （五）场所辐射环境监测和个人剂量监测情况及监测数据；
- （六）辐射事故及应急响应情况；
- （七）核技术利用项目新建、改建、扩建和退役情况；
- （八）存在的安全隐患及其整改情况；
- （九）其他有关法律、法规规定的落实情况。

年度评估发现安全隐患的，应当立即整改。

12.2 辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》规定，生产、销售、使

用射线装置的单位应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。

操作规程：明确操作人员的资质条件要求、操作过程中采取的具体防护措施及步骤，明确加速器的操作步骤，工作人员佩戴个人剂量计，携带个人剂量报警仪或检测仪器，避免事故发生。

岗位职责：明确管理人员、操作人员的岗位责任，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任，并层层落实。

辐射防护和安全保卫制度：制定严格的组织责任、人员资质管理、全流程管控（特别是双人双锁）以及应急机制，以保障人员与环境免受辐射危害。

设备检修维护制度：制定 BNCT 装置及辅助系统的年度检修计划，填写检修记录，内容包括检修日期、检修内容、更换部件、检修人员等信息。

使用登记制度：建立 BNCT 使用台账，记录使用日期、使用人、用途等信息；动物实验场所的小鼠出入库进行登记，记录小鼠数量、照射日期、养殖时间、解剖日期等信息。

培训计划：明确培训对象、内容、周期、方式以及考核的办法等内容，内外结合，加强对培训档案的管理，做到有据可查。

监测方案：明确监测频次和监测项目，主要包括个人剂量监测和工作场所监测，监测方式由企业自主监测与有资质单位开展的年度监测。监测结果妥善保存，定期上报生态环境主管部门。

辐射事故应急措施：明确应急组织体系与职责、应急响应程序、应急保障、后期处置等内容，确保在发生辐射事故时，能够迅速、有效、有序地采取行动，控制事态，减轻事故后果，保障人员、公众和环境安全，并按规定报告。

12.3 辐射监测

12.3.1 辐射工作人员个人剂量监测

建设单位应严格按照国家关于个人剂量监测和健康管理规定，为辐射工作人员配备个人剂量计。同时，应根据每年的工作人员的变化增加个人剂量计，并进行个人剂量监测（1 季度 1 次）和职业健康检查（不少于 1 次/2 年），建立个人剂量监测档案和职业健康监护档案，并为工作人员保存职业照射记录。

建设单位须建立辐射工作人员个人剂量监测档案，包括姓名、工作单位、监

测周期、监测结果等信息，个人剂量监测档案应保存。

12.3.2 辐射工作场所监测

1、日常监测

(1) 实时监测

建设单位拟配置 1 套固定式辐射剂量仪固定式剂量监测系统，包括 4 个场所 γ 探测器和 4 个场所中子剂量监测仪，可同时监测中子辐射剂量水平、光子辐射剂量水平。BNCT 实验室 A 和实验室 B 内布置 2 个场所 γ 探测器和 2 个场所中子剂量监测仪，BNCT 控制室内布置 2 个场所 γ 探测器和 2 个场所中子剂量监测仪。

固定式辐射剂量仪的任一监测均会在控制室的显示器中进行提示。此外，BNCT 控制室布置的 2 个场所 γ 探测器和 2 个场所中子剂量监测仪，接入安全连锁系统。监测仪具备实时剂量率显示及超阈值声光报警功能，通过硬连线方式接入连锁 PLC 系统。当监测值超过设定阈值（如 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ）时，系统自动触发连锁，装置发出声光报警，并自动切断加速器束流。

表 12.3-1 场所监测项目和监测内容一览表

监测仪器	监测项目	监测内容
场所 γ 探测器	γ 辐射剂量率	连续监测 BNCT 实验区及控制室等关键区域的 γ 辐射剂量率水平，实时显示、超阈值报警
场所中子剂量监测仪	中子剂量当量率	连续监测 BNCT 实验区的中子辐射剂量当量率水平，实时显示、超阈值报警

(2) 常规定期自检监测

建设单位拟配置 1 台便携式 X- γ 剂量率仪、2 台表面污染监测仪，用于工作场所及周围环境的辐射剂量监测、表面放射性污染。

2、年度监测

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的相关规定，使用放射性同位素和射线装置的单位应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托环境监测机构进行监测。

建设单位将定期委托有资质单位对核技术利用区域及其周围环境进行辐射环境监测，并建立监测技术档案，以确保辐射工作人员和公众的辐射安全。

3、竣工环境保护验收监测

本项目建成投运前，建设单位委托有资质的单位对辐射工作场所的放射性水平进行竣工环境保护验收监测。验收监测时，硼中子俘获治疗系统运行至最大的辐射发射率状态，并在辐射防护人员的参加下，对有关区域进行全面的辐射水平测量，做出辐射安全状况的评价。

