

核技术利用建设项目
基于强流直线加速器的 BNCT 装备
研发及临床研究
环境影响报告表
(公示版)

建设单位：中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司
环评单位：重庆宏伟环保工程有限公司
编制时间：2024 年 9 月



核技术利用建设项目

基于强流直线加速器的 BNCT 装备

研发及临床研究

环境影响报告表



建设单位名称：中核医疗科技（重庆）有限公司

建设单位法人代表（签名或盖章）：



通讯地址：重庆市璧山区璧泉街道双星大道 50 号 1 幢 7-6

邮编：402760

联系人：胡银国

电子邮箱：976223104@qq.com

联系电话：150*****6

编制单位和编制人员情况表

项目编号	en9p3l		
建设项目名称	基于强流直线加速器的BNCT 装备研发及临床研究		
建设项目类别	55—172核技术利用建设项目		
环境影响评价文件类型	报告表		
一、建设单位情况			
单位名称（盖章）	中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司		
统一社会信用代码	91500120MACPCY173X		
法定代表人（签章）	钟俊晴		
主要负责人（签字）	孙新健		
直接负责的主管人员（签字）	胡银国		
二、编制单位情况			
单位名称（盖章）	重庆宏伟环保工程有限公司		
统一社会信用代码	915001126913004062		
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
任洪文	2016035550350000003511550220	BH001038	任洪文
2 主要编制人员			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
赵蕾	项目基本情况、放射源、非密封放射性物质、射线装置、废弃物、评价依据、保护目标与评价标准、环境质量和辐射现状、项目工程分析与源项、辐射安全与防护、环境影响分析、辐射安全管理、结论及建议	BH024400	赵蕾

表 1 项目基本情况

建设项目名称		基于强流直线加速器的 BNCT 装备研发及临床研究			
建设单位		中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司			
法人代表	钟俊晴	联系人	胡银国	联系电话	15023009596
注册地址		重庆市璧山区璧泉街道双星大道 50 号 1 幢 7-6			
项目建设地点		重庆市璧山区高新技术产业开发区 专精特新产业园 13 号标准厂房第一层			
立项审批部门		重庆市璧山区发展和改革委员会	批准文号	2405-5001 20-04-01-868650	
建设项目总投资（万元）	40000	项目环保投资（万元）	1000	投资比例（环保投资/总投资）	2.5%
项目性质		☒ 新建 ☐ 改扩建 ☐ 其他		建筑面积（m²）	约 3700
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	无			

1.1 企业概况

中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司成立于 2023 年，是中国核工业集团中核粒子医疗科技有限公司与重庆绿发资产经营管理有限公司共同出资设立的 BNCT 核医疗装备研发和产业化的高科技创新公司，是致力于成为国内领先、国际先进的 BNCT 核医疗装备全生态整体解决方案服务运营商。

1.2 项目由来

癌症是严重危害人类健康的重大慢性疾病，根据世界卫生组织发布的数据显示，2020 年全球新发癌症病例为 1929 万例。仅中国新发癌症就有 457 万人，占全球 23.7%，中国癌症新发人数远超过世界其他国家。2020 年全球癌症死亡病例 996 万例，其中中国癌症死亡人数高达 300 万，占癌症死亡总数的 30%。当前我国癌症治疗水平与美国等国家相比还有很大差距。

续表 1 项目基本情况

硼中子俘获治疗（Boron Neutron Capture Therapy，简称“BNCT”）是近年来国际肿瘤治疗领域新兴快速发展的精准诊疗技术，被日本医学界称为继手术、传统放疗、抗癌药物、免疫治疗后的“第五疗法”，对于复发性、浸润性、局部转移肿瘤具有突出临床优势，已在全球上千例临床上证明在复发性头颈癌、恶性肿瘤、黑色素瘤、皮肤癌、骨肉瘤和乳腺癌等多种实体肿瘤上有显著可靠的疗效。在治疗过程中，中子与预先富集在癌细胞内的目标物质（含硼药物）发生核反应，有选择地只杀死癌细胞，而对肿瘤周围的健康组织损伤较小，这一特性使得硼中子俘获治疗成为癌症治疗的革命性手段。

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，中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司租用重庆市璧山区高新技术产业开发区专精特新产业园 13 号标准厂房第一层实施“基于强流直线加速器的 BNCT 装备研发及临床研究”（以下简称“拟建项目”），主要布置硼中子俘获治疗系统生产区、调试实验区以及办公生活区用于硼中子俘获治疗系统的生产、使用（调试、实验研究、检修）、销售。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 3 台/年。此外，硼中子俘获治疗系统的生产不涉及喷涂、电镀等表面处理工艺，仅进行构件、零部件的钻孔、攻丝、打磨、焊接等组装工艺。

根据《射线装置分类》（2017 年 12 月 5 日起实施）规定，粒子能量小于 100 兆电子伏的医用加速器属于 II 类射线装置。拟建项目生产、使用、销售的硼中子俘获治疗系统的加速质子最大能量为 2.7MeV，故硼中子俘获治疗系统属于 II 类射线装置。

根据《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国环境影响评价法》《建设项目环境保护管理条例》等相关规定，拟建项目应进行环境影响评价。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版）中“五十五 核与辐射 172 核技术利用建设项目”可知：生产、使用 II 类射线装置的项目环境影响评价文件形式为编制环境影响报告表，销售 II 类射线装置的项目环境影响评价文件形式为编制环境影响登记表。因此，环境影响评价类别按照其中单项等级最高的确定，故拟建项目环境影响评价文件形式为编制环境影响报告表。

为加强核技术应用项目的辐射环境管理，防止辐射污染和意外事故的发生，并严格执行环境影响评价制度，中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司委托重庆宏伟环保工程有限公司对“基于强流直线加速器的 BNCT 装备研发及临床研究”进行环境影响评价。评

续表 1 项目基本情况

价单位在进行现场踏勘及收集有关资料的基础之上，并按照《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）的要求，编制完成《基于强流直线加速器的 BNCT 装备研发及临床研究环境影响报告表》。

1.3 评价思路

（1）根据《重庆市企业投资项目备案证》（2405-500120-04-01-868650）可知，拟建项目硼中子俘获治疗系统生产、使用、销售的规模不超过 6 台/年。建设单位最终核定硼中子俘获治疗系统生产、使用、销售的规模不超过 3 台/年。因此，本评价按照硼中子俘获治疗系统生产规模不超过 3 台/年进行评价。

（2）拟建项目采取零库存订单模式，建设单位接受用户单位（医疗机构）的订单后，委托第三方单位生产硼中子俘获治疗系统所需的构件、零部件，而后运至拟建项目场地完成硼中子俘获治疗系统各部件的组装，最终运至用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所完成安装、调试，而后方可投入使用。特殊情况下，硼中子俘获治疗系统在拟建项目场地完成安装、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，由于运输过程中不能完全保证硼中子俘获治疗系统各部件的性能，故硼中子俘获治疗系统再次安装完成后必须再次进行调试后方可投入使用。此外，硼中子俘获治疗系统在拟建项目场地内进行调试过程中兼顾完成实验研究。

（3）拟建项目硼中子俘获治疗系统的生产工艺仅涉及构件、零部件的钻孔、攻丝、打磨、焊接等组装工艺，无喷涂、电镀等表面处理，故不使用溶剂型、非溶剂型涂料。根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》，仅涉及分割、焊接、组装的专用设备制造业不开展环境影响评价。因此，拟建项目主要关注硼中子俘获治疗系统出束调试、实验研究以及检修过程中产生的电离辐射环境影响，对其他环境影响仅进行简单分析。

（4）本评价按照最不利情况考虑，硼中子俘获治疗系统均在拟建项目场地内完成调试后再运至用户单位（医疗机构）再次进行安装、调试。硼中子俘获治疗系统的拆解、打包、运输、安装、调试、检修均由建设单位负责，故该部分内容纳入本次评价范围。用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所另行开展环境影响评价，且硼中子俘获治疗系统入场前，使用场所必须取得建设项目环境影响评价批准书。同时，用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所的辐射防护措施、布局均无法确定，

续表 1 项目基本情况

故硼中子俘获治疗系统在用户单位（医疗机构）的评价重点在建设单位的辐射工作人员受照剂量，其余部分均进行简单介绍。

（5）建设单位作为硼中子俘获治疗系统的生产、销售商，负责硼中子俘获治疗系统的销售、安装、调试、检修工作以及全过程相关场所的安保工作，并完成辐射安全防护措施的调试工作。用户单位（医疗机构）作为硼中子俘获治疗系统的所有单位，负责提供符合法规标准要求以及能够满足硼中子俘获治疗系统安装、调试要求的核技术利用工作场所，对建设单位的硼中子俘获治疗系统安装、调试、检修全过程履行监管职责，并协助建设单位完成该阶段的安保工作；用户单位（医疗机构）作为硼中子俘获治疗系统的第一责任人，全面负责硼中子俘获治疗系统正式投入临床使用时的安保工作，包括硼中子俘获治疗系统使用场所以及周围活动人员。

（6）拟建项目仅对硼中子俘获治疗系统进行调试，不开展患者治疗工作。因此，拟建项目场地内硼中子俘获治疗系统不配置患者摆位系统、患者定位系统。建设单位可根据用户单位（医疗机构）的需求定制患者摆位系统、患者定位系统，由第三方单位直接运至用户单位（医疗机构）硼中子俘获治疗系统使用场所进行安装、调试。因此，本评价不对患者定位系统的射线装置进行评价，其销售另行开展环境影响评价。

（7）拟建项目建设 1 座 BNCT 调试实验机房及其配套用房用于硼中子俘获治疗系统的调试、实验工作。BNCT 调试实验机房的辐射安全防护措施以及控制室、设备电源间、功率源间、水处理间的设施设备均固定使用，不随着调试完成的硼中子俘获治疗系统搬迁至用户单位（医疗机构）。建设单位为用户单位（医疗机构）另行定制 1 套完整的辐射安全防护措施以及控制系统、水冷系统等，均由第三方单位直接运至用户单位（医疗机构）硼中子俘获治疗系统使用场所进行安装、调试、维护，其中辐射安全防护措施调试由建设单位负责。

1.4 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，中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司租用重庆市璧山区高新技术产业开发区的专精特新产业园 13 号标准厂房第一层实施“基于强流直线加速器的 BNCT 装备研发及临床研究”，总建筑面积约 3700m²（长×宽：102.2m×36.2m），主要建设 BNCT 生产区、BNCT 调试实验区、办公生活区开展硼中子俘获治疗系统（加速质子最大能量 2.7MeV，最大束流强度为

续表 1 项目基本情况

30mA, II 类射线装置) 的生产、使用(调试、实验研究、检修) 和销售。拟建项目采用零库存订单模式, 硼中子俘获治疗系统生产规模不超过 3 台/年。拟建项目总投资 40000 万元, 环保投资 1000 万元, 建设工期为 12 个月。

拟建项目组成情况见下表所示。

表 1.4-1 项目组成情况一览表

分类	项目组成	主要内容及规模	备注
主体工程	BNCT 生产区	BNCT 生产区位于厂房中部, 布置在 BNCT 调试实验区的西侧, 内设装配件区、洁净间以及生产辅助用房等, 用于硼中子俘获治疗系统的生产, 预计年产 3 台硼中子俘获治疗系统。 装配件区: 使用面积约 315m ² , 配置角磨机、手枪钻、台式砂轮机、焊接机等设备, 主要用于构件、零部件的钻孔、打磨、组装、打包等。 洁净间: 使用面积约 22m ² , 用于需要无尘装配的部件组装。	新建
	BNCT 调试实验区	BNCT 调试实验区位于厂房东部, 布置在 BNCT 生产区的东侧, 内设 BNCT 调试实验机房、物理实验室、库房、预留用房以及调试实验辅助用房等, 用于开展硼中子俘获治疗系统的调试、实验研究等工作。	新建
	射线装置机房	BNCT 调试实验机房布置在 BNCT 调试实验区中部, 内设 1 个加速器室、1 个中子靶站间, 主要用于硼中子俘获治疗系统的调试、实验研究, 总建筑面积约 389m ² 。加速器室、中子靶站间东西并排布置, 其中加速器室布置在西部, 中子靶站间布置在东部。 加速器室内部呈五边形, 使用面积约 137.2m ² , 主要布置硼中子俘获治疗系统的核心部件, 主要包括加速器和束流线系统、中子靶站系统。中子靶站间设置 L 型迷路, 内部呈五边形, 使用面积约 40.6m ² (不含迷路), 主要布置实验平台。	新建
	物理实验室	物理实验室紧邻布置在 BNCT 调试实验机房东南角, 利用高纯锗谱仪对活化后的金丝、活化箔的放射强度监测, 用于分析硼中子俘获治疗系统运行产生的横向、纵向热中子的分布。	新建
辅助工程	生产辅助用房	集中布置在 BNCT 生产区的装配件区、洁净间周围, 包括零部件入场验收区、电气控制室、细水雾机房等。	新建
	调试实验辅助用房	集中布置在 BNCT 调试实验区的 BNCT 调试实验机房周围, 包括功率源间、水处理间、控制室、设备电源间、工艺空调机房、库房、放射性废物衰变间、仓储间等。	新建
	办公生活区	集中布置在 BNCT 生产区、BNCT 调试实验区的东侧以及南侧, 包括办公室、会议室、接待室、资料档案室、茶水间、文印室等。	新建
储运工程	运输	硼中子俘获治疗系统的构件、零部件均委托第三方单位运输至 BNCT 生产, 经北侧主入口送至零部件入场验收区。硼中子俘获治疗系统出厂经零部件入场验收区北侧主入口离开。	新建
	储存	仓储间紧邻装配件区布置, 使用面积约 44m ² , 用于中子探测器、光子探测器以及相关的电源配件等存放。 库房紧邻放射性废物衰变间布置, 使用面积约 9m ² , 用于模体(水箱、固体水等)存放。	新建

续表 1 项目基本情况

分类	项目组成	主要内容及规模		备注
公用工程	供电工程	市政供电，厂房内新建电网，并布置 1 间强电进线间，厂房外新建 1 个预装式变电站，电压等级为 10kV，容量为 1600kVA。		内部新建 室外依托
	给水工程	厂房内新建给水管网连接室外现有给水管网，最终与市政给水管网连接，由市政给水管网供水。		内部新建 室外依托
	排水工程	雨污分流。雨水经专精特新产业园雨水管网排入市政雨水管网，最终排入壁南河；厂房内新建排水管连接专精特新产业园现有排水管网，排入生化池进行预处理，最终连接市政污水管网排入高新区污水处理厂，处理后排入壁南河。		内部新建 室外依托
	暖通工程	办公生活区	门厅、接待室、会议室、资料档案室、监控室等布置风冷式中央空调控制室内温度、湿度，采用机械进风、自然排风的通风方式；办公室、党员活动室、员工活动室等布置分体式空调控制室内温度、湿度，采用自然进风、机械排风的通风方式。	新建
		BNCT 生产区	装配件区、洁净间、零部件入场验收区、电气控制室布置风冷式中央空调控制室内温度、湿度。 洁净间、预留用房采用机械进风、机械排风的通风系统，其他用房采用机械进风、自然排风的通风系统。	新建
		BNCT 调试实验区	加速器室、中子靶站间各设置 1 套直膨组合式新风处理机组，采用“粗过滤+中高效过滤”工艺，并对内部温度、湿度进行控制。 加速器室设置 1 套独立的通风系统，南墙水平均匀布置 9 个新风口，距地面均约 3.0m，总风量约 6000m ³ ；北墙上下布置 4 个排风口，距地面分别约 3.0m、0.3m，总风量约 7000m ³ 。 中子靶站间设置 1 套独立的通风系统，东墙水平均匀布置 4 个新风口，距地面均约 3.0m，总风量约 2500m ³ ；西北角上下布置 2 个排风口，距地面分别约 3.0m、0.3m，总风量约 3000m ³ 。	新建
		其他区域	功率源间、设备电源间各配置 2 台专业空调机对室内温度、湿度进行控制，其他功能房间布置风冷式中央空调控制室内温度、湿度。 设备电源间、消防气瓶间、放射性废物衰变间、物理实验室均采用机械进风、机械排风的通风方式；仓储间采用机械进风、自然排风的通风方式；功率源间、水处理间采用自然进风、机械排风的通风方式；控制室、工艺空调机房采用自然进风、自然排风的通风方式。	新建
环保工程	废气	放射性废气	硼中子俘获治疗系统运行产生活化废气引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶，并高于楼顶 3m 排放，排放高度约 17m。	新建
		非放射性废气	硼中子俘获治疗系统生产产生的少量金属粉尘、焊接废气均利用工业吸尘器处理，处理后废气直接在厂房内无组织排放。 硼中子俘获治疗系统运行产生的少量氮氧化物、臭氧等废气与活化废气一起引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶，并高于楼顶 3m 排放，排放高度约 17m。	新建

续表 1 项目基本情况

分类	项目组成	主要内容及规模		备注
环保工程	废水	放射性废水	硼中子俘获治疗系统由 BNCT 调试实验机房拆解搬运至客户单位时，必须将硼中子俘获治疗系统内的加速器冷却水、靶站冷却水排空，将产生活化冷却水，单次产生量不超过 50L，全年产生量不超过 150L。硼中子俘获治疗系统的内循环水系统的冷却水（即加速器冷却水、靶站冷却水）平均 2 年整体更换 1 次，产生的活化冷却水不超过 1000L。此外，硼中子俘获治疗系统事故状态下，内循环水系统的冷却水泄漏将产生活化冷却水，单次产生量不超过 1000L。 BNCT 调试实验机房、水处理间地面均设置地漏，活化冷却水可通过地漏及管道进入加速器室或水处理间的冷却水收集池内，暂存 30 天后取样监测，其主要感生放射性核素 ^3H 的活度低于 1A1Imin，可作为普通废水处理，并做好存档记录。 加速器室、水处理间的冷却水收集池有效容积分别约 1.2m³、1.5m³，均内设水泵（一用一备）将活化冷却水排入污水管道。	新建
		非放射性废水	废水经专精特新产业园的污水管网进入配套的生化池处理，处理满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）三级标准后再排入市政污水管网，最终进入高新区生活污水处理厂，处理满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中IV类水质标准后排入璧南河。	依托
	固废	放射性固废	放射性固废主要包括活化的废弃锂靶、金丝、活化箔，均在放射性废物衰变间内暂存足够的时间，其活度低于清洁解控水平后作为一般固废交物资公司回收处理。待核技术利用工作场所退役时，如果放射性固废活度仍无法低于清洁解控水平，则交有资质的单位处置。 放射性废物衰变间布置在预留用房旁，使用面积约 25.4m²，并配置铅容器用于废弃活化锂靶、废弃活化金丝以及活化箔的储存。 建设单位不对客户单位（医疗机构）产生的废弃活化锂靶进行回收处理，由客户单位按照相关规定自行处理。	新建
		非放射性固废	厂房西南角外布置 1 个生活垃圾收集桶用于收集办公生活产生的生活垃圾，每日统一转移至专精特新产业园的生活垃圾收集点，而后由市政环卫部门处理。 废包装物、废金属屑等一般固废暂存在零部件入场验收区的废物区，定期外卖给物资回收单位处理；废过滤材料由厂家更换时回收处理，不暂存。	新建
	噪声	生产设备、中央空调、风机等拟选用低噪声设备，采取建筑隔声、基础减振等噪声防治措施。		新建
	辐射防护	BNCT 调试实验机房、物理实验室、放射性废物衰变间设置足够厚的混凝土屏蔽墙体、迷道、加气混凝土墙体、迷道、顶棚以及防护门（铅/铅+含硼聚乙烯）等进行屏蔽，满足辐射防护要求。		新建

1.5 辐射防护屏蔽防护

拟建项目的 BNCT 调试实验机房、物理实验室、放射性废物衰变间、冷却水收集池的屏蔽防护设计情况见表 1.5-1 和附图六。

续表 1 项目基本情况

表 1.5-1 拟建项目屏蔽防护设计情况一览表					
功能房间		屏蔽体			屏蔽防护情况
BNCT 调试机房	加速器室	内部五边形 内空高：5.5m 吊顶高：5.0m 内部五边形 边 1：约 15.0m 边 2：约 7.2m 边 3：约 3.4m 边 4：约 21.2m 边 5：约 7.0m	墙体		2000mm 混凝土
			顶棚		2000mm 混凝土
			底板		50mm 水泥砂浆+1500mm 混凝土
			内防 护门	门洞	门洞尺寸：2.0m×2.3m（宽×高）
				门	尺寸：2.5m×2.55m（宽×高） 屏蔽：10mmPb+130mm 含 30%碳化硼聚乙烯
			外防 护门	门洞	尺寸：2.0m×2.3m（宽×高）
				门	尺寸：2.5m×2.55m（宽×高） 屏蔽：60mmPb+80mm 含 30%碳化硼聚乙烯
			移动防护屏		尺寸：2.4m×2.3m（宽×高） 屏蔽：20mmPb+50mm 含 30%碳化硼聚乙烯
BNCT 调试机房	中子 靶站 间	内部五边形 （不含迷路） 内空高（含迷路）：5.5m 吊顶高（含迷路）：5.0m 边 1：约 6.2m 边 2：约 8.0m 边 3：约 0.6m 边 4：约 6.5m 边 5：约 4.8m 迷路宽度：约 1.6m 迷路长度：约 7.2m+2.8m	墙体		2000mm 混凝土
			顶棚		2000mm 混凝土
			底板		50mm 水泥砂浆+1500mm 混凝土
			L 型 迷路	内墙	1000mm 混凝土
				外墙	2000mm 混凝土
			内防 护门	门洞	尺寸：1.6m×2.0m（宽×高）
				门	尺寸：2.2m×2.3m（宽×高） 屏蔽：20mm 含 30%碳化硼聚乙烯
			外防 护门	门洞	尺寸：1.7m×2.3m（宽×高）
门	尺寸：2.1m×2.55m（宽×高） 屏蔽：60mmPb+80mm 含 30%碳化硼聚乙烯				
物理实验室	东墙、南墙			300mm 混凝土	
	西墙、北墙			2000mm 混凝土	
	顶棚			100mm 混凝土	
	防护门			2mmPb	
放射性废 物衰变间	墙体			300mm 加气混凝土	
	顶棚			100mm 混凝土	
	防护门			2mmPb	
冷却水	池壁、池底、盖板			100mm 混凝土	

注：①BNCT 调试机房的加速器室和中子靶站间之间的通道尺寸为 2.0m×2.3m（宽×高）；②BNCT 调试机房与上方楼板之间的空间封闭，人员无法进入；③混凝土密度不低于 2.35g/cm³，铅的密度不

注：①BNCT 调试机房的加速器室和中子靶站间之间的通道尺寸为 2.0m×2.3m（宽×高）；②BNCT 调试机房与上方楼板之间的空间封闭，人员无法进入；③混凝土密度不低于 2.35g/cm³，铅的密度不

续表 1 项目基本情况

低于 $11.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，含 30%碳化硼聚乙烯密度不低于 $1.1578\text{g}/\text{cm}^3$ 。

1.6 产品方案

拟建项目生产、使用、销售的硼中子俘获治疗系统基本情况如下表。

表 1.6-1 拟建项目生产、使用、销售的硼中子俘获治疗系统情况一览表

射线装置名称	质子束流最大能量	质子束流最大强度	射线装置类别	产量
硼中子俘获治疗系统	2.7MeV	30mA	II	≤ 3 台/a

1.7 主要设备情况

拟建项目生产、调试硼中子俘获治疗系统的过程中使用的主要设备情况见下表。

表 1.7-1 拟建项目使用的主要设备一览表

序号	名称	规格型号	数量	用途
硼中子俘获治疗系统的生产设备				
1	家用手枪钻	GBM345	3 个	钻孔、攻丝
2	家用充电钻	GSR120-LI	1 个	
3	多功能冲击钻	GSB13RE	2 个	钻孔
4	三功能锤钻冲击钻电钻	GBH3-28DRE	1 个	
5	家用角磨机	φ 100	2 个	打磨
6	直流脉冲氩弧焊机	WSM-400HD	1 台	焊接
7	工业吸尘器	70L/4800W	1 个	除尘
8	龙门吊	2T	1 个	零部件转移
9	叉车	杭叉 3.5T CPD35-XD4-SI	1 台	
10	电动步行式托盘搬运车	杭叉 2T CBD20	1 台	
11	电动无轨运输车	25T	1 台	
12	手动液压车	5T	1 台	
硼中子俘获治疗系统的调试、实验设备				
1	高纯锗谱仪	/	1 台	用于活化片实验
2	中子探测器	/	1 台	剂量测量
3	光子探测器	/	1 台	剂量测量
4	模体（水箱、固体水等）	/	1 套	剂量测量
5	水平仪	/	1 台	检查靶站移动变形
6	激光投线仪器	/	1 台	
7	仪器数值检查仪	/	1 台	检查真空漏液等问题
8	移动试验台	/	1 个	放置设备
9	冷却水处理系统	/	1 套	设备冷却
10	控制系统	/	1 套	设备运行
11	铅容器	80mmPb	1 个	废活化锂靶存
12	铅盒	3mmPb	1 个	活化金丝、活化箔暂存

续表 1 项目基本情况

13	铅手套	0.35mmPb	2 付	辐射工作人员防护
序号	名称	规格型号	数量	用途
监测设备				
1	固定式辐射剂量监测仪	/	1 套	工作场所剂量监测
2	便携式中子剂量仪（含 γ 探头）	/	1 台	
3	便携式个人剂量报警仪	/	4 台	工作场所剂量报警
4	X-γ 个人剂量计	/	按需	辐射工作人员 个人剂量监测
5	中子个人剂量计	/	按需	
其他设备				
1	风管式中央空调	/	4 套	控温、控湿、通风
2	直膨组合式新风处理机组	/	2 套	
3	专空调机	/	4 台	
4	分体式空调	/	24 台	

注：未使用《部分工业行业淘汰落后生产工艺设备和产品指导目录（2010 年本）》《产业结构调整指导目录（2024 年本）》中限制、淘汰类设备。

1.8 原辅材料

拟建项目原辅材料使用情况见下表。

表 1.8-1 主要原辅材料使用情况表

序号	备品备件名称	规格/型号/材质	年用量
加速器和束流线系统			
1	真空规管（低规）	X3203-60012	3 台
2	真空规管（高规）	PKR361	3 台
3	真空计	XGS600H0M3C1	3 台
4	磁悬浮分子泵	CXF-250/2301	3 台
5	分子泵控制仪	TVDP-II	3 台
6	干泵	ECODRY 65PLUS	3 台
7	插板阀	10840-CE44	3 台
8	快关阀传感器	770SH-99NN	3 个
9	快关阀控制仪	VF-2	3 台
10	膜窗	/	3 件
11	束流阻挡器	/	3 台
12	法拉第筒	BD-FC	3 套
13	法拉第筒信号采集	BD-FCDAQ	3 套
14	水冷荧光靶片	BD-VS-1	3 套
15	引出绝缘陶瓷	95%AL ₂ O ₃	3 个
16	氢气气瓶	15L/纯度 99.999%	3 瓶

续表 1 项目基本情况

17	微波窗	/	3 个
序号	备品备件名称	规格/型号/材质	年用量
加速器和束流线系统			
18	高压隔离器	95%AL ₂ O ₃	3 个
19	校正铁电源	6V±15A	3 台
20	螺线管电源	I/V=400A/30V	3 台
21	螺线管校正电源	I/V=20A/10V	3 台
22	四极铁电源	260A/30V	3 台
23	二极铁电源	±350A/35V	3 台
24	AD/DA 板	AD/D	3 套
25	170MHz 频综板	170MHz	3 套
26	162.5MHz 变频板	162.5MHz	3 套
中子靶站系统			
27	含硼聚乙烯块	含 30%碳化硼聚乙烯	若干
28	铅块	99.9%纯度以上的纯铅	若干
29	真空腔	铝制真空腔体	3 套
30	锂靶	/	3 个
31	伽马监测器	/	27 台
32	中子监测器	/	30 台
其他			
33	临床应用软件系统	/	1 套
34	金属丝、活化箔	/	100g

此外，硼中子俘获治疗系统的患者定位系统（滑轨机械床、固定底座机器人、悬臂机器人）、患者摆位系统（激光灯、X 射线影像设备（DR 或 CR）、CT）、循环冷却水系统、服务器、微型计算机、UPS 电源以及剂量监测仪器等均根据用户单位（医疗机构）需求进行配置，直接由第三方单位运至硼中子俘获治疗系统使用场所进行安装、调试，辐射安全防护措施调试由建设单位负责。

1.9 劳动定员和工作制度

拟建项目年工作 250 天，单班制，每班 8 小时。拟建项目拟配置劳动定员 90 人，其中辐射工作人员 8 人，负责硼中子俘获治疗系统的调试、实验研究以及大型维修工作。

拟建项目生产、销售的硼中子俘获治疗系统在用户单位（医疗单位）正式投运后，建设单位将委派 1~2 名运维人员在用户单位（医疗单位）常驻，负责硼中子俘获治疗系统的日常维护。运维人员属于辐射工作人员，每年新增人数不超过 6 名。

续表 1 项目基本情况

1.10 工作负荷

拟建项目硼中子俘获治疗系统年生产、使用、销售不超过 3 台。

拟建项目单台硼中子俘获治疗系统在拟建项目场所内离子源调试、加速器调试、整机调试出束时间分别不超过 20h、30h、10h，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离子源调试、加速器调试、整机调试出束时间分别不超过 10h、15h、5h。拟建项目预计全年在 BNCT 调试实验区开展实验研究不超过 6 次，硼中子俘获治疗系统单次整机出束时间不超过 0.5h，则实验研究过程中硼中子俘获治疗系统整机出束时间约 3.0h。拟建项目实验研究均在硼中子俘获治疗系统整体调试过程中同步开展，故不单独考虑。

硼中子俘获治疗系统调试实验过程中的工作负荷详见下表。

表 1.10-1 硼中子俘获治疗系统工作负荷表

工作内容 工作场所		BNCT 调试实验机房（h）		用户单位（医疗机构）（h）	
		单台出束时间	全年出束时间	单台出束时间	全年出束时间
硼中子 俘获治 疗系统	离子源调试	20	60	10	30
	RFQ 加速器调试	30	90	15	45
	整机调试	10 (含实验研究)	30 (含实验研究)	5	15

此外，拟建项目生产、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常驻用户单位（医疗单位）负责设备日常维护，预计检修过程中硼中子俘获治疗系统整机出束时间不超过 50h/a。

1.11 项目外环境情况

拟建项目位于重庆市璧山区高新技术产业开发区的专精特新产业园 13 号标准厂房 1F（最底层）。专精特新产业园 13 号标准厂房的建筑结构为 2F，其中 1F 层高 9m，属于拟建项目用房；2F 层高 5m，重庆坤元堂医药有限公司用房，正在装修。

专精特新产业园 13 号标准厂房四周均紧邻专精特新产业园内部绿化、道路，另东侧隔绿化、道路约 16m 为专精特新产业园 12 号标准厂房，南侧隔绿化、道路约 8m 为专精特新产业园 10 号、11 号标准厂房，西侧隔绿化、道路约 15m 为专精特新产业园 14 号标准厂房，北侧隔绿化、道路约 12m 为奥方汽车零部件公司、重庆市璧山区高新技

续表 1 项目基本情况

术产业开发区的标准厂房（重庆市蒂派门业有限公司、重庆纳善精密电子有限公司、重庆荣锦精密电子有限公司等）。

拟建项目用房周围环境见下表所示。

表 1.11-1 拟建项目厂区周围环境一览表

序号	名称	方位	水平最近距离	高差	备注
1	绿化、道路	东	紧邻	0m	/
2	专精特新产业园 12 号标准厂房		约 16m	0m	3F/-1F，高约 18m 尚未招租
3	绿化、道路	南	紧邻	0m	/
4	专精特新产业园 10 号标准厂房		约 8m	0m	3F/-1F，高约 14m 均尚未招租
	专精特新产业园 11 号标准厂房				2F/-1F，高约 14m 均尚未招租
5	绿化、道路	西	紧邻	0m	/
6	专精特新产业园 14 号标准厂房 （重庆寰美电子科技有限公司）		约 15m	0m	3F/-1F，18m 晶圆转载产品生产
7	绿化、道路	北	紧邻	0m	/
8	重庆奥方汽车零部件公司		约 12m	-4m	2F，高约 14m 汽车塑料件、车灯生产
9	重庆市璧山区高新技术产业开发区 的标准厂房（重庆市蒂派门业有限公司、 重庆纳善精密电子有限公司、 重庆荣锦精密电子有限公司等）		约 12m	-4m	3 栋标准厂房 1F/2F，高约 6m/10m 推拉门生产、制品热加工、金 属制品加工等
10	重庆坤元堂医药有限公司	上层	/	+9m	专精特新产业园 13 号标准厂 房 2F，药品批发

备注：“+”表示其地面高于拟建项目所在建筑 1F 地面，“-”表示其地面低于 1F 地面。

根据拟建项目周围环境情况，确定拟建项目的环境保护目标主要为从事拟建项目的辐射工作人员以及周围活动的公众成员。

1.12 选址可行性

（1）拟建项目已取得重庆市璧山区发展和改革委员会下发的《重庆市企业投资项目备案证》（2405-500120-04-01-868650）。

（2）拟建项目场址的辐射剂量背景监测结果表明，其辐射环境质量现状良好，能满足拟建项目的建设需求。

（3）拟建项目用房楼上为重庆坤元堂医药有限公司，周围均紧邻专精特新产业园的内部绿化、道路，之外为专精特新产业园的标准厂房和奥方汽车零部件公司、重庆市璧山区高新技术产业开发区的标准厂房等，且拟建项目周围 500m 范围内无医院、学校、

续表 1 项目基本情况

集中居住区等环境敏感区分布，无环境制约因素。此外，拟建项目 BNCT 调试实验区相对独立，内部调试实验机房 BNCT、物理实验室以及放射性废物衰变间均未与办公生活区办公室、员工活动室等人流量较大的区域紧邻。拟建项目位于建筑最底层，且 BNCT 调试实验机房、物理实验室以及放射性废物衰变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，拟建项目选址合理。

(4) 拟建项目所在的专精特新产业园位于璧山高新技术产业开发区范围内。根据《璧山高新技术产业开发区规划（2017~2022）环境影响报告书》及其审查意见可知，璧山高新技术产业开发区主要以智能装备、信息技术、生命健康产业为主，其中生命健康产业主要是生物医药、医疗器械、健康食品等为主。拟建项目为医疗设备建设项目，属于璧山高新技术产业开发区主导行业中生命健康产业中的医疗器械，符合璧山高新技术产业开发区的产业定位。拟建项目与璧山高新技术产业开发区入园条件符合性分析见表 1.12-1 和表 1.12-2。

表 1.12-1 璧山高新技术产业开发区产业准入条件

清单内容	项目情况	符合性
工业项目应符合产业政策，不得采用国家和重庆市淘汰的或禁止使用的工艺、技术和设备。	拟建项目不涉及国家和重庆市淘汰或禁止使用的工艺、技术、设备。	符合
新建和改造的工业项目清洁生产水平应达到国家清洁生产标准的国内先进水平。	拟建项目生产工艺简单，达到国家清洁生产标准的国内先进水平。	符合
新增重金属排放量的工业项目应落实污染物排放指标来源。	拟建项目不涉及重金属的排放。	符合
禁止建设存在重大环境安全隐患的工业项目。	拟建项目不属于存在重大环境安全隐患的建设项目。	符合
严格控制清洗、磷化等含磷工艺入驻。	拟建项目不涉及清洗、磷化等含磷工艺。	符合

表 1.12-2 璧山高新技术产业开发区环境保护负面清单

序号	类别	清单内容	项目情况	符合性
禁止类				
1	禁止	一、农副食品加工业	拟建项目不属于农副食品加工业	符合
		1. 屠宰建设项目		
		二、食品制造业	拟建项目不属于食品制造业	符合
		1. 5 万吨/年及以下且采用等电离交工艺的味精生产项目		
		2. 糖精等化学合成甜味剂生产项目		
		3. 2000 吨/年及以下的酵母加工项目		
		4. 豆坯生产项目		
		5. 小食品加工项目		

续表 1 项目基本情况

序号	类别	清单内容	项目情况	符合性
禁止类				
1	禁止	三、酒、饮料和精制茶制造业	拟建项目不属于酒、饮料和精制茶制造业	符合
		1. 酒精、白酒生产项目； 2. 生产能力小于 18000 瓶/时的啤酒灌装生产项目。		
		四、医药制造业	拟建项目不属于医药制造业	符合
		1. 化学制药		
	加工区 区外禁止	五、金属表面处理及热处理加工	拟建项目不涉及金属表面处理及热处理工艺	符合
		1. 电镀项目		
禁止	六、制鞋业	拟建项目不属于制鞋业	符合	
限制类				
2	限制	一、农副食品加工业	拟建项目不属于农副食品加工业	符合
		1. 豆坯生产项目		
		2. 小食品加工项目		
		二、食品制造业	拟建项目不属于食品制造业	符合
		1.COD、氨氮、TP 排放量大的项目		
		三、酒、饮料和精制茶制造业	拟建项目不属于酒、饮料和精制茶制造业	符合
		1. 葡萄酒生产项目。		
		四、医药制造业	拟建项目不属于医药制造业	符合
		1. 发酵制造等废水排放量大的工艺类型； 2. 颗粒物排放较大的工艺类型。		
		五、电子信息	拟建项目不属于电子信息制造业	符合
1. NO _x 排放量大的电子信息制造业				
根据表 1.12-1 和表 1.12-2 可知，拟建项目不属于璧山高新技术产业开发区的环境保护负面清单中禁止及限制类行业。				
综上所述，从璧山高新技术产业开发区的行业准入以及辐射安全防护的角度分析，拟建项目选址是可行的。				
1.13 与项目有关的环境保护问题				
中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司是 2023 年新成立的公司，主要负责硼中子俘获治疗系统的生产、研发、销售，目前尚未涉及其他核技术利用。				
拟建项目租用的厂房为重庆两山建设开发有限公司统一建成的标准厂房，已取得《中小企业家园（产业园区基础设施建设）项目建设项目环境影响登记表》（202050022700000469）。拟建项目租用的标准厂房未开展过生产活动，目前为空置状				

