

核技术利用建设项目

绵阳质子医疗装备制造基地项目

环境影响报告书

（公示本）

建设单位：中广核医疗科技（绵阳）有限公司（盖章）

二〇二二年八月

核技术利用建设项目

绵阳质子医疗装备制造基地项目

环境影响报告书

建设单位名称：中广核医疗科技（绵阳）有限公司

建设单位法人代表（签字或盖章）：

通讯地址：**

邮政编码：**联系人：**

电子邮箱：**联系电话：**

编制说明

本报告书为中广核医疗科技（绵阳）有限公司申请生态环境行政主管部门核发“辐射安全许可证”的环评文件，申请活动种类为：使用、销售（含建造）Ⅰ类射线装置，生产、使用、销售Ⅲ类射线装置。

本报告书遵照国家环境保护和辐射安全有关法律法规、标准和导则进行编制，主要参照《辐射环境保护管理导则 核技术应用项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ/T10.1-2016）进行编写。此外，报告书遵照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》规定“环境影响评价文件，除按照国家有关环境影响评价的要求编制或者填报外，还应当包括对辐射工作单位从事相应辐射活动的技术能力、辐射安全和防护措施进行评价的内容”，在报告书中开展了相应评价工作。

目 录

第一章 概述.....	1
1.1 项目名称及地点	1
1.2 项目概况	3
1.3 编制依据	33
1.4 评价标准	39
1.5 评价范围和保护目标	44
1.6 安全责任划分	46
第二章 自然环境与社会环境状况	48
2.1 自然环境状况	48
2.2 社会经济状况	56
2.3 环境质量和辐射现状	58
2.4 场址适宜性评价	68
第三章 工程分析及源项.....	71
3.1 项目规模与基本参数	71
3.2 工作流程与工艺分析	76
3.3 污染源项	113
3.4 废弃物处置	136
第四章 辐射安全与防护.....	139
4.1 场所布局及合理性分析	139
4.2 辐射安全与防护措施	146
4.3 三废的治理	164
4.4 服务期满后的环境保护措施	168
第五章 环境影响分析.....	169
5.1 建设阶段对环境的影响	169
5.2 运行阶段对环境的影响	171
5.3 事故影响分析	236

第六章 辐射安全管理	242
6.1 机构与人员	242
6.2 辐射安全管理规章制度	243
6.3 辐射监测	248
6.4 辐射事故应急	256
6.5 辐射工作能力综合评价	257
6.5 小结	258
第七章 利益和代价简要分析	259
7.1 利益分析	259
7.2 代价分析	260
7.3 正当性分析	264
第八章 结论与建议	266
8.1 项目工程概况	266
8.2 辐射安全与防护	266
8.3 环境影响分析	267
8.4 辐射安全管理	268
8.5 环境影响评价要求及建议汇总	268
8.6“三同时”竣工验收一览表	269
8.7 建设单位承诺	270
8.8 结论	271

第一章 概述

1.1 项目名称及地点

1.1.1 项目名称

项目名称：绵阳质子医疗装备制造基地项目

建设单位：中广核医疗科技（绵阳）有限公司

建设单位统一社会信用代码：91510704MA65YP452W

建设单位背景介绍：

2020 年 8 月 26 日，中广核技术发展股份有限公司（以下简称为中广核技）与质子治疗技术全球领先的比利时 Ion Beam Applications S.A.（以下简称为 IBA）公司签署了《多室质子治疗系统技术许可协议》和《战略合作协议》。根据协议，中广核技将完整引入质子治疗系统技术，并获得该技术及产品在中国大陆地区独家开发、生产、销售、安装、运营、维修的权利。

2020 年 11 月 26 日，中广核技与绵阳市游仙区政府签署《绵阳质子医疗装备制造基地项目投资协议书》和《绵阳质子医疗装备制造基地项目扶持协议书》。根据协议中广核技将投资 10 亿元建设质子医疗装备制造基地。双方将充分发挥各自优势，资源共享、强强联合，在医用同位素、质子医疗装备制造、核控装备研发制造等领域开展务实合作，符合新一轮科技革命和产业变革大趋势，符合国家促进核技术应用、壮大核产业规模的战略取向和政策导向，是地方政府打造全球领先的国家核医疗健康产业基地、建设核技术应用产业创新高地的战略性项目。

2020 年 12 月 10 日，中广核技成立全资子公司中广核医疗科技（绵阳）有限公司（以下简称为中广核医疗或建设单位），中广核医疗负责质子治疗系统技术的消化吸收，生产、销售、安装、运营和维修以及研发国产单治疗室质子治疗系统。

1.1.2 建设地点

本项目选址位于四川省绵阳市游仙区游仙街道石垭村 2 社（东经 104.804914° 、北纬 31.535766° ），项目地理位置见附图 1。根据城市总体规划，项目所在区域位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园中的青龙山北片区。

拟建项目地理位置见图 1.1-1 及附图 1。该项目所在厂区周边环境图见图 1.1-2 及附图 2。



图 1.1-1 拟建项目地理位置图



图 1.1-2 项目所在厂区周边环境图（500m）

本项目开展质子治疗系统及附属图像引导系统的研发、设计生产、销售、安装调试及后续维修维护业务。项目规划占地约 28 亩，总建筑面积 17350m²，主要建筑物包括 1#生产厂房、2#生产厂房、质子医疗办公楼、配电房及放射性固体废物暂存间等。

项目建成后，形成主要产能为：1）4 台/年的质子治疗系统销售（含建造）、使用能力；2）20 台/年 CBCT（锥形束电子计算机断层扫描）图像引导系统、20 台/年二维图像系统的生产、使用、销售能力。

1.2 项目概况

1.2.1 项目性质

本项目为新建项目

1.2.2 建设内容及规模

1、项目建设规模

中广核医疗科技（绵阳）有限公司拟在四川省绵阳市游仙区游仙街道石垭村 2 社新建绵阳质子医疗装备制造基地项目。

项目主要建设内容包括：新建质子治疗系统生产 1#生产厂房、2#生产厂房、质子医疗办公楼及配电房、放射性固体废物暂存间等配套设施。项目总投资额 100000 万元。

1#生产厂房为单层钢结构厂房，建筑长约 60m、宽约 39.9m，主体建筑高度约为 28m，耐火等级二级，火灾危险性分类为丁类，占地面积 2404 m²，计容建筑面积 4808m²，部分装置地下布置。建筑设计使用年限 50 年。该厂房内设置独立质子治疗系统集成调试机房（长 44m×宽 21.7m×高 10.41m）作为本项目质子治疗系统及其附属图像引导系统集成、安装、调试的主要辐射工作场所使用。

质子治疗系统集成调试机房分隔为东西两个调试区：1）西侧为加速器调试区，设置质子加速器室（含加速器基坑及铜靶），仅用于开展加速器系统调试作业；2）东侧为整体调试区，含质子加速器室（含加速器基坑）、束流输运线、1 个旋转治疗室（含旋转治疗机架基坑及铜靶），既可开展质子治疗系统（加速器、束流输运线、治疗室）整体调试作业，亦可单独开展加速器系统调试作业；3）CBCT 图像引导系统及二维图像系统依托整体调试区旋转治疗室部分开展生产、使用、调试工作；4）两个调试区共用 1 个控制室。

2#生产厂房为单层钢结构厂房，建筑长约 70m、宽约 60m，建筑高度约 12m，耐火等级二级，火灾危险性分类为丁类，占地面积 4222.26m²，计容建筑面积 8444.52m²。建筑设计使用年限 50 年。该厂房作为质子治

疗系统各子系统装配、调试（不出束）作业场所及仓库用房使用，不涉及辐射作业。

质子医疗办公楼为多层公共建筑，钢筋混凝土框架结构，地面以上四层，地下局部一层。该建筑整体尺寸：长 31.8m，宽 31.4m，建筑高度为 16.8m，建筑耐火等级为二级，占地面积为 947.42m²，总建筑面积为 3990.68 m²，建筑设计使用年限为 50 年。

配电房为单层建筑，建筑面积 76.80m²；放射性固废暂存间为单层建筑，建筑面积 30.00m²。

本项目所建造、销售的质子治疗系统，所引出质子最大能量为 230MeV、额定束流强度 750nA，引出连续最大束流 300nA，属 I 类射线装置，年最大调试出束时间为 960 小时。项目配套生产的 CBCT 图像引导系统和二维图像系统属于质子治疗系统放射治疗图像引导装置，最大管电压 150kV，最大管电流 320~420mA，均属于 III 类射线装置。

本项目建成后，将具备质子治疗系统整体设计、组装、测试、总装、集成、调试能力，形成 4 台/年的质子治疗系统的使用、销售（含建造）能力。同时，本项目建成后还将配套形成 CBCT 图像引导系统及二维图像系统各 20 台/年的生产、使用、销售能力。

2、项目实施阶段划分

结合本项目的建设周期，本项目实施分为两个阶段：

第一阶段，绵阳质子医疗装备制造基地未建成，销售（含建造）、使用（用户方安装调试）阶段。

该阶段，建设单位工作内容包括质子治疗系统的销售、用户方安装

调试及后续维修维护工作，年最大生产销售量为 4 台，安装调试和维修维护量为 4 台。其中，销售环节在建设单位内部进行，实行零库存管理模式，建设单位本部所在地区（绵阳基地及办公场所）不设置质子治疗系统暂存场所，质子治疗系统由供货方直接发货至用户方，由用户方委托有资质单位进行报关及装置运输业务。在销售过程中，建设单位的销售人员不直接接触质子治疗系统，仅涉及商务谈判和财务结算活动。

射线装置运抵用户方后，安装调试和售后维修维护环节在用户方使用质子治疗系统的辐射工作场所内进行（该场址由用户方先期完成环境影响评价后方可允许质子治疗系统入驻），由中广核医疗工程师团队负责。

中广核医疗设置一支 30 人的质子治疗系统安装调试和维修维护工作队伍，专业方向涵盖核物理、粒子物理与原子核物理、核工程与核技术、辐射防护与环境工程、加速器物理、机械工程及自动化、电磁场与微波技术、机械设计、机械制造工艺与设计、模具设计与制造、机械电气、化学等领域，专门负责质子治疗系统在用户方的安装调试和售后维修维护工作。

中广核医疗安装调试和售后维修维护团队工作人员在入职后，均由 IBA 公司亚太地区全资子公司亿比亚（北京）粒子加速器技术有限公司（以下简称“亿比亚公司”）组织各类专业技术培训，培训内容主要包括加速器的原理及其应用、加速器辐射安全防护、加速器安装调试流程、加速器故障的检修流程、加速器保养等内容。同时，新入职辐射工作人员在其实习期内必须参加辐射安全与防护培训，通过生态环境部门组织的考核后方可执证上岗。

亿比亚公司是 IBA 于 2004 年在亚太地区成立的全资子公司，主要负责为亚太地区使用 IBA 公司设备的用户提供优质的产品和服务。目前业务范围主要是销售 IBA 公司生产的 C18/9MeV、C10/5MeV、C230/230MeV 质子加速器，并提供加速器的安装调试和售后维修维护等技术服务。

第二阶段，绵阳质子医疗装备制造基地建成，销售（含建造）、使用（绵阳基地组装调试、用户方安装调试）阶段。

该阶段，建设单位工作内容包括质子治疗系统的基地组装调试、销售、用户方安装调试及后续维修维护工作，年最大销售量为 4 台，安装调试和维修维护量为 4 台。

其中：1）组装调试环节在绵阳基地进行，建设单位采用外购加速器、输运线、治疗室、图像引导系统的成品单元部件，于绵阳质子医疗装备制造基地开展组装作业。该部分作业内容中外购的均为成品部件，机械加工、表面处理、喷（涂）油漆等环节均外协开展，本项目区域仅开展机械设备装配及少量焊接作业。

2）加速器系统于 1#厂房辐射工作场所（质子治疗系统机房加速器调试区或整体调试区）内开展组装、调试作业，年组装、调试加速器系统 4 台（套）。调试完成后，其中 3 台（套）加速器系统直接销售往用户方，配套的束流输运线、治疗室等单元部件由供货方直接发货至用户方，于用户方辐射工作场所开展整体组装调试作业。1 台（套）加速器系统与建设单位自行组装的束流输运线、治疗室等单元部件匹配，于质子治疗系统机房整体调试区开展整体调试后，销售往用户方，配套的束

流输运线、治疗室等单元部件不足的，由供货方直接发货至用户方。

3) 束流输运线、治疗室等单元部件于 2#厂房内开展组装，经初步调试后，运输至 1#厂房质子治疗系统机房整体调试区开展整体调试作业。年组装调试束流输运线、治疗室终端各 1 台（套），与 1 台加速器系统匹配，开展整体调试作业，完成调试后，销售往用户方。

4) CBCT 图像引导系统、二维图像系统分别为质子治疗系统中旋转束流治疗室、固定束流治疗室附属的图像引导装置。建设单位依据 IBA 公司每套质子治疗系统配置 5 个治疗室的常规设计规模，拟形成 CBCT 图像引导系统 20 台/年、二维图像系统 20 台/年的产能。本项目根据用户方需求，于 2#厂房内开展 CBCT 图像引导系统、二维图像系统组装及初步测试作业（不出束，不涉及辐射作业）。调试完成后，运输至 1#厂房质子治疗系统机房整体调试区旋转治疗室内，逐台配装至旋转治疗机架中，开展出束调试作业，调试完成后，销售往用户方。

5) 销售环节在建设单位内部进行。建设单位年销售计划中，1 台（套）质子治疗系统（含加速器、束流输运线、旋转机架及图像引导系统等）由绵阳基地调试后直接发货至用户方；另外 3 台（套）质子治疗系统，加速器系统、图像引导系统等部分由绵阳基地调试后发货至用户方，束流输运线、旋转机架另行采购后，由供货方发货至用户方。涉及射线装置及其他含放射性部件的运输作业，均由建设单位委托有资质单位开展运输。在销售过程中，建设单位自行安排辐射工作人员开展质子治疗系统及其部件拆卸、包装作业。

6) 质子治疗系统运抵用户方后，安装调试和售后维修维护环节在

用户方使用质子治疗系统的辐射工作场所内进行（该场址由用户方先期完成环境影响评价后方可允许质子治疗系统入驻），由建设单位工程师团队负责。

7) 随着销售量的增加，维护维修的需求可能逐年增加。建设单位将在控制职业工作人员剂量约束值不变的基础上，通过扩大维修团队、外协维修作业等方式来满足用户维修维护作业需求。

3、本项目拟申请的辐射安全许可证内容

本项目建成后，拟申请的辐射安全许可证内容如下表所示。

表 1.2-1 本项目新增射线装置

序号	名称	类别	申请活动范围	数量	型号	加速粒子	最大能量	额定流强	最大引出流强	用途	工作场所	备注
1	质子治疗系统	I 类	销售(含建造)、使用	4 台	C230	质子	230MeV	750nA	300nA	放射治疗	1#生产厂房	新增

表 1.2-2 本项目新增射线装置

序号	名称	类别	申请活动范围	数量	型号	最大管电压(kV)	最大管电流(mA)	用途	工作场所	备注
1	CBCT 图像引导系统	III类射线装置	生产、销售、使用	20 套	待定	150	320	医学诊断/治疗定位	质子治疗系统 1#生产厂房	新增
2	二维图像系统	III类射线装置	生产、销售、使用	20 套	待定	150	420	医学诊断/治疗定位	质子治疗系统 1#生产厂房	新增

1.2.3 任务由来

本项目所建造的质子治疗系统，所引出质子最大能量为 230MeV，额定流强 750nA，引出连续最大束流 300nA，属 I 类射线装置。根据《关于发布<射线装置分类>的公告》（环境保护部、国家卫生和计划生育委员会 2017 年第 66 号公告），**属于 I 类射线装置**；CBCT（锥形束电子计算机断层扫描）图像引导系统及二维图像系统属于**III类射线装置**。

根据《中华人民共和国环境影响评价法》和《中华人民共和国放射性污染防治法》、《建设项目环境保护管理条例》等法律法规要求，本项目须进行环境影响评价。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”中“172、核技术利用建设项目”中“生产放射性同位素的（制备 PET 用放射性药物的除外）；**销售（含建造）、使用 I 类射线装置**；甲级非密封放射性物质工作场所的为报告书类” 的分类管理要求，**本项目应编制环境影响报告书**。

为加强辐射安全与环境管理，防止放射性污染和意外环境事故的发生，保护环境，保障公众健康，同时为申办生态环境主管部门核发《辐射安全许可证》提供支持性文件，中广核医疗科技（绵阳）有限公司委托四川久远环保安全咨询有限公司承担本项目的环境影响报告书编制工作。环评单位接收委托后，随即组织专业人员开展资料收集、现场踏勘、资料整理分析、调研有关法规等工作，并与建设单位进行多方咨询交流，反复核实，在进行工程分析的基础上，结合工程的具体情况以及辐射危害特征，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》（HJ/T10.1-2016）的要求，编制了《绵

阳质子医疗装备制造基地项目环境影响报告书》。

1.2.4 编制目的

四川久远环保安全咨询有限公司在接受本项目环境报告书编制工作的委托后，在进行现场踏勘、实地调查了解项目所在地环境条件和充分研读相关法律法规、规章制度、技术资料后，估算项目单位绵阳质子医疗装备制造基地项目在正常运行和事故期间对项目所在地周围的环境影响，并按相应标准进行评价。同时，对项目单位从事相应辐射活动的的能力、拟采取的辐射安全和防护措施及相关管理制度、事故应急预案的可行性、合理性进行分析和评价，对项目的利益、代价进行简要分析，在此基础上提出合理可行的对策和建议，编制完成《中广核医疗科技（绵阳）有限公司绵阳质子医疗装备制造基地项目环境影响报告书》，呈报四川省生态环境厅审批。

1.2.5 产业政策符合性

根据中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 49 号（2021 年 12 月 27 日发布）《产业结构调整指导目录（2019 年本，2021 年修订）》，本项目属其中**鼓励类**第六项“核能”第 6 条“同位素、加速器及辐照应用技术开发”项目，因此，本项目符合国家产业政策。

1.2.6 项目与有关区域规划相符性分析

（1）项目用地符合性

本项目位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园的青龙山北片区，根据该产业园用地规划布局图，项目拟建厂址为工业用地。目前，项目已取得绵阳市自然资源和规划局核发的建设项目用地规划许可证，地字

第 510700202100157（见附件），用地为工业用地。

因此，本项目用地符合中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园用地规划。

（2）与绵阳市国土空间规划和城市总体规划符合性

目前，《绵阳市国土空间总体规划（2020-2035 年）》正在编制中。根据《四川省自然资源厅关于同意<绵阳市国土空间规划近期实施方案>的函》（川自然资函〔2021〕810 号）和《绵阳市自然资源和规划局关于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划用地的情况说明》（绵自然资函〔2022〕144 号），中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区已经纳入绵阳市国土空间规划近期实施方案内容。

本项目位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园内，项目为医用质子治疗系统研发、生产和销售，符合核医疗健康产业园青龙山北片区的主导产业定位，亦符合绵阳市国土空间规划。

（3）与中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区的规划符合性

本项目厂址位于四川省绵阳市游仙区游仙街道石垭村二社。根据城市总体规划，项目所在区域位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园中的青龙山北片区。根据《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划（初稿）》，核医疗健康产业园总规划用地 4000 亩，规划范围包含游仙区游仙街道石垭村、金山村、文胜村、吴家社区和新桥镇玉泉村，规划为研发、生产和医疗、科研配套和文商旅等 5 个组团，以放射性药物研发生产、专业物流配送、核医疗设备制造、肿瘤医院及康养、核测控装备、无损检测等相关核技术应用产业、科研教育孵化中心及配套设施为主导产业。

核医疗健康产业园规划分批次启动建设，建设周期五年。首期启动

区为青龙山北片区，该片区位于游仙区游仙街道石垭村，规划范围东至游仙区乡村旅游环线，西、南至青龙山，北至绵梓路，规划总面积 50.97 公顷（约 764.55 亩），该片区规划重点发展放射性同位素研发及应用、放射性药物研发及生产和放射医疗设备研发设计及制造等核技术产业。

本项目选址位于核医疗健康产业园青龙山北片区的生产组团内，项目为医用质子治疗系统研发、生产及销售，系放射医疗设备研发设计及制造，符合核医疗健康产业园青龙山北片区的主导产业定位。

目前，中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园（以下简称“核医疗健康产业园”）已完成项目立项、空间规划研究及生产组团控制详规等工作。为加快园区建设，核医疗健康产业园采取规划环评和项目环评同步进行的策略，目前园区规划环评已完成文本编制并召开了咨询讨论会，正进行修改工作。

因此，本项目的建设符合中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区的规划。

1.2.7 项目“三线一单”符合性分析

根据环境保护部《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》（环环评[2016]150 号）的要求，建设项目选址选线、规模、性质和工艺路线等应与“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单”（以下简称“三线一单”）进行对照。根据《生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和环境准入负面清单编制技术指南》（环办环评[2017]99 号），生态保护红线的定义如下：

生态保护红线：指在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域，是保障和维护国家生态安全的底线和生命线，通常包括具有重要水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙、

海岸生态稳定等功能的生态功能重要区域，以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境敏感脆弱区域。按照“生态功能不降低、面积不减少、性质不改变”的基本要求，实施严格管控。

环境质量底线：指按照水、大气、土壤环境质量不断优化的原则，结合环境质量现状和相关规划、功能区划要求，考虑环境质量改善潜力，确定的分区域分阶段环境质量目标及相应环境管控、污染物排放控制等要求。

资源利用上线：指按照自然资源资产“只能增值、不能贬值”的原则，以保障生态安全和改善环境质量为目的，利用自然资源资产负债表，结合自然资源开发管控，提出的分区域分阶段的资源开发利用总量、强度、效率等上线管控要求。

环境准入负面清单：指基于环境管控单元，统筹考虑生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线的管控要求，提出的空间布局、污染物排放、环境风险、资源开发利用等方面禁止和限值的环境准入要求。

1.2.7.1 与《四川省人民政府关于印发四川省生态保护红线方案的通知》（川府发〔2018〕24号）符合性分析

（1）生态红线划分及管理要求

根据《四川省人民政府关于印发四川省生态保护红线方案的通知》（川府发〔2018〕24号）生态保护红线划定结果：四川省生态保护红线总面积14.80万平方公里，占全省幅员面积的30.45%，涵盖了水源涵养、生物多样性维护、水土保持功能极重要区，水土流失、土地沙化、石漠化极敏感区，自然保护区、森林公园的生态保育区和核心景观区，风景名胜区的级保护区（核心景区）、地质公园的地质遗迹保护区、世界自然遗产地的核心区、湿地公园的湿地保育区和恢复重建区、饮用水水

源保护区的一级保护区、水产种质资源保护区的核心区等法定保护区域，以及极小种群物种分布栖息地、国家一级公益林、重要湿地、雪山冰川、高原冻土、重要水生生境、特大和大型地质灾害隐患点等各类保护地。

根据生态保护红线类型分布，本项目所处地理位置属于盆中城市饮用水源—水土保持生态保护红线：

地理分布：该区位于四川省东部成都平原及盆地丘陵区，行政区涉及成都市、自贡市、德阳市、绵阳市、广元市、遂宁市、内江市、乐山市、南充市、眉山市、广安市、达州市、巴中市、资阳市，总面积 0.08 万平方公里，占生态保护红线总面积的 0.54%，占全省幅员面积的 0.17%。

生态功能：四川盆地区是成渝经济区的重要组成部分，是成渝城市群核心区域，人口密集，经济发展，城镇化率大于 50%，该区主体功能区定位为重点开发区域和农产品主产区，其主导功能为人居保障和农林产品提供，该区的生态保护红线主要以保障城市饮水安全的饮用水水源保护区为主，还有零散分布于四川盆地及成都平原区自然保护区、风景名胜区、湿地公园、地质公园等各类生态保护重要区域，它们在维护区域水土保持功能方面发挥着重要作用。

重要保护地：本区域分布有 32 处饮用水水源保护区、6 个省级自然保护区、3 个国家级风景名胜区、10 个省级风景名胜区、1 个世界地质公园、5 个国家地质公园、1 个省级地质公园、2 个国家湿地公园、4 个省级湿地公园、14 个国家级水产种质资源保护区、1 个省级水产种质资源保护区、1 处世界文化与自然遗产地的部分或全部区域。

保护重点：严格按照现有相关法律法规对禁止开发区域的管理要求，对生态保护红线实施严格保护，严格控制人为因素对区内自然生态的干扰。

（2）本项目与生态保护红线位置关系及符合性分析

本项目位于绵阳市游仙区，周边生态红线的生态功能和保护重点见下表。

表 1.2-3 绵阳市涉及四川省生态红线区类型和保护要求一览表

名称	生态功能	保护重点
盆中城市饮用水源—水土保持生态红线	四川盆地是成渝经济区的重要组成部分，是成渝城市群核心区域，人口密集，经济发展，城镇化率大于 50%，该区主体功能区定位为重点开发区域和农产品主产区，其主导功能为人居保障和农林产品提供，该区的生态保护红线主要以保障城市饮水安全的饮用水水源保护区为主，还有零散分布于四川盆地及成都平原区自然保护区、风景名胜区、湿地公园、地质公园等各类生态保护重要区域，它们在维护区域水土保持功能方面发挥着重要作用。	严格按照现有相关法律法规对禁止开发区域的管理要求，对生态保护红线实施严格保护，严格控制人为因素对区内自然生态的干扰。

根据《长江经济带战略环境评价四川省绵阳市“三线一单”生态环境分区管控优化完善研究报告》，本项目与绵阳市生态保护红线位置关系如下图所示。

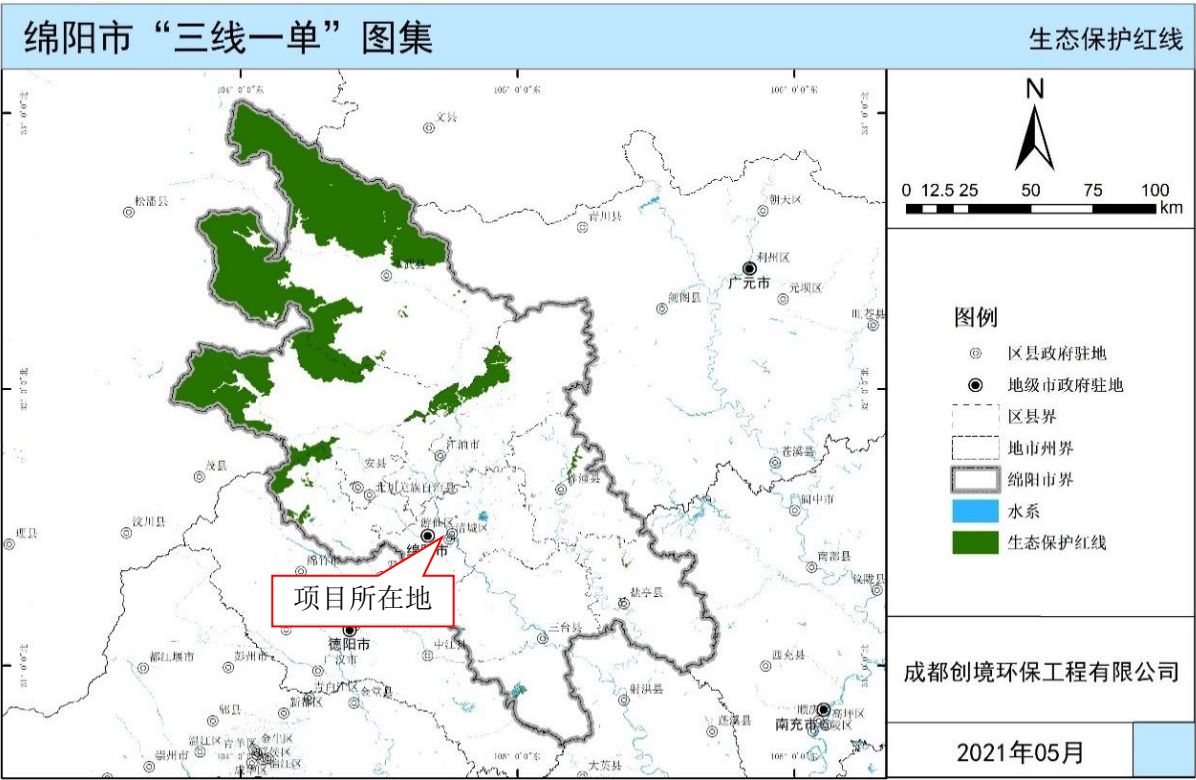


图 1.2-1 绵阳市生态保护红线分布图

由上图可以看出，本项目不涉及绵阳市生态保护红线。

1.2.7.2 与《关于落实生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线制定生态环境准入清单实施生态环境分区管控的通知》(绵府发[2021]18 号)符合性分析

根据绵阳市人民政府《关于落实生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线制定生态环境准入清单实施生态环境分区管控的通知》(绵府发[2021]18 号), 本项目与绵阳市“三线一单”的符合性分析如下:

围绕省委“一干多支、五区协同”的区域发展战略和全市“一核两翼、三区协同”的空间布局, 立足成渝地区双城经济圈区域中心城市的区域特征、发展定位及突出生态环境问题, 将全市行政区域从生态环境保护角度划分为优先保护、重点管控和一般管控三类环境管控单元。

1、优先保护单元。以生态环境保护为主的区域, 全市划分优先保护单元 20 个, 主要包括生态保护红线、自然保护地、饮用水水源保护区等, 应以生态环境保护优先为原则, 严格执行相关法律、法规要求, 严守生态环境质量底线, 确保生态环境功能不降低。

2、重点管控单元。涉及水、大气、土壤等资源环境要素重点管控的区域, 全市划分重点管控单元 43 个, 主要包括人口密集的城镇规划区和产业集聚的工业园区(工业集聚区)等, 应不断提升资源利用效率, 有针对性地加强污染物排放控制和环境风险防控, 解决生态环境质量不达标、生态环境风险突出等问题, 制定差别化的生态环境准入要求。对环境质量不达标区域, 提出污染物削减比例要求; 对环境质量达标区域, 提出允许排放量建议指标。

3、一般管控单元。除优先保护单元和重点管控单元之外的其他区域, 全市共划分一般管控单元 6 个。执行区域生态环境保护的基本要求, 重点加强农业、生活等领域污染治理。

本项目位于绵阳市游仙区游仙街道石垭村 2 社, 根据绵阳市环境管

控单元划分（详见图 1.2-2），项目属于重点管控区。需有针对性地加强污染物排放控制和环境风险防控，对环境质量达标区域，提出允许排放量建议指标。项目与绵阳市及游仙区“三线一单”符合性分析见表 1.2-4。

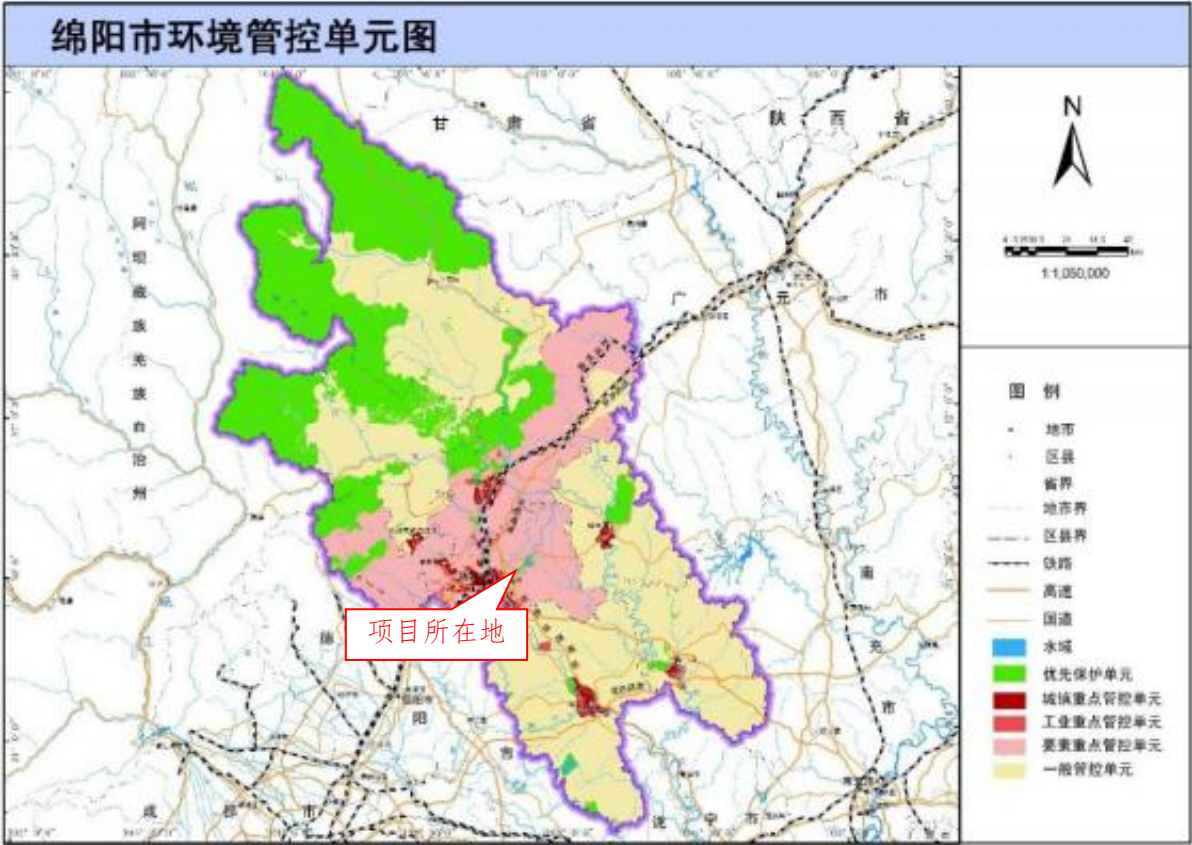


图 1.2-2 绵阳市环境管控单元图

表 1.2-4 绵阳市及游仙区生态环境管控要求及本项目符合性分析

序号	区域	生态环境管控要求	本项目情况	符合性
1	重点管控单元	应不断提升资源利用效率，有针对地加强污染物排放控制和环境风险防控，解决生态环境质量不达标、生态环境风险突出等问题，制定差别化的生态环境准入要求。对环境质量不达标区域，提出污染物削减比例要求；对环境质量达标区域，提出允许排放量建议指标。	本项目为质子治疗系统生产销售项目，运营期主要环境污染物为电离辐射与放射性“三废”。质子治疗系统机房设有混凝土屏蔽，经分析屏蔽体设计满足相关辐射防护要求，所致职业人员受照剂量低于GB18871规定的职业照射剂量限值和本报告提出的职业照射剂量管理约束值。活化气体等气载流出物经30m高排气筒排放，外排气载流出物所致周边评价范围内公众剂量满足GB18871规定的公众剂量限值和本报告提出的公众剂量管理约束值。放射性废水经暂存衰变经监测达标后排入所在核医疗健康产业园园区污水处理厂处理。放射性固废集中收集交有资质单位处置。各类污染物经治理后对环境影影响较小。	符合

2	绵阳市	电子信息行业引入严格执行其行业资源环境绩效指标准入要求。统筹城区发展与园区的关系，优化园区布局，严控城市上风向引入大气污染物排放量大的企业，推进城区以及布局不合理的高污染、高能耗企业退城入园。	本项目为质子治疗系统生产销售项目，属于《国民经济行业分类》（GB/T4754-2017）中“ 医疗诊断、监护及治疗设备制造 C3581 ”，项目选址位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区的生产组团。根据《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园的青龙山北片区规划（初稿）》，该片区以放射性药物研发生产、 核医疗设备制造 、核测控装备、无损检测等相关核技术应用产业为主导产业。本项目符合产业园青龙山北片区主导产业定位，且属于产业园青龙山北片区提前启动的项目之一。	符合
3		新建、改建、扩建增加重点重金属（汞、镉、铬、铅、砷）污染物排放的建设项目需满足区域重点重金属总量管控要求，对电子信息、化工等涉重企业重点重金属执行严格的准入条件，严控环境风险	本项目为质子治疗系统生产销售项目，无重金属（汞、镉、铬、铅、砷）污染物排放。	符合
4		严格控制高污染、高能耗项目；严格执行能源消费总量和强度双控制度，严格执行煤炭消费总量控制要求。	本项目不属于高污染、高耗能项目。项目不涉及使用高污染燃料。	符合
5		优化调整产业结构，严格生态环境准入要求。	本项目为质子治疗系统生产销售项目，属于《产业结构调整指导目录（2019年本）》中第六项“核能”中第六条“同位素、 加速器 及辐照应用技术开发”，属于国家鼓励类产业，符合国家当前产业发展政策。	符合
6	游仙区	统筹城区发展与园区的关系，优化园区布局，引导工业园区及城市发展方向，推动城市建成区内企业“退城入园”，严格控制园外企业无序扩张。	本项目厂址位于四川省绵阳市游仙区游仙街道石垭村二社。根据《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园的青龙山北片区规划（初稿）》，该片区以放射性药物研发生产、 核医疗设备制造 、核测控装备、无损检测等相关核技术应用产业为主导产业。本项目为质子治疗系统生产销售项目，符合该片区主导产业定位，属于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区提前启动的项目之一。	符合
7		统筹涪江、魏城河、芙蓉溪等流域水资源、水生态、水环境治理防护，加强农业面源污染治理，严格控制化肥农药使用量	本项目放射性废水经暂存衰变达标后，进入园区生产污水管网汇入健康产业园（青龙山北片区）规划建设的园区污水处理厂处理达标后，于绵梓路接入市政污水管网；生活污水进入园区生活污水管网，经园区污水处理厂泵站泵送至绵梓路接入市政污水管网，上述废水最终都进入塘汛污水处理厂处理达标排放。	/

8	加强重点时段、重点区域大气污染联防联控，以 PM2.5 和臭氧污染协同控制为重点，全面开展 VOCs 治理，强化燃煤、扬尘、机动车移动源整治。	本项目 1#厂房气载流出物经 30m 高排气筒排放。经分析，处理后外排放射性气载流出物所致周边评价范围内公众剂量满足 GB18871 规定的公众剂量限值和本报告提出的公众剂量管理约束值；臭氧排放符合《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准限值。2#厂房内焊接烟气、VOCs 经净化后，由厂房 15m 高排气筒排放；焊接烟气排放符合《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准限值；VOCs 排放符合《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》（DB51/2377-2017）表 3 “第二阶段排气筒挥发性有机物排放限值（常规控制污染物项目）”标准限值。	/
9	加快构建生态安全屏障，构建城乡一体、全域覆盖、通道连续、生物多样、功能丰富的游仙区绿化体系，加强生物多样性保护。	本项目选址不占林地，厂址区域以人工植被为主，项目建成后厂区绿地面积 2285.73m ² ，绿化率 12.5%。	/
10	加强涪江良好水体保护，严格控制涪江流域水环境风险突出项目。	本项目放射性废水经暂存衰变达标后，进入园区生产污水管网汇入健康产业园（青龙山北片区）规划建设的园区污水处理厂处理达标后，于绵梓路接入市政污水管网；生活污水进入园区生活污水管网，经园区污水处理厂泵站泵送至绵梓路接入市政污水管网，上述废水最终都进入塘汛污水处理厂处理达标排放，对最终受纳水体涪江影响轻微。	符合

环境准入负面清单是基于生态保护红线、环境质量底线和资源利用上线，以清单方式列出的禁止、限制等差别化环境准入条件和要求。根据《四川省生态保护红线实施意见》（川府发〔2018〕24 号），由于本项目所经区域未进入绵阳市生态保护红线区，根据《四川省国家重点生态功能区产业准入负面清单（第一批）（试行）》、《四川省国家重点生态功能区产业准入负面清单（第二批）（试行）》，项目不在四川省国家重点生态功能区产业准入负面清单内。

1.2.7.3 与《长江经济带战略环境评价四川省绵阳市“三线一单”生态环境分区管控优化完善研究报告》符合性分析

根据项目行业类别，拟选址经纬度坐标，通过查询四川省生态环境厅“三线一单”应用平台，本项目共涉及环境管控单元 3 个，涉及到管

控单元见下表。

表 1.2-5 项目涉及环境管控单元一览表

环境管控单元编码	环境管控单元名称	所属城市	所属区县	准入清单类型	管控类型
ZH51070420003	要素重点管控单元	绵阳市	游仙区	环境综合	环境综合管控单元要素重点管控单元
YS5107043210001	涪江-游仙区-丰谷-控制单元	绵阳市	游仙区	水环境分区	水环境一般管控区
YS5107042320003	游仙区大气环境布局敏感重点管控区	绵阳市	游仙区	大气环境分区	大气环境布局敏感重点管控区

“三线一单” 符合性分析

按照相关管理要求，本系统查询结果仅供参考。

项目 **质子医疗装备制造基地项目** 所属医疗诊断、监护及治疗设备制造行业，共涉及3个管控单元，若需要查看管控要求，请点击右侧导出按钮，导出管控要求进行查看。

序号	管控单元编码	管控单元名称	所属城市	所属区县	准入清单类型	管控类型
1	ZH51070420003	要素重点管控单元	绵阳市	游仙区	环境综合	环境综合管控单元要素重点管控单元
2	YS5107043210001	涪江-游仙区-丰谷-控制单元	绵阳市	游仙区	水环境分区	水环境一般管控区
3	YS5107042320003	游仙区大气环境布局敏感重点管...	绵阳市	游仙区	大气环境分区	大气环境布局敏感重点管控区

结合该平台导出的《四川省“三线一单”符合性分析报告》与《长江经济带战略环境评价四川省绵阳市“三线一单”生态环境分区管控优化完善研究报告》，本项目与各环境管控单元符合性分析如下。

表 1.2-6 生态环境准入清单

“三线一单”具体要求			本项目	符合性分析
类别		对应管控要求		
环境综合管控单元 要素重点管控单元 -ZH51070420003- 要素重点管控单元	普适性清单 管控要求	空间布局约束	/	/
		污染物排放管控 允许排放量要求 暂无 现有源提标升级改造： 加快现有乡镇污水处理设施升级改造，按要求达《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标后排放； 火电、水泥、钢铁等行业按相关要求推进大气污染物超低排放和深度治理； 砖瓦行业实施脱硫、除尘升级改造，污染物排放达到《砖瓦工业大气污染物排放标准》相关要求； 其他污染物排放管控要求： 新增源排放标准限制：新、改、扩建工业项目全面执行大气污染物特别排放限值； 污染物排放绩效水平准入要求：-加快现有乡镇污水处理设施升级改造，到 2025 年底按要求达《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标或相关标准后排放，农田灌溉用水满足《农田灌溉水质标准》（GB 5084）； 至 2022 年底，基本实现乡镇污水处理设施全覆盖，配套建设污水收集管网，乡镇污水处理率达到 65%； 到 2025 年，矿山规模结构及开发利用布局趋于合理，开采矿山向集约化、大型化发展，整合资源开采的格局初步形成； 大中型矿山基本达到绿色矿山标准，小型矿山绿色矿山比例不低于 80%； 新、改扩建规模化畜禽养殖场（小区）要实施雨污分流、粪便污水资源化利用； 至 2025 年，规模化畜禽养殖场（小区）粪污处理设施装备配套率达到 95%以上，粪污综合利用率达到 80%以上，大型	质子治疗系统调试区域采用独立排风方式，排气筒高度 30m，外排气载流出物所致周边评价范围内公众剂量满足 GB18871 规定的公众剂量限值和本报告提出的公众剂量管理约束值。放射性废水经暂存衰变经监测达标后排入所在核医疗健康产业园园区污水处理厂处理；放射性固废集中收集，交有资质单位处置。各类污染物经治理后对环境的影响较小。	符合

			规模养殖场粪污处理设施装备配套率达到 100%，畜禽粪污基本实现资源化利用； 散养密集区要实行畜禽粪便污水分户收集、集中处理利用； 屠宰项目必须配套污水处理设施或进入城市污水管网； 大气污染物排放执行特别排放限制； 到 2023 年底，建制镇生活垃圾收转运处置体系基本实现全覆盖； 主要农作物化肥、农药使用量实现零增长，化肥利用率保持在 40%以上，测土配方施肥技术推广覆盖率保持在 90%以上，农作物秸秆综合利用率保持在 90%以上，控制农村面源污染，采取灌排分离等措施控制农田氮磷流失； 2030 年，涪江流域水总量控制在 41.16 亿 m³ 以内，COD 排放总量限制在 3.61 万 t/a 内、NH₃-N 排放总量限制在 0.41 万 t/a 内； 全面推进涪江流域水环境保护工作，确保流域相关控制断面水质达标； 全面推进流域水生生态保护及修复工作；		
		环境风险防控	联防联控要求： 涪江流域干流建设流域突发环境事件监控预警体系； 其他环境风险防控要求： 企业环境风险防控要求：-工业企业退出用地，须经评估、修复满足相应用地功能后，方可改变用途； 对拟收回土地使用权的有色金属矿采选、有色金属冶炼、石油加工、化工、焦化、电镀、制革、天然（页岩）气开采、铅蓄电池、汽车制造、农药、危废处置、电子拆解等行业企业用地，以及用途拟变更为居住和商业、学校、医疗、养老机构等公共设施的上述企业用地，以及由重度污染农用地转为的城镇建设用地，开展土壤环境状况调查评估； 加强“散乱污”企业环境风险防控； 用地环境风险防控要求：严禁将城镇生活垃圾、污泥、工业废物直接用作肥料，禁止处理不达标的污泥进入耕地；	本项目设计有辐射屏蔽措施、气载流出物排放设施、放射性废液和放射性固废收集暂存设施，采取上述措施并加强管理的情况下可避免辐射事故发生。	符合

		禁止在农用地排放、倾倒、使用污泥、清淤底泥、尾矿（渣）等可能对土壤造成污染的固体废物； 禁止在农用地排放、倾倒、使用污泥、清淤底泥、尾矿（渣）等可能对土壤造成污染的固体废物； 严格控制林地、草地、园地的农药使用量，禁止使用高毒、高残留农药；		
--	--	---	--	--

		资源开发效率	水资源利用总量要求： 到 2025 年完成流域内大型灌区续建配套和节水改造任务，农田灌溉水有效利用系数提高到 0.52 以上； 到 2030 年，节水工程灌溉面积占农田灌溉面积的比例达到 70%以上，通过灌区节水改造等工程节水措施，70%的节水量用于改善现有灌区和新增灌溉面积，约 20%用于改善生态环境用水，约 10%的数量用于支持工业及城镇生活用水； 地下水开采要求： 绵阳市 2025 年地下水开采控制量以省市下发指标为准； 能源利用总量及效率要求： 推进清洁能源的推广使用，全面推进散煤清洁化整治； 禁止新建每小时 10 蒸吨以下的燃煤锅炉及其他燃煤设施； 禁止焚烧秸秆和垃圾，到 2025 年底，秸秆综合利用率达到 86%以； 禁燃区要求： 禁燃区内任何单位不得新建、改建、扩建任何高污染燃料燃用设施，不得将其他燃料燃用设施改造为高污染燃料燃用设施； 高污染燃料销售单位应按要求逐步取消禁燃区内的销售网点； 对于现有的高污染燃料燃用设施，有关单位和个人应当按照规定予以拆除或者改用电、天然气、生物质成型燃料等清洁能源； 对逾期继续使用高污染燃料的，各县市区政府、各园区管委会要依法依规查处； 其他资源利用效率要求：/	本项目不涉及地下水开采，用水由市政给水管网供给且用水量小。项目不涉及使用高污染燃料。	符合
	单元级清单 管控要求	空间布局约束	禁止开发建设活动的要求 同要素重点管控单元普适性管控要求 限制开发建设活动的要求	本项目厂址位于四川省绵阳市游仙区游仙街道石垭村二社。根据《中国（绵阳）科技城核医疗健康产	符合

			同要素重点管控单元普适性管控要求 允许开发建设活动的要求 不符合空间布局要求活动的退出要求 位于城镇空间外的工业园区外工业企业：具有合法手续的企业，且污染物排放及环境风险满足管理要求的企业，可继续保留，要求污染物排放只降不增，并进一步加强日常环保监管；严控新（扩）建水泥厂、危废焚烧、陶瓷厂等以大气污染为主的企业；不具备合法手续，或污染物排放超标、环境风险不可控的企业，限期进行整改提升，通过环保、安全、工艺装备升级等落实整改措施并达到相关标准实现合法生产，整改后仍不能达到要求的，属地政府应按相关要求责令关停并退出；-其他同要素重点管控单元普适性管控要求；其他空间布局约束要求	业园的青龙山北片区规划（初稿）》，该片区以放射性药物研发生产、核医疗设备制造、核测控装备、无损检测等相关核技术应用产业为主导产业。本项目为核医疗设备制造，符合该片区主导产业定位，属于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区提前启动的项目之一。	符合
		污染物排放管控	现有源提标升级改造 全面完成芙蓉溪、魏城河等重点小流域综合整治，芙蓉溪、魏城河环境质量优良比例达到 100%，建成区饮用水水源水质达标率提高到 100%；其他同要素重点普适性管控要求；新增源等量或倍量替代 同要素重点管控单元普适性管控要求 新增源排放标准限值 同要素重点管控单元普适性管控要求 污染物排放绩效水平准入要求 到 2025 年，乡镇污水处理率达到 92%。村庄生活污水处理率到达 40%以上；到 2030 年，实现农村生活污水处理率达到 70%；农膜残留回收率达到 80%，配方肥推广率达 92%以上。规模化养殖场畜禽粪便处理率达到 90%。到 2025 年，农村生活垃圾定点存放清运率 90%，无害化处理率达到 80%	外排气载流出物所致周边评价范围内公众剂量满足 GB18871 规定的公众剂量限值和本报告提出的公众剂量管理约束值；放射性废水经暂存衰变经监测达标后排入所在核医疗健康产业园园区污水处理厂处理；放射性固废集中收集，交有资质单位处置。各类污染物经治理后对环境的影响较小。	

			以上。其他同要素重点普适性管控要求。 其他污染物排放管控要求		
		环境风险防控	严格管控类农用地管控要求 同要素重点管控单元普适性管控要求 安全利用类农用地管控要求 到 2025 年，科学施肥水平明显提升，主要农作物测土配方施肥技术推广覆盖率达到 90%以上，主要农作物肥料利用率达到 40%以上。力争全区农作物病虫害绿色防控技术覆盖率达到 30%以上。其他同要素重点管控单元普适性管控要求 污染地块管控要求 同要素重点管控单元普适性管控要求 园区环境风险防控要求 企业环境风险防控要求 同要素重点管控单元普适性管控要求 其他环境风险防控要求	/	/
		资源开发效率要求	水资源利用效率要求 同要素重点管控单元普适性管控要求 地下水开采要求 同要素重点管控单元普适性管控要求 能源利用效率要求 秸秆资源化利用率达 95%；其他同要素重点单元普适性管控要求 其他资源利用效率要求	/	/
水环境一般管控区 -YS5107043210001- 涪江-游仙区-丰谷- 控制单元	单元级清单 管控要求	空间布局约束	禁止开发建设活动的要求 涪江-游仙区-丰谷-控制单元 限制开发建设活动的要求 允许开发建设活动的要求	/	/

			不符合空间布局要求活动的退出要求 其他空间布局约束要求		
		污染物排放管控	城镇污水污染控制措施要求 工业废水污染控制措施要求 农业面源水污染控制措施要求	/	/
		环境风险防控	加强环境风险防范，坚持预防为主，构建以企业为主体的环境风险防控体系，优化产业布局，加强协调联动，提升应急救援能力；严格环境风险源头防控，加强涉重金属、危险废物、危化品等重点企业环境风险评估；强化工业、企业集中分布区环境风险管控，建设相应的防护工程	本项目设计有辐射屏蔽措施、气载流出物排放设施、放射性废液和放射性固废收集暂存设施，采取上述措施并加强管理的情况下可避免辐射事故发生。	符合
		资源开发效率要求	/	/	/
大气环境布局敏感 重点管控区 -YS5107042320003- 游仙区大气环境布局敏感重点管控区	单元级清单 管控要求	空间布局约束	禁止开发建设活动的要求 限制开发建设活动的要求 允许开发建设活动的要求 不符合空间布局要求活动的退出要求 其他空间布局约束要求	/	/
		污染物排放管控	大气环境质量执行标准 《环境空气质量标准》（GB3095-2012）：二级 区域大气污染物削减/替代要求 新增大气污染物排放的建设项目实施总量削减替代。 燃煤和其他能源大气污染控制要求 工业废气污染控制要求 机动车船大气污染控制要求 扬尘污染控制要求 农业生产经营活动大气污染控制要求 重点行业企业专项治理要求	本项目建成投运后废气主要为放射性气载流出物，不涉及总量控制污染物。	符合