4、监测计划

针对本项目运行后的监测，建设单位制定了辐射监测计划（表 12.3-1），并将每次监测结果记录存档备查。

表12.3-1 工作场所监测计划一览表

监测类别	工作场所	监测因子	监测频度	监测设备	监测范围	监测方法类型
日常监测	BNC T实验室	X-γ周围剂量当量率、中子剂量当量率	1次/季度	按照国家规定进行计量检定	四周屏蔽墙外30cm处、操作位、防护门门缝处、辐射工作场所正上方、人员居留较长的位置等	自行监测/委托监测
年度监测			1次/年	按照国家规定进行计量检定		委托监测
验收监测			安装调试正常后	按照国家规定进行计量检定		委托监测
日常监测	动物实验场所	β表面放射性污染	1次/季度	按照国家规定进行计量检定	操作台面、设备表面、墙壁和地面，放射性废物桶和包装袋表面等	自行监测
年度监测			1次/年	按照国家规定进行计量检定		委托监测
验收监测			安装调试正常后	按照国家规定进行计量检定		委托监测
日常监测	动物实验场所、放射性废物储存间	X-γ周围剂量当量率	1次/季度	按照国家规定进行计量检定	四周屏蔽墙外30cm处、操作位、防护门门缝处、辐射工作场所正上方、人员居留较长的位置等	自行监测
年度监测			1次/年	按照国家规定进行计量检定		委托监测
验收监测			安装调试正常后	按照国家规定进行计量检定		委托监测
固废监测	/	放射性比活度、X-γ周围剂量当量率	处置前	按照国家规定进行计量检定	/	委托监测
废水监测	/	总β	排放前	按照国家规定进行计量检定	/	委托监测
个人剂量监测		个人剂量当量	1次/季度	个人剂量计，委托有资质单位监测	所有辐射工作人员	委托监测

12.3.3 环保措施竣工验收

建设应根据核技术利用项目的开展情况，按照《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评〔2017〕4号）《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》（HJ1326-2023）的相关要求，对配套建设的环境保护设施进行验收，自行或委托有能力的技术机构编制验收报告，并组织由设计单位、施工单位、环境影响报告表编制机构、验收监测（调查）报告编制机构等单位代表以及专业技术专家等成立的验收工作组，采取现场检查、资料查阅、召开验收会议等方式开展验收工作。建设项目配套建设的环境保护设施经验收合格后，其主体工程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。

12.4 辐射事故应急

12.4.1 应急预案制定要求

为了加强对辐射装置安全管理，确保仪器设备的安全应用，保障公众健康，保护环境，建设单位根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》的规定，制定《辐射事故应急预案》。建设单位应定期开展辐射事故应急演练，并对演练结果进行总结，及时对辐射事故应急预案进行完善和修订。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》中第四十一条的规定，结合建设单位的实际情况和事故工况分析，须建立的辐射事故应急预案应当包括以下内容：

- （1）应急机构和职责分工（具体人员和联系电话）；
- （2）应急人员的组织、培训以及应急装备、资金、物资准备；
- （3）辐射事故分级与应急响应措施；
- （4）辐射事故的调查、报告和处理程序。

12.4.2 辐射事故上报要求

发生辐射事故时，事故单位应当立即启动本单位的辐射事故应急预案，采取必要的防范措施并在2小时内填报《辐射事故初始报告表》。对于发生的误照射事故，应首先向当地生态环境部门报告，造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告，当发生人为破坏行为时，应及时向公安部门报备。

12.4.3 培训演习计划

（1）制定辐射事故应急培训计划方案，每年对与辐射事故应急有关的人员实施培训和演练，以验证该预案的有效性。每年应至少演练 1 次，演练内容包括放射事故应急处理预案的可操作性、针对性、完整性，演习报告存盘。可提出将每年用于辐射应急工作的（包括应急装备、应急技术支持、培训及演习等）支出，纳入部门预算。

（2）公司应根据实际情况定期组织修订放射事故应急预案，使其不断完善健全。

（3）公司应将本单位的应急预案报所在地生态环境主管部门备案，开展隐患排查并及时消除隐患，防止发生事故。

表 13 结论与建议

13.1 结论

13.1.1 项目概况

为了完善我国癌症治疗手段，给肿瘤患者提供更高质量的放疗服务能力，杭州硼中修元科技有限公司租用杭州空港新城保税物流中心有限公司 3 号保税仓库实施“临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产 10 台 BNCT 设备项目”（以下简称“本项目”），主要布置硼中子俘获治疗系统实验区、动物实验区以及办公生活区。该项目采用零库存订单模式，预计硼中子俘获治疗系统生产规模不超过 10 台/年。