续表 1 项目基本情况

态，无环保遗留问题和环保投诉。

1.14 项目依托情况

拟建项目主要依托专精特新产业园的 13 号标准厂房的建筑物结构、给排水及供配电工程、生化池，依托情况详见表 1.14-1。

表 1.14-1 项目依托可行性分析

依托工程	依托情况	可行性分析
主体工程	建筑物结构	拟建项目租用的专精特新产业园 13 号标准厂房第一层建成后尚未启用，无环境遗留问题。拟建项目能根据需求重新设计、重新装修。因此，拟建项目依托专精特新产业园 13 号标准厂房第一层的建筑物结构可行。
公用工程	供电工程	拟建项目位于城市建成区，区域供电设施齐全，且供电系统已接入拟建项目用房。因此，拟建项目依托市政供电设施可行。
	供水工程	拟建项目位于城市建成区，区域供水设施齐全，且供水设施已接入拟建项目用房。因此，拟建项目依托市政供水设施可行。
	排水工程	拟建项目位于城市建成区，区域排水设施齐全。另拟建项目所在的专精特新产业园已铺设了完善的雨水管网以及污水管网，雨水能接入市政雨水管网，废水能排入生化池处理达标后再接入市政污水管网。因此，拟建项目依托市政排水设施可行。
环保工程	废水处理	拟建项目废水依托专精特新产业园生化池处理达《污水综合排放标准》（GB8978-1996）三级标准后排入市政污水管网。拟建项目废水中污染物浓度不高、成分简单，故不会影响专精特新产业园生化池的正常运行。专精特新产业园生化池位于专精特新产业园东南角，处理能力为 900m³/d。拟建项目在专精特新产业园生化池的受纳范围内，且废水产生量仅约 7m³/d，远低于其处理能力。因此，拟建项目依托专精特新产业园生化池可行。
	固废处理	拟建项目在专精特新产业园内，故产生的生活垃圾依托专精特新产业园的生活垃圾收运系统可行。

根据上表可知，拟建项目依托专精特新产业园的 13 号标准厂房的建筑物结构、供水工程、排水工程、供电工程以及专精特新产业园的生化池、生活垃圾收运系统等可行。

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
拟建项目不涉及。								

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
拟建项目不涉及。										

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》（GB18871-2002）。

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	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	硼中子 俘获治 疗系统	II	3 台/年	/	质子	2.7	30mA	科研实验 放射治疗	BNCT 调试实验 机房及用户单位 BNCT 治疗用房	/

（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	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
拟建项目不涉及。									

（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（mA）	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	
拟建项目不涉及。													

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
废活化冷却水	液态	^3H 、 ^{19}O 等	/	/	1.15m ³	^3H 活度低于 1ALlmin ($1.11\times 10^9\text{Bq}$)	暂存在冷却水收集池	经污水管排入专精特新产业园生化池处理，最终进入高新区生活污水处理厂处理后排入璧南河。
普通废水	液态	/	/	/	2066.15m ₃	/	不暂存	
活化废气	气态	^3H 、 ^{14}C 、 ^{16}N 、 ^{19}O 、 ^{41}Ar 等	/	少量	少量	/	/	引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶，并高于楼顶 2F 排放
非放射性调试实验废气（臭氧、氮氧化物等）	气态	/	/	少量	少量	/	不暂存	
焊接废气	气态	/	/	少量	少量	/	不暂存	经工业吸尘器处理后在厂房内无组织排放
金属粉尘	气态	/	/	少量	少量	/	不暂存	
废活化锂靶	固态	^7Be 、 ^{64}Cu 、 ^{66}Cu 、 ^{28}Al 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 等	/	/	28.8kg	/	暂存在放射性废物衰变间的铅容器内	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。
废弃活化金丝、活化箔	固态	^{28}Al 、 ^{114}Ln 、 ^{64}Cu 、 ^{66}Cu 、 ^{196}Au 等	/	/	0.1kg	/		
生活垃圾	固态	/	/	/	1100kg	/	暂存在垃圾收集点	交环卫部门统一处理
废弃过滤材料	固态	/	/	/	200kg	/	不暂存	更换时由厂家直接回收处理

注：1、常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/l，固态为 mg/kg，气态为 mg/m³；年排放总量用 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）和活度（Bq）。

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
包装废物	固态	/	/	/	50kg	/	暂存在零部件入场验收区的废物区	定期交物资公司回收处理
金属屑	固态	/	/	/	10kg	/		

注：1、常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/l，固态为 mg/kg，气态为 mg/m³；年排放总量用 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）和活度（Bq）。

表 6 评价依据

法规文件	(1) 《中华人民共和国环境保护法》，2015 年 1 月 1 日施行修订版； (2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，2002 年 10 月 28 日通过，自 2003 年 9 月 1 日起施行；2016 年 7 月 2 日第一次修正；2018 年 12 月 29 日第二次修正； (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，中华人民共和国主席令第六号，2003 年 10 月 1 日施行； (4) 《建设项目环境保护管理条例》，中华人民共和国国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日修改施行； (5) 《建设项目环境影响评价分类管理名录》，生态环境部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日施行； (6) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院令第 449 号，2005 年 12 月 21 日施行；国务院令第 653 号，2014 年 7 月 29 日修订实施；国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日修订实施； (7) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，国家环境保护总局令第 31 号，2006 年 3 月 1 日施行；生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日修正实施； (8) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环保部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日施行； (9) 《关于发布〈射线装置分类〉的公告》，环境保护部和国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日施行； (10) 《关于发布〈放射性废物分类〉的公告》，环境保护部 工业和信息化部 国防科工局公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月 1 日起施行； (11) 《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，2024 年 2 月 1 日实施； (12) 《重庆市环境保护条例》，1998 年 5 月 29 日通过；2007 年 5 月 18 日第一次修订；2010 年 7 月 23 日第一次修正；2017 年 3 月 29 日第二次修订；2018 年 7 月 26 日第二次修正；2022 年 9 月 28 日第三次修正； (13) 《重庆市辐射污染防治办法》，重庆市人民政府令第 338 号，2021 年 1 月 1 日起施行；
------	--

续表 6 评价依据

法规文件	(14) 《重庆市辐射污染防治“十四五”规划》，2022年3月11日； (15) 《重庆市璧山区声环境功能区划分调整方案》（璧山环发〔2023〕140号）。
技术标准	(1) 《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ2.1-2016）； (2) 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）； (3) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）； (4) 《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ2.1-2016）； (5) 《建设项目环境影响报告表编制技术指南（污染影响类）（试行）》； (6) 《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）； (7) 《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）； (8) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）； (9) 《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）； (10) 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）； (11) 《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ104-2017）； (12) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）； (13) 《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》（GBZ2.1-2019）； (14) 《环境空气质量标准》（GB3095-2012）； (15) 《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）； (16) 《声环境质量标准》（GB3096-2008）； (17) 《污水综合排放标准》（GB8978-1996）； (18) 《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）； (19) 《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）。
其他	(1) 环境影响评价委托书； (2) 《重庆市企业投资项目备案证》（2405-5001 20-04-01-868650）； (3) 拟建项目用房的租房合同；

续表 6 评价依据

其他	(4) 《监测报告》（渝泓环（监）[2024]502 号）； (5) 《璧山高新技术产业开发区规划（2017~2022）环境影响报告书》及审查意见，环审〔2019〕42 号，2019 年 3 月； (6) NCRP NO.144 报告； (7) 《辐射防护基础》（李星洪等，原子能出版社）； (8) 设计资料等其他相关资料。
----	---

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》（HJ10.1-2016）的相关规定，并结合拟建项目射线装置为能量流污染的特征，根据能量流的传播与距离相关的特性，确定以拟建项目核技术利用工作场所控制区边界外 50m 区域作为辐射环境影响的评价范围，并将客户单位（医疗单位）与硼中子俘获治疗系统相关的核技术利用工作场所控制区边界外 50m 区域作为辐射环境影响的评价范围。

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）》，大气环境、地下水环境评价范围确定为专精特新产业园 13 号标准厂房厂界外 500m 范围内，声环境评价范围确定为：专精特新产业园 13 号标准厂房厂界外 50m 范围内。

7.2 环境保护目标

用户单位（医疗机构）与拟建项目相关的核技术利用工作场所布局及周围环境均不能确定，故本评价重点关注拟建项目场所内核技术利用工作场所控制区边界外 50m 区域范围内活动的人员。

拟建项目位于璧山区高新技术产业开发区专精特新产业园 13 号标准厂房第一层，楼上为正在装修的重庆坤元堂医药有限公司。专精特新产业园 13 号标准厂房四周均紧邻专精特新产业园内部绿化、道路，东侧、南侧、西侧隔专精特新产业园内部绿化、道路均为专精特新产业园标准厂房，北侧隔专精特新产业园内部绿化、道路为奥方汽车零部件公司以及璧山区高新技术产业开发区的标准厂房。

（1）辐射环境保护目标

拟建项目所在的专精特新产业园 13 号标准厂房建筑结构为 2F，无地下层，建筑高度约 14m。拟建项目所在专精特新产业园 13 号标准厂房第一层为该建筑最底层，内部主要划分为 3 个区域，分别为 BNCT 生产区、BNCT 调试实验区、办公生活区。拟建项目的核技术利用工作场所布置在 BNCT 调试实验区，其控制区包括 BNCT 调试实验机房、物理实验室、放射性废物衰变间。此外，BNCT 调试实验区各出入口均拟设置刷卡门禁，仅允许辐射工作人员出入。其他人员进入该区域必须由辐射工作人员领入，且必须避开硼中子俘获治疗系统运行时间。因此，本评价将 BNCT 调试实验区均作为辐射工作人员活动区域。

续表 7 保护目标与评价标准

①BNCT 调试实验机房及物理实验室周围环境保护目标

拟建项目的 BNCT 调试实验机房、物理实验室紧邻布置，其周围辐射环境保护目标见下表。

表 7.2-1 BNCT 调试实验机房、物理实验室周围辐射环境保护目标情况一览表

序号	环境保护目标名称	方位	水平距离 (m)	最低高差 (m)	保护目标特征	影响人群	影响因素
1	走廊	东	0~5	0	BNCT 调试实验区用房，流动人员，约 2 人	辐射工作人员	电离辐射
	预留用房、放射性废物衰变间等		5~13	0	BNCT 调试实验区用房，固定人员，约 4 人		
2	专精特新产业园内部绿化、道路		13~29	0	绿化、道路，流动人员，约 2 人	公众成员	
3	专精特新产业园 12 号标准厂房		29~50	0	3F/-1F，尚未招租	公众成员	
4	工艺空调机房、控制室、设备电源间	南	0~6	0	BNCT 调试实验区用房，固定人员，约 4 人	辐射工作人员	
	走廊		6~8	0	办公生活区用房，流动人员，约 2 人	公众成员	
	办公室		8~20	0	办公生活区用房，固定人员，约 80 人		
5	专精特新产业园内部绿化、道路		20~28	0	绿化、道路，流动人员，约 2 人	公众成员	
6	专精特新产业园 10 号、11 号标准厂房		28~50	0	3F/-1F，2F/-1F，尚未招租	公众成员	
7	仓储间	西南	0~9	0	BNCT 调试实验区用房，固定人员，约 2 人	辐射工作人员	
8	预留用房、洁净间	西	0~4	0	BNCT 生产区用房，固定人员，约 4 人	公众成员	
	装配件区、会议室、资料档案室、监控室、办公室等		4~50	0	BNCT 生产区用房、办公生活用房，固定人员，约 50 人		
9	零部件入场验收区	西北	0~18	0	BNCT 生产区用房，固定人员，约 10 人	公众成员	
10	功率源间、水处理间	北	0~8	0	BNCT 调试实验区用房，固定人员，约 2 人	公众成员	
11	专精特新产业园内部绿化、道路等		3~15	0	绿化、道路，流动人员，约 2 人	公众成员	
12	重庆市璧山区高新技术产业开发区的标准厂房		15~50	0	3 栋标准厂房，1/2F，固定人员，约 200 人	公众成员	
13	重庆坤元堂医药有限公司	楼上	0	+9~+14	标准厂房 2F，固定人员，约 50 人	公众成员	

注：“+”代表其地面高于 BNCT 调试实验机房、物理实验室地面，“-”代表其地面低于 BNCT 调试实验机房、物理实验室地面。

续表 7 保护目标与评价标准

③放射性废物衰变间周围环境保护目标

拟建放射性废物衰变间周围辐射环境保护目标见下表。

表 7.2-2 放射性废物衰变间周围辐射环境保护目标情况一览表

序号	环境保护目标名称	方位	水平距离 (m)	最小高差 (m)	保护目标特征	影响人群	影响因素
1	专精特新产业园内部绿化、道路	东	0~16	0	绿化、道路,流动人员,约 2 人	公众成员	电离 辐射
2	专精特新产业园 12 号标准厂房		16~50	0	3F/-1F, 尚未招租	公众成员	
3	卫生间	南	0~8	0	办公生活区用房,流动人员,约 4 人	公众成员	
	预留用房、办公室等		8~18	0	办公生活区用房,固定人员,约 80 人	公众成员	
4	专精特新产业园内部绿化、道路		18~26	0	绿化、道路,流动人员,约 2 人	公众成员	
5	专精特新产业园 10 号、11 号标准厂房		26~50	0	3F/-1F, 2F/-1F, 尚未招租	公众成员	
6	走廊、预留用房	西	0~8	0	BNCT 调试实验区用房,流动人员,约 2 人	辐射工作人员	
	BNCT 调试实验机房、控制室、仓储间等		8~48	0	BNCT 调试实验用房,约 6 人		
	预留用房、洁净间等		41~50	0	BNCT 生产区用房,固定人员,约 20 人	公众成员	
7	预留用房	北	0~4	0	BNCT 调试实验区用房,约 2 人	辐射工作人员	
	消防气瓶间		4~10	0	BNCT 调试实验区用房,固定人员,约 2 人		
	楼梯间		10~14	0	辅助用房,流动人员,约 10 人	公众成员	
8	专精特新产业园内部绿化、道路等		14~26	0	绿化、道路,流动人员,约 2 人	公众成员	
9	重庆市璧山区高新技术产业开发区的标准厂房		26~50	0	3 栋标准厂房, 1F/2F, 固定人员,约 200 人	公众成员	
10	重庆坤元堂医药有限公司	楼上	0	+9~+14	标准厂房 2F, 固定人员,约 50 人	公众成员	

注: “+”代表其地面高于放射性废物衰变间地面, “-”代表其地面低于放射性废物衰变间地面。

(2) 大气环境保护目标

拟建项目厂界周围 500m 范围内均为专精特新产业园的标准厂房、奥方汽车零部件公司、上海中炼线材有限公司等工业企业以及道路、绿化, 无自然保护区、风景名胜区、居住区、文化区等。因此, 拟建项目厂界周围 500m 大气环境评价范围内无大气环境保护目标。

续表 7 保护目标与评价标准

(3) 声环境保护目标 拟建项目厂界周围 50m 范围内均为专精特新产业园的标准厂房、奥方汽车零部件公司、重庆市璧山区高新技术产业开发区的标准厂房、道路、绿化，故拟建项目厂界周围 50m 声环境评价范围内无声环境保护目标。 (4) 地下水环境保护目标 拟建项目位于城市建成区，厂界周围 500m 范围内无地下水环境保护目标。 (5) 生态环境 拟建项目位于重庆市璧山区高新技术产业开发区的专精特新产业园 13 号标准厂房第一层，不涉及生态环境保护目标，故不用进行生态环境现状调查。
7.3 评价标准 7.3.1 辐射环境相关标准 (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。 4.3.2 剂量限制和潜在照射危险限制 B1 剂量限值 第 B1.1.1.1 款 应对任何工作人员的照射水平进行控制，使之不超过下述限值：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 作为职业照射剂量限值。 第 B1.2 款 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超过下述限值：年有效剂量，1mSv。 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： a) 符合本标准附录 A（标准的附录）中所规定的豁免要求； b) 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。

续表 7 保护目标与评价标准

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
^7Be	1×10^3	1×10^7
^{14}C	1×10^4	1×10^7
^{41}Ar	1×10^2	1×10^9
^{55}Fe	1×10^4	1×10^6
^{59}Fe	1×10^1	1×10^6
^{66}Cu	1×10^2	1×10^6
^{114}Ln	1×10^2	1×10^6

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

续表 7 保护目标与评价标准

记录：

(a) 每月排放的总活度不超过 $10ALImin$ ($ALImin$ 是相应于职业照射的食入和吸入 ALI 值中的较小者)；

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

(2) 《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-85)

1 总则

1.2 本规定适用于加速粒子的单核能量低于 $100MeV$ 的粒子加速器（不包括医疗用加速器和象密封型中子管之类的可移动加速器）设施。

2 剂量当量限值

2.1 职业放射性工作人员全身受到均匀照射的剂量当量或全身受到不均匀照射的有效剂量当量，均不得超过每年 $50mSv$ ($5rem$)；公众中的个人，均不得超过每年 $5mSv$ ($0.5rem$)。

2.2 职业放射性工作人员眼晶体的剂量当量不得超过每年 $50mSv$ ($5rem$)，其他组织或器官的剂量当量均不得超过每年 $500mSv$ ($50rem$)；公众中的个人，任何器官或组织的剂量当量均不得超过每年 $50mSv$ ($5rem$)。

2.3 在只受到外照射的情况下，深部剂量当量指数应低于每年 $50mSv$ ($5rem$)。

2.6 必要时经辐射安全机构批准，可允许职业放射性工作人员接受超过年剂量当量限值的照射。但 1 次事件接受的剂量当量或剂量当量负担，不得超过年限值的 2 倍；一生中这种照射总共接受的剂量当量或剂量当量负担，不得大于年限值的 5 倍。具有生育能力的妇女和未满 18 周岁者，不得接受这种照射。

2.7 从事放射性工作的孕妇、授乳妇以及年龄在 16~18 周岁的实习人员。应在 1 年的照射不超过年剂量当量限值 $3/10$ 的条件下工作，并要求剂量当量率比较均匀。未满 16 周岁者，禁止从事放射性工作。

2.8 从事加速器工作的全体放射性工作人员，年人均剂量当量率应低于 $5mSv$ ($0.5rem$)。

2.10 加速器产生的杂散辐射、放射性气体和放射性废水等，对关键居民组中的个人造成的有效剂量当量率应低于每年 $0.1mSv$ ($10mrem$)。

续表 7 保护目标与评价标准

(3) 《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)

本标准规定了放射治疗的放射防护要求。

本标准适用于利用医用电子加速器、钴 60 治疗机、中子放射源及 γ 放射源后装治疗机、X 射线及 γ 射线立体定向放射治疗系统、螺旋断层放射治疗系统、术中放射治疗的移动式电子加速器、医用 X 射线治疗机、低能 X 射线放射治疗设备和质子重离子加速器等设备开展放射治疗的防护要求。

本标准不适用于放射性籽粒植入和放射性核素敷贴治疗的放射防护。

6.2 空间、通风要求

6.2.2 放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部，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；通风换气次数应不小于 4 次/h。

6.3 屏蔽要求

6.3.1 治疗机房墙和入口门外关注点周围剂量当量率参考控制水平

6.3.1.1 治疗机房（不包括移动式电子加速器治疗机房）墙和入口门外 30cm 处（关注点）的周围剂量当量率应不大于下述 a)、b) 和 c) 所确定的周围剂量当量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ ，见式 (1)：

$$\dot{H}_c \leq H_e / (t \times U \times T) \quad (1)$$

式中： $\dot{H}_c$ ——周围剂量当量率参考控制水平，单位为微希沃特每小时 ($\mu\text{Sv/h}$)；

H_e ——周剂量当参考控制水平，单位为微希沃特每小时 ($\mu\text{Sv/周}$)，其值按如下方式取值：放射治疗机房外控制区的工作人员： $\leq 100\mu\text{Sv/周}$ ；放射治疗机房外非控制区的人员： $\leq 5\mu\text{Sv/周}$ ；

t ——设备周最大累积照射的小时数，单位为小时每周 (h/周)；

U ——治疗设备向关注点位置的方向照射的使用因子；

T ——人员在关注点位置的居留因子，取值方法参附录。

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

续表 7 保护目标与评价标准

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

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

c) 由上述 a) 中的导出周围剂量当量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 和 b) 中的最高周围剂量当量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,\max}$, 选择其中较小者作为关注点的周围剂量当量率参考控制水平 $\dot{H}_c$ 。

6.3.2 治疗机房顶屏蔽的周围剂量当量率参考控制水平

6.3.2.1 在治疗机房上方已建、拟建二层建筑物或在治疗机房旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点至机房顶内表面边缘所张立体角区域时, 距治疗机房顶外表面 30cm 处, 或在该立体角区域内的高层建筑物中人员驻留处, 周围剂量当量率参考控制水平同 6.3.1。

6.3.2.2 除 6.3.2.1 的条件外, 若存在天空反射和侧散射, 并对治疗机房墙外关注点位置照射时, 该项辐射和穿出机房墙透射辐射在相应处的周围剂量当量率的总和, 按 6.3.1 确定关注点的周围剂量当量率作为参考控制水平。

(4) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分: 一般原则》(GBZ/T 201.1-2007)

本部分规定了医用放射治疗机房(以下简称治疗机房)辐射屏蔽的剂量参考控制水平一般屏蔽要求和辐射屏蔽评价要求。

本部分适用于外照射源治疗装置的机房。

本部分不适用于人体植入放射性核素粒子源的放射治疗房间和放射性核素源敷贴治疗的房间。

4.8.3 治疗机房辐射屏蔽涉及诸多物理量: 治疗装置有用束给予患者受治部位的剂量为吸收剂量(Gy)、治疗装置的泄漏辐射和可能产生的杂散中子及其散射辐射剂量为周围剂量当量或空气比释动能(Sv 或 Gy)、人员在治疗机房外的受照剂量为有效剂量(Sv)、在治疗机房外的辐射场和剂量仪表的测量值为周围剂量当量(Sv)。为了治疗机房屏蔽剂量估算和评价的方便及统一, 在辐射屏蔽及其设计范畴内, 不进行诸物理量与本标准中的周围剂量当量之间的转换系数修正。

续表 7 保护目标与评价标准

(5) 评价标准及相关参数值

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 5172-1985），建设单位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核算

拟建项目场所内开展硼中子俘获治疗系统的调试、实验研究，不涉及患者治疗，执行《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）。硼中子俘获治疗系统在用户单位（医疗机构）将开展患者治疗，执行《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）。

《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）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，但对周围活动的放射性工作人员、公众成员的年有效剂量提出了控制要求。本评价根据《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）的要求，并结合《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）的要求确定 BNCT 调试实验机房的屏蔽体外的剂量率参考控制水平。BNCT 调试实验机房屏蔽体外的剂量率参考控制水平确定方法详见前文《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）6.3 屏蔽要求。

根据硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试实验机房内开展离子源调试、RFQ 加速器调试时，BNCT 调试实验机房屏蔽体外的剂量率可忽略不计。故拟建项目主要考虑硼中子俘获治疗系统整机调试。据建设单位提供的资料可知，硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试实验机房内整机调试年出束时间不超过 30h，周出束时间不超过 0.6h。

硼中子俘获治疗系统的主射束方向仅朝向 BNCT 调试实验机房的中子靶站间北墙照射，故使用因子均取 1。

不同场所居留因子的推荐值见《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）附录 A（本报告表 7.3-4）。

表 7.3-4 不同工作场所与环境条件下的居留因子

场所	居留因子		示例
	典型值	范围	
全居留	1	1	管理人员或职员办公室、治疗计划区、治疗控制室、护士站、移动式电子加速器的相邻手术室与诊室、咨询台、有人护理的候诊室以及周边建筑中的驻留区

续表 7 保护目标与评价标准

场所	居留因子		示例				
	典型值	范围					
部分居留	1/4	1/2~1/5	1/2: 与屏蔽室相邻的患者检查室 1/5: 走廊、工作人员休息室				
偶然居留	1/16	1/8~1/40	1/8: 各治疗机房房门外 30 cm 处、相邻的（共用屏蔽墙）放射诊疗机房 1/20: 公厕、自动售货区、储藏室、设有座椅的户外区域、无人护理的候诊室、病人滞留区域、屋顶、门岗室 1/40: 仅有来往行人车辆的户外区域、无人看管的停车场、车辆自动卸货区域、楼梯、无人看管的电梯				

拟建 BNCT 调试实验机房屏蔽体外关注点的剂量率控制水平核算结果见表 7.3-5。

表 7.3-5 BNCT 调试实验机房屏蔽体外关注点剂量率控制水平核算表

方向		H_e (μSv/周)	T	$\dot{H}_{c,\max}$ (μSv/h)	$\dot{H}_c$ (μSv/h)	剂量率控制 水平(μSv/h)		
加速器室								
东	物理实验室	辐射工作人员	100	1	2.5	166.6	2.5	
南	控制室	辐射工作人员	100	1	2.5	166.6	2.5	
	设备电源间	辐射工作人员	100	1/16	10	2666.6	10	
西南	仓储间	辐射工作人员	100	1/16	10	2666.6	10	
西	洁净间、预留用房	公众成员	5	1	2.5	8.3	2.5	
北	零部件入场验收区（防护门外）	公众成员	100	1/8	10	1333.3	10	
	功率源间 空调夹层	辐射工作人员	100	1/16	10	2666.6	10	
	水处理间	辐射工作人员	100	1/16	10	2666.6	10	
顶棚	不借助工具无法到达	公众成员	5	1/16	10	133.3	10	
加速器室								
东	辐射工作人员走廊	迷路墙外	辐射工作人员	100	1/5	10	833.3	10
		防护门外	辐射工作人员	100	1/8	10	1333.3	10
南	物理实验室	辐射工作人员	100	1	2.5	166.6	2.5	
西→北	水处理间	辐射工作人员	100	1/16	10	2666.6	10	
顶棚	不借助工具无法到达	公众成员	5	1/16	10	133.3	10	

根据表 7.3-5 的计算结果，并考虑辐射防护的管理要求。建设单位确定 BNCT 调试

续表 7 保护目标与评价标准

实验机房屏蔽体外关注点周围剂量率控制水平确定为 2.5μSv/h。此外，物理实验室、放射性废物衰变间紧邻区域均为辐射工作人员活动区域或居留因子不大于 1/16 的公众成员活动区域。因此，建设单位参考 BNCT 调试实验机房屏蔽体外关注点的剂量率控制水平，确定物理实验室、放射性废物衰变间屏蔽体外关注点的剂量率控制水平为 2.5μSv/h。

用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统工作时间以及 BNCT 机房周围环境均无法确定。本评价根据《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）的要求，并参考拟建项目 BNCT 调试实验机房的剂量率参考控制水平，用户单位（医疗机构）的 BNCT 机房屏蔽体外的剂量率控制水平按照 2.5μSv/h 进行考虑，最终以用户单位（医疗机构）的环评报告以及批复文件为准。

③放射性废水排放

年摄入量限值（ALI）是指参考人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} ）：

$$I_{il} = \frac{D_L}{e_j} \quad (7.3-2)$$

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 $ALI_{\min}$ 为 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ， $10ALI_{\min}$ 为 $1.11 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。因此，拟建项目每月排放的 ^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。

综上所述，结合拟建项目实际情况，辐射环境标准限值如下。

表 7.3-6 辐射相关标准限值要求汇总表

年有效剂量控制要求		执行依据
放射工作人员	年有效剂量约束值 5mSv/a	GB18871-2002 GB5172-85 建设单位制定
公众成员	年有效剂量约束值 0.1mSv/a	

续表 7 保护目标与评价标准

周围剂量控制值		执行依据
屏蔽体外剂量率控制水平	BNCT 调试实验机房的加速器室屏蔽体外关注点的剂量率参考控制水平确定为 2.5 μ Sv/h。 物理实验室、放射性废物衰变间屏蔽体外关注点的剂量率控制水平确定为 2.5 μ Sv/h。	GBZ121-2020 建设单位制定
放射性废物排放		执行依据
放射性废水	活化冷却水活度低于豁免水平，建设单位保守考虑，在冷却水收集池内暂存30d后，取样监测，并做好存档记录。 每月排放的总活度不超过10ALImIn；每次排放的活度不超过1ALImIn。 放射性核素 ³ H的1ALImIn：1.11 $\times 10^9$ Bq， 10ALImIn：1.11 $\times 10^{10}$ Bq。	GB18871-2002
放射性固废	放射性固废暂存在放射性废物衰变间，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。	GB18871-2002
通风要求		执行依据
通风	通风换气次数应不小于 4 次/h。	GBZ121-2020

7.3.2 环境质量标准

(1) 《环境空气质量标准》（GB3095-2012）

根据《重庆市环境空气质量功能区划分规定》（渝府发〔2016〕19 号）规定，项目所在区属环境空气二类区，执行《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准，标准限值如下：

表 7.3-7 环境空气污染物浓度限值

标准	污染物项目	平均时间	浓度限值	单位
《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 二级标准	二氧化硫 (SO ₂)	年平均	60	μ m/m ³
		24 小时平均	150	
		1 小时平均	500	
	二氧化氮 (NO ₂)	年平均	40	
		24 小时平均	80	
		1 小时平均	200	
	一氧化碳 (CO)	24 小时平均	4	mg/m ³
		1 小时平均	10	
	臭氧 (O ₃)	日最大 8 小时平均	160	μ m/m ³
		1 小时平均	200	
	颗粒物 (粒径小于等于 10 μ m)	年平均	70	
		24 小时平均	150	μ m/m ³
	颗粒物 (粒径小于等于 2.5 μ m)	年平均	35	
		24 小时平均	75	μ m/m ³

续表 7 保护目标与评价标准

(2) 《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）				
拟建项目受纳水体为璧南河，根据《重庆市人民政府批转重庆市地表水环境功能类别调整方案的通知》（渝府发〔2012〕4号），璧南河璧山河段水域功能为IV类，执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）IV类水质标准，具体标准限值见下表。				
表 7.3-8 地表水环境质量标准限值情况一览表单位：mg/L				
项目	pH	BOD ₅	COD	氨氮
IV类水域	6~9	≤6	≤30	≤1.5
(3) 《声环境质量标准》（GB3096-2008）				
拟建项目位于重庆市璧山区高新技术产业开发区内。根据《重庆市璧山区声环境功能区划分调整方案》（璧山环发〔2023〕140号）可知，拟建项目所在区域为3类声功能区，执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）中3类标准（昼间≤65dB（A）、夜间≤55dB（A））。				
7.3.3 污染物排放标准				
(1) 《污水综合排放标准》（GB8979-1996）				
拟建项目生活污水经过专精特新产业园现有生化池处理达《污水综合排放标准》（GB8978-1996）三级标准后接入市政污水管网，并经璧山高新区生活污水处理厂处理后排入璧南河。根据《重庆市璧山高新区生活污水处理厂工程环境影响报告表》（报批版）可知，璧山高新区生活污水处理厂出水执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中的IV类水体标准。标准值详见表 7.3-9。				
表 7.3-9 废水污染物排放标准值				
序号	污染物	最高允许排放浓度（mg/L）		
		《污水综合排放标准》 （GB8978-1996）三级标准	《地表水环境质量标准》 （GB3838-2002）IV类水体质量标准	
1	pH（无量纲）	6-9	6-9	
2	COD	500	30	
3	BOD ₅	300	6	
4	SS	400mg/L	/	
5	氨氮	45*	1.5	
注：*表示氨氮执行《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T31962-2015）。				
(2) 噪声排放标准				
施工期：执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）：昼间≤70dB（A）、夜间≤55dB（A）。				

续表 7 保护目标与评价标准

营运期：厂界噪声排放执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）中 3 类排放标准：昼间 $\leq 65\text{dB}(\text{A})$ 、夜间 $\leq 55\text{dB}(\text{A})$ 。

（3）固体废弃物

一般工业固废：其贮存过程应满足相应防渗漏、防雨淋、防扬尘等环境保护要求。

7.3.3 其他标准

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

工作场所空气中化学因素的职业接触限值为：臭氧最高容许浓度（MAC）接触限值： $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ ；氮氧化物（一氧化氮和二氧化氮）的时间加权平均容许浓度（PC-TWA）接触限值： $5\text{mg}/\text{m}^3$ 。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理和场所位置

拟建项目位于重庆市璧山区高新技术产业开发区专精特新产业园 13 号标准厂房第一层。专精特新产业园 13 号标准厂房为已建成的标准厂房，拟建项目根据自身需要进行内部建设及装修。拟建项目地理位置图见附图 1，核技术利用工作场所（BNCT 调试实验机房、物理实验室、放射性废物衰变间）位置见附图 2-4。

用户单位（医疗机构）以及硼中子俘获治疗系统使用场所均无法确定，但选址应符合《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）的要求，硼中子俘获治疗系统使用场所一般单独建造或建在建筑物底部的一端。

8.2 辐射环境现状

为掌握项目所在位置的环境质量现状，重庆泓天环境监测有限公司于 2024 年 6 月 12 日对拟建项目的环境 γ 辐射剂量率、中子剂量当量率进行了监测，其监测报告（渝泓环（监）[2024]502 号）见附件三。

8.1.1 监测因子

《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）的“5.3.3.1 应用粒子加速器的辐射环境监测”中提出“粒子加速器按射线能量和在申请中辐射风险程度或安全防护的难易程度分低能加速器（Ⅲ、Ⅱ类射线装置）和中高能加速器（Ⅰ类射线装置）两大类”。拟建项目生产、销售、使用的硼中子俘获治疗系统是Ⅱ类射线装置，属于低能加速器。故拟建项目应用粒子加速器的辐射环境监测方案见《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）的表 11。因此，拟建项目需对放射性 BNCT 调试实验机房屏蔽体外的 γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率，循环冷却水的总 α 、总 β ，固体废物的废物包装表面的 γ 辐射空气吸收剂量率进行监测。

根据后文分析可知，拟建项目运营期间产生的活化废气、活化冷却水的放射性核素活度均低于其豁免活度。参考《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期）、日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。拟建项目 BNCT 调试实验机房底部与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5mSv/h。因此，拟建项目建设前仅对拟建项目场址的环境 γ 辐射剂量率、中子剂量当量率进行监测。

续表 8 环境质量和辐射现状

8.1.2 监测方案

(1) 监测方法和依据

监测方法和依据见表 8.1-1。

表 8.1-1 监测方法和依据

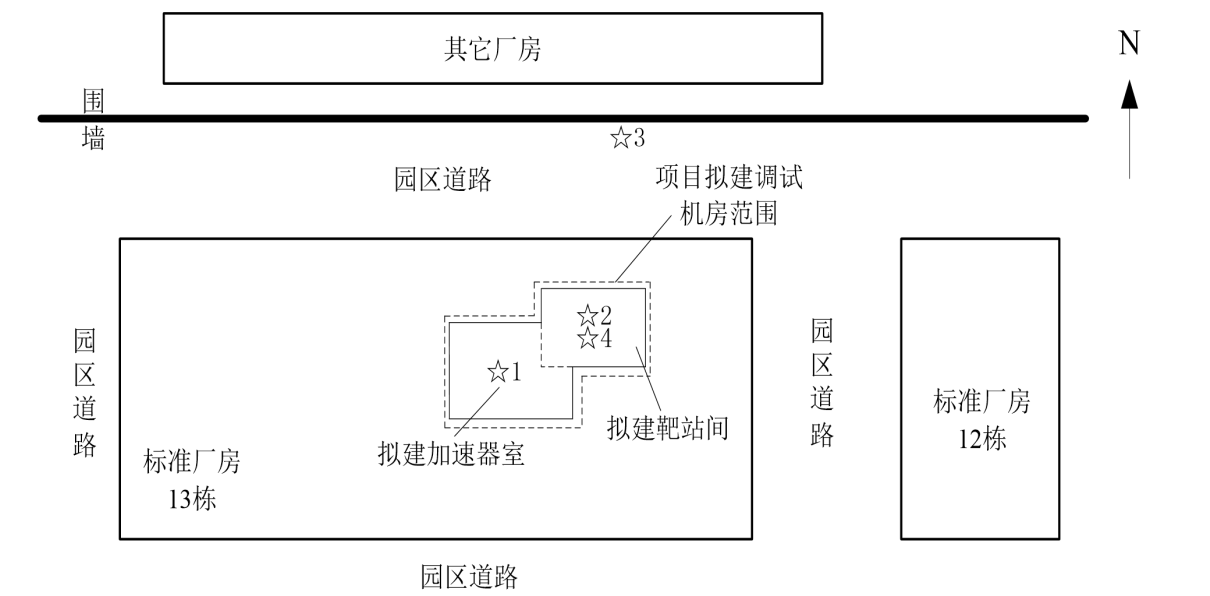
监测方法	监测因子	监测依据
仪器法	环境γ辐射剂量率	《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)
	中子剂量当量率	《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)

(2) 监测点位选取

拟建项目共设 4 个环境 γ 辐射剂量率监测点及 4 个中子剂量当量率监测点，监测点位情况见表 8.1-2，监测布点图见 8.1-1。

表 8.1-2 监测点位描述

序号	监测点位描述	监测因子	备注
1	拟建加速器室	环境γ辐射剂量率 中子剂量当量率	拟建 BNCT 调试实验机房内（室内）
2	拟建靶站间		
3	厂房北侧园区道路		室外
4	拟建靶站间楼上		拟建 BNCT 调试实验机房楼上（室内）



备注：☆为环境γ辐射剂量率和中子剂量当量监测点位，其中☆4位于拟建靶站间楼上。

图 8.1-1 监测布点示意图

根据项目拟建场所现状以及厂房内部布局，共布设 4 个监测点，分别位于 BNCT 调试实验机房拟建位置、楼上及所在厂房外部紧邻最近环境保护目标处。拟建项目租用的专精特新产业园 13 号标准厂房第一层为空置状态，1 号和 2 号监测点位的监测结果也能

续表 8 环境质量和辐射现状

代表 BNCT 调试实验机房周围其他用房的辐射环境现状。因此，拟建项目布设的监测布点可以反应拟建项目所在区域环境 γ 辐射背景值及中子剂量当量率背景值。因此，拟建项目环境 γ 辐射剂量率、中子剂量当量率的监测布点合理可行。

8.1.3 质量保证措施

监测仪器情况见表 8.1-3。

表 8.1-3 监测仪器情况

仪器名称	仪器型号	仪器编号	资产编号
环境级 χ 、 γ 辐射巡检仪	RGM5200	1222203004005	HT20221201
测量范围	计量检定证书编号	有效期至	校准因子
10nSv/h-100 μ Sv/h	2023110704836	2024.11.26	1.06
仪器名称	仪器型号	仪器编号	资产编号
中子剂量当量仪	BH3105	38	HT20160803
测量范围	计量检定证书编号	有效期至	校准因子
0.1 μ Sv/h~100.0mSv/h	DLjs2023-02030	2024.7.12	0.913