			其他大气污染物排放管控要求		
		环境风险防控		/	/
		资源开发效率要求		/	/

1.2.8 项目外环境关系及选址合理性分析

1、项目外环境关系

本项目厂址位于绵阳市游仙区游仙街道石垭村二社（东经 104.804914°、北纬 31.535766°）。结合现场踏勘，本项目周边 500m 评价范围内外环境关系如下表。

表 1.2-7 项目外环境关系

名称	方位	距离	性质	备注
核测控装备研发制造基地项目	北	15~95m	企业	规划待建，目前为空地
绵梓路	北	200m	国道	/
石垭村二社居民 ^①	东北	200m	分散居民	待拆迁
某科研基地	西北	320m	科研基地	/
某国家专项工程预留用地	北	240~700m	科研基地	目前，该预留用地内有待拆石垭村一社居民，距项目厂界最近约 52m
科技城核医疗健康产业园规划用地	东	15-270m	规划建设用地	规划待建，目前为空地
芙蓉溪	东	320m	河流	/
玉泉村	东	440-1100m	分散居民	约 1200 人
中广核医用核素生产项目	东	紧邻	企业	规划待建，100 人

注：项目选址位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园生产组团内，根据绵游府函〔2021〕201 号文，产业园生产组团内的拆迁工作由绵阳市游仙区街道办事处负责，预计于 2022 年 12 月底完成全部拆迁工作。

2、项目选址合理性分析

（1）与园区功能及配套设施的相容性

本项目厂址地处中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园中的青龙山北片区。根据园区规划，中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园的青龙山北片区规划重点发展放射性同位素研发及应用、放射性药物研发及生产和放射医疗设备研发设计及制造等核技术产业。本项目属于放射医疗设备研发设计及制造，为园区主导产业之一，项目符合园区的产业规划。

本项目营运期间产生的生活污水经园区生活污水管网收集后经园区污水处理厂提升泵站泵送至绵阳梓路市政污水管网，最终进入塘汛污水处理厂处理；项目产生的放射性生产废水经暂存衰变达标（总 $\alpha \leq 1\text{Bq/L}$ 、总 $\beta \leq 10\text{Bq/L}$ ）后，与非放生产废水一并排入园区规划建设污水处理厂进行处理，之后通过提升泵站泵送至绵阳梓路市政污水管网，最终进入塘汛污水处理厂处理。同时，项目可充分依托园区配套的给排水、供电、供气、道路等基础设施。

目前，核医疗健康产业园污水处理厂正在开展规划设计，处理厂将根据受纳片区入驻企业产生的生产废水类型特点设计相应的污水处理工艺，并将另行开展环评工作。根据绵阳市游仙区人民政府出具的污水处理厂完成时限的函（绵游府函〔2021〕248号），园区污水处理厂预计2023年12月完成竣工验收并投入运营。本项目计划于2024年1月完成建设，届时所依托的下游污水处理厂均已投运，污水可得到有效处理。

综上所述，本项目符合园区功能规划，园区配套设施能满足项目需要。

（2）与周边环境关系的相容性

①与周边企业相容性分析

经调查，项目周边已建成或规划引入的企事业单位以科研院所、放射性核素药物研发生产、核医疗设备制造、核测控装备等相关核技术应用产业为主，对本项目的建设无明显环境制约影响。项目为放射医疗设备研发设计及制造项目，与周边企业同属于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划的主导产业。因此，项目与周边企业相容。

②与周边常驻居民相容性分析

本项目为放射医疗设备研发设计及制造项目，运营期主要环境污染物为电离辐射与放射性“三废”。质子治疗系统机房设有混凝土屏蔽，经分析屏蔽体设计满足相关辐射防护要求，所致职业人员受照剂量低于GB18871规定的职业照射剂量限值和本报告提出的职业照射剂量管理约束值。加速器机房产生的活化气体经通排风系统集中排放，外排气载流出物所致周边评价范围内公众剂量满足GB18871规定的公众剂量限值和本报告提出的公众剂量管理约束值。放射性废水经暂存衰变和监测达标后排入所在核医疗健康产业园园区污水处理厂处理；放射性固废收集后交有资质单位处置。因此，项目投运后各类污染物经有效治理后排放，所致周边居民剂量满足相关标准限值要求，与周边常驻居民相容。

综上所述，本项目与周边环境相容，采取的环保治理措施可保证污染物达标排放，对周边环境影响轻微，从辐射防护和环境保护角度而言，本项目选址合理可行。

1.3 编制依据

1.3.1 国家相关法律、法规

- (1)《中华人民共和国环境保护法》，2015年1月1日实施；
- (2)《中华人民共和国环境影响评价法》，2018年12月29日修订实施；
- (3)《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003年10月1日实施；
- (4)《中华人民共和国大气污染防治法》，2018年10月26日修订实施；
- (5)《中华人民共和国水污染防治法》，2018年1月1日实施；

- (6) 《中华人民共和国噪声污染防治法》，2022 年 6 月 5 日修订实施；
- (7) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，2020 年 9 月 1 日修订实施。

1.3.2 国家相关行政法规、条例

- (1) 《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，2019 年 3 月 2 日国务院令第 709 号修订实施；
- (2) 《放射性废物安全管理条例》，国务院令第 612 号，2011 年 12 月 20 日实施；
- (3) 《放射性物品运输安全管理条例》，国务院令第 562 号，2010 年 1 月 1 日实施；
- (4) 《建设项目环境保护管理条例》，（根据 2017 年 7 月 10 日国务院令第 682 号《国务院关于修改〈建设项目环境保护管理条例〉的决定》修订），2017 年 10 月 1 日实施；
- (5) 《危险化学品安全管理条例》，国务院令第 645 号，2013 年 12 月 7 日修订实施。

1.3.3 部门规章、规范性文件

- (1) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环境保护部 18 号令，2011 年 5 月 1 日实施；
- (2) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，2006 年 1 月 18 日国家环境保护总局令第 31 号公布，2021 年 1 月 4 日生态环境部 20 号令修订实施；
- (3) 《建设项目环境影响评价分类管理目录（2021 版）》，生态环境部令

第 16 号，2021 年 1 月 1 日实施；

(4)《产业结构调整指导目录（2019 年本，2021 年修订）》，中华人民共和国国家发展和改革委员会令 2021 年第 49 号，2021 年 12 月 30 日起施行；

(5) 关于发布《放射性废物分类》的公告，环保部公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月 1 日起实施；

(6) 环境保护部办公厅《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》，环办辐射函〔2016〕430 号；

(7)《放射性物品运输安全许可管理办法》（2019 年修正本），生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日修订施行；

(8)《放射性物品运输安全监督管理办法》，环保部令第 38 号，2016 年 5 月 1 日起施行；

(9)《放射性物品道路运输管理规定》（2016 年修正版），交通运输部令 2016 年第 71 号，2016 年 9 月 2 日发布；

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

(11)《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》，国核安发〔2015〕25 号，国家核安全局、环境保护部办公厅 2015 年 2 月 27 日印发实施。

1.3.4 地方环境法规和政府规章文件

(1)《四川省环境保护条例》，2017 年 9 月 22 日四川省第十二届人民代表大会常务委员会第三十六次会议通过；

(2)《四川省辐射污染防治条例》，2016 年 3 月 29 日四川省第十二届人民代表大会常务委员会第二十四次会议通过；

(3)《四川省环境保护厅关于进一步加强辐射工作人员个人剂量管理的通知》，川环办〔2010〕49 号，2010 年 3 月 29 日实施；

(4)《关于印发<四川省核技术利用辐射安全监督检查大纲（2016）>的通知》四川省环境保护厅，川环办发〔2016〕1400 号。

1.3.5 技术规范和标准

(1)《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)；

(2)《环境空气质量标准》(GB3095-2012)；

(3)《声环境质量标准》(GB3096-2008)；

(4)《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)；

(5)《污水综合排放标准》(GB8978-1996)；

(6)《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)；

(7)《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)；

(8)《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)；

(9)《放射性废物管理规定》(GB14500-2002)；

(10)《低、中水平放射性固体废物暂时存储规定》(GB11928-1989)；

(11)《放射性物品安全运输规程》(GB11806-2019)；

(12)《放射性物质运输包装质量保证》(GB/T15219-2009)；

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

(14)《危险废物贮存污染控制标准》(GB18597-2001)(2013 年修订)；

- (15)《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021);
- (20)《环境影响评价技术导则 总纲》(HJ 2.1-2016);
- (21)《环境影响评价技术导则 地面水环境》(HJ 2.3-2018);
- (22)《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 2.2-2018);
- (23)《环境影响评价技术导则 声环境》(HJ 2.4-2021);
- (24)《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ610-2016);
- (25)《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ 169-2018);
- (26)《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ/T10.1-2016);
- (28)《公众成员的放射性核素年摄入量限值》(WST613-2018);
- (29)《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599-2020);
- (30)《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》(GBZ/T201.1-2007)
- (31)《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》(GBZT 201.5-2015);
- (32)《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021);
- (33)《测量、控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第 1 部分通用要求》(GBT18268.1-2010/IEC61326-1);
- (34)《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020);
- (35)《放射诊断放射防护要求》(GBZ 130-2020);
- (36)《放射工作人员健康要求及监护规范》(GBZ98-2020);

(37)《低、中水平放射性固体废物包安全标准》(GB 12711-2018)。

1.3.6 与项目有关的文献、资料

(1)项目立项备案表,备案号“川投资备【2020-510704-35-03-525604】FGQB-0418”;

(2)《绵阳质子医疗装备制造基地项目可行性研究报告》,深圳中广核工程设计有限公司,2021年7月;

(3)《质子医疗装备制造项目辐射防护设计报告(V3-20220407)》(深圳中广核工程设计有限公司);

(4)《质子重离子加速器治疗系统环境影响评价讨论》(顾建刚);

(5)《肿瘤放射物理学》(胡逸民著);

(6)《质子治疗技术基础》(郁庆长,罗正明等著,北京原子能出版社,1999);

(7)《质子和重离子治疗及其装置》(刘世耀);

(8)《安全系列报告 19》,国际原子能委员会(IAEA);

(9)《辐射防护手册》(第一分册—辐射源与屏蔽,原子能出版社,1987);

(10)《实用辐射安全手册》(丛慧玲,北京:原子能出版社.2007.8);

(11)《医学辐射防护学》(强永刚,北京:高等教育出版社,第二版);

(12)《高能质子加速器治疗系统应用中的环境安全问题》(刘原中);

(13)其他相关文件资料。

1.4 评价标准

1.4.1 辐射剂量约束值

依据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021)、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》(GBZ/T201.1-2007)、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》(GBZ/T 201.5-2015)、《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)中的相关规定，以及建设单位的设备辐射防护设计资料，本项目各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制限值见下表 1.4- 1。

表 1.4-1 本项目各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制限值 单位：μSv/h

编号	场所名称	屏蔽体外表面 30cm 处剂量率控制限值
1	人员全居留工作场所（居留因子 $T \geq 1/2$ ）：加速器机房控制室。	2.5
2	人员部分和偶然居留场所（居留因子 $T < 1/2$ ）：迷道入口联锁门外、其他辅助作业区域（如电源室、供水系统室等）。	10
3	机房正上方已建、拟建建筑物或机房旁邻近建筑物的高度超过自然辐射源点到机房顶内表面边缘所张立体角区域，机房顶表面和（或）在该立体角区域的高层建筑物中人员驻留处	2.5
	机房顶不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶	100
4	III类医用射线装置生产调试场所（旋转治疗室）	2.5

在此基础上，本次评价于机房外共设置 14 个关注点位置，覆盖工作人员常驻区域及周边人员临时驻留、通过区域，其位置设置及剂量率控制值计算详见下表 1.4-2 及图 1.4-1（红色点位部分）。

表 1.4-2 质子治疗系统区域关注点及设计剂量率限值

序号	区域描述	HJ1198-2021 中 6.1.4 条取值条件	剂量率控制值
1	1#加速器室西侧迷道屏蔽墙厚度 3m 处	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=400\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$
2	1#加速器室西侧迷道外墙	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=400\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$
3	1#加速器室西侧主屏蔽外墙	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=400\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$
4	1#加速器室南侧室外	1) 公众人员居留区域, $H_c=5\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=4\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$4\mu\text{Sv}/\text{h}$
5	2#加速器室南侧室外	1) 公众人员居留区域, $H_c=5\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=4\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$4\mu\text{Sv}/\text{h}$
6	治疗室东侧室外	1) 公众人员居留区域, $H_c=5\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=4\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$4\mu\text{Sv}/\text{h}$
7	治疗室迷道入口	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/4, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=100\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/4, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$
8	辅助设备间	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/8, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=200\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/8, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$
9	2#加速器室迷道入口	1) 辐射工作人员 $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/4, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=100\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/4, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$
10	1#加速器室迷道入口	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/4, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=100\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1/4, $H_{c,\text{max}}=10\mu\text{Sv}/\text{h}$	$10\mu\text{Sv}/\text{h}$
11	控制室	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv}/\text{周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1, 剂量率参考控制水平 $H_{c,d}=25\mu\text{Sv}/\text{h}$; 2) 居留因子 1, $H_{c,\text{max}}=2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$	$2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$
12	1#加速器室房顶	人员无法直接到达区域, 居留因子 1/20 剂量率限值 $100\mu\text{Sv}/\text{h}$ (机房正上方, 人员无法到达)	$100\mu\text{Sv}/\text{h}$
13	2#加速器室房顶	人员无法直接到达区域, 居留因子 1/20 剂量率限值 $100\mu\text{Sv}/\text{h}$ (机房正上方, 人员无法到达)	$100\mu\text{Sv}/\text{h}$
14	治疗室屋顶	人员无法直接到达区域, 居留因子 1/20 剂量率限值 $100\mu\text{Sv}/\text{h}$ (机房正上方, 人员无法到达)	$100\mu\text{Sv}/\text{h}$

表 1.4-3 本项目辐射环境影响评价标准

单位: mSv/a

分类		GB18871-2002 基本限值标准	剂量约束值
职业照射	本项目职业工作人员	20	5
公众照射		1	0.1

1.4.2 放射性废水排放

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》GB18871-2002, 低放废液可以直接排入流量大于 10 倍排放量的普通下水道既每月排放的总活度不超过 $10ALI_{min}$ (年摄入量限值), 每次排放的活度不超过 $1ALI_{min}$ 并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

根据 GB18871-2002 计算的本项目废水中 (设备冷却水) 涉及的主要放射性核素的 ALI_{min} 值见下表 1.4-4。

表 1.4-4 本项目废水中 (设备冷却水) 主要放射性核素的 ALI_{min} 值

编号	核素	ALI_{min} 值 (Bq)
1	H-3	$3.00E+09$
2	Be-7	$7.00E+08$

1.4.3 放射性固废处置

项目正常运行期间, 放射性固废处置执行 GB 11928-1989《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》。

1.4.4 非放射性环境质量和污染物排放标准

1、环境空气质量标准

根据本项目所在区域的大气环境功能区划分, 属二类区 (即城镇规划中确定的居住区、商业交通居民混合区、文化区、一般工业区和农村地区), 执行 GB3095-2012《环境空气质量标准》二级标准, 见表 1.4-5。

表 1.4-5 GB3095-2012 中各项污染物的浓度限值（二级标准）

污染物名称	取值时间	浓度限值, mg/m ³	标准来源
二氧化氮 (NO ₂)	年平均	0.04	GB3095-2012 二级标准
	日平均	0.08	
	1 小时平均	0.20	
臭氧 (O ₃)	日平均	0.16	GB3095-2012 二级标准
	1 小时平均	0.20	

本项目臭氧室内浓度限值按照 GBZ2.1-2019《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》控制 MAC（最高容许浓度），控制值为 0.30mg/m³；外环境质量执行 GB3095-2012《环境空气质量标准》二级标准，浓度限值 0.16 mg/m³。

2、大气污染物排放标准

项目废气主要为空气被电离产生的臭氧、氮氧化物、焊接烟气（颗粒物）及有机废气（VOCs）。氮氧化物、焊接烟气（颗粒物）排放执行 GB16297-1996《大气污染物综合排放标准》排放限值；臭氧排放执行 GB3095-2012《环境空气质量标准》二级标准限值；有机废气（VOCs）执行 DB51/2377-2017《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》表 3“第二阶段排气筒挥发性有机物排放限值（常规控制污染物项目）”标准限值。

3、噪声排放标准

环境噪声排放执行 GB12348-2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》中 3 类标准。

4、固废贮存标准

一般固废临时贮存执行 GB18599-2001《一般工业固体废物贮存、

处置场污染控制标准》；危险废物贮存执行 GB18597-2001《危险废物贮存污染控制标准》。

1.4.5 电磁辐射

本项目加速器高频设备的频率约为 106~500MHz，根据《电磁环境控制限值》（GB8702-2014）确定本项目的电磁场控制限值见表 1.4-6。

表 1.4-6 本项目电磁环境公众暴露控制限值

频率范围 MHz	电场强度 V/m	磁场强度 A/m	磁感应强度 μT	等效平面波功率密度 W/m^2
30~3000	12	0.032	0.04	0.4

1.5 评价范围和保护目标

参照 HJ/T10.1-2016《辐射环境保护管理导则 核技术应用项目环境影响评价文件的内容和格式》中有关“报告书”项目评价范围的相关要求，以及评价范围可根据环境影响的范围适当扩大的规定，本项目评价范围为以质子治疗加速器机房屏蔽体外 500m 范围。

1.5.1 评价目的

通过对本项目的工程分析、项目周围环境放射性水平的调查，经过计算、分析预测评价项目在投入运行后对周围环境和工作人员及公众的影响，论证其采用的辐射防护与环境保护措施的可行性，提出放射性污染防治对策和建议，为建设和管理部门做好辐射环境管理工作提供科学依据。

1.5.2 控制与保护目标

根据项目拟建厂址所在环境现状，在评价范围区域内，除建设单位的相关设施外，周边还存在零散住户、企事业单位等其他人员聚居点。

据此确定本项目辐射影响保护目标为辐射工作人员（职业照射）、其他工作人员（视为公众）、评价范围内的其他人员（视为公众），辐射工作人员所受的职业照射剂量应不大于 5mSv/a，公众所受照射剂量应不大于 0.1mSv/a。

与污染源项相应的环境保护目标和评价因子情况详见表 1.5-1。项目周围 500m 范围内环境敏感目标见表 1.5-2。

表 1.5-1 项目环境保护目标和评价因子

源项类型	评价因子	保护目标	保护要求
质子加速器瞬发辐射（贯穿辐射）	n、 γ 、X 射线	辐射工作人员、其他工作人员	满足辐射工作人员剂量不大于 5mSv/a，公众所受照射剂量应不大于 0.1mSv/a。
质子加速器感生放射性	感生放射性气体	辐射工作人员、其他工作人员	辐射工作场所内利用通风系统保障放射性气体活度浓度低于控制水平；设置合理的通排风量及 30m 高排气筒，排放的感生放射性气体对周边公众所造成的剂量低于本项目给出的公众剂量约束值
	活化的设备冷却水		设置独立冷却水收集池，分格收集贮存 180d，经监测达标后排放。
	加速器活化部件等		满足《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》(GB 11928-1989)要求，妥善处理。
非放有害气体	臭氧	工作场所及周围环境空气	室内浓度满足 GBZ2.1-2019 的要求，排放浓度满足 GB3095-2012 的要求

表 1.5-2 项目周围 500m 范围内环境敏感目标分布情况

敏感目标名称		方位	距离（m）	居留人数	保护要求
职业照射	本项目辐射工作人员	本项目辐射工作场所	/	40 人	5mSv/a
公众照射	某科研基地	北	320	约 300 人	0.1mSv/a
	中广核医用核素项目（规划建设）	东	紧邻	100 人	
	中广核测控设备（规划建设）	北	80	50 人	
	新桥镇桩子村 1 队	东北	500	约 200 人	
	玉泉村	东	340	约 1200 人	

	周边临时通过人员	/	0-500	200 人次	
--	----------	---	-------	--------	--

注：据调查，项目东北厂界外 240~700m 为某国家专项工程预留用地，该用地内的拆迁于 2021 年 12 月底完成，拆迁协议见附件。项目选址位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园生产组团内，根据绵游府函〔2021〕201 号文，生产组团内的拆迁工预计于 2022 年 12 月底完成，协议见附件。而本项目预计于 2024 年 1 月建成。

1.6 安全责任划分

本项目为质子治疗系统、CBCT 图像引导系统、二维图像系统的生产、使用与销售（含建造）项目，涉及中广核医疗公司、供货方（IBA 公司等厂商）、亿比亚公司、用户方（医院）、运输单位等五个方面，其各自的安全责任划分如下：

1、中广核医疗公司：作为质子治疗系统、CBCT 图像引导系统、二维图像系统的生产、使用及技术维护方——中广核医疗科技（绵阳）有限公司，负责：1）质子治疗系统、CBCT 图像引导系统、二维图像系统等在中国地区的销售；2）上述射线装置在绵阳基地的研发、组装、调试；3）上述射线装置在用户单位（医院）使用场所的整机安装调试以及后续的维修维护服务。不参与用户单位在质子治疗系统投入临床使用后进行的运行、调试。因此，其承担上述射线装置生产、销售、安装调试及维修维护过程中的安全责任。

2、供货方（IBA 公司等厂商）：供货方（IBA 公司等厂商）作为质子治疗系统的生产商，主要负责为中广核医疗公司提供质子治疗系统产品部件，不涉及生产、销售、安装调试及维修维护等作业过程。

3、亿比亚公司：亿比亚公司作为 IBA 公司亚太地区全资子公司，中广核科技公司获得 IBA 公司质子治疗系统技术及产品在中国大陆地区独家开发、生产、销售、安装、运营、维修的权利后，不再开展相应

活动，仅为中广核科技公司提供技术指导、培训等服务。

4、用户方（医院）：用户方作为质子治疗系统的使用方，负责提供能够满足相关法规标准要求的辐射工作场所以及安装、调试和维修维护过程中的辐射防护和安全保卫；负责质子治疗系统在投入临床使用后的安全责任。

5、运输单位：中广核医疗科技（绵阳）有限公司或用户方委托有资质的单位负责所其销售的 I、III类射线装置或重要部件的运输工作，并要求相关单位负责对运输过程中的全程监控，委托方与所委托的运输单位共同承担射线装置运输过程中的安全责任。

第二章 自然环境与社会环境状况

2.1 自然环境状况

2.1.1 地理位置

本项目选址于绵阳市游仙区游仙街道石垭村二社（东经 104.804914° 、北纬 31.535766° ），项目地理位置见附图 1。

绵阳市地处四川盆地西北部，涪江中上游地带，北纬 $30^{\circ}42' \sim 33^{\circ}03'$ ，东经 $103^{\circ}45' \sim 105^{\circ}43'$ 。东接南充市，南接遂宁市，西南界德阳市，西靠阿坝藏族自治州，北抵甘肃省，东北与广元市为邻。全市幅员面积 20249km^2 。

游仙区位于绵阳市的腹心地带，是 1992 年底经国务院批准，撤销原绵阳市中区，而分设的一个隶属于绵阳市的县级行政区，游仙区位于四川盆地西北部边缘丘陵地带，地理坐标介于北纬 $30^{\circ}20' \sim 31^{\circ}43'$ ，东经 $104^{\circ}40' \sim 105^{\circ}09'$ 之间。东接梓潼县、南临三台县、西接涪城区、北靠江油市，是绵阳市的重要组成部分。东西长约 43 公里，南北宽 42 公里。宝成铁路和川陕、绵梓、绵盐等高等级公路穿境而过，距成都 127 公里。

2.1.2 地形、地貌、地质

（1）地形地貌

绵阳市境内地层发育较齐全，岩石建造复杂，岩性岩相变化大；多期多次构造继承、干扰、迭加，构造形态极复杂；晚期岩浆活动及区域变质作用微弱；沉积成矿作用强，内生矿化弱。绵阳市处于龙门山前缘向四川盆地过渡带。该区域地跨摩天岭、龙门山及四川盆地三个地理地

貌单元。北部属摩天岭南缘，南部为盆地边缘山区，中部为龙门山山脉。

绵阳市属于四川盆地盆中丘陵区北部，总的地势呈北高南低，自北而南呈阶梯逐渐降低。东西两面高中间低。中部为河谷冲积平原，两边为高阶地形成的丘状台地或丘陵。区境海拔一般为 500 米至 600 米。地势东北高西南和西部涪江及中部芙蓉溪、魏城河谷较低。最高点在太平乡与柏林镇交界处的旱山庙山顶，海拔 728 米，最低点在玉河镇花碑湾魏城河谷与三台县交界处，海拔 419 米。全市按地貌主要类型分为：山区占 61.00%，丘陵区占 20.40%，平坝区占 18.60%。

游仙区地处四川盆地西北边缘，地势北高南低，海拔高程多在 465m~550m 之间，地形相对切割深度一般在 30m 左右。全区以低山丘陵地形为主，山坡自然陡度在 20° 以内，山体宽厚、沟谷和缓，按成因划分为侵蚀堆积和构造侵蚀堆积两大类型，山间洼地之间有树状水沟连通，侵蚀作用不很强烈。

拟建项目场地原为丘陵地貌，现已场坪，地势较平坦，整体呈西高东低，场地东侧约 320m 为芙蓉溪。根据项目地勘报告，勘探点孔口绝对高程为 486.89~490.30m。

（2）地质

根据项目地勘报告，勘察深度范围内地基土按时代和成因划分为三个工程地质层，即第四系人工填土层（ Q_4^{ml} ）、第四系全新统残坡积层（ Q_4^{el+dl} ）、第四系全新统残坡积（ Q_4^{el+dl} ）、白垩系灌口组泥岩（ K_{2g} ）。地层结构自上而下为：

①第四系全新统人工填土层（ Q_4^{ml} ）

杂填土 1：杂色，成分以粉质粘土、砖块、水泥混凝土、卵石、漂石等为主，夹少量生活垃圾，结构松散，成分混杂，其中硬杂质含量大于 30%。为新近填土，堆填时间小于 3 年。该层在场地内均有分布，层厚 2.00~6.20m，平均厚度 4.36m。

②第四系全新统残坡积层 (Q_4^{el+dl})

粉质粘土 2：黄褐色、灰褐色，可塑-硬塑状，稍有光泽，干强度中等，韧性中等。土体含碎石，土质不均匀。该层在场地内大部分区域分布，层厚 0.60~3.70m，平均厚度 2.29m。

③第四系全新统残坡积层 (Q_4^{el+dl})

粉质粘土 3：褐色、灰褐色，软塑，成份主要以粘粒矿物为主，土体含少量碎石、卵石，物理力学性质较差。该层在场地内仅 CK4 有分布，层厚 2.80m。

④白垩系剑门关组泥岩 (K_{1j})

泥岩 (K_{1j})：棕红色，由石英、长石及少量粘土矿物等碎屑矿物组成，厚—巨层状构造，岩石遇水易软化，脱水易崩解。根据钻孔揭露厚度，按风化程度可分为强风化泥岩和中风化泥岩。

强风化泥岩 4-1：棕红色，强风化，岩层风化强烈，色泽陈旧，风化裂隙较发育，沿裂隙夹土状全风化泥岩，局部含中风化泥岩，岩芯多呈碎块状，少量呈短柱状，岩块用手可捏碎，敲击声闷，岩芯采取率一般为 65% 以上。该层在场地内广泛分布，层厚 1.80~6.90m，平均厚度 3.69m。

中风化泥岩 4-2：棕红色，中风化，风化裂隙发育-轻微发育，色泽

较新鲜，岩体较完整，岩芯以长柱状为主，少量短柱状，岩块用手难折断，岩芯采取率一般为 80%~95%，岩体 RQD=70~80。岩质软，浸水或日晒易软化和崩解，岩体完整程度为较完整，岩体基本质量等级为 V 级。在钻孔 CK05、CK06 区域内中风化岩层有强风化透镜体，层厚 1.8~3.2m，岩芯多呈碎块状，岩块用手可捏碎，敲击声闷，岩芯采取率一般约 60%。该层在场区内广泛分布，本次钻探未揭穿。

(3) 地震

拟建场地位于四川省绵阳市游仙区游仙镇，根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010、2016) 附录 A 的规定，拟建场地抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.10g，设计地震分组为第二组，根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015) 的规定，II 类场地条件下，拟建场地峰值加速度为 0.10g，反应谱特征周期为 0.40s

2.1.3 水文特征

(1) 地表水

绵阳境内河流属嘉陵江水系，涪江是绵阳市的主要河流、嘉陵江右岸的一级支流，发源于岷山东麓松潘县的三舍驿雪宝顶(海拔 5555m)，经平武、江油、绵阳、三台、遂宁、合川注入嘉陵江，全长 670km，流域面积 36400km²。支流呈树枝状，涪江左岸有芙蓉溪、梓江；右岸有平通河、通口河、安昌江等较大支流流入。

涪江：涪江自江油县飞凤山向南流入绵阳市中区，于丰谷镇赵家脊流出区境，此段河长 39.25km，天然落差 63.7m，平均比降 1.6‰，汇水面积 1012.6km²。河床宽阔，最宽可达 1~2km。河床枯水期水面宽

100~200m，洪水期水面宽可达 1000m 以上，属顺直微变型，两岸边有边滩交错分布；心滩发育，并断续出现，水流多转折，叉道较多，河床底部多为砂、砾、卵石，间有基岩出露。据涪江桥水文站实测资料统计，最大流量 $10400\text{m}^3/\text{s}$ ，最小流量 $34.6\text{m}^3/\text{s}$ ，多年平均流量 $280\text{m}^3/\text{s}$ ；枯水期流量约 $100\text{m}^3/\text{s}$ 。

芙蓉溪：系涪江的支流，共有两源，西源为正源名杜家河，东源名战旗河，两源分别发源于江油市新兴、新安、双河 3 乡交界海拔 825 米的垮石岩南坡和东坡，杜家河与战旗河南流至绵阳市游仙区太平场镇北面汇合后始名芙蓉溪，再经太平、凤凰、忠兴、街子、瓦子、新桥、游仙等乡镇，至城区沈家坝南注入涪江。河流全长 90.7km，流域面积 594.9km^2 ，流经市境河段长约 60km，天然落差 63m，平均比降 1.05‰，汇水面积 311.5km^2 。河道蜿蜒曲折，两岸开阔，有 1~2 级阶地发育。芙蓉溪主要水体功能为纳污、灌溉和泄洪等，水质类别为 III 类水域。

根据中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划，本项目产生的生产废水经园区污水处理厂处理后泵送至绵梓路市政污水管网，生活污水经园区污水处理厂泵送至绵梓路市政污水管网，最终进入塘汛污水处理厂处理达标后排入涪江。因此，本项目产生的废水不排入芙蓉溪，最终受纳水体为涪江。

（2）地下水

据区域地质资料及钻探揭示，拟建场地的地下水由上层滞水、基岩裂隙水组成，上层滞水主要富存于填土层及黏性土裂隙中，受大气降水的补给，并通过渗流和蒸发排泄，无统一水位，含水量和水位随季节

变化较大，而岩石裂隙、节理为基岩裂隙水的主要含水层，主要受地下径流补给和排泄，埋藏较深，含水量一般。

勘察期间正值平水期，钻孔内测得水位，埋深 2.20~5.41m，高程 484.01~487.11m，无统一地下水位，地下水位年变化幅度为 2.00~3.00m。

2.1.4 气候特征

绵阳市属北亚热带湿润季风气候区，气候温和，四季分明，具有冬长但无严寒，无霜期长（年平均在 253~301 天之间）；夏热但无酷暑，春旱、秋凉的特点。全年都适于农作物生长。年平均气温 14.7~17.3℃，年平均日照时数 929.7~1391.4 小时。雨量充沛，年降雨量 825~1417mm，但季节分配不均，主要集中在 6~9 月份，占全年降雨量的 76%，11 月~翌年 2 月降雨量仅为 5%，形成冬春少雨多旱、初夏干旱频繁、立夏西部多涝、东部旱涝交错的气候特征。主要参数如下：

多年平均气温：	16.3℃
多年极端最高气温：	39.4℃
多年极端最低气温：	-4.5℃
多年平均日照时数：	1298.1 小时
全年无霜期：	272 天
多年平均相对湿度	79%
多年平均降水量	963.2mm
常年主导风向	NE
最大风速	15.7m/s，
多年平均风速	1.1 米/秒
多年静风风频	49%

2.1.5 土壤资源

游仙区 90%的土地面积的母质属白垩系城墙岩群剑阁组紫色砂质页岩母质。岩层 由黄色砂岩与紫色泥岩相间组成，多呈水平状。因此丘陵地区从坡脚到坡顶的土地多是梯地。该类母质形成的土壤为紫色土壤类型，富含钙质，土壤中呈中性至微碱性，砂岩裸露多的地方质地较轻，黄砂岩裸露的地方土壤呈微酸性。

2.1.6 矿产资源

绵阳自然资源丰富，全境水能总量 293.28 万千瓦，可开发水能 138.35 万千瓦。天然气储量 100 亿立方米，有铁、金、铝、铜、煤、铅、锌、钨、锰、锡、铂、汞、银、磷、石灰石、石英石、重晶石、石油、天然气、大理石、油页岩、玻璃砂岩、耐火粘土、膨润土、高岭土、方解石、白圣、石棉、水晶、萤石等有工业开采价值的矿产资源 57 种，已有 26 种矿产探明储量，已开发利用的矿产 21 种。开采价值大、储量居四川重要地位的共 15 种。其中黄金、锰、熔剂白云岩、膨润土的探明储量居全省首位；重晶石、玻璃砂岩居第二位；天然气、水泥灰岩、水泥配料、铸型砂居第三位；熔剂灰岩列第四位，磷块岩居第六位。有矿产地 335 处,其中黑色金属 73 处，贵金属 69 处，燃料矿产 13 处，非金属矿产 155 处;全市各类矿产具有一定工业矿床规模的产地共 74 处：其中黑色金属 17 处，有色金属 4 处，贵金属 14 处，燃料矿产 4 处，非金属矿产 35 处。

经调查，项目用地区域内无矿产资源存储。

2.1.7 动植物资源

绵阳生物多样性丰富，自然植被主要林相为马尾松木林，以及次生灌丛和草丛。乔木以马尾松、柏树、青冈为主，灌木以麻栎、栓皮栎、马桑、黄荆为主要代表，主要经济林木是油桐、乌柏、桑、柑橘等。市

境共有林业用地 1562.2 万亩。森林面积 941.08 万亩，森林覆盖率为 36%，现有林地 73 万多公顷。林木总面积量 8136 万立方米。全市有维管束植物 4500 余种，其中主要植物有 2471 种，列入全国植物保护的有珙桐、连香、杜仲、四川红杉、水杉、木青等 39 种。有药用植物 2156 种，其中常用药材 457 种。桔梗、麦冬、附子、枣皮、杜仲、天麻、黄连、党参、银杏、贝母、虫草等数十种优质药材著称中外。木耳等大型真菌和地衣植物、蕨类植物资源丰富。开发区自然植被受人为经济活动影响基本不复存在，取而代之的是农田植被、四旁植被和缓丘植被。区域的植被覆盖率一般，有轻度或微度的水土流失。

绵阳区系代表动物以鼬科和鼠类为主，鸟类以白鹭、斑鸠、家燕、喜鹊、麻雀最为常见。动物资源中，除家养动物 57 个品种外，有野生动物 330 种。其中属全省重点保护的珍稀动物 42 种，列入全国重点保护的珍稀动物 26 种，包括大熊猫、金丝猴、云豹、牛羚、黑颈鹤、小熊猫等。

游仙区森林植被分区位于四川省亚热带常绿阔叶林区，川东盆地及西南山地常绿阔叶林地带，川东盆地偏湿性常绿阔叶林亚带、盆地底部丘陵低 14 山植被地区、盆地深丘植被小区。主要植被群落为亚热带常绿针叶林、以柏木、马尾松构成群落的优势树种。还有阔叶树种、桉木、栎类、桉树、梧桐、槐等，珍贵树种有杏樟、银杏、红豆树等。灌木以马桑、黄荆为主。草本植物主要有茅草、蓑草，巴茅等。全区有乔木树种 57 科、109 属、187 种。全区活立木蓄积量 50 万 m^3 ，其中用材林 36.15 万 m^3 ，占总蓄积量的 72.3%，其余为防护林、薪碳林、特用林。全区森林覆盖率为 31.9%，林业用地占全区土地总面积的 36%。绿色覆盖率为 32.4%。

经调查，受人类活动影响深远，评价区域内植被多以农作植被、经

济作物及果树为主，无天然林。评价区域内无重点保护的珍稀、濒危动植物及古、珍树木。

2.2 社会经济状况

2.2.1 人口简况

本项目选址于绵阳市游仙区游仙街道石垭村（东经 104.804914°、北纬 31.535766°），根据绵阳市游仙区经济试验区管委会提供的中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划方案，项目属于产业园生产组团内。项目评价范围内的人口分布情况见下表。

表 2.2-1 项目评价范围内人口分布情况

名称	方位	距离	性质	人数
核测控装备研发制造基地项目	北	15~95m	企业	50 人
某科研基地	西北	320m	科研基地	约 300 人
新桥镇桩子村 1 队	东北	500-1700m	居民住宅	约 200 人
玉泉村	东	440-1100m	分散居民	约 1200 人
中广核医用核素生产项目	东	紧邻	企业	100 人

2.2.1 中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区

（1）园区规划概况

根据城市总体规划，2021 年拟在游仙区成立中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园（以下简称“核医疗健康产业园”）。

核医疗健康产业园位于游仙区游仙街道石垭村、金山村、文胜村、吴家社区和新桥镇玉泉村，园区规划用地 4000 亩，园区规划研发、生产、安评和医疗、科研配套和文商旅等 5 个组团，以核技术应用产业为主导，重点发展放射性同位素研发及生产、放射性诊断和治疗药物研发及生产、放射医疗装置研发及制造、核探测成像仪器仪表研发制造及应用、辐照加工等相关产业。

核医疗健康产业园规划分批次启动建设，建设周期五年。首期启动区为青龙山北片区，该片区位于游仙区游仙街道石垭村，规划范围东至游仙区乡村旅游环线，西、南至青龙山，北至绵梓路，规划总面积 50.97 公顷，该片区规划重点发展放射性同位素研发及应用、放射性药物研发及生产和放射医疗设备研发设计及制造等核技术产业。该片区计划先期启动四川先通医药研发生产项目、中广核同位素项目和中广核质子医疗项目等建设项目。

目前，中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区已完成项目立项、空间规划研究及生产组团控制性详细规划专家评审等工作，正在实施规划环评编制工作（规划环评工作情况说明文件详见附件绵游府〔2021〕99 号）。

（2）核医疗健康产业园污水处理厂概况

根据《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划（初稿）》，产业园拟在青龙山北片区生产组团内建设 1 座污水处理厂，收集首期启动区内各企业产生的生产废水、生活污水，规划用地 18.7 亩，设计生产污水处理能力 $1500\text{m}^3/\text{d}$ （拟分两期建设，一期建设 $500\text{m}^3/\text{d}$ ，二期建设 $1000\text{m}^3/\text{d}$ ），办公及生活污水沉淀池 1000m^3 。其中，各企业产生的生产废水经各自建设的污水处理设施预处理达《污水综合排放标准》（GB8978-1996）三级标准后，进入园区生产污水管网，汇入园区污水处理厂集中处理达标后，排入绵梓路市政污水管网。各企业产生的办公、生活污水经各自建设的污水处理设施预处理达《污水综合排放标准》（GB8978-1996）三级标准后，进入园区生活污水管网，经园区污水处

理厂集设置的泵站加压提升送至绵梓路市政污水管网，最终进入塘汛污水处理厂处理达标后排放。

目前，核医疗健康产业园污水处理厂正在开展规划设计，处理厂将根据受纳片区入驻企业产生的生产废水类型特点设计相应的污水处理工艺，并将另行开展环评工作。根据绵阳市游仙区人民政府出具的污水处理厂完成时限的函（绵游府函〔2021〕248号），园区污水处理厂预计2023年12月完成竣工验收并投入运营。

2.3 环境质量和辐射现状

2.3.1 非放环境质量现状

2.3.1.1 空气环境质量现状

根据《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ2.2-2018），项目所在区域达标情况判定优先采用国家或地方生态环境主管部门公开发布的环境质量公告或环境质量报告中的数据或结论。

根据绵阳市环境保护局2022年1月发布的《2021年绵阳市环境质量状况年报》，中的数据和结论作为空气质量达标区的判定依据，环境空气质量年均浓度统计及达标情况见下表：

表 2.3-1 区域环境空气质量现状评价

污染物	年评价指标	现状浓度/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	标准值/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	占标率 /%	达标情况
SO ₂	年平均质量浓度	7.9	60	13.2	达标
NO ₂	年平均质量浓度	26.4	40	66.0	达标
CO	24小时平均 第95百分位数	1000	4000	25.0	达标
O ₃	8小时平均 第90百分位数	138.6	160	86.6	达标
PM _{2.5}	年平均质量浓度	34.9	35	99.7	达标
PM ₁₀	年平均质量浓度	56.7	70	81.0	达标

由上表可知，绵阳市2021年SO₂、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀年平均浓度达

到《环境空气质量标准》（GB3095-2012）相应的二级标准，CO 24小时平均第95百分位数、O₃ 8小时平均第90百分位数达到《环境空气质量标准》（GB3095-2012）中相应的二级标准。因此，绵阳市环境空气质量达标。

2.3.1.2 地表水环境质量现状评价

本项目最终受纳水体为涪江，涪江属于 III 类水域。根据绵阳市生态环境局官网发布的《2021 年绵阳市环境质量状况年报》中地表水环境质量：2021 年，绵阳市地表水 25 个断面中，I -III类（优良水体）断面 25 个，地表水优良率 100%。河流中，涪江、通口河、凯江、梓江、安昌河、平通河、土门河、青竹江、秀水河整体水质优；芙蓉溪、魏城河水质良。

表 2.3-2 2021 年地表水环境质量评价结果统计表

河流/湖库名称	断面名称	所在地	控制级别	划定类别	上年度平均水质类别	本年度平均水质类别
涪江	平武水文站	平武县	国控	I	I	I
	楼房沟	平武县	长江经济带	II	II	II
	福田坝	江油市	国控/长江经济带	III	II	I
	丰谷渡口	涪城区	国控	III	II	II
	百顷	三台县	国控	III	II	II

由上述监测结果可知，涪江（项目排污口下游监测断面-丰谷渡口）水质类别达到了《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III 类水域标准的要求，表明涪江水质良好。

2.3.1.3 声学环境质量现状评价

为了解项目所在区域声环境质量现状，委托四川久测环境技术有限公司于 2021 年 10 月 8 日-10 月 9 日对拟建厂址声环境进行了现状监测，监测内容如下：

（1）监测项目

昼、夜等效连续 A 声级

(2) 监测布点

在拟建厂址东南西北四周各布设 1 个监测点位，共计 4 个点位。

(3) 监测时段

监测两天，昼夜各监测一次。

(4) 监测方法

按《声环境质量标准》(GB3096-2008) 的规定进行监测

(5) 监测结果与分析

评价区域环境噪声监测结果如下表所示。

表 2.3-3 区域声环境质量监测与评价结果表 单位: dB (A)

点位编号	点位名称	检测日期	昼间测量结果 dB(A)	夜间测量结果 dB(A)
1#	厂界东侧外 1m 处	2021/10/8	52	41
		2021/10/9	48	43
2#	厂界南侧外 1m 处	2021/10/8	50	43
		2021/10/9	49	44
3#	厂界西侧外 1m 处	2021/10/8	50	43
		2021/10/9	50	40
4#	厂界北侧外 1m 处	2021/10/8	50	43
		2021/10/9	51	39

由上表结果可知，项目拟建厂址厂界监测点位昼夜噪声监测值满足《声环境质量标准》(GB3096-2008) 中 3 类区标准（昼间 ≤ 65 dB(A)、夜间 ≤ 55 dB(A)）要求，表明区域声学环境质量较好。

2.3.2 辐射环境现状

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ/T10.1-2016) 和《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)，本次监测包含拟建厂址及周围环境的 γ 辐射、中子剂量当量率水平和大气、土壤、地表水和地下水等环境介质中的放射性核素含量现状水平。

由于项目位于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区内，本次评价引用四川久测环境技术有限公司对该产业园的 X- γ 剂量率、中子剂量率的监测数据（四川久测环检字（2021）第 0150 号）、四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园辐射环境现状监测及样品分析》（川辐环监字（2021）第 RM0036 号）对该产业园的环境现状监测数据以及四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区样品核素分析》（川辐环监字（2022）第 RM0031 号）对该产业园的样品核素分析数据。

2.3.2.1 环境 γ 辐射剂量水平

1、监测项目

环境 γ 空气吸收剂量率

2、监测使用仪器

项目监测使用仪器情况见下表。

表 2.3-4 监测使用设备一览表

仪器名称及编号	仪器参数	检定/校准日期	检定/校准证书号	检定/校准单位
FH40G-X 型多功能辐射测量仪 编号：SCJC-JL-0221 探头型号： FHZ672E-10	测量范围： 1nSv/h~100 μ Sv/h 校准因子：0.97	2021.6.30	检定字第 2021-71 号	四川省核工业辐射测试防护设备 计量检定站

3、监测方法及来源

项目监测方法及来源见下表。

表 2.3-5 监测方法一览表

项目	监测方法及方法来源
X- γ 辐射剂量率	《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）
	《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）

4、监测结果及结果分析评价

监测结果见下表。

表 2.3-6 项目区域 X-γ 辐射剂量率监测结果

点位编号	点位描述	监测结果 (nSv/h)	
		测量值	标准差
1#	质子加速器场所中部空地	80.4	2.3
2#	质子加速器场所中部道路	75.1	1.8
3#	质子加速器场所北侧	75.3	1.8
4#	质子加速器场所西侧	86.9	1.3
5#	质子加速器场所南侧	69.9	1.2
6#	质子加速器场所东侧	61.9	1.2
7#	同位素项目南侧	75.9	1.4
8#	同位素项目东侧	72.7	1.8
9#	同位素项目北侧	63.8	1.2
10#	同位素项目中部空地	78.3	1.9
11#	同位素项目中部道路	71.7	1.8
12#	草溪河对岸甘家坝	48.6	1.0
13#	108国道北侧石堰村1队	45.3	1.8
14#	石堰村2队	54.0	1.2
15#	石堰村3队	50.4	3.9
16#	区域东侧居民点	54.9	0.6

注：以上监测数据未扣除监测仪器宇宙射线响应值。

根据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157-2021)，环境 γ 辐射剂量率测量结果按照下式计算：

$$\dot{D}_\gamma = K_1 \times K_2 \times R_\gamma - K_3 \times \dot{D}_c$$

式中： $\dot{D}_\gamma$ ——测点处环境 γ 辐射空气吸收剂量率值，Gy/h；

k_1 ——仪器检定/校准因子，取 0.97；

k_2 ——仪器无检验源，该值取 1；

R_γ ——仪器测量读数值均值，使用 ^{137}Cs 作为检定参考辐射源，换算系数取 1.20 Sv/Gy；

k_3 ——建筑物对宇宙射线的屏蔽修正因子，楼房取 0.8，平房取 0.9，原野、道路取 1；

$\dot{D}_c$ ——测点处宇宙射线响应值（评价不考虑），Gy/h。

由表 2.3-6 可知，项目拟建场址周围环境 X-γ 辐射剂量率监测值为 45.3~86.9nSv/h，经修正后环境 γ 辐射空气吸收剂量率为 36.6~70.2nGy/h，与生态环境部《2020 年全国辐射环境质量报告》中四川省自动站空气吸

收剂量率监测结果（67.5nGy/h～121.3nGy/h）基本一致，属于当地正常天然本底辐射水平。

2.3.2.2 中子剂量率水平

1、监测项目

中子剂量率

2、监测使用仪器

项目监测使用仪器情况见下表。

表 2.3-7 监测使用设备一览表

仪器名称及编号	仪器参数	检定/校准日期	检定/校准证书号	检定/校准单位
FH40G-X 型多功能辐射测量仪 编号：41342 探头型号： FHT762H*10	测量范围： 1nSv/h~100mSv/h 校准因子：1.22	2021.8.13	检定字第 [2021]-N1055 号	中国辐射防护 研究院放射性 计量站

3、监测方法及来源

项目监测方法及来源见下表。

表 2.3-8 监测方法一览表

项目	监测方法及方法来源
中子剂量率	《辐射防护仪器中子周围剂量当量（率）仪》（GB/T14318-2019）
	《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）

4、监测结果及结果分析评价

监测结果见下表。

表 2.3-9 项目区域中子剂量率监测结果

点位编号	点位描述	监测结果（nSv/h）
		测量值
1#	质子加速器场所中部空地	未检出
2#	质子加速器场所中部道路	未检出
3#	质子加速器场所北侧	未检出
4#	质子加速器场所西侧	未检出
5#	质子加速器场所南侧	未检出
6#	质子加速器场所东侧	未检出
7#	同位素项目南侧	未检出

8#	同位素项目东侧	未检出
9#	同位素项目北侧	未检出
10#	同位素项目中部空地	未检出
11#	同位素项目中部道路	未检出
12#	草溪河对岸甘家坝	未检出
13#	108国道北侧石垭村1队	未检出
14#	石垭村2队	未检出
15#	石垭村3队	未检出
16#	区域东侧居民点	未检出

由上表分析可知，项目区域中子剂量率低于仪器检测下限，属正常环境本底水平。

2.3.2.3 气溶胶

1、监测项目

(1) 环境空气中与本项目活动相关的总 α 、总 β 活度浓度。引用四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园辐射环境现状监测及样品分析》（川辐环监字（2021）第 RM0036 号）。

(2) 气溶胶中 ^{7}Be 核素分析。引用四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区样品核素分析》（川辐环监字（2022）第 RM0031 号）。

2、监测使用仪器

项目监测使用仪器情况见下表。

表 2.3-10 监测使用设备一览表

监测项目	仪器名称及编号	仪器技术指标	校准/检定情况
气溶胶、地下水、地表水和土壤中总 α 、总 β	低本底 α 、 β 测量仪 MPC9604 编号：Zysb191	α 本底 (cpm) <0.070 β 本底 (cpm) <0.700 α 效率 (^{241}Am) $\geq 42\%$ β 效率 (^{90}Sr - ^{90}Y) $\geq 55\%$	检定单位：中国计量科学研究院 检定有效期： 2020.03.20-2022.03.19 检定结果：合格
气溶胶、地表水、地下水、土壤和底泥中 γ 核素分析	高纯锗 γ 谱仪 编号： ZY2017000276、 ZY2015000065、 ZY2016000067、 ZY2009000036、 ZY2017000274	能量范围：3~7000keV 分辨率：2.20keV、 2.09keV、1.83keV、 2.02keV、2.04keV	检定单位：中国计量科学研究院 检定有效期： 2020.03.20-2022.03.19

3、监测方法

项目监测方法及来源见下表。

表 2.3-11 监测使用设备一览表

项目	监测方法及方法来源	检出限或探测限
气溶胶中总 α 、总 β	气溶胶中总 α 、总 β 监测实施细则（参考生活饮用水标准检验方法放射性指标） REMS-ZY-XZ24-2016(GB/T5750.13-2006)	α : $1.93 \times 10^{-3} \text{mBq/m}^3$ β : $1.46 \times 10^{-3} \text{mBq/m}^3$
气溶胶中 ^7Be 核素	气溶胶中 γ 核素测量实施细则（参考空气中放射性核素的 γ 能谱分析方法） REMS-ZY-XZ12-2016(WS/T184-2017)	^7Be : 0.055mBq/m^3

4、监测结果及结果评价

表 2.3-12 产业园环境空气气溶胶中总 α 、总 β 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	总 α (mBq/m^3)	总 β (mBq/m^3)	备注
园区中央	2021.06.21-2021.06.22	1.09×10^{-1}	2.25	项目尚未动工，拟建厂址为空地
上风向新桥镇	2021.06.21-2021.06.22	1.20×10^{-1}	2.64	
下风向游仙镇吴家村	2021.06.21-2021.06.22	1.51×10^{-1}	2.56	