13.1.2 辐射安全与防护分析结论

1、辐射安全防护措施结论

本项目 BNCT 实验室、放射性废物储存间均设计了足够厚度的屏蔽体，可保证屏蔽体外周围剂量当量率满足辐射防护的要求。本项目 BNCT 装置的安全联锁系统不设置独立的物理联锁钥匙，而是通过以下等效安全联锁措施替代物理钥匙的认证功能：拟配置门机联锁装置，任一防护门开启，硼中子俘获治疗系统无法运行出束或停止出束；BNCT 实验室及控制室拟设置急停按钮，触发后，硼中子俘获治疗系统停止出束。拟设置 1 套固定式剂量监测系统，用于 BNCT 实验室内外的辐射剂量监测；拟设置警示装置、视频监控系统以及警示标志电离辐射用于警告人员远离。此外，拟配置便携式 X- γ 剂量率仪、个人剂量计、个人剂量报警仪等设备。因此，本项目采取的辐射安全与防护措施满足辐射防护的要求。

2、辐射安全管理结论

建设单位拟成立专门的辐射安全与环境保护管理机构，明确了管理人员的职责，并将加强监督管理。建设单位拟制定包括《辐射事故应急预案》在内的一系列管理制度，并适时进行修订、完善。建设单位应根据本单位核技术应用项目开展的情况，不断对各项管理制度进行调整、补充和完善，并在以后的实际工作中严格落实执行。

13.1.3 环境影响分析结论

1、电离辐射

(1) 硼中子俘获治疗系统整机运行出束时, BNCT 实验室各防护门外、各区域墙外的最大剂量率和周剂量率均满足《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021) 中的相关要求。

(2) ①冷却时间 0 s 时, 实验室内最大剂量率为 $9.562 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, 远低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$; 但 BNCT 装置内最大剂量率高达 $2.183 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$, 装置屏蔽门口为 $5.804 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, 此时严禁人员进入 BNCT 装置内。②冷却时间 5min 时, 实验室内最大剂量率降至 $9.225 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, BNCT 装置屏蔽门口降至 $2.252 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, 装置内最大剂量率降至 $3.535 \mu\text{Sv/h}$ 。此时实验室内环境辐射水平已低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$, 装置内大部分区域剂量率低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$, 仅在中子发生器区域靠近地面位置存在局部热点。③冷却时间 1 h 时, 实验室内最大剂量率降至 $8.791 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, BNCT 装置屏蔽门口降至 $1.922 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$, 装置内最大剂量率降至 $2.474 \mu\text{Sv/h}$, 该值已低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 的剂量率参考控制水平, 此时装置内所有区域剂量率均满足安全限值。④实验室 B 感生放射性的安全管控可参照实验室 A 的要求执行, 即冷却时间达到 5 min 后人员可短时进入实验室操作, 冷却 1 h 后装置内所有区域的剂量率均低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 安全限值, 允许人员正常进入。

(3) 经距离衰减及储存间墙体、防护门、顶棚的屏蔽作用后, 储存间墙外、门外及顶棚外 30cm 处的周围剂量当量率均低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 的剂量率参考控制水平。因此, 放射性废物储存间对周围环境的辐射影响可接受。

(4) 动物实验场所墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率均小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$, 能够满足《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 相关剂量率要求。实际上, 小鼠在养殖过程中, 由于衰变作用导致小鼠体内核素的活度不断减少, 因而对墙外或门外的辐射影响也不断降低。

(5) 辐射工作人员最大受照剂量均小于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-2025)《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 规定的年有效剂量管理目标 5mSv/a ; 公众受照的年有效剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-2025)《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188-2021) 年有效剂量管理目标 0.1mSv/a 。

2、放射性三废

本项目 BNCT 实验室内设置机械通排风系统，室内废气经抽排风装置抽排至 3 号仓库屋顶并高出屋顶 2m 的排气筒有组织排放，对周围大气环境影响较小。

本项目产生的活化冷却废水在专用容器中内暂存 30 天后，取样检测，确认废水中各放射性核素满足要求后纳管（活度满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中放射性废液排放活度小于 1ALlmin 和单月排放活度小于 10ALlmin，同时满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中排放总 β 浓度不大于 10 Bq/L 的要求）。

本项目产生的废活化中子发生器、废活性炭均存放在铅容器内，铅容器放置在放射性废物储存间内进行衰变处理，待其低于清洁解控水平后作为一般固体废物，交物资公司回收处理；若长时间无法清洁解控的放射性固废，待核技术利用工作场所退役时，送至有资质的单位处置。

动物实验工作场所设置废物衰变桶，手套、口罩、一次性垫纸、注射器、吸水纸、棉签、棉球以及含有放射性核素的小白鼠排泄物等放射性固废收集放置于衰变桶中，暂存至低于清洁解控水平。动物尸体暂存在冰柜中，暂存至其放射性比活度低于相应核素的解控水平。动物实验放射性固废暂存时间超过 30 天，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， β 表面污染小于 0.8Bq/cm²，可对废物清洁解控并作为医疗废物进行处理。