重庆泓天环境监测有限公司具有相应检验检测资质 CMA；监测仪器每年送计量部门检定合格后在有效期内使用；监测时获取足够的数据量，以保证监测结果的统计学精度；重庆泓天环境监测有限公司出具的监测报告严格实行三级审核制度，经过校对、校核，最后由授权签字人签发。监测结果有效。

8.1.4 监测结果

监测结果统计见表 8.1-4。

表 8.1-4 拟建项目所在区域环境本底监测结果统计

监测点位	监测点位描述	环境 γ 辐射剂量率（ μ Gy/h）	中子剂量当量率（ μ Sv/h）
1	拟建加速器室	0.058	L
2	拟建靶站间	0.055	L
3	厂房北侧园区道路	0.069	L
4	拟建靶站间楼上	0.070	L

备注：环境 γ 辐射剂量率监测结果均未扣除宇宙射线响应值。L 表示未检出中子剂量当量率。

由上表可知，拟建项目场址及周围环境的环境 γ 辐射剂量率的监测值在 55nGy/h~70nGy/h 之间（未扣除宇宙射线响应值）。2023 年重庆市环境 γ 辐射剂量率各点位测量均值范围为 76.8~93.3nGy/h、全市各点位年均值为 87.0nGy/h（均未扣除宇宙射线回应值）。拟建项目辐射环境背景调查表明，拟建项目场址及周围的环境 γ 辐射剂量水平在重庆市天然辐射本底水平的正常涨落范围内。

续表 8 环境质量和辐射现状

此外，拟建项目场址及周围环境均未检测出中子剂量当量率。						
8.2 大气环境质量现状						
根据《重庆市环境空气质量功能区划分规定》（渝府发〔2016〕19 号）规定，项目区域环境空气功能区划为二类区，环境空气质量执行《环境空气质量标准》（GB3095-2012）中二级标准。						
本评价引用《2023 重庆市生态环境状况公报》中璧山区 SO ₂ 、NO ₂ 、CO、O ₃ 、PM ₁₀ 、PM _{2.5} 数据进行区域达标判定。监测数据及评价结果如下表 8-5 所示。						
表 8.2-1 环境空气评价因子监测结果统计表						
污染物	监测值类型	现状浓度 (μg/m ³)	标准值 (μg/m ³)	最大浓度占 标率 (%)	超标率 (%)	达标 情况
SO ₂	年均值	11	60	18.3	/	达标
NO ₂	年均值	26	40	65.0	/	达标
O ₃	日最大 8 小时平均值	156	160	97.5	/	达标
CO (mg/m ³)	24 小时平均值	1.1	4	27.5	/	达标
PM ₁₀	年均值	61	70	87.1	/	达标
PM _{2.5}	年均值	36	35	102.9	2.9	不达标
由上表可知，璧山区为区域环境质量不达标区，环境空气基本污染物 PM ₁₀ 、SO ₂ 、NO ₂ 、CO 和 O ₃ 满足《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准，PM _{2.5} 不满足《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准。						
根据《璧山区大气环境质量限期达标规划（2017—2028 年）》，规划分“近、中、远期”三个阶段，逐步削减大气污染物排放量，以细颗粒物（PM _{2.5} ）年均浓度达标为核心，全面改善环境空气质量。工业方面的主要任务与措施包括：						
优化能源结构，发展清洁能源。实施能源消耗总量和强度双控行动、大力淘汰燃煤锅炉、推广清洁能源使用、推进建筑节能和绿色建筑						
严格环境准入，完善产业布局。严格环境准入管理、优化产业布局、推进淘汰过剩产能、推进清洁生产技术。						
加大防治力度，减少工业排放。强化工业废气综合治理、全面开展挥发性有机物治理、“散乱污”企业综合整治、实施企业错峰生产、加强污染源监督监测						
加强执法监管、加强大气污染应急监测、优化空气质量常规监测网络、加快网格化监测方案实施、完善物联网体系建设、建立市场化资源要素交易机制、加强重污染天气						

续表 8 环境质量和辐射现状

应对工作。

根据《璧山区大气环境质量限期达标规划（2017—2028 年）》，到 2028 年实现璧山区 PM_{2.5} 年均浓度达标。除 PM_{2.5} 年均浓度以外的其余未达标污染物应在 2028 年之前达标，原则上不应超过 PM_{2.5} 的达标期限。

8.3 地表水环境质量现状

拟建项目所在区域污水受纳水体为璧南河。根据《重庆市人民政府批转重庆市地表水环境功能类别调整方案的通知》（渝环发〔2012〕4 号），璧南河璧山河段为 IV 类水域，执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中 IV 类标准。

根据重庆市生态环境局连续发布的 2024 年 1~6 月璧南河两河口国控断面水质状况（https://sthjj.cq.gov.cn/hjzl_249/shjzl/shjzlzk/202402/t20240206_12912040_wap.html），该断面 2024 年前 6 个月水质达地表水 III 类，满足 IV 类水域功能要求。本次评价对璧南河评价段按 IV 类水域功能进行了评价，其水质质量能满足《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）IV 类水域功能区要求。

8.4 声环境质量现状

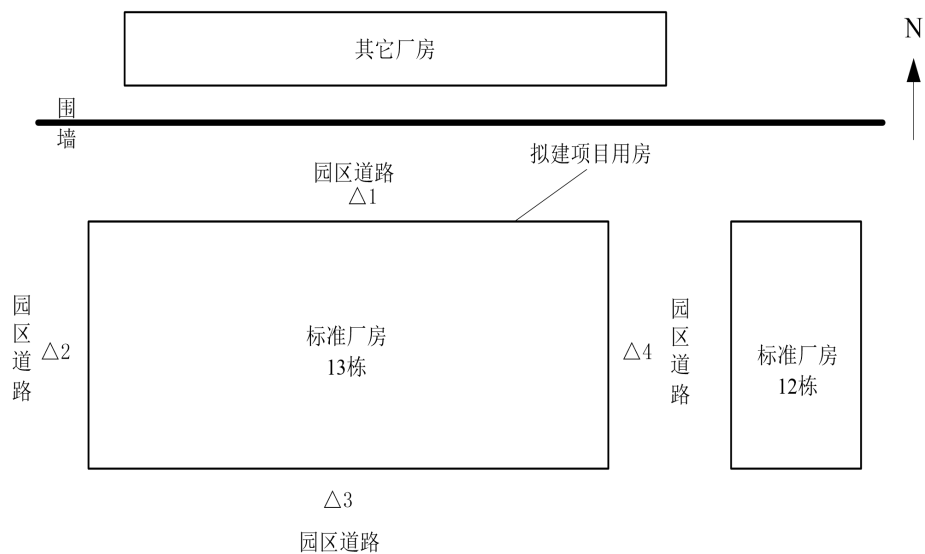
拟建项目位于璧山区高新技术产业开发区专精特新产业园，所在区域为 3 类声环境功能区，其声环境执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）中 3 类标准。重庆泓天环境监测有限公司于 2024 年 6 月 12 日对拟建项目区域声环境进行了监测，其监测报告（渝泓环〔监〕[2024]502 号）见附件三。

监测因子：等效连续 A 声级

监测频率：每天昼间、夜间各 1 次。

监测布点：共布设 4 个监测点，位于拟建项目所在专精特新产业园 13 号标准厂房四周，监测布点示意图见图 8.2-1。

续表 8 环境质量和辐射现状



备注：△为环境噪声监测点位。

图 8.2-1 监测布点示意图

声环境质量现状监测结果见下表。

表 8.2-2 噪声监测结果

监测点位	监测结果 dB(A)		标准限值 dB(A)	
	昼间	夜间	昼间	夜间
△1	55	50	≤65	≤55
△2	51	47		
△3	47	43		
△4	50	46		

从上表可知，拟建项目周围声环境监测点的昼夜监测结果均满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）中 3 类标准的要求。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 施工期污染工序及污染物产生情况

拟建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。因此，标准厂房的主体结构已建成，本次施工主要进行 BNCT 调试实验机房的建设、厂房内部装修以及设备安装。拟建项目主要污染工序及环节见图 9.1-1。

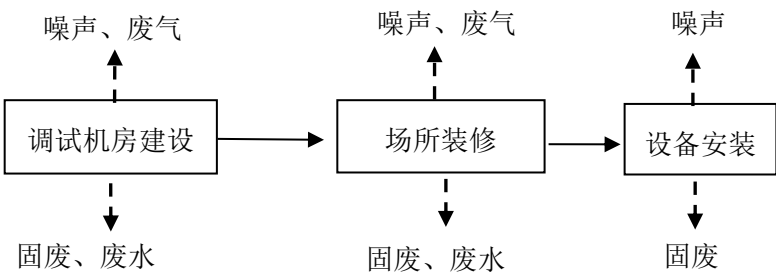


图 9.1-1 施工期工艺流程及产污环节图

拟建项目施工期的污染因子主要有噪声、废气、废水、固废等。

(1) 噪声

拟建项目施工期噪声主要来自 BNC 调试机房建设、装修以及设备安装过程中的施工设备噪声。拟建项目施工各施工设备在施工过程中噪声源强约为 75~115dB（A）。

(2) 废气

拟建项目施工期的主要大气污染物为施工机械废气和施工扬尘等。

施工扬尘：施工产生的扬尘主要来自水泥、砂石等卸载过程，因外力产生的尘粒再悬浮而造成。据有关监测，在风速为 1.2m/s 或 2.4m/s 下，土方和灰土的装卸、运输、施工或现场施工时，距离下风向 50~100m 处颗粒物浓度为 11.7~5.0mg/m³。

施工机械废气：施工产生的施工机械废气主要来自各类燃油动力机械在进行施工、运输等施工活动，其废气主要污染物为 CO、NO_x 等。

(3) 废水

拟建项目施工期废水主要为施工废水与生活污水。

施工废水：施工废水主要为混凝土养护废水，其特点是悬浮物含量高，浓度约为 1500-2000mg/L。

生活污水：施工期生活污水主要为施工人员生活污水，拟建项目施工人员按平均 20 人/天计，每人每天排水量按 50L 计，污水排放量按生活用水量的 90%核算，废水量约 0.9m³/d，主要污染物为 COD：300mg/L、BOD₅：200mg/L、NH₃-N：35mg/L。

续表 9 项目工程分析与源项

(4) 固体废物

拟建项目施工期产生的固体废物主要为土石方、建筑垃圾、生活垃圾。拟建项目土石方主要来自 BNCT 调试实验机房的开挖，产生量约 1200t；建筑垃圾主要包括施工过程中产生的废木料、水泥、砂石、石材等，产生量约 20t。生活垃圾按每天 20 人计，每人每天生活垃圾产生量约 0.5kg，则每天产生 10kg。

9.2 运营期工艺流程及产污环节

9.2.1 设备组成及工作方式

(一) 设备组成

拟建项目生产、调试、销售的硼中子俘获治疗系统是一个集核物理、中子物理、加速器技术、计算机技术、软件工程、自动控制技术、辐射防护和工业设计等多学科的一个复杂系统。

拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统选用“***”的技术路线。因此，拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统主要由加速器和束流线系统、中子靶站系统、****、****、治疗控制与安全系统、****、****、辐射屏蔽与防护系统等八大子系统构成，详见下图 9.2-1。

图 9.2-1 硼中子俘获治疗系统的系统组成示意图

拟建项目生产、调试、销售的硼中子俘获治疗系统的组装示意图见图 9.2-2。

图 9.2-2 硼中子俘获治疗系统组装示意图

拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统可根据客户需求，可配置多间中子靶站间（治疗室）。典型的硼中子俘获治疗系统布局效果见图 9.2-3。

图 9.2-3 硼中子俘获治疗系统的整机布局效果图

硼中子俘获治疗系统的顶层架构见图 9.2-4。

图 9.2-4 BNCT 系统顶层架构图

拟建项目的 BNCT 调试实验机房仅配置 1 间中子靶站间，且仅开展硼中子俘获治疗系统的调试、实验研究工作，不进行患者治疗。因此，拟建项目 BNCT 调试实验机房的中子靶站间不配置患者治疗相关设备，仅配置 1 套可移动的实验平台用于开展硼中子俘

续表 9 项目工程分析与源项

获治疗系统调试工作。 ***。 患者摆位系统、患者定位系统均由第三方单位运输至用户单位（医疗机构）进行安装、调试。因此，本章节重点对硼中子俘获治疗系统的加速器和束流线系统、中子靶站系统进行介绍。 （1）加速器和束流线系统 硼中子俘获治疗系统的加速器和束流线系统安装在 BNCT 调试实验机房内，主要由离子源及 LEBT 系统、RFQ 加速器系统、射频功率源系统、束流传输线系统、束流测量系统、准直系统、加速器控制系统、支架系统构成，是硼中子俘获治疗系统的核心系统，其目的是将能量为 2.7MeV、强度 15~30mA 的质子束流线引入靶站位置。 根据建设单位提供的资料，拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统的加速器和束流线系统的主要参数见下表。 表 9.2-1 加速器和束流线系统的主要参数 *** 离子源及 LEBT 系统、RFQ 加速器系统、束流线系统是加速器和束流线系统的核心系统，具体情况如下： ①离子源及 LEBT 系统 离子源及 LEBT 系统是加速器和束流线系统的核心系统之一。 拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统使用的离子源为强流 ECR（Electron Cyclotron Resonance，电子回旋共振）质子源，其主要功能是提供 RFQ 加速器系统所需能量为 30~50keV 的质子束流。低能传输线（Low Energy Beam Transport）简称为“LEBT”，其主要功能是将强流 ECR 质子源产生的质子束流传输并匹配到 RFQ 加速器系统。 离子源及 LEBT 系统的离子源体结构和引出系统结构示意图如下： *** 图 9.2-5 离子源及 LEBT 系统结构示意图 ②RFQ 加速器系统 RFQ 加速器系统是加速器和束流线系统的核心系统之一。 硼中子俘获治疗系统的加速器主要有回旋加速器、射频直线加速器、静电加速器。拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统采用射频直线加速器，选用强流连续波 RFQ（Radio
--

续表 9 项目工程分析与源项

Frequency Quadrupole，射频四极）加速器技术路线。RFQ 加速结构是一种利用高频四极电场同时实现横向聚焦和纵向加速的加速结构，其主要功能是将强流 ECR 质子源产生的能量为 30~50keV 质子束流最高加速到 2.7MeV。

RFQ 腔体结构示意图如下：

图 9.2-6 RFQ 腔体结构

③束流传输线系统

束流传输线系统是加速器和束流线系统的核心系统之一，其主要功能是利用高能传输线（High Energy Beam Transport Line，简称“HEBT”）将能量不高于 2.7MeV 的质子束流输送至中子靶站系统。

（2）中子靶站系统

硼中子俘获治疗系统的中子靶站系统是质子束到治疗束的转换站，主要由旋转锂靶组件、束流整形体组件组成，内嵌在 BNCT 调试实验机房的加速器室和治疗室之间的混凝土墙内。中子靶站系统是将能量不高于 2.7MeV 的质子束流通过旋转锂靶组件转换为能量不高于 1.1MeV 的初级中子束流（平均能量为 450~500keV），通过束流整形体组件慢化为能量不大于的 1.1MeV 次级中子束流（平均能量为 4~5keV）。

中子靶站系统主要结构见下图。

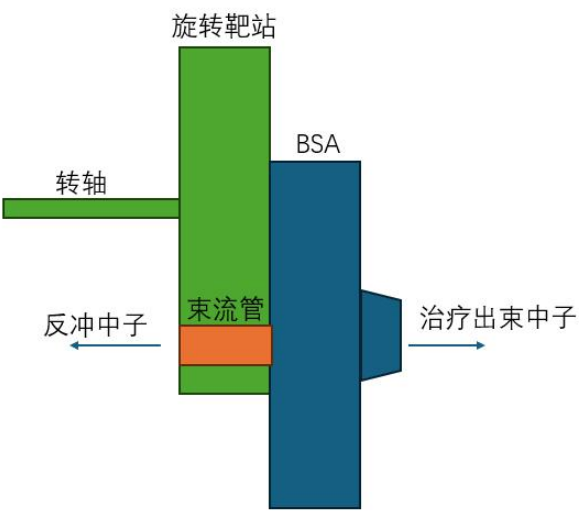


图 9.2-7 旋转锂靶组件、束流整形体组件示意图

束流整形体组件的主要材质为氟化锂、铅、含 30%碳化硼聚乙烯，初级中子束流主

续表 9 项目工程分析与源项

要通过氟化镁进行束流整形，铅进行反射和光子屏蔽，含硼聚乙烯吸收中子，保证治疗出束中子满足治疗要求。

根据建设单位提供的资料，拟建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 9.2-2 中子靶站系统技术指标

(二) 工作方式

拟建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，委托第三方单位生产硼中子俘获治疗系统所需的构件、零部件，而后运至拟建项目场地完成硼中子俘获治疗系统各部件的组装，最终运至用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所完成安装、调试，最终正式投入使用。特殊情况下，硼中子俘获治疗系统在拟建项目场地完成安装、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，硼中子俘获治疗系统在拟建项目场地内进行调试时，同步开展实验研究工作。

硼中子俘获治疗系统使用前，在 BNCT 调试实验机房相应位置布置***等，而后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，测试纯质子束流的束斑大小、均匀度、测量质子束流强度、中子束流品质，活化后的金丝、活化片转移至物理实验室进行 γ 射线强度的测量，进而完成相关实验研究。

9.2.2 工作原理

(一) 硼中子俘获治疗系统工作原理

硼中子俘获治疗系统是利用强流 ECR 质子源产生能量为 30keV~50keV 质子束流，经低能传输线传输至 RFQ 加速器系统，RFQ 加速器系统将质子束流进行加速，而后将加速至束流能量不大于 2.7MeV 的质子束流经高能传输线传输至中子靶站系统，撞击锂靶后产生能量不大于 1.1MeV 的初级中子束流（平均能量为 450~500keV），中子经过慢化和束流整形获得治疗所需能量不大于 1.1MeV 的次级中子束（平均能量为 4~5keV），中子束照射患者肿瘤区域时，肿瘤细胞内的 ^{10}B 可俘获大量中子，产生 α 粒子和反冲锂核

续表 9 项目工程分析与源项

对癌细胞起到杀伤作用。

硼中子俘获治疗系统工作原理示意图见下图。

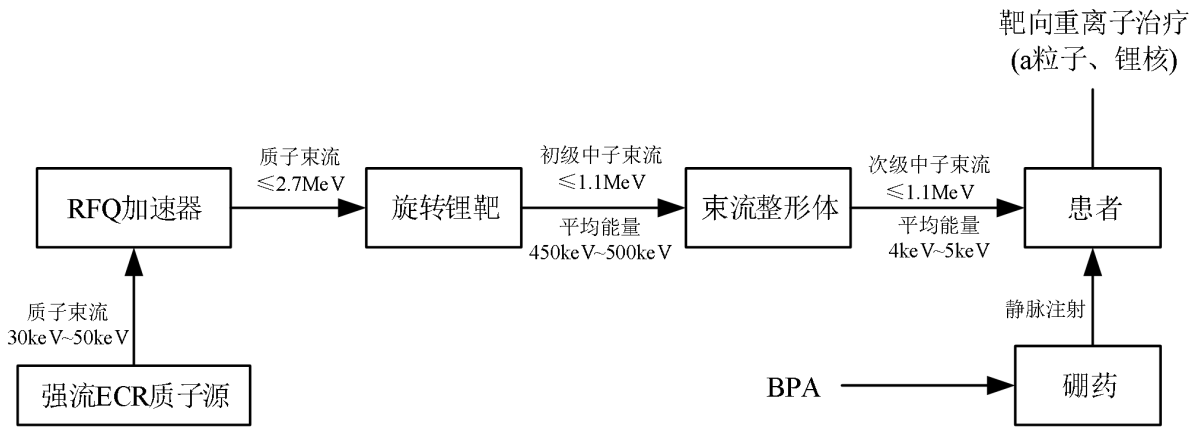


图 9.2-8 硼中子俘获治疗系统工作原理

拟建项目不涉及患者治疗，重点关注硼中子俘获治疗系统运行产生能量不大于次级 1.1MeV 中子束流（平均能量为 4keV~5keV）的工作原理，对患者治疗的工作原理进行简单介绍。

(1) 硼中子俘获治疗系统出束工作原理

①30keV~50keV 质子束流

硼中子俘获治疗系统的强流 ECR 离子源将氢气剥离产生 30keV~50keV 质子束流，其工作原理是通过外加的恒磁场和高频微波场形成一个稳定的电子回旋轨道。这个电子回旋轨道在恒磁场的作用下，使得电子受到一个向心力，不断绕着回旋轨道运动。其次，微波场会通过电子回旋轨道的频率匹配，将能量传递给电子，电子的能量就会逐渐增加。最后，加热介质中的原子或分子与高能电子发生碰撞，被电离成离子。这些离子在恒磁场的引导下，沿着电子回旋轨道被加速并聚焦，形成一个稳定的离子束。

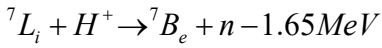
②≤2.7MeV 质子束流

硼中子俘获治疗系统的 RFQ 加速器将强流 ECR 离子源产生的 30keV~50keV 质子束流最高加速至 2.7MeV，其工作原理是 RFQ 加速器的四个轴中心对称的电极由于高频功率的激励而产出交变电四极场，从而提供连续的横向聚焦力，同时电极在纵向受到周期性的调制，从而产生纵向电场分量，使得 30keV~50keV 质子束流受到准绝热聚束的同时得到加速，经过射频四极加速器出口处的质子能量达到 2.7MeV。

③≤1.1MeV 初级中子束流

续表 9 项目工程分析与源项

硼中子俘获治疗系统的 RFQ 加速器加速产生的 2.7MeV 质子束流轰击锂靶产生能量不大于 1.1MeV 的初级中子束流，核反应如下：



核反应 ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n}){}^7\text{Be}$ 为吸热反应。拟建项目采用蒙特卡罗程序 FLUKA 进行模拟计算能量为 2.7MeV、束流强度 30mA 的质子轰击锂靶产生的初级中子能谱见图 9.2-9。

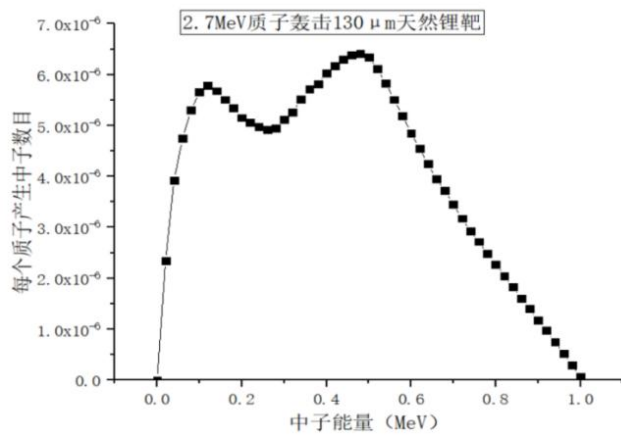


图 9.2-9 2.7MeV 质子轰击锂靶的中子能谱分布图

根据上图可知，能量为 2.7MeV、束流强度 30mA 的质子轰击锂靶，每个质子累积产生的中子数目约为 2.1×10^{-4} ，初级中子能量不大于 1.1MeV，平均能量约 400keV~450keV。

④≤1.1MeV 次级中子束流

2.7MeV 质子束流轰击锂靶产生能量不大于 1.1MeV 的中子束流通过束流整形体进行慢化和整形得到患者治疗所需的次级中子束流。硼中子俘获治疗系统出束口的初级中子能谱见图 9.2-10。

图 9.2-10 1.1MeV 初级中子束流慢化整形后的次级中子能谱分布图

根据上图可知，能量不大于 1.1MeV 的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 1.1MeV，平均能量约 4keV~5keV。

(2) 硼中子俘获治疗系统治疗原理

${}^{10}\text{B}$ 与肿瘤有特异性亲合力的，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

续表 9 项目工程分析与源项

^{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。

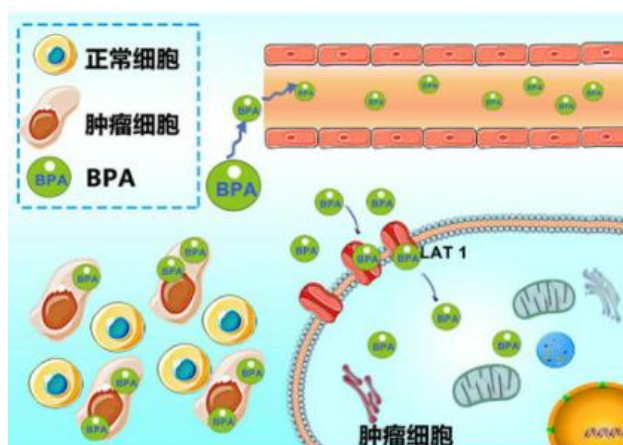


图 9.2-11 BPA 在人体组织内的分布示意

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。

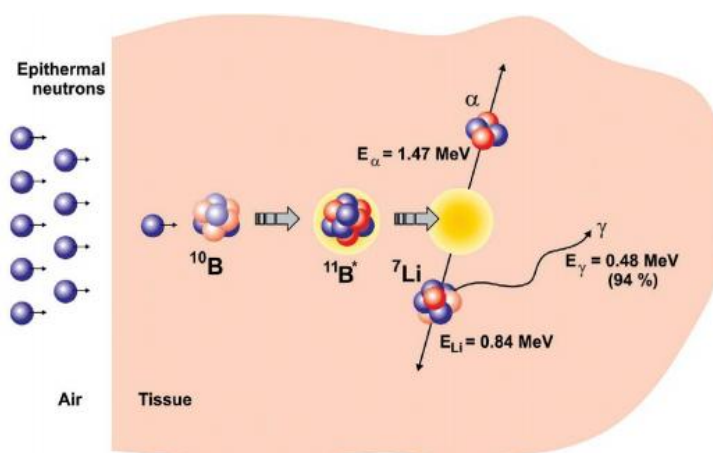


图 9.2-12 硼、中子反应示意图

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。

拟建项目场所仅开展硼中子俘获治疗系统的生产、销售、使用（调试、实验研究及售后检修），不涉及患者治疗，故未设置治疗室。但拟建项目设置 1 间中子靶站间用于布置研发试验平台，并配套设置物理实验室开展硼中子俘获治疗系统调试实验工作。

续表 9 项目工程分析与源项

9.2.3 工艺流程及产污环节

拟建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。拟建项目整体工艺及产污流程图见下图。

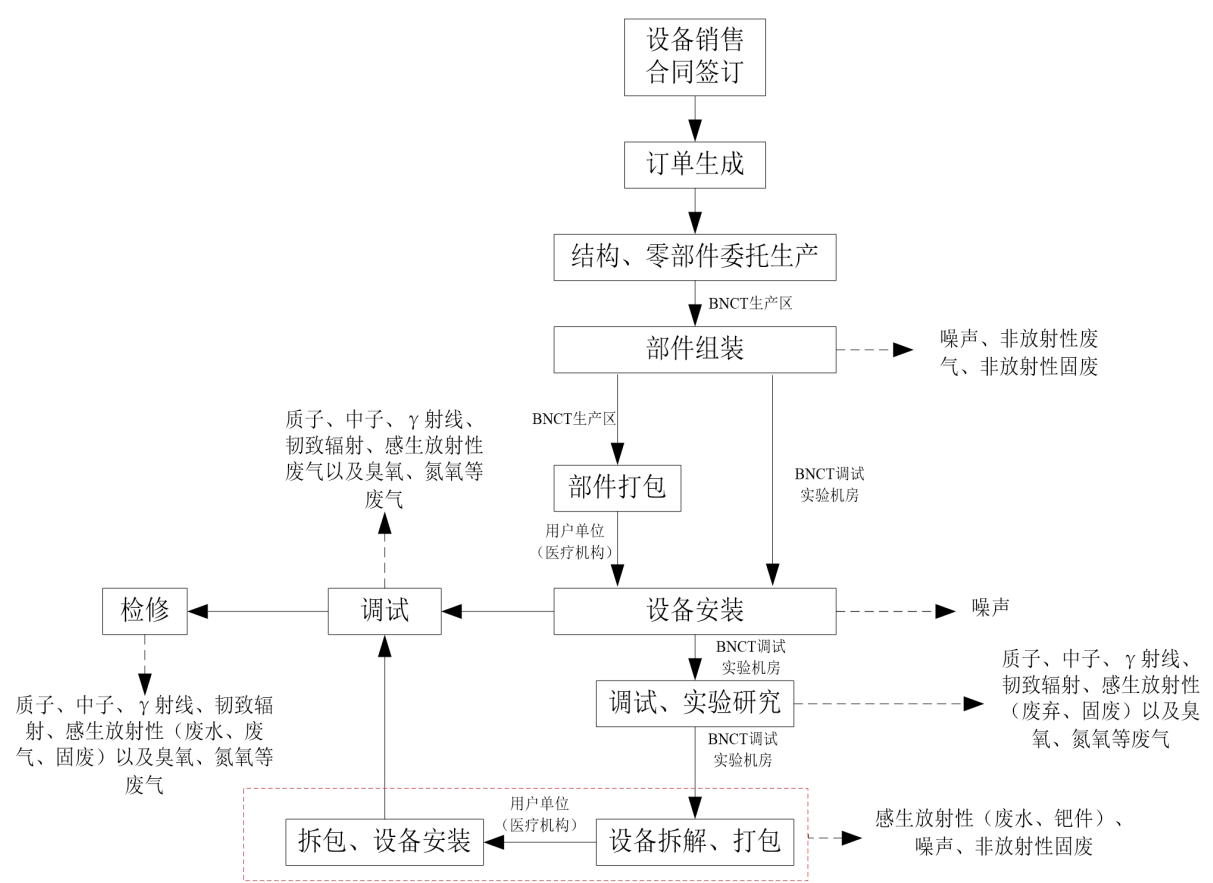


图 9.2-13 整体工艺及产污流程图

（一）硼中子俘获治疗系统的销售

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。

（二）硼中子俘获治疗系统的生产、安装

续表 9 项目工程分析与源项

拟建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，委托第三方单位生产硼中子俘获治疗系统所需结构、零部件，并运至拟建项目 BNCT 生产区的零部件入场验收区进行拆包验收，而后在洁净间、装配件区对结构、零部件进行钻孔、攻丝、打磨、焊接等操作，完成部件组装并打包，而后部件运输至用户单位（医疗机构），拆包并完成设备安装。用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所未按照计划修建完成，组装完成的部件转移至 BNCT 调试实验机房内完成设备安装，并与 BNCT 调试实验机房的相关辅助设施、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）建设单位有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，另硼中子俘获治疗系统的结构、零部件在钻孔、攻丝、打磨以及焊接过程中将产生少量的金属粉尘、焊接废气。此外，在拟建项目 BNCT 调试实验机房完成调试的硼中子俘获治疗系统在用户单位（医疗机构）的拆包、安装过程中还将产生感生放射性（部件）。

（三）硼中子俘获治疗系统的调试

硼中子俘获治疗系统的调试内容主要包括离子源调试、RFQ 加速器调试、整机调试。拟建项目采取分段式调试方式，具体情况如下：

离子源调试：离子源及 LEPT 系统工作，RFQ 加速器及 HEBT 系统不工作、中子靶站系统不工作，则硼中子俘获治疗系统运行离子源调试仅有强流 ECR 质子源运行产

续表 9 项目工程分析与源项

生的 30keV~50keV 质子束流。

RFQ 加速器调试：离子源及 LEBT 系统工作、RFQ 加速器及 HEBT 系统工作，中子靶站系统不工作，则硼中子俘获治疗系统运行 RFQ 加速器调试有强流 ECR 质子源运行产生的 30keV~50keV 质子束流以及 RFQ 加速器加速引出的能量不大于 2.7MeV 的质子束流。

整机调试：离子源及 LEBT 系统工作、RFQ 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运行整机调试有强流 ECR 质子源运行产生的 30keV~50keV 质子束流、RFQ 加速器加速引出的能量不大于 2.7MeV 质子束流、质子束流轰击锂靶产生的能量不大于 1.1MeV 中子束流（平均能量为 450~500keV），中子束流慢化处理产生的能量不大于 1.1MeV 的中子束流（平均能量为 4~5keV）。

硼中子俘获治疗系统调试流程见下图所示。

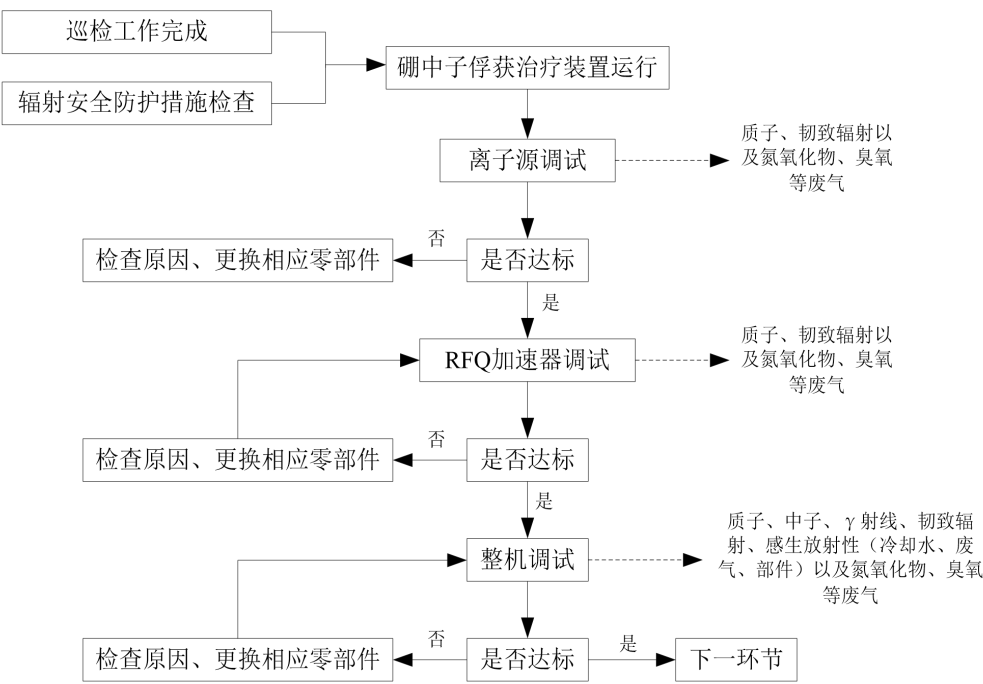


图 9.2-14 硼中子俘获治疗系统调试流程示意图

硼中子俘获治疗系统的调试工作开展前必须对 BNCT 调试实验机房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 调试实验机房进行巡检，确保机房内无人滞留，并关闭防护门，禁止人员进入。

离子源调试：离子源调试主要将离子源及 LEBT 系统输出的纯质子束流撞击荧光靶，用于测试纯质子束流的束斑形状（椭圆发射度约**）、稳定度（**）等是否满足要求。

续表 9 项目工程分析与源项

该环节将产生质子、韧致辐射以及氮氧化物、臭氧等废气。 RFQ 加速器调试：RFQ 加速器调试主要调试质子束流强度，利用 RFQ 加速器自带的质子电离室测量质子束流电流强度确定束流强度，当束流强度达到设定值（**）认为加速器调试完毕。该环节将产生质子、韧致辐射以及氮氧化物、臭氧等废气。 整机调试：整机调试是设定束流强度为**，在束流出口处，利用宽能中子谱仪和伽马剂量率仪测量中子能谱和伽马射线剂量率。评估中子束流品质，品质最低满足 IAEA 关于 BNCT 中子束流的推荐值（**）。该环节将产生质子、中子、γ 射线、韧致辐射、感生放射性（冷却水、废气、部件）以及氮氧化物、臭氧等废气。 在拟建项目 BNCT 调试实验机房或用户单位（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，包括便携式中子剂量仪（含 γ 探头）、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。 （四）硼中子俘获治疗系统的实验研究 拟建项目主要采用金丝和活化箔测量法进行中子束流品质的实验研究。金丝和活化箔测量法是利用硼中子俘获治疗系统的整机出束产生的中子照射金丝和活化箔，而后转移至物理实验室，利用高纯锗谱仪测量 γ 放射性强度，分析横向、纵向热中子的分布。 硼中子俘获治疗系统实验研究的流程见下图所示。
--