表 2.3-13 产业园环境空气气溶胶中 ^7Be 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	^7Be (mBq/m^3)	备注
规划区中央	2022.2.8-2022.2.10	2.89	项目尚未动工，拟建厂址为空地
规划区上风向 500m 处	2022.2.8-2022.2.11	2.92	
规划区下风向 500m 处	2022.2.8-2022.2.11	2.85	

由上表可知，项目所在区域监测点气溶胶总 α 监测值范围为 $0.109 \text{mBq/m}^3 \sim 0.151 \text{mBq/m}^3$ 、总 β 监测值范围为 $2.25 \text{mBq/m}^3 \sim 2.64 \text{mBq/m}^3$ ， ^7Be 监测值范围为 $2.85 \text{mBq/m}^3 \sim 2.92 \text{mBq/m}^3$ 。

2.3.2.4 地表水

项目厂址东侧约 320m 处为芙蓉溪，该河主要水体功能为纳污、排洪和灌溉等。根据中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划，本项目产生的生产废水经园区污水处理厂处理后排入绵梓路市政污水管网，生活污水经园区污水处理厂泵送至绵梓路市政污水管网，最终进入塘汛污水处理厂处理达标后排入涪江。因此，本项目产生的废水

不排入芙蓉溪，亦不会直接排入最终受纳水体涪江。本次评价通过引用相应监测报告以了解项目所在区域地表水体辐射环境质量现状。

1、监测项目

(1) 对周边水体芙蓉溪中与本项目活动相关的总 α 、总 β 活度浓度进行监测。引用四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园辐射环境现状监测及样品分析》（川辐环监字（2021）第 RM0036 号）。

(2) 对周边水体芙蓉溪中 ^7Be 核素分析。引用四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区样品核素分析》（川辐环监字（2022）第 RM0031 号）。

2、监测使用仪器

项目监测使用仪器情况见表 2.3-10。

3、监测方法

项目监测方法及来源见下表。

表 2.3-14 监测使用设备一览表

项目	监测方法及方法来源	检出限或探测限
水中总 α 、总 β	《生活饮用水标准检验方法放射性指标》（GB/T5750.13-2006）	α : $8.80 \times 10^{-3} \text{Bq/L}$ β : $5.37 \times 10^{-3} \text{Bq/L}$
水中 γ 核素分析	《生活饮用水标准检验方法放射性指标》（GB/T5750.13-2006）	^7Be : 0.041Bq/L

4、监测结果及结果评价

表 2.3-15 产业园地表水体中总 α 、总 β 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	总 α (Bq/L)	总 β (Bq/L)	备注
产业园拟建污水处理厂厂址下游 500m 芙蓉溪河段	2021.06.22	9.84×10^{-3}	6.83×10^{-2}	项目尚未动工，拟建厂址为空地

表 2.3-16 产业园地表水体中 ^7Be 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	^7Be (Bq/L)	备注
产业园拟建污水处理厂厂址上游 500m 芙蓉溪河段	2022.2.8	$\leq \text{LLD}$	项目尚未动工，拟建厂址为空地
产业园拟建污水处理厂厂址下游 500m 芙蓉溪河段	2022.2.8	$\leq \text{LLD}$	

由上表可知，项目所在产业园拟建污水处理厂厂址下游 500m 芙蓉

溪河河段监测点的总 α 监测值为 $9.84 \times 10^{-3} \text{Bq/L}$ 、总 β 监测值 $6.83 \times 10^{-2} \text{Bq/L}$ ， ^7Be 监测结果低于仪器检测限。

2.3.2.5 地下水

1、监测位置

(1) 地下水总 α 、总 β 的监测取样井设在拟建厂址区域空地。引用四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园辐射环境现状监测及样品分析》（川辐环监字（2021）第 RM0036 号）。

(2) 地下水 ^7Be 的监测取样井设在拟建厂址区域上游、下游。引用四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区样品核素分析》（川辐环监字（2022）第 RM0031 号）。

2、监测项目

地下水中总 α 、总 β 、 ^7Be 活度浓度。

3、监测结果及结果评价

表 2.3-17 产业园地下水体中总 α 、总 β 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	总 α (Bq/L)	总 β (Bq/L)	备注
拟建厂址园区内	2021.06.22	$\leq 8.80 \times 10^{-3}$	$\leq 5.37 \times 10^{-3}$	项目尚未动工，拟建厂址为空地

表 2.3-18 产业园地下水体中 ^7Be 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	^7Be (Bq/L)	备注
拟建厂址园区上游	2022.2.8	$\leq \text{LLD}$	项目尚未动工，拟建厂址为空地
拟建厂址园区下游	2022.2.8	$\leq \text{LLD}$	

由上表可知，项目所在区域地下水中总 α 监测值不超过 $8.8 \times 10^{-3} \text{Bq/L}$ 、总 β 监测值不超过 $5.37 \times 10^{-3} \text{Bq/L}$ ， ^7Be 监测结果低于仪器检测限。

2.3.2.6 土壤

1、监测项目

(1) 土壤中总 α 、总 β 活度浓度。引用四川省辐射环境管理监测中

心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园辐射环境现状监测及样品分析》（川辐环监字（2021）第 RM0036 号）。

（2）土壤中 ^7Be 活度浓度。引用四川省辐射环境管理监测中心站《中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区样品核素分析》（川辐环监字（2022）第 RM0031 号）。

2、监测方法

项目监测方法及来源见下表。

表 2.3-19 监测方法一览表

项目	监测方法及方法来源	检出限或探测限
固体中总 α 、总 β	固体样品总 α 、总 β 监测实施细则（参考生活饮用水标准检验方法放射性指标） REMS-ZY-XZ24-2016（GB/T5750.13-2006）	α : $3.79 \times 10^1 \text{Bq/Kg}$ β : $2.34 \times 10^1 \text{Bq/Kg}$
固体中 ^7Be	固体样品 γ 核素监测实施细则（参考高纯锗 γ 能谱分析通用方法土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法） REMS-ZY-XZ15-2016（GB/T1173-2015）（GB/T11743-2013）	^7Be : 5.87Bq/Kg

3、监测结果及结果评价

表 2.3-20 产业园土壤中总 α 、总 β 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	总 α （Bq/kg）	总 β （Bq/kg）	备注
拟建厂址园区内	2021.06.22	3.23×10^2	9.25×10^2	项目尚未动工，拟建厂址为空地

表 2.3-21 产业园土壤中 ^7Be 活度浓度监测结果

监测点位	采样时间	^7Be （Bq/kg）	备注
园区内 1#	2022.2.8	$\leq \text{LLD}$	项目尚未动工，拟建厂址为空地
园区内 2#	2022.2.8	$\leq \text{LLD}$	
园区南侧吴家村	2022.2.8	$\leq \text{LLD}$	

由上表可知，项目所在区域土壤中总 α 监测值为 323Bq/kg 、总 β 监测值为 925Bq/kg ， ^7Be 监测结果低于仪器检测限。

2.4 场址适宜性评价

本项目厂址位于绵阳市游仙区游仙街道石垭村二社。经对建设区域自然环境状况分析可知，项目场地区域内无不良地质现象，无地表水或

地下水集中式饮用水源，无矿产资源存储，评价范围内受人类活动影响深远，多以城市绿化乔灌木等人工植被为主，无天然林，无重点保护的珍稀、濒危动植物及古、珍树木。

经调查，已建成的、规划引入的企事业单位以科研院所、放射性核素药物研发生产、核医疗设备制造、核测控装备等相关核技术应用产业为主，对本项目的建设无明显环境制约影响。项目为核医疗设备制造项目，与周边企业同属于中国（绵阳）科技城核医疗健康产业园青龙山北片区规划的主导产业。

本项目为核医疗设备制造项目，运营期主要环境污染物为电离辐射与放射性“三废”。质子治疗系统机房设有混凝土屏蔽，经分析屏蔽体设计满足相关辐射防护要求，所致职业人员受照剂量低于GB18871规定的职业照射剂量限值和本报告提出的职业照射剂量管理约束值。气载流出物经屋顶30m烟囱排放，外排气载流出物所致周边评价范围内公众剂量满足GB18871规定的公众剂量限值和本报告提出的公众剂量管理约束值。放射性废水经暂存衰变经监测达标后排入所在核医疗健康产业园园区污水处理厂处理；放射性固废集中收集交有资质单位处置。

根据《2021年绵阳市生态环境质量年报》分析可知，项目所在区域属于环境空气质量达标区。项目最终受纳水体为涪江，根据《2021年绵阳市生态环境质量年报》分析可知，涪江（项目排污口下游监测断面-丰谷渡口）水质满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类水域标准要求。经现场监测，拟建厂址厂界监测点位昼夜间噪声监测值均满足《声环境质量标准》（GB3096-2008）中3类区标准要求，区域声学环境质量较好。根据辐射环境监测结果，项目厂址环境 γ 辐射剂量率处于四川省天然本底涨落范围内，所在区域空气、地表水、地下水及土壤中与本项目活动相关的放射性核素活度浓度、总 α 和总 β 活度浓度监测

值未见异常。

综上所述，项目评价范围内无明显环境制约因素，项目的建设及周边环境相容，区域内环境质量良好，辐射环境水平属于区域辐射本底水平，因此，从环境保护和辐射安全角度分析，项目选址较合理。

第三章 工程分析及源项

3.1 项目规模与基本参数

3.1.1 项目建设规模

本项目开展质子治疗系统及附属图像引导系统的研发、设计生产、销售、安装调试及后续维修维护业务。项目规划占地约 28 亩，总建筑面积 17350m²，主要建筑物包括 1#生产厂房、2#生产厂房、质子医疗办公楼、配电房及放射性固体废物暂存间等。

项目建成后，形成主要产能为：1) 4 台/年的质子治疗系统销售（含建造）、使用能力；2) 20 台/年 CBCT（锥形束电子计算机断层扫描）图像引导系统、20 台/年二维图像系统的生产、使用、销售能力。

本项目生产、调试、销售质子治疗系统的主要技术指标设计情况见下表。

表 3.1-1 质子治疗系统主要技术指标

指标	数值/方案
加速器主体	质子回旋加速器 C230
引出能量	230MeV
加速器内额定流强	750nA
引出流强	300nA
治疗室终端能量范围	70~230MeV
加速器射频频率	106~500MHz
治疗室	固定束治疗室+旋转束治疗室

3.1.2 质子治疗系统组成及设备参数

本项目生产、调试、销售的质子治疗系统主要由回旋加速器、能量选择系统、束流输运系统 and 治疗系统组成。质子在回旋加速器中加速到 230MeV 后引出，引出流强约为 300nA，引入能量选择系统。通过调节能量选择系统中降能器的厚度，可根据实际治疗室中肿瘤的深度和厚度，

在输出端得到 70~230MeV 连续可调不同能量的质子束流。束流输运系统用于将能量选择器引出的质子传输到各治疗室内。装置结构组成示意图如下图 3.1-1 所示。IBA 公司为用户单位推荐的质子治疗系统机房典型的设计安装、布置方案如图 3.1-2 所示。

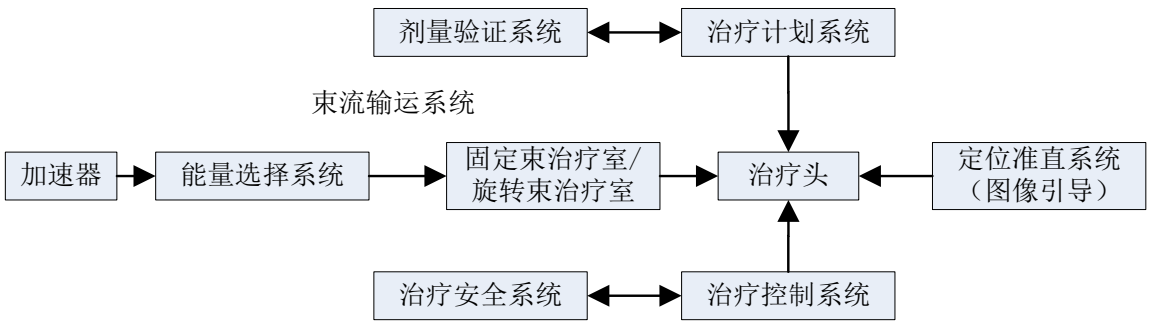


图 3.1-1 质子治疗系统主要构成

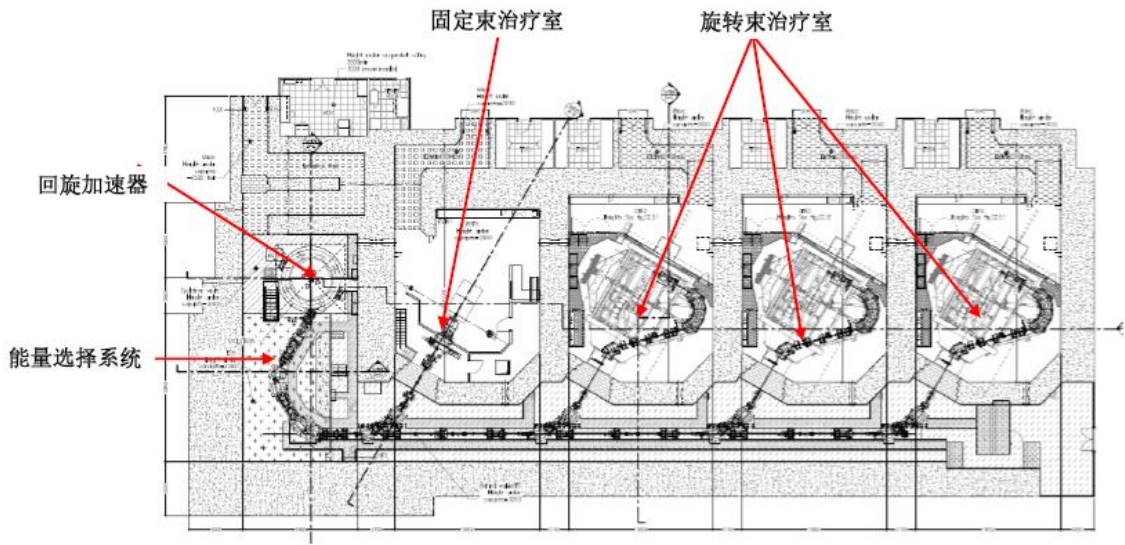


图 3.1-2 典型质子治疗系统安装布局示意图

3.1.2.1 回旋加速器

回旋加速器是质子治疗系统的核心。如图 3.1-3 至图 3.1-5 给出了质子治疗系统的回旋加速器系统结构图及平面、剖面布置图。在回旋加速器内，通过离子源部件将氢气进行电离，使其成为氢离子，即带正电的

质子。质子通过若干个高频电场供电的间歇，每次通过间隙均得到高频能量进而实现加速。为把质子限制在有限的空间内进行加速，加速器中央设置 D 形盒和周边磁铁，在质子运动的垂直平面上加一个固定磁场，使质子在该磁场中做螺旋圆周运动。D 形盒形成的交变电场和磁铁形成的磁场共同作用，最终将初始能量约 50keV 的质子能量加速到 230MeV，然后通过加速器引出系统利用磁电偏转方式，将质子束从加速器中引出。

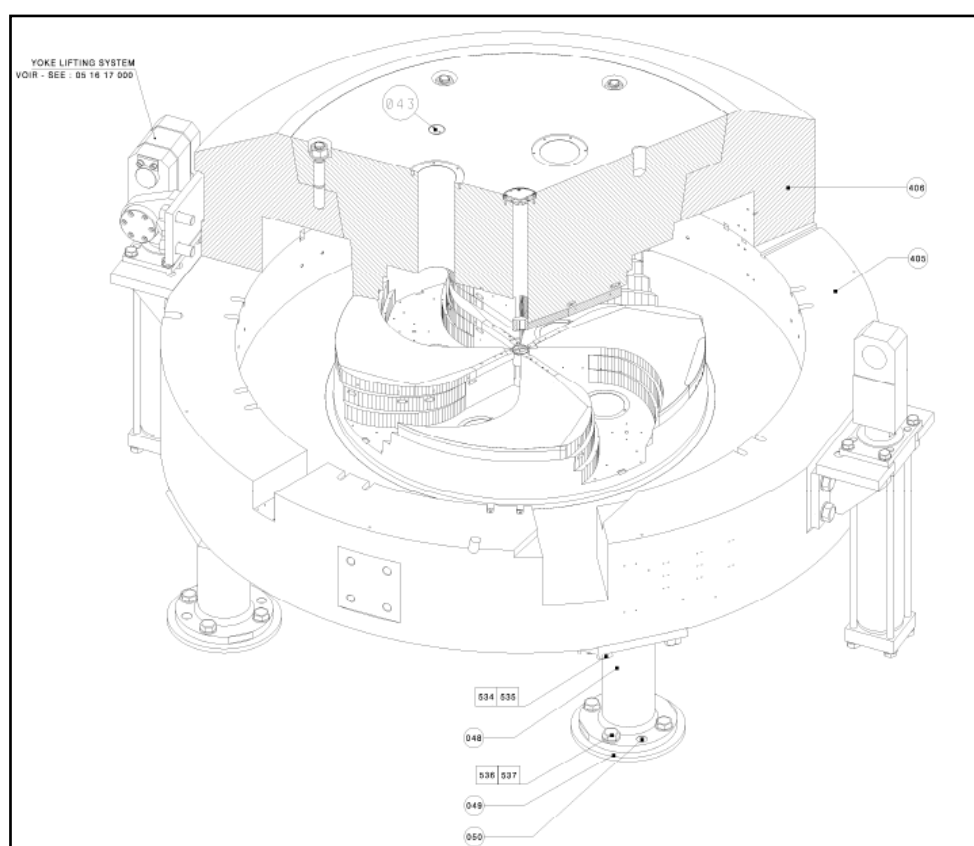
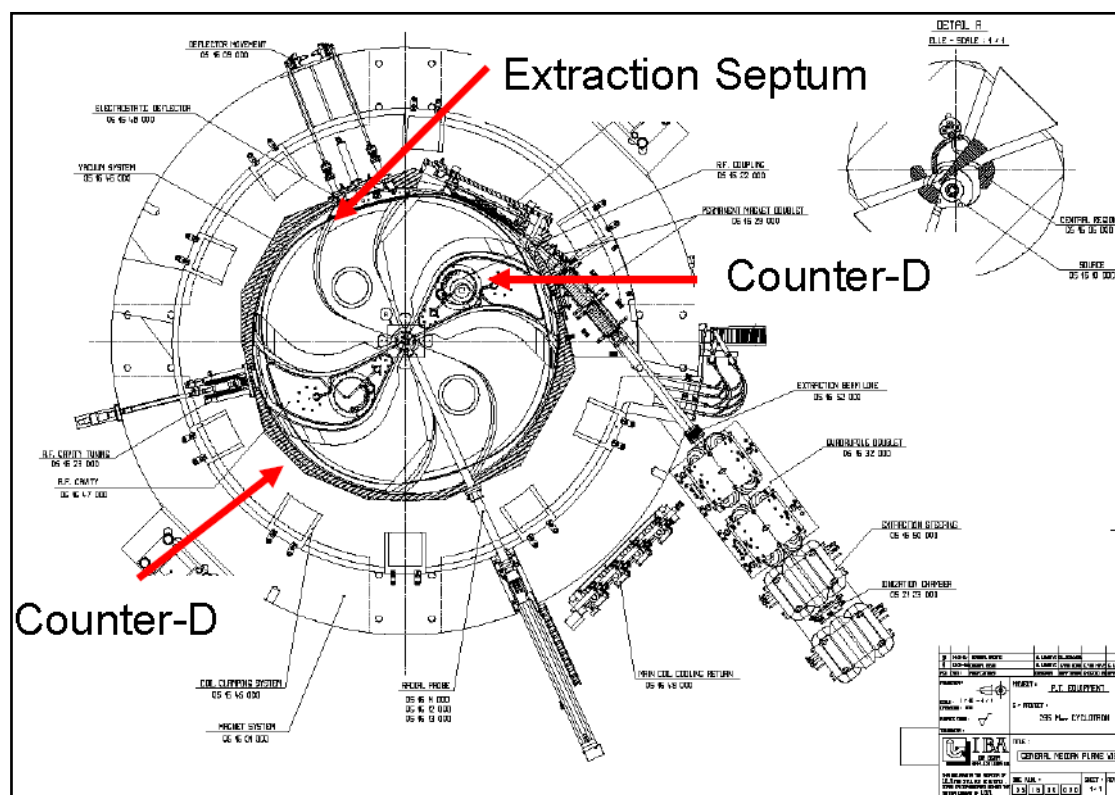
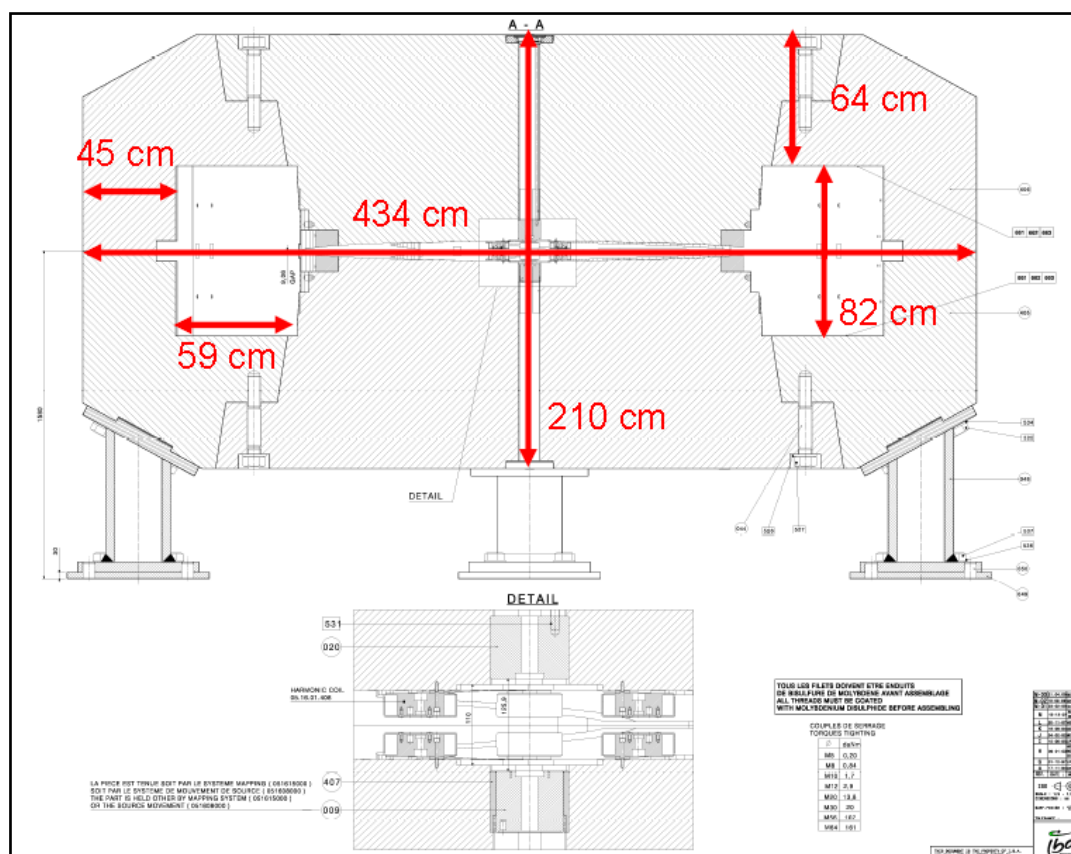


图 3.1-3 质子治疗系统回旋加速器结构图



3.1.2.2 能量选择系统（ESS）

质子治疗时要根据肿瘤本身深度和厚度选用不同能量的质子，由于回旋加速器引出的质子能量是固定的，因此在回旋加速器和治疗室之间设置一个能量选择系统，该系统由降能器、准直器与离子光学用的各种磁铁和测量元件组成，如图 3.1-6 给出了能量选择系统（ESS）的主要布局。沿束流方向，依次包括：降能器（degrader）、准直器（collimator）、发散狭缝（divergence slits）、发散狭缝后的束流阻断器、动量狭缝（momentum slits）。

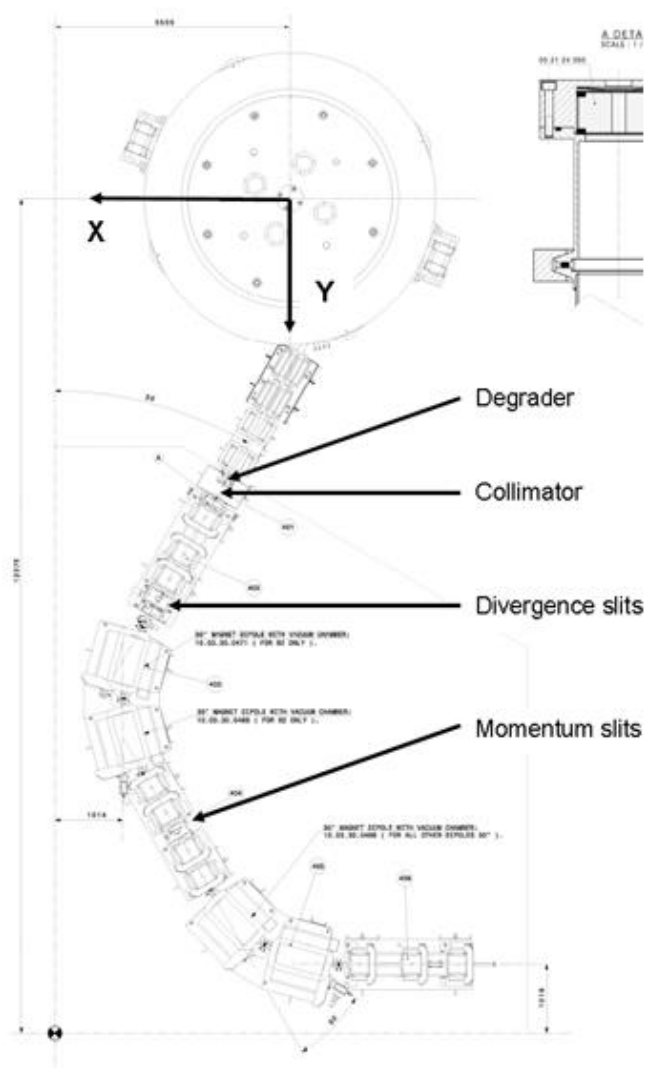


图 3.1-6 能量选择系统总体布局图

从回旋加速器引出的能量为 230MeV，固定不变。能选系统能按照调试计划，对引出能量进行降能，以获得所需的能量质子束流。

降能器材质一般为石墨、Be 和 Al，当质子通过降能器时，降能器厚度越大质子能量降低越多，因此使用不同厚度的降能器即可得到不同程度能量的降低。当回旋加速器引出的能量为 230MeV 的质子进入能量选择系统，通过调节降能器的不同厚度，就可以在输出端得到能量为 70~230MeV 之间连续可调的不同能量的质子。

3.1.2.3 束流传输线

束流输运系统用于将加速器产生的质子束流输送到患者治疗部位附近。沿束流输运线管道放置四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备、四级磁铁用于对质子束流进行聚焦，偏转磁铁用于改变束流的方向，导向磁铁用于纠正质子束流在系统安装时产生的偏离。

3.1.2.4 治疗室

质子治疗室包括固定束治疗室和旋转束治疗室。旋转机架治疗室内含有旋转机架及旋转治疗头，旋转机架能够环绕卧姿患者进行转动，可实现 360° 旋转。固定束治疗室内不含旋转机架。

3.2 工作流程与工艺分析

本项目实施分为两个阶段：1) 第一阶段，绵阳质子医疗装备制造基地未建成，销售（含建造）、使用（用户方安装调试）阶段。2) 第二阶段，绵阳质子医疗装备制造基地建成，销售（含建造）、使用（绵阳基地组装调试、用户方安装调试）阶段。

3.2.1 绵阳质子医疗装备制造基地未建成阶段

该阶段中，本项目绵阳质子医疗装备制造基地尚未建成，建设单位采用代理销售、为用户方提供设计建造方案、在用户方开展安装调试并提供维护维修服务的方式进行项目运营。该阶段质子治疗系统年最大销售量为 4 台，安装调试和维修维护量为 4 台。

3.2.1.1 销售流程

该阶段，建设单位主要开展代理销售业务，实行零库存管理模式，建设单位本部所在地区（绵阳基地及办公场所）不设置质子治疗系统暂存场所，质子治疗系统及附属设备均由供货方直接发货至用户方，由用户方委托有资质单位进行报关及装置运输业务。在销售过程中，建设单位的工作人员不直接接触质子治疗系统，仅涉及商务谈判和财务结算活动。

具体销售业务的工艺流程见下图。

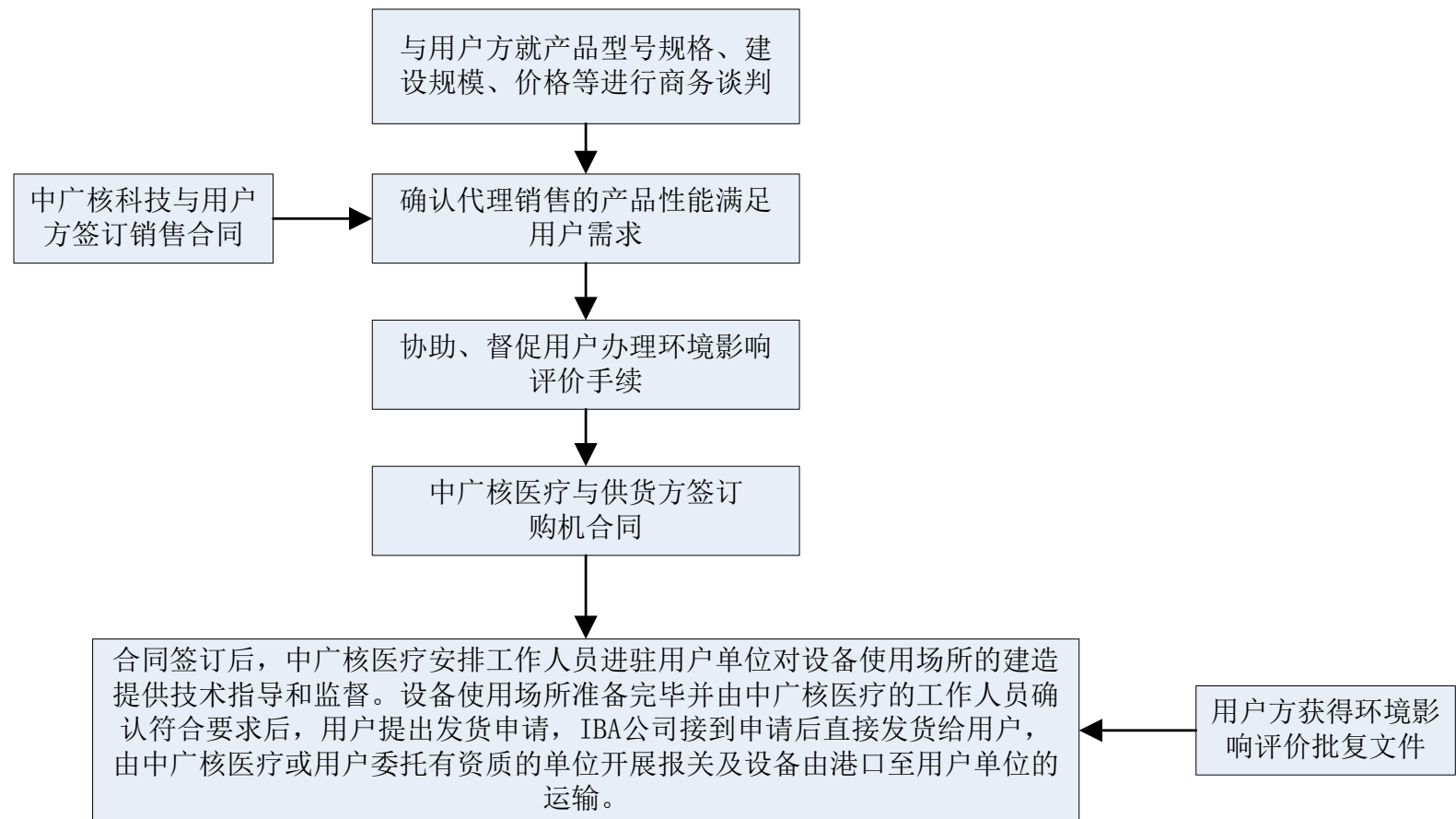


图 3.2-1 质子治疗系统销售流程图

1、签订销售合同后，中广核医疗将以提供技术支持、设计资料等方式密切配合用户单位开展辐射场所环境影响评价工作，要求用户在获取环境影响批复文件后，方可启动辐射工作场所建造工作；

2、用户方获取环境影响批复文件后，中广核医疗提供技术支持并安排工作人员进驻用户单位对设备使用场所的建造进行技术指导和现场监督。

3、用户单位使用场所建造完成并由中广核医疗的工作人员确认符合要求后，用户单位向 IBA 提供发货申请，由 IBA 直接发货给用户。设备抵达后，由用户负责委托有资质的单位进行射线装置的报关和运输。整个过程中，中广核医疗的工作人员不会接触射线装置。

3.2.1.2 在用户方场所开展安装调试流程

质子治疗系统运抵用户方后，安装调试和售后维修维护环节在用户方使用质子治疗系统的辐射工作场所内进行（该场址由用户方先期完成环境影响评价后方可允许质子治疗系统入驻），由中广核医疗工程师团队负责。

1、安装调试顺序

中广核医疗确认用户单位质子治疗系统所在辐射工作场已取得环境影响批复文件，同时用户单位安装调试场所符合要求（水、风、电齐备，场地和墙面整洁、设备起吊与运输顺畅，不存在安全隐患，通过建筑单位和消防等部门的验收），在装置送达用户使用场所后，安排技术人员进行现场安装。

现场安装时，先安装质子治疗系统主体部分（包括回旋加速器、能

量选择系统和输运线)。系统主体安装完成后,且确认安全联锁系统、通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成,医院方可进行带束调试。回旋加速器调试完成后,开始各个治疗室的安装调试。各治疗室安装调试前,也需确认治疗室安全联锁系统、通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成,方可进行出束调试。

2、安装调试周期

质子治疗系统首次安装调试时间周期因每个用户治疗室建设数目的不同而不同,以建有1个固定束治疗室和1个旋转束治疗室的质子治疗系统为例,其首次安装调试周期约为16个月,其中带束调试的周期约为7个月,具体带束调试计划见下表。

表 3.2-1 质子治疗系统带束调试计划

调试项目	主要内容	工作时间（月）
回旋加速器	出束调试	1
能量选择系统	束流优化，调整	1
束流输运线	束流优化，调整，验证	1
1 个固定束治疗室	束流优化，调整，验证	2
1 个旋转治疗室	束流优化，调整，验证	2
总调试出束时间	500h	
注：在上述计划外，额外增加的每个旋转束治疗室交付周期增加 3 个月，固定束治疗室交付周期增加 2 个月。		

中广核医疗的工作人员确认质子治疗系统各项技术指标符合要求后,并协助用户取得医疗器械注册证后,经用户单位确认,将设备正式移交给用户单位,即完成整个安装调试的过程。此后,中广核医疗的工作人员不再参与设备在用户单位临床治疗使用期间的调试。

3、安装调试期间的辐射防护措施

调试期间工作人员的主要的工作区域在加速器控制间、治疗室控制间、配套房间等区域,调试过程中的采取辐射防护措施主要包括场所屏

蔽防护、人员培训、人机安全联锁系统、工作人员剂量控制等四个方面，详见第四章“辐射安全防护章节”4.2.4 章节。

3.2.1.3 维修维护

1、维护维修流程

质子治疗系统维修维护的整个过程，由中广核医疗的工作人员负责，用户单位负责提供工作场所和协调前期相关准备工作，不参与具体维修维护作业。维修维护包括质子治疗系统发生故障时的维修和预防性的维护保养。具体流程见下图。

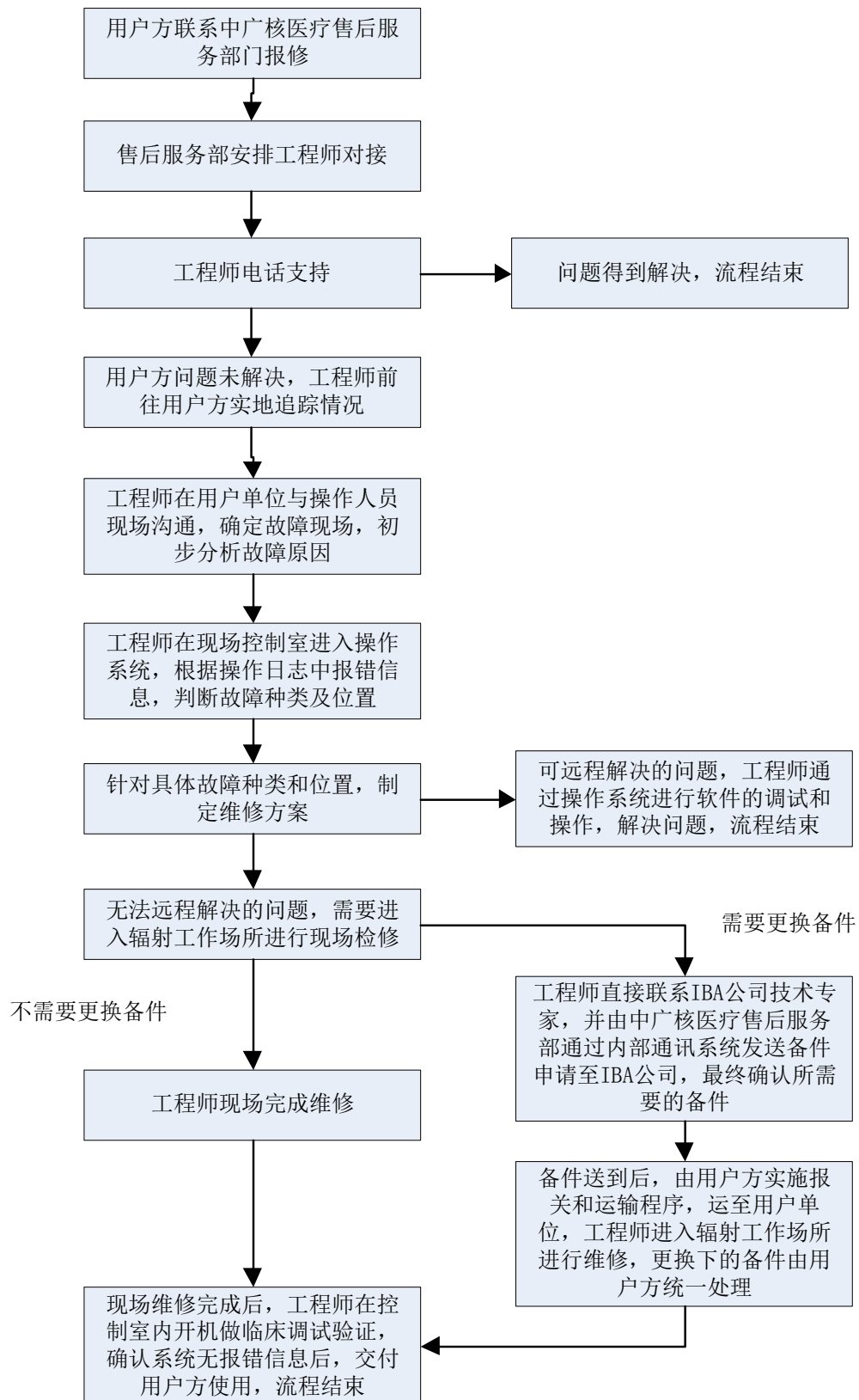


图 3.2-2 质子治疗系统维修维护流程图

2、主要维护维修工作内容

质子治疗系统维修调试的主要内容如下：

（1）设备维修时，工作人员严格遵守操作系统屏幕提示，按照设备维修调试规程中的步骤进行维修操作；

（2）工程师到用户现场进行维修服务时，首先与操作人员进行现场沟通，了解故障现场，初步判断故障类型和原因；

（3）初步判断故障原因后，工作人员在控制室的监控计算机上进入操作系统内，调出操作日志文件，参照日志文件中的报错信息，确定故障位置和故障原因。常见的故障包括软件故障和硬件故障，如通讯故障、软件冲突、水冷过温、水压不足、机器无法出束、束流状态监视器无数据等。

（4）工作人员针对故障种类和出现故障的区域，制定维修方案：

① 初步判断能够通过远程解决的问题。设备操作系统包括自动模式和“Service 模式”，自动模式即用户正常的治疗模式，Service 模式仅由被授权的人员进入维修的模式。工作人员通过 Service 模式进入操作系统后台，进行软件的调试或对系统局部进行操作，确认设备恢复正常后返回自动模式。

② 对于不可远程解决的问题，工作人员需进入辐射区进行现场检修，工作人员在现场维修时，允许进入各辐射区进行维修维护的条件如下：

a. 各辐射区停机冷却至少 24 个小时后，由专门辐射防护人员进行“清场搜索”确认，并利用便携式中子/ γ 剂量率仪对辐射区进行巡检，监

测结果需满足如下管理要求后，工作人员方可按照进入辐射区的流程进入作业；

- ◆ 待维修区域剂量率水平不高于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 时，允许辐射工作人员正常进入开展维修作业，无需采取额外的防护措施；
- ◆ 待维修区域剂量率水平高于 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 时，辐射工作人员按照维修规程，采取延长冷却时间、实施个人防护、控制维修维护时间等措施进行维修作业；
- ◆ 设备部件表面污染水平（ α 、 β ）高于控制水平时，由专门的辐射安全人员对活化部件表面进行擦拭清洁、包覆后方可对部件进行装卸、搬动、维修等操作。

③ 对于进入辐射区内进行维修的工作人员，需佩戴个人剂量计和直读式个人剂量报警仪，该报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平。

中广核医疗为进入辐射区内维修的工作人员建立档案，每次在辐射区内的的工作结束后，由专门的辐射安全员负责回收直读式个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，作为下次该名工作人员进入辐射区工作时制定工作方案的依据。

工作人员进入辐射区前，由专门的辐射安全员切断该辐射区束流后，利用便携式中子/ γ 剂量巡测仪对该辐射区进行巡检，根据工作人员可能进入的区域的剂量率水平以及可能接触的设备或部件表面的剂量率水平，结合各工作人员历史受照剂量记录，制定工作方案，通过安排多名人员同时工作的方式控制每个工作人员的工作时间，确保其受照剂量不

会超过剂量控制目标值。

对接触高辐射水平区域部件的操作，须有专门的辐射安全人员现场监督，并根据实际情况采取必要的临时局部屏蔽措施。工作人员操作完毕后必须进行表面污染检测。对直接接触部件的工作人员，必须穿戴工作服，安全眼镜、口罩、手套及鞋套等防护用品。

④ 维修过程中需要更换备件时，中广核医疗工程师直接与 IBA 等供货方公司的技术专家联系，并由公司售后服务部通过公司内部通讯系统发送备件申请至供货方，最终确认所需要的备件。备件送到后，由用户或中广核医疗委托资质单位进行报关和运输，直接送至用户使用现场。维修过程中更换下的旧备件由用户单位（医院）统一进行处理。

（5）维修完成后的临床调试验证

①对于软件、电路板、水冷系统、空气管路等的故障维修，维修完成后，工程师在控制室内开机，切断高压出束，检查机器无报错信息后，交付医院使用；

②对于降能器、束流聚焦、束流调节等方面的故障维修，维修完成后，经“清场搜索”程序确认相应辐射区内无人停留后，工程师在控制室内开机并出束，检查机器无报错信息后，交付医院使用。

3、维修维护过程的辐射防护措施

维修维护过程中的采取辐射防护措施同安装调试过程中的辐射防护措施基本相同，包括人员培训、人身安全联锁系统和工作人员剂量控制等，本节不再重复描述。

3.2.2 绵阳质子医疗装备制造基地建成后阶段

该阶段中，本项目绵阳质子医疗装备制造基地已建成，建设单位采用购置 IBA 质子治疗系统部件、自行组装生产调试、直接对接用户方展开销售、为用户方提供设计建造方案、于用户方开展终端调试并提供维护维修服务的方式进行项目运营。

建设单位于本项目质子医疗装备制造基地具备 1 台（套）完整质子治疗系统（含加速器、束流输运线、治疗室等全部单元部件）、3 台（套）质子加速器系统的生产能力。通过购置配套的束流输运线、治疗室等单元部件，具备 4 台（套）质子治疗系统/年的销售能力、以及同规模的安装调试和维修维护能力。

3.2.2.1 销售流程

该阶段为建设单位中广核医疗的常态运行方式。中广核医疗所销售的质子治疗系统、CBCT 图像引导系统及二维图像系统均为直接销售方式。销售环节在建设单位内部进行，中广核医疗根据用户方需求开展质子治疗系统部件引进、组装调试工作。组装调试后的质子治疗系统安置（暂存）于本项目 1#厂房质子治疗系统机房内。销售过程中，建设单位自行安排辐射工作人员开展质子治疗系统及其部件拆卸、包装等作业，并委托有资质单位将质子治疗系统及其附属设备运输至用户方。

该阶段具体销售业务的工艺流程见下图。

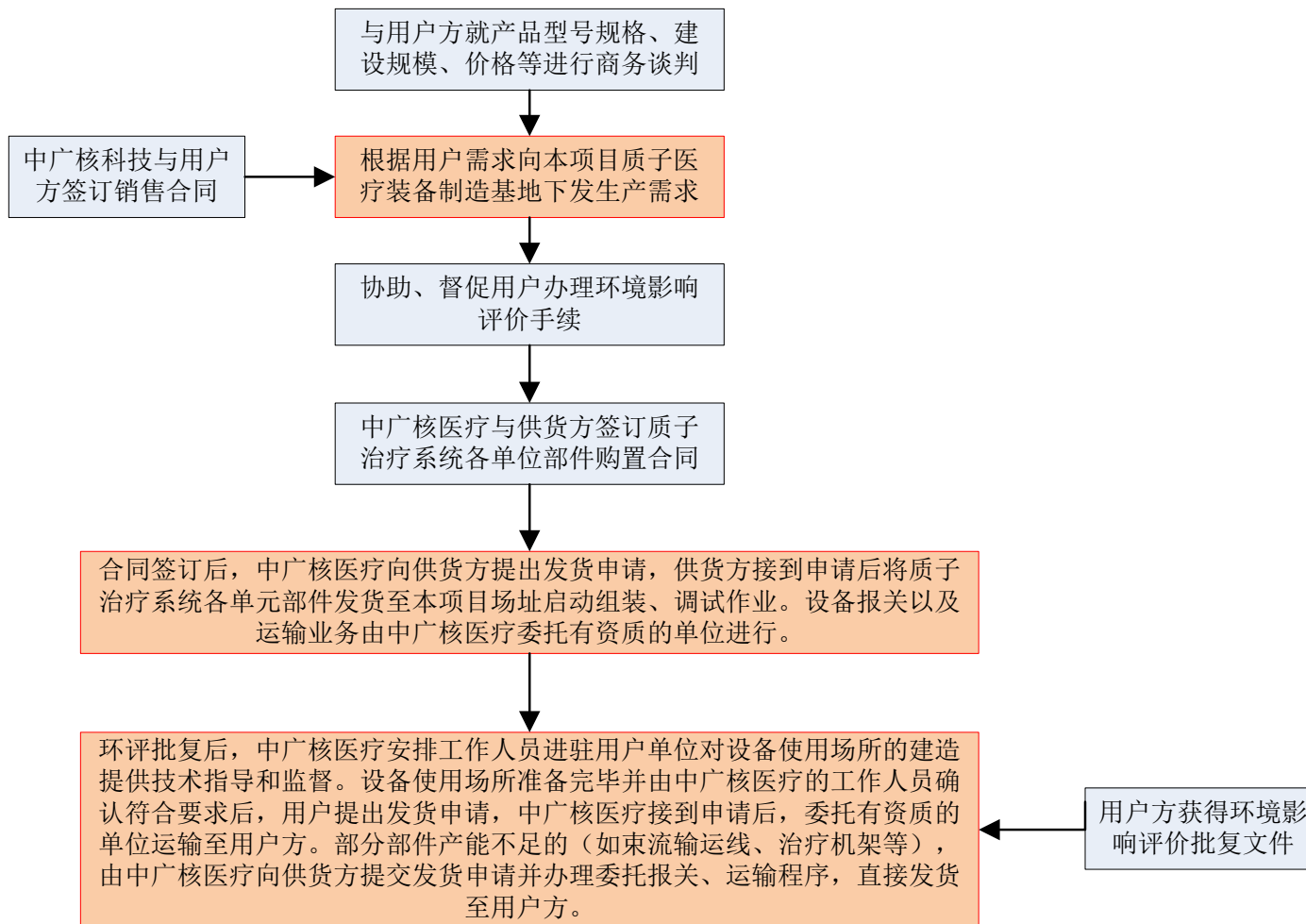


图 3.2-3 质子治疗系统销售流程图（红色部分为与第一阶段销售流程有所差异之处）

该阶段，常态运行情况下，建设单位具体销售业务的工艺流程与第一阶段类似，主要的不同之处在于：

1、销售过程中，中广核医疗将按用户需求发送生产需求单至本项目质子装备制造基地；

2、销售合同签订后，中广核医疗向供货方（IBA 公司）购入的为质子治疗系统各单元部件而非整体部件。如回旋加速器部分，将分别购入离子源、偏转板、D 形盒、高性能磁铁、加速器壳体等成品部件，而非购入完整回旋加速器；能量选择系统部分，将分别购入降能器、准直器、发散狭缝、束流阻断器、动量狭缝等成品部件；束流传输线部分，将分别购入真空管路、四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备等成品部件；治疗室终端部分，将视用户需求，分别购入若干套的固定束治疗头（笔形束模式）及旋转机架部件、旋转治疗头（双散射模式）。

3、购入质子治疗系统各单元部件后，中广核医疗将在本项目自行开展组装生产、运行调试作业，并于项目 1#厂房质子治疗系统机房进行出束调试。

4、用户单位使用场所建造完成并由中广核医疗的工作人员确认符合要求后，用户单位向中广核医疗提供发货申请，由中广核医疗协调绵阳基地及其他供货方发货给用户。

5、建设单位年销售计划中，1 台（套）质子治疗系统（含加速器、束流输运线、旋转机架及图像引导系统等）由绵阳基地调试后直接发货至用户方，配置不足的部分（如额外的束流输运线、旋转机架）由供货

方发货至用户方；另外 3 台（套）质子治疗系统，加速器系统、图像引导系统等部分由绵阳基地调试后发货至用户方，束流输运线、旋转机架另行采购后，由供货方发货至用户方。

6、涉及射线装置及其他含放射性部件的运输作业，由中广核医疗或用户方委托有资质单位开展运输。在销售过程中，建设单位自行安排辐射工作人员开展质子治疗系统及其部件拆卸、包装作业。

3.2.2.2 质子治疗系统组装、生产、调试流程

中广核医疗拟成立专业队伍，对引进的质子治疗系统及其各子系统的工艺技术进行消化吸收，根据不同用户需求，设计具有针对性的质子治疗系统设备配置方案，并自行开展质子治疗系统组装调试作业。