综上所述，本项目产生的放射性废物均得到了合理处置，对周围环境影响不大。

3、非放射性污染

（1）废气

硼中子俘获治疗系统运行时，加速器产生的束流与空气相互作用会产生臭氧（O₃）和氮氧化物（NO_x），臭氧和氮氧化物排入大气环境后，经自然分解，可达标排放，对周围环境影响较小。

（2）废水

本项目产生的非放射性废水主要为生活污水，生活污水依托现有化粪池预处理后排入市政污水管网，对周围水体环境影响较小。

（3）固体废物

本项目产生的生活垃圾和包装废物收集后统一委托环卫清运，不会对周围环境造成二次污染。

13.1.4 可行性分析结论

1、产业政策符合性

根据《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，本项目属于“第一类鼓励类 六、核能—4、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”和“第一类鼓励类 十三、医药-4、高端医疗器械创新发展：新型基因、蛋白和细胞诊断设备，新型医用诊断设备和试剂，高性能医学影像设备，高端放射治疗设备，急危重症生命支持设备，人工智能辅助医疗设备，移动与远程诊疗设备，高端康复辅助器具，高端植入介入产品，手术机器人等高端外科设备及耗材，生物医用材料、增材制造技术开发与应用”，符合国家产业政策。

2、实践的正当性

硼中子俘获治疗作为最先进的肿瘤治疗手段，大大提高了患者的治愈率，“硼中子捕捉治疗系统及其靶向药物”列入《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》（2016 版）生物医学工程产业的“先进治疗设备及服务”条目。本项目实施后可推动国内加速器硼中子俘获治疗的发展，为国内癌症病人提供更多更优质的治疗选择。

本项目在实践过程中采取了可靠的辐射防护措施，对周围环境、本项目辐射工作人员和公众造成的辐射影响满足国家辐射防护安全标准的要求，其所获利益远大于可能因辐射实践所造成的损害及项目辐射安全与防护投入的代价，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于辐射防护“实践正当性”的要求。

3、选址合理性

本项目位于浙江省杭州市萧山区靖江街道杭州保税物流中心（保税大道）3 号仓库，周围 50m 范围内无医院、居民点、学校等环境敏感区分布，无环境制约因素。此外，本项目 BNCT 实验区相对独立，均未与办公区等人流量较大的区域紧邻，且 BNCT 实验室、放射性废物储存间均拟建设足够的实体屏蔽设施，并拟采取完善的辐射安全防护措施。因此，从辐射防护角度，因此本项目的选址

是合理的。

4、“杭州市生态环境分区管控动态更新方案”符合性

根据《杭州市生态环境分区管控动态更新方案》，本项目所在地属于萧山区萧山城区产业集聚重点管控单元2（ZH33010920014），属于重点管控单元。本项目建设符合杭州市生态环境分区管控动态更新方案要求，不涉及生态保护红线，符合环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单的要求，满足“三线一单”的要求。

5、“三区三线”符合性

根据“杭州临空经济示范区三区三线示意图”，项目所在地在城镇开发边界范围内，不涉及生态保护红线及永久基本农田。本项目的建设符合“三区三线”管控要求。

6、项目可行性结论

综上所述，临空经济示范区杭州硼中修元科技有限公司年产10台BNCT设备项目选址符合国家相关法律法规。建设单位在落实本报告提出的各项污染防治措施后，其辐射工作场所辐射安全措施及安全管理措施满足从事相应辐射活动的要求，辐射工作人员和公众年有效剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-2025）的要求，营运期对周围环境产生的辐射影响在可接受范围内，因此本项目运行时对周围环境的影响能符合辐射环境保护的要求，故从辐射环境保护角度论证，该项目的建设和运行是可行的。

13.2 建议与承诺

13.2.1 建议

- 1、应结合工作实际情况对辐射安全管理制度进行不断修改和完善；
- 2、每年定期开展辐射事故应急演练，并对演练结果进行总结，及时对辐射事故应急预案进行完善和修订；
- 3、应加强辐射安全教育培训，提高职业工作人员对辐射防护的理解和执行辐射防护措施的自觉性，杜绝放射性事故的发生。

13.2.2 承诺

- 1、承诺将根据本评价报告和生态环境主管部门的要求落实相应的污染防治措施和管理要求。

2、环评报批并建成后，公司应及时向生态环境主管部门申领辐射安全许可证。

3、承诺在本项目正式运行前根据《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》，在规定的验收期限内（一般不超过3个月），对配套建设的环境保护设施进行验收，编制验收报告。

4、承诺严格执行辐射监测计划，发现隐患及时整改；对门~机联锁装置、警示灯联锁装置等防护设施进行经常性检查，发现防护设施故障或失灵应立即维护、修复。