续表 9 项目工程分析与源项

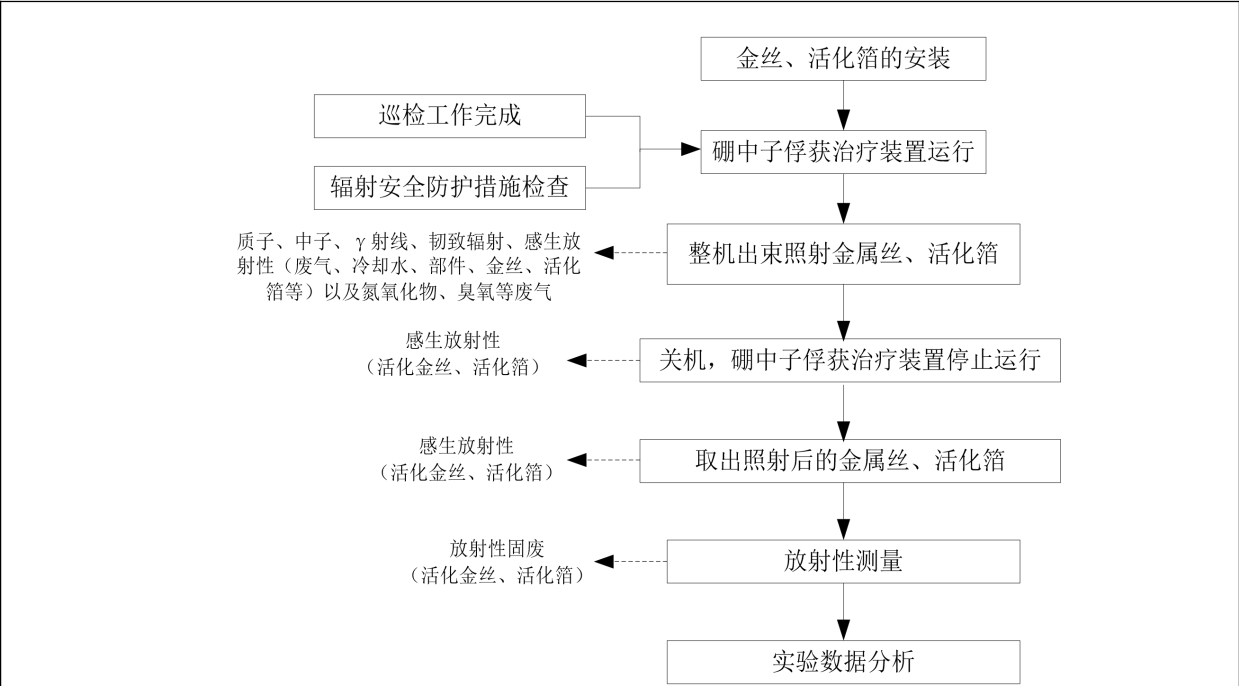


图 9.2-15 硼中子俘获治疗系统实验研究流程示意图

- (1) 金丝、活化箔安装：辐射工作人员进入中子靶站间，将金丝安装在水箱内或固体水模片层中间；活化箔片则重叠安装在射束出口，并外包锡片。
- (2) 硼中子俘获治疗系统的出束前必须对 BNCT 调试实验机房的辐射安全防护措施进行检查，确保其能正常运行；且必须对 BNCT 调试实验机房进行巡检，确保机房内无人滞留，并关闭防护门，禁止人员进入。
- (3) 硼中子俘获治疗系统开机出束照射活化箔片、金丝，单次照射时间不超过约 60min，而后关机，硼中子俘获治疗系统停止出束。
- (4) 待 BNCT 调试实验机房内部剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ （预计硼中子俘获治疗系统停止出束约 20min 后）后，辐射工作人员佩戴好个人剂量计，并携带个人剂量报警仪、便携式中子剂量仪（含 γ 探头），手戴铅手套取出照射后的活化箔片、金丝放置在铅盒内，并转移至物理实验室。
- (5) 将照射后的活化箔片、金丝放入高纯锗谱仪测量其放射性强度，反算出测量数据，分析横向、纵向热中子的分布。
- 硼中子俘获治疗系统在拟建项目 BNCT 调试实验机房内进行实验研究的过程中兼顾完成相应的实验研究工作。硼中子俘获治疗系统的实验研究仅在整机调试的过程中进行。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，主要有质

续表 9 项目工程分析与源项

子、中子、 γ 射线、韧致辐射、感生放射性（废气、冷却水、部件、金丝、活化箔等）以及氮氧化物、臭氧等废气。

（五）硼中子俘获治疗系统的拆解、打包

特殊情况下，硼中子俘获治疗系统在拟建项目的 BNCT 调试实验机房内完成调试，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 调试实验机房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。

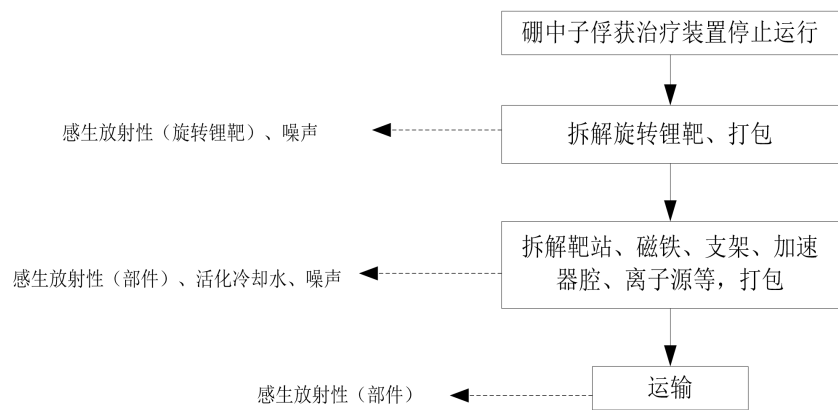


图 9.2-16 硼中子俘获治疗系统拆解、打包流程示意图

硼中子俘获治疗系统主要拆解为旋转锂靶、靶站、磁铁、支架、加速器腔、离子源等六大部件，其拆解工作分段进行，先由机器人拆解旋转锂靶，再由辐射工作人员拆解靶站、磁铁、支架、加速器腔、离子源。

（1）旋转锂靶由机器人拆解放入铅容器内并锁上铅盖，拆解过程详见机器人换靶流程。辐射工作人员在确认调试实验机房内部剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后，佩戴个人剂量计，携带个人报警仪、便携式中子剂量仪（含 γ 探头）进入 BNCT 调试实验机房，将放置有旋转锂靶的铅容器进行打包，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 5d 后，且调试实验机房内部剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后方可启动。辐射工作人员使用便携式中子剂量仪（含 γ 探头）对硼中子俘获治疗系统表面剂量率进行巡测，其监测结果低于

续表 9 项目工程分析与源项

2.5 μ Sv/h 后方可进行设备拆解,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 μ Sv/h,则停止拆解,离开 BNCT 调试实验机房。间隔 1d 进入 BNCT 调试实验机房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 μ 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 调试实验机房进行拆解、打包过程中产生的污染物主要为活化冷却水、设备噪声、固体废物、感生放射性(部件)。

(六) 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、锂靶更换。

(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,建设单位将会委派运维人员(辐射工作人员)常驻用户单位(医疗机构),定期对硼中子俘获治疗系统进行日常维护。运维人员无法解决的故障,由运维人员和用户单位(医疗机构)共同发起检修申请,建设单位安排维修人员(辐射工作人员)前往用户单位(医疗机构)的硼中子俘获治疗系统使用场所进行维修。

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。

辐射工作人员检修及大型维修过程中均按照要求佩戴个人剂量计,进入机房内必须携带便携式个人剂量仪、便携式中子剂量仪(含 γ 探头),辐射剂量监测结果异常,立马退出机房。

(2) 锂靶更换

硼中子俘获治疗系统满负荷运行时,轰击锂靶的质子束流强度约**,锂靶使用寿命约**,故锂靶需要定期更换。

拟建项目硼中子俘获治疗系统整机调试、实验研究过程中轰击锂靶的质子束流强度

续表 9 项目工程分析与源项

不大于**，锂靶使用寿命可达约**。此外，硼中子俘获治疗系统在拟建项目 BNCT 调试实验机房内整机出束的时间不超过**，仅占锂靶使用寿命的 0.2%。因此，正常情况下，硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试实验机房内使用过程中无需更换锂靶。特殊情况下，出现锂靶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。

拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统的锂靶全程由机器人更换，更换后的活化锂靶由机器人放置在铅容器内，锁上铅盖，再由辐射工作人员转移至用户单位（医疗机构）放射性废物衰变间内暂存，不进行回收处理。机器人更换锂靶的详细工艺流程如下：

①真空阀断开加速器束流管道和真空腔真空，卸掉负压 破除真空腔真空；电磁阀控制气缸打开靶片窗门；

②机械手运动至靶片夹持结构处，电磁阀控制气缸夹持住靶片，拔出靶片搬运至靶片铅容器里；更换上新的靶片，如此往复直至更换上所有靶片；机器人关闭铅容器的屏蔽盖；

③电磁阀控制气缸关闭上靶片窗门；真空阀打开加速器束流管道和真空腔空间，启动真空泵抽真空；

④气压表检测气压满足真空度要求时，加速器束流管道和真空腔真空重新连接，锂靶更换完成。

硼中子俘获治疗系统的锂靶更换过程中产生的污染物主要为废活化锂靶。

9.3 工作负荷

（1）硼中子俘获治疗系统的工作负荷

拟建项目全年拟生产、使用、销售 3 台硼中子俘获治疗系统。按照最不利情况考虑，硼中子俘获治疗系统均在拟建项目场所内完成调试后再运至用户单位（医疗机构）安装、调试。本评价不考虑硼中子俘获治疗系统售后检修的工作负荷，仅考虑调试、实验研究阶段的工作负荷，具体情况见下表。

表 9.3-1 硼中子俘获治疗系统工作负荷表

工作内容 工作场所		BNCT 调试实验机房（h）		用户单位（医疗机构）（h）	
		单台出束时间	全年出束时间	单台出束时间	全年出束时间
硼中子 俘获治 疗系统	离子源调试	20	60	10	30
	RFQ 加速器调试	30	90	15	45
	整机调试	10	30	5	15

续表 9 项目工程分析与源项

	(含实验研究)	(含实验研究)																														
根据上表可知,硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试实验机房内离子源调试出束时间不超过 60h/a, RFQ 加速器调试出束时间不超过 90h/a, 整机调试出束时间不超过 30h/a。硼中子俘获治疗系统在用户单位(医疗机构)的硼中子俘获治疗系统使用场所内离子源调试出束时间不超过 30h/a, RFQ 加速器调试出束时间不超过 45h/a, 整机调试出束时间不超过 15h/a。 (2) 辐射工作人员的工作负荷 辐射工作人员主要负责硼中子俘获治疗系统的安装、拆解、打包、调试、实验研究以及大型维修工作。硼中子俘获治疗系统大型维修情况无法估计,辐射工作人员通过佩戴个人剂量计,携带个人计量报警仪以及便携式中子剂量仪(含γ探头),严格控制辐射工作人员的受照剂量。本评价重点针对硼中子俘获治疗系统的安装、拆解、打包、调试、实验研究的工作负荷开展评价。 ①辐射工作人员在机房内受照时间 硼中子俘获治疗系统停止出束后,辐射工作人员进入 BNCT 调试实验机房或用户单位(医疗机构)的硼中子俘获治疗系统使用场所工作时将受到感生放射性核素的照射。根据建设单位提供的资料,辐射工作人员在机房内受照时间详见下表。 表 9.3-2 辐射工作人员在机房内受照时间表 <table> <tr> <th rowspan="2">工作内容</th><th colspan="2">辐射工作人员受照时间 (h)</th><th rowspan="2">工作场所</th></tr> <tr> <th>单台设备受照时间</th><th>全年受照时间</th></tr> <tr> <td rowspan="2">硼中子俘获治疗系统调试 (调试设备安装、摆放)</td><td>20</td><td>60</td><td>BNCT 调试实验机房</td></tr> <tr> <td>10</td><td>30</td><td>用户单位(医疗机构)</td></tr> <tr> <td>硼中子俘获治疗系统实验研究 (金丝、活化箔安装)</td><td>1</td><td>3</td><td>BNCT 调试实验机房</td></tr> <tr> <td>硼中子俘获治疗系统拆卸、打包</td><td>10</td><td>30</td><td>BNCT 调试实验机房</td></tr> <tr> <td>硼中子俘获治疗系统拆包、安装</td><td>30</td><td>90</td><td>用户单位(医疗机构)</td></tr> <tr> <td>合计</td><td>71</td><td>213</td><td>/</td></tr> </table> ②辐射工作人员在控制室受照时间 硼中子俘获治疗系统出束调试、实验研究过程中,辐射工作人员均在控制室内工作。根据前文分析可知,离子源调试有能量不大于 50keV 的质子束流;RFQ 加速器调试有能量不大于 2.7MeV 质子束流;整机调试(含实验研究)有能量不大于 2.7MeV 的质子				工作内容	辐射工作人员受照时间 (h)		工作场所	单台设备受照时间	全年受照时间	硼中子俘获治疗系统调试 (调试设备安装、摆放)	20	60	BNCT 调试实验机房	10	30	用户单位(医疗机构)	硼中子俘获治疗系统实验研究 (金丝、活化箔安装)	1	3	BNCT 调试实验机房	硼中子俘获治疗系统拆卸、打包	10	30	BNCT 调试实验机房	硼中子俘获治疗系统拆包、安装	30	90	用户单位(医疗机构)	合计	71	213	/
工作内容	辐射工作人员受照时间 (h)		工作场所																													
	单台设备受照时间	全年受照时间																														
硼中子俘获治疗系统调试 (调试设备安装、摆放)	20	60	BNCT 调试实验机房																													
	10	30	用户单位(医疗机构)																													
硼中子俘获治疗系统实验研究 (金丝、活化箔安装)	1	3	BNCT 调试实验机房																													
硼中子俘获治疗系统拆卸、打包	10	30	BNCT 调试实验机房																													
硼中子俘获治疗系统拆包、安装	30	90	用户单位(医疗机构)																													
合计	71	213	/																													

续表 9 项目工程分析与源项

束流以及能量不大于 1.1MeV 的中子束流。相对于 1.1MeV 的中子束流对 BNCT 调试实验机房或用户单位（医疗机构）硼中子俘获治疗系统使用场所的屏蔽体外的辐射环境影响，2.7MeV 质子束流的辐射环境影响可忽略不计。因此，辐射工作人员在控制室的受照时间详见下表。

表 9.3-3 辐射工作人员在控制室受照时间表

工作内容		辐射工作人员受照时间（h）		工作场所
		硼中子俘获治疗系统单台出束时间	硼中子俘获治疗系统全年出束时间	
整机调试	一次	10（含实验研究）	30（含实验研究）	BNCT 调试实验机房
	二次	5	15	用户单位（医疗机构）
	合计	15（含实验研究）	45（含实验研究）	/

③辐射工作人员在物理实验室内的受照时间

辐射工作人员负责活化后的金丝、活化箔的 γ 射线强度监测。活化后的金丝、活化箔在物理实验室的操作时间不超过 15h/a。

（3）运维人员的工作负荷

运维人员常驻用户单位（医疗机构），主要负责硼中子俘获治疗系统日常维护。运维人员日常维护过程中，硼中子俘获治疗系统会整机出束，预计年出束时间不超过 50h，则运维人员在用户单位（医疗机构）的控制室内年受照时间不超过 50h。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，将受到感生放射性核素的照射，预计运维人员年受照时间不超过 10h。

9.4 人流物流路径规划

拟建项目重点关注 BNCT 调试实验区的人流物流路径，详见附图 7。

（一）辐射工作人员路径

拟建项目辐射工作人员拟从生活办公区进入 BNCT 调试工作区开展工作。

（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控制室。

（2）BNCT 调试实验机巡检辐射工作人员

硼中子俘获治疗系统开机运行前，辐射工作人员必须对 BNCT 调试实验机房的加速

续表 9 项目工程分析与源项

器室、中子靶站间进行巡检，确保内部无人滞留后方可开机运行。BNCT 调试实验机巡检辐射工作人员巡检路径如下：

加速器室巡检路线：控制室→生活办公区走廊→装配件区→零部件入场验收区→BNCT 调试实验机房的加速器室（触发 2 个清场按钮离开，并关闭防护门）→零部件入场验收区→装配件区→生活办公区走廊→控制室

中子靶站间巡检路线：控制室→生活办公区走廊→BNCT 调试实验区辐射工作人员走廊→BNCT 调试实验机房的中子靶站间（触发 2 个清场按钮离开，并关闭防护门）→辐射工作人员走廊→生活办公区走廊→控制室

（2）实验研究辐射工作人员

生活办公区走廊→BNCT 调试实验区辐射工作人员走廊→物理实验室→BNCT 调试实验机房的中子靶站间→物理实验室→BNCT 调试实验区的走廊→生活办公区走廊

（二）物流路径

（1）硼中子俘获治疗系统的实验研究物品

金丝、活化箔：BNCT 调试生产区北侧出入口→辐射工作人员走廊→物理实验室→BNCT 调试实验机房的中子靶站间→物理实验室

（2）放射性固体废物

废活化锂靶：BNCT 调试实验机房的中子靶站间→辐射工作人员走廊→放射性废物衰变间→清洁解控后作为一般固废交物资回收公司回收处理/无法清洁解控则待核技术利用工作场所退役时，交有资质的单位处置

活化金丝、活化箔：物理实验室→走廊→放射性废物衰变间→清洁解控后作为一般固废交物资回收公司回收

9.4 污染源项描述

9.4.1 施工期污染源项描述

拟建项目施工期主要包括 BNCT 机房土建施工、厂房装修、设备组装、辐射安全设施安装等。施工期产生的污染物主要包括废水、废气、噪声及固体废物。

9.4.2 运营期污染源项描述

9.4.2.1 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

续表 9 项目工程分析与源项

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质子束流以及质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。剩余辐射场主要考虑硼中子俘获治疗系统的部件以及 BNCT 调试实验机房的屏蔽体受质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。

拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统的强流 ECR 质子源产生的低能量质子束流通过 RFQ 加速器加速引出的质子束流能量最大为 2.7MeV。2.7MeV 质子是原子的电离和激发过程为主，同时会穿过原子核的库仑势垒，进入原子核内，通过 (p, n)、(p, pn)、(p, 2n) 等核反应产生瞬发中子、 γ 光子和其它粒子，其中带电粒子因电离作用迅速停止，故从靶中出来的主要是次级中子和 γ 光子，最终屏蔽体内、外的瞬发辐射场都成为中子、光子的混合场。

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质子及其次级粒子的轰击，核内质子数和中子数发生改变，一部分变成了放射性核素，产生感生放射性。硼中子俘获治疗系统停机以后，这部分放射性核素会继续释放出 β 、 γ 射线，成为缓发辐射的来源。

根据硼中子俘获治疗系统的设备组成以及工艺流程可知，本评价主要考虑硼中子俘获治疗系统运行产生瞬发辐射，重点关注硼中子俘获治疗系统的加速器和束流线系统的质子束流、中子靶站系统的质子束流轰击靶发生的核反应。

(1) 加速器和束流线系统

硼中子俘获治疗系统的强流 ECR 质子源产生的质子束流在加速器和束流线系统加速、输运过程中将沿着真空管道损失束流。***。

强流 ECR 质子源产生的质子束流能量（30keV~50keV）低，在强流 ECR 质子源、LEBT 系统内不会发生核反应，束流损失主要产生少量韧致辐射。

RFQ 加速器系统将能量为 30keV~50keV 质子束流加速至 2.7MeV 的过程中，与 RFQ 加速器系统内的真空管道材料、偏转磁铁等主要发生电荷交换反应，即 (p, n) 反应。RFQ 加速器系统的真空管道材料、偏转磁铁主材为铝、铜、铁，2.7MeV 质子束流入射铝靶、铜靶、铁靶的反应截面见图 9.4-1~9.4-4。

续表 9 项目工程分析与源项

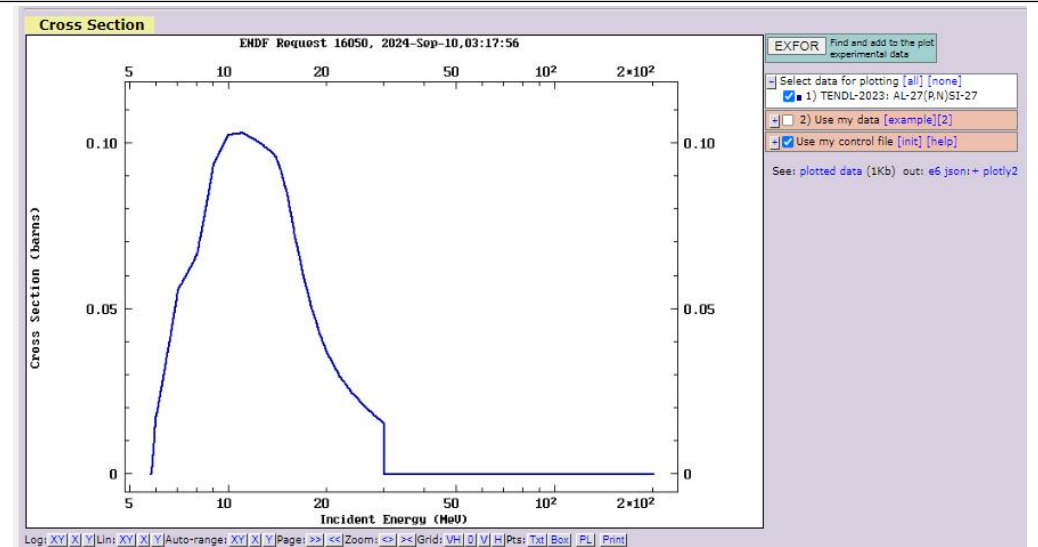


图 9.4-1 质子与铝 (^{27}Al) 靶反应截面

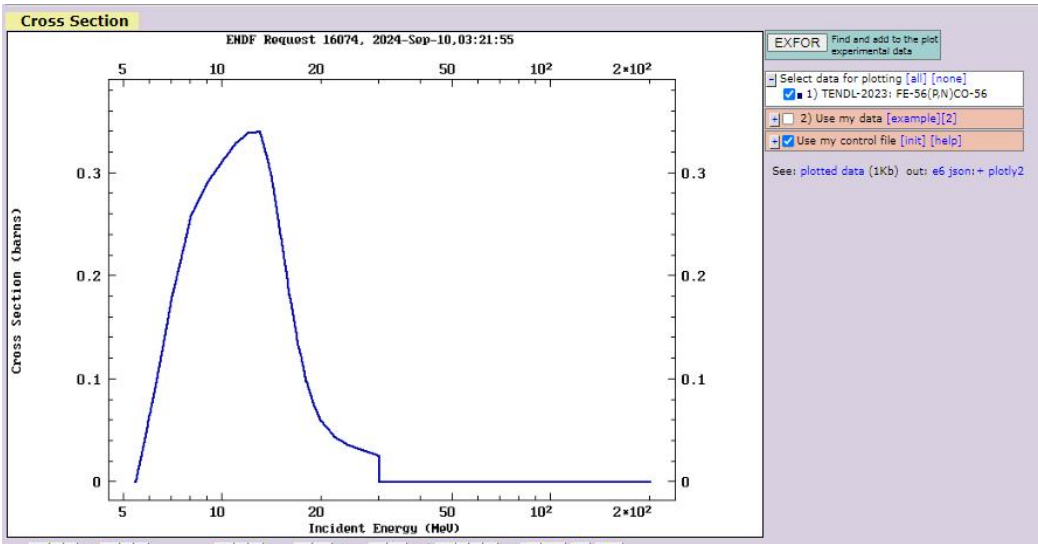


图 9.4-2 质子与铁 (^{56}Fe) 靶反应截面

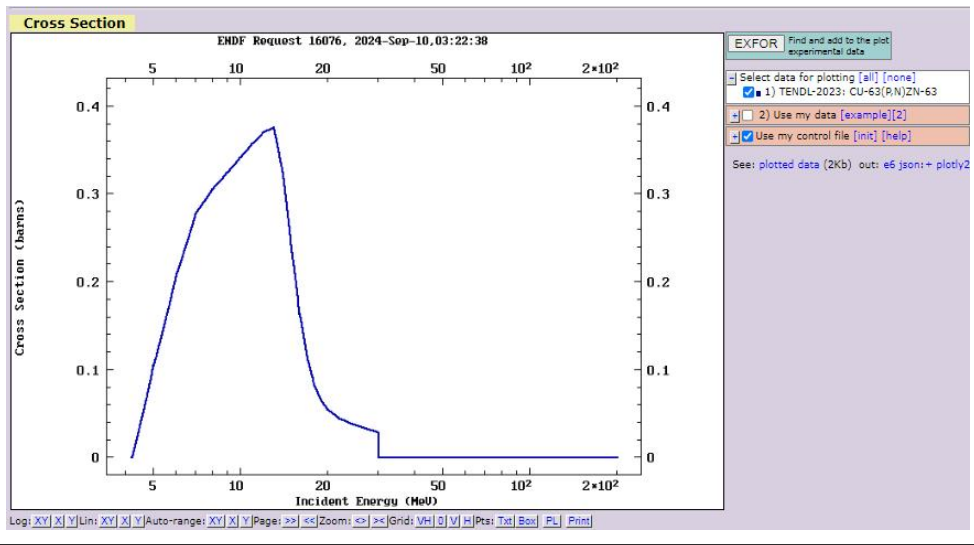


图 9.4-3 质子与铜（⁶³Cu）靶反应截面

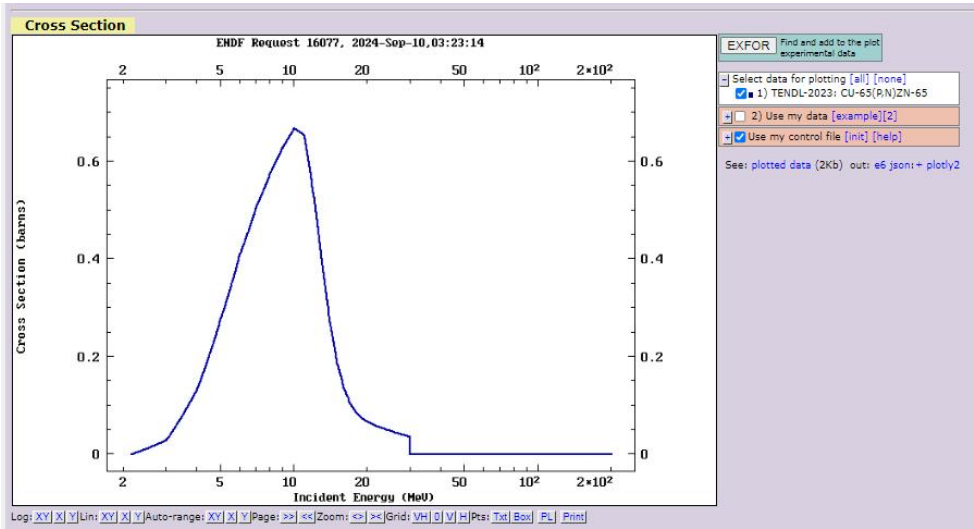


图 9.4-4 质子与铜（⁶⁵Cu）靶反应截面

从图中可知，2.7MeV 的质子束流与铝、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 2.7MeV、流强 30mA 的质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，2.7MeV 质子束流偏转与 RFQ 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) 中子靶站系统源项分析

硼中子俘获治疗系统的 RFQ 加速器系统引出的能量为 2.7MeV 质子轰击中子靶站系统的锂靶，通过 ⁷Li(p, n)⁷Be 核反应产生中子，其能量不大于 1.1MeV。此外，中子与周围物质发生核反应产生γ射线，其最大能量约 10.8MeV。建设单位采用蒙特卡洛程序 FLUKA 进行模拟计算能量为 2.7MeV、束流强度 30mA 的质子轰击锂靶的污染源项进行分析，BNCT 调试实验机房内剂量率分布见图 9.4-5。

续表 9 项目工程分析与源项

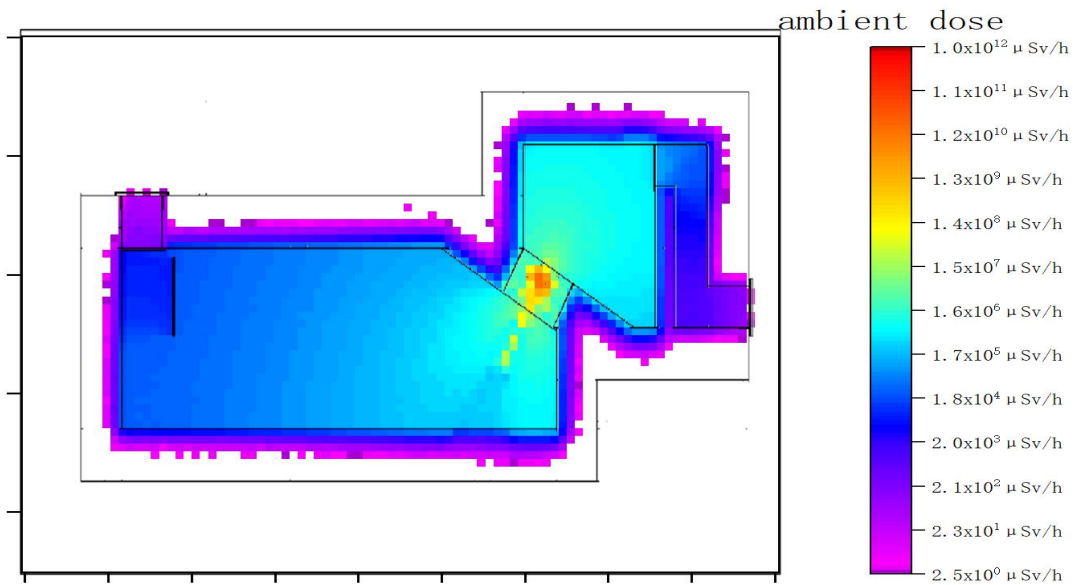


图 9.4-5 2.7MeV 质子轰击锂靶的剂量率分布图

从模拟计算结果可知能量为 2.7MeV、束流强度 30mA 的质子轰击锂靶时，靶点 1m 处的剂量率约 $2.1\times10^6\mu\text{Sv/h}$ 。

(3) 感生放射性

①活化废气

硼中子俘获治疗系统运行产生的中子与 BNCT 调试实验机房内空气中的物质发生 $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ 、 $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ 、 $^{40}\text{Ar}(n, \gamma)^{41}\text{Ar}$ 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%。

本评价综合考虑同位素的丰度百分数、半衰期以及空气中各物质成分的含量，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：

$$Q = \lambda \times Y_0 \times R \times N \times \sigma \times t \tag{9.4-1}$$

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， 1.07×10^{-4} ；

Y_0 ：中子发射率， $3.86\times10^{13} \text{ n/s}$ ；

续表 9 项目工程分析与源项

σ ：放射性同位素 ^{40}Ar 的活化截面， $1.57\times10^{-26}\text{cm}^2$ ；

R ：房间内空气的有效半径，加速器室内空气的有效半径 547cm（等效球半径）和中子靶站间内空气的有效半径 365cm（等效球半径）；

N ：单位体积空气中的 ^{40}Ar 原子个数， $3.49\times10^{17}\text{n/cm}^3$ ；

t ：单次运行时间， $3.6\times10^3\text{s}$ （单次整机出束时间不会超过 1h）；

1.1MeV 中子束流入射氩靶的反应截面见图 9.4-7。

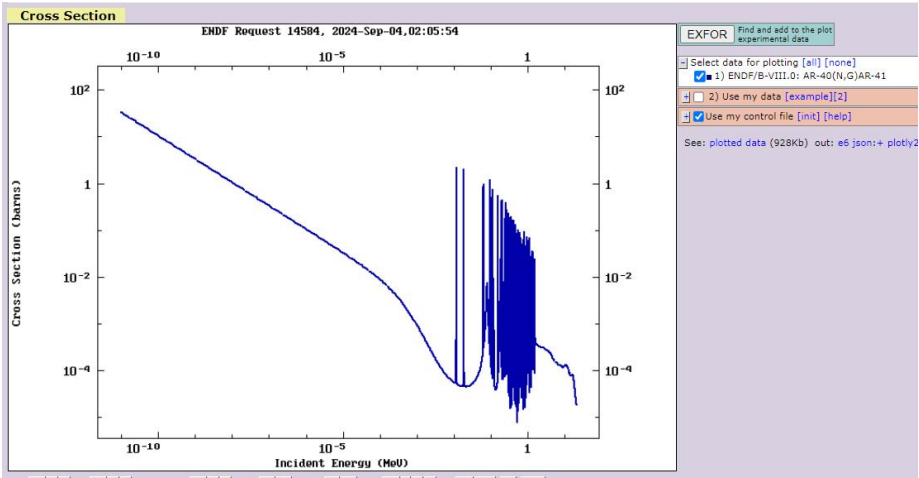


图 9.4-6 1.1MeV 中子束流与氩（ ^{40}Ar ）靶反应截面

根据上图可知，放射性同位素 ^{40}Ar 的活化截面为 15.7mb（ $1.57\times10^{-26}\text{cm}^2$ ）。BNCT 调试实验机房内放射性同位素 ^{41}Ar 的产生情况见下表。

表 9.4-1 BNCT 调试实验机房 ^{41}Ar 的产生情况一览表

功能房间	λ	Y_0 (n/s)	σ (cm^2)	N (n/cm^3)	t (s)	R (cm)	Q (Bq/次)
加速器室	1.07×10^{-4}	3.86×10^{13}	1.57×10^{-26}	3.49×10^{17}	3.6×10^3	547	4.46×10^7
中子靶站间						365	2.97×10^7

根据上表可知，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 1h，BNCT 调试实验机房的加速器室产生的放射性同位素 ^{41}Ar 活度不大于 $4.46\times10^7\text{Bq}$ ，中子靶站间产生的放射性同位素 ^{41}Ar 活度不大于 $2.97\times10^7\text{Bq}$ ，总活度不大于 $7.43\times10^7\text{Bq}$ 。

BNCT 调试实验机房的加速器室排风量为 7000m^3 ，中子靶站间排风量为 3000m^3 ，空气密度取 1.29kg/m^3 ，则 BNCT 调试实验机房的加速器室放射性同位素 ^{41}Ar 活度浓度为 4.94Bq/g ，中子靶站间放射性同位素 ^{41}Ar 活度浓度为 7.67Bq/g 。硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试实验机房内运行整机出束产生的活化废气最终引至专精特新产业园 13 号

续表 9 项目工程分析与源项

标准厂房 2F 楼顶，并高于楼顶 3m 排放，排放高度约 17m。

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 调试试验机房，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、靶站冷却，硼中子俘获治疗系统由 BNCT 调试实验机房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，剩余冷却水封存在冷却水路内，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 $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ 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 。

1.1MeV 中子束流入射氘靶的反应截面见图 9.4-8。

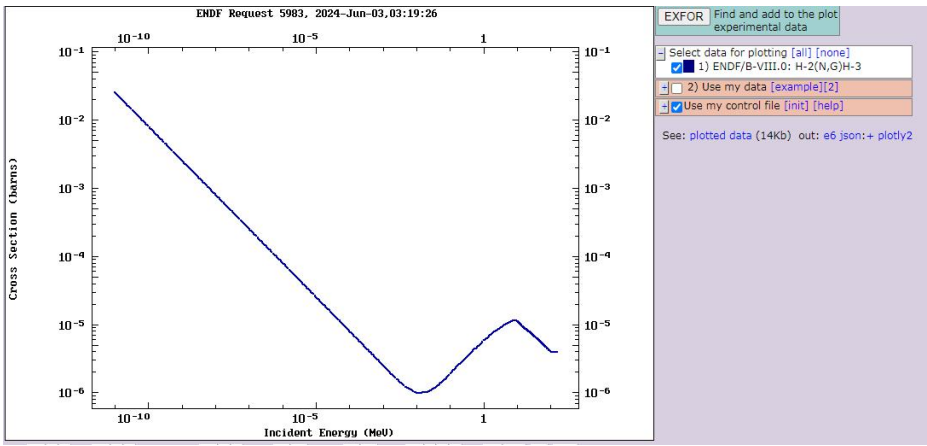


图 9.4-7 1.1MeV 中子束流与氘（ ^2H ）靶反应截面

根据上图可知，放射性同位素 ^2H 的活化截面为 0.01mb（ $1.00 \times 10^{-29} \text{cm}^2$ ）。硼中子俘获治疗系统的内循环水系统冷却水平均 2 年更换 1 次，单台硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试机房内整机调试出束时间不超过 10h，则内循环水系统的冷却水的受照时间不超过 60h。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

续表 9 项目工程分析与源项

公式 9.4-1，本评价简化计算，忽略硼中子俘获治疗系统搬迁排空后补入的冷却水，考虑冷却水均受照 60h，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	Y_0 (n/s)	σ (cm^2)	N (n/cm^3)	t (s)	R (cm)	Q (Bq)
8.14×10^{-9}	3.86×10^{13}	1.0×10^{-29}	1.80×10^{20}	2.16×10^6	62	7.57×10^3

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 $7.57 \times 10^3 \text{Bq}$ 。硼中子俘获治疗系统的内循环水量约 1000L，则活化核素 ^3H 的活度浓度不大于 $7.57 \times 10^{-3} \text{Bq/g}$ 。

单台硼中子俘获治疗系统搬迁排空的活化冷却水仅约 50L，剩余约活化冷却水均封存在冷却水路内，可重复使用。硼中子俘获治疗系统的活化冷却水全年排放次数不超过 3 次，则全年排放量约 150L；另硼中子俘获治疗系统的内循环水系统冷却水单次更换量不超过 1000L。因此，拟建项目活化冷却水全年总排放量不超过 1150L，放射性同位素 ^3H 含量约 $8.71 \times 10^3 \text{Bq}$ 。

③活化固废

A.活化锂靶

硼中子俘获治疗系统的 2.7MeV 质子束流轰击锂靶产生中子，进而活化锂靶引起感生放射性。硼中子俘获治疗系统的锂靶基底材料以铜、铝为主，表面涂层为锂，仅在固定、结构处使用少量的铁材、钢材。

中子与锂靶中的各物质发生 $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 、 $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 、 $^{65}\text{Cu}(n, \gamma)^{66}\text{Cu}$ 、 $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ 、 $^{54}\text{Fe}(n, \gamma)^{55}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$ 等核反应产生活化核素 ^7Be 、 ^{64}Cu 、 ^{66}Cu 、 ^{28}Al 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe ，其半衰期分别为 53.29d、12.7h、5.12min、2.24min、2.7a、44.6d。 ^7Li 的丰度为 92.41%， ^{63}Cu 的丰度为 69.17%， ^{65}Cu 的丰度为 30.83%， ^{27}Al 的丰度为 100%， ^{54}Fe 的丰度为 5.8%， ^{58}Fe 的丰度为 0.28%。1.1MeV 中子束流入射铜靶、铝靶、铁靶的反应截面见下图。