本项目质子治疗系统生产、调试工艺流程及污物产生环节图如下图 3.2-4 所示：

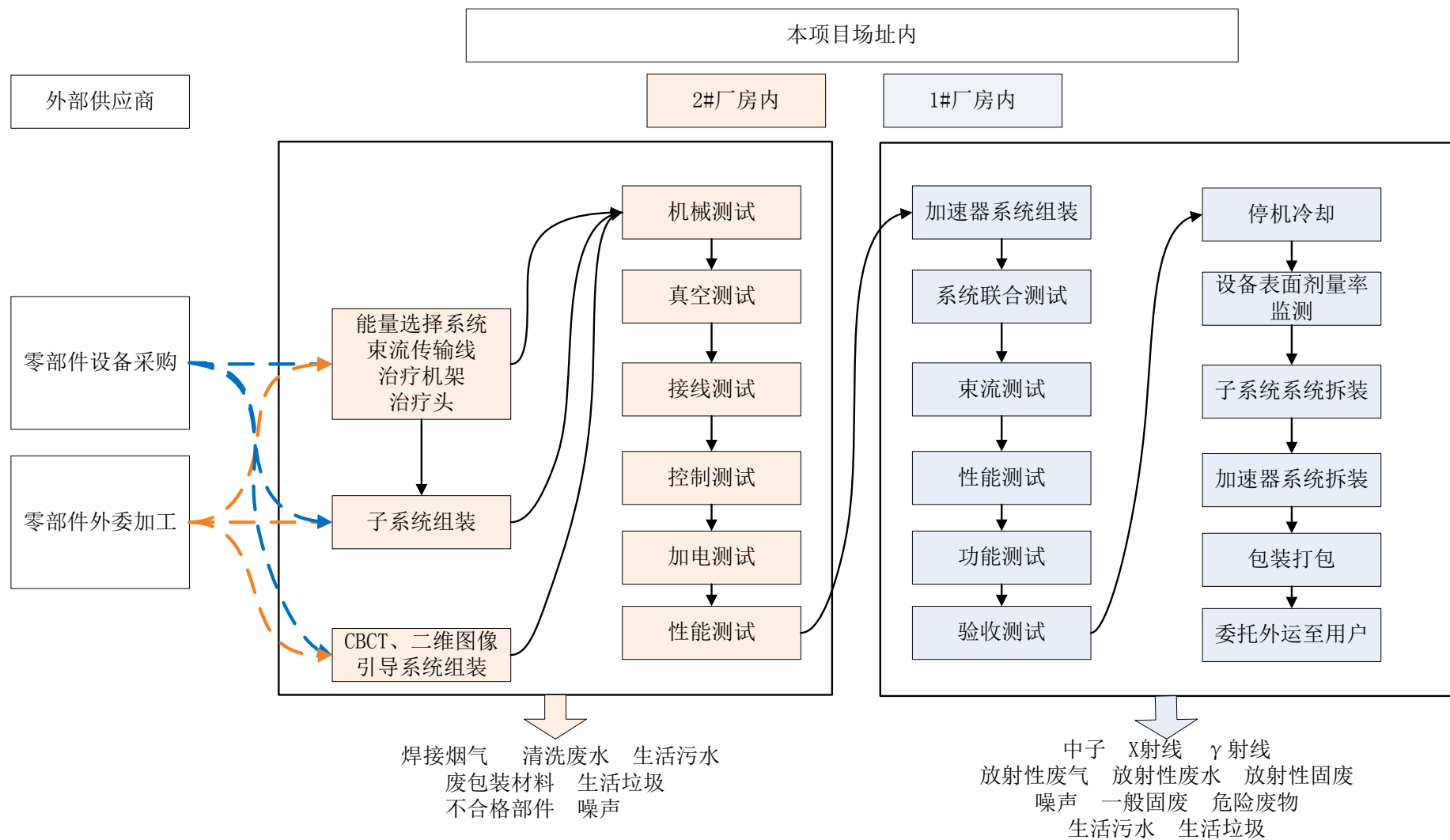


图 3.2-4 质子治疗系统生产、调试工艺流程及污物产生环节图

1、非放射性组装、调试工作

根据设备配置方案，建设单位将直接采购或委外加工全部设备部件，开展组装及初步性能调试工作。

质子治疗系统主要分为回旋加速器、能量选择系统、束流传输线、终端治疗室四个子系统。

各子系统包含的主要部件如下 1) 回旋加速器：离子源、偏转板、D 形盒、高性能磁铁、加速器壳体等；2) 能量选择系统部分：降能器、准直器、发散狭缝、束流阻断器、动量狭缝等；3) 束流传输线部：真空管路、四级磁铁、偏转磁铁、导向磁铁、束流测量设备和真空设备等；4) 治疗室终端：固定束治疗头（笔形束模式）、旋转机架部件、旋转治疗头（双散射模式）等。

回旋加速器组装、调试工作于项目 1#厂房质子治疗系统机房加速器室内开展。质子治疗系统机房西侧加速器调试区及东侧整体调试区均可开展加速器组装调试作业。能量选择系统、束流输运线、治疗室终端等其他子系统，均于项目 2#厂房内开展组装及初步性能调试工作。

质子治疗系统四个子系统的具体生产工艺流程基本一致简要介绍如下：1) 根据用户需求制定生产资料需求清单，主要包括：物料清单，结构、电气、电路图册等；2) 其次进行各子系统的原材料采购。原材料采购分为标准件和非标件的采购，标准件根据物料清单进行采购，非标件根据设计图册委托外部单位加工生产；原材料采购和加工完成后，根据采购要求或技术规格书进行原材料的检验，检验合格后，进行入库；3) 生产人员根据各个子系统的作业指导书，领用原材料及各子系统部

件，拆除包装，清洗、擦拭送至对应厂房等待组装调试；4) 对各部件进行装配、焊接，完成质子治疗系统各子系统的组装；完成子系统组装后，按照调试作业指导书对各子系统进行非放射性调试、检验等工作，检验完成后进入后续工序。

具体组装生产调试工艺流程如下图所示。

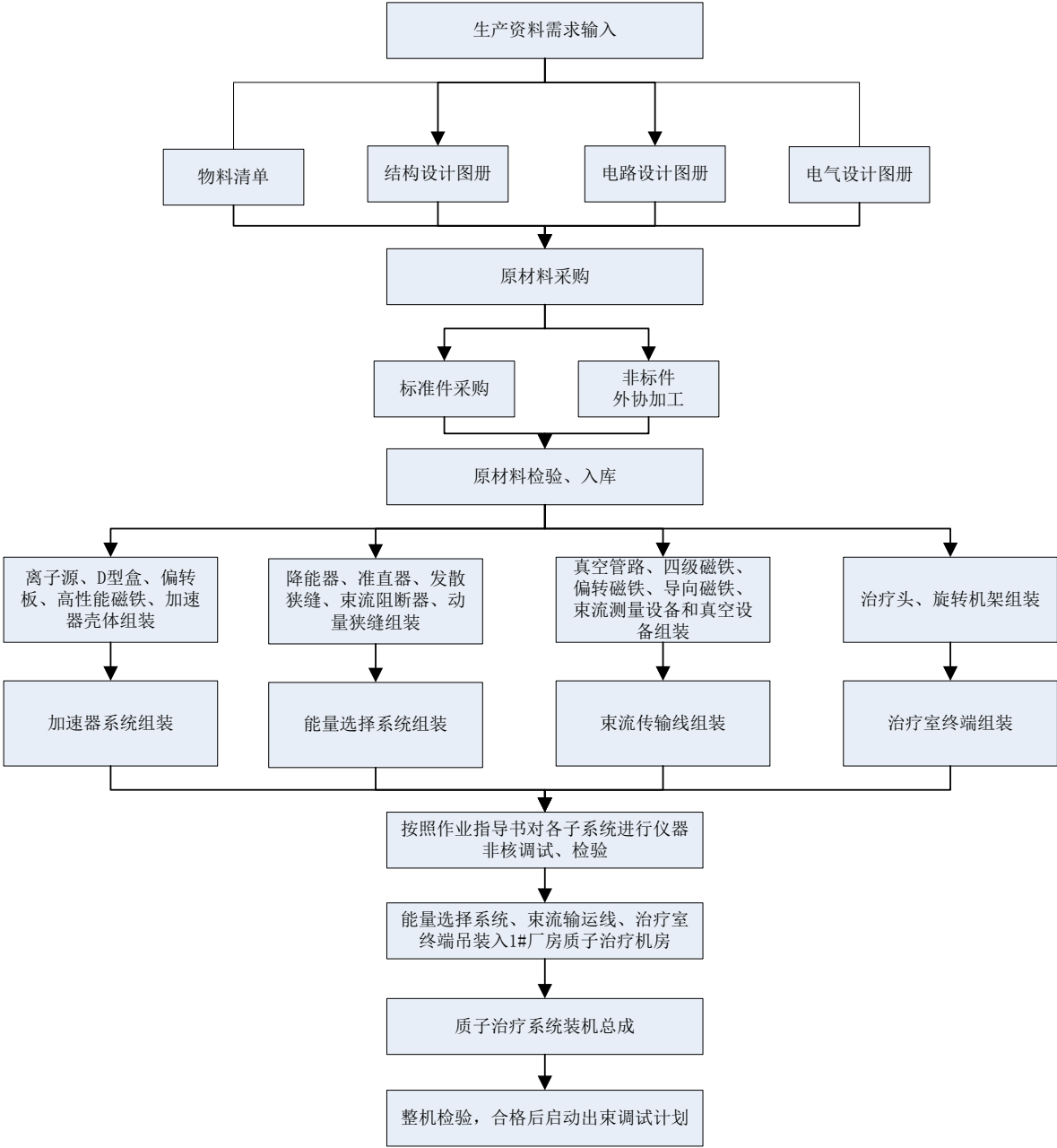


图 3.2-5 非放射性组装、生产流程图

本项目非放射性组装、生产部分工作仅涉及设备及零部件组装、测

试工作，含少量焊接作业，不涉及任何电路、电器元件、仪器的生产、包装与加工工艺，不涉及机械加工、电镀、表面处理、喷漆等工序（相应工序全部委外实施）。

本项目各单元部件初步调试较为类似，主要涉及机械、真空、接线、控制、加电、性能调试等测试作业，以加速器偏转板部件调试为例，其测试流程如下图所示。

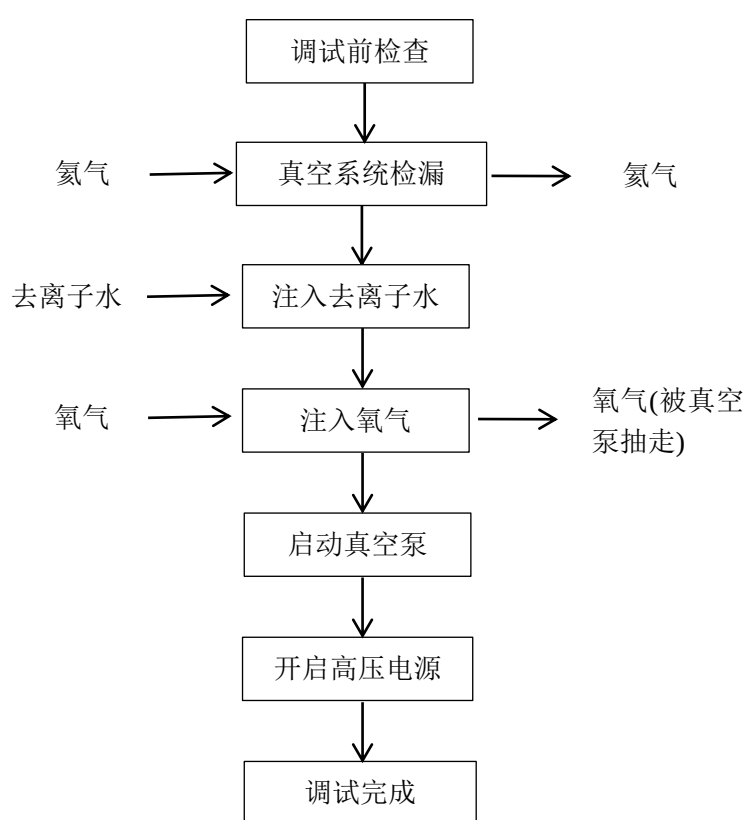


图 3.2-6 加速器偏转板部件调试流程图

偏转板部件调试流程简介：

1) 调试前检查：检查、核对控制系统的信号是否正确，检查安全保护接地是否可靠，测试急停按钮是否可靠。

2) 真空系统检漏：用氦气检漏仪对真空系统进行检漏，氦气会在空气中扩散。

3) 注入去离子水：启动水冷机，为测试平台提供去离子冷却水，去离子冷却水在冷却管道中循环。

4) 注入氧气：打开氧气阀，注入氧气（2-5ml/min）至真空环境中，被真空泵抽出排到大气中。

5) 启动真空泵：启动粗真空泵，等待，当真空达到 10^{-1} mbar 时，启动分子泵。

6) 开启高压电源：当真空达到 9.0E-06mbar 后，接通高压电源，将电极上的电压逐渐升高至 20kV；稳定一段时间后，逐渐将电压升高至 60kV，升压期间，如有电弧放电击穿，降低电压，稳定一段时间后继续升压。

7) 调试完成：当电压达到 60kV 后，漏电流维持小于 10 微安，耐高压锻炼测试完成。

由以上部件调试过程可了解到，本项目非放射性部件调试工程中，无质子束流产生，不产生辐射环境影响。

2、离子源调试

初步调试结束后的质子治疗系统，分功能单元送入本项目 1#生产厂房开展出束调试期间，需要开展加速器离子源调试作业，具体调试工作流程如下图所示。

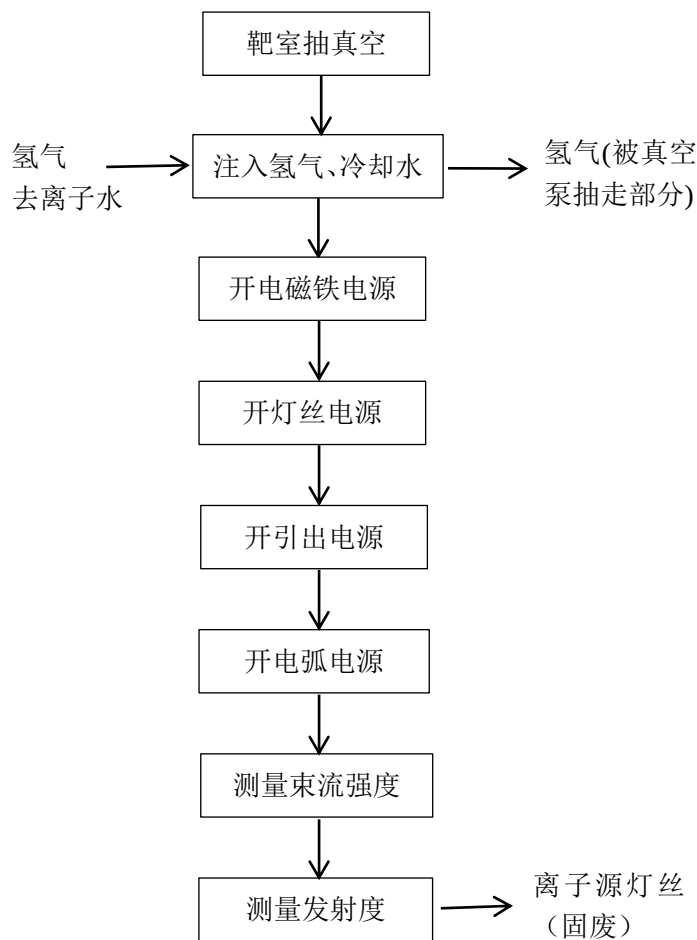


图 3.2-7 离子源调试流程图

离子源调试流程简介：

1) 靶室抽真空：打开粗抽泵，皮拉尼真空规检测真空度达到 0.1mbar 后，打开主真空泵，同时启动潘宁规，直至真空度达到 1×10^{-6} mbar。

2) 注入氢气、冷却水：打开氢气开关阀门，注入氢气，注入氢气流量 2SCCM。打开冷却水阀门，注入去离子冷却水，离子源注入流量 3L/min；电磁铁注入流量 13L/min；部分氢气被真空泵排入大气。

3) 开电磁铁电源：打开磁铁电源，磁铁电源为 30V，300A 直流电源。

4) 开灯丝电源：打开灯丝电源，灯丝电源为 300V，7A 交流电源，频率 16KHz。

5) 开引出电源: 打开引出电源, 引出电源为 50kV, 3mA 直流电源, 电压可调, 设计最大使用电压 40kV。

6) 开电弧电源: 打开电弧电源, 电弧电源为 140V, 500mA 直流电源。电弧电源打开后, 在腔室中电离氢气, 产生等离子体。

7) 测量束流强度: 采用法拉第筒测量引出束流强度, 束流主要成分为 H^+ , H^{2+} , H^{3+} 。设计最大束流强度 10mA。

8) 测量发射度: 采用发射度测量仪测量束流发射度。测试完成后根据使用情况更换离子源灯丝。

由上述调试流程可见, 在离子源调试作业过程中, 存在低能量、低流强的质子束流 (最大能量 40keV, 最大流强 10mA)。对于不同能量的质子阻止本领, 如下图 3.2-8 所示。图 3.2-9 给出了不同级别粒子的能量损失。

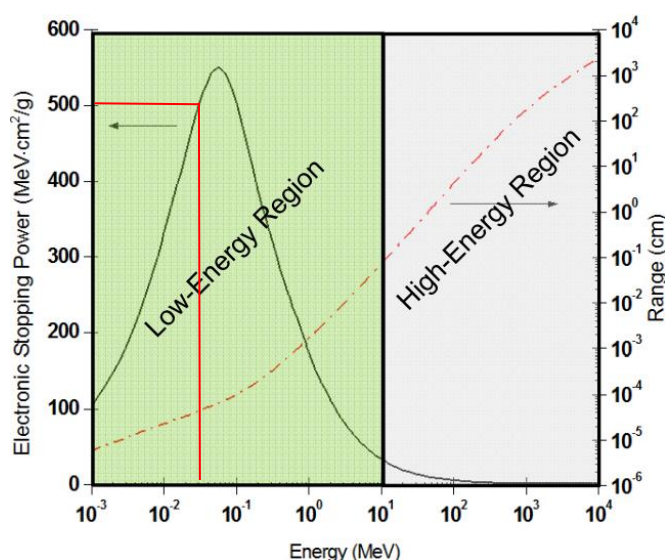


图 3.2-8 质子阻止本领图

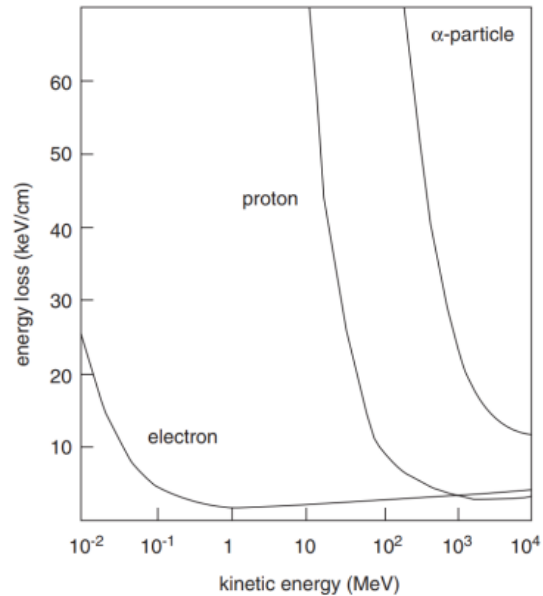


图 3.2-9 不同粒子的能量损失图

由图 3.8-8 可见，对于离子源调试过程产生的 40keV 质子，其质量阻止本领约 $500\text{MeV cm}^2/\text{g}$ ，换算成钢则需要 $0.102\mu\text{m}$ 厚就能挡住。本项目离子源周边为真空环境，真空壁采用 20mm 厚钢板材质，故无需外加其他防护措施。由图 3.2-9 可以看出，对于 keV 级别的质子，随着距离的增加，粒子能量的损失几乎可以认为是无穷大。综上，针对 40keV 的质子，在现有防护的情况下无需增加其他防护，其对周边环境的影响是可以忽略的。本报告将不再分析其所带来的辐射环境影响。

3、放射性安装调试

不出束调试结束后的质子治疗系统各系统组件，分功能单元送入本项目 1#生产厂房安装并开展出束调试。调试作业前，做详尽的调试计划，按照计划在加速器调试区或整体调试区开展调试作业，并采用铜靶作为束流最终损失点，通过项目自行组装生产的图像引导系统进行高清晰度的数字影像定位模拟。拟定每台质子治疗系统放射性安装调试约 12 周，出束时间 240 小时。

质子治疗系统完成调试停机冷却 1 周后，将对各子系统部件（特别是束流损失部件）进行剂量率监测，拟定部件包装方案。采取合理包装方式以保证货包表面辐射水平符合国家规范要求。委托有资质单位将货包运输至用户所在地。

3.2.2.3 质子治疗系统出束调试方案、工作计划及工作量

本项目于 1#生产厂房内建设 1 处质子治疗系统机房。质子治疗系统集成调试机房分隔为东西两个调试区，具体布置及工作内容为：

1) 西侧为加速器调试区，设置质子加速器室（含加速器基坑及铜靶），仅用于开展加速器系统调试作业；建成后，每年组装、调试加速器系统 2 台（套）。

2) 东侧为整体调试区，含质子加速器室（含加速器基坑）、束流输运线、1 个旋转治疗室（含旋转治疗机架基坑及铜靶），既可开展质子治疗系统整体（加速器、束流输运线、治疗室）整体调试作业，亦可单独开展加速器系统调试作业；建成后，每年组装、调试加速器系统 1 台（套）、质子治疗系统 1 台（套）（含回旋加速器、能量选择系统、束流输运线、治疗室终端各 1 套）。

3) CBCT 图像引导系统及二维图像系统依托整体调试区旋转治疗室部分开展生产、使用、调试工作；调试生产的 CBCT 图像引导系统、二维图像系统为质子治疗系统调试计划提供高清晰度的数字影像引导、定位功能模拟作业。

4) 两个调试区共用 1 个控制室。根据工作进度，两个区域存在同时开展调试出束的可能性。

根据建设单位生产调试方案，每台加速器在出厂前均需开展出束调试作业。根据调试规模的不同，本项目分为加速器独立调试和质子治疗系统整体调试两种方式。

本项目计划每年对 3 台回旋加速器系统进行加速器独立调试作业。其中，2 台加速器调试作业于质子治疗系统机房加速器西侧加速器调试区开展，1 台加速器调试作业于质子治疗系统机房加速器东侧整体调试区开展。同时，本项目计划每年对 1 台（套）质子治疗系统（含回旋加速器、能量选择系统、束流输运线、治疗室终端各 1 套）开展整体调试作业，调试作业于质子治疗系统机房东侧整体调试区开展。调试方案及周期安排见下表。

表 3.2-2 本项目质子治疗系统调试方案及周期安排

出束调试项目及参数	加速器调试区	整体调试区	
调试设备	回旋加速器系统 (回旋加速器、铜靶)	回旋加速器系统 (回旋加速器、铜靶)	质子治疗系统(回旋加速器、能量选择系统、束流输运线、治疗室终端、铜靶)
调试设备数量	2 台/年	1 台/年	1 台/年
出束调试周期	12 周/台	12 周/台	12 周/台
出束时间	240 小时/台	240 小时/台	240 小时/台
最高调试能量	230MeV	230MeV	230MeV
额定束流强度	125nA	125nA	750nA
最大引出束流强度	50nA	50nA	300nA
铜靶（负载） 最大束流损失	50nA	50nA	4.3nA
主要束流损失位置	加速器、束流引出口、铜靶	加速器、束流引出口、铜靶	加速器、束流引出口、降能器、准直器、发散狭缝、动量狭缝、铜靶
主要束流损失点源项、损失方式	详见表 3.2-3	详见表 3.2-4	详见表 3.2-5、表 3.2-6(降能器、准直器、发散狭缝、动量狭缝存在 2 种不同的布置方式)

质子治疗系统机房加速器调试区调试过程中，束流损失坐标、方向、强度等见下表 3.2-3，束流损失点位见图 3.2-10。

质子治疗系统机房整体调试区对加速器系统进行调试过程中，束流损失坐标、方向、强度等见下表 3.2-4，束流损失点位见图 3.2-11。

质子治疗系统机房整体调试区对质子治疗系统进行整体调试过程中，为验证不同的束流输运线布置方式的效率及合理性，建设单位对不同时期开展整体调试的降能器、准直器、发散狭缝、动量狭缝将可能采取两种不同的布置方式（同一套质子治疗系统调试时不会改动布置方式），整体调试区束流输运线的束流损失点位坐标、束流方向将随着发生变化。两种不同的束流输运线布置方式调试过程中，整体调试区束流损失坐标、方向、强度等见下表 3.2-5、表 3.2-6，束流损失点位见图 3.2-12、图 3.2-13。

表 3.2-3 加速器调试区加速器出束调试辐射源项表

运行模式	位置	坐标(m)	束流方向	器件	质子能量	束流强度	靶材料	损失率%	损失流强	损失方式
加速器调试区加速器出束调试	1	大半径处	任意方向	回旋加速器 D 型盒	230MeV	125nA	Cu+Fe	20	25nA	集中损失
	2	(6. 3, 12. 3)	南偏西 30°	回旋加速引出隔板	230MeV	100nA	Cu+Fe	50	50nA	集中损失
	3	(4. 6, 9. 2)	南偏西 30°	垃圾桶（铜靶）	230MeV	50nA	Cu	100	50nA	集中损失

表 3.2-4 整体调试区加速器出束调试辐射源项表

运行模式	位置	坐标(m)	束流方向	器件	质子能量	束流强度	靶材料	损失率%	损失流强	损失方式
整体调试区加速器出束调试	4	大半径处	任意方向	回旋加速器 D 型盒	230MeV	125nA	Cu+Fe	20	25nA	集中损失
	5	(17. 3, 12. 3)	南偏西 30°	回旋加速引出隔板	230MeV	100nA	Cu+Fe	50	50nA	集中损失
	6	(15. 6, 9. 2)	南偏西 30°	垃圾桶（铜靶）	230MeV	50nA	Cu	100	50nA	集中损失

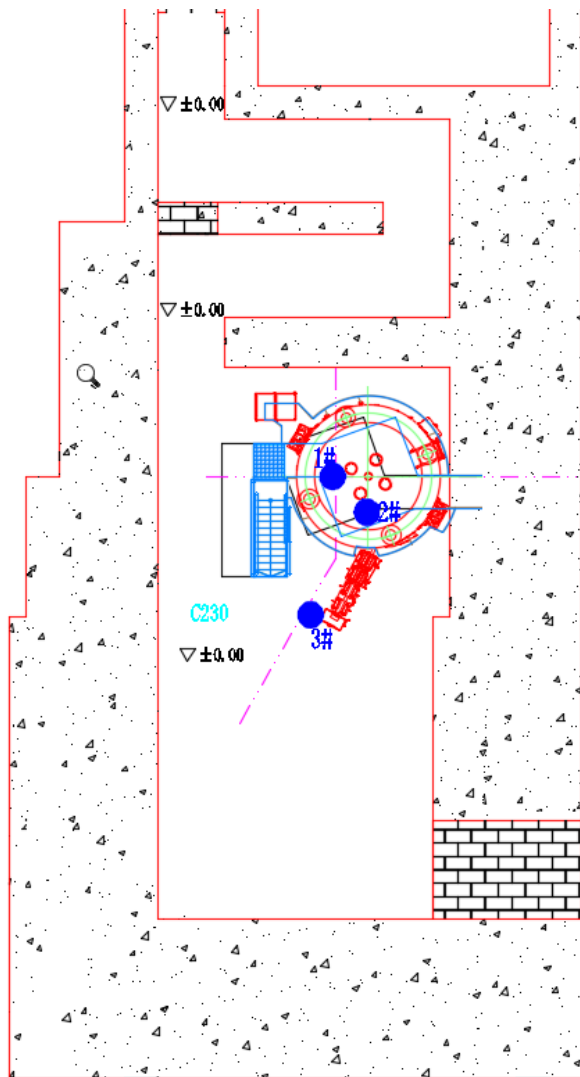


图 3.2-10 加速器调试区加速器出束调试辐射源项点位图

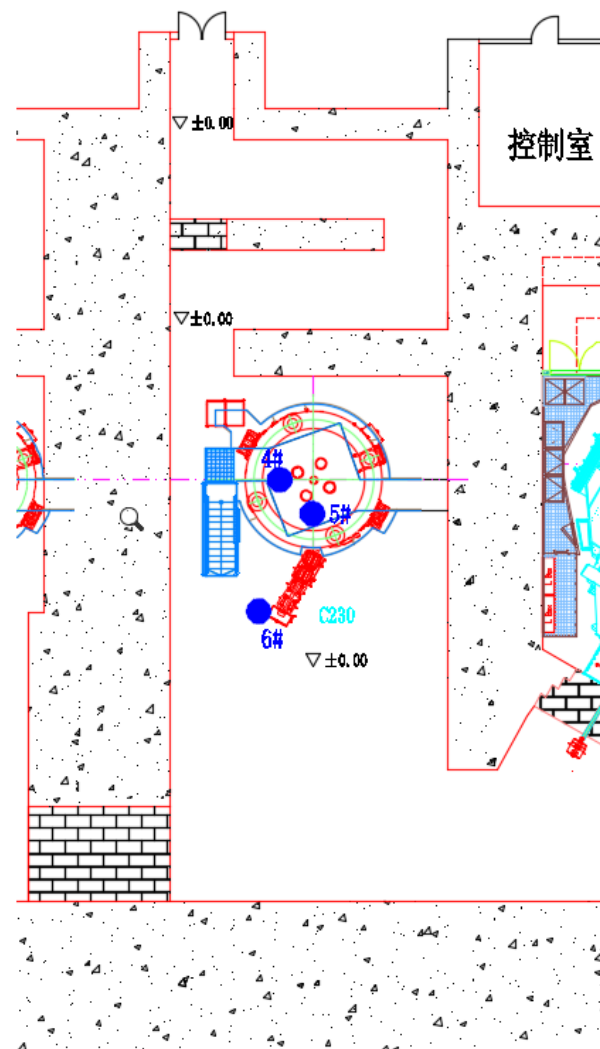


图 3.2-11 整体调试区加速器出束调试辐射源项点位图

表 3.2-5 整体调试区质子治疗系统整体调试辐射源项表 1

运行模式	位置	坐标(m)	束流方向	器件	质子能量	束流强度	靶材料	损失率%	损失流强	损失方式
整体调试 区质子治 疗系统整 体调试	4	大半径处	任意方向	回旋加速器 D 型盒	230MeV	750nA	Cu+Fe	20	150nA	集中损失
	5	(17.3, 12.3)	南偏西 30°	回旋加速引出隔板	230MeV	600nA	Cu+Fe	50	300nA	集中损失
	6	(15.6, 9.2)	南偏西 30°	降能器	230MeV	300nA	Be+C+Al	24	72nA	集中损失
	7		南偏西 30°	准直器	70MeV~ 230MeV	228nA	Ta	94	214nA	集中损失
	8	(14.6, 7.6)	南偏西 30°	发散狭缝	70MeV~ 230MeV	13.7nA	Ni	34.40	4.7nA	集中损失
	9	(15.2, 4.8)	南偏东 30°	动量狭缝	70MeV~ 230MeV	9.0nA	Ni	52.40	4.7nA	集中损失
	10	(30.2, 14.2)	任意方 向	垃圾桶（铜靶）	70MeV~ 230MeV	4.3nA	Cu	100	4.3nA	集中损失

表 3.2-6 整体调试区质子治疗系统整体调试辐射源项表 2

运行模式	位置	坐标 (m)	束流方向	器件	质子能量	束流强度	靶材料	损失率%	损失流强	损失方式
整体调试 区质子治 疗系统整 体调试	4	大半径处	任意方向	回旋加速器 D 型盒	230MeV	750nA	Cu+Fe	20	150nA	集中损失
	5	(17.3, 12.3)	南偏西 30°	回旋加速引出隔板	230MeV	600nA	Cu+Fe	50	300nA	集中损失
	6	(18.5, 1.8)	偏东	降能器	230MeV	300nA	Be+C+Al	24	72nA	集中损失
	7		偏东	准直器	70MeV~ 230MeV	228nA	Ta	94	214nA	集中损失
	8		偏东	发散狭缝	70MeV~ 230MeV	13.7nA	Ni	34.40	4.7nA	集中损失
	9	(24.6, 4.3)	北偏东 30°	动量狭缝	70MeV~ 230MeV	9.0nA	Ni	52.40	4.7nA	集中损失
	10	(30.2, 14.2)	任意方向	垃圾桶（铜靶）	70MeV~ 230MeV	4.3nA	Cu	100	4.3nA	集中损失

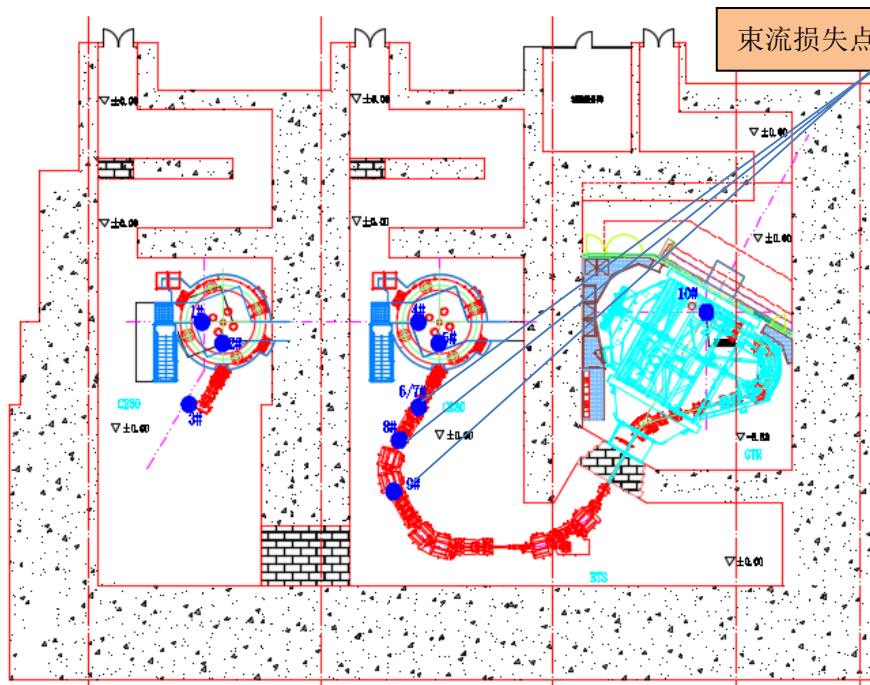


图 3.2-12 整体调试区质子治疗系统整体调试辐射源项点位图 1

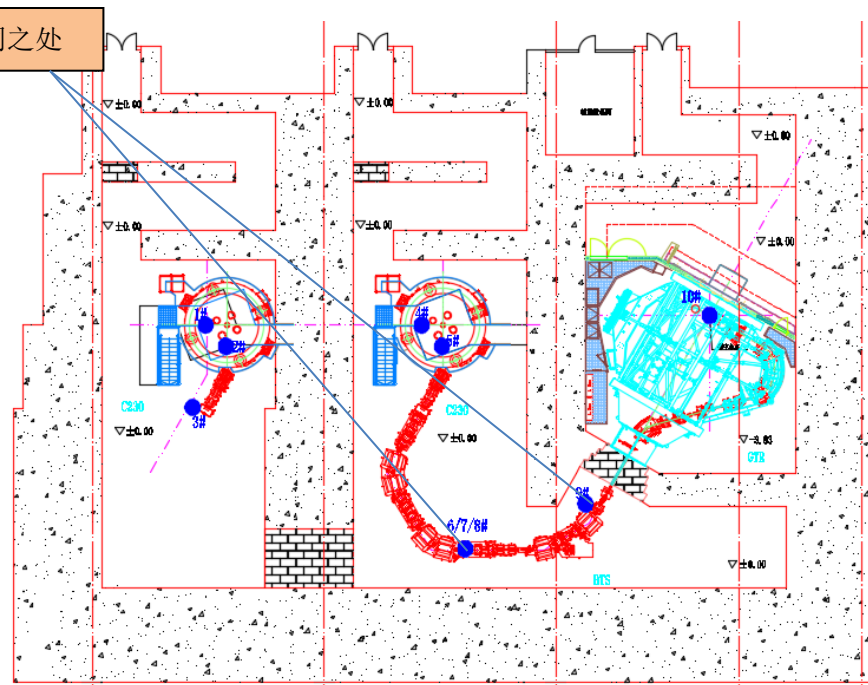


图 3.2-13 整体调试区质子治疗系统整体调试辐射源项点位图 2

3.2.2.4 图像引导系统生产、调试

图像引导系统是本项目质子治疗设备上一个子系统，主要用于治疗图像引导，包括 CBCT 图像引导系统和二维图像系统两种类型。两种图像引导系统中射线源均为 X 射线管，仅成像接收方式有所不同，均为 III 类医用射线装置（医用 X 射线诊断装置）。

建设单位拟依托旋转治疗室开展 CBCT 图像引导系统及二维图像系统联合生产调试工作。成像系统调试完毕后，将作为本项目质子治疗设备上一个子系统，与质子治疗系统配套销售。项目建成后，将形成 III 类射线装置生产能力如下表所示。

表 3.2-7 本项目 III 类射线装置生产能力

序号	名称	类别	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途	规模	申请活动范围
1	CBCT 图像引导系统	III 类	150	320	医疗诊断/治疗定位	20 台/年	生产、销售、使用
2	二维图像系统	III 类	150	420		20 台/年	

3.2.2.5 用户方安装调试流程、维护维修流程

中广核医疗在本项目内完成质子治疗系统或加速器系统调试后，将自行拆卸、打包系统部件，并委托有资质单位运输至用户方。质子治疗系统运抵用户方后，安装调试和售后维修维护环节在用户方使用质子治疗系统的辐射工作场所内进行（该场址由用户方先期完成环境影响评价后方可允许质子治疗系统入驻），由中广核医疗工程师团队负责。其工作流程与绵阳质子医疗装备制造基地建成前阶段用户方安装调试流程一致，详见“章节 3.2.1.2”，此处不再重复叙述。

质子治疗系统维修维护的整个过程，由中广核医疗的工作人员负责，

用户单位负责提供工作场所和协调前期相关准备工作，不参与具体维修维护作业。维修维护包括质子治疗系统发生故障时的维修和阶段性的维护保养，具体流程与绵阳质子医疗装备制造基地建成前阶段用户方安装调试流程一致，详见“章节 3.2.1.3”，此处不再重复叙述。

3.2.3 项目组成及主要环境问题

项目主要建设内容、规模及可能产生的环境问题详见下表。

表 3.2-8 项目组成及主要环境问题

名称	建设内容及规模		可能产生的环境问题	
			施工期	运行期
主体工程(非本项目区域)	I 类射线装置销售	项目将形成 4 套/年的质子治疗系统生产、销售（含建造）能力。 签订销售协议后，开展设计工作，在用户方辐射工作场所获得环评批复后，开展建造指导、安装、调试等工作。	/	/
	III类射线装置销售业务	项目还将配套形成 CBCT（锥形束电子计算机断层扫描）图像引导系统及二维图像系统各 20 台/年的生产、使用（调试）、销售能力。 签订销售协议后，确认用户方拥有相应辐射安全许可证，委托具备相应资质的专业运输单位提供运输车辆及相应人员，开展射线装置销售运输工作。在用户方调试成功后，交付使用。	/	/
	用户方安装调试	质子治疗系统运抵用户方后，安装调试环节在用户方使用质子治疗系统的辐射工作场所内进行，由中广核医疗工程师团队负责。现场安装时，先安装质子治疗系统主体部分（包括回旋加速器、能量选择系统和输运线）。系统主体安装完成后，且确认安全连锁系统、通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成，方可进行带束调试。回旋加速器调试完成后，开始各个治疗室的安装调试。各治疗室安装调试前，也需确认治疗室安全连锁系统、通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成，方可进行出束调试。在出束调试成功后，交付用户方使用。	不涉及	中子、X 射线、 γ 射线、放射性废气、放射性废水、放射性固废、一般固废、危险废物、生活污水、生活垃圾
	售后维修维护	质子治疗系统维修维护的整个过程，由中广核医疗的工作人员负责，用户单位负责提供工作场所和协调前期相关准备工作，不参与具体维修维护作业。维修维护包括质子治疗系统发生故障时的维修和阶段性的维护保养。		

主体工程(本项目区域)	质子治疗系统 组装调试	项目拟在质子治疗系统 2#生产厂房开展质子治疗系统（含回旋加速器设备及相应附属设置、CBCT 图像引导系统及二维图像系统）组装、集成、调试工作。设备、元器件等均为外购或委外生产，该场所仅开展组装调试工作。	施工扬尘 施工噪声 施工废水 建筑垃圾 生活污水 生活垃圾	焊接烟气 清洗废水 废包装材料 噪声 不合格部件 生活垃圾 生活污水
	质子治疗系统 出束调试	项目拟在质子治疗系统 1#生产厂房开展质子治疗系统（含回旋加速器设备及相应附属设置）集成、调试及国产化研发工作，加速器引出质子最大能量为 230 兆电子伏特，引出连续最大束流 300nA。属 I 类射线装置）。 项目建成后，将形成 4 台/年的质子治疗系统的生产、使用（调试）、销售（含建造）能力。同时，项目还将配套形成 CBCT（锥形束电子计算机断层扫描）图像引导系统及二维图像系统各 20 台/年的生产、使用（调试）、销售能力，CBCT 图像引导系统及二维图像系统为质子治疗系统放射治疗图像引导装置，均属于 III 类射线装置。		中子、 X 射线、 γ 射线、 放射性废气、 放射性废水、 放射性固废、 一般固废 危险废物 生活污水 生活垃圾
	1.加速器调试 区	①加速器调试区周边采用半包围屏蔽，西侧为 3~4.5m 厚混凝土墙，南侧为 4.8m 厚混凝土墙；东侧为 4~4.5m 厚混凝土墙； ②回旋加速器顶部混凝土屋顶厚度 2.8m，局部设置 5.08×5.08m 可开顶盖混凝土砌块； ③加速器室北侧设置“S”型迷道，由南至北各迷道内墙厚度分别为 1.5m、1.0m、1.0m，内部过道宽 2.0~2.5m，迷道西侧外墙厚度为 1.0m，迷道口设普通联锁门。 ④加速器调试区内，加速器南侧设置铜靶作为调试束流的负载。		
	2.1 整体调试 区加速器室	①加速器调试区周边采用半包围屏蔽，西侧为 4~4.5m 厚混凝土墙、南侧为 4.8m 厚混凝土墙、东侧为 3m 厚混凝土墙； ②回旋加速器顶部混凝土屋顶厚度 2.8m，设置为可开顶盖混凝土砌块； ③加速器室北侧设置“S”型迷道，由南至北各迷道内墙厚度分别为 1.5m、1.0m、1.0m，内部过道宽 2.0~2.5m，迷道西侧外墙厚度为 1.0m，迷道口设普通联锁门。		

	2..2 整体调试区束流传输线区域	①束流传输线连接加速器室及治疗室，束流传输线连与治疗室之间的混凝土屏蔽墙 1.68m 厚； ②输运线不设置迷道。 ③顶部混凝土屋顶厚度 2m。		
	2.3 旋转治疗室	①旋转治疗室西侧混凝土屏蔽墙厚 4~4.5m；东侧混凝土屏蔽墙厚 4.7m。 ②旋转治疗室北侧设置“S”型迷道，由南至北各迷道内墙厚度分别为 2.5m、1.4m，内部过道宽 2.0~2.5m，迷道西侧外墙厚度为 0.4m，迷道口设普通联锁门。 ③顶部混凝土屋顶厚度 2m，局部设置 5.08×5.08m 可开顶盖混凝土砌块。		
	3.CBCT 图像引导系统生产调试区	CBCT 图像引导系统依托旋转治疗室开展生产、组装及调试作业。		
	4.二维图像系统生产调试区	与 CBCT 图像引导系统依托旋转治疗室开展生产、组装及调试作业。		
辅助工程	质子治疗系统 1#生产厂房内，紧邻质子治疗系统区北侧设置主控制室，西侧设置通风设备间，厂房北侧设置空调机房、冷却水设备间、电源室、总控室、工具间等功能区域，厂房西侧设置物流区用于物料转运。		/	/
办公及生活设施	新建质子医疗办公楼开展办公设计工作，地面以上四层，地下局部一层。建筑高度 16.8m，占地面积 947.42m ² ，建筑面积 3990.68 m ² 。		/	生活垃圾 生活污水
环保设施	废气：本项目质子治疗系统调试过程产生的废气将由治疗机房内通排风系统引出，于 1#生产厂房屋顶排气筒排放，排气筒高度 30m。		/	/
	废水：质子治疗系统冷却循环水定期更换，每个加速器调试周期结束后，均将冷却循环水排入 1#生产厂房北侧放射性废水暂存池中，经检测达标后，排入市政污水管网；人员生活污水经预处理池处理后，排入市政污水管网。		/	/
	固废：质子治疗系统更换、维护过程产生的活化部件作为放射性固废，经检测后，装入定制屏蔽容器，送项目场址西侧放射性废物暂存间暂存，定期交有资质单位处置；组装过程中产生的危险废物集中收集至密闭容器中，于 2#生产厂房危废暂存间暂存，定期交有资质单位处理；一般固废集中收集，与人员生活垃圾一并由市政环卫部门清运。		/	/

3.2.4 主要设备及工艺装置

本项目产品方案见下表。

表 3.2-9 本项目产品方案

序号	设备名称	规格型号	主要参数	厂家/产地	管理类别	调试位置	年产量(台/套)
1	质子治疗系统	C230	70~230MeV 额定流强 750nA 最大引出流强 300nA	IBA/比利时/ 中广核医疗科技	I 类	1#生产厂房	4
2	CBCT 图像引导系统	待定	150kV/320mA	待定	III类	1#生产厂房	20
3	二维图像系统	待定	150kV/420mA		III类	房	20

本项目使用的主要工艺设备列于下中

表 3.2-10 本项目主要工艺设备一览表

设备名称	规格型号	数量	用途或使用工序
行车	20T	2 台	吊装重型仪器设备
可移动吊装架	5T	2 套	子系统装配使用
叉车	3T	1 台	转运设备及零部件
通用/专用装配工具	多种	1 组	装配
氦检漏仪	ASM340	1 台	真空检漏
真空计	CENTER2+PTR91	2 套	真空检测
高灵敏度阻抗检测仪	TH2515	1 套	阻抗检测
高精度精密工作台面	1m*1m; 00 级	1 台	尺寸检测
气垫搬运装置	5 吨	1 套	精密设备搬运
表面光洁度测试工具	LEEB432	1 套	粗糙度检测
专用测磁装置	定制	1 套	磁场测量
超声波清洗装置	1*0.5*0.4 (m ³)	2 套	清洗
电源稳压器	SJW3-120kVA	1 套	设备供电
水冷装置	LSF-40DT	1 套	提供冷却水
压缩空气系统	G7P-8.5	1 套	提供压缩空气
高精度水平尺	42-065-23	1 件	安装测量
高性能 RF 信号发生器	UTG9030RF	1 台	电子测试
50MHZ 四通道数字示波器	DSOX1204G	1 台	电子测试
射频功率计	Agilent N1911A	1 台	功率测试
网络分析仪	Agilent E5071A	1 台	信号测量
钎焊机	SFG-100	1 台	焊接
真空泵机组	HiCube 700 Classic	1 套	真空测试
激光准直仪	Leica AT930	1 台	机械测量
机械臂测量仪	Hexagon-85	1 台	机械测量
剂量监测器	FJ1210 型	1 台	放射性测量
模拟校准工具	定制	1 套	电子设备
USP 电源	50kVA	1 套	备用电源

本项目原辅材料使用情况见下表。

表 3.2-11 本项目原辅材料使用情况一览表

原辅材料名称	规格/型号	年用量	最大储存量	储存方式	用途	来源
离子源	定制	4 台套	4 台套	常温干燥箱	组装调试	外购
加速器壳体	定制	4 台套	2 台套	常温常压	组装调试	外购
偏转板	定制	4 台套	2 台套	常温干燥箱	组装调试	外购
电磁铁	定制	4 台套	2 台套	常温常压	组装测试	外购
降能器	定制	1 台套	1 台套	常温常压	组装调试	外购
准直器	定制	1 台套	1 台套	常温常压	组装调试	外购
能量狭缝	定制	1 台套	1 台套	常温常压	组装调试	外购
动量狭缝	定制	1 台套	1 台套	常温常压	组装调试	外购
真空管道	定制	4 台套	2 台套	常温常压	组装/焊接	外购
治疗机架	定制	1 台套	1 台套	常温常压	组装调试	外购
治疗头	定制	1 台套	1 台套	常温常压	组装调试	外购
铜靶	定制	2 台套	2 台套	常温常压	束流接收	外购
电源机柜	多种	4 台套	2 台套	常温常压	组装	外购
控制机柜	多种	4 台套	2 台套	常温常压	组装	外购
无水乙醇	500ml/瓶	100 瓶	24 瓶	常温常压/独立存放	设备擦拭	外购
丙酮	500ml/瓶	36 瓶	24 瓶	常温常压/独立存放	设备擦拭	外购
螺纹胶 Loctite243	50ml	20 瓶	10 瓶	常温常压	组装	外购
清洗剂 LX2000-007	25kg/桶	2 桶	2 桶	常温常压	超声波清洗	外购
焊料（银铜钎料）	多种	100kg	25kg	常温常压	钎焊	外购
氢气	40L； 15Mpa	8 瓶	2 瓶	常温/独立房间存放	设备调试	外购
氦气	40L； 15Mpa	8 瓶	2 瓶	常温/气瓶间存放	设备调试	外购
氧气	40L； 15Mpa	8 瓶	2 瓶	常温/气瓶间存放	设备调试	外购
氮气	40L； 15Mpa	8 瓶	2 瓶	常温/气瓶间存放	设备调试	外购

表 3.2-12 本项目主要辅助材料理化性质一览表

序号	名称	理化性质	毒理毒性/危险性
1	乙醇	无色易燃，且有特殊香味的挥发性液体。与水混溶，可混溶于醚、氯仿、甘油等多数有机溶剂。无水乙醇密度为 0.79g/cm ³ 。	易燃，具刺激性。
2	丙酮	无色透明易流动液体，有微香气味。易溶于水、甲醇、乙醇、乙醚、氯仿、吡啶等有机溶剂。相对密度（水=1）：0.788。沸点 56.53℃。	急性中毒主要表现为对中枢神经系统的麻醉作用，出现乏力、恶心、头痛、头晕、易激动。燃爆危险：该品极度易燃，具刺激性。

3	螺纹胶	主要成分为糖精 1~10%，1-甲基-1-苯基乙基过氧化氢 1~10%，1,4-萘醌 0~0.1%，其他成分为聚合物，密度 1.08g/cm ³	/
4	清洗剂	蓝色至绿色液体，主要成分为磷酸盐（5%）、表面活性剂（1%），具有弱酸性。相对密度（水=1）为 1.2~1.34g/ml	对伤口附近、眼睛和皮肤有一定的刺激和腐蚀

注：本项目使用的螺纹胶属于其他类胶粘剂，化学性质稳定，螺纹胶中的挥发性有机化合物（VOCs）含量为 4.1%（1-甲基-1-苯基乙基过氧化氢 4%，1,4-萘醌 0.1%），符合《胶粘剂挥发性有机化合物限量》（GB33372-2020）中“表 3 本体型胶粘剂 VOC 含量限量”限定：“应用于装配业的其他类胶粘剂中 VOC 限量值为 50g/kg”的要求。

3.2.5 劳动定员及工作制度

劳动定员：本项目劳动定员 108 人，其中拟配置射线装置操作人员 24 人（分为 4 组开展工作），辐射安全管理 6 人。辐射工作人员定岗定责，不从事其它辐射工作岗位。

其他人员数量约 78 人，不涉及辐射作业内容，质子治疗系统处于调试出束状态时，不进入辐射工作场所（1#生产厂房）。

工作制度：本项目每年工作 250 天，每天工作 8 小时。辐射工作人员实行一班制工作制度。

建设单位承诺本项目辐射工作人员在上岗前均应参加辐射安全与防护培训，经考试、获证后持证上岗，定期参加复训。

3.3 污染源项

本项目主要开展质子治疗系统及其附属设备销售、场所建造、部件组装、整机生产、出束调试等作业过程，并按照项目所在绵阳质子医疗制造基地建成前后分为两个阶段进行运行。

质子治疗系统销售过程中，主要涉及商务谈判、财务结算，不涉及放射性操作，也不会对加速器进行开机出束。因此，质子治疗系统的销售环节不会对周围环境产生辐射污染。

质子治疗系统运输过程中，由中广核医疗或用户方委托有资质的单位开展运输作业。质子治疗系统按照国家规范要求进行打包运输，其运输过程环境影响由有资质运输单位进行防护、治理以及处置。本评价不再涉及相应部分污染源项。