续表 9 项目工程分析与源项

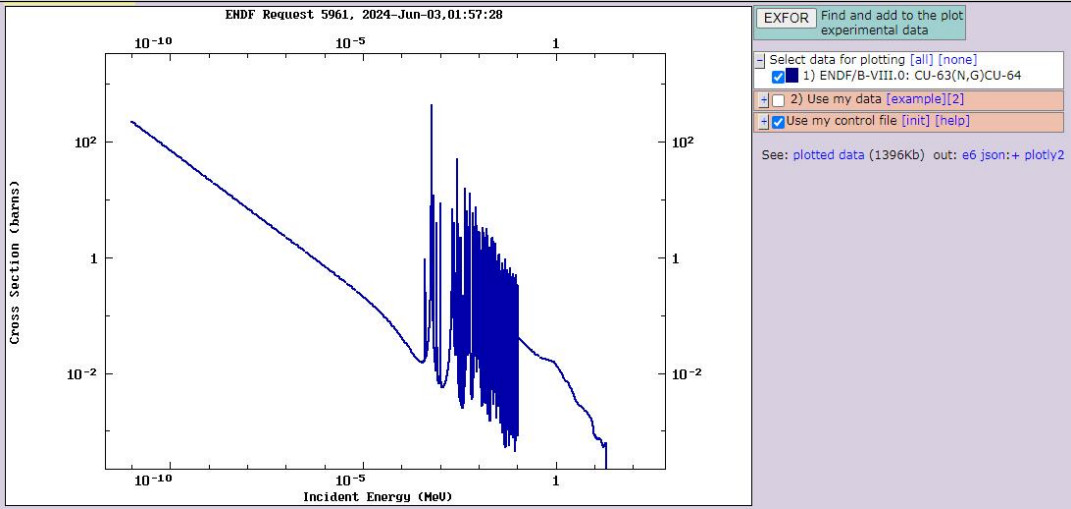


图 9.4-8 1.1MeV 中子束流与铜 (^{63}Cu) 靶反应截面

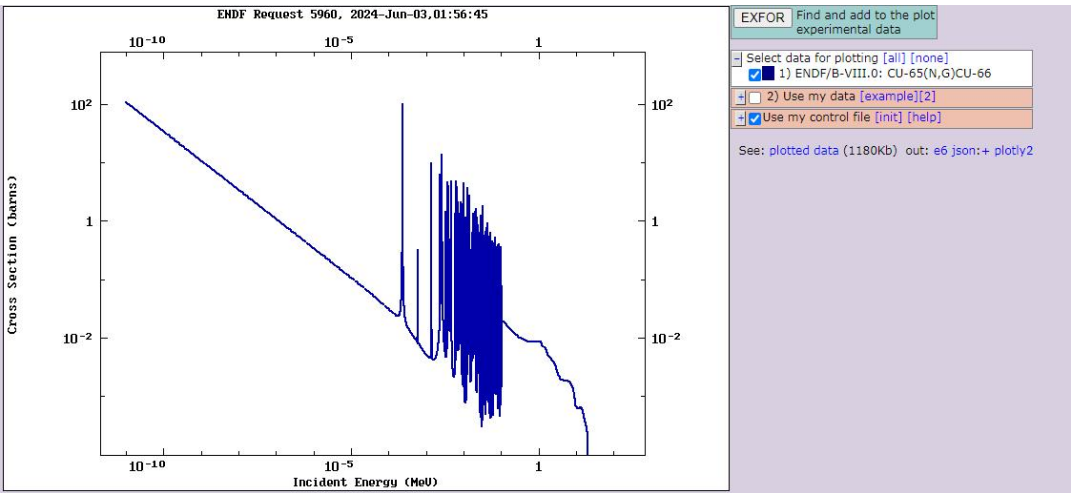


图 9.4-9 1.1MeV 中子束流与铜 (^{65}Cu) 靶反应截面

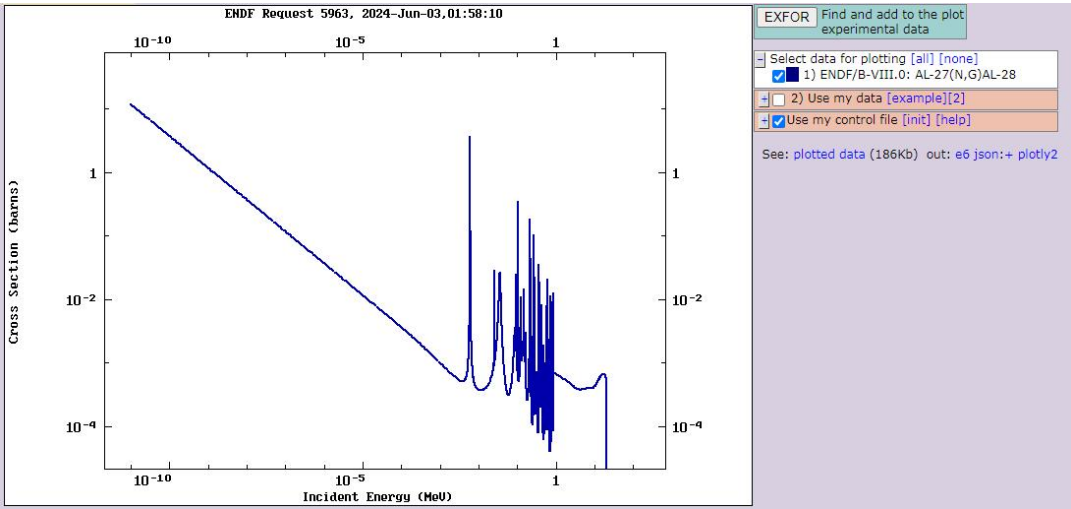


图 9.4-10 1.1MeV 中子束流与铝 (^{27}Al) 靶反应截面

续表 9 项目工程分析与源项

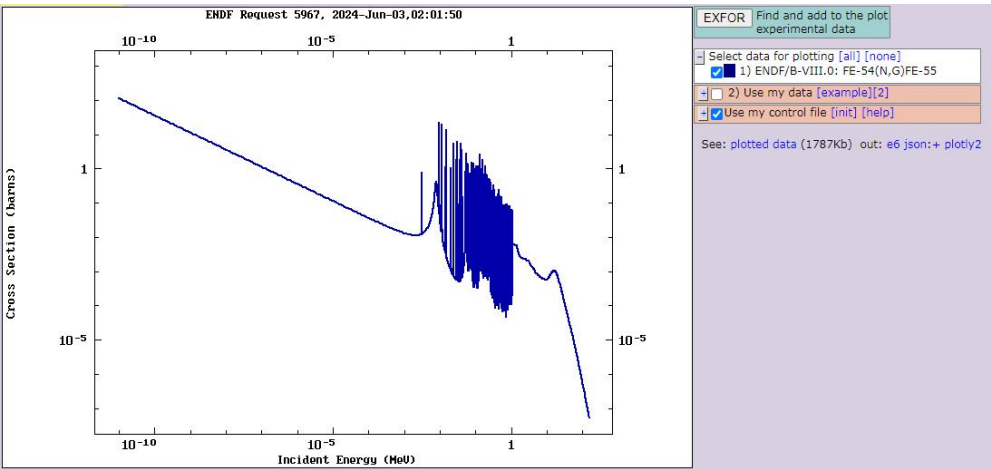


图 9.4-11 1.1MeV 中子束流与铁 (^{54}Fe) 靶反应截面

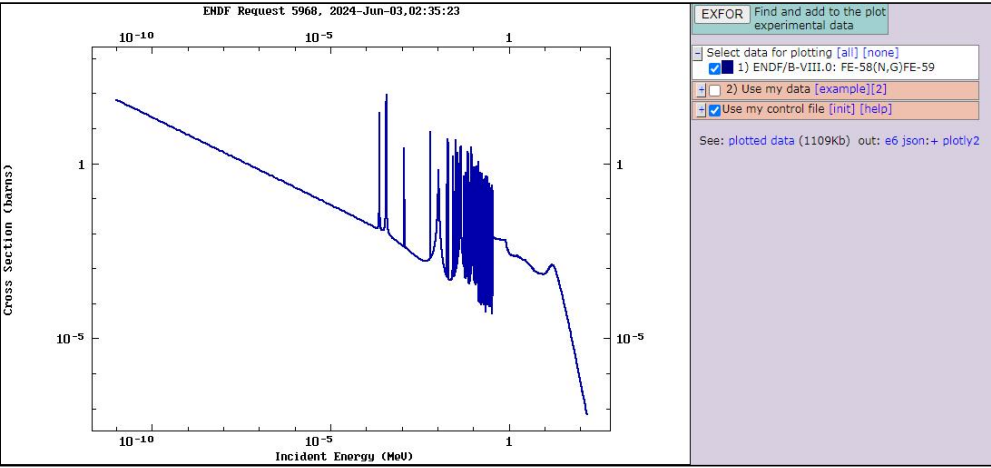


图 9.4-12 1.1MeV 中子束流与铁 (^{58}Fe) 靶反应截面

本评价综合考虑同位素的丰度百分数、半衰期、锂靶的材料使用情况以及反应截面大小，硼中子俘获治疗系统运行产生的活化锂靶主要考虑放射性同位素 ^7Be 。根据前文分析可知，拟建项目正常情况下不产生废弃活化锂靶，仅在特殊情况下，出现锂靶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。

拟建项目硼中子俘获治疗系统整机调试、实验研究过程中轰击锂靶的质子束流强度不大于 3mA。硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试实验机房内整体调试或实验研究出束时间不超过 10h。本评价非常保守估计，硼中子俘获治疗系统轰击锂靶的质子束流强度为 3mA，连续出束 10h，质子产生量约 6.74×10^{20} 个，单个质子产生 2.04×10^{-4} 个中子和放射性同位素 ^7Be ，则整个旋转靶锂层上分布约 1.37×10^{17} 个放射性核素 ^7Be 。放射性同位素 ^7Be 的衰变常数 λ 为 1.50×10^{-7} ，则旋转靶锂活度为 $2.06 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。

硼中子俘获治疗系统满负荷运行时，轰击锂靶的质子束流强度约 30mA，锂靶使用

续表 9 项目工程分析与源项

寿命约 500h，故锂靶需要定期更换。本评价按照最不利情况考虑，硼中子俘获治疗系统整体出束时，轰击锂靶的质子束流强度不大于 30mA，连续出束时间为 500h，则旋转靶锂活度为 $1.03\times10^{12}\text{Bq}$ 。废活化锂靶放置在屏蔽能力为 80mmPb 铅容器，基于蒙特卡罗模拟计算程序 MCNPX，铅容器屏蔽体外剂量分布见下图。

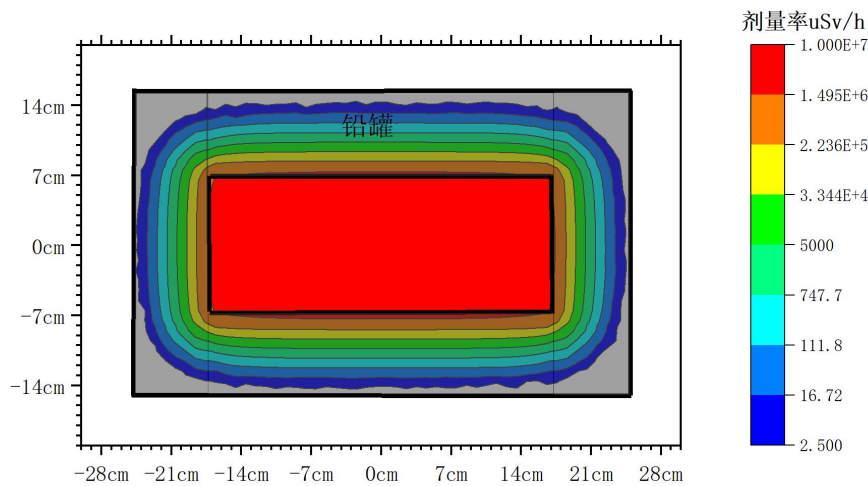


图 9.4-13 铅容器屏蔽体外剂量分布图

根据模拟预测结果可知，铅容器内部中心点最大剂量当量率约 $1.0\times10^7\mu\text{Sv/h}$ ，铅容器屏蔽体外表面剂量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，则铅容器屏蔽体外表面 30cm 处的剂量率也小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

拟建项目考虑破损活化锂靶产生量为 1 个/a（约 28.8kg），贮存在铅容器内并转移至放射性废物衰变间暂存衰变，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。

B、活化金丝、活化箔

硼中子俘获治疗系统的 1.0MeV 中子束流照射金丝、活化箔活化引起感生放射性，产生活化废金丝、活化箔。实验用的活化箔多为金属片，如铝、铟、铜、金等。中子与金丝、活化箔中的各物质发生核反应产生 ^{28}Al 、 ^{114}In 、 ^{64}Cu 、 ^{66}Cu 、 ^{196}Au 等活化核素。硼中子俘获治疗系统以能量为 2.7MeV、束流强度 30mA 的质子轰击锂靶产生的 1.0MeV 中子束流照射金丝、活化箔，单次照射时间不超过 10min。根据建设单位提供的资料可知，受照后的金丝、活化箔表面 5cm 处剂量率不超过 10uSv/h。活化的金丝、活化箔贮存在屏蔽能力为 3mmPb 铅盒内，其表面 30cm 处的剂量率低于 0.25uSv/h。

续表 9 项目工程分析与源项

活化废金丝、活化箔年产生量不超过 100g/a，而后转移至放射性废物衰变间暂存衰变，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。

④活化部件

根据前文分析可知，硼中子俘获治疗系统整机调试、实验研究出束过程中，硼中子俘获治疗系统部分部件活化产生感放射性，主要放射性核素为 ⁷Be。用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所布局、屏蔽材料及厚度均无法确定，本故评价主要考虑硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试实验机房内使用后部分部件活化产生的感生放射性。

本评价保守考虑，硼中子俘获治疗系统轰击锂靶的质子束流强度为 3mA，连续出束 10h 停机后，BNCT 调试实验机房内剂量率分布图见下图所示。

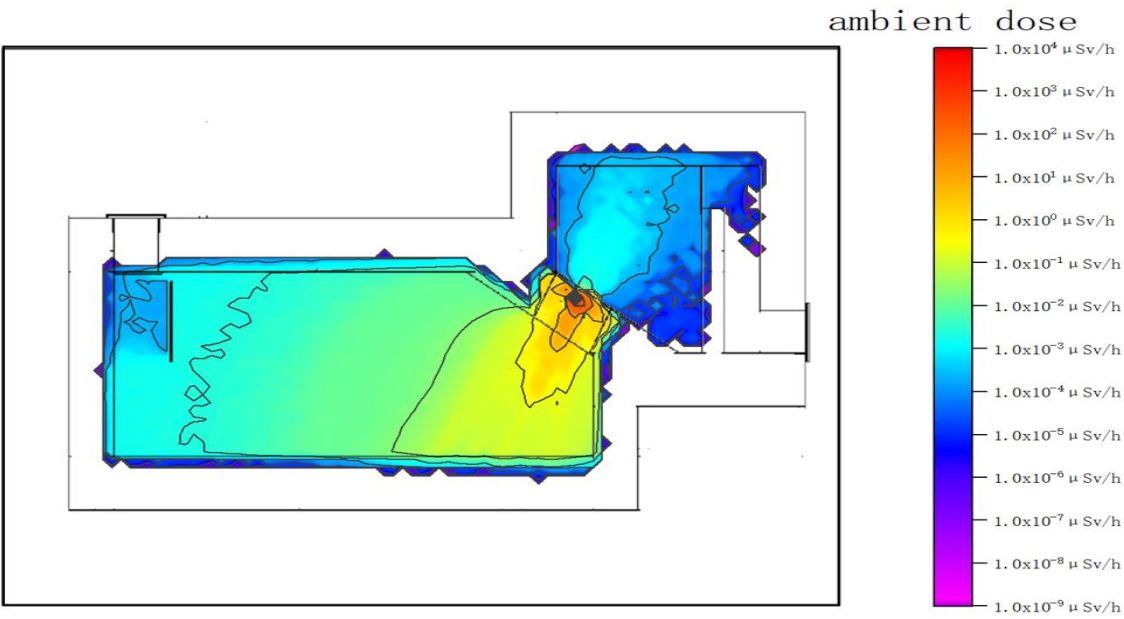


图 9.4-14 硼中子俘获治疗系统停止出束后剂量当量率分布图

根据上图可知，硼中子俘获治疗系统轰击锂靶的质子束流强度为 3mA，连续出束 10h 停机后，BNCT 调试实验机房最大剂量率约 1.0×10⁴μSv/h，加速器室人员能到达的地方剂量率最大约 40μSv/h，中子靶站间人员能到达的地方剂量率最大约 0.008μSv/h。因此，辐射工作人员在硼中子俘获治疗系统停止出束后，即可进入中子靶站间开展工作；进入加速器室工作，其剂量率必须低于 2.5μSv/h，预计在硼中子俘获治疗系统停止出束后再等候 20min 可满足要求。

9.4.2 非放射性污染因素分析

续表 9 项目工程分析与源项

(一) 废气

拟建项目运营期产生的非放射性废气主要包括生产废气、调试实验废气。

(1) 生产废气

拟建项目委托第三方单位生产硼中子俘获治疗系统所需的构件、零部件，故在拟建项目生产场所内主要进行硼中子俘获治疗系统部件组装，涉及钻孔、打磨、攻丝、焊接等简单工艺，产生少量的金属粉尘、焊接废气。

①金属粉尘

拟建项目配置 3 个家用手枪钻、1 个家用充电钻、2 个多功能冲击钻、1 个三功能锤钻冲击钻电钻、2 个家用角磨机用于硼中子俘获治疗系统的构件、零部件的钻孔、攻丝、打磨，该过程中将产生少量的金属粉尘，其主要成分为铁、铝、铜等。拟建项目拟配置 1 台工业吸尘器对金属粉尘进行处理，而后无组织排放至室外。工业吸尘器处理的金属粉尘作为一般固废处置。

②焊接废气

拟建项目配置 1 台 WSM-400HD 型直流脉冲氩弧焊机用于硼中子俘获治疗系统的构件、零部件的焊接，焊接过程中将产生少量的焊接废气，其主要成分为 CO、NO_x、O₃、金属化合物等。拟建项目拟配置 1 台工业吸尘器对焊接过程中产生的少量焊接废气进行处理，而后无组织排放至室外。

(2) 非放射性调试实验废气

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。硼中子俘获治疗系统调试实验过程中，BNCT 调试实验机房内产生的臭氧浓度 C 可由下式计算。

$$C = N_{sat} \frac{M}{N_A} \tag{9.4-2}$$

式中：C：臭氧浓度，g/m³；

N_{sat} ：单位时间单位体积臭氧分子数，m⁻³；

M：气体的摩尔质量，g/mol；O₃ 取值 48；

N_A ：阿伏伽德罗常数，6.022×10²³mol⁻¹。

根据 NCRP NO.144 报告，硼中子俘获治疗系统调试实验过程中，连续出束时间高

续表 9 项目工程分析与源项

达 1h (3600s)，BNCT 调试实验机房内的空气单位体积饱和臭氧分子数 N_{sat} 可由下式计算。

$$N_{\text{sat}} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + Q/V} \quad (9.4-3)$$

式中： N_{sat} ：单位体积内的臭氧分子数；

g ：空气中单位能量形成的臭氧气体分子数， eV^{-1} ；NCRP NO.144 报告 P358：臭氧取值 $0.103\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1}$ ；

I ：单位体积单位时间在空气中能量的沉积， $\text{eV}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ；

α ： O_3 分解速率， s^{-1} ；NCRP NO.144 报告 P358： α 取值 $2.3 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ；

κ ：单位能量和体积内被破坏的臭氧分子数量， $\text{eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ；NCRP NO.144 报告 P358： κ 取值 $1.4 \times 10^{-16}\text{eV}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ；

Q ：机房通风效率， m^3/s ；BNCT 调试实验机房的加速器室通风效率 Q 为 $1.94\text{m}^3/\text{s}$ ($7000\text{m}^3/\text{h}$)，中子靶站间通风效率 Q 为 $0.83\text{m}^3/\text{s}$ ($3000\text{m}^3/\text{h}$)；

V ：机房内体积， m^3 ；BNCT 调试实验机房的加速器室室内体积 V 为 686m^3 ，中子靶站间室内体积 V 为 203m^3 。

空气中单位体积单位时间的光子能量沉积 I 可由下式计算。

$$I = 6.25 \times 10^{18} \times K \times \rho \quad (9.4-4)$$

式中： K —在空气中的比释动能率， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ ；

ρ —空气密度， kg/m^3 ；空气密度 ρ 取值 $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ 。

本评价主要考虑中子与空气发生反应产生的臭氧，根据《辐射防护基础》（李星洪等，原子能出版社）P39 公式 (2.19)，中子在空气中的比释动能率 K 可由下式计算：

$$K = \Phi \times K_r \quad (9.4-5)$$

$$K_r = E \times \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \quad (9.4-6)$$

式中： Φ ：粒子注量， $\text{粒子}/\text{m}^2$ ；中子注量 Φ 为 1.97×10^9 中子/ $(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ；

续表 9 项目工程分析与源项

K_r : 比释动能因子, $J \cdot m^2/kg$; 《辐射防护基础》(李星洪等, 原子能出版社) P379 附表 3, 入射中子的比释动能因子 $K_r: 2.51 \times 10^{-8} J \cdot m^2/kg (2.51 \times 10^{-10} Rad \cdot cm^2)$ 。

BNCT 调试机房内的 O_3 饱和浓度计算结果见下表。

表 9.4-3 BNCT 调试机房 O_3 的饱和浓度

场所名称		O_3 饱和浓度 (mg/m^3)	O_3 产生速率 (kg/h)
BNCT 调试实验机房	加速器室	5.86×10^{-5}	4.10×10^{-7}
	中子靶站间	5.86×10^{-5}	1.76×10^{-7}

硼中子俘获治疗系统调试实验过程中产生的氮氧化物中以二氧化氮为主, 二氧化氮的产额约为臭氧的一半。根据表 9.4-3 可知, BNCT 调试机房内臭氧饱和浓度均为 $5.86 \times 10^{-5} mg/m^3$, 加速器室臭氧产生率约为 $4.10 \times 10^{-7} kg/h$, 中子靶站间臭氧产生率约为 $1.76 \times 10^{-7} kg/h$, 则加速器室二氧化氮产生率约为 $2.05 \times 10^{-7} kg/h$, 中子靶站间二氧化氮产生率约为 $8.80 \times 10^{-8} kg/h$ 。另废气中二氧化氮与氮氧化物的比率约 0.9, 则加速器室氮氧化物浓度约 $3.26 \times 10^{-5} mg/m^3$, 产生率约为 $2.28 \times 10^{-7} kg/h$, 中子靶站间氮氧化物产生率约为 $9.78 \times 10^{-8} kg/h$ 。

硼中子俘获治疗系统在 BNCT 调试机房内整机调试出束时间不超过 450h/a, 则臭氧产生量为 $2.64 \times 10^{-7} t/a$, 氮氧化物(以二氧化氮为主)产生量约为 $1.47 \times 10^{-7} t/a$, 最终引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶, 并高于楼顶 3m 排放, 排放高度约 17m。

(二) 废水

拟建项目不提供食宿, 运营期产生的非放射性废水主要为生活污水、清洁废水, 均进入专精特新产业园的生化池进行预处理后排入市政污水管网, 并经璧山高新区生活污水处理厂处理后, 最终排入璧南河。硼中子俘获治疗系统产生的活化冷却水在冷却水收集池内暂存 30d 后取样监测, 确定放射性核素 3H 的活度低于 $1ALIm$ ($1.11 \times 10^9 Bq$) 后再排入专精特新产业园生化池处理, 并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

(1) 生活用水

拟建项目配置工作人员约 90 人, 不提供住宿。拟建项目使用风冷式中央空调, 无冷却塔, 用水定额取 $70L/人 \cdot d$ 的计算, 则员工生活用水量为 $6.30 m^3/d (1575.00 m^3/a)$ 。生活污水产生系数按 0.9, 则生活污水产生量为 $5.67 m^3/d (1417.50 m^3/a)$ 。

续表 9 项目工程分析与源项

(2) 清洁用水

拟建项目采取清扫制度，不进行地面冲洗，使用拖把或尘推车清理，用水量按 $1.0\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ 计算。拟建项目总建筑面积约 3700.0m^2 ，清洁用水量约 $3.70\text{m}^3/\text{d}$ ($925.00\text{m}^3/\text{a}$)，排污系数取 0.7，则清洁废水产生量为 $2.59\text{m}^3/\text{d}$ ($647.50\text{m}^3/\text{a}$)。

(3) 废弃活化冷却水

硼中子俘获治疗系统的冷却水均外购去离子水。硼中子俘获治疗系统由 BNCT 调试实验机房拆解搬运至客户单位时，必须将硼中子俘获治疗系统内的加速器冷却水、靶站冷却水排空，将产生活化冷却水，单次产生量不超过 50L，全年产生量不超过 150L。此外，硼中子俘获治疗系统的内循环水平均 2 年更换 1 次，单次更换量约 1000L，则活化冷却水年排放量不超过 1150L。

拟建项目供排水量核算见下表所示。

表 9.4-4 拟建项目供排水情况核算表

用水单位	日用水量 (m^3/d)	日排水量 (m^3/d)	年用水量 (m^3/a)	年排水量 (m^3/a)	去向
生活用水	6.30	5.67	1575.00	1417.50	专精特新产业园的生化池进行预处理后排入市政污水管网
清洁用水	3.70	2.59	925.00	647.50	
活化冷却水	/	1.00	/	1.15	
合计	10.00	9.26	2500.00	2066.15	

拟建项目运营期产生的废水经专精特新产业园的生化池进行预处理后排入市政污水管网，并经璧山高新区生活污水处理厂处理后排放，最终排入璧南河。拟建项目废水中污染物产生及排放情况见下表。

表 9.4-5 拟建项目废水主要污染物产生量及排放量

废水量	污染物	产生量		生化池处理排放		璧山高新区生活污水处理厂排放	
		浓度 mg/L	产生量 t/a	浓度 mg/L	排放量 t/a	浓度 mg/L	排放量 t/a
2066.15t/a	COD	400	0.83	340	0.70	30	0.06
	BOD ₅	200	0.41	180	0.37	6	0.01
	SS	220	0.45	150	0.31	10	0.02
	NH ₃ -N	40	0.08	35	0.07	1.5	0.01

注：璧山高新区生活污水处理厂排放的污染物浓度执行 IV 水环境质量标准。

(三) 噪声

拟建项目硼中子俘获治疗系统的生产过程中主要使用家用手枪钻、家用充电钻、多

续表 9 项目工程分析与源项

功能冲击钻、三功能锤钻冲击钻电钻、家用角磨机、直流脉冲氩弧焊机等小型设备，其噪声源强均不超过 60dB（A）。此外，拟建项目的暖通工程的风机、风冷式中央空调的室外机等设备噪声源强不超过 65dB（A）。

（四）固废

拟建项目运营期产生的固体废弃物包括生活垃圾、一般固体废弃物。

（1）生活垃圾

拟建项目的工作人员产生的生活垃圾按 0.5kg/人·天计，工作人员约 90 人，则生活垃圾产生量约 4.5kg/d（1.10t/a），收集在专精特新产业园垃圾收集点内，而后交环卫部门统一处理。

（2）一般固体废弃物

拟建项目运营期将产生少量一般固体废弃物，主要为构件、零部件的包装废物、金属屑以及废过滤材料。

构件、零部件的包装废物产生量约 0.05t/a，工业吸尘器处理的金属屑约 0.01t/a，均分类暂存在零部件入场验收区的废物区，定期交物资公司回收处理。硼中子俘获治疗系统的内循环水系统的冷却水循环使用过程中，管路以及相关配件不可避免会产生微量的金属离子进入冷却水中，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。硼中子俘获治疗系统的循环冷却水系统过滤材料平均 2 年更换 1 次，产生量约 0.2t。硼中子俘获治疗系统的内循环水系统平均 2min 循环一次，仅约 2%冷却水受照 2min，约 0.04%的冷却水受照 4min，故冷却水中的微量金属离子几乎未被照射即被过滤材料吸附，同时活化冷却水的活度低于豁免水平，故硼中子俘获治疗系统的内循环水系统过滤材料属于一般固体废弃物，更换时由厂家直接回收处理，不暂存。

9.4.3 污染物统计

拟建项目运营期污染物产排情况见下表。

续表 9 项目工程分析与源项

表 9.4-6 污染物产排情况统计表					
类别		污染因子	产生量	排放量	备注
电离辐射		质子	最高能量约 2.7MeV	靶点 1m 处的中子剂量当量率约 2.0×10 ⁶ μSv/h，光子剂量率约 1.1×10 ⁵ μSv/h	屏蔽体防护
		中子	最高能量约 1.1MeV		
		γ射线	最高能约量 10.8MeV		
放射性三废	活化气体	主要含 ³ H、 ¹⁴ C、 ¹⁶ N、 ¹⁹ O、 ⁴¹ Ar 等放射性同位素	少量	少量	引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶，并高于楼顶 3m 排放，排放高度约 17m
	活化废水	活化冷却废水主要含 ³ H、 ¹⁹ O 等放射性同位素	年产生量约 1.15m ³	年排放量约 1.15m ³	冷却水收集池内暂存 30d 后，取样监测，待其放射性核素 ³ H 活度低于 1ALImin 后再排入专精特新产业园生化池处理后进入市政污水管网，再经过璧山高新区生活污水处理厂处理后排放，受纳水体为璧南河
	活化固废	活化锂靶主要含 ⁷ Be、 ⁶⁴ Cu、 ⁶⁶ Cu、 ²⁸ Al、 ⁵⁵ Fe、 ⁵⁹ Fe 等放射性同位素	年产生量约 28.8kg (1 个)	/	暂存在放射性废物衰变间内，低于清洁解控水平后作为一般固废交物资公司回收处理；若无法清洁解控，则待核技术利用工作场所退役时送至有资质单位处置
		活化金丝、活化箔主要含 ²⁸ Al、 ¹¹⁴ Ln、 ⁶⁴ Cu、 ⁶⁶ Cu、 ¹⁹⁶ Au 等放射性同位素	年产生量约 100g	/	暂存在放射性废物衰变间内，待其低于清洁解控水平后作为一般固废交物资公司回收处理
非放射性三废	废水	COD	0.83t/a	0.06 t/a	进入专精特新产业园生化池预处理后排入市政污水管网，再经过璧山高新区生活污水处理厂处理后排放，受纳水体为璧南河
		BOD ₅	0.41 t/a	0.01t/a	
		SS	0.45t/a	0.02t/a	
		NH ₃ -N	0.08t/a	0.01t/a	

续表 9 项目工程分析与源项

类别		污染因子		产生量	排放量	备注
非放射性三废	废气	调试实验废气	O ₃	3.52×10 ⁻⁷ t/a	3.52×10 ⁻⁷ t/a	引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶，并高于楼顶 3m 排放，排放高度约 17m
			NO _x	1.76×10 ⁻⁷ t/a	1.76×10 ⁻⁷ t/a	
		金属粉尘	铁、铝、铜等	少量	少量	经工业吸尘器处理后在车间无组织排放
		焊接废气	CO、NO _x 、O ₃ 、金属化合物等	少量	少量	
	固废	生活垃圾		1.10t/a	/	收集后交环卫部门统一处理
		包装废物		0.05t/a	/	定期交物资公司回收处理
		金属屑		0.01t/a	/	
		废过滤材料		0.20t/a	/	厂家直接回收处理，不暂存
噪声		设备噪声	少量	少量	选用低噪声设备，采取基础减振，合理布局、建筑隔声等	

表 10 辐射安全与防护

10.1 布局与分区

10.1.1 工作场所布局合理性

拟建项目用房总体划分为 3 个相对独立的区域，分别 BNCT 生产区、BNCT 调试实验区、办公生活区。拟建项目涉及核技术利用的功能用房（BNCT 调试实验机房、放射性废物衰变间、物理实验室）均布置在 BNCT 调试实验区内。BNCT 调试实验机房为地上一层建筑，内设 1 间加速器室、1 间中子靶站间，周围根据硼中子俘获治疗系统的运行、调试、实验研究等需求布置控制室、设备电源间、功率源间、水处理间、物理实验室等辅助用房，功能设置齐全。BNCT 调试实验机房的中子靶站间设置 L 型迷路，主射方向朝向中子靶站间的北墙（水处理间），避开了控制室、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 调试实验机房的控制室独立布置在 BNCT 调试实验机房外，隔室操作能减少对辐射工作人员的照射。另 BNCT 调试实验区独立成区，周围活动的公众成员少。此外，放射性废物衰变间、物理实验室以及 BNCT 调试实验机房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，拟建项目平面布局满足要求。

10.1.2 分区

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）控制区和监督区的定义划定控制区和监督区。其定义为“控制区：在辐射工作场所划分的一种区域，在这种区域内要求或可能要求采取专门的防护手段和安全措施；监督区：未被确定为控制区、通常不需要采取专门防护手段和安全措施但要不断检查其职业照射条件的任何区域”。

根据《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）：放射治疗工作场所应分为控制区和监督区。治疗机房、迷路应设置为控制区；其他相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需经常检查其职业照射条件的区域设为监督区。

用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所必须在硼中子俘获治疗系统入场前取得建设项目环境影响评价批准书，其控制区和监督区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）的要求。

根据控制区和监督区的定义，本评价结合拟建项目布局情况和环境情况特点进行辐射防护分区划分。拟将 BNCT 调试实验机房、放射性废物衰变间、物理实验室设为控制

续表 10 辐射安全与防护

区，其余与其相邻区域划为监督区。拟建项目工作场所控制区和监督区划分情况见表 10.1-1，工作场所分区示意图见附图 8。

表 10.1-1 分区管理情况表

类别	区域
控制区	BNCT 调试实验机房（包括加速器室、中子靶站间）、放射性废物衰变间、物理实验室
监督区	控制室、设备电源间、工艺空调机房、走廊、水处理间、功率源间、零部件入场验收区、洁净间、预留用房、仓储间、预留用房、卫生间、室外道路（东侧）、BNCT 调试实验机房楼上对应区域（封闭空间）、放射性废物衰变间楼上对应区域（重庆坤元堂医药有限公司用房）、物理实验室楼上对应区域（重庆坤元堂医药有限公司用房）

拟建项目核技术利用工作场所还应采取必要的措施加强分区管理，主要措施如下：

①控制区：在该区的辐射工作人员应当严格遵守防护规定和安全操作规程，BNCT 调试实验机房的出入口处设置门禁、声光报警装置、工作状态指示灯、电离辐射警告标志以及门机联锁等防止人员误入的控制措施。放射性废物衰变间设置双人双锁措施，并在防护门上方粘贴电离辐射警告标志。

②监督区：在监督区的入口处的适当地点设立标明监督区的标牌，并设置警示标识和标语，提醒无关人员不要靠近，并按照要求定期对监督区的周围剂量当量率进行监测。

③在监督区与控制区边界及管线连接等处开展定期监测工作。

10.2 辐射安全与防护措施

拟建项目硼中子俘获治疗系统运行时主要产生的韧致辐射、中子、 γ 射线以及感生放射性等，对其基本防护原则是减少照射时间、远离射线源以及加以必要的屏蔽。用户单位（医疗机构）硼中子俘获治疗系统的使用场所无法确定，但采取的安全防护措施与 BNCT 调试实验机房的基本一致。因此，本评价仅对拟建项目场所内的 BNCT 调试实验机房及硼中子俘获治疗系统的辐射安全与防护措施进行介绍。

10.2.1 实体屏蔽防护措施

（一）主体屏蔽

（1）BNCT 调试实验机房

BNCT 调试实验机房的地板采用 1500mm 混凝土进行屏蔽，中子靶站间迷路内墙采用 1000mm 混凝土进行屏蔽，其他墙体、顶棚均采用 2000mm 混凝土进行屏蔽。加速器室内防护门采用 10mmPb+130mm 含 30%碳化硼聚乙烯，外防护门采用 60mmPb+80mm 含 30%碳化硼聚乙烯进行屏蔽，中子靶站间内防护门采用 20mm 含 30%碳化硼聚乙烯，

续表 10 辐射安全与防护

外防护门采用 60mmPb+80mm 含 30%碳化硼聚乙烯进行屏蔽。此外，加速器室内部设置 1 扇 20mmPb+50mm 含 30%碳化硼聚乙烯的移动防护屏。经后文核算，BNCT 调试实验机房的屏蔽能力能满足《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-1985)以及建设单位的要求。

(2) 物理实验室

物理实验室的墙体采用 300mm 加气混凝土、2000mm 混凝土进行屏蔽，顶棚楼板采用 100mm 混凝土进行屏蔽，防护门采用 2mmPb 进行屏蔽。

(3) 放射性废物衰变间

放射性废物衰变间的墙体均采用 300mm 混凝土进行屏蔽，顶棚楼板采用 100mm 混凝土进行屏蔽，防护门采用 2mmPb 进行屏蔽。

(4) 冷却水收集池

冷却水收集池布置在地下，池体、池底、盖板均采用 100mm 混凝土进行屏蔽。

(二) BNCT 调试机房穿墙管线屏蔽补偿

BNCT 调试实验机房的穿墙管线包括风管、电管、水管、气体管以及试验管，BNCT 调试实验机房穿墙管线平面布置图以及穿墙大样图见附图 10，穿墙管线情况见下表。

续表 10 辐射安全与防护

表 10.2-1 BNCT 调试实验机房穿墙管线情况					
功能 房间	名称	编号	尺寸及数量 (mm)	穿墙方式	大样图编号
加速 器室	风管预留洞	①	1400×600	“Г”形穿墙，通道底部高于加速器室内地面 6.00m，高于零部件入场验收区地面 6.50m。进风管 600mm×600mm，排风管 600mm×800mm。	风管预留洞大样图 1
	预埋电管	①	6×φ150	地下水平 0° 穿墙。上层电管底部低于加速器室地面约 0.20m，设备电源间地面约 0.35m，顶部低于加速器室地面约 0.05m，设备电源间地面约 0.20m，下层电管底部低于加速器室地面约 0.55m，设备电源间地面约 0.70m，顶部低于加速器室地面约 0.40m，设备电源间地面约 0.55m。	电管-埋管大样图 7
加速 器室	预埋电管	②	4×φ200	地上水平 45° 穿墙。电管顶部高于加速器室、功率源间地面约 3.70m，底部高于加速器室、功率源间地面约 3.50m。	电管-埋管大样图 8
		③	8×SC20	地上水平 45° 穿墙。电管顶部高于加速器室、功率源间地面约 5.90m，底部高于加速器室、功率源间地面约 5.87m。	电管-埋管大样图 9
		④	4×φ200	“U”形穿墙，电缆沟底部低于加速器室、洁净间地面约 0.90m，顶部低于加速器室、洁净间地面约 0.70m。电缆沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	电管-埋管大样图 1
		⑤	4×φ200	“半 U”形穿墙，电缆沟底部低于加速器室地面约 0.3m、控制室地面约 0.45m，顶部低于加速器室地面约 0.10m、控制室地面约 0.25m。电缆沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	电管-埋管大样图 4
		⑥	6×φ150	地下水平 0° 穿墙。上层电管底部低于加速器室地面约 0.20m，设备电源间地面约 0.35m，顶部低于加速器室地面约 0.05m，设备电源间地面约 0.20m；下层电管底部低于加速器室地面约 0.55m，设备电源间地面约 0.70m，顶部低于加速器室地面约 0.40m，设备电源间地面约 0.55m。	电管-埋管大样图 5
		⑦	10×φ150	地下水平 0° 穿墙。上层电管底部低于加速器室地面约 0.35m，设备电源间地面约 0.50m，顶部低于加速器室地面约 0.20m，设备电源间地面约 0.35m；下层电管底部低于加速器室地面约 0.70m，设备电源间地面约 0.74m，顶部低于加速器室地面约 0.55m，设备电源间地面约 0.70m。	电管-埋管大样图 6

续表 10 辐射安全与防护

功能 房间	名称	编 号	尺寸及数量 (mm)	穿墙方式	大样图编号
加速 器室	预埋电管	⑧	4×φ200	“U”形穿墙，电缆沟底部低于加速器室、物理实验室地面约 0.94m，顶部低于加速器室、物理实验室地面约 0.74m。电缆沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	电管-埋管大样图 2
	预埋水管	①	4×φ250 2×φ150	“U”形穿墙，水管管底低于加速器室、水处理间的地面约 475mm，150mm 不锈钢套管顶部低于加速器室、水处理间的地面约 325mm，250mm 不锈钢套管顶部低于加速器室、水处理间的地面约 225mm。加速器室侧水管沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	水管-埋管大样图 1
		②	1×φ80	地上水平 45° 穿墙。水管顶部高于加速器室、水处理间地面约 5.14m，底部高于加速器室、水处理间地面约 4.06m。	水管-埋管大样图 2
		③	1×φ40	地上水平 45° 穿墙。水管顶部高于加速器室、零部件入场验收区地面约 5.12m，底部高于加速器室、零部件入场验收区地面约 4.08m。	水管-埋管大样图 3
中子靶 站间	风管 预留洞	②	1200×600	“┐”形穿墙，通道底部高于中子靶站间迷路内地面 6.0mm，高于辐射工作人员走廊地面 6.5mm。进风管 400mm×400mm，排风管 500mm×400mm。电缆沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	风管预留洞大样图 2
	预埋电管	⑨	2×φ200	“U”形穿墙，电缆沟底部低于中子靶站间、物理实验室地面约 0.94m，顶部低于中子靶站间、物理实验室地面约 0.74m。电缆沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	电管-埋管大样图 2
		⑩	2×φ200	“U”形穿墙，电缆沟底部低于中子靶站间迷路、物理实验室地面约 0.94m，顶部低于中子靶站间迷路、物理实验室地面约 0.74m。电缆沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	电管-埋管大样图 2
		⑪	3×φ200	“倒 U”形穿墙，电缆沟入口高于中子靶站间及迷路地面约 6.0m，底部高于中子靶站间及迷路地面约 6.9m，顶部低于中子靶站间及迷路地面约 7.1m。	电管-埋管大样图 3
		⑫	2×SC20	地上水平 45° 穿墙。电管顶部高于中子靶站间、辐射工作人员走廊地面约 5.90m，底部高于中子靶站间、辐射工作人员走廊地面约 5.87m。	电管-埋管大样图 9

续表 10 辐射安全与防护

功能 房间	名称	编 号	尺寸及数量 (mm)	穿墙方式	大样图编号
中子 靶站间	预埋电管	⑬	2×φ200	“U”形穿墙，电缆沟底部低于中子靶站间、水处理间地面约 0.90m，顶部低于中子靶站间、水处理间地面约 0.70m。电缆沟穿墙进出口上方加盖 50mm 钢板进行屏蔽。	电管-埋管大样图 1
	预埋水管	④	1×DN75	地下水平 0° 穿墙。水管底部低于中子靶站间地面约 1.05m，物理实验室地面约 1.00m，工艺空调机房地面约 1.65m；顶部低于中子靶站间地面约 0.97m，物理实验室地面约 1.07m，工艺空调机房地面约 1.57m。	水管-埋管大样图 4
		⑤	1×φ80	地上水平 45° 穿墙。水管顶部高于中子靶站间、水处理间地面约 5.14m，底部高于中子靶站间、水处理间地面约 4.06m。	水管-埋管大样图 2
	预埋气管	⑪	1×φ80	地上水平 45° 穿墙。气管顶部高于中子靶站间、水处理间地面约 5.14m，底部高于中子靶站间、水处理间地面约 4.06m。	水管-埋管大样图 2
	试验管	①	1×φ20	地上水平 30° 穿墙。试验管顶部高于中子靶站间、物理实验室地面约 1.47m，底部高于中子靶站间、物理实验室地面约 1.45m。	试验管-埋管大样图 1

BNCT 调试实验机房各穿墙预埋管线跟混凝土浇筑同时进行，并一次到位。BNCT 调试实验机房穿墙管线采用多种穿越方式，避免射线直接穿墙。BNCT 调试实验机房采取这些措施后，对其墙体屏蔽防护能力削弱甚微，不影响屏蔽体的屏蔽防护效果。

10.2.2 通风

BNCT 调试实验机房的加速器室、中子靶站间各设置 1 套独立的通风系统，废气均引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶，并高于楼顶 3m 排放，排放高度约 17m。BNCT 调试实验机房通风布置图见附图九。

加速器室南墙水平均匀布置 9 个新风口，距地面均约 3.0m，总风量约 6000m³；北墙上下各布置 2 个排风口，距地面分别约 3.0m、0.3m，总风量约 7000m³，则加速器室的通风换气次数约 8 次/h。中子靶站间东墙水平均匀布置 4 个新风口，距地面均约 3.0m，总风量约 2500m³；东南角上下各布置 1 个排风口，距地面分别约 3.0m、0.3m，总风量约 3000m³，周围中子靶站间（不含迷路）的通风换气

续表 10 辐射安全与防护

次数约 13 次/h。加速器室、中子靶站间均采用上进风，上下出风的通风方式，且排风量略高于送风量，内部形成微负压，有利于废气的收集，也能避免进气受到排出气体的污染。因此，拟建项目 BNCT 调试实验机房的通风系统满足《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）的通风要求。

10.2.3 辐射安全防护措施

（一）BNCT 调试实验机房及硼中子俘获治疗系统的辐射安全防护措施

（1）授权钥匙

硼中子俘获治疗系统拟配置授权钥匙，由硼中子俘获治疗系统运行负责人（辐射工作人员）持有，硼中子俘获治疗系统运行前运行负责人确认任务后打开（授权）。授权钥匙匹配的锁孔设置在控制室的操作台上，钥匙开关锁孔必须插入授权钥匙后才能启动硼中子俘获治疗系统，硼中子俘获治疗系统不使用时应及时关机并拔出授权钥匙。

（2）巡检系统

运行负责人（辐射工作人员）必须完成 BNCT 调试实验机房巡检清场工作后，硼中子俘获治疗系统才能开机运行。硼中子俘获治疗系统的巡检系统包括加速器室巡检系统、中子靶站间巡检系统，均由防护门、清场按钮构成，清场按钮安装在 BNCT 调试实验机房的加速器室东墙、西墙内侧以及中子靶站间西墙、迷路外墙内侧，安装高度均距离地面约***。

运行负责人更换工作服后，使用防护门禁激活外防护门控制开关，开启外防护门进入加速器室或中子靶站间，巡检系统开启，确定无人滞留的前提条件下按下清场按钮，并在内防护门关闭的前提下，离开加速器室或中子靶站间，关闭外防护门，巡检完成。

加速器室或中子靶站间的巡检时间必须控制在 5min 以内，否则视为巡检失败，全部清场按钮重置。加速器室或中子靶站间巡检完成后，任一防护门未开启，视为巡检仍有效，硼中子俘获治疗系统再次启动前无需巡检。加速器室巡检系统、中子靶站间巡检系统各自独立运行，即若加速器室的任一防护门未开启，中子靶站间的任一防护门开启，则视为加速器室巡检仍有效，无需再次巡检，中子靶站间巡检系统失效，清场按钮重置，必须再次巡检；同理，若加速器室的任一防护门开启，中子靶站间的任一防护门未开启，则视为加速器室巡检系统失效，清场按钮重置，必须再次巡检，中子靶站间巡检仍有效，无需再次巡检。

续表 10 辐射安全与防护

(3) 门机联锁装置

BNCT 调试实验机房所有防护门（4 扇）均设置门机联锁装置。当 BNCT 调试实验机房的任一防护门处于开启状态，硼中子俘获治疗系统均不能出束；当硼中子俘获治疗系统正常运行时，任一防护门开启，硼中子俘获治疗系统将会自动切断高压，停止出束。

(4) 移动防护屏联锁装置

硼中子俘获治疗系统与 BNCT 调试实验机房的移动防护屏进行联锁。移动防护屏设置传感器，该传感器接入安全联锁系统，在移动防护屏未到达预设位置时，硼中子俘获治疗系统不能整机出束。***。

(5) 通风联锁装置

硼中子俘获治疗系统与 BNCT 调试实验机房的通风系统进行联锁。通风系统接入安全联锁系统，通风系统未启动，硼中子俘获治疗系统不能整机出束。***。

(6) 防护门开门按钮、控制开关

BNCT 调试实验机房的 4 个防护门内均设置防护门开门按钮，同时可作为紧急开门按钮使用；4 个防护门外均拟安装防护门控制开关，用于控制防护门的开闭，其中 2 个外防护门的防护门控制开关需要使用防护门禁刷卡激活后方可使用。如遇紧急情况，滞留在 BNCT 调试实验机房内人员可按下防护门内侧的防护门开门按钮，防护门开启后迅速离开。同时硼中子俘获治疗系统将会自动切断高压，停止出束。防护门控制开关旁张贴中文说明。

(7) 手动应急开门装置

BNCT 调试实验机房的防护门均为电动推拉门，防护门控制开关在停电状态下无法使用。因此，BNCT 调试实验机房的各防护门均拟设置手动开门装置（铰链）用于停电状态下应急开门。

(8) 急停按钮

BNCT 调试实验机房内布置 15 个急停按钮，安装高度距离 BNCT 调试实验机房地面约 1.5m。BNCT 调试实验机房的加速器室内布置 7 个急停按钮，分布在各面墙上；中子靶站间内布置 7 个急停按钮，分布在各面墙上、迷路以及迷路内口上。此外，控制室的控制台上拟布置 1 个急停按钮。因此，拟建项目布置的急停按钮可实现全区域覆盖。

续表 10 辐射安全与防护

当人员滞留在 BNCT 调试实验机房内，硼中子俘获治疗系统运行后，滞留人员或控制室的辐射工作人员（视频监控系统）就近触发急停按钮，硼中子俘获治疗系统将会自动切断高压，停止出束。拟建项目的急停装置触发后必须由运行负责人复位后方可再次运行硼中子俘获治疗系统。急停按钮旁张贴中文说明。

(9) 工作状态指示灯

拟在 BNCT 调试实验机房设置 4 套工作状态指示灯，安装在 BNCT 调试实验机房的外防护门外、中子靶站间迷路以及控制室内。工作状态指示灯与硼中子俘获治疗系统、剂量联锁，显示“安全通行”表示硼中子俘获治疗系统处于未出束状态且 BNCT 调试实验机房内的辐射剂量低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；“准备出束，限制进入”表示巡检程序启动，硼中子俘获治疗系统处于未出束状态且 BNCT 调试实验机房内的辐射剂量低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，“有辐射，禁止进入”表示硼中子俘获治疗系统处于出束状态或 BNCT 调试实验机房内的辐射剂量高于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

(10) 声光报警装置

拟在 BNCT 调试实验机房设置 5 个声光报警装置，其中 2 个分别安装在 BNCT 调试实验机房的加速器室、中子靶站间内，2 个安装在 BNCT 调试实验机房外防护门外，1 个安装在控制室内。BNCT 调试实验机房巡检完成后辐射工作人员回到控制室，启动硼中子俘获治疗系统运行出束，声光报警装置红灯闪烁且警铃响，持续 10s 后，红灯停止闪烁不熄灭，警铃停止，待硼中子俘获治疗系统停止出束后，声光报警装置红灯熄灭。

(11) 剂量监测

硼中子俘获治疗系统的工作场所拟配置 1 套固定式剂量监测系统，包括 7 个辐射剂量监测探头，可同时监测中子辐射剂量水平、光子辐射剂量水平。***。

(12) 视频监控

拟建项目拟设 1 套视频监控系统，包含 12 个摄像头。5 个摄像头布置在 BNCT 调试实验机房内，分布在加速器室西南角、东北角以及中子靶站间东南角、西北角、迷路内。7 个摄像头布置在 BNCT 调试实验机房外，分布在 BNCT 调试实验机房的外防护门外（2 个）、功率源间、水处理间（2 个）、设备电源间（2 个）。监控画面实时显示于控制室内计算机屏幕上，辐射工作人员可全方位无死角地观察到 BNCT 调试实验机房内的情况。

续表 10 辐射安全与防护

(13) 广播系统

BNCT 调试实验机房布置 1 套广播系统, 加速器室、中子靶站间拟各设置 1 个喇叭, 控制室内布置 1 个话筒, 用于提醒滞留在加速器室、中子靶站间的人员离开。

(14) 红外防挤压装置

BNCT 调试实验机房的 4 个防护门拟设置红外线防挤压装置, 防止人员被夹伤。

(15) 门禁系统

BNCT 调试实验区拟设置 11 个普通门禁, 分布在 BNCT 调试实验区用房的出入口处, 未经授权的人员无法进入。另 BNCT 调试实验机房外防护门各设置 1 个防护门禁用于激活防护门控制开关。

(16) 警示标志

BNCT 调试实验机房周围及防护门上均拟张贴电离辐射警告标志和中文说明, 提示经过该区域的人员远离。硼中子俘获治疗系统工作场所的控制区、监督区合适位置设立表明控制区、监督区的标牌, 并设置警示标识和中文说明。

(17) 设备拆解运输的辐射安全防护措施

①硼中子俘获治疗系统的旋转锂钽由机器人拆卸, 并装入铅容器内盖好, 再由辐射工作人员打包;

②硼中子俘获治疗系统其它部件由辐射工作人员手动拆卸, 必须在硼中子俘获治疗系统停止出束后 5d 后, 且调试实验机房内部剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后方可启动。辐射工作人员拆卸硼中子俘获治疗系统其他部件时必须对其表面剂量率进行巡测, 其监测结果低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 后方可进行。

③打包好的硼中子俘获治疗系统部件表面剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$, 委托第三方专业运输公司运输, 运输安全由第三方单位承担。

根据硼中子俘获治疗系统的性能及辐射安全与防护要求, 辐射安全联锁逻辑关系见图 10.2-1。

续表 10 辐射安全与防护

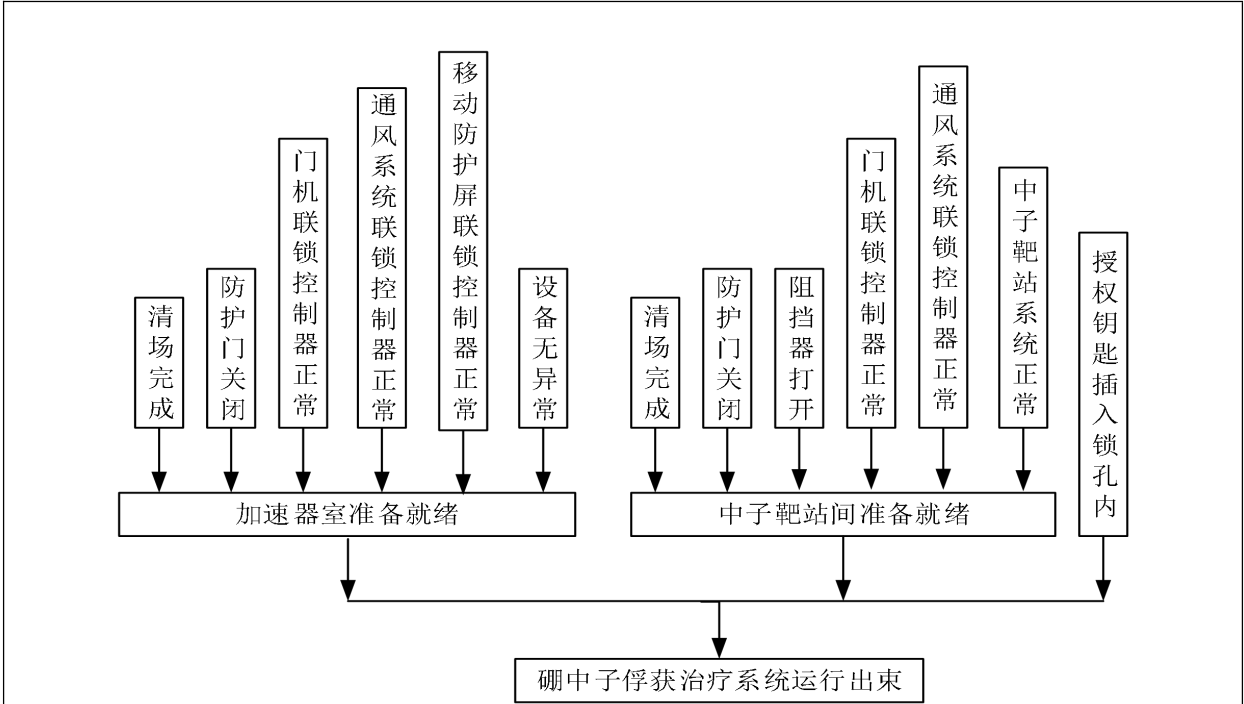


图 10.2-1 辐射安全联锁逻辑关系图

硼中子俘获治疗系统正常出束必须满足以下条件：

授权钥匙插入锁孔内；加速器室准备就绪（清场完成、防护门关闭、急停按钮未动作、联锁控制器正常、设备无异常）；中子靶站间准备就绪（清场完成、防护门关闭、阻挡器打开、急停按钮未动作、联锁控制器正常、中子靶站系统正常）。

硼中子俘获治疗系统一旦发生以下任何一种情况，将会自动停止出束：

授权钥匙拔出锁孔；防护门开启；急停按钮动作；联锁控制器异常；设备异常；阻挡器关闭；中子靶站系统异常。

辐射工作人员进入BNCT调试实验机房必须满足以下条件：

硼中子俘获治疗系统关机停止出束，且 BNCT 调试实验机房内辐射剂量监测探头测量结果均低于 2.5μSv/h。如遇紧急情况，硼中子俘获治疗系统关机停止出束后，辐射工作人员可立即进入 BNCT 调试实验机房。

综上所述，硼中子俘获治疗系统及工作场所辐射防护与安全设施见表 10.2-2，辐射防护与安全设施布置见附图十一。

表 10.2-2 硼中子俘获治疗系统辐射防护与安全设施一览表

场所	安全防护措施	数量	说 明
硼中	授权钥匙	1 把	控制硼中子俘获治疗系统的运行，由运行负责人持有

续表 10 辐射安全与防护

子俘获治疗系统及工作场所	巡检系统	2 套	中子靶站间、加速器室各配置 1 套。
	门机联锁	4 套	4 个防护门各配置 1 套门机联锁, 防护门与硼中子俘获治疗系统联锁
	移动防护屏联锁装置	1 套	移动防护屏与硼中子俘获治疗系统的整机出束联锁
	通风联锁装置	2 套	通风系统与硼中子俘获治疗系统的整机出束联锁
	防护门控制开关	4 套	4 个防护门开门按钮, 用于防护门的开启; 4 个防护门控制开关, 用于防护门的开闭, 其中 2 个外防护门的控制开关需要防护门禁激活后方可使用。
	手动应急开门装置	4 个	4 个防护门各配置 1 个手动应急开门装置
	门禁系统	13 个	包括 11 个普通门、2 个防护门禁
	急停按钮	15 个	用于紧急情况下切断硼中子俘获治疗系统的高压, 停止出束。7 个急停按钮安装在加速器室内墙上, 7 个急停按钮安装在中子靶站间内墙、迷路以及迷路内口上, 1 个急停按钮安装控制台上
	固定式辐射剂量监测系统	1 套	包括 7 个辐射剂量监测探头, 其中 3 个布置在 BNCT 调试实验机房内, 4 个布置在 BNCT 调试实验机房外
	工作状态指示灯	4 个	用于显示硼中子俘获治疗系统和 BNCT 调试实验机房的状况, 布置在 BNCT 调试实验机房外防护门外、中子靶站间迷路内
	声光报警装置	5 个	2 个安装在 BNCT 调试实验机房内, 3 个声光报警装置安装在 BNCT 调试实验机房外, 用于提醒人员离开或远离 BNCT 调试实验机房。
	视频监控系统	1 套	包含 12 个摄像头, 5 个布置在 BNCT 调试实验机房内, 7 个布置在 BNCT 调试实验机房外, 用于监控 BNCT 调试实验机房内外情况
	广播系统	1 套	包含 2 个喇叭、1 个话筒, 用于提醒人员离开 BNCT 调试实验机房的加速器室、中子靶站间。
	警示标志、警示语	4 套	在 BNCT 调试实验机房防护门外设置电离辐射警示标志和中文警示说明, 警示与防止误进入。
	红外防挤压装置	4 套	4 扇防护门各配置 1 套红外防挤压装置, 防人员被夹伤。
	便携式个人剂量报警仪	4 台	进入 BNCT 调试实验机房内工作人员使用
	便携式中子剂量仪(含 γ 探头)	1 台	日常监测使用
场所	安全防护措施	数量	说 明
硼中子俘获治疗系统及工作场所	个人剂量计	按需	每名辐射工作人员佩戴 1 枚 X- γ 个人剂量计、1 枚中子个人剂量计
	通风系统	2 套	BNCT 调试实验机房的加速器室、中子靶站间各设置 1 套独立的通风系统, 废气均引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶, 并高于楼顶 3m 排放, 排放高度约 17m。
	警示标志	若干	包括电离辐射警告标志、监督区、控制区等
(二) 放射性废物衰变间、物理实验室的辐射安全防护措施			

续表 10 辐射安全与防护

放射性废物衰变间、物理实验室拟设置门禁，专人管理，限制无关人员进入；放射性废物衰变间、物理实验室的防护门上拟张贴电离辐射警告标志和中文警示，提示经过该区域的人员远离；放射性废物衰变间、物理实验室的出入口处设立标明控制区的标牌，并设置警示标识和标语；放射性废物衰变间、物理实验室周围监督区合适位置设立标明监督区的标牌，并设置警示标识和标语。此外，放射性废物衰变间用于放射性废物暂存的铅容器外表面张贴电离辐射标志。

拟建项目拟采取的辐射安全与防护措施与《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-1985)的相关要求对比情况见表10.2-3所示。

表10.2-3 拟建项目辐射防护措施与标准要求对比情况表

标准要求		项目情况
3.3 辐射 安全 系统	3.3.1 决定加速器产生辐射的主要控制系统应该用开关钥匙控制。	拟建项目硼中子俘获治疗系统拟配置授权钥匙用于控制硼中子俘获治疗系统。
	3.3.2 加速器厅、靶厅的门均需安装联锁装置，只有门关闭后才能产生辐射。	拟建项目的硼中子俘获治疗系统固定安装在 BNCT 调试实验机房内，其防护门拟安装门机联锁装置，只有所有防护门关闭后，硼中子俘获治疗系统才能运行出束，产生辐射。
	3.3.3 在加速器厅、靶厅内人员容易到达的地点，应安装紧急停机或紧急断束开关，并且这种开关应当有醒目的标志。	拟建项目的硼中子俘获治疗系统固定安装在 BNCT 调试实验机房内，其加速器室、中子靶站间内人员容易到达的地点均拟安装紧急停机按钮，并张贴醒目的标志。
	3.3.4 在加速器厅、靶厅内人员容易看到的地方须安装闪光式或旋转式红色警告灯及音响警告装置；在通往辐射区的走廊、出入口和控制台上须安装工作状态指示灯。	拟建项目拟在 BNCT 调试实验机房内、防护门外安装声光报警装置，具有旋转式红色警告灯和音响警告装置的功能。另拟在 BNCT 调试实验机房内、防护门外、控制室内安装工作状态指示灯。
标准要求		项目情况
3.4 通风系统	3.3.5 在高辐射区和辐射区，应该安装遥控辐射监测系统。该系统的数字显示装置应安装在控制台上或监测位置。当辐射超过预定水平时，该系统的音响和（或）灯光警告装置应当发出警告信号。	拟建项目在 BNCT 调试实验机房内安装固定式 γ 辐射监测仪，防护门外安装固定式 γ 辐射监测仪和固定式中子辐射监测仪用于监测中子屏蔽室内外的辐射水平。固定式辐射监测仪的数字显示装置均安装在控制台上，当辐射超过预定水平时，固定式辐射监测仪的音响警告装置能发出警告信号。

续表 10 辐射安全与防护

3.3.6 每台加速器必须根据其特点配备其他辐射监测装置，如个人剂量计、可携式监测仪、气体监测仪等。	拟建项目拟配置个人剂量计、便携式个人剂量报警仪、便携式中子剂量仪（含 γ 探头）等。
3.3.7 辐射安全系统的部件质量要好，安装必须坚实可靠。系统的组件应耐辐射损伤。	拟建项目硼中子俘获治疗系统的辐射安全系统的部件质量好，安装能坚实可靠。系统的组件能耐辐射损伤。
3.4.1 为排放有毒气体（如臭氧）和气载放射性物质，加速器设施内必须设有通风装置。	BNCT 调试实验机房安装有独立的通风系统，硼中子俘获治疗系统运行产生的废气经通风系统收集后引至 2F 楼顶排放。
3.4.2 通风系统的排风速率应根据可能产生的有害气体的数量和工作需要而定。通风系统的进气应避免受到排出气体的污染。	BNCT 调试实验机房安装有 2 套独立的通风系统，采用上进风、上下排风的方式，排风量较进风量大，机房内形成微负压，避免进气受到排出气体的污染。BNCT 调试实验机房通风换气次数不低于 8 次/h，其通风效果能满足工作需要。
3.4.3 通风管道通过屏蔽体时，必须采取措施，保证不得明显地减弱屏蔽体的效果。	BNCT 调试实验机房的通风管采用“ Γ ”形穿墙方式，通风管底部高于地面 6.00m，未明显地减弱屏蔽体的效果。

根据上表可知，拟建项目拟采取的辐射安全与防护措施符合《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）的相关要求。

10.3 放射性三废的处理

（1）放射性废气

BNCT调试实验机房的加速器室、中子靶站间各设置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专精特新产业园13号标准厂房2F楼顶，并高于楼顶3m排放，排放高度约17m。

（2）放射性废水

拟建项目产生的放射性废水主要为活化冷却水。活化冷却水排入冷却水收集池暂存衰变30d后取样检测，放射性同位素 ^3H 活度浓度小于 $1\text{ALI}_{\min}$ 后再排入专精特新产业园生化池处理，最终经璧山高新区生活污水处理厂处理达标后排入璧南河。

（3）放射性固废

拟建项目产生的放射性固废主要包括活化锂靶、活化的金丝、活化箔等，均暂存在放射性废物衰变间内，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。

10.4 项目服务期满后环保要求

BICT 调试实验机房因搬迁等原因不再使用及服务期满后，建设单位拟按照法规标

续表 10 辐射安全与防护

准规定要求实施退役。拟在退役实施前开展污染调查，编制相应的退役方案、制定退役目标，首先安全、妥善处理放射性废物，做好退役实施期间的辐射安全防护等工作，确保放射性废物得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

表 11 环境影响分析

11.1 施工期环境影响

拟建项目施工期主要为 BNCT 调试实验机房的土建施工、内部装修以及设备、设施的安装等工作，主要的污染因子有：扬尘、噪声、废水、固体废物等。

施工场地内定期洒水抑尘，施工材料加盖篷布等措施，减少扬尘的产生和扩散。施工期施工人员生活污水，依托园区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。管沟开挖会产生少量土石方及建筑垃圾，土石方回填，建筑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 营运期环境影响分析

11.2.1 辐射环境影响

11.2.1.1 BNCT 调试实验机房

（一）硼中子俘获治疗系统的计算模型

拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统由建设单位自主研发，建设单位使用可视化软件 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。

续表 11 环境影响分析

(二) 关注点的选取

拟建项目 BNCT 调试实验机房屏蔽体外的关注点主要包括硼中子俘获治疗系统运行时，加速器室、中子靶站间屏蔽体外 30cm。

(三) BNCT 调试实验机房的辐射水平

(1) 辐射源项分析

质子束流在加速、输运的过程中将在质子束流真空管道损失束流。强流 ECR 质子源到 LEPT 系统束流损失约 25%，LEPT 系统到 RFQ 加速器系统束流损失约 5%，相对于质子束流轰击锂靶产生的反冲中子泄漏到加速器室的辐射剂量，加速器束流损失产生的辐射剂量可以忽略，主要考虑质子束流轰击锂靶后的辐射源项。

拟建项目生产的硼中子俘获治疗系统的质子束流轰击锂靶的源项参数见下表。

表 11.2-1 质子束流轰击锂靶的源项参数一览表

靶材	束流能量	束流强度
锂 (^7Li)	2.7MeV	30mA

(2) 屏蔽设计

拟建 BNCT 调试实验机房的地板采用 1500mm 混凝土进行屏蔽，迷路内墙采用 1000mm 混凝土进行屏蔽，其他墙体、顶棚均采用 2000mm 混凝土进行屏蔽。BNCT 调试实验机房的加速器室内防护门采用 10mmPb+130mm 含 30%碳化硼聚乙烯，外防护门采用 60mmPb+80mm 含 30%碳化硼聚乙烯进行屏蔽；中子靶站间内防护门采用 20mm 含 30%碳化硼聚乙烯，外防护门采用 60mmPb+80mm 含 30%碳化硼聚乙烯进行屏蔽。此外，加速器室内部配置 1 扇移动防护屏，屏蔽材料为 20mmPb+50mm 含 30%碳化硼聚乙烯。

BNCT 调试实验机房使用的混凝土密度设置为 2.35 g/cm^3 ，含 30%碳化硼聚乙烯密度设置为 1.1578 g/cm^3 ，铅密度设置为 11.34 g/cm^3 。BNCT 调试实验机房屏蔽计算时使用的铅、混凝土、含 30%碳化硼聚乙烯成分见下表。

表 11.2-2 铅、混凝土、含 30%碳化硼聚乙烯成分表

物质	密度, g/cm^3	元素成分	质量含量	元素成分	质量含量
铅	11.34	Pb	1	/	/
普通混凝土	2.35	H	0.008485	Si	0.145100
		C	0.050064	S	0.002970
		O	0.473483	K	0.001697

续表 11 环境影响分析

物质	密度，g/cm³	元素成分	质量含量	元素成分	质量含量
普通混凝土	2.35	Mg	0.024183	Ca	0.246924
		Al	0.036063	Fe	0.011031
含30%碳化硼聚乙烯	1.1578	H	0.1006	B	0.23478
		C	0.66462		

(2) 几何模型

拟建项目 BNCT 调试实验机房由 1 个加速器室、1 个中子靶站间组成。加速器室、中子靶站间东西并排布置。加速器室布置在西部，内部呈现五边形，使用面积约 137.4m²；中子靶站间布置在东部，设置迷路，内部呈现五边形，使用面积约 44.7m²（不含迷路）。根据硼中子俘获治疗系统及 BNCT 调试实验机房的 Auto CAD 布局图纸，使用 flair 建立 BNCT 调试实验机房的屏蔽物理计算模型，详见图 11.2-1 和图 11.2-2。

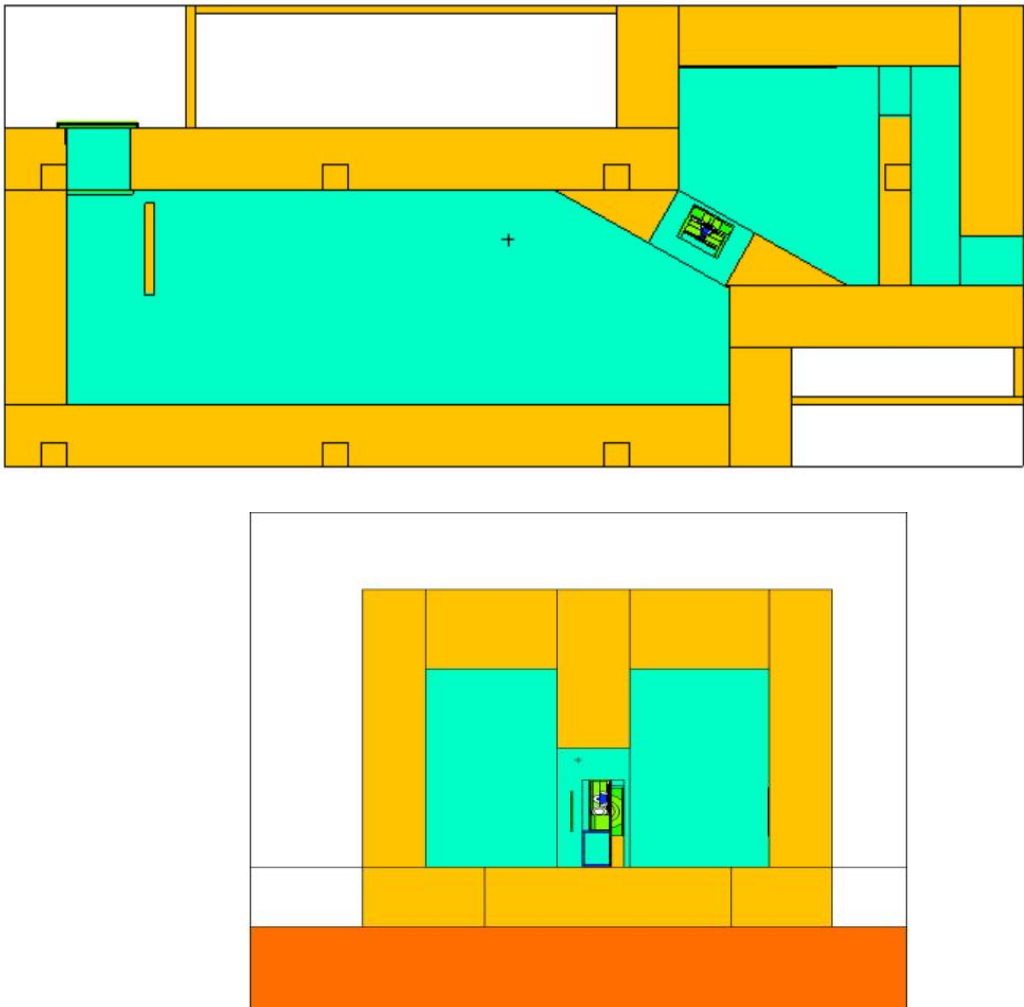


图 11.2-1 预测几何模型平二维图

续表 11 环境影响分析

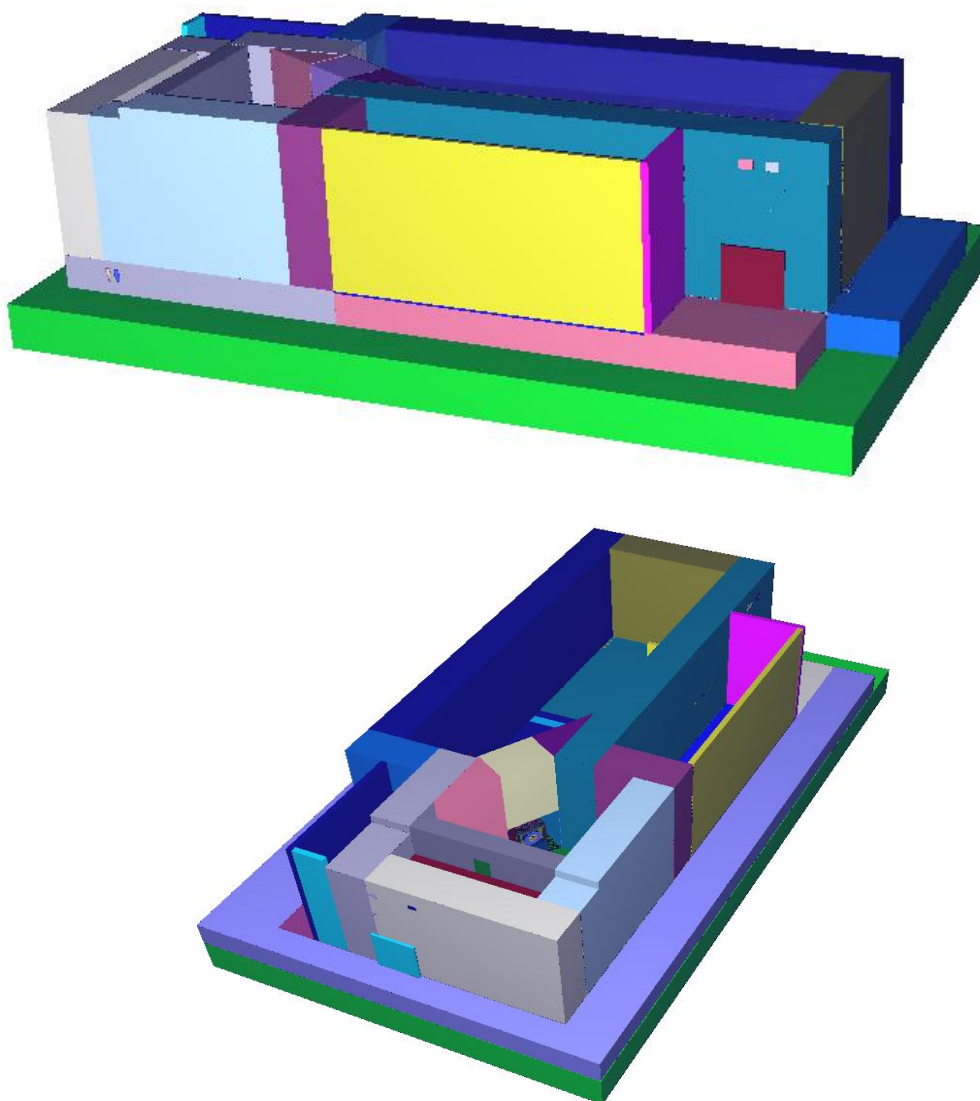


图 11.2-2 预测几何模型三维图

本评价建模时考虑了 BNCT 调试机房的穿墙风管、电管、风管、水管、试验管等。此外，BNCT 调试机房建模时还考虑了靶站安装在中子靶站间和加速器室的共墙上。靶站外观尺寸为 $2.2\text{m} \times 2.0\text{m} \times 0.8\text{m}$ ，其材料主要涉及锂、氟化锂、铅、含 30% 碳化硼聚乙烯、铁、铝、铜等。