质子治疗系统销售、组装生产、建设单位调试、用户端调试、维修维护等过程中主要的污染源分析如下表。

表 3.3-1 本项目污染源分析

运行阶段	活动环节	影响范围	
		工作人员	公众
1 阶段，绵阳基地未建成	销售	——	——
	用户方安装调试	瞬时辐射照射 感生放射性气体 活化结构部件	瞬时辐射照射 感生放射性气体（由用户方辐射工作场所环评报告进行分析论述）
	维修维护	瞬时辐射照射 感生放射性气体 活化结构部件	瞬时辐射照射
2 阶段，绵阳基地建成后（常态运行）	销售	——	——
	建设单位组装生产	焊接烟气 VOCs	焊接烟气 VOCs
	建设单位出束调试	瞬时辐射照射 感生放射性气体 活化结构部件	瞬时辐射照射 感生放射性气体
	用户方安装调试	瞬时辐射照射 感生放射性气体 活化结构部件	瞬时辐射照射 感生放射性气体
	维修维护	瞬时辐射照射 感生放射性气体 活化结构部件	瞬时辐射照射

其中安装调试环节，无论是建设单位出束调试还是用户方调试作业，该环节主要的污染源均为质子治疗系统开机出束产生的瞬时辐射对工作人员和周围活动公众造成的外照射。此外，安装调试期间产生的感生放射性气体和活化结构部件也会对工作人员和周围公众产生辐射影响。

维修维护环节，工作人员在设备停机后进入加速器大厅或治疗室

检修、维护时，可能受到这些区域内加速器运行产生的感生放射性气体和活化结构部件的辐射影响。维修完成后进行调试时，设备开机出束产生的瞬时辐射会对工作人员和周围活动的公众造成辐射影响。

3.3.1 230MeV 质子与物质的相互作用

3.3.1.1 230MeV 质子与物质的相互作用机理及辐射场的来源

本项目质子治疗系统从回旋加速器引出的质子能量为 230MeV，经降能器后，进行治疗的质子能量在 130MeV~230MeV 之间。该能区的质子，以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，发生核内级联，通过 (p, n) 、 (p, pn) 、 $(p, 2n)$ 、 (p, α) 、 (p, γ) 等核反应产生瞬发中子、 γ 和其它粒子。由于 π 介子静质量~140MeV，产生阈能 (~150MeV)，核反应也可以产生 π 介子，但其产生截面很小，在 300MeV 时，也仅为 0.001mb 左右，因此可以忽略 π 介子等稀有粒子的影响。在产生的次级粒子中，带电粒子因电离作用迅速停止，因此，从靶中出来的主要是次级中子和 γ 。其中产生的次级中子能量由低到高可分为热中子、蒸发中子和级联中子三部分。在屏蔽材料的屏蔽作用下，初始的热中子、蒸发中子和 γ 的数量迅速减少，级联中子成为穿透屏蔽的主要贡献者；级联中子在穿透屏蔽过程中，通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数目，一部分转变成了热中子和蒸发中子，一部分通过 (n, γ) 反应等转化成了光子，使得达到一定屏蔽深度，中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变，形成“平衡谱”。最终屏蔽内、外的瞬发辐射场

都成为中子、光子的混合场。

在产生上述瞬发辐射（主要是瞬发中子和瞬发 γ ）的过程中，靶和周围部件、屏蔽墙、空气和冷却水里原本稳定的靶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，产生了感生放射性。在加速器停机以后，这部分放射性核素会继续释放出 γ 、 β 等射线，成为剩余辐射的来源。

3.3.1.2 230MeV 以下质子与物质作用次级粒子的辐射场分布

辐射场的分布特点：

1、粒子加速器运行时产生的辐射场，包括加速器的运行时产生的“瞬发辐射场”和加速器停机后依然存在的“残余放射场”。瞬发辐射决定着加速器的屏蔽厚度，而残余放射性是工作人员所受剂量的主要来源。瞬发辐射是加速器运行时损失束流与加速器部件、屏蔽体等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但会随着加速器的停机而完全消失；残余放射性主要来自与加速器部件、设备冷却水、空气被主束或次级粒子轰击产生的活化产物，在加速器停机后依然存在。前者决定着加速器的屏蔽厚度，而后者是工作人员所接受剂量的主要来源。

2、对于医用质子加速器，其能量、流强变化大，束流在各损失点损失流强有明显差别。加速器运行时产生的辐射主要是高能粒子引起的核反应而发射出的瞬发中子，主要包括由核内级联产生的高能中子及复合核退激出射的蒸发中子（各向同性部分）两部分，其他粒子

(电子、 γ 等)不论是产生的量还是穿透能力皆小于中子,对于屏蔽外剂量当量的贡献与中子相比可以忽略。因此对于中高能的质子加速器,中子是决定屏蔽厚度的主要因素。同时,次级中子也是造成空气、冷却水和屏蔽体活化的主要因素。

3、质子核反应瞬发中子的产额、能谱和角分布与质子的能量和流强有密切关系,还受靶核性质的影响。中子产额与能量都随质子束能量的提高而单调上升。中、高能质子核反应瞬发中子有两个突出的特点:从角分布看,正前方有尖锐的峰值;从能谱看,几乎各个方向都有一部分高能中子,尤其是前方,其能量最高可与质子束能量相当,这些高能中子是辐射屏蔽的主要对象。

4、辐射场以中子为主导,并具有明显的前向性,光子剂量率比中子小了 2 个量级,230MeV 时, π 介子可以忽略,130MeV 则完全记录不到 π 介子(低于反应阈能)。

5、对于医疗质子加速器的屏蔽设计,最主要的在于次级中子辐射场的确定。评价采用两种方法来计算次级中子辐射场,一是依据《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021)、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分:质子加速器放射治疗机房》(GBZT201.5-2015)等标准规范中经验公式进行预测计算,二是利用 FLUKA 程序进行复核计算。

3.3.2 放射性污染源

3.3.2.1 质子加速器瞬发辐射及感生放射性

1、质子加速器瞬发辐射源项分析

质子治疗系统的核心是质子加速器，质子在加速、降能、准直、传输、治疗及调束过程中都有质子束流的损失。本项目质子装置从回旋加速器引出的质子能量为 230MeV，经降能器后质子能量在 70MeV~230MeV 之间。该能区的质子，以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，发生核内级联，通过 (p, n)、(p, pn)、(p, 2n)、(p, α)、(p, γ) 等核反应产生瞬发中子、 γ 和其它粒子。其它粒子由于产额小或不能穿透屏蔽而快速衰减，使得屏蔽内、外的瞬发辐射场都成为以中子为主、光子为辅的混合场。

瞬发辐射是屏蔽设计的主要考虑因素，恰当的屏蔽设计可使屏蔽外工作人员和公众在加速器运行时的放射性污染降到合理、可行且尽可能低的水平。

由装置结构和工艺流程可以看出，质子治疗系统的加速器运行参数取决于调试计划。主要辐射源项包括回旋加速器的束流损失（含加速过程的损失和引出过程中的损失）、能量选择系统的束流损失（包括降能器、降能器上的束流阻断器、准直器、狭缝）、束流输运线的束流损失、治疗室的束流损失（铜靶/负载的 100%损失）、以及沿束流线的随机损失。

本项目质子治疗系统机房主体包括：两个回旋加速器调试间、高能输运线及 1 个旋转机架调试间等。调试用的粒子是质子，最高能量为 230MeV。

2、感生放射性

感生放射性是加速器设备维修维护人员、运输打包人员的主要辐射来源。同时，也是周围公众和环境受本装置影响的主要因素之一。

（1）感生放射性的产生

加速器运行时束流损失在部件、靶等部位，在产生瞬发辐射的过程中，初始和次级粒子与周围设备、屏蔽体和空气、水等材料发生的核反应，会使里面原来稳定的核素转变成带有各种放射性的核素，使其产生感生放射性，发生活化。在加速器停机后，由束流损失产生的瞬发辐射立即消失，但感生放射性依然存在，产生的放射性核素依然会按照各自的衰变规律，发出 γ 、 β 等射线。

主要的活化及产物包括：

加速器结构部件（特别是质子源及质子束直接作用的部件：Cu、Fe、不锈钢、Al 和 Al 合金）活化主要产生 ^{54}Mn 、 $^{52\text{m}}\text{Mn}$ 、 ^{56}Mn 、 ^{58}V 、 ^{51}Cr ；

加速器室内的混凝土屏蔽墙活化主要产生 ^{24}Na ；

加速器厅室内的空气活化主要产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar ；

加速器冷却水活化主要产生 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^7Be 、 ^3H ；

地表层土壤和地下水活化主要产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{22}Na 。

计算方法：

采用蒙特卡罗程序模拟计算源项，结合 Gollon 经验法则、活化公式进行估算和验证。

(2) Gollon 经验法则和剩余剂量率

NCRP-144 号报告，给出了 Gollon 经验法则，包括以下四条：

法则 1：点源的 γ 吸收剂量率由下式决定

$$\frac{dD}{dt} = (1.08 \times 10^{-4}) \frac{S}{r^2} \sum_i E_{\gamma i} \quad (3.1)$$

式中， $\frac{dD}{dt}$ 是距离点源 $r(m)$ 处的空气吸收剂量率，单位为 $Gy \cdot h^{-1}$ ； S 是点源的活度；单位用 GBq 表示； $E_{\gamma i}$ 是光子的能量，单位用 MeV 表示。

法则 2：对于多数普通材料，大约 50% 的非弹性核反应产生了半衰期大于几分钟的放射性核素，而且，其中约有 50% 的放射性核素的半衰期是大于 1 天的。

法则 3：对于大多数普通屏蔽材料，有 Sullivan-Overton 关系式：

$$\frac{dD}{dt} = b\phi \ln\left(\frac{t_i + t_c}{t_c}\right) \quad (3.2)$$

式中， $\frac{dD}{dt}$ 是空气吸收剂量率， t_i 、 t_c 分别是照射时间和冷却时间， b 是由几何和材料决定的常数， ϕ 是入射粒子通量。Sullivan-Overt 关系式适用于中等原子质量的材料和停机时间大于 30 分钟的情形。

法则 4：在强子级联中，质子或者中子每 GeV 能量产生约 4 个非弹性核反应。

(3) 活化公式和活度

假设加速器稳定运行 $t_i(s)$ 时间，然后冷却了 $t_c(s)$ 时间，照射到靶上的初始或次级粒子束对靶的活化截面是 σ (b ， $1b = 10^{-24} cm^2$)。在加速器运行时 ($0 \leq t \leq t_i$) 和停机后 ($t > t_i$) 两个阶段，产生的放射性核素

的比活度 $S(Bq.cm^{-3})$ ，分别对应下面的活化公式：

$$S(0 \leq t \leq t_i) = N\sigma\Phi(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.3a)$$

$$S(t = t_i + t_c) = N\sigma\Phi(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_c} \quad (3.3b)$$

用半衰期 $T_{1/2}(s)$ 表示为：

$$S(0 \leq t \leq t_i) = N\sigma\Phi \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}\right) \quad (3.4a)$$

$$S(t = t_i + t_c) = N\sigma\Phi \left(1 - 2^{-\frac{t_i}{T_{1/2}}}\right) 2^{-\frac{t_c}{T_{1/2}}} \quad (3.4b)$$

式中， λ 为该放射性核素的衰变常数(s^{-1})， $N(cm^{-3})$ 是靶材料的原子密度， $\Phi(cm^{-2} \cdot s^{-1})$ 是入射粒子通量；照射时间 $t_i \rightarrow \infty$ 时，活化达到饱和，因此， $S_{sat} = N\sigma\Phi$ 为产生的放射性核素在加速器持续运行下的饱和活度($Bq.cm^{-3}$)。

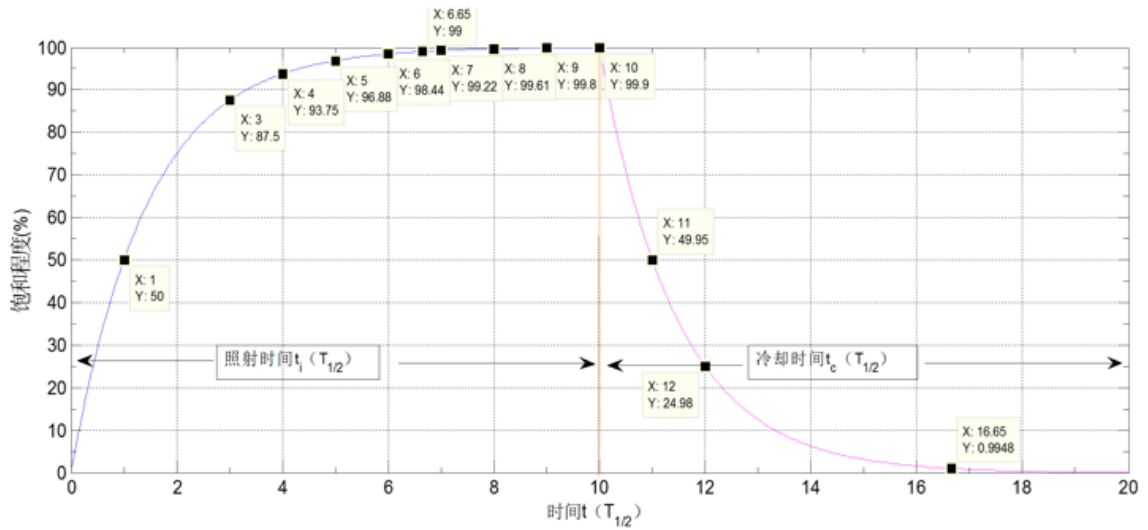


图 3.3-1 加速器运行和停机时活度随时间的变化情况（运行时间为 10 个半衰期）

图 3.3-1 直观地表示了活度随加速器运行和停机时间的变化情况。由图归纳出加速器运行时的活度累积规律：

- ①活化活度、饱和活度与入射粒子通量成正比。
- ②加速器运行该放射性核素的 1 个半衰期，饱和程度达到 50%；

运行 5 个半衰期，饱和程度达到 97%；饱和程度达到 99%，只需 6.5 个半衰期；达到 99.9%，只需 10 个半衰期。

③半衰期越短的核素，越容易达到饱和。

④一般加速器连续运行时间在几周或几个月，所以对于半衰期在 1 周以下的核素，都可以认为达到了饱和，只有那些半衰期在几个月乃至几年的长寿命核素，才难以达到饱和。

对于加速器多次运行、停机的情况，当各次停机时间远小于运行时间的情形，可以采用下式保守计算：

$$S(t) = N\sigma\Phi \left(1 - 2^{-\frac{t_i}{T_{1/2}}}\right) 2^{-\frac{t_c}{T_{1/2}}} \quad (t_i = \sum_k t_{ik}) \quad (3.5)$$

对于半衰期仅为最后一次运行时间的几分之一核素，最后的活度基本取决于最后一次的运行和停机过程，之前历次运行时对活度产生的累积效应基本可以忽略。图 3.3-2 给出了加速器多次运行、停机过程的活化过程。

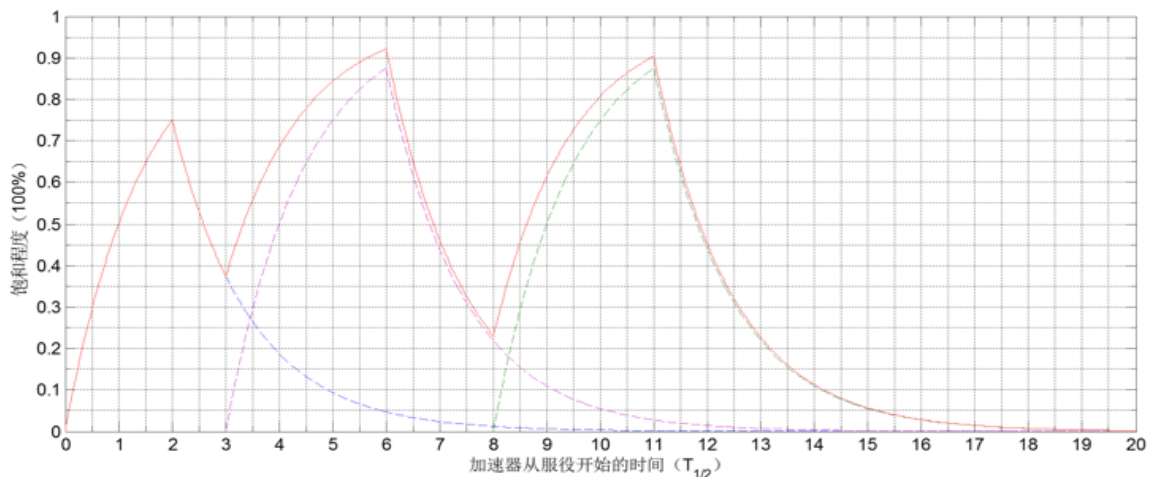


图 3.3-2 加速器多次运行、停机过程的活化过程

(4) 空气活化计算

静态空气中感生放射性核素的产生：

加速器空气产生的感生放射性主要有三个来源：（1）初始或次级粒子与空气分子的直接核反应；（2）空气中的灰尘或气溶胶；（3）冷却水等蒸发到空气中。Thomas和Stevenson在1988年^[5]，Swanson和Thomas在1990年^[1]对空气活化产生的感生放射性问题作了深入讨论，结果表明，由第一种方式产生的感生放射性占主导，后两种方式产生的感生放射性要小得多^[2]。将一般活化方程扩展，可以直接得到密闭的活化空气的总比活度S（一般以Bq.cm⁻³为单位）：

$$S = C \sum_{ijk} N_j \int_{E_{ijk}}^{E_{kmax}} \sigma_{ijk}(E) \phi_k(E) dE (1 - e^{-\lambda_i T}) e^{-\lambda_i t} \quad (3.6)$$

式中，C为由单位确定的常数（无单位），i代表第i种放射性核素，j代表第j种靶核，k代表相互作用的粒子 γ, p, n 等。 N_j 为单位体积空气中第j种靶核的数目(cm^{-3})。 $\sigma_{ijk}(E)$ 为能量为E的第k种粒子从第j种靶核上产生第i种放射性核素的截面（b， $1b = 10^{-24}cm^2$ ）； $\phi_k(E)$ 为能量在E到E + dE之间的第k种粒子的通量密度($cm^{-2} \cdot s^{-1}$)。 E_{ijk} 为由第k种粒子引起的j → i反应的阈值在（MeV）， E_{kmax} 为第k种粒子的最大能量（MeV）； λ_i 为第i种放射性核素的衰变常数(s^{-1})，T为照射时间(s)，t为冷却时间(s)。

方程（3.6）可以按以下方式进行简化：

①只考虑由下面三种方式产生的核素：热中子俘获反应、高能粒子散裂反应、 γ, n 反应，可以分别用下标 $k = th, HE, \gamma$ 表示这三种反应；

②将方程中的积分用通量和平均截面来代替：

$$\overline{\sigma_{ijk}} = \frac{\int_{E_{ijk}}^{E_{kmax}} \sigma_{ijk}(E) \phi_k(E) dE}{\int_{E_{ijk}}^{E_{kmax}} \phi_k(E) dE} \quad (3.7)$$

$$\phi_k = \int_{E_{ijk}}^{E_{kmax}} \phi_k(E) dE \quad (3.8)$$

从而方程 (3.6) 简化为:

$$S = C \sum_i [\sum_j N_j \overline{\sigma_{ijth}} \phi_{th} + \sum_j N_j \overline{\sigma_{ijHE}} \phi_{HE} + \sum_j N_j \overline{\sigma_{ij\gamma}} \phi_{\gamma}] \times (1 - e^{-\lambda_i T}) e^{-\lambda_i t} \quad (3.9)$$

式中, $N_j \overline{\sigma_{ijth}} \phi_{th}$ 、 $N_j \overline{\sigma_{ijHE}} \phi_{HE}$ 、 $N_j \overline{\sigma_{ij\gamma}} \phi_{\gamma}$ 分别表示了由热中子俘获反应、高能粒子散裂反应、 γ, n 反应这三种反应引起的对第 i 种放射性核素饱和活度的部分。

表 3.3-2 为加速器空气中产生的半衰期大于 1 分钟的放射性核素及其半衰期、衰变类型、母核、产生机制、高能截面。注意表中截面最大的 1640mb 和 660mb 分别是产生 ^{14}C 、 ^{41}Ar 的热中子(n,p)、(n, γ)俘获反应的截面; 其它的都是对应于在几十 MeV 以上截面达到最大值的高能饱和截面; 其中 γ 引起的反应几乎是在所有的加速器和能量下都存在, 其截面相应地与能量有关, 尤其是在能量刚刚超过阈能的情况下更是如此。由表 3.3-2 可见, 主要核素有 ^3H 、 ^7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 、 ^{14}C 虽然截面最大, 但由于半衰期太长, 由活化公式可知, 在装置服役期 (假设不通风连续运行 30 年) 饱和度也仅 0.4%, 仅相当于 6mb 的核素的饱和度, 因此, 并非主要核素。

表 3.3-2 加速器空气中产生的半衰期大于 1 分钟的放射性核素
及其半衰期、衰变类型、母核、产生机制、高能截面

放射性核素	半衰期	衰变类型	母核	产生机制	高能截面 (mb)
^3H	12.32 y	β^-	N	散裂	30
			O	散裂	30
^7Be	53.22 d	γ , 电子俘获	N	散裂	10
			O	散裂	5
			Ar	散裂	0.6
^{11}C	20.33 min	β^+	N	散裂	10
			O	散裂	0.7
			Ar	散裂	0.7
^{14}C	5700 y	β^-	N	(n 热中子,p)	1640
^{13}N	9.96 min	β^+	N	散裂	10
			N	(γ ,n)	10
			O	散裂	9
			Ar	散裂	0.8
^{14}O	1.18 min	β^+ , γ	O	散裂	1
			Ar	散裂	0.06
^{15}O	2.04 min	β^+	O	散裂	40
			O	(γ ,n)	10
			Ar	散裂	*
^{18}F	1.83 h	β^+	Ar	散裂	6
^{24}Ne	3.38 min	β^- , γ	Ar	散裂	0.12
^{22}Na	2.603 y	β^+ , γ	Ar	散裂	10
^{24}Na	14.95 h	β^-	Ar	散裂	7
^{27}Mg	9.46 min	β^- , γ	Ar	散裂	2.5
^{28}Mg	20.92 h	β^- , γ	Ar	散裂	0.4
^{28}Al	2.24 min	β^- , γ	Ar	散裂	13
^{29}Al	6.56 min	β^- , γ	Ar	散裂	4
^{31}Si	2.62 h	β^- , γ	Ar	散裂	6
^{30}P	2.50 min	β^+ , γ	Ar	散裂	4.4
^{32}P	14.26 d	β^-	Ar	散裂	25
^{33}P	25.34 d	β^-	Ar	散裂	9
^{35}S	87.51 d	β^-	Ar	散裂	23
$^{34\text{m}}\text{Cl}$	32.0 min	β^- , γ	Ar	散裂	0.7
^{38}Cl	37.24 min	β^- , γ	Ar	(γ ,pn)	4
^{39}Cl	55.6 min	β^- , γ	Ar	(γ ,p)	7
^{41}Ar	1.83 h	β^- , γ	Ar	(n 热中子, γ)	660
*说明：原表未给出该反应截面。					

3、向环境排风状态下空气的感生放射性

为减少活化空气从辐射工作场所内沿缝隙泄漏到其他工作场所对工作人员造成辐射，需要保持辐射工作场所有一定的负压，也就是需要将活化空气抽走，通过排风口排放到环境中。对加速器运行、停机时刻加速器内静态空气产生的某种放射性核素的活度随时间变化关系可以分别用下面两式表示：

$$S_{t_i} = S_{\text{sat}}(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (3.10a)$$

$$S_{t_c} = S_{\text{sat}}(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_c} \quad (3.10b)$$

式中， S_{t_i} 、 S_{t_c} 分别是加速器运行和停机时的活度（ $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）， t_i 、 t_c 分别是照射时间和冷却时间(s)， λ 是该放射性核素的物理衰变常数（ s^{-1} ）。 S_{sat} 表示饱和活度（ $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ ），

$$S_{\text{sat}} = N\sigma\phi \quad (3.11)$$

式中， $N(\text{cm}^{-3})$ 是靶材料的原子密度， $\phi(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 是入射粒子通量。

在加速器通风状态下，设加速器运行和冷却时的通风速率分别为 R_i 和 R_c （单位： cm^3/s ）， V 为隧道空气体积（ cm^3 ）。则对隧道空气而言，有效衰变常数 λ_{effi} 和 λ_{effc} （ s^{-1} ）由下式确定：

$$\lambda_{\text{effi}} = \lambda_{\text{dec}} + \lambda_{\text{lossi}} = \lambda_{\text{dec}} + \frac{R_i}{V} \quad (3.12a)$$

$$\lambda_{\text{effc}} = \lambda_{\text{dec}} + \lambda_{\text{lossc}} = \lambda_{\text{dec}} + \frac{R_c}{V} \quad (3.12b)$$

经过推导可得到，对应的饱和放射性活度（ $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）由静态时的 S_{sat} 减少为 $S_{(\text{reduced})}$ ：

$$S_{(\text{reduced})} = S_{\text{sat}} \frac{\lambda_{\text{dec}}}{\lambda_{\text{effi}}} \quad (3.13)$$

$$S_{t_i} = S_{(\text{reduced})}(1 - e^{-\lambda_{\text{effi}}t_i}) \quad (3.14a)$$

$$S_{t_c} = S_{(\text{reduced})}(1 - e^{-\lambda_{\text{effi}}t_i})e^{-\lambda_{\text{effc}}t_c} \quad (3.14b)$$

运行时和停机后向周围排放的总活度 (Bq) 可以由下列两式计算:

$$Q_i = \int_0^{t_i} S_{t_i} R_i dt = S_{\text{sat}} \frac{\lambda_{\text{dec}}}{\lambda_{\text{effi}}} R_i \left(t_i - \frac{1}{\lambda_{\text{effi}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{effi}}t_i}) \right) \quad (3.15a)$$

$$Q_c = \int_0^{t_c} S_{t_c} R_c dt = S_{\text{sat}} \frac{\lambda_{\text{dec}}}{\lambda_{\text{effi}}} R_c (1 - e^{-\lambda_{\text{effi}}t_i}) \frac{(1 - e^{-\lambda_{\text{effc}}t_c})}{\lambda_{\text{effc}}} \quad (3.15b)$$

4、冷却水的感生放射性

质子治疗系统中许多设备需要使用冷却水, 本项目冷却水使用去离子水, 因受次级粒子的照射而活化, 主要是中子引起水中 ^{16}O 的散裂, 其产物见下表。其主要核素为 ^{15}O 、 ^{11}C 、 ^3H 和 ^7Be 。

表 3.3-3 ^{16}O 的散裂产物

放射性核素	半衰期		放射性核素	半衰期
^{10}C	19s		^{13}N	10min
^{14}O	71s		^{11}C	20.5min
^{15}O	124s		^7Be	53d
^3H	12.2y		/	/

本项目共设有 1 个闭路循环的水冷系统对加速器调试区设备以及整体调试区设备进行冷却, 系统总容量为 4.5m^3 。

本项目循环冷却水为闭路运行, 每年更换 4 次, 每次更换水量约 4.5m^3 。本项目于冷水机房北侧设有放射性废水收集暂存池, 设置两个容积为 5m^3 的并行贮存槽, 收集池总容积为 10m^3 , 用于暂存更换下来的冷却水。设计容量达到项目水冷系统总容量的 2 倍以上, 可以有效收纳、暂存更换后带有感生放射性的冷却水。

经一定时间暂存后，带有感生放射性的冷却水中短半衰期核素¹⁵O、¹³N 和 ¹¹C 等将迅速衰变，浓度也很快降低，因此只需关注冷却水中半衰期较长的 ³H 和 ⁷Be 的浓度。

建设单位将定时对废水收集池中冷却水进行采样，并分析监测其总 α、总 β 浓度，在浓度达标并经环境主管部门同意后，方可排入市政污水管网。

5、加速器部件的感生放射性及放射性固体废物

加速器结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。质子加速器产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如铜靶、离子源/引出隔板、降能器、准直器、狭缝、治疗头、磁铁等，其主要材料为铁、不锈钢、铜、铝、铍、石墨、钽和镍以及各种烃类制品。相关实验研究表明，加速器关机后所被活化部件中的核素主要是 ⁵⁴Mn、^{52m}Mn、⁵⁶Mn、⁵⁸V、⁵¹Cr 等半衰期较长的核素。

根据建设单位设计资料，本项目预计每年放射性固体废物产生量约 16.8kg，主要为质子治疗系统维修维护、更换的含感生放射性的结构部件。具体废物组成如下表所示。

表 3.3-4 项目放射性固废产生量预测

放射性固废种类	单件重量	年产生量 (总重量/个数)		备注
离子源（钽丝）	0.14kg	1.7kg	12	更换周期 1 个月
降能器挡块-铝	0.1kg	0.1kg	1	仅损坏时更换
降能器挡块-铍	1.5kg	1.5kg	1	仅损坏时更换
降能器挡块-石墨	4.4kg	4.4kg	1	仅损坏时更换
准直器-钽	2kg	4.0kg	2	维护周期 6 个月
狭缝-镍	1.7kg	5.1kg	3	维护周期 24 个月
合计		16.8		
注：其他可能产生感生放射性的主要部件如引出隔板（铁）、治疗头（铜）、磁铁（铁）、铜靶（铜）等无损耗，无需更换，不产生放射性固废。				

根据软件模拟结果测算，在本项目加速器结构部件的放射性活度浓度最高可达到 $7.23\text{E}+07\text{Bq/g}$ （预测过程详见报告 5.2.5 章节），超出了豁免水平，需对拆卸下来的废弃部件加强管理，按照《低、中水平放射性固体废物包安全标准》（GB 12711-2018）进行包装（包装容器外表面上任意一点的剂量率应 $\leq 0.1\text{mSv/h}$ ）及辐射水平监测、登记，暂存在放射性固废暂存间。

本项目在厂区西南角设置放射性固废暂存间，建筑面积 30m^2 ，贮存间容积为 75m^3 。放射性固体废物按国家规范包装后，集中暂存在该储存间，最终将委托项目所在地城市放射性固废处置中心等有资质的单位处置。

6、土壤及地下水的感生放射性

本项目质子治疗系统的屏蔽体为地上单层建筑（地坑部分位于地面标高以下），屏蔽采用全包围式屏蔽，辐射安全设计指标为屏蔽外墙、屋顶表面 30cm 处剂量率达标，不考虑使用地坑外周土壤、地下水等作为附加的辐射屏蔽措施。同时，屏蔽体底部混凝土厚度大于 1.5m ，经预测，屏蔽体底部外的剂量率 $<20\mu\text{Sv/h}$ ，对地下水及土壤影响轻微。在屏蔽设计满足项目需求，屏蔽体外剂量率达标的情况下，本评价不考虑项目对地坑外土壤、地下水造成的感生放射性影响。

7、回旋加速器电磁环境影响

运动电荷在磁场的洛伦兹力的作用下作圆周运动时具有向心加速度，因此电荷将辐射电磁波。用回旋加速器加速带电粒子时，粒子因作圆周运动而辐射电磁波，成为回旋加速器的一种能量损失途径。

由于这种辐射与回旋加速器相联系，故被称为回旋加速器辐射，简称回旋辐射。

本项目产生电磁辐射的回旋加速器部分自身采取了金属壳体作为电磁屏蔽措施。电磁屏蔽是利用一些能抑制电磁辐射扩散的材料，将电磁辐射源与外界隔离开来，使辐射能被限制在某一范围内，从而达到防止电磁污染的目的。屏蔽装置一般为金属材料（或导电性好的非金属）制成的封闭壳体，并与地相接。屏蔽防护主要是利用其对电磁能进行反射与吸收，使得传递到屏蔽体上的电磁场，一部分被屏蔽体反射，进入屏蔽体内的电磁能又有一部分被吸收，因此透过屏蔽的电磁场强度会大幅度衰减，从而避免了对人与环境的危害。

3.3.2.2 其他医用 X 射线机瞬时辐射（图像引导设备）

本项目拟依托旋转治疗室开展 CBCT 图像引导系统、二维图像系统生产、组装及调试作业，并同时运用于质子治疗系统区固定治疗室及旋转治疗室作为图像引导设备。

上述两类设备均属于医用 CT（图像引导机），属 III 类射线装置。在运行时，上述两类设备将产生 X 射线的瞬时辐射影响。

医用 CT 的 X 射线的产生机理简述如下：X 射线由 X 射线管产生。X 射线管是密封在高真空壳内，真空壳内设有阴极和阳极。阴极一般是钨制灯丝，它装在聚焦杯中。当灯丝通电加热后，释放出电子，聚焦杯使这些电子聚集成束。在阴极和阳极之间加高压，电子在高压电场作用下获得高速，高速电子轰击靶体（阳极，一般用高原子序数

的难熔金属如钨、铂、金、钽等制成)产生 X 射线。

医用 CT 的 X 射线产生原理如图 3.3-3 所示。

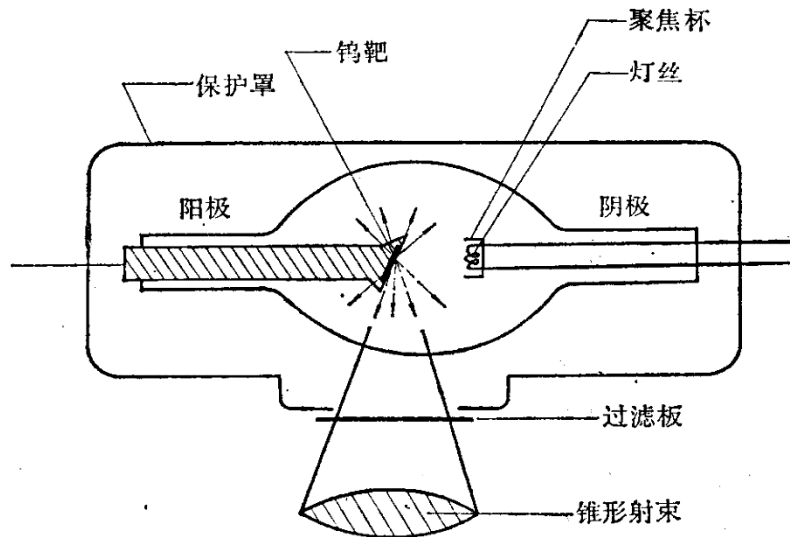


图 3.3-3 X 射线产生原理示意图

医用 CT 产生的 X 射线有用的锥形射束都是通过与电子射束大致垂直的方向上 X 射线管保护罩上的窗口引出, 其他方向上的 X 射线则被保护罩的屏蔽层屏蔽掉。产生的 X 射线强度与管电压、管电流、靶材料和形状、以及过滤板的材料及厚度相关。

医用 CT 在运行时会产生 X 射线辐射, 会对人员产生 X 射线贯穿辐射外照射影响, 在停机状态下无辐射影响。

本项目 CBCT 图像引导系统、二维图像系统的 X 光管及其他部件均为外购, 本项目仅开展组装调试工作, 仅在通电调试过程中产生 X 射线, 无其他污染物产生。

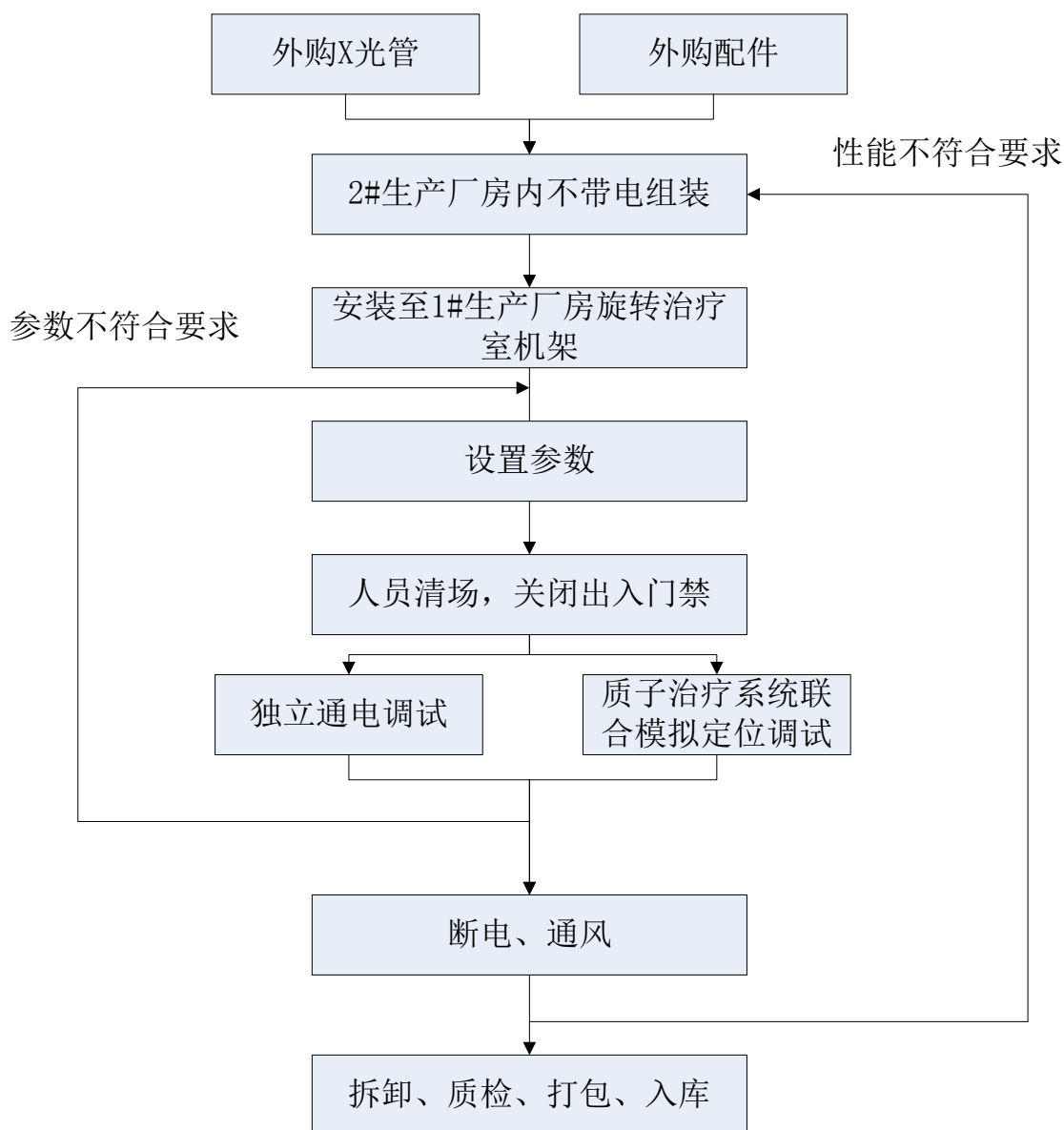


图 3.3-4 CBCT 图像引导系统、二维图像系统带电调试作业流程

3.3.3 非放射性污染源

1、废气

项目运行过程中的废气主要包括臭氧（O₃）、二氧化氮（NO₂）及焊接烟气：

1) 空气经 γ 射线的辐射能量，发生辐射分解，最后反应产生的臭氧和二氧化氮，其浓度和排放量详见 5.2.3.1 章节。非放射性废气经通排风系统，由 1#生产厂房屋顶 30m 高排气筒排入大气。

2) 焊接烟气

本项目 2#生产厂房内组装作业涉及少量焊接工序。本项目焊接工序主要用于不同部件或部件与支架间的焊接连接，焊接方式为钎焊（银铜焊丝配合氧乙炔焊）。

钎焊是采用比母材熔点低的金属材料作钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点，低于母材熔化温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接焊件的方法。

钎焊过程：需焊接工件以搭接型式装配在一起，把钎料（银铜焊丝）放在接头间隙附近或接头间隙之间。当工件与钎料被加热到稍高于钎料熔点温度后，钎料熔化（工件未熔化），并借助毛细作用被吸入和充满固态工件间隙之间，液态钎料与工件金属相互扩散溶解，冷凝后即形成钎焊接头。

本项目仅设置 1 台钎焊机，年使用银铜焊丝约 0.1t，根据《焊接技术手册》(作者：史耀武，化学工业出版社，2009 年 7 月)并结合经验排放系数，每公斤焊丝约产生 5-8 g 烟尘，保守取值 8g，则焊接烟尘排放量约为 0.8kg/a。

本项目使用焊机数量少，焊接烟尘产生量极小，且使用时间分散，焊接烟尘排放速率低，焊接烟尘通过焊接设备（钎焊机）自带或另行购置的焊接烟气收集净化装置净化后，由厂房通排风系统排出厂房。

3) 有机废气

项目部分零部件组装前需使用螺纹胶进行点胶固定，螺纹胶中含有部分挥发性有机化合物，使用过程会产生微量有机废气，主要污染

因子为 VOCs。项目螺纹胶使用量为 1L/a (1.08.kg/a)，螺纹胶中挥发性有机化合物含量为 4.1%，按全部挥发计，则有机废气产生量为 0.44kg/a。项目点胶过程产生的有机废气采用集气罩收集后，引至 2# 厂房楼顶的一套活性炭吸附装置处理后（设计净化效率 90%）排放，排气筒高度 15m。

本项目产品测试阶段涉及机械测试、真空测试、接线测试、控制测试、加电测试、性能测试、系统联合测试、功能测试、验收测试、出厂测试等多个环节，主要使用激光准直仪、机械臂测量仪、真空泵机组、高精度水平尺、射频功率计等机械设备进行测试。部分设备使用前需使用无水乙醇或丙酮进行擦拭，该过程产生有机废气，主要污染因子为 VOCs。项目无水乙醇用量为 50L/a (39.5kg/a)，丙酮用量为 18L/a (14.1kg/a)，按使用过程中全部挥发计，则有机废气产生量为 53.6kg/a。项目设备擦拭过程产生的有机废气过程采用集气罩收集后，引至 2#厂房楼顶的一套活性炭吸附装置处理后（设计净化效率 90%）排放，排气筒高度 15m。

2、生产废水

项目使用的部分零部件需进行清洗，清洗使用超声波清洗机，清洗时使用清洗剂（主要成分含 5%磷酸），主要用于洗去零部件表面的灰尘、油污等，该过程产生清洗废水。

超声波清洗机根据清洗零件数量决定换水频次，约每周 1-2 次，每次换水约 0.25m³，清洗废水年最大产生量约 25 m³。排放的清洗废水排入于 2#厂房清洗废水暂存罐（设计容积 30 m³，位于 2#厂房北侧），

定期由有资质单位收运处理。

建设单位拟于清洗废水暂存罐区域进行防渗防漏处理（建议采用混凝土+HDPE 膜，防渗系数 $\leq 10^{-10}$ cm/s），并在其周边设置围堰，防止发生泄漏污染地下水。

3、噪声

项目运行过程中的噪声源主要为冷水机组、冷却水泵及通排风机。

噪声源强约为 65dB(A)~90dB(A)。，经类比，其主要噪声源强见下表：

表 3.3-5 噪声源强及控制措施表 单位（dB(A)）

序号	设 备	噪声源所在位置	数量	声级范围	控制措施	降噪效果 (dB(A))
1	新风机组	质子治疗系统 1#生产 厂房空调机房	1	80-90	选用低噪声设备， 减振基座，墙体隔 声	10-15
2	冷却水泵	质子治疗系统 1#生产 厂房冷却水设备间	2	80-90	选用低噪声设备， 减振基座，墙体隔 声	10-15
3	通排风机	质子治疗系统 1#生产 厂房通风设备间	2	65-75	选用低噪声设备， 减振基座，墙体隔 声	5-10
4	恒温恒湿 机组	质子治疗系统 1#生产 厂房外	16	65-75	选用低噪声设备， 减振基座	5-10

4、固体废物

项目质子治疗系统运行过程中，在组装、调试、检修等阶段将产生一定量的工业废物，年产生量预计约 100kg/a，主要为废包装材料、不含放射性的不合格部件等，经集中收集后，交环卫部门清运处理。

同时，本项目在设备调试、检修过程中将产生一定量废润滑油、废含油棉纱、废含油手套、含酒精或丙酮擦拭布等废物，年产生量预计约 50kg/a。

该部分废物属于危险废物，废物类别“HW49 其他废物”，代码

900-047-49，建设单位拟将其集中收集至危险废物暂存桶中，按照《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597），于 2#生产厂房设置危险废物暂存间暂存危险废物，定期交由有资质单位回收。

依据相关规范要求，建设单位应重点实施以下措施：①暂存间按照《环境保护图形标志-固体废物贮存(处置)场》（GB15562.2）设置警示标志；②地面、裙角防渗处理（耐腐蚀且不与危废反应的材料）；③泄露液体收集装置（托盘、双层容器或围堰等措施，收集容量应满足最大容器容量或总容量的 1/5）；④暂存间内设置通讯装置、安全照明装置、应急防护设施（灭火器材）；⑤落实危废记录单（产生点、暂存间）及转移联单制度，且在危废交付资质单位后应保存三年。

5、生活污水及生活垃圾

本项目的工作人员生活污水经预处理后排入当地市政污水管网，对周边地表水无影响。生活垃圾由环卫部门收集处置，不会对周围环境造成不利影响。

3.4 废弃物处置

3.4.1 放射性废弃物

项目单位在运行期间，会产生放射性废气、放射性废液和放射性固体废物，各种含放射性的废弃物的来源、种类、比活度、总量、排放或处理方式见表 3.4-1。

表 3.4-1 项目运行过程中放射性废弃物年产生量及处理方式一览表

废物种类	来源/名称	产生量	废物分类	限值	排放或处理方式
放射性废气	回旋加速器	8.04E+09 Bq/a	低放废气	低于规范导出限值	经通风系统，直接排入外环境
放射性废液	冷却水	18m ³ （设备最大单次排放量 4.5m ³ ，年排放次数 4 次）	/	低于规范导出限值	收集贮存，定期监测，合格后经主管部门许可后外排。
放射性固体废物	含感生放射性的结构部件	16.8kg/a	中、低放废物	⁵⁴ Mn、 ^{52m} Mn、 ⁵⁶ Mn、 ⁶⁰ Co、 ⁵¹ Cr<7.23E+07Bq/kg，不外排	分类收集后暂存于放射性固体废物间，达到一定量后转运至有资质单位处置，不外排。

项目运行期间产生的各类放射性固体废物按照《低、中水平放射性固体废物包安全标准》（GB 12711-2018）进行包装（包装容器外表面上任意一点的剂量率应 $\leq 0.1\text{mSv/h}$ ）及辐射水平监测、登记，暂存在放射性固废暂存间。放射性固体废物暂存量超过暂存间 50%容积（37.5m³）后，送交城市放射性固废处置中心等资质单位处理。

3.4.2 非放射性废弃物

1、废气

项目运行过程中，空气辐射反应产生的臭氧（O₃）和二氧化氮（NO₂）经通排风系统，由 1#生产厂房屋顶排风口排入大气；2#生产厂房内组装焊接工序产生的焊接烟气，通过焊接设备（钎焊机）自带或另行购置的焊接烟气收集净化装置净化后，由厂房通排风系统排出厂房。点胶、擦拭工序产生的有机废气，采用集气罩收集后，引至 2#厂房楼顶的一套活性炭吸附装置处理后（设计净化效率 90%）排放，

排气筒高度 15m。

2、固体废物

项目质子治疗系统运行过程中，在调试、检修等阶段将产生一定量固体废物，年产生量预计约 100kg/a，主要为不含感生放射性的零部件，经集中收集后，由当地物资公司回收利用。

同时，本项目在设备调试、检修过程中将产生一定量废润滑油、废含油棉纱、废含油手套、含酒精或丙酮擦拭布等废物，年产生量预计约 50kg/a。该部分废物属于危险废物，集中收集至危险废物暂存桶中，暂存至 2#生产厂房一层危险废物暂存间，定期交由有资质单位回收。

第四章 辐射安全与防护

4.1 场所布局及合理性分析

4.1.1 厂区平面布置及合理性分析

(1) 厂区平面布置情况

项目厂区总占地面积 18631.91m^2 ，地块近似矩形，南北最大长度 143.5m 、东西最大宽度 162.1m 。项目涉及建筑物包括质子治疗系统 1#生产厂房、质子治疗系统 2#生产厂房、质子治疗办公楼、配电房、放射性固体废物存放间、门卫室等。

质子治疗系统 1#生产厂房为单层钢结构厂房，内设质子治疗系统集成调试机房，主要开展质子治疗系统集成调试工作；质子治疗系统 2#生产厂房为单层钢结构厂房，主要开展质子治疗系统子系统装配、调试工作并设置仓储区域；办公楼位于厂区西北部，为 3 层建筑，主要用于日常办公；放射性固体废物存放间位于厂区西南部，为单层建筑，用于存放放射性固体废物；厂区入口及门卫室位于厂区北部。厂区平面布置见附图 4。

(2) 厂区布置合理性分析

①本项目涉放场所为质子治疗系统调试区，集中布置于质子治疗系统 1#生产厂房，并设置独立屏蔽设施，以尽量减少对周边环境的辐射影响。

②项目所在区域主导风向为东北风，办公楼、门卫室等建筑均位于辐射工作场所的上风向或侧风向，以最大程度减少降低生产区排放活化气体所致办公区员工的辐射影响。

③本项目放射性固废主要含感生放射性的结构部件（来自质子治疗系统，约 16.8kg/a），为间断性产生。为减少放射性固废对周边工作人员的影响，放射性固废暂存间设置于厂区西南角，远离厂区人员活动区域。放射性固体废物按国家规范包装后，集中暂存在该储存间，定期委托有资质的单位处置。

综上所述，厂区总图布置做到了功能分区明确、人物分流，厂房布置符合相关规范要求。从辐射防护和环境保护的角度而言，本项目厂区总平布置合理。

4.1.2 厂房平面布置

本项目辐射场所布局及辐射防护设计均由建设单位自行设计并承担建设，平面布局如图 4.1-1~4.1-4 所示。

质子治疗系统 1#生产厂房为单层钢结构厂房，内设质子治疗系统集成调试机房（独立单体单层混凝土构筑物）、物流区、通风设备间、空调机房、冷却水设备间、电源室、总控室、工具间等功能区域。

质子治疗系统集成调试机房设计内容包括两个调试区：1）质子治疗系统加速器调试区，含质子加速器室及内置铜靶；2）质子治疗系统整体调试区，含质子加速器室、束流输运线、1 个旋转治疗室及内置铜靶。两个调试区共用 1 个控制室。

1#生产厂房严格按照工艺需求开展空间布置设计，人员通过厂房东侧人员通道进入，可直达控制室；调试用设备、物资等由厂房西侧物流通道送入，通过厂房内设置的行吊送入各调试区进行安装；经过较长时间调试左右后，废弃的含感生放射性结构部件经包装后，由各

产生区域经厂房西侧物流通道送入厂区放射性固废暂存间暂存。

质子治疗系统 2#生产厂房为单层钢结构厂房，内设质子治疗系统子系统装配车间、子系统调试间、零件仓库、临时仓库、成品仓库等功能区域。该厂房区域内，不涉及辐射作业场所，无放射性废物产生。

综上所述，本项目辐射工作场所以有利于辐射安全管理，方便放射性操作为原则，将辐射设备集中布置于屏蔽建筑内，且布置位置相对独立，周边人流较少，可实现人流、物流互不干扰，降低了职业人员与公众受到照射的可能性。因此，从辐射防护和环境保护的角度而言，本项目生产厂房的平面布置合理。