(4) BNCT 调试实验机房屏蔽计算结果

为了直观显示 BNCT 调试实验机房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。

硼中子俘获治疗系统的射束平面是质子束流管道和出束口中心高度。射束平面是剂

续表 11 环境影响分析

量分布最高平面，距离地面约 1.4m。本评价选取 BNCT 调试实验机房距离地面 1.4m 处的水平方向剂量率水平分布图，详见图 11.2-3。

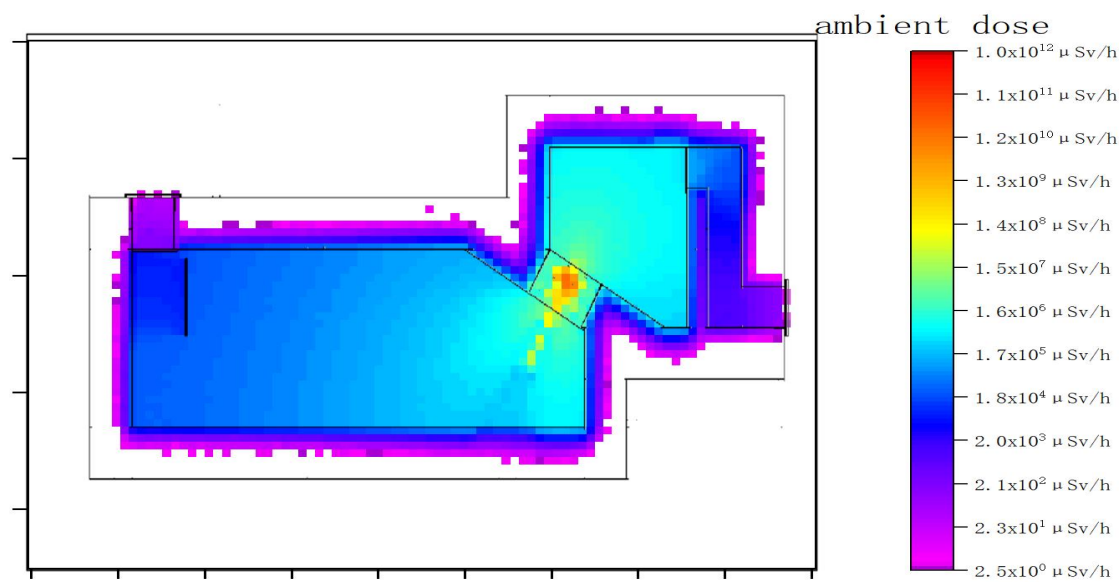


图 11.2-3 距离地面 1.4m 处水平方向剂量率水平分布图

BNCT 调试实验机房垂直方向剂量率水平分布图见图 11.2-4~图 11.2-5。

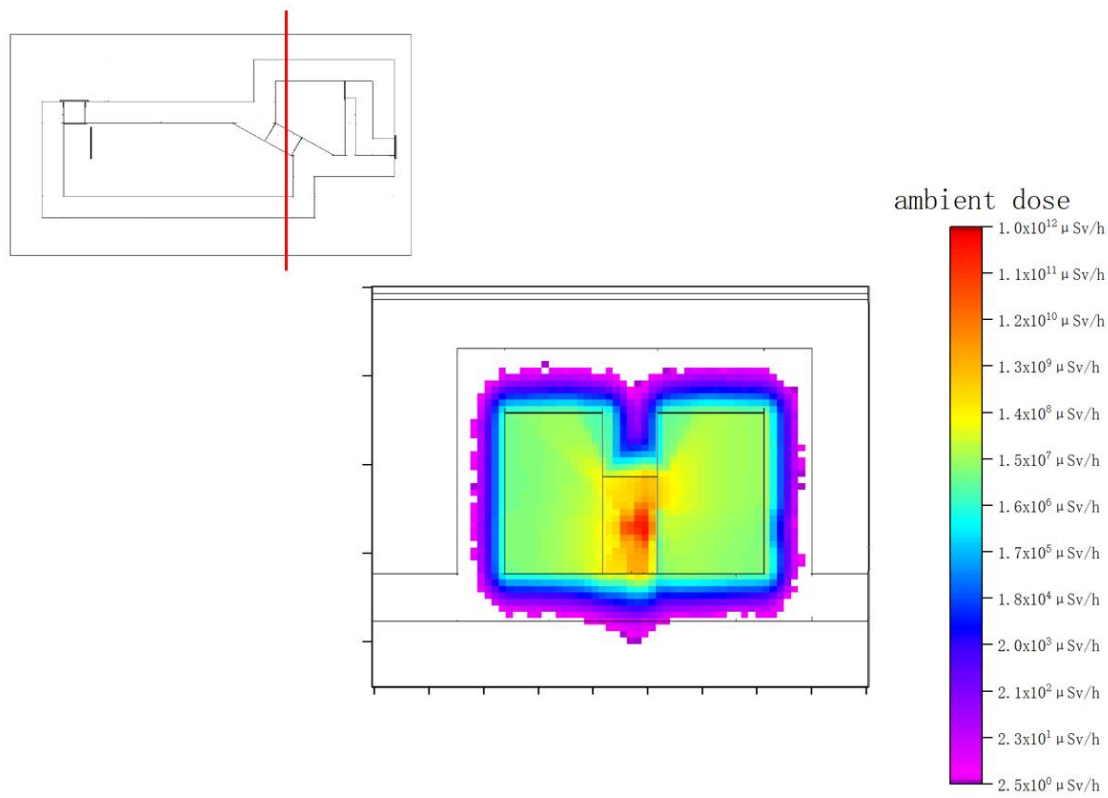


图 11.2-5 垂直方向剂量率水平分布图（南北方向）

续表 11 环境影响分析

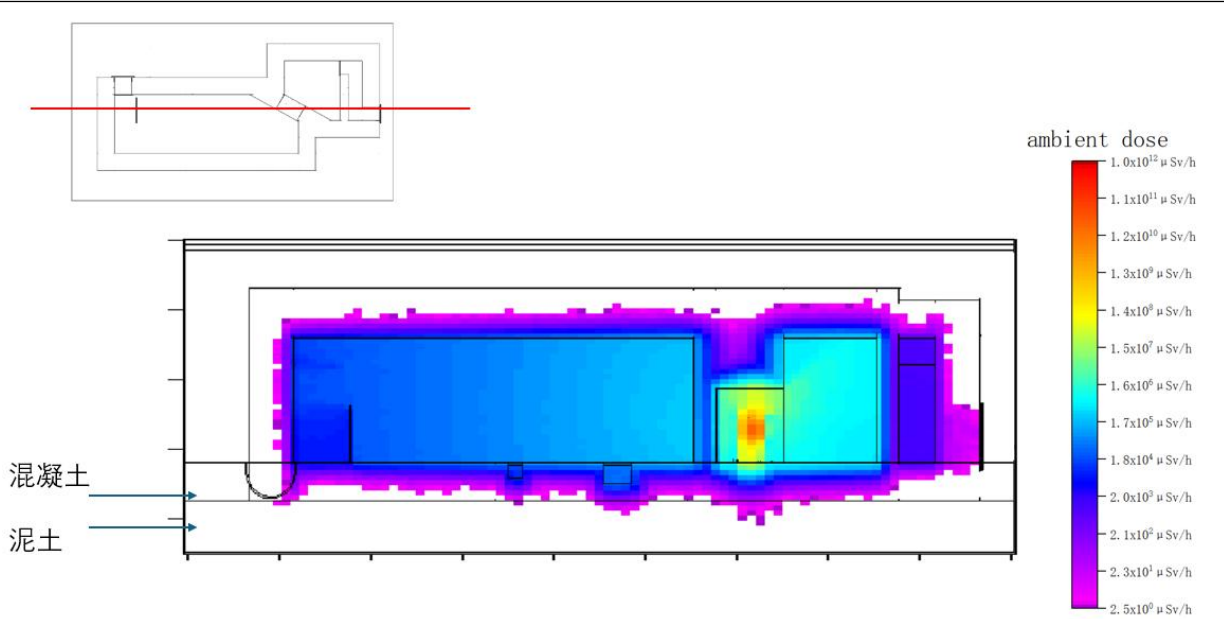


图 11.2-6 垂直方向剂量率水平分布图（东西方向）

根据预测图，获取 BNCT 调试实验机房屏蔽体外 30cm 处各功能房间内最大预测值见表 11.2-3，点位示意图见图 11.2-7。

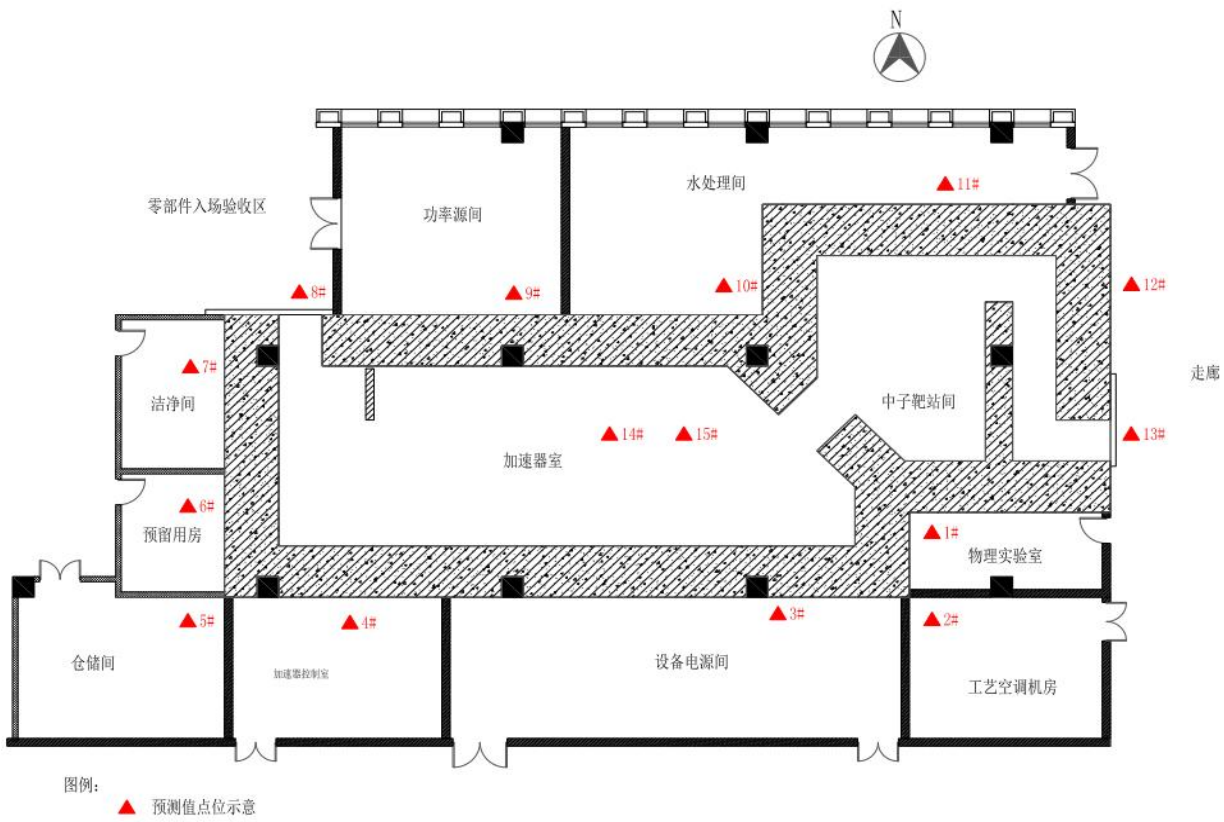


图 11.2-7 BNCT 调试实验机房屏蔽体外关注点示意图

续表 11 环境影响分析

表 11.2-3 BNCT 调试实验机房屏蔽体外 30cm 处关注点预测结果一览表		
序号	关注点位置	剂量率预测结果($\mu\text{Sv/h}$)
1#	物理实验室（中子靶站间南墙 30cm 外）	1.47
2#	工艺空调机房（加速器室东南墙外 30cm 处）	0.26
3#	设备电源间（加速器室南墙外 30cm 处）	1.46
4#	控制室（加速器室南墙外 30cm 处）	0.62
5#	仓储间（加速器室西南墙外 30cm 处）	$<2.0\times 10^{-4}$
6#	预留用房（加速器室西墙外 30cm 处）	$<2.0\times 10^{-4}$
7#	洁净间（加速器室西墙外 30cm 处）	0.09
8#	零部件入场验收区（加速器室防护门外 30cm 处）	1.71
9#	功率源间（加速器室北墙外 30cm 处）	1.16
10#	水处理间（加速器室北墙外 30cm 处）	1.15
11#	水处理间（中子靶站间北墙外 30cm 处）	1.24
12#	辐射工作人员走廊（中子靶站间迷路外墙外 30cm 处）	0.91
13#	辐射工作人员走廊（中子靶站间防护门外 30cm 处）	0.01
14#	BNCT 调试实验机房顶棚屏蔽体外 30cm 处	0.09
15#	BNCT 机房地板屏蔽体外（与土壤交界处）	23.1

根据模型预测可知，硼中子俘获治疗系统整机运行出束时，BNCT 调试实验机房地板屏蔽体与土壤交界处的剂量率约 $23.1\mu\text{Sv/h}$ ，其他屏蔽体外 30cm 处的剂量率不大于 $1.71\mu\text{Sv/h}$ 。因此，BNCT 调试实验机房屏蔽外的周围剂量率均低于建设单位制定的剂量率控制水平（ $2.5\mu\text{Sv/h}$ ）的要求。

11.2.1.2 物理实验室

物理实验室主要使用高纯锗谱仪对活化的金丝、活化箔的 γ 放射性强度进行检测。物理实验室紧邻 BNCT 调试实验机房布置，其西墙、北墙屏蔽厚度为 2000mm 混凝土，东墙、南墙为 300mm 加气混凝土，防护门为 2mmPb，顶棚为 100mm 混凝土。根据前文表 9 可知，活化的金丝、活化箔表面 5cm 处的剂量当量率不超过 $10\mu\text{Sv/h}$ ，则表面 1m 处剂量当量率约 $2.50\times 10^{-2}\mu\text{Sv/h}$ 。高纯锗谱仪布置在物理实验室西北角，距离物理实验室四周屏蔽体表面均超过 2.0m，距离楼板外表面约 8.0m，忽略屏蔽体作用，仅考虑距离衰减，其四周屏蔽体外 30cm 处（ $2.0\text{m}+0.3\text{m}=2.3\text{m}$ ）剂量当量率约 $4.73\times 10^{-3}\mu\text{Sv/h}$ ，楼板屏蔽体外 30cm 处（ $8.0\text{m}+0.3\text{m}=8.3\text{m}$ ）的剂量当量率约 $3.63\times 10^{-4}\mu\text{Sv/h}$ ，远小于建设单位确定的剂量当量率参考控制水平 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。因此，拟建项目实验研究对物理实验室屏蔽体外的辐射环境影响可忽略不计。

续表 11 环境影响分析

11.2.1.3 放射性废物衰变间

放射性废物衰变间主要用于废弃活化锂靶、活化的金丝、活化箔的暂存。放射性废物衰变间墙体屏蔽厚度为 300mm 混凝土，防护门为 2mmPb，顶棚为 100mm 混凝土。废弃活化锂靶、活化的金丝、活化箔均存放在铅容器或铅盒内，其表面周围剂量率均低于 2.5μSv/h。放射性废物衰变间屏蔽体外的辐射环境影响主要考虑活化锂靶，将活化锂靶的铅容器中心点简化为辐射源点，则距离辐射源点约 0.25m 处的剂量当量率均低于 2.5μSv/h，1m 处的剂量当量率约 $1.56\times10^{-1}\mu\text{Sv/h}$ 。铅容器放置在放射性废物衰变间内部，距离四周屏蔽体外表面不低于 0.5m，距离楼板外表面约 8.0m，忽略屏蔽体作用，仅考虑距离衰减，四周屏蔽体外 30cm 处（0.5m+0.25m+0.3m=1.05m）的周围剂量率约 $1.41\times10^{-1}\mu\text{Sv/h}$ ，楼板屏蔽体外 30cm 处（8.0m+0.3m=8.3m）的周围剂量率约 $2.26\times10^{-3}\mu\text{Sv/h}$ ，均小于建设单位确定剂量当量率参考控制水平 2.5μSv/h。

11.2.1.4 个人剂量估算

外照射人均年有效剂量当量按下列公式计算：

$$H_{Er} = H^*_{(10)} \times T \times t \times 10^{-3} \tag{11.2-1}$$

式中： H_{Er} ：X 或γ射线外照射人均年有效剂量，mSv；

$H^*_{(10)}$ ：X 或γ射线周围剂量当量率，μSv/h；

T ：居留因子；

t ：X 或γ射线照射时间，h。

（一）辐射工作人员剂量估算

拟建项目辐射工作人员负责硼中子俘获治疗系统的操作，实验研究、设备检修工作。辐射工作人员受照剂量主要来自硼中子俘获治疗系统的运行、放射性废物的暂存以及活化金丝、活化箔的γ放射性强度检测。根据拟建项目平面布置及辐射安全防治措施布置图可知，BNCT 调试实验区的出入口均设置了门禁，仅允许辐射工作人员刷卡进入。因此，该区域活动的人员均为辐射工作人员。特殊情况下，其他人员进入该区域必须由辐射工作人员领入，且避开硼中子俘获治疗系统运行出束的时间。

（1）BNCT 调试实验机房周围及内部活动的辐射工作人员受照剂量

①BNCT 调试实验机房周围活动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，机房内无辐射工作人员。在 BNCT 调试实验机

续表 11 环境影响分析

房整机调试运行出束时间不超过 30h/a，BNCT 调试实验机房周围活动的辐射工作人员受照剂量见表 11.2-4。

表 11.2-4 BNCT 调试实验机房周围活动辐射工作人员受照剂量估算表

序号	环境保护目标	方位	最小距离	关注点剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射时间 (h)	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)
1	走廊	东	0m	0.91	30	1/4	6.83×10^{-3}
	预留用房、放射性废物衰变间等		5m	0.44		1	1.32×10^{-2}
2	物理实验室	南	0m	1.47		1	4.41×10^{-2}
	工艺空调机房		0m	0.26		1/4	1.95×10^{-3}
	设备电源间		0m	1.46		1/4	1.10×10^{-2}
	控制室		0m	0.62		1	1.86×10^{-2}
3	仓储间	西南	0m	$<2.0 \times 10^{-4}$		1/4	1.50×10^{-6}
4	功率源间	北	0m	1.16		1/4	8.70×10^{-3}
5	水处理间		0m	1.24		1/4	9.38×10^{-3}

备注：关注点（预留用房、放射性废物衰变间等）的周围剂量当量率利用 BNCT 调试实验机房东侧关注点的最大周围剂量当量率进行距离衰变计算获取，BNCT 调试实验机房东侧关注点距离辐射源点约 10.7m。

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 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。辐射工作人员在用户单位（医疗机构）调试期间，硼中子俘获治疗系统整体调试出束的时间不超过 15h/a，受照剂量不超过 $3.75 \times 10^{-2}\text{mSv/a}$ ；运维人员在用户单位（医疗机构）调试硼中子俘获治疗系统的时间不超过 50h/a，受照剂量不超过 $1.25 \times 10^{-1}\text{mSv/a}$ 。

②BNCT 调试实验机房内部活动的辐射工作人员受照剂量

辐射工作人员在 BNCT 调试实验机房内进行硼中子俘获治疗系统调试、实验研究时的仪器设备、金丝、活化箔的摆放以及安装。根据前文可知，辐射工作人员在加速器室、中子靶站间进行设备仪器安装、摆放时，最大受照剂量为 $40.0\mu\text{Sv/h}$ ；在中子靶站间进行金丝、活化箔安装时，最大受照剂量为 $0.008\mu\text{Sv/h}$ 。辐射工作人员在 BNCT 调试实验机房内进行调试完成的硼中子俘获治疗系统的拆解、打包工作。根据前文分析可知，硼中子俘获治疗系统拆解、打包时近距离接触硼中子俘获治疗系统的活化部件约 30h，辐射工作人员的受照剂量考虑为活化部件表面最大剂量当量率 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。辐射工作人员在

续表 11 环境影响分析

BNCT 调试实验机房工作的受照剂量见下表。

表 11.2-5 辐射工作人员在 BNCT 调试实验机房内受照剂量估算表

序号	辐射工作人员工作内容	受照剂量率($\mu\text{Sv/h}$)	年工作时间(h/a)	受照剂量(mSv/a)
1	硼中子俘获治疗系统调试	40	60	2.40
2	硼中子俘获治疗系统实验研究	0.008	3	2.40×10^{-5}
3	硼中子俘获治疗系统拆卸、打包	2.5	30	7.50×10^{-2}
合计		/	/	2.48

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内进行拆包、安装，辐射工作人员近距离接触硼中子俘获治疗系统的活化部件约 90h，辐射工作人员的受照剂量考虑为活化部件表面最大剂量率 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，则辐射工作人员的受照剂量考虑为 $2.25 \times 10^{-1}\mu\text{Sv/h}$ 。因用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所的布局、屏蔽材料及厚度均无法确定，内部感生放射性强度无法估算。因此，辐射工作人员在用户单位（医疗机构）进行设备调试、大型维修过程中，在硼中子俘获治疗系统使用场所内部的受照剂量不进行估算。同理，运维人员在用户单位（医疗机构）进行硼中子俘获治疗系统日常维护过程中，在硼中子俘获治疗系统使用场所内部的受照剂量不进行估算。

反馈意见：硼中子俘获治疗系统在用户单位（医疗机构）进行硼中子俘获治疗系统调试、大型维修、日常维护期间，辐射工作人员、运维人员均严格按照工作制度要求，佩戴个人剂量计、携带个人剂量报警仪以及便携式中子剂量仪（含 γ 探头）进行硼中子俘获治疗系统使用场所内开展工作，建设单位严格管理辐射工作人员、运维人员的个人剂量，严禁超剂量工作。

（3）放射性废物衰变间周围活动的辐射工作人员受照剂量

放射性废物衰变间主要用于废弃活化锂靶以及活化的金丝、活化箔暂存，辐射工作人员仅在放射性废物进出时进入。因此，本评价主要考虑放射性废物衰变间屏蔽体外的辐射工作人员受照剂量。拟建放射性废物衰变间周围 50m 范围内的辐射工作人员均为拟建项目 BNCT 调试实验区的工作人员，全年工作 2000h。放射性废物衰变间周围活动的辐射工作人员受照剂量见表 11.2-6。

续表 11 环境影响分析

表 11.2-6 放射性废物衰变间周围活动辐射工作人员受照剂量估算表

序号	环境保护目标	方位	最小距离	关注点剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射时间 (h)	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)
1	走廊	西	0m	1.41×10^{-1}	2000	1/4	7.05×10^{-2}
	库房		0m	1.41×10^{-1}	2000	1/4	7.05×10^{-2}
	BNCT 调试实验机房、工艺空调机房、控制室、物理实验室等		8m	2.04×10^{-3}	2000	1	4.08×10^{-3}
2	预留用房	北	0m	1.41×10^{-1}	2000	1	2.82×10^{-1}
	消防气瓶间		4m	6.91×10^{-3}	2000	1/4	3.46×10^{-3}

(4) 物理实验室内活动的辐射工作人员受照剂量

根据前文分析可知，活化的金丝、活化箔的 γ 放射性强度的检测过程中对物理实验室屏蔽体外的辐射环境影响可忽略不计，故不考虑活化的金丝、活化箔的 γ 放射性强度的检测对物理实验室外活动的辐射工作人员的影响。

物理实验室主要使用高纯锗谱仪对活化的金丝、活化箔的 γ 放射性强度进行检测，全年操作活化的金丝、活化箔的工作时间不超过 15h/a。活化的金丝、活化箔表面 5cm 处的周围剂量率均为 $10\mu\text{Sv/h}$ ，距离 30cm 的辐射工作人员操作位处的周围剂量率约 $2.78 \times 10^{-1}\mu\text{Sv/h}$ ，受照剂量约 $4.17 \times 10^{-3}\text{mSv/a}$ 。

(5) 辐射工作人员受照剂量汇总

BNCT 调试实验区的功率源间、水处理间、辐射工作人员走廊、消防气瓶间、工艺空调机房、设备电源间、库房等属于偶尔停留的区域，且不属于辐射工作人员的工作场所。辐射工作人员不可能同时在不同的功能房间，故本评价考虑辐射工作人员在控制室、物理实验室、预留用房工作，并均考虑为全居留。

辐射工作人员受照剂量见表 11.2-7。

续表 11 环境影响分析

表 11.2-7 辐射工作人员受照剂量估算表						
序号	辐射工作人员 工作内容	受照剂量（mSv/a）				
		硼中子俘获治疗系统		放射性废 物暂存	活化金丝、 活化箔放射 性测量	年有效 剂量
		整机出束	感生放射性			
辐射工作人员（安装、调试、实验研究、大型维修）						
1	硼中子俘获治疗系统调试、 实验研究 （BNCT 调试实验机房）	1.86×10^{-2}	2.4	4.08×10^{-3}	/	2.69
2	硼中子俘获治疗系统调试 （用户单位（医疗单位））	3.75×10^{-2}	/	/	/	
3	硼中子俘获治疗系统 拆卸、打包 （BNCT 调试实验机房）	/	7.50×10^{-2}	/	/	
4	硼中子俘获治疗系统 拆包、安装 （用户单位（医疗单位））	/	2.25×10^{-1}	/	/	
5	操作活化的金丝、活化箔 （物理实验室）	4.41×10^{-2}	/	4.08×10^{-3}	4.17×10^{-3}	5.24×10^{-1}
6	预留用房	1.32×10^{-2}	2.82×10^{-1}	/	/	2.95×10^{-1}
运维人员（设备日常维护）						
7	硼中子俘获治疗系统检修 （运维人员）	1.25×10^{-1}	/	/	/	1.25×10^{-1}

辐射工作人员不可能在不同场所同时停留，故根据上表可知，辐射工作人员最大受照剂量约 2.69mSv/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 5172-1985）以及建设单位制定的年有效剂量管理目标 5mSv/a。

（二）公众成员

拟建项目 BNCT 调试实验机房、物理实验室、放射性废物衰变间周围 50m 范围内主要为拟建项目用房、专精特新产业园的标准厂房、奥方汽车零部件公司、重庆市璧山区高新技术产业开发区的标准厂房以及绿化、道路等。专精特新产业园的 10 号、11 号、12 号标准厂房均尚未招租，本评价均按照最不利情况考虑，居留因子均保守取 1。拟建项目楼上为重庆坤元堂医药有限公司，目前正在装修，本评价按照最不利情况考虑，居留因子均保守取 1。

续表 11 环境影响分析

(1) BNCT 调试实验机房周围活动的公众成员受照剂量

BNCT 调试机房屏蔽体外公众成员年有效剂量估算结果见表 11.2-8。

表 11.2-8 BNCT 调试机房屏蔽体外公众成员年有效剂量估算结果汇总表

序号	环境保护目标		方位	最小距离	关注点剂量率 (μSv/h)	受照射时间 (h)	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)
1	专精特新产业园内部绿化、道路		东	13m	1.90×10 ⁻¹	30	1/16	3.57×10 ⁻⁴
	专精特新产业园 12 栋			23m	9.34×10 ⁻²		1	2.80×10 ⁻³
2	走廊		南	6m	4.87×10 ⁻¹		1/4	2.92×10 ⁻³
	办公室、卫生间等			8m	3.70×10 ⁻¹		1	1.11×10 ⁻²
3	专精特新产业园内部绿化、道路			20m	1.17×10 ⁻¹		1/16	2.20×10 ⁻⁴
4	专精特新产业园 10 栋、11 栋			28m	7.05×10 ⁻²		1	2.11×10 ⁻³
5	预留用房、洁净间		西	0m	9.00×10 ⁻²	1	2.70×10 ⁻³	
	装配件区、零部件入场验收区、会议室、资料档案室、监控室、办公室等			4m	6.64×10 ⁻²	1	1.99×10 ⁻³	
6	零部件入场验收区	防护门外	西北	0m	2.70×10 ⁻¹	300	1/16	5.06×10 ⁻⁴
		其他区域		0m	2.00×10 ⁻⁴		1	6.00×10 ⁻⁶
7	专精特新产业园绿化、道路等		北	3m	6.68×10 ⁻¹		1/16	1.25×10 ⁻³
8	璧山区高新技术产业开发区的标准厂房			15m	9.39×10 ⁻²		1	2.82×10 ⁻³
9	重庆坤元堂医药有限公司（专精特新产业园 13 号标准厂房 2F）		楼上	+1m	2.00×10 ⁻⁴		1	6.00×10 ⁻⁶

备注：BNCT 调试机房屏蔽体外环境保护目标的最大剂量率利用距离衰减计算获取。BNCT 调试实验机房东侧屏蔽墙外 30cm 处的关注点距离辐射源点约 10.7m；南侧屏蔽墙外 30cm 处的关注点距离辐射源点约 7.8m；北侧屏蔽墙外 30cm 处的关注点距离辐射源点约 22.5m；北侧屏蔽墙外 30cm 处的关注点距离辐射源点约 4.5m。

(2) 放射性废物衰变间周围活动的公众成员受照剂量

放射性废物衰变间屏蔽体外公众成员年有效剂量估算结果见表 11.2-9。

表 11.2-9 放射性废物衰变间屏蔽体外公众成员年有效剂量估算结果汇总表

序号	环境保护目标	方位	最小距离	关注点剂量率 (μSv/h)	受照射时间 (h)	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)
1	专精特新产业园内部绿化、道路	东	0m	1.41×10 ⁻¹	2000	1/16	1.76×10 ⁻²
	专精特新产业园 12 栋		16m	5.57×10 ⁻⁴	2000	1	1.11×10 ⁻³
2	卫生间	南	0m	1.41×10 ⁻¹	2000	1/16	1.76×10 ⁻²
	预留用房、办公室等	南	8m	2.04×10 ⁻³	2000	1	4.08×10 ⁻³

续表 11 环境影响分析

序号	环境保护目标	方位	最小距离	关注点剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	受照射时间 (h)	居留因子	年有效剂量 (mSv/a)
3	专精特新产业园内部绿化、道路	南	18m	4.44×10^{-4}	2000	1/16	5.56×10^{-5}
4	专精特新产业园 10 号、11 号标准厂房		26m	2.18×10^{-4}	2000	1	4.37×10^{-4}
5	预留用房、洁净间等	西	41m	8.98×10^{-5}	2000	1	1.79×10^{-4}
6	楼梯间	北	10m	1.35×10^{-3}	2000	1/16	1.69×10^{-4}
7	专精特新产业园内部绿化、道路		14m	7.18×10^{-4}	2000	1/16	8.98×10^{-5}
8	璧山区高新技术产业开发区的标准厂房		26m	2.18×10^{-4}	2000	1	4.37×10^{-4}
9	重庆坤元堂医药有限公司（专精特新产业园 13 号标准厂房 2F）	楼上	0m	2.44×10^{-3}	2000	1	4.88×10^{-3}

(3) 物理实验室外活动的公众成员受照剂量

根据前文分析可知，活化的金丝、活化箔的 γ 放射性强度的检测过程中对物理实验室屏蔽体外的辐射环境影响可忽略不计，故不考虑活化的金丝、活化箔的 γ 放射性强度检测对物理实验室外活动的公众成员的影响。

(4) 公众成员受照剂量汇总

根据前文表 11.2-7 和表 11.2-8 可知，BNCT 调试实验机房周围活动的公众成员受照剂量最大约 $1.10 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ ；忽略放射性废物衰变间墙体、楼板、防护门屏蔽效果的前提下，周围活动的公众成员最大受照剂量约 $1.76 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ 。因此，拟建项目公众成员受照剂量不超过 $2.86 \times 10^{-2} \text{mSv/a}$ ，仍小于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》

（GB18871-20020.176）《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-1985）和建设单位制定的年有效剂量管理目标 0.1mSv/a 。此外，拟建项目的环境保护目标若考虑其他屏蔽体的屏蔽效果，公众成员受照剂量将更小。

11.2.1.5 放射性“三废”环境影响分析

(一) 放射性废水影响分析

硼中子俘获治疗系统运行产生的活化冷却水中的主要放射性核素为 ^3H 、 ^{19}O ，本评价重点关注放射性同位素 ^3H 。根据前文表 9 可知，拟建项目单次排放的活化冷却水中活化核素 ^3H 的活度不大于 $7.57 \times 10^3 \text{Bq}$ ，活化核素 ^3H 的活度浓度不大于 $7.57 \times 10^{-3} \text{Bq/g}$ ，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（ 1.0×10^9

续表 11 环境影响分析

Bq)、豁免活度浓度 ($1 \times 10^6 \text{Bq/g}$)。拟建项目活化冷却废水每月最多排放 1 次, 每次排放量不超过 1000L, 则单次排放量、月排放量均低于 $7.57 \times 10^3 \text{Bq}$ (放射性同位素 ^3H), 小于 $1\text{ALI}_{\min}$ ($1.11 \times 10^9 \text{Bq}$)、 $10\text{ALI}_{\min}$ ($1.11 \times 10^{10} \text{Bq}$)。因此, 拟建项目产生的活化冷却废水在冷却水收集池内暂存 30 天后, 取样检测, 放射性同位素 ^3H 活度浓度小于 $1\text{ALI}_{\min}$ 后再排入专精特新产业园生化池可行, 每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。综上所述, 拟建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。

(二) 放射性废气影响分析

硼中子俘获治疗系统运行产生的中子与 BNCT 调试实验机房内空气中的物质发生核反应产生 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{16}N 、 ^{19}O 、 ^{41}Ar 等放射性同位素, 本评价重点关注放射性同位素 ^{41}Ar 。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 1h, 在 BNCT 调试实验机房内产生的放射性同位素 ^{41}Ar 活度不大于 $7.43 \times 10^7 \text{Bq}$, 放射性同位素 ^{41}Ar 活度浓度最大约 7.67Bq/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)。因此, 拟建项目产生的活化废气直接引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶排放可行。

拟建项目放射性废气排口周围 50m 范围内的建筑主要包括专精特新产业园 10 号、11 号、12 号标准厂房以及重庆市璧山区高新技术产业开发区的标准厂房。拟建项目放射性废气排口高度约 17m, 仅低于东侧约 16m 处的专精特新产业园 12 号标准厂房 (18m)。拟建项目所在区域主导风向为东北风, 专精特新产业园 12 号标准厂房不在放射性废气排口的下风方向, 故拟建项目排放的放射性废气对周围环境影响不大。

拟建项目硼中子俘获治疗系统停机运行后持续通风, 直至 BNCT 调试实验机房室内辐射剂量低于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 后方可进入, 以减少放射性废气对辐射工作人员的影响。

综上所述, 拟建项目硼中子俘获治疗系统运行产生的放射性废气对周围环境影响不大, 在可接受范围内。

(三) 放射性固废影响分析

根据前文表 9 可知, 拟建项目产生的破损活化锂靶、活化的金丝、活化箔均存放在铅容器内, 其外表面辐射剂量均小于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。铅容器放置在放射性废物衰变间内, 放

续表 11 环境影响分析

放射性废物衰变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。废弃活化锂靶以及活化的金丝、活化箔在放射性废物衰变间内暂存衰变，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。

拟建项目放射性固废应严格采取以下治理措施：

（1）严格区分放射性废物与非放射性废物，不可混同处理，应力求控制和减少放射性废物产生量。

（2）供收集的专用铅容器应具有外防护层和电离辐射警告标志。

综上所述，拟建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。

11.2.1.6 非放射性“三废”环境影响分析

（一）非放射性废水的环境影响

根据前文表 9 可知，拟建项目产生的非放射性废水主要有生活污水、清洁废水。生活污水、清洁废水的污染物成分简单，直接排入专精特新产业园现有生化池处理可行。

拟建项目产生的非放射性废水进入生化池处理满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）三级标准后再经市政污水管网排入璧山高新区生活污水处理厂处理满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中的Ⅳ类水体标准后排入璧南河。因此，拟建项目产生的非放射性废水对地表水环境影响不大。

（二）非放射性废气的环境影响

根据前文表 9 可知，拟建项目产生的非放射性废气主要包括非放射性调试实验废气、焊接废气、金属粉尘。

（1）非放射性调试实验废气

根据前文表 9 可知，拟建项目产生的调试实验废气的主要污染物为臭氧、氮氧化物。BNCT 调试实验机房内的臭氧浓度最大为 $5.86 \times 10^{-5} \text{mg/m}^3$ ，低于《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》（GBZ2.1-2019）中臭氧最高容许浓度（MAC）接触限值 0.3mg/m^3 ，也低于《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准中规定的臭氧 1 小时平均限值 $200 \mu\text{g/m}^3$ 。BNCT 调试实验机房内的氮氧化物浓度最大为 $3.26 \times 10^{-5} \text{mg/m}^3$ ，低于《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》

续表 11 环境影响分析

（GBZ2.1-2019）中氮氧化物（一氧化氮和二氧化氮）的时间加权平均容许浓度（PC-TWA）接触限值 5mg/m³；二氧化氮浓度最大为 2.93×10⁻⁵mg/m³，低于《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准中规定的二氧化氮 1 小时平均限值 200μg/m³。 拟建项目产生调试实验废气的污染物浓度低，经 BNCT 调试机房独立的排风系统收集后直接引至专精特新产业园 13 号标准厂房 2F 楼顶排放，排放后废气经大气扩散和分解后，污染物浓度将进一步降低。 （2）焊接废气、金属粉尘 根据前文表 9 可知，拟建项目产生焊接废气、金属粉尘量很小，经工业吸尘器处理后无组织排放至室外。工业吸尘器处理的金属粉尘（金属屑）作为一般固废处理。 综上所述，拟建项目产生的非放射性废气均得到合理处置，对周围大气环境影响小。 （三）非放射性固废的环境影响 根据前文表 9 可知，拟建项目产生的非放射性固废主要有生活垃圾、包装废物、废金属屑、废过滤材料。生活垃圾收集后转移至专精特新产业园的生活垃圾收集点，而后交环卫部门处理。包装废物、废金属屑收集暂存在零部件入场验收区的废物区，定期外卖。废过滤材料由厂家回收，不暂存。拟建项目产生的非放射性固废均得到合理处置，对周围环境影响小。 11.2.1.7 噪声环境影响分析 根据前文表 9 可知，拟建项目的设备噪声源强均不超过 65dB（A），通过采取合理布置、基础减振等措施后，对周围声环境影响不大，厂界噪声能满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）中 3 类排放标准（昼间≤65dB（A）、夜间≤55dB（A））的要求。 11.3 实践正当性分析 硼中子俘获疗法是近年来国际肿瘤治疗领域新兴快速发展的精准诊疗技术，具有细胞级别上的精准靶向性，对于复发性、浸润性、局部转移肿瘤具有突出临床优势，其治疗过程中，中子与预先富集在癌细胞内的目标物质（含硼药物）发生核反应，有选择地只杀死癌细胞，而对肿瘤周围的健康组织损伤较小，这一特性使得BNCT成为癌症治疗的革命性手段。在“健康中国”的国家战略背景下，大力发展BNCT这种快速有效且在医院可普及、大众可负担的全新抗癌技术是应对复发头颈癌、恶性脑瘤、黑色素瘤、骨