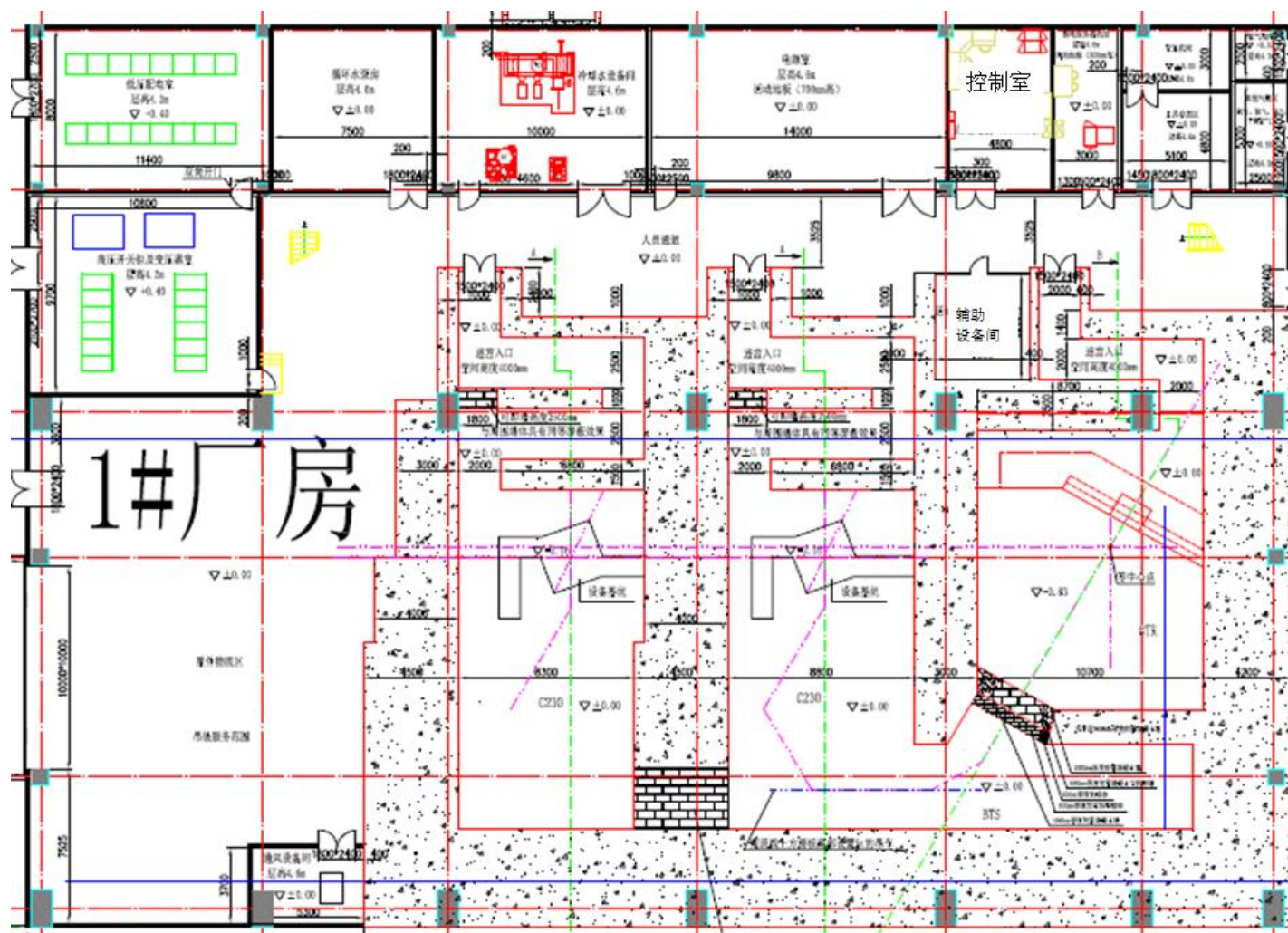


图 4.1-1 质子治疗系统所在区域（1#生产厂房）平面布局图

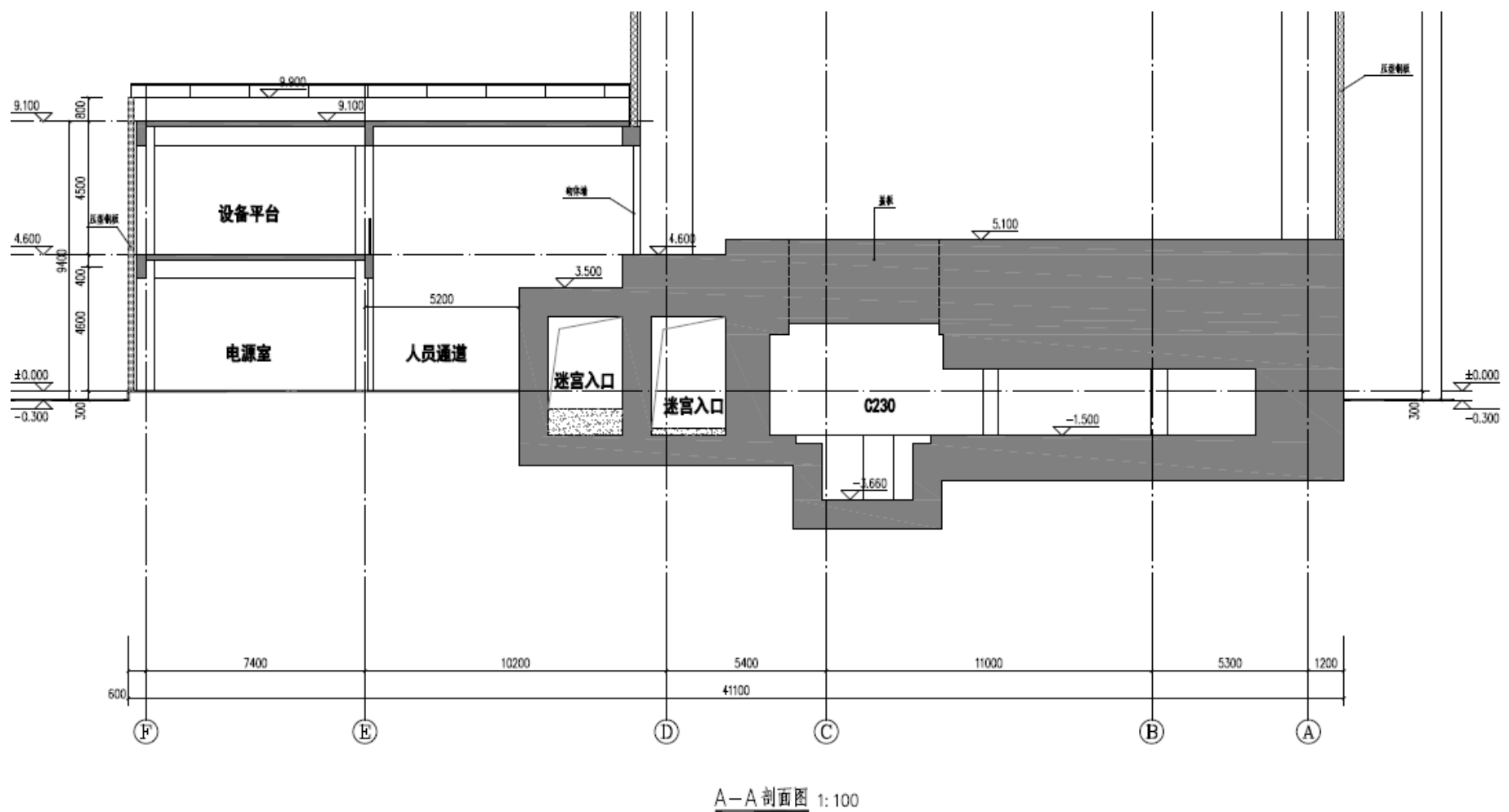


图 4.1-2 加速器室横剖面及屏蔽厚度示意图

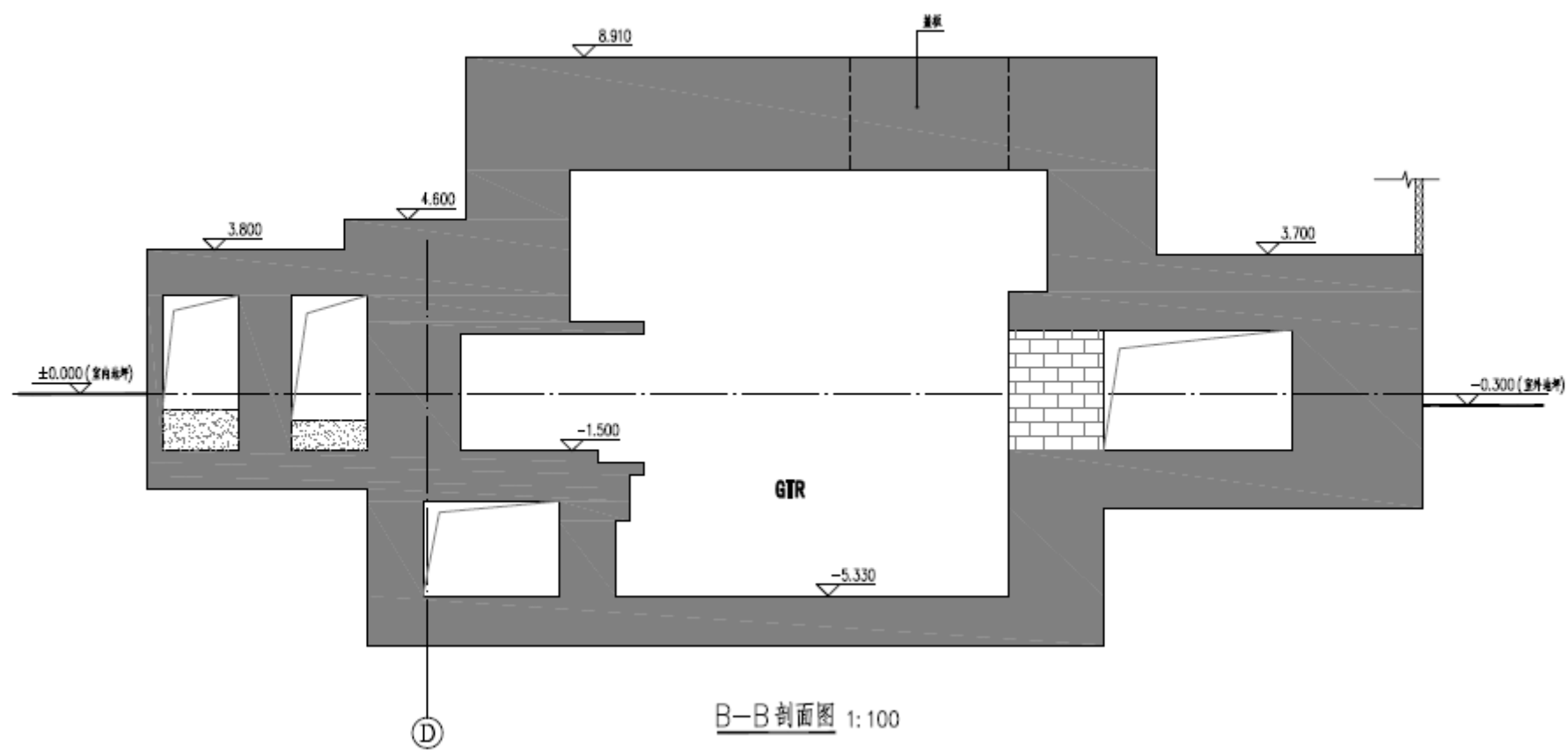


图 4.1-3 旋转治疗室剖面及屏蔽厚度示意图

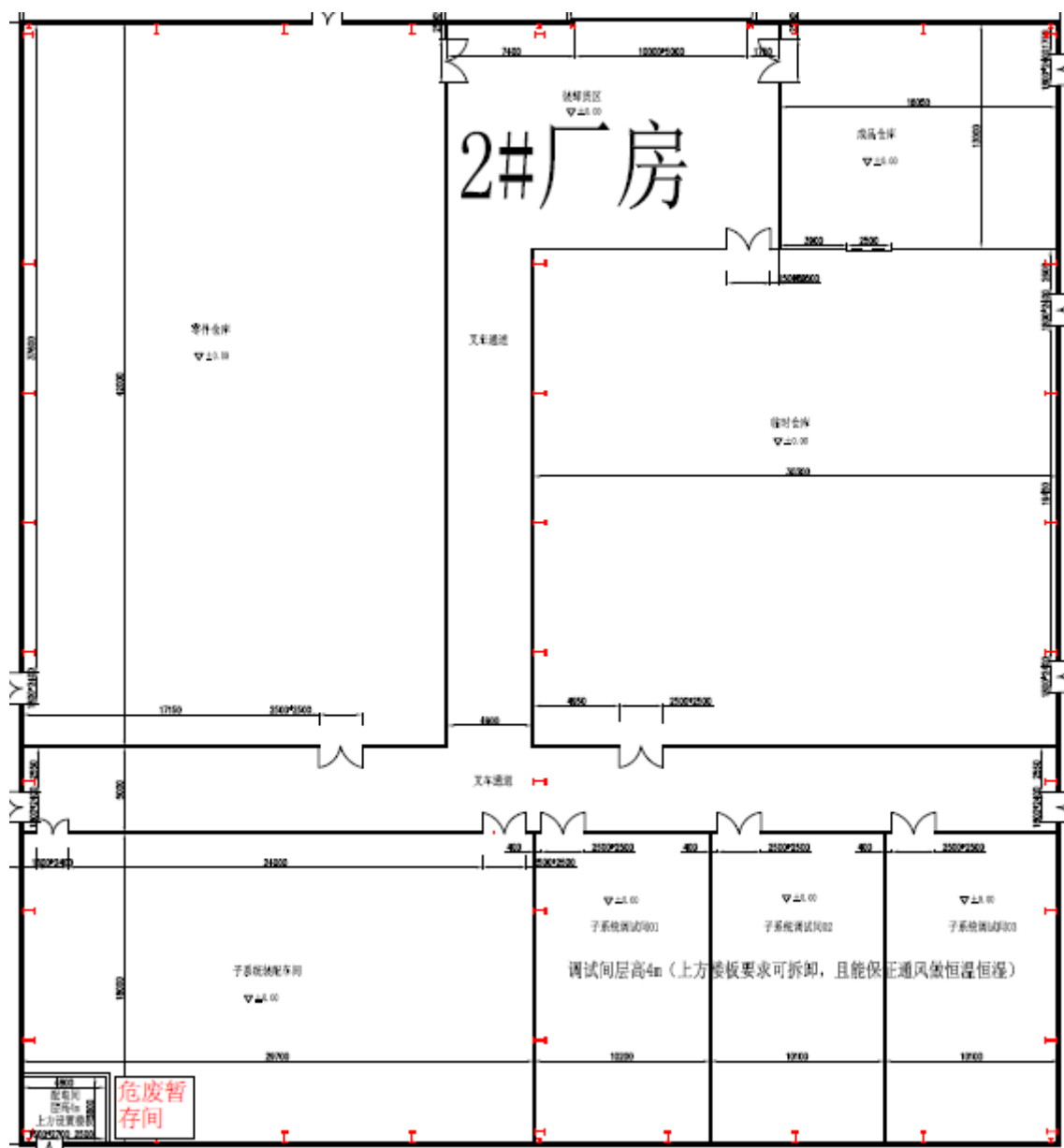


图 4.1-4 二期厂房平面布置图

4.2 辐射安全与防护措施

4.2.1 工程屏蔽措施

本项目质子加速器机房及治疗室工程屏蔽设计情况见表 4.2-1。

表 4.2-1 项目回旋加速器机房及治疗室辐射防护设计情况

序号	名称	机房墙体、屋顶材料/厚度	防护门结构/材料/厚度
加速器调试区	加速器调试区	①加速器调试区周边采用半包围屏蔽，西侧为 3~4.5m 厚混凝土墙，南侧为 4.8m 厚混凝土墙；东侧为 4~4.5m 厚混凝土墙 ②回旋加速器顶部混凝土屋顶厚度 2.8m，局部设置 5.08×5.08m 可开顶盖混凝土砌块； ③加速器室北侧设置“S”型迷道，由南至北各迷道内墙厚度分别为 1.5m、1.0m、1.0m，内部过道宽 2.0~2.5m，迷道西侧外墙厚度为 1.0m，迷道口设普通联锁门。 ④加速器调试区内，加速器南侧设置铜靶作为调试束流的负载。	普通门
2 整体调试区	2.1 整体调试区加速器室	①加速器调试区周边采用半包围屏蔽，东侧为 4~4.5m 厚混凝土墙；南侧为 4.8m 厚混凝土墙；东侧为 3m 厚混凝土墙 ②回旋加速器顶部混凝土屋顶厚度 2.8m，设置为可开顶盖混凝土砌块； ③加速器室北侧设置“S”型迷道，由南至北各迷道内墙厚度分别为 1.5m、1.0m、1.0m，内部过道宽 2.0~2.5m，迷道西侧外墙厚度为 1.0m，迷道口设普通联锁门。	普通门
	2.2 整体调试区束流传输线区域	①束流传输线连接加速器室及治疗室，束流传输线连与治疗室之间的混凝土屏蔽墙 1.68m 厚； ②输运线不设置迷道。 ③顶部混凝土屋顶厚度 2m。	普通门
	2.3 旋转治疗室	①旋转治疗室西侧混凝土屏蔽墙厚 4~4.5m；东侧混凝土屏蔽墙厚 4.7m。 ②旋转治疗室北侧设置“S”型迷道，由南至北各迷道内墙厚度分别为 2.5m、1.4m，内部过道宽 2.0~2.5m，迷道西侧外墙厚度为 0.4m，迷道口设普通联锁门。 ③顶部混凝土屋顶厚度 2m，局部设置 5.08×5.08m 可开顶盖混凝土砌块。	

注：混凝土密度 2.35g/cm³，含水率大约 5.5%，参考 NCRP51 号报告附录 H.3 “中子屏蔽材料”，混凝土含水率大于 5.5%，中子透射剂量率放大系数为 1.0（即不考虑放大系数）。

本项目拟生产、使用的 CBCT 图像引导系统、二维图像系统均属于

III类射线装置，其工作、调试场所位于旋转治疗室内，依托旋转治疗室既有辐射防护措施。

4.2.2 辐射安全联锁措施

4.2.2.1 设计准则

辐射安全联锁系统是通过辐射控制区进出控制管理、清场搜索、紧急保护等措施防止因过量照射导致的工作人员辐照损伤甚至死亡风险，避免人员接近工作中的加速器和束流管线，或者避免在这些区域有人时，给这些区域提供束流，而且，即使在加速器停止期间，如果该区域辐射剂量超标，也不允许人员进入。事故状态下，能及时关闭束流阻挡装置或剔除传输管线中的束流，保证低能加速器运行期工作人员的辐射安全。

辐射安全联锁系统设计原则如下：

1) 分区联锁：根据加速器的运行模式，利用实体屏蔽可以将整个加速器辐射区分为控制区和监督区等不同区域；各辐射区将采用实体屏蔽及束流闸来保证分区独立。

2) 实现辐射区门与区域内辐射剂量的双重联锁，即控制区内有束流时，工作人员不能进入该区域；而在控制区有人时，束流不能被送到相应区域。此外，辐射监测信号也将作为安全联锁信号，当控制区内辐射剂量超过所设阈值时即便在无束流的状态也不允许人员进入，保障工作人员安全。

3) “冗余”设计及独立性：控制区的门有三重联锁：一为限位开关；二为身份识别卡，可对进入隔离区的人员确认其身份，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中；三为钥匙箱，确保在钥匙箱上的钥匙没有全部归还的情况下束流不会进入相应的辐射区。采用冗余设计的多套联锁设施相互独立，不会因为一套系统的实效而影响到其它系统的安全性。

4) 最优切断：联锁系统应尽可能地切断前级控制或是机器的最初

始的运行功能（如离子源的高压等），更好的保证区域内的辐射安全。

5) 失效保护设计：所有的线路、气动装置、电动装置均采用失效保护设计。门的限位开关在门关上后不能立即接通联锁，需要打开中控室的区域控制总钥匙才能接通。急停开关在计划停机或被自救人员按下后即处于断开状态，需安全人员到当地进行复位后才能重新开机，所以急停开关同时也是开机前的清场检查站。

4.2.2.2 质子治疗系统辐射安全联锁系统

辐射安全联锁系统采用可编程控制技术、门禁控制技术及自动门技术、集散式控制技术、计算机网络与通讯技术、探测与数据处理技术、设备自诊断与自恢复技术等。在加速器和实验终端的各区域，对门禁及辐射监测等系统的参数进行实时监测，并将信号输入到安全联锁系统，只有在各系统均正常的条件下，束流的产生和加速才被允许。下图为本项目辐射安全联锁系统结构示意图。

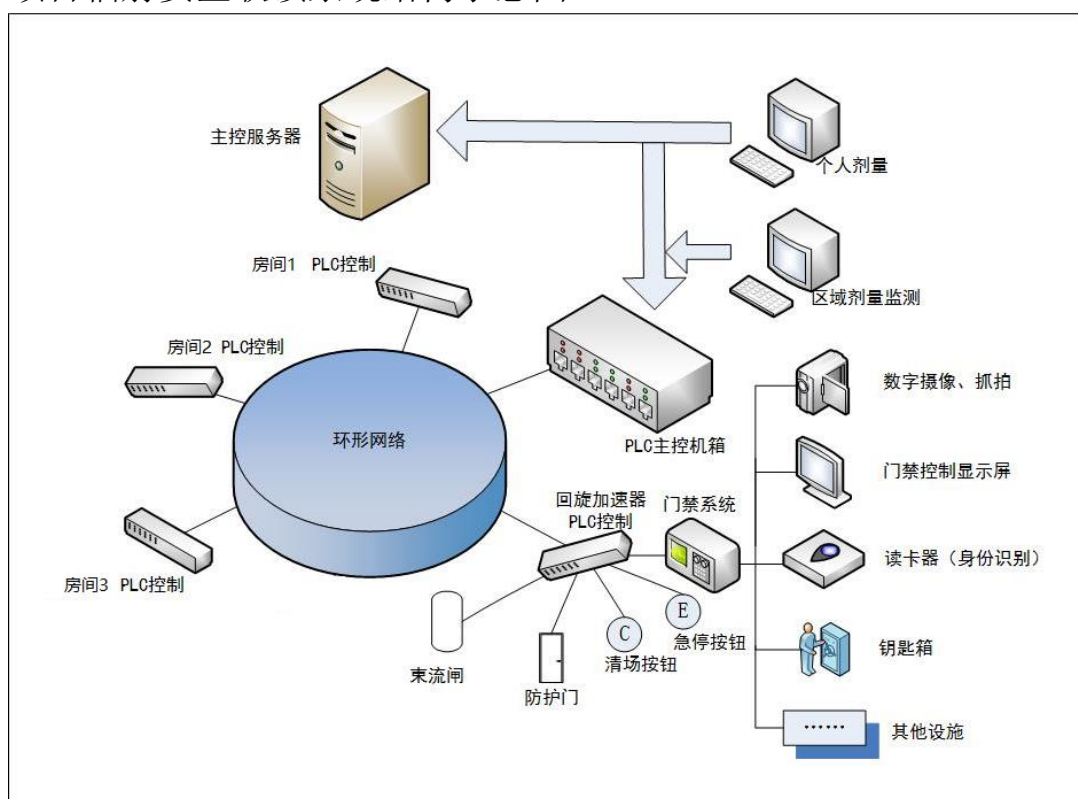


图 4.2-1 安全联锁系统结构示意图

其工作流程如下所示。

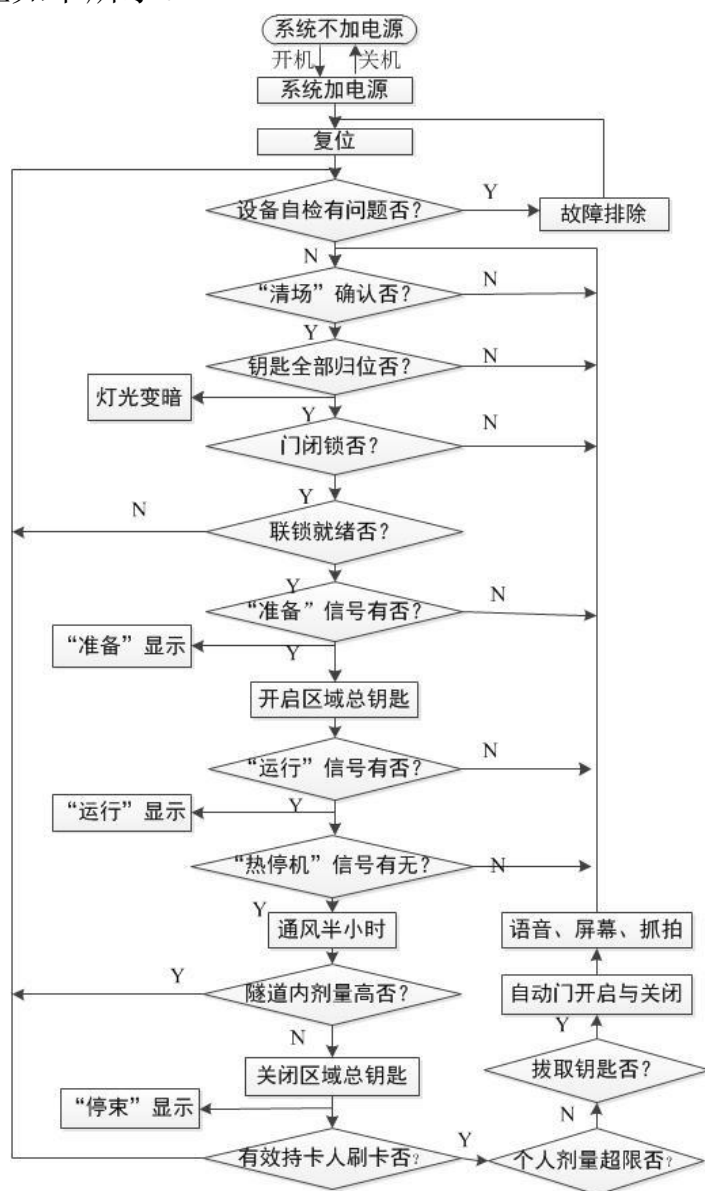


图 4.2-2 人身安全联锁系统工作流程

人身安全联锁系统各部分的主要功能如下:

1) 主控制服务器及软件

主控制服务器及其软件是人身安全联锁系统的核心，其将各子系统有机联系起来。它不仅是一个管理平台，同时它还构成了系统信息交换平台，通过对各子系统相关信息的采集和分析来完成系统信息管理工作、实现平台的核心功能，并据此完成对加速器辐射安全做出评价。

2) PLC 逻辑控制

PLC 控制系统是实现联锁逻辑的核心部件。PLC 系统采用成熟的可编程逻辑控制器技术，在一系列可靠的硬件设备基础之上，结合相应的管理及控制软件将加速器束流闸、通道门、区域剂量及紧急停机按钮等设施或信号进行联锁，规定了人身安全联锁各子系统的联锁逻辑关系，并在联锁动作发生时执行这些联锁关系，以此来保障加速器的安全运行及工作人员的人身安全。各个子 PLC 逻辑控制系统能够独立运行，对各安全联锁设施进行最底层的操作且具有最高优先权。当一个子系统发生问题时，不影响其他子系统。PLC 控制系统包括 1 套冗余 CPU S7412-5h 和 5 套分布式 I/O 站点，人身安全联锁系统所有需控制、联锁的设备状态全部输入至 PLC 内，进行联锁判断是否满足工作允许的条件，分别完成回旋加速器大厅、高能束运线和四个治疗室区域的现场通道门、束流闸、声光报警灯等设备的联锁控制。

服务器与 PLC 之间采用 OPC 通讯方式，在服务器上配置一套西门子 CP1623 网卡，配合 SMATIC.NET 软件，服务器软件可与西门子 S7412-5H PLC 进行数据交互，读取、写入参数。与主站连接的本地 IO 站和 6 套分布式 IO 站构成一个环形网络，通过冗余的环形以太网完成各设备之间的数据传输，以提高系统的可靠性。PLC 对安全联锁设施进行最底层的操作且具有最高优先级。

3) 人员出入管理系统

人员出入管理系统包括人员出入管理箱、个人剂量管理平台两部分，完成对进出辐射区和个人剂量的统计和管理。

个人剂量是指对从事放射性工作的人员进行的年累计剂量的统计，当个人剂量超限时，不允许进入辐射区域。对进入隔离区的人员确认其身份，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中，PLC 控制系统根据服务器的个人剂量数据进行判断，当某一个人的个人剂量

值超限时，不允许进入辐射区，以保证人员的安全。

个人剂量管理平台可实现工作人员 IC 卡和个人剂量计的自动绑定，每次进入辐射区域累积剂量的自动累加统计，超出安全阈值后禁止进入辐射区等功能。

人员出入管理箱主要实现对进出辐射区的人员统计和管理，主要有 IC 读卡器、ARM 处理器、指示灯及按钮等。人员出入管理箱是确保人员安全的重要部件，放置在各个辐射分区入口，与服务器和 PLC 相互通信，只有经过授权和累积剂量未超限的人员刷卡（或个人剂量计）后才能够分配开门权限，按下按钮后开门指令会发送至 PLC 内，控制通道门打开。钥匙箱自身的状态可以分为“全部归位”与“未归位”两种，其状态将作为联锁信号接入 PLC 联锁系统。

PLC 监测钥匙箱上的钥匙的状态，在钥匙没有全部归还的情况下束流闸不会被打开，确保在辐射区内有人的情况下束流不会进入该区域。

图 4.2-3、图 4.2-4 分别给出了本项目辐射安全联锁系统的 PLC 系统结构及其联锁逻辑。



图 4.2-3 PLC 系统网络结构

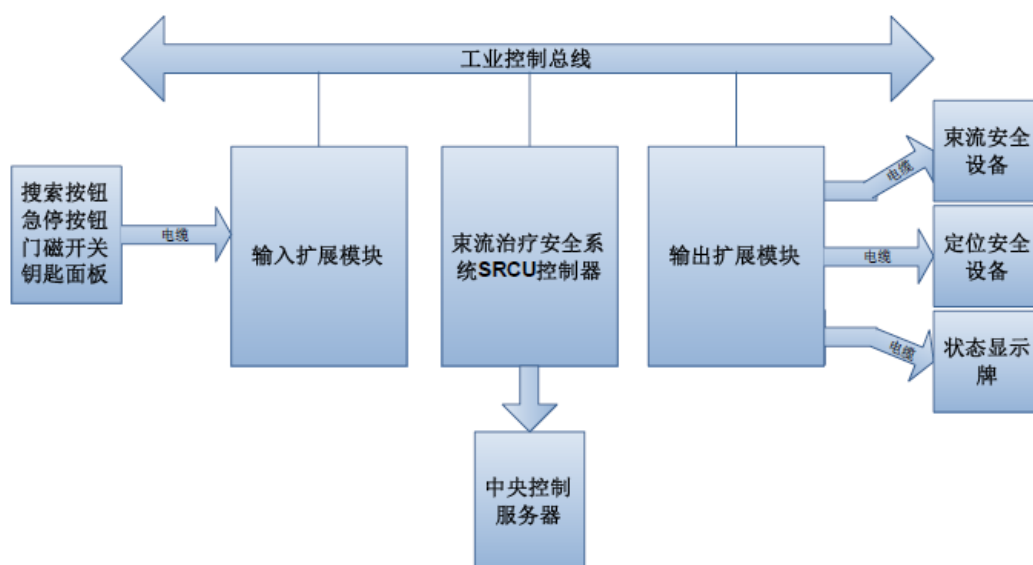


图 4.2-4 人身安全联锁系统结构示意图

4) 出入控制系统

根据加速器辐射区的划分，对各区域的人员出入进行管理。因为医用质子加速器系统要求当一个舱室进行治疗时，其它无束舱室能允许人员进行准备。对于本项目而言，则是在 1 个调试区开展调试作业是，另一个调试区能允许人员入内开展作业。

出入控制系统是人身安全联锁系统必不可少的组成部分。系统采用集散式控制体系，主要现场控制设备选用与个人剂量计相结合的门禁控制设备，结合为本项目需要专门开发的系列软件及硬件产品，对大厅内各主要通道安全联锁门进行实时监控，使被授权的持卡人在系统监控的情况下出入各联锁区域；系统采用了先进的“钥匙箱”技术，人员进入相关区域时必须先刷卡然后拔取指定的钥匙，自动门方可打开，同时门口的显示屏将会显示进入人员的信息；系统采用零计数技术，能自动统计、记录出入联锁区域的人员数量及信息，并可根据管理需要实现对加速器的联锁控制；人员通过出入口时，系统会通过红外感应来驱动摄像头进行抓拍，并对影像进行保存。此外，系统还具备良好的可扩展性,可最大

限度地改善与提高大厅内的人身安全保护措施。

回旋加速器区域的通道门采用自动防护门，在通道门的外部装有人员出入管理箱，工作人员通过在刷卡处读取有权限的卡片或者个人剂量计，才能打开通道门。人员需要进入电离辐射区域时，安全联锁系统会根据目标区域当前工作状态、内部的环境和人员累积剂量分析、判断是否适合进入，其流程如图 4.2-5 所示。

人员管理箱具备以下功能：

- a) 录取人员刷卡信息，在数据库验证其权限，比对累积剂量；
- b) 为刷卡人员分配可操作的按钮，用灯光指示；
- c) 在面板上用亮起灯光按钮数量指示内部区域人员数量；
- d) 与服务器通讯，将当前内部工作的人员情况全部上传；
- e) LED 屏上显示当前加速大厅的逻辑状态、与服务器通讯信息等。

出门时按下通道内的开门按钮，即可打开门，从工作区域离开。

通道门的打开、关闭有两种方式，手动控制和 PLC 自动控制。通道门采用电动门，形式可分平开门和轴开门等，根据现场实际情况及工况需求选择，开关门的动力由一台电机实现，电动门的控制端留有两套接口，一套接门内开门按钮，从内部打开门；另一套连接 PLC 的输出端，控制电动门的打开、关闭。

通道门还需配备开门到位、关门到位限位开关，限位开关的信号连接至 PLC 的 DI 端，当门运动到限位位置时，限位开关动作，PLC 得到限位信号，控制门停止打开或者关闭。开门和关闭到位信号也是重要的安全联锁信号，是试验设备能否安全运行的重要条件。

红外探测器安装在各个连锁门内的通道，有人员进出经过红外探测器的有效区域，会发出信号至 PLC，触发摄像机拍照，用图片的形式记录进出人员。

在电离辐射区域通道门内安装有开门按钮，离开时按下按钮，通道门即打开。从辐射区域出来后，在人员管理箱处刷卡、按按钮完成出门流程，服务器记录离开人员的信息。

进出区域人员的数量可实现手动清零，当区域内人员已全部离开，但没有刷卡的情况下，人员出入管理箱、服务器软件上依然有未离开的人员信息，此时可进行手动清零，需要具有管理员权限人员来操作。

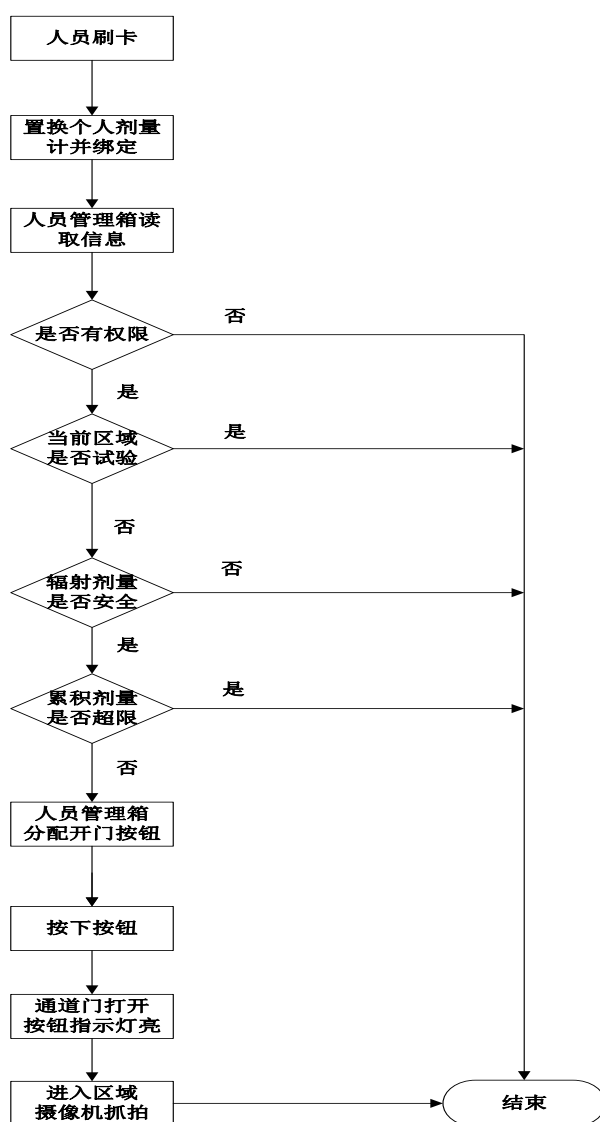


图 4.2-5 人员进入辐射区域流程图

5) 人员出入管理系统

人员出入管理系统包括人员出入管理箱、个人剂量管理平台两部分，

完成对进出辐射区和个人剂量的统计和管理。

个人剂量是指对从事放射性工作的人员进行的年累计剂量的统计，当个人剂量超限时，不允许进入辐射区域。对进入隔离区的人员确认其身份，记录每个进出人员的情况，并接入联锁系统的控制逻辑中，PLC 控制系统根据服务器的个人剂量数据进行判断，当某一个人的个人剂量值超限时，不允许进入辐射区，以保证人员的安全。

个人剂量管理平台可实现工作人员 IC 卡和个人剂量计的自动绑定，每次进入辐射区域累积剂量的自动累加统计，超出安全阈值后禁止进入辐射区等功能。

人员出入管理箱主要实现对进出辐射区的人员统计和管理，主要有 IC 读卡器、ARM 处理器、指示灯及按钮等。人员出入管理箱是确保人员安全的重要部件，放置在各个辐射分区入口，与服务器和 PLC 相互通信，只有经过授权和累积剂量未超限的人员刷卡（或个人剂量计）后才能够分配开门权限，按下按钮后开门指令会发送至 PLC 内，控制通道门打开。钥匙箱自身的状态可以分为“全部归位”与“未归位”两种，其状态将作为联锁信号接入 PLC 联锁系统。

PLC 监测钥匙箱上的钥匙的状态，在钥匙没有全部归还的情况下束流闸不会被打开，确保在辐射区内有人的情况下束流不会进入该区域。

6) 清场搜索按钮

清场搜索按钮分布于加速器大厅和治疗室内部四周沿途一定距离、一定高度的墙壁上。清场搜索是在开机前执行一套特定的安全搜索程序完成清场和建立联锁，联锁完成信号作为开机的必要前提条件，从而确保在开机前无人员滞留在里面。

加速器调试区域和整体调试区域的清场搜索的具体流程如下：

a) 每次开机调试前，由专门的辐射防护人员进入调试区域进行清

场；

b) 清场人员沿区域内巡视一周，沿途按一定的搜索顺序逐个按下清场按钮，若违反规定清场顺序则系统认为此次清场无效，需重新清场。每个子区域和整个大区域都有搜索时间窗口限制。搜索超时则认为该次搜索无效，需重新清场搜索。

c) 所有清场按钮被按下后联锁系统将自动开启警铃警灯；

d) 清场人员确认所有清场按钮全部按下，室内无人停留后，刷门禁卡进入控制室，将主控钥匙插回并旋转至“ON”状态，此时安全联锁系统会给加速器控制系统发送允许开机的信号。

7) 紧急停机按钮

加速器大厅和各治疗室内均安装若干各紧急停机按钮，若装置开机后仍有人员滞留在这些区域内，可按下该区域出口处的紧急停机按钮切断加速器运行。待确认该区域内没有工作人员并按下“清场”确认按钮，并将急停按钮复位后，可重新进行开机操作。

清场搜索按钮（蓝色点位）及清场路线（蓝色路线）、紧急停机按钮（红色点位）分布如下图所示。

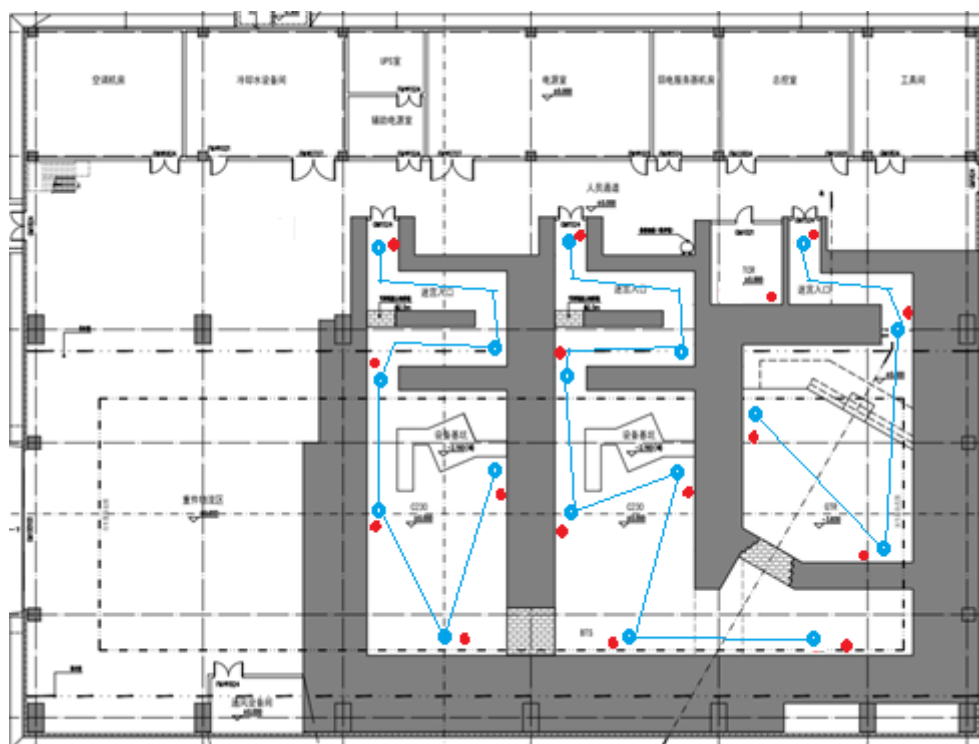


图 4.2-6 安全联锁设备分布图（清场搜索按钮、急停按钮分布及清场路线）

8) 警示装置

警报装置由辐射标志牌、运行状态显示灯、广播音响、大型荧光显示等组成，可直观、明显地显示加速器的工作状态、束流走向和工作模式，以及各处的剂量水平等。在各个入口处、控制室均安装剂量显示屏幕。

9) 视频监控/观察装置

利用摄像头监控辐射区内人员滞留状况，观察各种设备运行状态，可以设计人员定位系统，对进入辐射区的人员进行定位。

10) 其他安全防护措施

为了避免安全事故发生，建设单位制定了一系列操作规程，并对自身及销售用户的操作人员和工作人员进行操作培训，以避免运行人员的误操作。主要规程要求如下：

a) 安全和应急培训应至少包括以下内容：了解紧急停机按钮的位置和使用方法，电源断路器的位置和使用方法，紧急情况下如何将病人从病人定位系统上安全撤离。

- b) 操作人员必须清楚调试计划。
- c) 用户需制定和强制实施辐射安全程序，以确保辐射屏蔽有效。
- d) 用户需制定和强制实施程序，以实现“质子束流调节日常功能检查”。
- e) 用户需制定和强制实施程序，以实现“治疗区域外定期检测”。
- f) 用户需制定和强制实施预防保养计划，定期检查和测试所有人员安全联锁系统的控制电路。
- g) 在调试过程中，如果检测到任何设备失效需立即停止调试。
- h) 如果发生紧急停机或束流中止，需在维修人员进行合理检修，且进行日常校准之后，方可重启治疗。

4.2.2.2 其他医用射线装置安全联锁

本项目的 CBCT 图像引导系统、二维图像系统等医用 CT 射线装置主要采取：①安全联锁装置；②门机联锁；③观察和对讲装置门-灯联锁装置，提示人员不要误入正在工作的医用射线装置机房，以免受到辐射危害。

4.2.3 辐射工作场所的分区管理

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的规定，应将辐射工作场所分为控制区和监督区。

本项目建设有 2 个调试区（加速器调试区与整体系统调试区），在其中一个调试区进行出束时，另一个调试区可能正在开展出束前准备工作。考虑到本项目存在 2 个调试区同时出束的情况，环评针对此情况划分辐射工作场所见下表 4.2-2，图 4.2-7（图中红色范围为控制区，黄色范围为监督区）。

表 4.2-2 辐射工作场所控制区和监督区划分一览表

序号	辐射工作场所	控制区	监督区
1	质子治疗系统调试区	加速器调试区、整体系统调试区（加速器室、质子束输运线通道、治疗室）	控制室、人员通道、物流区、通风设备间、辅助设备间、空压机间、电源室、冷却水设备间、循环水泵房
2	CBCT 图像引导系统、二维图像系统	整体系统调试区旋转治疗室	控制室、人员通道、物流区、通风设备间、辅助设备间、空压机间、电源室、冷却水设备间、循环水泵房

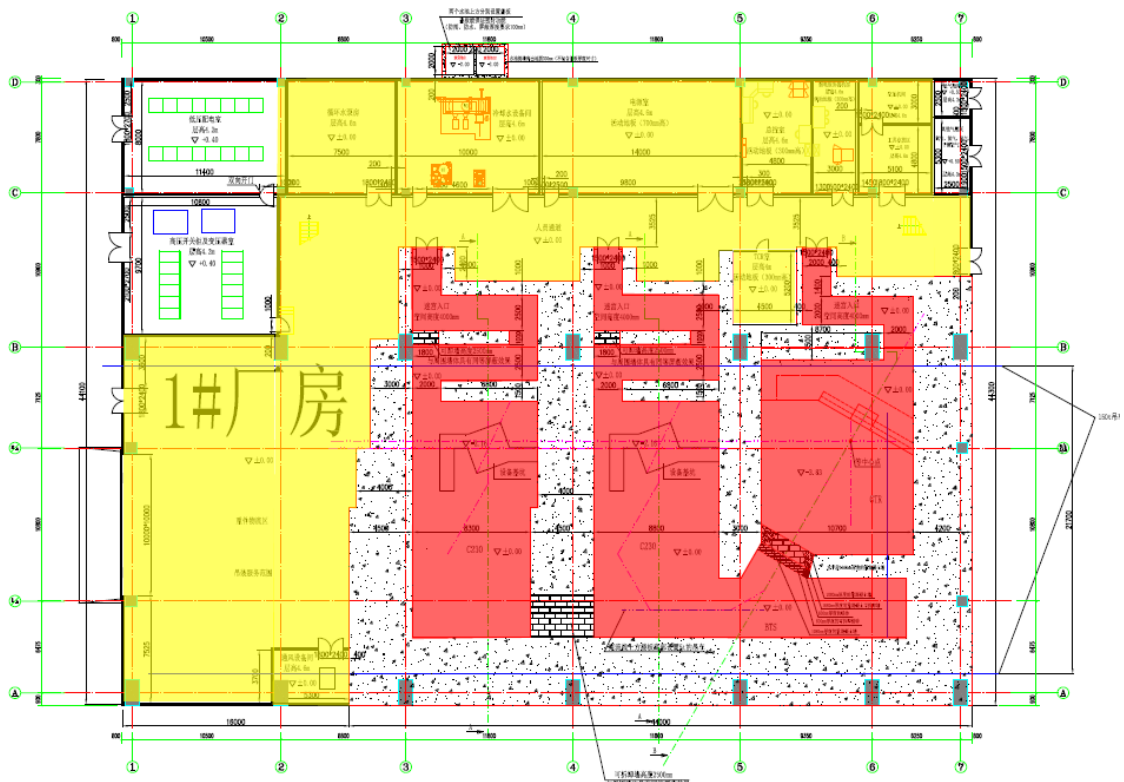


图 4.2-7 辐射工作场所分区图（红色控制区，黄色监督区）

环评要求：在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的、符合规定 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》要求的电离辐射标志和电离辐射警告标志如图 4.2-8 所示）的警告标志，并给出相应的辐射水平指示；在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌。

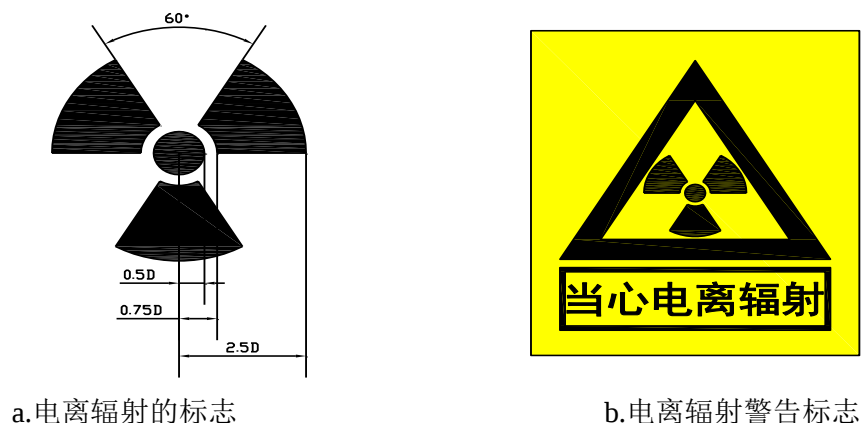


图 4.2-8 电离辐射标志和电离辐射警告标志

4.2.4 于用户方场所开展安装调试作业辐射安全防护措施

调试期间工作人员的主要的工作区域在加速器控制间、治疗室控制间、配套房间等区域，调试过程中的采取辐射防护措施主要包括场所屏蔽防护、人员培训、人机安全联锁系统、工作人员剂量控制等四个方面。

4.2.4.1 场所屏蔽防护

本项目质子治疗系统工作场所建筑墙体的屏蔽设计中，需要综合考虑用户单位使用系统的工作负荷、束流使用因子、装置布局、建筑结构布局等因素。这些因素因用户单位使用场所的不同而不同，同时，用户单位在使用本项目质子治疗系统前，需要进行环境影响评价，并对其使用场所建筑墙体的屏蔽设计进行评价，确保其能够满足质子治疗系统屏蔽设计标准的最低要求。最终编制的环境影响评价文件须报送至生态环境行政主管部门审批，取得生态环境部门的批复后，中广核医疗方可进行设备的安装调试。因此，本次评价不对调试流程中用户方辐射屏蔽设计进行评价计算。

4.2.4.2 工作人员培训

所有从事质子治疗系统安装调试岗位的工作人员上岗前均进行培训，包括：

1、辐射安全与防护培训

所有从事质子治疗系统安装调试岗位的工作人员均已参加了辐射安全与防护培训，并通过考核取得合格证书；

2、内部培训

中广核医疗所有从事质子治疗系统安装调试的工作人员均需参加 IBA 公司或亿比亚公司的组织的各类专业技术培训，培训内容主要包括加速器的原理及应用、加速器辐射安全防护、加速器安装调试流程、加速器故障的检修流程和加速器日常维护保养等内容，培训结束通过考核并取得相应的合格证书后方可上岗。

4.2.4.3 人身安全联锁系统

质子治疗系统设计了严密的人身安全联锁系统，包括门禁控制、清场搜索、紧急停机和状态监控等。每个辐射区都受安全联锁系统的控制。对于不同用户单位，使用场所的不同可能导致人身安全联锁系统布置的不同，但总体辐射防护及安全联锁的原则是相同的。同时，用户单位质子治疗系统工作场所均在使用本项目质子治疗系统前进行了环境影响评价，确保人身安全联锁系统能够满足相应法规规范、环境主管部门监督检查程序等要求。因此，本次评价不对调试流程中用户方人身安全联锁系统进行具体评价，仅对其设计标准和原则进行阐述。

1、质子治疗系统开始调试前，必须先进行安全联锁系统的安装调试，并对其进行确认，确认内容如下：

（1）按照工程设计报告，对系统建立联锁和解除联锁等状态逐一进行测试；

（2）确认联锁建立和解除后，各安全设备状态正常，如搜索按钮、急停开光、声光报警灯等状态正常；

（3）测试所有可能出现的紧急情况下，辐射安全联锁系统是否能够联锁加速器相关安全设备，以确保加速器关机或切断束流。

2、安全联锁系统确认完毕后，方可开始调试。调试过程中，通过安全联锁系统的运行，保证工作人员的安全。具体如下：

（1）每次开机出束调试前，由专门的辐射安全人员按照“清场流程”对各辐射区进行清场搜索，用户方清场流程根据辐射工作场所实际情况进行制定。清场搜索完毕确保辐射区内无人员逗留后方可允许开机出束。

（2）开机出束后将通过门禁系统防止人员随意进入辐射区，各辐射区的门一旦被打开，该区域的联锁系统将被破坏，强制停止出束以确保误入人员的安全。各辐射区内外均设有急停按钮，突发事故/故障情况下可紧急停束。

（3）调试期间，如因工作需要须进入辐射区内部进行设备的检修，工作人员应告知调试现场的负责人，由现场负责人安排相关人员切断该区域的束流或停机后，且满足下述进入辐射区的条件后，工作人员方可按照人员出入流程进入辐射区（人员出入流程根据辐射工作场所实际情况进行制定）。