续表 11 环境影响分析

肉瘤、乳腺癌、肝癌等浸润难治型癌症患者数量日渐增多的重要解决手段之一，也是落实高端诊疗设备国产化要求的重要抓手。

中核鲲硼医疗科技(重庆)有限公司拟实施“基于强流直线加速器的BNCT装备研发及临床研究”项目，具有明显的社会效益。随着建设单位BNCT装备研发及临床研究的顺利开展，必将创造较大的经济效益，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的原则与要求。

11.4 产业政策符合性分析

拟建项目主要是生产、使用、销售硼中子俘获治疗系统，属于《产业结构调整指导目录（2024年本）》中“鼓励类”第六项“核能”中第4条“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”，“鼓励类”第十三项“医药”中第4条“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。

11.5 辐射事故影响分析

11.5.1 辐射事故可能引起的电离辐射生物效应

电离辐射作用于机体后，其能量传递给机体的分子、细胞、组织和器官等基本生命物质后，引起一系列复杂的物理、化学和生物学变化，由此所造成生物体组织细胞和生命各系统功能、调节及代谢的改变，产生各种生物学效应。电离辐射引起生物效应的作用是一种非常复杂的过程，大多数学者认为放射损伤发生是按一定的阶梯进行的。生物基质的电离和激发引起生物分子结构和性质的变化，由分子水平的损伤进一步造成细胞水平、器官水平的损伤，继而出现相应的生化代谢紊乱，并由此产生一系列临床症状。电离辐射生物效应按照剂量与效应的关系进行分类，分为随机性效应和确定性效应（组织反应）。

随机性效应是指电离辐射照射生物机体所产生效应的发生概率（而非其严重程度）与受照射的剂量大小成正比，而其严重程度与受照射剂量无关；随机性效应的发生不存在组织反应阈剂量。辐射致癌效应和遗传效应属于随机性效应。受照射个体细胞受损伤

续表 11 环境影响分析

引发突变的结果，最终可导致受照射人员的癌症，即辐射致癌效应；受照射个体生殖细胞遗传物质的损伤，引起基因突变或染色体畸变可以传递下去并表现为受照者后代的遗传紊乱，导致后代先天畸形、流产、死胎和某些遗传性疾病，即遗传效应。

组织反应定义为通常情况下存在组织反应阈值的一种辐射效应，受照剂量超过一定的阈值时才会发生，其效应的严重程度随超过阈值的剂量越高而越严重。组织反应是辐射照射导致器官或组织的细胞死亡，细胞延缓分裂的各种不同过程的结果，指除了癌症、遗传和突变以外的所有躯体效应和胚胎效应及不育症等，包括血液、性腺、胚胎、眼晶体、皮肤的辐射效应及急性放射病，如放射性皮肤损伤、生育障碍。

拟建项目产生的随机性效应是关注的重点，因其无法防护，所以尽量降低人员的受照剂量，减少随机性效应产生的概率。

成人不同照射剂量的损伤估计情况见表11.5-1。

表 11.5-1 不同照射剂量对人体损伤的估计表

剂量 (Gy)	类型		初期症状和损伤程度
<0.25	/		不明显和不易察觉的病变
0.25~0.5			可恢复的机能变化，可能有血液学的变化
0.5~1			机能变化，血液学的变化，但不伴有临床症状
1.0~2.0	骨髓型 急性 放射病	轻度	乏力，不适，食欲减退
2.0~4.0		中度	头昏，乏力，食欲减退，恶心，1h~2h 后呕吐，白细胞短暂上升后下降
4.0~6.0		重度	1h 后多次呕吐，可有腹泻，腮腺肿大，白细胞数明显下降
6.0~10.0		极重度	1h 内多次呕吐和腹泻、休克、腮腺肿大，白细胞数急剧下降
10~50	肠型急性放射病		频繁呕吐，腹泻严重，腹疼，血红蛋白升高
>50	脑型急性放射病		频繁呕吐，腹泻，休克，共济失调，肌张力增高，震颤，抽搐，昏睡，定向和判断力减退。病情发展快，病程短，多在 1-3 天内发生昏迷，休克死亡。

备注：来自《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ 104-2017）和《辐射防护导论》P33。

11.5.2 事故分级

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，辐射事故从重到轻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 11.5-2。

表 11.5-2 辐射事故等级分级一览表

事故等级	危害后果
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。

续表 11 环境影响分析

事故等级	危害后果
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

11.5.3 辐射潜在风险事故类型

拟建项目正常营运情况下对于公众和周围环境是安全的。但如果操作管理不善或发生异常情况时，可能对公众和环境造成辐射危害，可能出现的情况有：

①设备异常开机，导致辐射工作人员意外受照

辐射工作人员在BNCT调试实验机房工作时，硼中子俘获治疗系统的控制系统失控，异常开机出束，导致辐射工作人员意外受照。

②人员滞留调试机房内，导致公众成员外受照

硼中子俘获治疗系统调试前，未按照要求进行搜索清场，仍有人滞留在机房内某个不易察觉的地方，且控制室辐射工作人员未发现。硼中子俘获治疗系统整机出束，致机房内人员受到误照射。

③联锁失效，导致人员意外受照

硼中子俘获治疗系统运行出束，联锁失效，防护门外开启导致防护门外的人员意外受照。

11.5.4 后果分析

（1）①、②事故类型

①、②种事故类型均为人员位于机房内受照射。根据前文剂量率分布图可知，2.7MeV 质子轰击锂靶的辐射场以中子和 γ 射线为主，在束流强度为30mA时，锂靶周围1m处最大剂量率约为 $2.11 \times 10^6 \mu\text{Sv/h}$ 。

本评价考虑滞留在BNCT调试实验机房内的人员距离硼中子俘获治疗系统锂靶约2m处，人员发现硼中子俘获治疗系统运行出束或控制室人员发现有人滞留，立即触发急停装置，硼中子俘获治疗系统停止出束，反应及操作时间考虑为2min，则人员在BNCT调试实验机房内的受照剂量约为17.58mSv。若滞留在BNCT调试实验机房的人员以及控制室的辐射工作人员均未发现，直至硼中子俘获治疗系统运行1h停机，则人员在BNCT

续表 11 环境影响分析

调试实验机房内的受照剂量约为527.50mSv。

根据前文表11.5-1，人员滞留在BNCT调试实验机房受照剂量17.58mSv~527.50mSv，可能引起人体机能变化，血液学的变化，但不伴有临床症状。根据前文表11.5-2，人员滞留在BNCT调试实验机房受照剂量均超过公众成员、辐射工作人员的年有效剂量限值（公众成员：1.0mSv/a；辐射工作人员：20mSv/a），属于一般辐射事故。

（2）③事故类型

③种事故类型为人员位于BNCT调试实验机房外受照射，考虑人员停留在防护门入口处。根据前文剂量率分布图可知，2.7MeV质子轰击锂靶的辐射场以中子和 γ 射线为主，在束流强度为30mA时，外防护门内口处最大剂量率约为 $3.0 \times 10^3 \mu\text{Sv/h}$ 。

硼中子俘获治疗系统出束过程中防护门开启，防护门外辐射剂量监测结果超过 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 进行警告，控制室工作人员触发急停装置，反应及操作时间考虑为2min，则人员在BNCT调试实验机房的防护门外受照剂量约0.1mSv。若防护门外的辐射剂量监测探头损坏，控制室的辐射工作人员均未发现，直至硼中子俘获治疗系统运行1h停机，则人员在BNCT调试实验机房防护门外人员受照剂量约为3.0mSv。

BNCT调试实验机房防护门外的人员受照剂量0.1~3.0mSv。根据前文表11.5-1，BNCT调试实验机房防护门外的人员受照剂量超过公众成员的年有效剂量限值（公众成员：1.0mSv/a），属于一般辐射事故。

（5）辐射事故防范措施

①人员进入BNCT调试实验机房作业后，按照既定程序进行清场。未进行清场操作，硼中子俘获治疗系统无法开机。

②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。

③出入BNCT调试实验机房或用户单位（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。

④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。

⑤辐射工作人员做好硼中子俘获治疗系统的稳定性和状态检测，使硼中子俘获治疗

续表 11 环境影响分析

系统始终保持在最佳状态下工作。

⑥辐射工作人员定期检查硼中子俘获治疗系统的靶装置运行情况，确保其正常运行。制定检修操作程序，加强安全文化教育，严格遵守操作程序，防止误操作造成硼中子俘获治疗系统的靶体脱落。

⑦辐射工作人员在每次换靶前，都需确认硼中子俘获治疗系统靶装置的有效性。

⑧辐射工作人员佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪后进入BNCT调试实验机房或用户单位（医疗机构）的硼中子俘获治疗系统使用场所，利用个人剂量报警仪具备的实时显示剂量率和累积剂量功能，以防工作人员受照剂量超过控制目标值。

⑨硼中子俘获治疗系统换靶前展开离线演练，使所有参与维护维修的人员熟悉操作过程、了解辐射水平，以缩短维修维护时间，减少维护维修过程中的意外情况。

建设单位落实上述措施后，能有效减少和杜绝辐射事故的发生，减少对周围环境和公众的影响。

11.7 环保投资估算

拟建项目环保投资约1000万元，具体情况见表11.7-1。

表 11.7-1 拟建项目环保投资一览表

类别	辐射安全与防护设施名称	投资（万元）
噪声防治措施	风机、中央空调外机等设备减振、隔声等措施	5
辐射安全防护措施	屏蔽墙体、防护门、安全联锁装置（门机联锁、急停按钮、巡检系统等）、监控系统、状态指示灯、声光报警等	890
监测仪器	个人剂量计、个人剂量报警仪、固定式剂量报警仪、便携式中子剂量仪（含 γ 探头）等	30
通风系统	BNCT 调试实验机房通风	20
放射性废水处理	放射性废水衰变处理设施	5
放射性固废处理	铅容器	5
监测费、环评咨询费、验收咨询费、办证咨询费等		45
合计		1000

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及辐射工作人员

(1) 辐射安全与环境保护管理机构

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条要求：使用I类、II类、III类放射源，使用I类、II类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作；其他辐射工作单位应当有 1 名具有大专以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作。

中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司为新成立单位，尚未配置辐射防护与安全管理人员。拟按照上述要求成立辐射安全与环境保护管理领导小组，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。

(2) 辐射工作人员配置

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条的规定：从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》第二十二条规定：取得辐射安全培训合格证书的人员，应当每五年接受一次再培训。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》（公告 2019 年第 57 号），辐射安全与防护培训需求的人员可通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台（以下简称培训平台，网址：<http://fushe.mee.gov.cn>）免费学习相关知识。

拟建项目拟配置 8 名辐射工作人员，后续根据硼中子俘获治疗系统的销售情况，另行配置相应的运维人员（辐射工作人员）。辐射工作人员拟按照上述要求进行辐射防护与安全培训，考核合格后方可上岗，并在到期前及时参加再培训。此外，辐射工作人员的配置满足拟建项目所开展的核技术利用活动。

续表 12 辐射安全管理

12.2 辐射安全管理规章制度

(1) 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》第十六条规定：使用放射性同位素、射线装置的单位申请领取许可证，应当具备下列条件：（六）有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。

建设单位承诺在项目建成运营前，拟按照相关规定制定相应的管理制度，包括：调试操作规程、调试人员岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、设备销售管理与台账制度、出入库管理制度、射线装置使用登记制度、人员培训计划、职业健康及个人剂量管理制度、安全检查制度、监测方案、年度评估等管理制度和辐射事故应急预案，并制定《开关机流程及紧急情况处理》《安全联锁系统操作规程》《调试期间场地安全管理规定》等规定。

(2) 个人剂量管理

建设单位拟为辐射工作人员建立个人剂量档案，个人剂量档案包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。发现个人剂量监测结果异常的，立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。辐射工作人员个人剂量档案终生保存。

另外，辐射工作人员在岗期间，必须正确佩戴个人剂量计，并对个人剂量计严格管理，不允许将个人剂量片相互传借，不允许将个人剂量片带出建设单位或用户单位（医疗机构）。

(3) 职业健康体检

辐射工作人员上岗前，建设单位拟按规定进行岗前职业健康检查，符合辐射工作人员健康标准的方可参加相应的辐射工作。从事辐射工作期间，建设单位拟制定管理制度组织辐射工作人员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。对不适宜继续从事辐射工作的，拟按照规定脱离辐射工作岗位，并进行离岗前的职业健康检查。

(4) 年度评估

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》第十二条规定：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当对本单位的放射性同位素与射线装置的安全

续表 12 辐射安全管理

和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度的评估报告。

建设单位拟在制度上规定年度评估要求，在项目运行后，拟严格落实制度要求开展年度评估工作，发现问题或隐患及时整改，并按时提交年度评估报告。

（5）射线装置销售台账管理

建设单位拟建立设备销售台账，并制定《射线装置销售台账管理制度》《射线装置台账管理制度》等，保障企业有序开展射线装置的生产、销售、使用工作。

（6）档案管理

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》第二十三条规定：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案。个人剂量档案应当包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。

建设单位拟安排专人负责个人剂量监测管理，建立放射工作人员个人剂量档案，将辐射工作人员的健康体检报告、个人剂量监测报告、辐射安全培训考核合格证等建立档案保存。档案信息和保存等按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》规定执行。

（7）核安全文化建设

核安全文化是以“安全第一”为根本方针，以维护公众健康和环境安全为最终目标；保障核安全是培育核安全文化的根本目的，而培育核安全文化是减少人因失误的有力措施，是核安全“纵深防御”体系中的重要屏障。

核安全文化是核安全的基础，是从事核技术利用活动单位及其全体工作人员的责任。对于核技术利用项目核安全文化建设要求建设单位树立并弘扬核安全文化，核安全文化表现在从事核技术利用活动单位的相关领导与员工及最高管理者应具备核安全文化素养及基本的放射防护与安全知识，增强并保持核安全意识。

建设单位拟建立辐射环境安全管理体系，设立核安全保障机构，明确单位各层级人员的职责，将良好的核安全文化融汇于运营和管理的各个环节；持续开展核安全文化建设，让其发挥的作用更加有效，做到凡事有章可循，凡事有据可查，凡事有人负责，凡事有人检查。在日常工作中将核安全文化建设贯彻于核技术利用活动中，不断识别单位内部核安全文化的弱项和问题并积极纠正与改进；落实两个“零容忍”，即对隐瞒虚报

续表 12 辐射安全管理

“零容忍”，对违规操作“零容忍”。让核安全文化落实到每个从事核技术利用活动人员的工作过程中，确保核技术利用项目的辐射安全。

具体操作参考如下：

①组织核安全文化培训，制定出符合自身发展规划的核安全文化；

②建立有关的部门管理，通过专项的管理能够让核安全文化一步步落实到员工的工作过程中，并让核安全文化建设更加有效。

12.3 从事辐射活动能力评价

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，企业从事辐射活动能力评价见下表 12.3-1。

表 12.3-1 从事辐射活动能力评价

应具备条件	落实情况
使用II类射线装置的工作单位，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有1名具有本科以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作	拟设立专门的辐射安全与环境保护管理领导小组
从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核	拟制定相关制度，要求辐射工作人员在通过辐射防护与安全考核后，方可上岗
射线装置使用场所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施	拟设置门禁系统、门机联锁、紧急停止开关、安全巡视程序、钥匙开关、声光报警、电离辐射警告标志、监视系统、剂量监测系统等设备及措施
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、射线装置使用登记制度、人员培训计划、监测方案等	尚未建立规章制度。待本项目建成运营前，将按照相关规定和要求完成，并将相应制度张贴上墙
配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量计	拟在 BNCT 调试实验机房内外安装固定式剂量监测系统，并配置便携式中子辐射巡测仪，辐射工作人员配置个人剂量计、个人剂量警报仪。
有完善的辐射事故应急措施	尚未建立，待项目建成运营前，将按照相关规定和要求制定辐射事故应急预案及风险防范措施

从上表可知，建设单位拟按照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》成立辐射安全与防护管理机构，建立相应规章制度和应急预案。待建设单位全部落实上述各项要求后，方能具备从事本项目辐射活动的能力，并取得辐射安全许可证后方可投入正式运行。

续表 12 辐射安全管理

12.4 监测计划

12.4.1 辐射监测

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关法规和标准，必须对辐射工作人员个人剂量进行监测、硼中子俘获治疗系统工作场所外的环境监测，开展常规的防护监测工作。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）以及行政管理要求，建设单位拟制定完善的监测方案，其监测内容包括：个人剂量监测、工作场所监测、竣工环境保护验收监测。

（1）个人剂量监测

按照《放射工作人员职业健康管理办法》和《职业性外照射个人监测规范》的相关要求，建设单位委托有资质的单位定期对所有辐射工作人员进行个人剂量监测（常规监测周期一般为 1 个月，最长不得超过 3 个月），并安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，并对职业照射个人监测档案终生保存。辐射工作人员（含运维人员）有权查阅和复制本人的个人剂量档案。

建设单位拟对辐射工作人员（含运维人员）进行个人剂量监测（含中子剂量、光子剂量），若辐射工作人员（含运维人员）季度个人剂量监测数据超过 1.25mSv，要开展调查，查明原因，撰写调查报告并由当事人在情况调查报告上签字确认。对于全年累计监测数值超过 5mSv 的辐射工作人员，要查明原因，采取暂停开展放射性工作等进一步干预手段，并撰写调查报告，经本人签字确认后，上报辐射安全许可证发证机关。此外，建设单位在每年上报的辐射安全和防护状况自查评估报告中应包含辐射工作人员（含运维人员）剂量监测数据及安全评估的内容。

（2）工作场所及周围环境辐射监测

建设单位根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）以及硼中子俘获治疗系统的特点，拟制定以下监测方案：

①企业自检

A.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 7 个辐射剂量监测探头，可同时监测中子辐射剂量水平、光子辐射剂量水平。BNCT 调试实验机房内布

续表 12 辐射安全管理

置 3 个辐射剂量监测探头，BNCT 调试实验机房外布置 4 个辐射剂量监测探头。剂量监测探头，BNCT 调试实验机房外布置 4 个辐射剂量监测探头。当固定式辐射剂量仪固定式剂量监测系统的任一监测结果高于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，均会在控制室的显示器中进行提示。此外，BNCT 调试实验机房内布置的 3 个辐射剂量监测探头的监测结果与工作状态指示灯联锁，任一辐射剂量测量结果高于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，工作状态显示“有辐射，禁止进入”。

B.常规定期自检监测和检查

建设单位拟配置 1 台便携式中子剂量仪（含 γ 探头），用于工作场所及周围环境的辐射剂量监测。建设单位拟制定的定期监测内容及频次见表 12.4-1。

表 12.4-1 定期监测内容一览表

工作场所	监测点	监测项目	控制水平	监测频率
BNCT 调试机房	BNCT 调试实验机房的屏蔽体、防护门外、穿墙管线出口外 30cm 处	中子剂量率 γ 剂量率	屏蔽体外: $2.5\mu\text{Sv/h}$	1 次/月
放射性废物衰变间	屏蔽体、防护门外 30cm 处	γ 剂量率	屏蔽体外: $2.5\mu\text{Sv/h}$	1 次/月
物理实验室	屏蔽体、防护门外 30cm 处	γ 剂量率	屏蔽体外: $2.5\mu\text{Sv/h}$	1 次/月

(2) 委托监测

①常规定期委托监测

建设单位委托有资质的单位定期对辐射工作场所的放射性水平进行监测，监测内容与定期监测内容一致，详表见表 12.4-1。另监测频率调整为 1 次/年。

②设备维修后委托监测

硼中子俘获治疗系统大修或者 BNCT 调试实验机房的屏蔽防护方案发生变化后，均委托有资质的单位对辐射工作场所的放射性水平进行监测，监测内容与定期监测内容一致，详表见表 12.4-1。监测结果交生态环境主管部门存档。

(3) 竣工环境保护验收监测

拟建项目建成投运前，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。竣工环境保护验收监测内容与定期监测内容一致，详见表 12.4-1。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，必须对射线装置使用单位进行个人剂量监测、工作场所监测、开展常规的防护监测工作。

续表 12 辐射安全管理

建设单位拟配备相应的监测仪器或委托有资质的单位定期对射线装置及使用场所开展辐射监测，做好监测记录，存档备查。

12.4.2 噪声监测

建设单位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，也可委托其他有资质的检（监）测机构代其开展自行监测。结合《排污单位自行监测技术指南 总则》（HJ819-2017），噪声监测计划如下：

表 12.4-2 运营期噪声监测计划表

类别	监测点位	监测项目	监测频率	执行标准
噪声	四周厂界	昼间噪声	验收时监测 1 次；每季度进行一次监测	《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）3 类

注：夜间不生产。

12.5 辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环保部令第 18 号）《重庆市辐射污染防治办法》（重庆市人民政府令第 338 号）等要求，使用 II 类以上（含 II 类）射线装置的辐射工作单位应建立完善的辐射事故应急方案或具有针对性与操作性的应急措施。

建设单位按照上述要求，拟制定辐射事故应急预案，预案内容包括需要考虑制定的应急机构组织、应急准备与响应程序、应急能力的培训、演练和应急响应能力、应急措施等。

12.5.1 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 3 月 2 日修订）第四十条：根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级。

拟建项目生产、销售、使用 II 类射线装置，可能发生的辐射事故主要为人员受到不必要的误照射，导致辐射工作人员和公众成员可能受到超过年剂量照射限值。因此，拟建项目可能造成一般辐射事故的发生。

12.5.2 事故应急方案与措施

（1）本项目调试机房及用户单位安装调试过程一旦发生人员误照射等辐射事故时，操作人员应立即利用最近的紧急停机开关切断设备电源。同时，事故第一发现者应及时

续表 12 辐射安全管理

向公司的辐射安全事故应急处理小组及上级领导报告。辐射安全事故应急处理小组在接到事故报告后，应以最快的速度组织应急救援工作，迅速封闭事故现场，用户单位安装调试过程封闭事故现场工作可由用户单位协助完成，禁止无关人员进入该区域，严禁任何人擅自移动和取走现场物件（紧急救援需要除外）。

（2）对可能受到超剂量照射的人员，尽快安排其接受检查和救治，并在第一时间将事故情况通报当地生态环境主管部门、卫生健康等主管部门。

（3）迅速查明和分析发生事故的原因，制定事故处理方案，尽快排除故障。若不能自行排除故障，则应上报当地生态环境主管部门并通知进行现场警戒和守卫，及时组织专业技术人员排除事故。

（4）事故的善后处理，总结事故原因，吸取教训，采取补救措施。一旦发生辐射事故，公司应立即启动应急预案，采取有效的事故处理措施，防止事故恶化。事故发生后的 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境主管部门报告。造成或可能造成超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康行政部门报告。

事故上报电话：

重庆市生态环境局 24 小时值班电话：023-89112369

重庆市璧山区生态环境局电话：023-41512369

重庆市卫生健康委员会电话：023-67706707

重庆市璧山区卫生健康委员会：023-4142123

重庆市璧山区公安局：110、023-41421247

公司应急电话：023-41605888

12.6 竣工验收

根据《建设项目环境保护管理条例》，建设项目需要配套建设的环境保护设施，必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。建设单位应按规定组织自主验收，编制验收报告。拟建项目竣工环境保护验收一览表见表 12.6-1。

表 12.6-1 竣工环境保护验收要求一览表

序号	验收内容	验收要求	备注
1	建设内容	生产、使用、销售硼中子俘获治疗系统 3 台/年，设备最大能量 2.7MeV、最大束流强度 30mA。建设 1 个 BNCT 调试实验机房	不发生重大变动
2	环保文件	环评报告、环评批复、验收监测报告等齐全	资料齐全

续表 12 辐射安全管理

序号	验收内容	验收要求		备注
3	环境管理	有辐射环境管理机构, 设专人负责, 制度上墙。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、人员培训计划、监测方案、销售与台账管理等制度		资料齐全
4	人员要求	辐射工作人员均持证上岗, 按要求定期组织复训		/
5		年剂量约束值	辐射工作人员 $\leq 5\text{mSv/a}$ 公众成员 $\leq 0.1\text{mSv/a}$	GB18871-2002 GB5172-85 建设单位制定
		屏蔽体外剂量率控制水平	BNCT 调试实验机房加速器室墙体外关注点的剂量当量率参考控制水平确定为 $2.5\mu\text{Sv/h}$	
6	电离辐射	辐射安全防护措施	1、授权钥匙: 授权钥匙必须插入锁孔后才能启动硼中子俘获治疗系统; 2、巡检系统: 巡检有效才能启动硼中子俘获治疗系统; 3、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; 4、移动防护屏装置: 移动防护屏未到达预设位置时, 硼中子俘获治疗系统不能整机出束; 5、通风联锁装置: 通风系统未启动, 硼中子俘获治疗系统不能整机出束; 6、防护门控制开关: 防护门内侧设置防护门开门按钮; 各防护门外侧设置防护门控制开关, 其中外防护门外侧的防护门控制开关需要刷卡门禁激活; 防护门设置红外线防夹装置; 7、手动开门装置: 设置在各防护门外, 停电时能开启防护门; 8、急停按钮: 覆盖 BNCT 调试实验机房及控制室, 触发后, 硼中子俘获治疗系统停止出束; 9、工作状态指示灯: 设置在中子靶站间迷路、外防护门外、控制室内, 并与防护门外的剂量监测结果联锁, 用于显示不同状态。 10、固定式剂量监测系统: 剂量监测探头分布在 BNCT 调试实验机房内、外防护门外、水处理间; 11、声光报警装置: 安装在 BNCT 调试实验机房内、外防护门外、控制室内, 具有闪光式或旋转式红色警告灯及音响警告装置; 12、视频监控系统: 摄像头分布在 BNCT 调试实验机房内、外防护门外, 显示器在控制室内; 13、广播系统: 音响安装在 BNCT 调试实验机房内, 话筒安装在控制室内; 14、监测仪器: 配置足够数量的便携式中子剂量仪 (含 γ 探头)、个人剂量计、个人剂量报警仪等; 15、防护门外张贴电离辐射警告标志, 控制区入口, 监督区合适位置张贴分区标识。	GB18871-2002 GB5172-85

续表 12 辐射安全管理

序号	验收内容	验收要求		备注
6	电离辐射	辐射安全防护措施	16、门禁系统:BNCT 调试试验区各功能房间设置普通门禁,禁止无关人员进入;BNCT 调试实验机房的外防护门设置防护门门禁,用于激活外防护门的防护门控制开关。	GB18871-2002 GB5172-85
		放射性固废	设置放射性废物储存间用于放射性废物暂存,配置门禁,防止无关人员进入。放射性废物储存间内配置铅容器,用于防止放射性废物。	GB18871-2002
		放射性废水	设置冷却水收集池,用于活化冷却水暂存以及冷却水系统发生泄漏时收集冷却水。	GB18871-2002
		放射性废气	机械通风,放射性废气引至2F楼顶排放	GB18871-2002
7	生活污水	新建厂区内部污水管网,接入园区管网进入产业园污水处理设施处理		《污水综合排放标准》 (GB8978-1996)三级标准
8	噪声	基础减振;建筑隔声		满足《工业企业厂界环境 噪声排放标准》 (GB12348-2008)3类排 放标准
9	固体废物	生活垃圾	设垃圾收集桶,生活垃圾收集后交环卫部门处理	/
		一般固废	设一般固废暂存区;一般固废分类收集后外卖物资回收公司;规范标识	/

表 13 结论及建议

13.1 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，中核鲲硼医疗科技（重庆）有限公司租用重庆市璧山区高新技术产业开发区的专精特新产业园 13 号标准厂房第一层实施“基于强流直线加速器的 BNCT 装备研发及临床研究”，建筑面积约 3700m²，主要建设硼中子俘获治疗系统生产区、调试实验区、办公生活区开展硼中子俘获治疗系统（加速质子最大能量 2.7MeV，最大束流强度为 30mA，II 类射线装置）的生产、调试、实验和销售。拟建项目采用零库存订单模式，硼中子俘获治疗系统生产规模不超过 3 台/年。

拟建项目总投资 40000 万元，环保投资 1000 万元，建筑面积约 3700m²。拟建项目建设工期为 12 个月。

13.2 实践正当性

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。拟建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。

硼中子俘获治疗系统设计采取安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，拟建项目对辐射工作人员和公众的辐射影响很小，满足国家相关标准要求。拟建项目实施后可推动国内加速器硼中子俘获治疗的发展，利益是大于可能引起的辐射危害的。因此，拟建项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)“实践正当性”的原则。

13.3 产业政策符合性

拟建项目主要是生产、销售、使用硼中子俘获治疗系统，属于《产业结构调整指导目录（2024 年本）》中“鼓励类”第六项“核能”中第 4 条“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”，“鼓励类”第十三项“医药”中第 4 条“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。

续表 13 结论及建议

13.4 环境现状

拟建项目场址及周围的 γ 辐射剂量水平在重庆市天然辐射本底水平的正常涨落范围内。另建项目场址及周围环境均未检测出中子剂量当量率。

拟建项目所在的重庆市璧山区为环境空气不达标区，已制定大气达标规划。拟建项目区域地表水体璧南河水质满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）IV 类标准。拟建项目区域声环境现状满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）中 3 类标准的要求。

13.5 选址及布局合理性

（1）选址可行性

拟建项目场址的辐射剂量背景监测结果表明，其辐射环境质量现状良好，能满足拟建项目的建设需求。拟建项目周围均为专精特新产业园标准厂房和奥方汽车零部件公司的厂房，楼上为重庆坤元堂医药有限公司，周围无医院、学校、集中居住区等环境敏感区分布，无大的环境制约因素。此外，拟建 BNCT 调试实验机房位于厂房中部，未与客流量较大的办公生活区紧邻，且 BNCT 调试实验机房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。拟建项目为医疗设备建设项目，属于璧山高新技术产业开发区主导行业中生命健康产业中的医疗器械，符合园区产业定位。从园区行业准入及辐射安全防护的角度分析，拟建项目选址是可行的。

（2）布局合理性

拟建项目涉及核技术利用的功能用房（BNCT 调试实验机房、放射性废物衰变间、物理实验室）均布置在 BNCT 调试实验区内。BNCT 调试实验机房为地上一层建筑，内设 1 间加速器室、1 间中子靶站间，周围根据硼中子俘获治疗系统的运行、调试、实验研究等需求布置控制室、设备电源间、功率源间、水处理间、物理实验室等辅助用房，功能设置齐全。BNCT 调试实验机房的中子靶站间设置 L 型迷路，主射方向朝向中子靶站间的北墙（水处理间），避开了控制室、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 调试实验机房的控制室独立布置在 BNCT 调试实验机房外，隔室操作能减少对辐射工作人员的照射。另 BNCT 调试实验区独立成区，周围活动的公众成员少。此外，放射性废物衰变间、物理实验室以及 BNCT 调试实验机房等所在区域出入口拟设置门禁，严禁无关人员进入。

从辐射防护的角度，拟建项目平面布局满足要求。

续表 13 结论及建议

13.6 辐射防护安全措施

(1) 辐射工作场所分区管理

拟建项目按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)、《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)等的要求将辐射工作场所划分控制区和监督区,实行辐射安全分区管理,并采取相应的防护安全措施。拟建项目将 BNCT 调试实验机房、放射性废物衰变间、物理实验室划分为控制区,其周围邻近的功能房间划分为监督区。

(2) 屏蔽体防护

拟建项目 BNCT 调试实验机房、放射性废物衰变间、物理实验室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。此外,拟建 BNCT 调风管、电管、风管、水管、试验管等拟采用“ Γ ”形、“U”形、“半 U”形、“倒 U”形、地下水平 0° 、地上水平 45° 、地上水平 30° 等多种穿墙措施,并与混凝土浇筑同时进行,并一次到位。BNCT 调试实验机房采取这些措施后,对其墙体屏蔽防护能力削弱甚微,不影响屏蔽体的屏蔽防护效果。此外,防护门的生产和安装均交有资质的厂家负责,施工时保证施工质量。

(3) 辐射安全防护措施

拟建项目拟配置授权钥匙,授权钥匙必须插入锁孔后才能启动硼中子俘获治疗系统;拟设置巡检系统,巡检有效才能启动硼中子俘获治疗系统;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;拟配置移动防护屏联锁装置,移动防护屏不到位,硼中子俘获治疗系统无法整机运行出束;拟配置通风联锁装置,通风系统未运行,硼中子俘获治疗系统无法整机运行出束;防护门内侧拟设置防护门开门按钮,触发后,防护门开启,硼中子俘获治疗系统停止出束;各防护门外侧拟设置 1 个防护门禁用于激活防护门控制开关,从而对防护门进行关闭、开启控制;各防护门拟设置红外线防夹装置、手动开门装置;BNCT 调试实验机房及控制室拟设置 15 个急停按钮,触发后,硼中子俘获治疗系统停止出束;拟设置 4 套工作状态指示灯,并与防护门外的剂量监测结果联锁,用于显示 BNCT 调试实验机房及硼中子俘获治疗系统的状态。拟设置 1 套固定式剂量监测系统,用于 BNCT 调试实验机房内外、水处理间的辐射剂量监测,具有报警功能;拟设置 5 个声光报警装置、1 套视频监控系统、1 套广播系统以及警示标志电离辐射用于警告人员远离。此外,BNCT 调试实验区其它功能房

续表 13 结论及建议

间设置普通门禁，禁止无关人员进入。此外，拟配置便携式中子剂量仪（含 γ 探头）、个人剂量计、个人剂量报警仪等设备。因此，拟建项目采取的辐射安全与防护措施满足辐射防护的要求。

13.7 环境影响分析

（1）屏蔽能力的核算

根据模拟计算结果可知，硼中子俘获治疗系统运行出束时，BNCT 调试实验机房的加速器室屏蔽体外 30cm 处的剂量当量率均小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，均低于《粒子加速器辐射防护规定》（GB 5172-85）以及建设单位制定的剂量率控制水平的要求（ $2.5\mu\text{Sv/h}$ ）。

（2）年累积剂量估算

经核算，拟建项目所致辐射工作人员年有效剂量低于剂量约束值（ 5mSv/a ），所致公众成员的年有效剂量亦低于剂量约束值（ 0.1mSv/a ），符合《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 5172-85）的要求。

（3）环境保护目标影响

通过核算，BNCT 调试实验机房周围 50m 范围内各环境保护目标处的年有效剂量均低于拟建项目剂量约束值（ 0.1mSv/a ）。因此，拟建项目所致周围 50m 范围内环境保护目标的影响小，故拟建项目对周围各环境保护目标的环境影响可以接受。

（4）放射性三废

BNCT调试实验机房的加速器室、中子靶站间各设置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专精特新产业园13号标准厂房2F楼顶，并高于楼顶3m排放，对周围大气环境影响较小。拟建项目产生的活化废水暂存在冷却水收集池内，30天后取样检测，确定放射性核素 ^3H 的活度低于 1ALImin （ $1.11\times 10^9\text{Bq}$ ）后再排入专精特新产业园生化池处理，并且每次排放后用不少于3倍排放量的水进行冲洗。拟建项目产生的放射性暂存在放射性废物衰变间进行衰变处理，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。

综上所述，拟建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。

（5）其他影响

硼中子俘获治疗系统运行产生的臭氧和氮氧化物等废弃废气经引至专精特新产业

续表 13 结论及建议

园13号标准厂房2F楼顶，并高于楼顶3m排放，经大气扩散和分解后，对周围大气环境影响较小。硼中子俘获治疗系统生产过程中产生的少量焊接废气、金属粉尘经工业吸尘器处理后直接无组织排放，对环境影响较小。

拟建项目工作人员产生的生活污水依托专精特新产业园已建生化池处理后排入璧山高新区生活污水处理厂处理达标后深度处理。

生活垃圾交环卫部门处理；废包装、金属屑等定期外卖给物资回收单位，废过滤材料由厂家回收。

运营期噪声主要来源于暖通系统的风机、中央空调外机等。拟建项目拟使用低噪声设备，其噪声值低于 65dB(A)，采用合理布局，基础减振等措施后对周围环境影响较小。

(6) 事故风险

拟建项目发生的单次误照射可能会造成人员受到辐射超过年剂量限值，属于一般辐射事故。拟建项目通过落实清场搜索程序防止人员滞留机房，在设备上及控制台设置有紧急停机按钮，加强管理及安全联锁系统维护，辐射工作人员加强专业知识学习、定期参加辐射安全与防护知识培训、严格遵守操作规程和规章制度，加强换靶装置运行检测、确保其正常运行，正确佩戴个人剂量计及个人剂量报警仪等措施后，拟建项目辐射事故风险可控。

13.8 辐射环境管理

建设单位拟按照相关要求建立辐射环境管理机构，配置辐射环境专职管理人员，制定相应的管理制度，保证辐射工作人员持证上岗，并组织复训；建立辐射工作人员健康档案、个人剂量监测档案、辐射环境监测档案、BNCT 设备销售台账等，及时办理《辐射安全许可证》，在许可范围内从事辐射活动。在今后的工作中，建设单位承诺加强核安全文化建设，提高辐射安全管理能力，杜绝辐射事故的发生。

综上所述，中核鲲鹏医疗科技(重庆)有限公司实施的基于强流直线加速器的 BNCT 装备研发及临床研究符合国家产业政策，具有实践的正当性，选址可行，布局合理。在严格落实各项辐射安全与防护措施后，项目环境风险可防可控，能实现辐射防护安全目标及污染物的达标排放，对环境及周围公众的影响可接受。因此，从环境保护的角度来看，该项目的建设是可行的。



附图一 拟建项目所在地理位置图