①各辐射区（包括加速器大厅和治疗室）停机冷却 24 个小时后，由专门辐射防护人员进行“清场搜索”确认，并利用便携式中子/ γ 剂量率仪对辐射区进行巡检，监测结果需满足相应管理要求后，工作人员方可按照进入辐射区的流程进入治疗室或加速器大厅；

②辐射工作场所内区域剂量率水平低 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 时允许工作人员进入；如无法满足剂量率水平要求，则应考虑采取延长冷却时间、人员个人防护、控制作业时间等措施，制定操作方案后，严格按照操作方案进入辐射工作场所内进行操作。

③设备部件表面污染水平（ α 、 β ）应低于 40Bq/cm^3 。若表面污染水平高于 40Bq/cm^3 ，应由专门的辐射安全人员对活化部件表面进行擦拭、去污清洁后，经表面污染监测满足要求后，方可对部件进行装卸、搬动、

维修等操作。

(4) 各辐射区内外均装有报警灯和显示屏等设备，能够实时显示各治疗室的运行状态。此外，各辐射工作场所均设置电离辐射警示标志及中英文警示说明等防止误操作。

4.2.4.4 工作人员剂量控制

中广核医疗对其用户方调试作业辐射工作人员实行累积剂量控制方式，其剂量控制目标为“单次受照剂量不超过 1mSv，每周总受照剂量不超过 1mSv，每年总受照剂量不超过 5mSv。”

1、控制室内的工作人员

控制室等区域的工作人员在调试期间必须佩带个人剂量计和个人剂量报警仪。个人剂量计每季度委托有资质单位监测一次，并由专门的辐射安全员负责记录工作人员的受照剂量；直读式个人剂量报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平。

此外，这些区域内均设有带有报警功能的在线区域监测仪，能够实时监测控制室内人员居留区域的剂量率水平。当监测的剂量率水平超过报警阈值时，即发出报警信号。此外，调试期间，由专门的辐射安全员利用便携式中子/ γ 剂量率仪对控制室等区域进行不定期的巡检，确保工作人员的安全。

2、进入辐射区内的工作人员

对于因工作需要须进入辐射区的工作人员，必须佩带个人剂量计和个人剂量报警仪。

中广核医疗为进入辐射区内工作的人员建立档案，每次在辐射区内的工作结束后，由专门的辐射安全员负责回收直读式个人剂量报警仪，并记录工作人员的工作时间和该次工作期间的受照剂量，作为下次进入辐射区工作时制定工作方案的依据。

工作人员进入辐射区前，由专门的辐射安全员切断该辐射区束流后，利用便携式中子/ γ 剂量巡测仪对该辐射区进行巡检，根据工作人员可能进入的区域的剂量率水平以及可能接触的设备或部件表面的剂量率水平，结合各工作人员历史受照剂量记录，制定工作方案，通过安排多名人员同时工作的方式控制每个工作人员的工作时间，确保其受照剂量不会超过剂量控制目标值。

对接触高辐射水平区域部件的操作，须有专门的辐射安全人员现场监督，并根据实际情况采取必要的临时局部屏蔽措施。工作人员操作完毕后必须进行表面污染检测。对直接接触高辐射水平部件的工作人员，必须穿戴防护服、防护眼镜、防护帽、手套、口罩及鞋套等防护用品，并佩戴指环剂量计。

4.3 三废的治理

4.3.1 放射性污染防治措施

4.3.1.1 放射性废气治理措施

本项目回旋加速器运行将产生感生放射性气体。加速器运行时，回旋加速器室及治疗室均设置通排风口，始终保持负压通风状态（运行状态换气次数大于 6 次/h，停止状态换气次数 1 次/h），及时排出产生的感生放射性气体。排出的感生放射性气体经通排风机房于 1#厂房屋顶排气筒排放，排气筒高度为 30m。

根据 5.1.1.1.2 章节预测分析内容，本项目排放的活化气体对周边公众最大落地浓度点位于 WSW（西南偏西）方向 200m 处。

经计算，项目排放的活化气体所致公众个人剂量最大值为 $1.71\text{E-}03\text{mSv/a}$ ，低于评价给出的公众剂量约束值要求（ 0.1 mSv/a ），因此，本项目所排放的活化气体对周边公众影响是极其轻微的。

4.3.1.2 放射性固体废物治理措施

加速器结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。质子加速器产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如铜靶、离子源/引出隔板、降能器、准直器、狭缝、治疗头、磁铁等，其主要材料为铁、不锈钢（铁）、铜、铝、铍、石墨、钽和镍以及各种烃类制品。相关实验研究表明，加速器关机后所被活化部件中的核素主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

根据建设单位设计资料，本项目预计每年放射性固体废物产生量约 16.8kg，主要为质子治疗系统维修维护、更换的含感生放射性的结构部件。根据软件模拟结果，在本项目加速器结构部件的放射性活度浓度最高可达到 $7.23\text{E}+07\text{Bq/g}$ （预测过程详见报告 5.2.5 章节），超出了豁免水平，需对拆卸下来的部件加强管理，进行辐射水平监测、登记，暂存在放射性固废暂存间。

本项目在厂区西北角内设置放射性固废暂存间，暂存间建筑面积 30m^2 ，暂存容积为 75m^3 。拆除的活化的结构部件按国家规范包装后，集中暂存在该储存间，最终将委托项目所在地城市放射性固废处置中心等具有资质的单位处置。

环评要求：项目单位应按照《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》(GB 11928-1989)的相关要求，产生的放射性固体废物经分类收集、包装后，装入带有分类标记的专用口袋或容器，送入放射性固体废物暂存间暂存。放射性固体废物暂存量超过暂存间 50%容积（ 37.5m^3 ）后，应及时送交城市放射性固废处置中心等具有资质单位处理。

4.3.1.3 放射性废水治理措施

本项目回旋加速器所用冷却水为去离子水。正常运行时，本项目质子治疗系统的活化冷却水循环使用，不对外排放，仅在保证水质而进行

去离子化或设备相关部位冷却水系统检修时才需要排放。

本项目质子治疗系统在冷水机房设有放射性废水收集池，设置两个容积为 5m^3 的并行贮存槽，收集池总容积为 10m^3 ，用于暂存更换下来的冷却水。设计容量达到项目水冷系统总容量的 2 倍以上，可以有效收纳、暂存更换后带有感生放射性的冷却水。

经一定时间暂存后，带有感生放射性的冷却水中短半衰期核素 ^{15}O 、 ^{13}N 和 ^{11}C 等将迅速衰变，浓度也很快降低，因此只需关注冷却水中半衰期较长的 ^3H 和 ^7Be 的浓度。

建设单位将定时对废水收集池中冷却水进行采样，并分析监测其中 ^3H 和 ^7Be 的浓度，在浓度达标并经环境主管部门同意后，方可排入市政污水管网。

4.3.2 非放射性污染防治措施

4.3.2.1 废气治理措施

项目运行期废气污染源主要为主要包括臭氧、二氧化氮及焊接烟气。

1、臭氧、二氧化氮

质子治疗系统内臭氧及氮氧化物，经通排风系统，由 1#生产厂房屋顶排气筒排入大气。根据预测分析，本项目辐射工作场所内，在 1 次/h 的通风频率下，有害气体浓度最大的是加速器室，其臭氧和二氧化氮的饱和浓度比《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》（GBZ2.1-2019）中控制值 $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 低。室内有害气体臭氧不会对工作人员造成危害，1 次/h 的通风频率即可完全满足防治有害气体的要求，在无温湿度要求的情况下，无需提高换气频率。

同时，有害气体排放到环境中去将受到大气的稀释，本项目排放臭氧造成周围空气中臭氧浓度同样远低于 GB3095-2012 环境空气质量标准中的二级浓度限值；本项目排放氮氧化物浓度远低于 GB16297-1996

《大气污染物综合排放标准》排放限值。

2、焊接烟气

2#生产厂房内组装焊接工序产生焊接烟气，本项目仅设置 1 台钎焊机，年使用银铜焊丝约 0.1t，根据《焊接技术手册》(作者：史耀武，化学工业出版社，2009 年 7 月)并结合经验排放系数，每公斤焊丝约产生 5-8 g 烟尘，保守取值 8g，则焊接烟尘排放量约为 0.8kg/a。

本项目使用焊机数量少，焊接烟尘产生量极小，且使用时间分散，焊接烟尘排放速率低，焊接烟尘通过焊接设备（钎焊机）自带或另行购置的焊接烟气收集净化装置净化后，由厂房通排风系统排出厂房。

3、有机废气

项目组装测试阶段点胶、擦拭等过程使用的螺纹胶、无水乙醇、丙酮等辅料将产生一定量的有机废气，有机废气采用集气罩收集后，引至 2#厂房楼顶的一套活性炭吸附装置处理后（设计净化效率 90%）排放，排气筒高度 15m。

项目螺纹胶使用量为 1L/a (1.08.kg/a)，螺纹胶中挥发性有机化合物含量为 4.1%，按全部挥发计，则有机废气产生量为 0.44kg/a。项目无水乙醇用量为 50L/a (39.5kg/a)，丙酮用量为 18L/a (14.1kg/a)，按使用过程中全部挥发计，则有机废气产生量为 53.6kg/a。项目有机废气产生总量约 54.04kg/a，经净化后排放量为 5.404kg/a。

有机废气收集系统排风量以 2000m³/h 考虑，全年工作时间以 2000 小时(8 小时/天, 250 天/nian)估算，有机废气排放浓度为 1.351mg/ m³，排放速率为 0.022kg/g，低于 DB51/2377-2017《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》表 3“第二阶段排气筒挥发性有机物排放限值（常规控制污染物项目）”中最高允许排放浓度 60 mg/ m³，15m 排气筒最高允许排放速率 3.4kg/h 的限值要求。

4.3.2.2 废水处理措施

本项目运行期废水主要为清洗废水及人员生活污水。清洗废水集中收集暂存于废水暂存池中，定期交有资质的单位收运处理；人员生活污水经预处理后排入当地市政污水管网，对周边地表水无影响。

4.3.2.3 噪声治理措施

项目运行过程中的噪声源主要为冷水机组、冷却水泵及通排风机噪声。噪声源强约为 65dB(A)~90dB(A)。

根据 5.1.3.1 章节预测分析内容，通过距离衰减及噪声叠加后各厂界噪声排放值均能够满足 GB12348-2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》3 类标准限值要求。

4.3.2.4 固体废物治理措施

项目质子治疗系统运行过程中，在组装、调试、检修等阶段将产生一定量的工业废物，年产生量预计约 100kg/a，主要为废包装材料、不含放射性的不合格部件等，经集中收集后，交环卫部门清运处理。

同时，本项目在设备调试、检修过程中将产生一定量废润滑油、废含油棉纱、废含油手套、含酒精或丙酮擦拭布等废物，年产生量预计约 50kg/a。建设单位拟将其集中收集至危险废物暂存桶中，暂存至 2#生产厂房危险废物暂存间，定期交由有资质单位回收。

人员生活垃圾由环卫部门收集处置，不会对周围环境造成不利影响。

4.4 服务期满后的环境保护措施

本项目服务期满后回旋加速器拆除下来的如束流装置、靶件、支撑配件等含感生放射性的结构部件，均按照上述放射性固废处置与转移。在退役过程中经过监测质子治疗系统区域中的各类感生放射性核素情况，待其衰变达到相应核素的清洁解控水平后，经环境主管部门批准后，方可进行退役处理。

第五章 环境影响分析

5.1 建设阶段对环境的影响

本项目的施工期主要环境影响来自土建施工过程产生的废水、废气、噪声、固废等。

1、施工废水

施工期的废水主要来自施工人员的生活污水与施工过程中产生的废水，施工废水主要包括土方阶段降水排水及结构阶段混凝土养护排水，这部分废水经市政排水管网最终排入芙蓉溪，由于废水产生量较小，对水环境影响不大。

2、施工废气

施工期的大气污染源主要为施工区裸露的地表在大风气象条件下易形成风蚀扬尘，其产生量与风力、表土含水率等因素有关。建筑材料运输、卸载中的扬尘，土方运输车辆行驶产生的扬尘，临时物料堆场产生的风蚀扬尘等。但影响程度及范围有限，而且是短期的局部影响。

为减轻扬尘对区域环境空气质量的不利影响，应进行合理绿化，以减少表土的裸露。施工单位应严格遵守项目所在地对于扬尘治理的规定，将施工期扬尘对周边环境的影响降至最小。

3、施工噪声

施工期的噪声污染特点是随着施工阶段的不同，噪声源将发生明显的变化，噪声影响程度也有所不同，高噪声施工机械相对集中于土方期和结构期，施工时间也相对较长，而打桩机冲击声功率最强，但延续时

间短。施工机械噪声除打桩机为狭带冲击声外，其余多为中、高频机械噪声。施工期声源都在室外，影响范围较远，尤其是打桩机噪声。装修期大部分声源在室内，有墙壁阻隔降噪。综合分析，施工噪声具有阶段性、临时性和不固定性，不同的施工设备产生的噪声不同，在多台机械设备同时作业时，各台设备产生的噪声会产生叠加。

根据目前的机械制造水平和施工条件，施工期间的噪声是有一定影响的，但只要采取一定的措施、合理安排施工作业时间，即可减轻施工噪声对周围环境的影响。由于施工期噪声影响是短期的，有限的，随着施工期的结束，其影响将随之消失。同时项目在采取相应措施及加强管理的前提下，项目施工对区域声环境影响不大。

4、固体废物

施工期的固体废物主要包括建筑垃圾和施工队伍产生的生活垃圾。建筑垃圾和工程渣土作为道路及低矮地面的回填土，这部分废物只要及时清运，不会对周围环境产生较大的影响。施工队伍驻扎现场应设置专门生活垃圾箱和垃圾筒，由环卫部门来收集，统一处置，不允许随意抛弃。只要及时清运，施工期固体废物不会对周围环境产生明显影响。

5、项目建设阶段环境影响小结

本项目施工期将产生废水、废气、噪声、固体废物等污染。由于施工期时间有限，影响范围以局部污染为主，施工期的影响将随着施工期的结束而结束。

施工期针对各污染物采取的措施经济技术基本可行且有效，施工期对外环境的影响是可接受的。

5.2 运行阶段对环境的影响

本项目拟配置质子加速器、CBCT 图像引导系统、二维图像系统等多种医用射线装置，开展生产、使用、销售业务，以下分别论述评价其辐射环境影响。

根据本报告的工程分析章节，回旋加速器运行时产生的辐射源项包括瞬时辐射和感生放射性，辐射源除通过贯穿辐射途径对屏蔽体外环境产生辐射影响外，场所空气中的感生放射性核素还将气载流出物的形式进入大气环境，主要通过空气浸没外照射和吸入内照射途径对人体产生辐射影响。

1、加速器屏蔽校核计算

对本项目回旋加速器的屏蔽设计校核，以《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.5-2015）的预测计算为主。

本项目使用的质子治疗系统的质子最高能量为 230MeV，束流打靶后产生的次级粒子有蒸发中子、级联中子、光子和正负电子等。研究表明，几百 MeV 能量范围的质子束流损失后产生的光子、正负电子甚至介子，经较厚的混凝土屏蔽衰减后对剂量率的贡献很小，屏蔽体外的剂量贡献主要来源于高能级联中子。因此，屏蔽的主要对象是中子。

根据《放射性治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.5-2015）中“6 机房墙体屏蔽估算方法”，当关注点与束流损失点的距离远大于束流损失点的几何尺寸（大于 7 倍时），可将靶视为点源。根据质子治疗系统的设备结构和平面布局，本项目各

束流损失点均视为点源处理。屏蔽体外剂量率采用下式 5.1 计算。

$$\dot{H} = S_0 H_{\text{casc}}(\theta) e^{-\frac{d\rho}{\lambda(\theta)}} r^{-2} \quad (5.1)$$

式中：

$\dot{H}$ ：r 处的当量剂量率，单位为 Sv/s；

S_0 ：每秒损失在点靶上的质子数目，单位为（质子数/s）

$H_{\text{casc}}(\theta)$ ：单个质子产生的级联中子在距束流损失点 1m 远处的剂量当量，单位为[（Sv.m²）/质子]；

d ：屏蔽厚度，单位 cm；

ρ ：屏蔽层密度，单位 g/cm³；

$\lambda(\theta)$ ：在 θ 方向的级联中子在屏蔽层中的衰减长度，单位 g/cm²；

r ：点源到计算点的距离，m。

2、迷道计算：

质子加速器迷道剂量率的衰减采用 NCRP-144 号报告推荐的 Tesch 在 1982 年给出的计算公式估算：

第一阶迷道：

$$H(r_1) = 2H_0(r_0)\left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2 \quad (5.2)$$

第一阶之后的迷道：

$$H(r_i) = \left(\frac{e^{-r_i/0.45} + 0.022A_i^{1.3}e^{-r_i/2.35}}{1 + 0.022A_i^{1.3}} \right) H_{0i} \quad (5.3)$$

式中：

r_0 ：源到第一阶迷道入口的距离（m）；

r_1 ：源到第一阶迷道拐角处的距离（m）；

$H_0(r_0)$ ：迷道入口的剂量率（mSv/h）；

A_i : 第*i*阶迷道的截面积 (m^2);

H_{0i} : 第*i*阶迷道入口的剂量率(mSv/h);

r_i : 第*i*阶迷道的深度 (m)。

3、天空反散射计算——Stapleton 公式:

天空反散射采用 NCRP-144 号报告推荐的 Stapleton 公式进行计算:

$$H(r) = \frac{a \cdot e^{-r/\lambda(E_c)}}{(b+r)^2} Q \quad (5.4)$$

$$Q = \frac{d^2}{g} \cdot H(d, t) \cdot \Omega \quad (5.5)$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta) \quad (5.6)$$

式中:

$H(r)$: 与源水平距离为*r*的计算点的剂量率 (Sv/h);

a : 系数 ($= 2 \times 10^{-15} \text{m}^2 \cdot \text{Sv}$);

b : 系数 ($= 40\text{m}$);

r : 源到计算点的水平距离 (m);

$\lambda(E_c)$: 与中子能量上限对应的空气的中子有效吸收长度 (m);

E_c : 截止能量 (MeV);

Q : 穿透顶屏蔽到达地面或天花板平面的中子数目 (n/h);

d : 源到地面或天花板平面的距离 (m);

g : 单位中子通量的剂量 ($\text{Sv} \cdot \text{m}^2$);

$H(d, t)$: 顶屏蔽地面处的剂量率 (Sv/h);

t : 顶屏蔽厚度 (m);

Ω : 源从顶屏蔽辐射出的立体角 (Sr);

θ : 源从顶屏蔽辐射出的最大极角 ($^\circ$ 或 rad)。

本项目质子治疗系统顶部为不上人屋面, 计算中从保守和简化角度

出发，将束流损失点源项视为点源，位于回旋加速器中心，其顶屏蔽为回旋加速器的顶部屋顶。

5.2.1 场所辐射水平

5.2.1.1 质子加速器系统各辐射区瞬发辐射环境影响分析

在进行辐射和屏蔽计算时，本项目根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》GBZ/T201.5-2015 的要求，只预计最高能量为 230MeV 的情况，并赋予各能量点中最大的束流损失和所有能量点的总工作量。

1、计算参数及设定

根据 GBZT201.5-2015 的 5.1 条款，需使用质子加速器最高能量、最大束流强度对屏蔽厚度的效果进行校核。在此条件下，与建设单位沟通后，结合本项目情况，给出本次评价计算校核屏蔽厚度的基本条件：

(1) 加速器至铜靶、治疗室等沿线损失的质子能量均以 230MeV 计算。

(2) 沿线束流损失强度以各能量等级中，束流损失最高值进行估算。

根据报告 3.2.23 章节“质子治疗系统出束调试方案、工作计划及工作量”分析内容，本项目质子治疗系统集成调试机房分隔为东西两个调试区，具体布置及工作内容为：

1) 西侧为加速器调试区，设置质子加速器室(含加速器基坑及铜靶)，仅用于开展加速器系统调试作业；建成后，每年组装、调试加速器系统 2 台(套)。

2) 东侧为整体调试区, 含质子加速器室 (含加速器基坑)、束流输运线、1 个旋转治疗室 (含旋转治疗机架基坑及铜靶), 既可开展质子治疗系统整体 (加速器、束流输运线、治疗室) 整体调试作业, 亦可单独开展加速器系统调试作业; 建成后, 每年组装、调试加速器系统 1 台 (套)、质子治疗系统 1 台 (套) (含回旋加速器、能量选择系统、束流输运线、治疗室终端各 1 套)。

3) CBCT 图像引导系统及二维图像系统依托整体调试区旋转治疗室部分开展生产、使用、调试工作; 调试生产的 CBCT 图像引导系统、二维图像系统为质子治疗系统调试计划提供高清晰度的数字影像引导、定位功能模拟作业。

4) 两个调试区共用 1 个控制室。根据工作进度, 两个区域存在同时开展调试出束的可能性。

根据调试规模的不同, 本项目分为加速器独立调试和质子治疗系统整体调试两种方式。

本项目计划每年对 3 台回旋加速器系统进行加速器独立调试作业。其中, 2 台加速器调试作业于质子治疗系统机房加速器西侧加速器调试区开展, 1 台加速器调试作业于质子治疗系统机房加速器东侧整体调试区开展。同时, 本项目计划每年对 1 台 (套) 质子治疗系统 (含回旋加速器、能量选择系统、束流输运线、治疗室终端各 1 套) 开展整体调试作业, 调试作业于质子治疗系统机房东侧整体调试区开展。调试方案及周期安排见下表。

表 5.2-1 本项目质子治疗系统调试方案及周期安排

出束调试项目及参数	加速器调试区	整体调试区	
调试设备	回旋加速器系统 (回旋加速器、铜靶)	回旋加速器系统 (回旋加速器、铜靶)	质子治疗系统(回旋加速器、能量选择系统、束流输运线、治疗室终端、铜靶)
调试设备数量	2 台/年	1 台/年	1 台/年
出束调试周期	12 周/台	12 周/台	12 周/台
出束时间	240 小时/台	240 小时/台	240 小时/台
最高调试能量	230MeV	230MeV	230MeV
额定束流强度	125nA	125nA	750nA
最大引出束流强度	50nA	50nA	300nA
铜靶(负载) 最大束流损失	50nA	50nA	4.3nA
主要束流损失位置	加速器、束流引出口、铜靶	加速器、束流引出口、铜靶	加速器、束流引出口、降能器、准直器、发散狭缝、动量狭缝、铜靶
主要束流损失点源项、损失方式	详见表 3.2-3	详见表 3.2-4	详见表 3.2-5、表 3.2-6(降能器、准直器、发散狭缝、动量狭缝存在 2 种不同的布置方式)

由上表可见，质子治疗系统机房东侧整体调试区的调试作业中，质子治疗系统整体调试作业的束流损失源项均大于回旋加速器系统独立调试作业的源项。因此，评价主要以质子治疗系统机房“西侧加速器调试区开展加速器系统调试+东侧整体调试区开展质子治疗系统整体调试”的最大工作负荷，进行评价与分析。

考虑到东侧整体调试区开展质子治疗系统整体调试存在 2 种不同的布局方式，评价对本项目出束调试作业时，机房内源项的分布汇总分析如下表 5.2-2、图 5.2-1 及表 5.2-3、图 5.2-2。

表 5.2-2 束流损失点分布情况表（西侧加速器调试+东侧整体调试布局 1）

束流损失点序号	区域描述	坐标	备注
1	1#加速器本体 D 型盒	大半径处	束流损失 25nA
2	1#加速器引出点	(6. 3, 12. 3)	束流损失 50nA
3	2#铜靶	(4. 6, 9. 2)	束流损失 50nA
4	2#加速器本体 D 型盒	大半径处	束流损失 150nA
5	2#加速器引出点	(17. 3, 12. 3)	束流损失 300nA
6	降能器	(15. 6, 9. 2)	束流损失 72nA
7	准直器		束流损失 214nA
8	发散狭缝	(14. 6, 7. 6)	束流损失 4.7nA
9	能量狭缝	(15. 2, 4. 8)	束流损失 4.7nA
10	2#铜靶	(30. 2, 14. 2)	束流损失 4.3nA

该工况下束流损失点位整体布局间下图中蓝色点位。

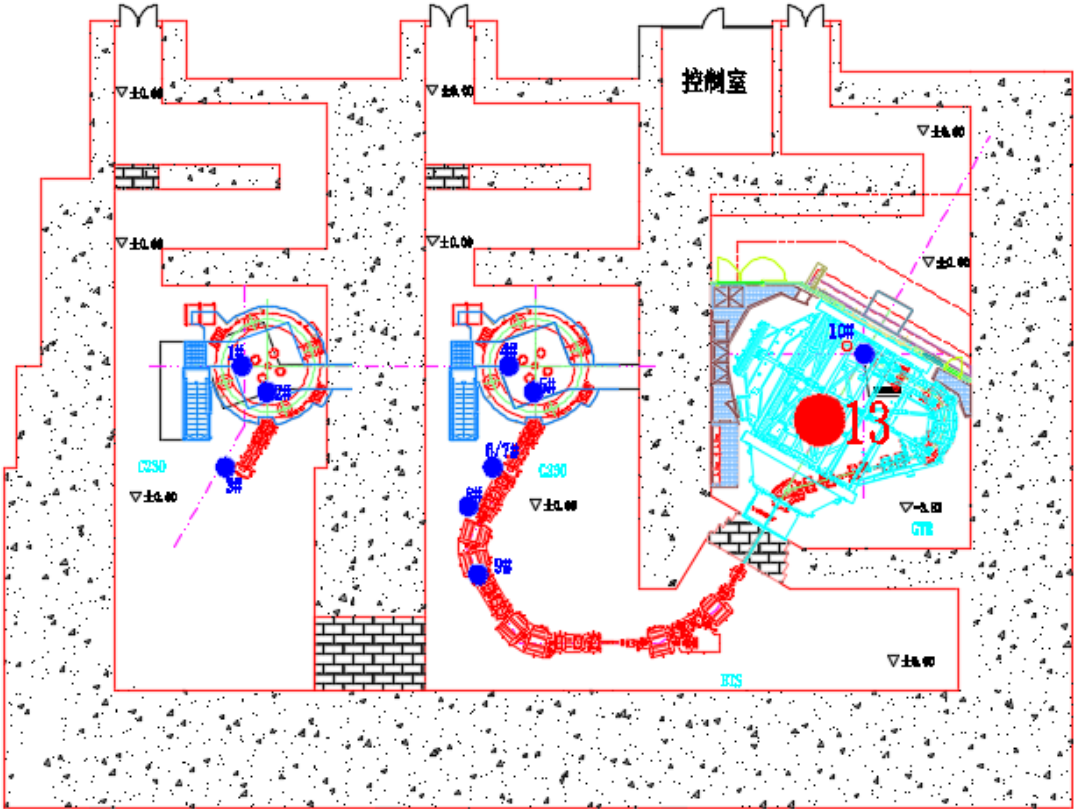


图 5.2-1 束流损失点分布图（西侧加速器调试+东侧整体调试布局 1）

表 5.2-3 束流损失点分布情况表（西侧加速器调试+东侧整体调试布局 2）

束流损失点序号	区域描述	坐标	备注
1	1#加速器本体 D 型盒	大半径处	束流损失 25nA
2	1#加速器引出点	(6. 3, 12. 3)	束流损失 50nA
3	1#铜靶	(4. 6, 9. 2)	束流损失 50nA
4	2#加速器本体 D 型盒	大半径处	束流损失 150nA
5	2#加速器引出点	(17. 3, 12. 3)	束流损失 300nA
6	降能器	(18. 5, 1. 8)	束流损失 72nA
7	准直器		束流损失 214nA
8	发散狭缝		束流损失 4.7nA
9	能量狭缝	(24. 6, 4. 3)	束流损失 4.7nA
10	2#铜靶	(30. 2, 14. 2)	束流损失 4.3nA

该工况下束流损失点位整体布局间下图中蓝色点位。

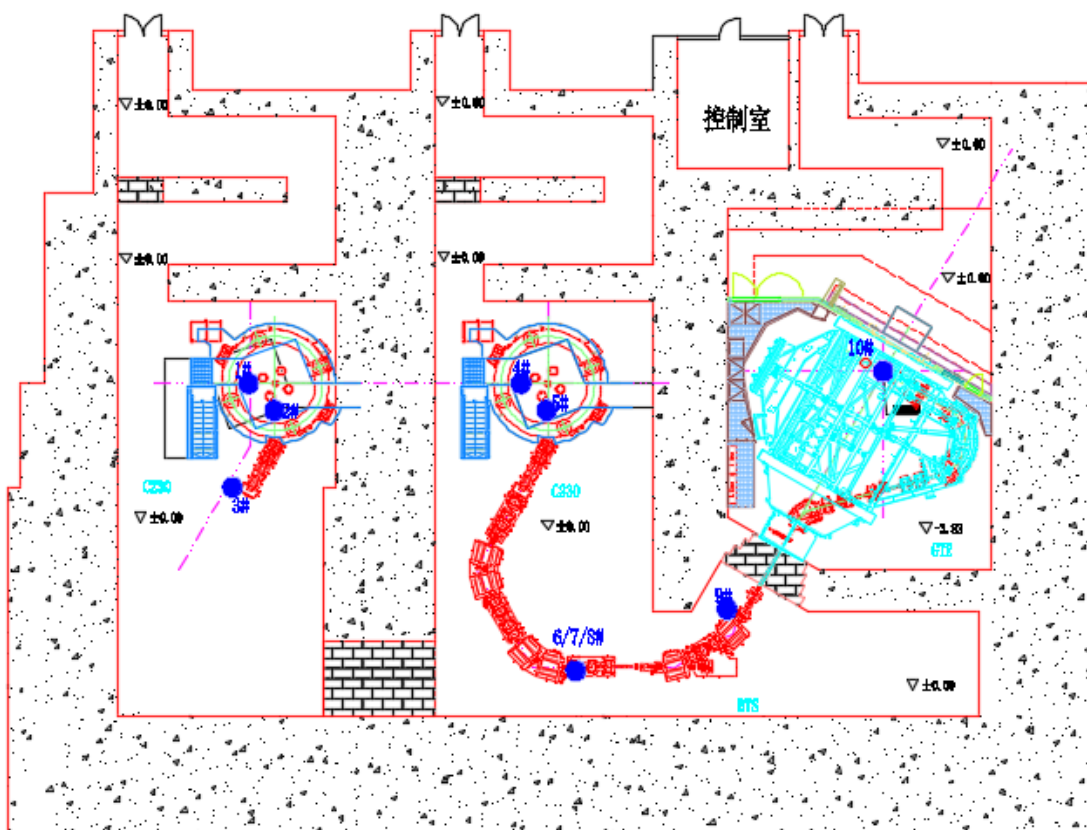


图 5.2-2 束流损失点分布图（西侧加速器调试+东侧整体调试布局 2）

对比上述 2 种工况的束流损失点布局表、图可以了解到：①东侧整体调试区两种不同的布局方式下，有 2 处源项位置有所变化：②点位 6、7、8 合并至坐标(18.5,1.8)，点位 9 向东侧移动至(24.6,4.3)；③该情况下，

对周边环境的影响有所变化的为整体调试区南侧关注点位。

(6) 加速器自带 40cm 铁壳。

(7) 单个 230MeV 质子产生的级联中子当量剂量以及相应屏蔽材料（铁、混凝土）的衰减长度，引用蒙卡模拟得到的 130~230MeV 质子相应参数。

表 5.2-4 给出了 130MeV~230MeV 这 4 个能量点的剂量，下表给出了 230MeV 质子打靶的侧向和前向的衰减长度。

表 5.2-4 130MeV~230MeV 质子打靶的侧向和前向 1m 远处的中子当量剂量转换因子

靶材	质子能量 (MeV)	侧向 ($\text{Sv} \cdot \text{m}^2$)	前向 ($\text{Sv} \cdot \text{m}^2$)
铁	130	6.61E-16	7.75E-16
	160	9.05E-16	1.32 E-15
	185	1.15 E-15	1.86 E-15
	230	1.67E-15	3.02E-15

表 5.2-5 230MeV 质子打铁/铜靶的侧向和前向的衰减长度

质子能量 (MeV)	屏蔽材料	侧向衰减长度 (g/cm^2)	前向衰减长度 (g/cm^2)
230	混凝土	87	116
	铁	114	152

(8) 级联中子发射方向与束流方向夹角 θ ($0^\circ \sim 90^\circ$) 中， 0° 导致剂量最高。在进行关注点剂量率校核时，当量剂量与衰减长度结合角度 θ 采用插值估算。估算情况见下表

表 5.2-6 估算参数表

估算条件	与质子方向的夹角 θ ($^\circ$)	级联中子当量剂量转换因子 ($\text{Sv} \cdot \text{m}^2$)	衰减长度 (g/cm^2)	
			混凝土	铁
质子能量 230 MeV; 铁靶	0~30	3.02E-15	116	152
	30~60	2.35 E-15	102	133
	60~90	1.67E-15	87	114

(9) 对于屏蔽体外关注点，将加速器内束流损失点简化为 1 个点源 (230MeV，束流方向侧向关注点)。加速器 D 型盒束流损失点位置与加

速磁场点位相关，存在正向、背向、侧向等多种可能，在关注点距离加速器较远，将加速器束流方向视为侧向各关注点。

2、关注点位置及其设定

(1) 关注点居留因子及剂量率取值

居留因子涉及屏蔽体外剂量率限值（ $H_{c,max}$ ）的取值，根据 GBZ/T201.5-2015 的 4.2 条款，居留因子 $\geq 1/2$ 的场所，剂量率限值为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，居留因子 $< 1/2$ 的场所，剂量率限值为 $10\mu\text{Sv/h}$ 。

同时，对于机房顶，本项目机房屋顶为不上人屋面，则正上方处于辐射源到机房顶内表面边缘所张立体角区域内无人员居留场所，剂量率限值为 $100\mu\text{Sv/h}$ 。

在此基础上，结合 GBZ/T201.1-2007、GBZ/T201.5-2015 对屏蔽体外关注点剂量率控制的要求，评价结合周工作负荷、关注点的使用因子和居留因子，对各关注点计算导出剂量率参考控制水平（ $H_{c,d}$ ）。

各关注点在导出剂量率参考控制水平（ $H_{c,d}$ ）与剂量率限值（ $H_{c,max}$ ）中，取较小者作为本项目关注点的剂量率控制值。

(2) 关注点设置及剂量率控制值计算

评价于机房外共设置 14 个关注点位置，覆盖工作人员常驻区域及周边人员临时驻留、通过区域，其位置设置及剂量率控制值计算详见表 5.2-7、图 5.2-3（红色点位部分）。

表 5.2-7 质子治疗系统区域关注点及设计剂量率限值

序号	区域描述	HJ1198-2021 中 6.1.4 条取值条件	剂量率控制值
1	1#加速器室 西侧迷道屏蔽墙厚度 3m 处	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=400\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$10\mu\text{Sv/h}$
2	1#加速器室 西侧迷道外墙	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=400\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$10\mu\text{Sv/h}$
3	1#加速器室 西侧主屏蔽外墙	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=400\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$10\mu\text{Sv/h}$
4	1#加速器室 南侧室外	1) 公众人员居留区域, $H_c=5\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=4\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$4\mu\text{Sv/h}$
5	2#加速器室 南侧室外	1) 公众人员居留区域, $H_c=5\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=4\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$4\mu\text{Sv/h}$
6	治疗室东侧 室外	1) 公众人员居留区域, $H_c=5\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/16, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=4\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/16, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$4\mu\text{Sv/h}$
7	治疗室迷道 入口	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/4, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=100\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/4, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$10\mu\text{Sv/h}$
8	辅助设备间	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/8, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=200\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/8, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$10\mu\text{Sv/h}$
9	2#加速器室 迷道入口	1) 辐射工作人员 $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/4, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=100\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/4, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$10\mu\text{Sv/h}$
10	1#加速器室 迷道入口	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/4, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=100\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1/4, $H_c,max=10\mu\text{Sv/h}$	$10\mu\text{Sv/h}$
11	控制室	1) 辐射工作人员居留区域, $H_c=500\mu\text{Sv/周}$, 每周工作时间 20h, 居留因子 1/8, 剂量率参考控制水平 $H_c,d=25\mu\text{Sv/h}$; 2) 居留因子 1, $H_c,max=2.5\mu\text{Sv/h}$	$2.5\mu\text{Sv/h}$
12	1#加速器室 房顶	人员无法直接到达区域, 居留因子 1/20 剂量率限值 $100\mu\text{Sv/h}$ (机房正上方, 人员无法到达)	$100\mu\text{Sv/h}$
13	2#加速器室 房顶	人员无法直接到达区域, 居留因子 1/20 剂量率限值 $100\mu\text{Sv/h}$ (机房正上方, 人员无法到达)	$100\mu\text{Sv/h}$
14	治疗室屋顶	人员无法直接到达区域, 居留因子 1/20 剂量率限值 $100\mu\text{Sv/h}$ (机房正上方, 人员无法到达)	$100\mu\text{Sv/h}$

表 5.2-8 关注点剂量率计算结果（西侧加速器调试+东侧整体调试布局 1）

序号	点位位置	附近源项	屏蔽体材料及厚度	距离（m）	屏蔽材料衰减长度取值 g/cm ²	级联中子当量剂量取值 Sv/p	剂量率 μSv/h	叠加值 μSv/h	剂量率限值 μSv./h	剂量率是否达标及备注
1	1#加速器室西北侧迷道外墙	1#加速器本体	2.5m 混凝土+0.4m 钢	10.2	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	6.82E-01	1.26	10	达标
		1#加速器引出口	2.6m 混凝土+0.4m 钢	11.7	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	5.77E-01			
2	1#加速器室迷道外墙	1#加速器本体	3.0m 混凝土+0.4m 钢	8.6	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.48E-01	3.03	10	达标
		1#加速器引出口	3.0m 混凝土+0.4m 钢	9.6	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	3.99E-01			
		1#铜靶	3.4m 混凝土	9.0	混凝土 87	1.67E-15	2.38E+00			
3	1#加速器室西侧外墙物流区	1#加速器本体	6.3m 混凝土+0.4m 钢	14.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.63E-03	3.38	10	达标
		1#加速器引出口	5.7m 混凝土+0.4m 钢	14.0	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	2.44E-01			
		1#铜靶	5.3m 混凝土	10.9	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	3.14E+00			
4	1#加速器室南侧室外	1#加速器本体	4.8m 混凝土+0.4m 钢	18.5	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	7.51E-04	1.08	4	达标
		1#加速器引出口	4.8m 混凝土+0.4m 钢	17.6	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	8.41E-02			
		1#铜靶	4.8m 混凝土	14.3	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	1.13E-01			
		2#加速器本体	13.8m 混凝土+0.4m 钢	19.4	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	6.27E-14			
		2#加速器引出口	14.0m 混凝土	22.0	混凝土 116	3.02E-15	2.60E-09			

			+0.4m 钢		钢 152					
		降能器+准直器	13.8m 混凝土	18.5	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	4.09E-08			
5	2#加速器 室南侧室外	2#加速器本体	4.8m 混凝土 +0.4m 钢	18.5	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.49E-03	1.42	4	达标
		2#加速器引出口	4.8m 混凝土	17.4	混凝土 102 钢 133	2.35E-15	7.89E-02			
		降能器+准直器	4.8m 混凝土	14.3	混凝土 102	2.35E-15	1.16E+00			
		发散狭缝	4.8m 混凝土	13.0	混凝土 102	2.35E-15	2.31E-02			
		动量狭缝	4.9 m 混凝土	10.2	混凝土 116	3.02E-15	1.50E-01			
6	治疗室东 侧室外	2#铜靶	4.2m 混凝土	9.6	混凝土 116	3.02E-15	6.73E+00	0.607	4	达标
7	治疗室迷 道入口	2#铜靶	2.9m 混凝土	13.7	混凝土 116	3.02E-15	4.37E+00	4.37	10	达标
8	辅助设备 间	2#加速器本体	3.6m 混凝土 +0.4m 钢	11.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.80E-01	2.44	10	达标
		2#铜靶	3.0m 混凝土	10.0	混凝土 102 钢 133	2.35E-15	2.26E+00			
9	2#加速器 室迷道入 口	1#加速器本体	9.3m 混凝土 +0.4m 钢	16.7	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.68E-09	1.46	10	达标
		2#加速器本体	2.5m 混凝土 +0.4m 钢	14.9	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.46E+00			
10	1#加速器 室迷道入 口	1#加速器本体	2.6m 混凝土 +0.4m 钢	14.9	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.44E-01	0.244	10	达标
		2#加速器本体	6.7m 混凝土 +0.4m 钢	21.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.14E-05			
11	控制室	2#加速器本体	5.1m 混凝土 +0.4m 钢	19.7	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	9.77E-04	1.58	2.5	达标

		2#铜靶	3.1m 混凝土	18.6	混凝土 116	3.02E-15	1.58E+00			
12	1#加速器 室房顶	1#加速器本体	3.2m 混凝土 +0.4m 钢	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.97E-01	10.1	100	达标
		1#加速器引出口	3.2m 混凝土 +0.4m 钢	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	5.95E-01			
		1#铜靶	3.2m 混凝土	6.0	混凝土 87	1.67E-15	9.18E+00			
13	2#加速器 室房顶	2#加速器本体	3.2m 混凝土	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.78E+00	35.3	100	达标
		2#加速器引出口	3.2m 混凝土	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	3.57E+00			
		降能器+准直器	3.3m 混凝土	7.0	混凝土 87	1.67E-15	2.95E+01			
		发散狭缝	3.4m 混凝土	7.5	混凝土 87	1.67E-15	3.22E-01			
		动量狭缝	3.5m 混凝土	8.5	混凝土 87	1.67E-15	1.91E-01			
14	治疗室房 顶	2#铜靶	2.8m 混凝土	6.0	混凝土 87	1.67E-15	1.36E+00	1.36	100	达标

表 5.2-9 关注点剂量率计算结果（西侧加速器调试+东侧整体调试布局 2,5#关注点）

序号	点位位置	附近源项	屏蔽体材料及厚度	距离（m）	屏蔽材料衰减长度取值 g/cm ²	级联中子当量剂量取值 Sv/p	剂量率 μSv/h	叠加值 μSv/h	剂量率限值 μSv./h	剂量率是否达标及备注
5	2#加速器室南侧室外	2#加速器本体	4.8m 混凝土+0.4m 钢	18.5	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.26E-01	0.795	4	达标
		2#加速器引出口	4.8m 混凝土	17.4	混凝土 102 钢 133	2.35E-15	7.89E-02			
		降能器+准直器+发 散狭缝	4.8m 混凝土	6.6	混凝土 87	1.67E-15	5.90E-01			

表 5.2-10 关注点剂量率计算结果复核（西侧加速器调试+东侧加速器调试）

序号	点位位置	附近源项	屏蔽体材料及厚度	距离（m）	屏蔽材料衰减长度取值 g/cm ²	级联中子当量剂量取值 Sv/p	剂量率 μSv/h	叠加值 μSv/h	剂量率限值 μSv./h	剂量率是否达标及备注
1	1#加速器室西北侧迷道外墙	1#加速器本体	2.5m 混凝土+0.4m 钢	10.2	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	6.82E-01	1.26	10	达标
		1#加速器引出口	2.6m 混凝土+0.4m 钢	11.7	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	5.77E-01			
2	1#加速器室迷道外墙	1#加速器本体	3.0m 混凝土+0.4m 钢	8.6	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.48E-01	3.03	10	达标
		1#加速器引出口	3.0m 混凝土+0.4m 钢	9.6	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	3.99E-01			
		1#铜靶	3.4m 混凝土	9.0	混凝土 87	1.67E-15	2.38E+00			
3	1#加速器室西侧外墙物流区	1#加速器本体	6.3m 混凝土+0.4m 钢	14.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.63E-03	3.38	10	达标
		1#加速器引出口	5.7m 混凝土+0.4m 钢	14.0	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	2.44E-01			
		1#铜靶	5.3m 混凝土	10.9	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	3.14E+00			
4	1#加速器室南侧室外	1#加速器本体	4.8m 混凝土+0.4m 钢	18.5	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	7.51E-04	1.08	4	达标
		1#加速器引出口	4.8m 混凝土+0.4m 钢	17.6	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	8.41E-02			
		1#铜靶	4.8m 混凝土	14.3	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	9.92E-01			
		2#加速器本体	13.8m 混凝土+0.4m 钢	19.4	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.05E-14			
		2#加速器引出口	14.0m 混凝土	22.0	混凝土 116	3.02E-15	4.33E-10			

			+0.4m 钢		钢 152					
		降能器+准直器	13.8m 混凝土	18.5	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	7.15E-09			
5	2#加速器 室南侧室外	2#加速器本体	4.8m 混凝土 +0.4m 钢	18.5	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.10E-02	0.237	4	达标
		2#加速器引出口	4.8m 混凝土 +0.4m 钢	17.4	混凝土 102 钢 133	2.35E-15	1.31E-02			
		2#铜靶	4.8m 混凝土	14.3	混凝土 102	2.35E-15	2.03E-01			
6	治疗室东 侧室外	2#加速器本体	4.2m 混凝土 +0.4m 钢	23.2	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.34E-03	3.29E-02	4	达标
		2#加速器引出口	4.2m 混凝土 +0.4m 钢	22.2	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.92E-03			
		2#铜靶	4.3m 混凝土	24.3	混凝土 87	1.67E-15	2.87E-02			
7	治疗室迷 道入口	2#加速器本体	4.6m 混凝土 +0.4m 钢	18.1	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.15E-02	1.15E-02	10	达标
8	辅助设备 间	2#加速器本体	3.6m 混凝土 +0.4m 钢	11.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	3.00E-02	3.00E-02	2.5	达标
9	2#加速器 室迷道入 口	1#加速器本体	9.3m 混凝土 +0.4m 钢	16.7	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.68E-09	0.244	10	达标
		2#加速器本体	2.5m 混凝土 +0.4m 钢	14.9	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.44E-01			
10	1#加速器 室迷道入 口	1#加速器本体	2.6m 混凝土 +0.4m 钢	14.9	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.44E-01	0.244	10	达标
		2#加速器本体	6.7m 混凝土 +0.4m 钢	21.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	1.14E-05			
11	控制室	2#加速器本体	5.1m 混凝土 +0.4m 钢	19.7	混凝土 116 钢 152	3.02E-15	9.77E-04	9.77E-04	2.5	达标
12	1#加速器	1#加速器本体	3.2m 混凝土 +0.4m 钢	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.97E-01	10.1	100	达标

	室房顶	1#加速器引出口	3.2m 混凝土 +0.4m 钢	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	5.95E-01			
		1#铜靶	3.2m 混凝土	6.0	混凝土 87	1.67E-15	9.18E+00			
13	2#加速器 室房顶	2#加速器本体	3.2m 混凝土 +0.4m 钢	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	2.97E-01	10.1	100	达标
		2#加速器引出口	3.2m 混凝土 +0.4m 钢	6.0	混凝土 87 钢 114	1.67E-15	5.95E-01			
		2#铜靶	3.2m 混凝土	6.0	混凝土 87	1.67E-15	9.18E+00			
注：常规调试情况下，治疗室内无束流，不对治疗室房顶 13#关注点进行剂量率校核。										

由上表可以看到，本项目在各个模式运行情况下，屏蔽体外剂量率均低于本项目给出的剂量率限值。

3、蒙特卡罗程序模拟结果

本项目在设计过程中利用 FLUKA 对各辐射区域进行了 3D 建模，并通过 2D 和 1D 中子剂量分布来确定辐射区屏蔽内外的中子剂量率。

模拟计算结果如下：

（1）第一加速器间（西侧加速器室）屏蔽计算法分析

采用 Fluka 软件，针对第一加速器间的束流损失点 1、2，保守的假设将束流损失点 1 的损失叠加作用到损失点的 2 处，得到了第一加速器间独立运行情况下，厂房内的剂量场分布，如图 5.2-4~图 5.2-5 所示。

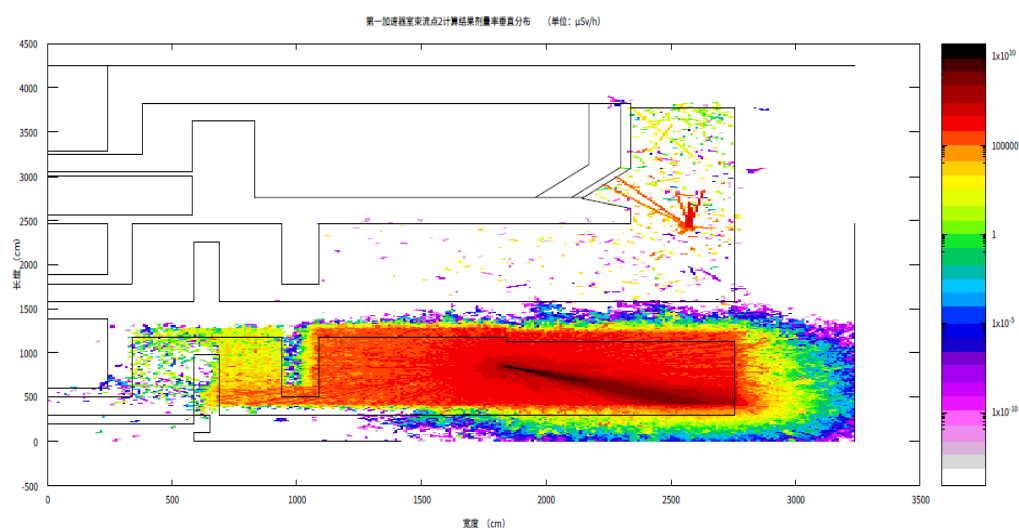


图 5.2-4 束流损失点 1、2 造成的剂量场水平分布图

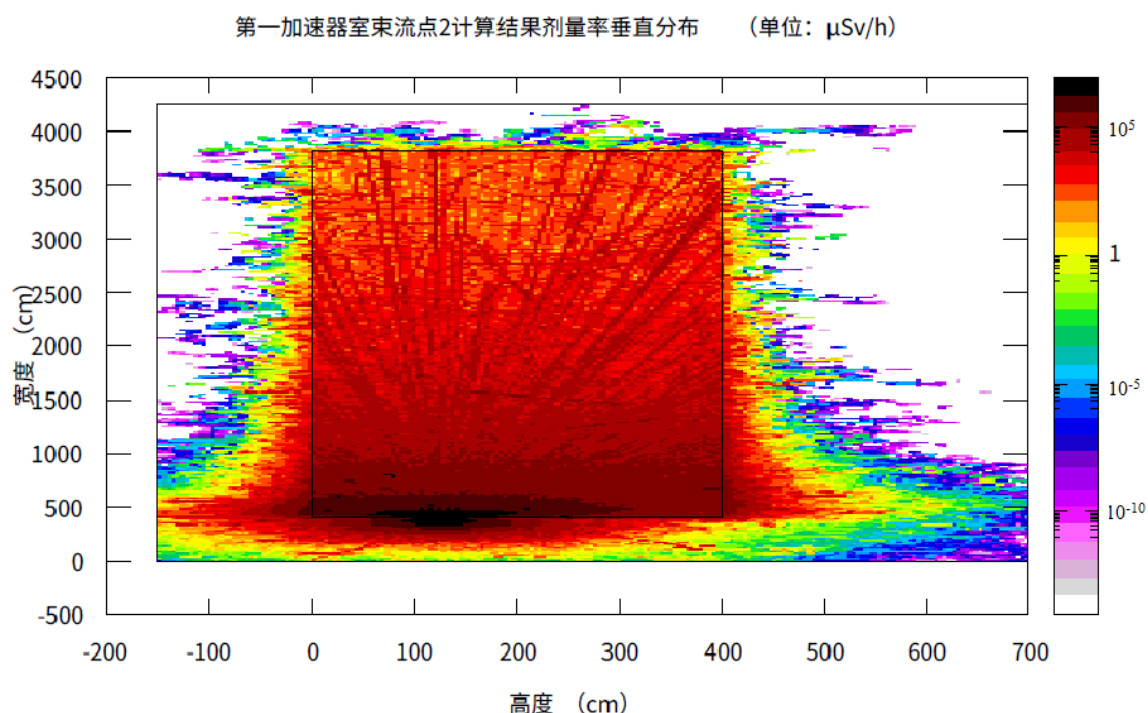


图 5.2-5 束流损失点 1、2 造成的剂量场垂直分布图

(2) 第二加速器间（东侧加速器室、束流输运线）屏蔽计算分析

经过对比分析可知，东侧加速器室独立调试的屏蔽需求可被整体调试的屏蔽需求所包络，采用 Fluka 软件，针对第二加速器间的束流损失点 4、5、6，采用束流损失点 5 的参数并叠加束流损失点 4、点 6 的损失强度，得到了第二加速器间独立运行情况下，厂房内的剂量场分布，如图 5.2-6~图 5.2-7 所示。

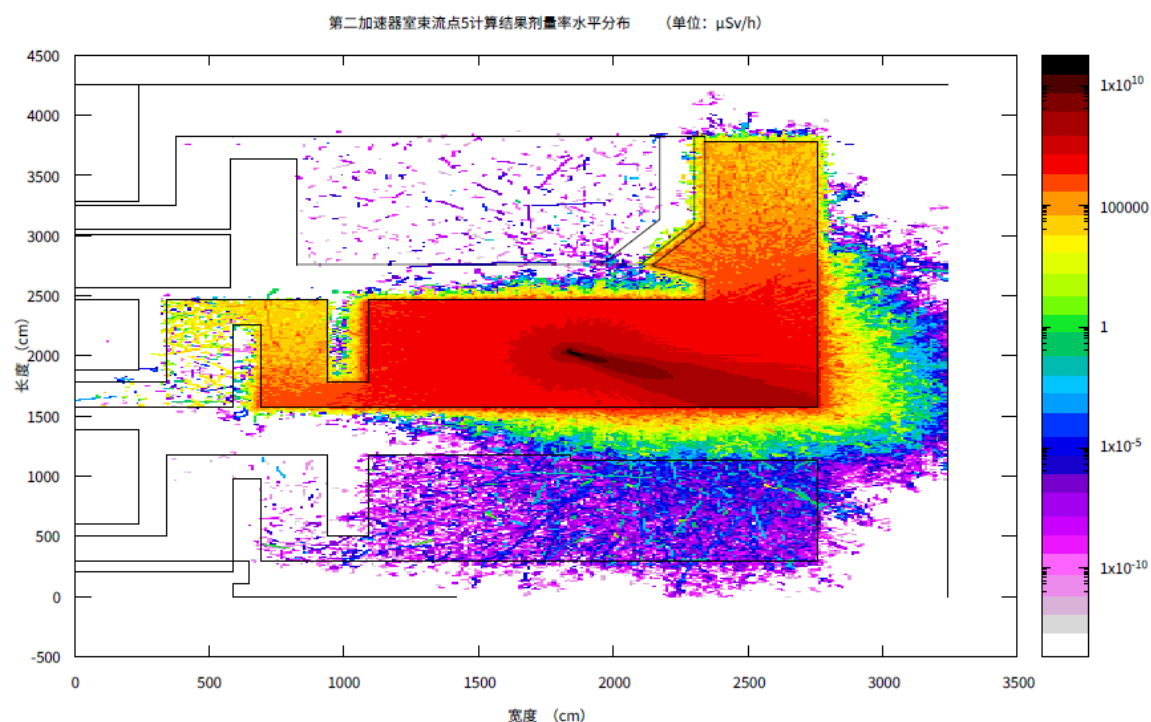


图 5.2-6 束流损失点 4、5、6 造成的剂量场水平分布图

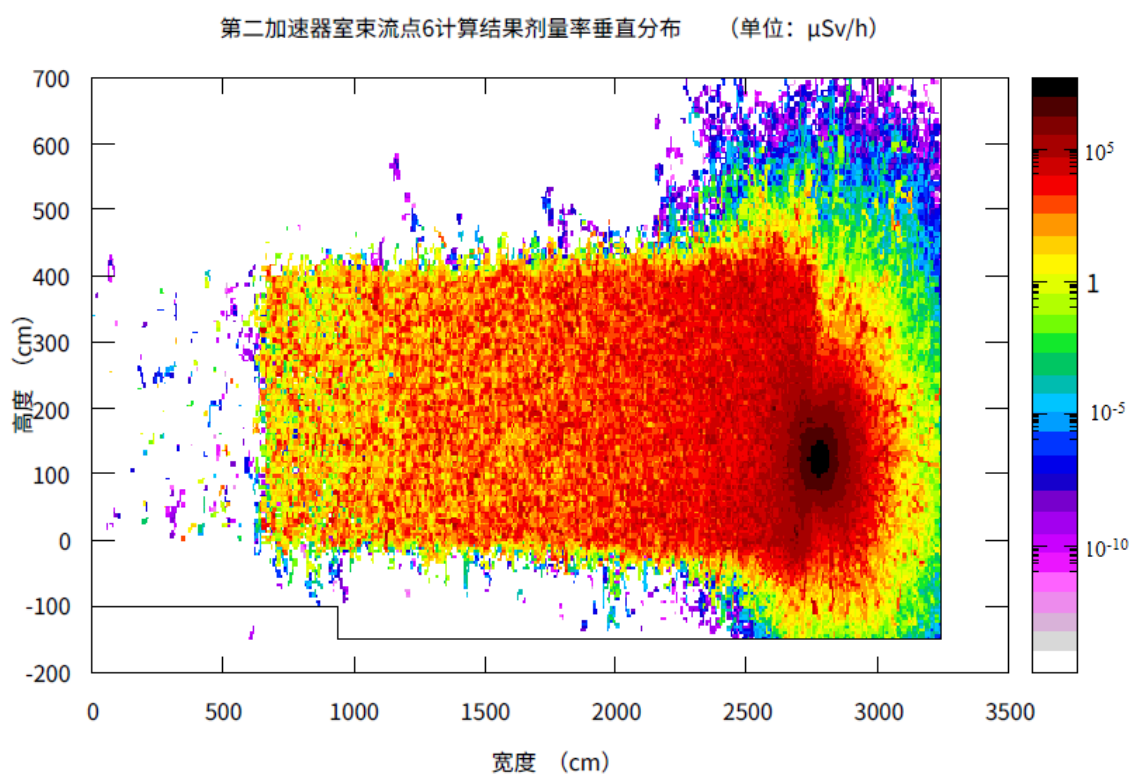


图 5.2-7 束流损失点 4、5、6 造成的剂量场垂直分布图

此外，针对整体调试的另一种布置方式，将束流损失点 9 的参数叠加，采用 Fluka 软件建立了第二加速器间的束流损失分析模型，得到了

第二加速器间独立运行情况下，厂房内的剂量场分布，如图 5.2-8 所示。

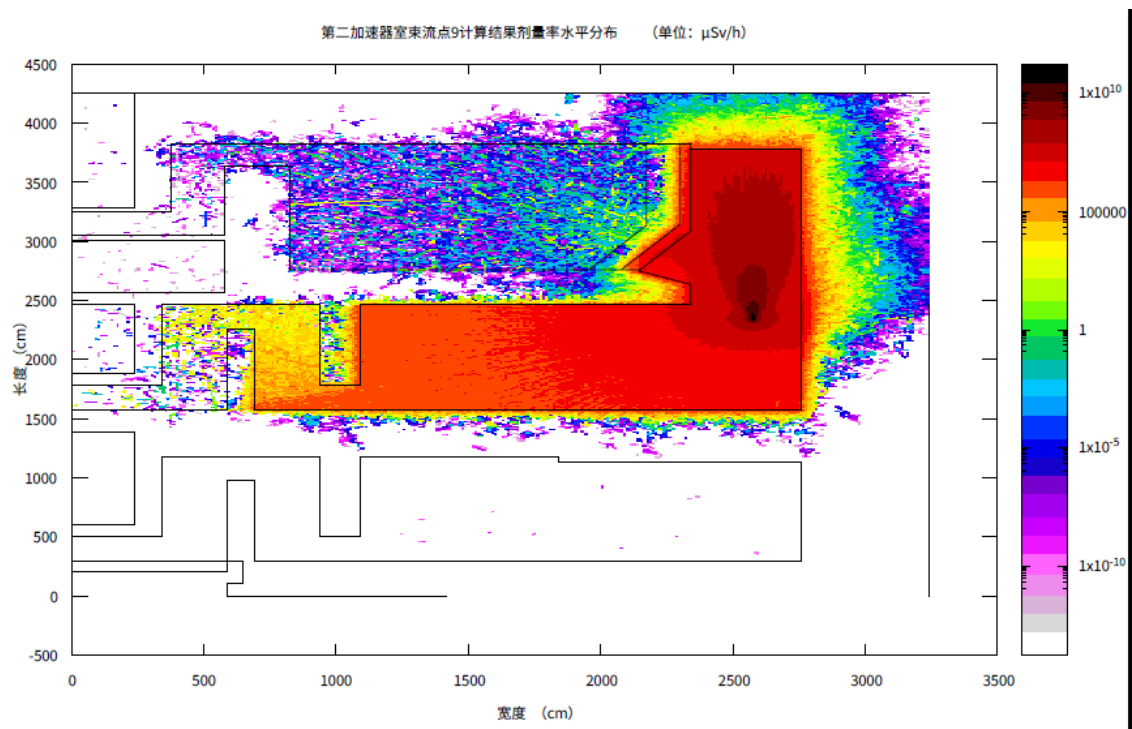
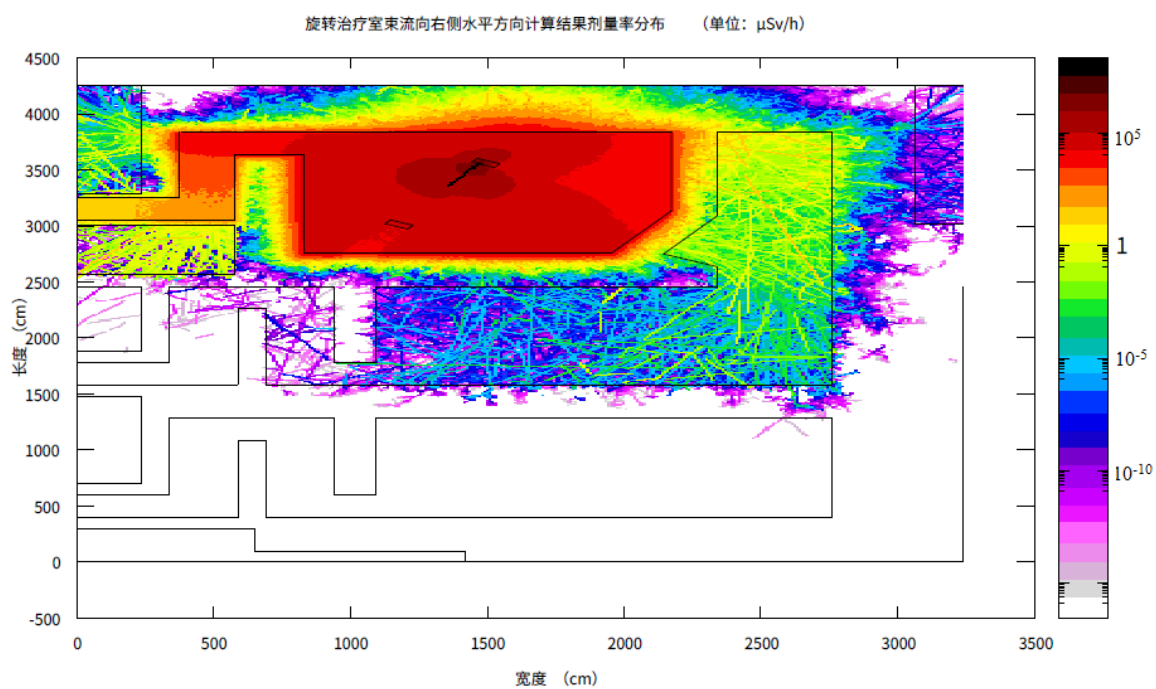
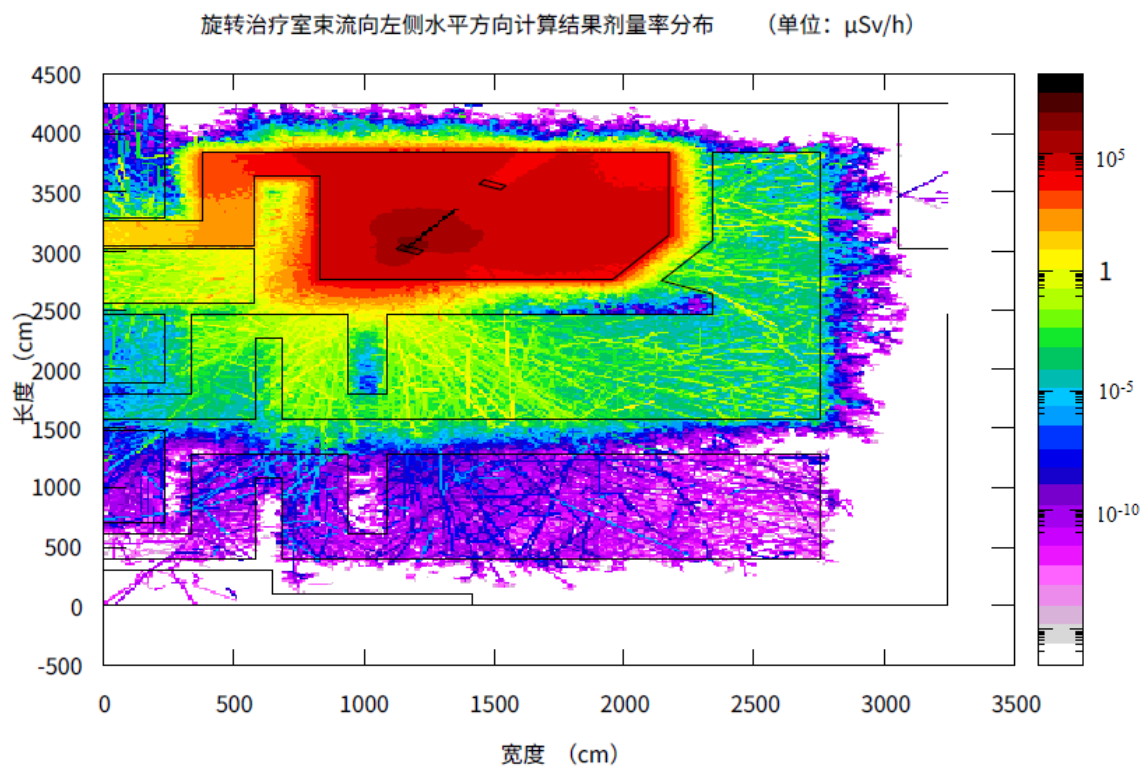


图 5.2-8 束流损失点 9 造成的剂量场水平分布图

(3) 治疗室屏蔽计算分析

采用 Fluka 软件，建立了治疗室内束流损失点 8 造成的不同方向的剂量场分布计算模型，考虑旋转机架的束流分别朝向第二加速器室、厂房外侧和屋顶三个方向照射的情况，得到了一期厂房内的剂量场分布，如图 5.2-9~图 5.2-10 所示。



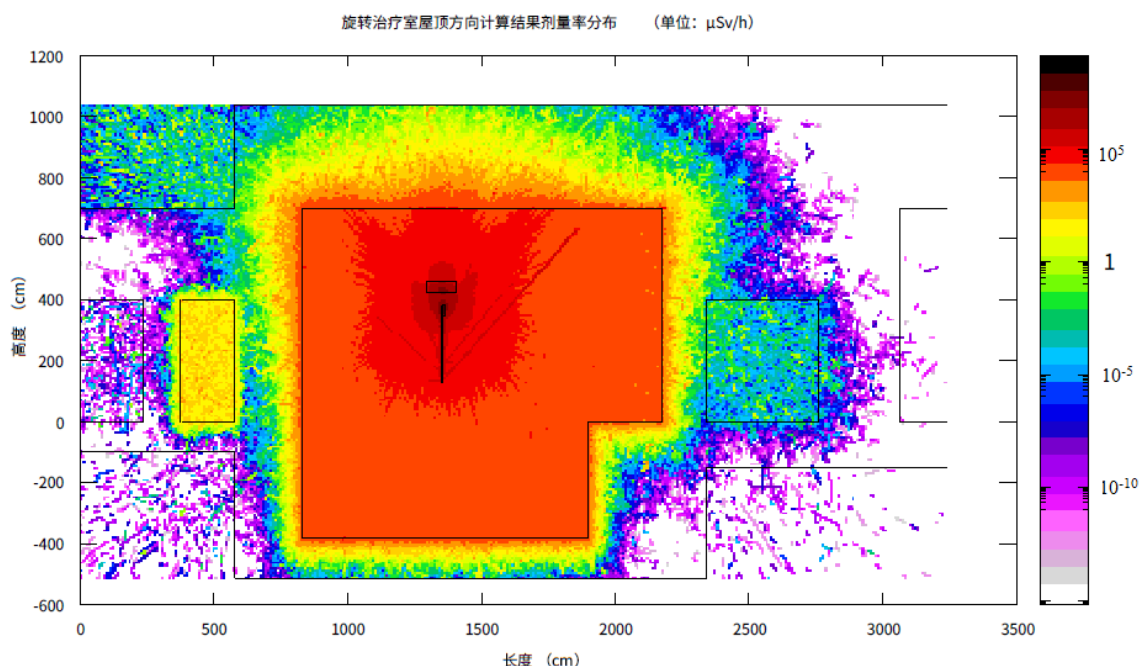


图 5.2-11 束流损失点 8 向垂直照射造成的剂量场垂直分布图

经程序结果可以得到，本项目西侧加速器调试区、东侧整体调试区的屏蔽设计均满足剂量约束值要求。

4、经验公式预测与蒙特卡罗程序模拟结果对比

为保障屏蔽体厚度校核的准确度，评价将屏蔽体外剂量率校核值与本项目屏蔽设计中采用蒙特卡罗程序模拟的屏蔽体外剂量率进行了对比，如下表所示。

表 5.2-11 屏蔽体外剂量率校核值对比分析表（μSv/h）

关注点序号	区域描述	预测剂量率	蒙特卡罗软件模拟剂量率	备注
1	1#加速器室西北侧迷道外墙	1.26	0.824	10
2	1#加速器室迷道外墙	3.03	0.093	10
3	1#加速器室西侧外墙物流区	3.38	1.704	10
4	1#加速器室南侧室外	1.08	0.712	4
5	2#加速器室南侧室外	1.42/0.795	0.130	4
6	治疗室东侧室外	0.607	0.856	4
7	治疗室迷道入口	4.37	3.820	10
8	辅助设备间	2.44	2.400	10
9	2#加速器室迷道入口	1.46	0.250	10
10	1#加速器室迷道入口	0.244	0.083	100
11	控制室	1.58	1.381	2.5
12	1#加速器室房顶	10.1	0.014	100
13	2#加速器室房顶	35.3	0.695	100
14	治疗室房顶	1.36	0.76	100

由上表可见，评价预测屏蔽体外剂量率与蒙特卡罗软件模拟数值较

为接近，评价预测值基本偏于保守，预测数值较为可信。

5.2.1.2 迷道口剂量率校核

本项目设置有 3 个迷道，分别为 1#加速器室出口迷道、1#加速器室出口迷道，旋转治疗室出口迷道。

项目迷道对剂量率的衰减采用 NCRP-144 号报告推荐的 Tesch 在 1982 年给出的计算公式估算，计算公式见 5.2 章节“迷道计算”部分，剂量率计算不考虑迷道门的防护效果。迷道出口处剂量率具体校核结果如下：

表 5.2-12 迷道对剂量率的衰减计算表

迷道位置	束流损失点	迷道口处	第一弯折			第二弯折			第三弯折			第四弯折			第五弯折			总剂量率值 ($\mu\text{Sv/h}$)
		H0 ($\mu\text{Sv/h}$)	r0 (m)	r1 (m)	H1 ($\mu\text{Sv/h}$)	A2	r2	H2 ($\mu\text{Sv/h}$)	A3	r3	H3 ($\mu\text{Sv/h}$)	A4	r4	H4 ($\mu\text{Sv/h}$)	A5	r5	H5 ($\mu\text{Sv/h}$)	
加速器大厅 1	损失点 1	19.41	6.94	8.90	23.61	10.00	6.80	0.40	8.00	3.50	0.02	10.00	6.80	3.7769E-04	8.00	3.13	2.4976E-05	3.5934E-04
	损失点 2	116.09	10.16	12.92	143.58	10.00	6.80	2.43	8.00	3.50	0.14	10.00	6.80	2.2973E-03	8.00	3.13	1.5191E-04	
	损失点 3	116.09	14.28	16.57	172.44	10.00	6.80	2.91	8.00	3.50	0.16	10.00	6.80	2.7591E-03	8.00	3.13	1.8245E-04	
加速器大厅 2	损失点 4	19.41	6.94	8.90	23.61	10.00	6.80	0.40	8.00	3.50	0.02	10.00	6.80	3.7769E-04	8.00	3.13	2.4976E-05	3.5934E-04
	损失点 5	116.09	10.16	12.92	143.58	10.00	6.80	2.43	8.00	3.50	0.14	10.00	6.80	2.2973E-03	8.00	3.13	1.5191E-04	
	损失点 6	116.09	14.28	16.57	172.44	10.00	6.80	2.91	8.00	3.50	0.16	10.00	6.80	2.7591E-03	8.00	3.13	1.8245E-04	
旋转治疗室	损失点 7	19.41	6.33	9.47	17.35	8.00	5.80	0.36	8.00	3.40	0.02							2.1288E-02

由上表可以得知，经迷道散射后的剂量远小于透射剂量，叠加后对迷道口剂量率贡献绩效，各迷道口剂量率满足本项目给出的剂量率约束值。

5.2.1.3 天空反散射

参照《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》GBZ/T201.5-2015 中 4.2.2a) 款要求，本项目对质子治疗系统的顶部采取了剂量率限值控制，计算结果表明现有屏蔽设计对机房顶的屏蔽效果满足规范要求，根据 4.2.2b) 款要求，不再考虑天空散射和侧散射辐射对机房外地面附近和楼层中公众的照射。

5.2.1.4 配电、冷却水、弱电等穿越工程对屏蔽体的影响分析

根据 GBZ/T201.1-2007《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》要求，本项目质子治疗系统内通风、配电、冷却水、弱电管线均不直穿质子治疗系统屏蔽墙体或屋顶屏蔽层。

本项目屏蔽体上通风管线、水管等开孔对屏蔽的减弱，均根据初步的辐射场计算结果，对开孔位置在水平方向和高度方向上统一进行布置，避开高剂量区域，并对可能导致屏蔽弱化起主要贡献的通风管线进行精确建模，分析通风管线对辐射屏蔽的影响。

本项目送风管线通过迷宫引入，排风管布置于 2.7m 以上的标高并避开水平方向的束流集中损失照射野，风管的截面尺寸为 50cm×40cm，通风管线的详细布置如下图所示。

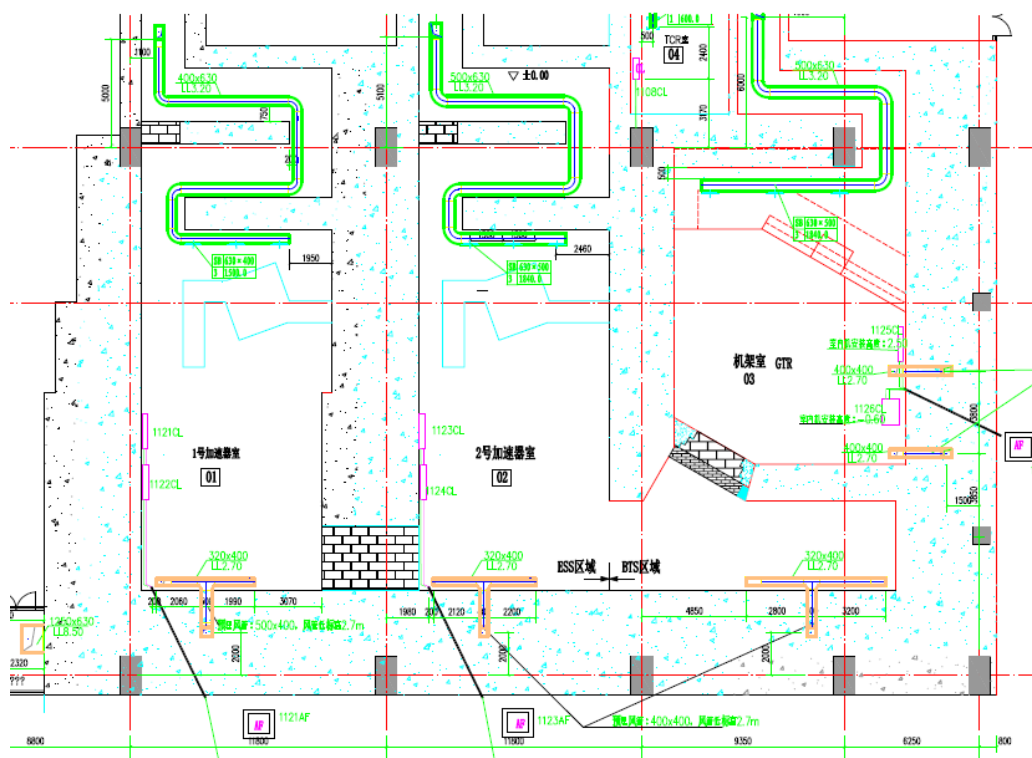


图 5.2-12 通风管线穿越屏蔽墙体示意图（水平布置图）

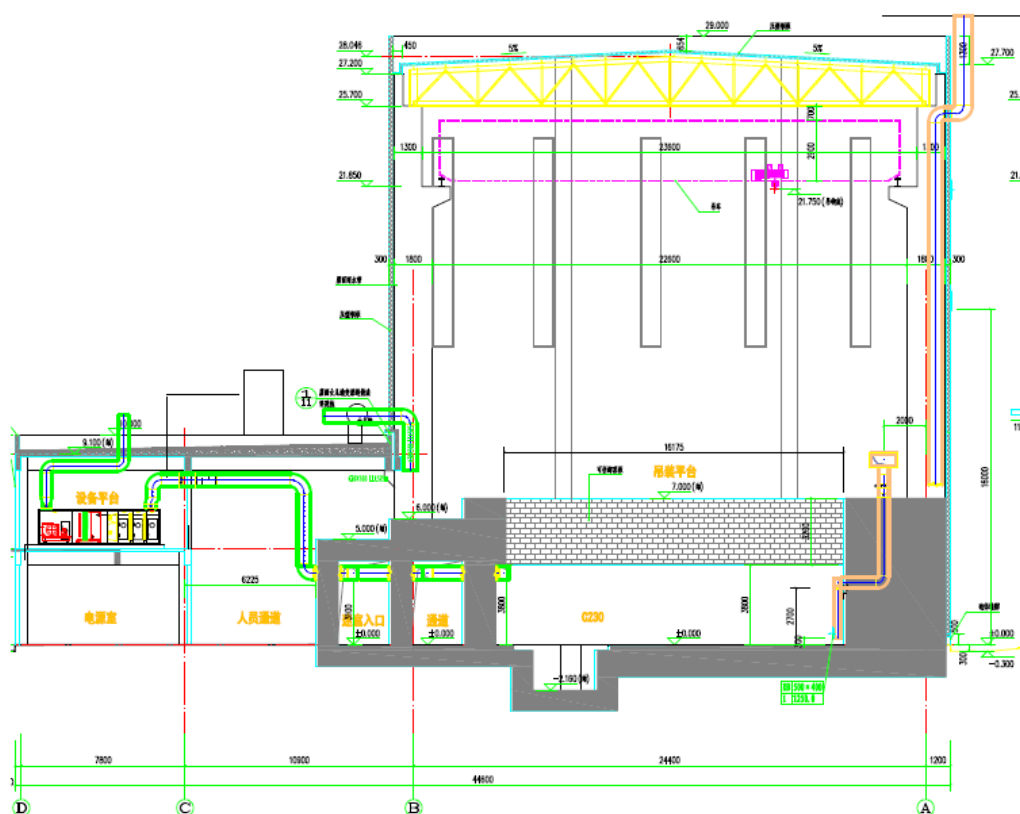


图 5.2-13 通风管线穿越屏蔽墙体示意图（垂直布置图）

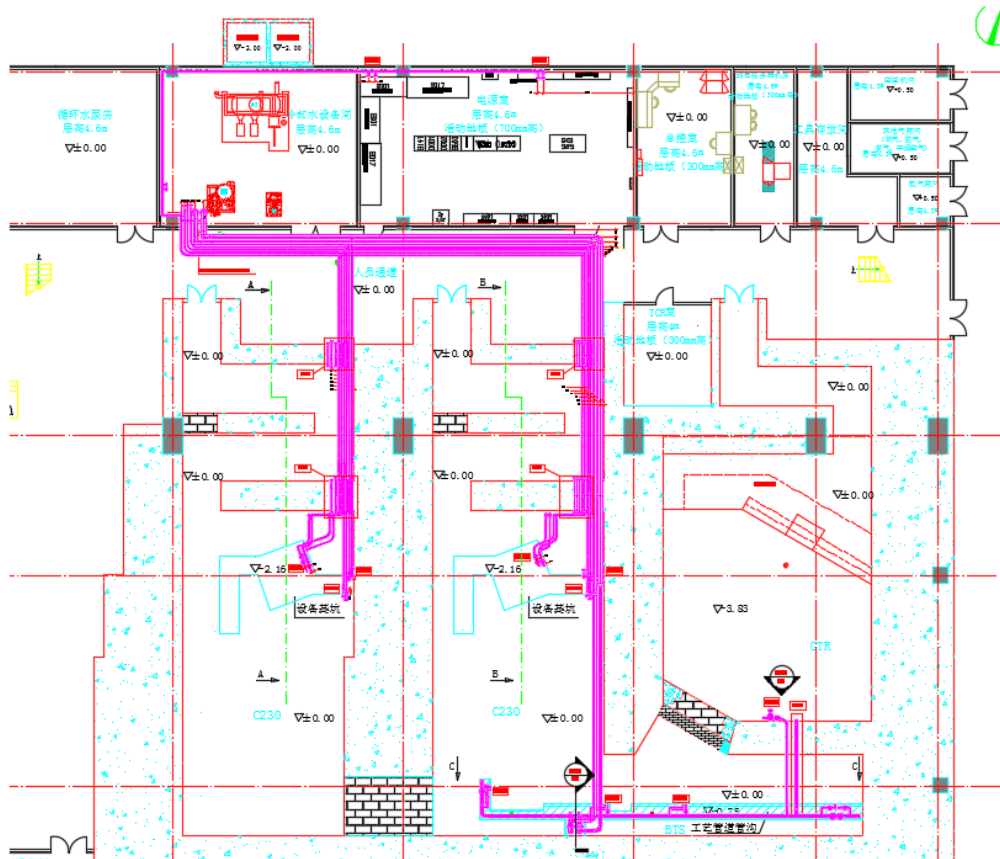


图 5.2-14 冷却水管线穿越屏蔽墙体示意图（平面布置图）

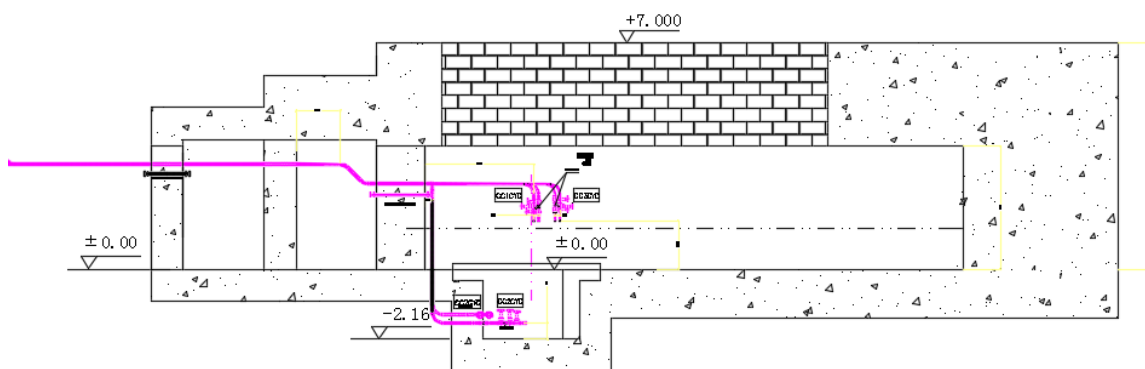


图 5.2-15 冷却水管线穿越屏蔽墙体示意图（垂直布置图）

项目电缆采用折弯形式穿墙布置；冷却水管采用迷道处穿墙后二次浇注屏蔽补偿方式，确保局部的屏蔽效果满足设计目标。

屏蔽体内的中子、 γ 射线经管线多次折射后才能穿出管线，感生放射性气体通过通排风系统造成的负压无法由管线穿越处泄露。本项目管线穿越工程均满足相应规范要求，不会降低屏蔽墙体及屋顶屏蔽层的屏蔽效果。

5.2.2 质子加速器系统感生放射性环境辐射影响分析

5.2.2.1 质子加速器感生放射性计算方法

1、空气活化排放及所致剂量的计算方法

空气活化后排放到环境中会对场址外的公众产生照射。在空气由排风口输运到评估点的过程中，一方面，空气中的放射性核素会自然衰变，另一方面，扩散过程也使得活化空气的浓度进一步降低。在评估其辐射影响时，需要结合气象、建筑物布局、地形地貌等条件，采用恰当的扩散模型，分别计算场址边界外各处公众可能接受到的最大年有效剂量，使其满足法律法规中对放射性气体排放所导致的临界人群的年有效剂量限值。

在本项目计算时，采用《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ2.2-2018)推荐大气模拟预测软件计算。结合气象、地形布局、活化空气对人体所致剂量转换公式等进行计算分析。

活化空气对人体产生的剂量及其来源包括：内照射剂量（可分为食入和吸入）、外照射剂量（可分为空气浸没外照射、地表沉积外照射）。

①空气浸没外照射剂量

对全年的空气浸没外照射有效剂量 D_{imm} (Sv/a)可以采用下式进行计算：

$$D_{imm} = 3.15 \times 10^7 \bar{X} C_{imm} \quad (5.12)$$

式中， $\bar{X}(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3})$ 是空气中核素的年平均浓度， $C_{imm}(\frac{\text{Sv}\cdot\text{m}^3}{\text{s}\cdot\text{Bq}})$ 是空气浸没外照射的活度-剂量转换因子。

②地表沉积外照射剂量

对放射性核素的地表沉积外照射剂量 D_{surf} (Sv/a)可以用下式计算：

$$D_{surf} = 3.15 \times 10^7 X_{surf} C_{surf} \quad (5.13)$$

式中， $C_{surf}(\frac{Sv \cdot m^2}{s \cdot Bq})$ 是地表沉积外照射的活度-剂量转换因子， $X_{surf}(\frac{Bq}{m^2})$ 是地表沉积的放射性核素浓度，它的计算可以采用下面公式：

$$X_{surf} = 3.15 \times 10^7 \frac{w_d + w_s}{\lambda_T} (1 - e^{-\lambda_T t}) \quad (5.14)$$

其中， w_d 、 w_s 分别为干沉积速率和湿沉积速率（2.28E-5），单位为 $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ； λ_T 是地表核素的有效衰变常数（0.01），单位为每年， a^{-1} ； $\lambda_T = \lambda + \lambda_s$ ， λ 是核素的物理衰变常数（1.51E-7）， λ_s 是环境衰变常数（0.01），其值与再悬浮、降水冲洗和核素向地下迁移等过程有关。其值确定比较困难，一般采用下面公式估算：

$$\lambda_s = \begin{cases} 1 \times 10^{-1} a^{-1} (\text{对于碘}) \\ 1 \times 10^{-2} a^{-1} (\text{对其它粒子}) \end{cases} \quad (5.15)$$

w_d 可以由下式进行计算：

$$w_d = V_d X(x, y, 0) \quad (5.16)$$

式中， $X(x, y, 0)(\frac{Bq}{m^3})$ 是在地面的核素空气浓度， $V_d(m/s)$ 是干沉积速率。本项目计算中，不同粒子态核素的干沉积速率按表 5.2-13 进行计算。

表 5.2-13 不同粒子态核素的干沉积速率

气载排出物	气溶胶	氟化水
$v_d(m/s)$	0.001	0.004

湿沉积过程是指由云、雾和降水引起的污染物被收入水滴或随水滴下落而被清除的过程。通常以冲洗系数 $\Lambda(s^{-1})$ 来描述，与降雨率 $I(mm/h)$ 有以下关系：

$$\Lambda = \alpha I^b \quad (5.17)$$

α, b 为经验系数，计算中， α 取值 8E-05， b 取值 0.8。

知道冲洗系数 Λ 后，湿沉积速率可由公式(5.18)估算：

$$w_s = \Lambda \cdot L \cdot X(x, y, 0) \quad (5.18)$$

式中， L 是混合层的高度，可以由公式(5.19)计算：

当大气稳定度为 A、B、C、D 时，

$$L = a_s \frac{u_{10}}{f} \quad (5.19)$$

当大气稳定度为 E、F 时，

$$L = b_s \sqrt{u_{10}/f} \quad (5.20)$$

式中， u_{10} 是地面 10m 处的风速，m/s，大于 6m/s 时取为 6m/s； a_s 、 b_s 是混合层系数， f 是地转参数： $f = 2\Omega \sin\varphi$ ， Ω 为地转角速度，取为 $7.29 \times 10^{-5} \text{rad/s}$ ； φ 是地理纬度。

③吸入和食入内照射剂量

对于吸入含有放射性核素的空气所致年待积有效剂量 $D_{inh}(\text{Sv/a})$ 可由下式进行估算：

$$D_{inh} = \bar{X} B_r C_{inh} \quad (5.21)$$

$\bar{X}$ 为吸入的空气中核素年平均浓度， $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ； C_{inh} 是吸入待积有效剂量转换因子， Sv/Bq ； B_r 为年呼吸的空气体积， m^3/a 。

公众成员 1 年内经饮用水或食物途径摄入某种放射性核素后，在其一生中导致待积有效剂量 D_{ina}

$$D_{inh} = 365 M_a C_{ina}$$

M_a —公众成员每天食入的核素量 (Bq/d)；

C_{ina} —食入待积有效剂量转换因子 (Sv/Bq)；

365—1 年内的天数。

④本项目剂量转换因子的取值

由于国标 GB 18871-2002 没有给出空气浸没剂量转换因子和地面沉积剂量转换因子。因此，本项目计算采用的空气各照射途径的剂量转换因子，分别取自 ICRP68 报告和 fgr12 报告（美国联邦指导报告第 12 份报告）。其中，ICRP68 给出了不同核素内照射（吸入和食入）剂量转换因子的汇总，其值与 GB 8871-2002 给出的相差不大；fgr12 给出了分别

按 ICRP26 和 ICRP60 的组织权重因子计算得到的不同核素各种外照射途径（空气浸没、地面及不同厚度土壤照射、水浸没）的剂量转换因子。本项目计算中采用的空气各照射途径的剂量转换因子见表 5.2-14。其中，对于与肺吸收类别有关的吸入剂量转换因子，当肺吸收类别不能确定时，从保守角度出发，取最大的吸入剂量转换因子。

表 5.2-14 各核素的剂量转换因子

质量数	元素符号	原子序数	工作人员吸入单位核素的待积有效剂量 (ICRP68) (Sv/Bq)	公众成人吸入单位核素的待积有效剂量 (ICRP68) (Sv/Bq)	公众儿童吸入单位核素的待积有效剂量 (ICRP68) (Sv/Bq)	空气浸没剂量转换因子 (fgr12 (按 ICRP60 计算) (Sv.s ⁻¹) /(Bq.m ⁻³))	地面沉积剂量转换因子 (fgr12 (按 ICRP60 计算) (Sv.s ⁻¹) /(Bq.m ⁻²))
3	H	1	1.8E-11	1.8E-11	6.4E-11	3.31E-19	/
7	Be	4	5.2E-11	5.5E-11	2.8E-10	2.19E-15	4.72E-17
11	C	6	2.2E-12	2.2E-12	1.8E-11	4.56E-14	1.01E-16
14	C	6	6.5E-12	6.2E-12	1.9E-11	2.60E-18	1.27E-20
13	N	7	/	/	/	4.57E-14	1.03E-15
15	O	8	/	/	/	4.59E-14	1.07E-15
35	S	16	1.3E-09	1.1E-10	9.4E-10	3.11E-18	1.33E-20
38	Cl	17	7.3E-11	4.5E-11	4.7E-10	7.58E-14	1.43E-15
39	Cl	17	7.6E-11	4.6E-11	4.3E-10	6.90E-14	1.41E-15
37	Ar	18	/	/	/	1.27E-19	/
41	Ar	18	/	/	/	6.14E-14	1.22E-15

2、冷却水活化

质子治疗系统中部分设备需要使用冷却水，本项目设有 1 个闭路循环的水冷系统对质子治疗机房内设备进行冷却。

加速器设备冷却水中的放射性核素主要来自于高能中子引起水中 O-16 的散裂反应而产生的核素，主要核素列于表 5.2-15 中。

表 5.2-15 O-16 的散裂产物

核素	半衰期	反应截面* (mb)
C-10	19 s	很小
O-14	71 s	5
O-15	2.03 min	60
N-13	10 min	10
C-11	20.39 min	20
Be-7	53.28 d	10
H-3	12.33 年	30

对典型高能加速器中子能谱范围产生的放射性核素的实验研究表明：

- (1) 辐照后 1~5 小时，水中主要短寿命放射性核素是 C-11；

(2) 半衰期长于 10 小时左右的唯一长寿命 γ 射线发射体是 Be-7;

(3) 在几种不同条件下受辐照的水样中, 氚和 Be-7 的饱和放射性之比值变化于 1.3~5.8 之间。

除 Be-7 和 H-3 外, 其余核素都是短寿命的核素, 这些短寿命核素在排放时早已衰变殆尽, 不会对环境带来影响, 对环境有影响的核素只有 Be-7 和 H-3。

3、加速器结构部件的感生放射性

加速器结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。质子加速器产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位, 如束流管、偏转磁铁等, 其主要材料为铁、不锈钢、铜、铝和铝合金以及各种烃类。相关实验研究表明, 加速器关机后所被活化部件中的核素主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

本项目建成后, 因销售需求, 需定期 (4 次/年) 打开现有区域屏蔽屋顶, 以对调试后的质子治疗系统进行打包外运销售。

在此情况下, 建设单位制定相应管理制度, 对拟销售的质子治疗系统区域进行停机冷却处理。当工作人员因工作需要进入辐射区时, 至少停机冷却 24 个小时后, 方可进入。冷却期后, 委托有资质单位, 对屏蔽体混凝土构件表面、质子治疗系统各子系统部件活化水平进行实地检测。辐射检测值超出豁免水平时, 应采取时间防护 (延后进入)、个人防护 (穿戴个人防护用品) 等措施后, 再进入辐射区开展打包、外运、销售等作业。

5.2.2.2 质子加速器系统致空气的感生放射性

1、空气的放射性核素浓度和排放量

目前, 国内尚无成熟运行的质子治疗系统, 在前期工作中, 为保守预测加速器运行所带来的空气、冷却水、部件等活化的影响, 采用

FLUKA 软件设置高于本项目的运行时间及束流损失源强进行活化模拟。

评价结合经验公式进行修正的方式，以获得与本项目实际运行较为一致的活化源项。

(1) 软件模拟条件及结果

表 5.2-16 给出了计算中采用的各辐射区通风系统参数。

表 5.2-16 计算中采用的各辐射区通风系统参数

辐射区	空气体积 (m ³)	运行时通风频率 (次/h)	停机后通风频率 (次/h)	设置通风排风机数量及功率
加速器调试区	628.96	1	8	1 台 7.5kW 送风机, 1 台 3kW 排风机
整体调试区	1928	1	6	联通区域, 合用 1 台 11kW 送风机, 1 台 4kW 排风机

根据加速器运行时, 房间内的换气次数为 1 次/h 新风, 停机后排风 8 次/h, 治疗室内为 6 次/h。模拟计算时为保守估计按照加速器运行 6 天停 1 天, 认为在停机的一天中加速器大厅以及终端治疗室内被活化的空气完全被新的空气替换。加速器回旋大厅、能量选择系统及输运线隧道空气总体积为 628.96m³, 终端治疗室总体积为 1928 m³。依据《粒子加速器辐射防护规定》(GB5172-1985)(附录 C: 表 C3, 表 C4, 表 C5 和表 C10)。只有当空气中产生的核素值低于规定的导出空气浓度才允许排向大气。

空气计算模型为束流损失在回旋加速器内的 D 盒上, 对周围空气产生的活化。图 5.2-16 给出了其计算模型, D 盒空气计算模型中空气尺寸为: 5m×5m×7.5m, 其余模型空气尺寸为: 2m×2m×2m,。当加速器运行 6 天后, 加速器系统中回旋大厅、ESS 能量选择系统以及治疗室内空气中产生的放射性核素活度、各部件总的放射性活度如下。

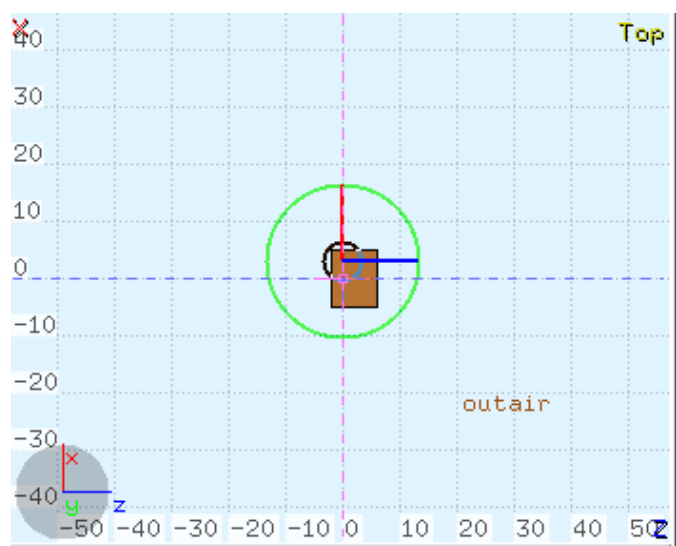


图 5.2-16 空气感生放射性计算模型

表 5.2-17 加速器运行 6 天后回旋大厅 D 盒附近空气中产生的感生放射性核素

核素	^3H	^7Be	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar
运行 6 天产生量 Bq	4.62E4	1.14E6	1.94E7	4.76E7	2.46E7	7.1E4
比浓度 Bq/m ³	73.45	1378.54	30844.57	75680.49	39112.19	112.88
导出空气浓度 DAC, Bq/m ³	2E+10	3E+5	1E+7	7E+4	7E+4	2E+6

表 5.2-17 加速器运行 6 天后 ESS 系统空气中产生的感生放射性核素

核素	^3H	^7Be	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar
运行 6 天产生量 Bq	3.12E4	1.24E6	1.35E7	3.82E7	1.80E7	3.62E6
比浓度 Bq/m ³	49.61	1971.51	21464	60735.18	28618.67	5755.53
导出空气浓度 DAC, Bq/m ³	2E+10	3E+5	1E+7	7E+4	7E+4	2E+6

表 5.2-18 加速器运行 6 天后治疗室空气中产生的感生放射性核素

核素	^3H	^7Be	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{41}Ar
运行 6 天产生量 Bq	7.02E2	1.58E4	2.95E5	7.5E5	3.73E5	2.25E2
比浓度 Bq/m ³	0.36	8.20	153.01	389	193.46	0.12
导出空气浓度 DAC, Bq/m ³	2E+10	3E+5	1E+7	7E+4	7E+4	2E+6

表 5.2-19 各部件附件空气放射性总活度

位置	空气放射性总活度 (Bq)
回旋加速器大厅 D 盒附近	1.21E+08
回旋加速器大厅束流引出口附近	9.2E+07
能量选择系统附近	9.20E+07
治疗舱喷嘴黄铜附近	4.299E+09

(2) 源项修正

本项目实际运行过程中，单台加速器每天运行 4 小时，一周运行 5 天，每台 12 周（240h/台），一年 48 周（960h/a）。束流损失以系统整体调试状态数值进行考虑（额定流强 750nA，引出流强 300nA）。

根据 3.3.2.1 章节，对质子加速器感生放射性活度的累积规律可以得知：①活化活度、饱和活度与入射粒子通量成正比；②加速器运行该放射性核素的 1 个半衰期，饱和程度达到 50%；运行 5 个半衰期，饱和程度达到 97%；饱和程度达到 99%，只需 6.5 个半衰期；达到 99.9%，只需 10 个半衰期。

通过修正，可以得到质子治疗系统运行期间，回旋加速器大厅和治疗室内感生放射性气体的总活度，具体见下表。

表 5.2-20 加速器室和治疗室内空气感生放射性核素的总量，Bq

核素	加速器调试区	整体调试区	周排放量 Bq/W	年排放量 Bq/a
³ H	2.96E+04	5.00E+04	7.96E+04	3.82E+06
⁷ Be	7.30E+05	1.53E+06	2.26E+06	1.08E+08
⁴¹ Ar	1.24E+07	2.12E+07	3.36E+07	1.61E+09
¹¹ C	3.05E+07	5.54E+07	8.59E+07	4.12E+09
¹³ N	1.57E+07	2.75E+07	4.32E+07	2.07E+09
¹⁵ O	4.54E+04	2.36E+06	2.41E+06	1.15E+08
合计	5.94E+07	1.08E+08	1.67E+08	8.04E+09

通过修正，可以得到质子治疗系统运行 5 天、停机 1 天后工作区域内空气感生放射性核素的活度浓度，具体见下表。

表 5.2-21 运行 5 天停机 1 天后空气感生放射性核素的活度浓度，Bq/m³

核素	加速器调试区	整体调试区	导出空气浓度 DAC
³ H	4.70E+01	7.95E+01	2.00E+09
⁷ Be	1.15E+03	2.41E+03	3.00E+04
⁴¹ Ar	2.23E+00	3.82E+00	2.00E+05
¹¹ C	2.32E-17	4.23E-17	1.00E+06
¹³ N	1.12E-39	1.96E-39	7.00E+03
¹⁵ O	1.31E-215	6.81E-214	7.00E+03

注：DAC 为职业照射放射性核素的导出空气浓度，是放射性核素在空气中的浓度限值。其值取自《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-1985）附录 C 中表 C3，表 C4，表 C5 和表 C10 并结合该规范的工作人员剂量率限值（50mSv/a）与本项目的工作人员剂量率控制值（5mSv/a）进行了换算。

考虑到本项目组装调试状态下，存在出束 1~2 小时后，辐射工作人员拟进入操作的情况，通过修正，可以得到质子治疗系统运行 2 小时、停机不同时间后工作区域内空气感生放射性核素的活度浓度。（以活度浓度较高的整体调试区为预测范例，为保守计，通风速率以 1 次/小时计算）

表 5.2-22 运行 2 小时后不同停机时间空气感生放射性核素的活度浓度，Bq/m³

核素	整体调试区	停机 0min	停机 5min	停机 15min	停机 30min	导出空气浓度 DAC
³ H	2.92E+00	2.92E+00	2.92E+00	2.92E+00	2.92E+00	2.00E+09
⁷ Be	9.01E+01	9.01E+01	9.01E+01	9.01E+01	9.01E+01	3.00E+04
⁴¹ Ar	6.58E+03	6.58E+03	6.40E+03	5.99E+03	5.48E+03	2.00E+05
¹¹ C	3.18E+04	3.18E+04	2.68E+04	1.91E+04	1.14E+04	1.00E+06
¹³ N	1.61E+04	1.61E+04	1.14E+04	5.70E+03	2.01E+03	7.00E+03
¹⁵ O	1.38E+03	1.38E+03	2.44E+02	7.61E+00	4.23E-02	7.00E+03
合计	5.60E+04	5.60E+04	4.49E+04	3.09E+04	1.90E+04	

由上述表格可见，质子治疗系统停机 1 天后，回旋加速器大厅和治疗室内的空气感生放射性核素的活度浓度均低于各自的导出空气浓度值，对进入人员的影响是可接受的。

组装调试状态下，停机 30min 后进入，室内的空气感生放射性核素的活度浓度均低于各自的导出空气浓度值，对进入人员的影响是可接受的。

2、空气活化对公众产生的剂量

为保守计，本次评价不考虑活化空气中核素在扩散过程中的衰变影响。使用 EIAProA2018 大气环境影响预测软件对污染源计算并进行分析。

活化空气中的部分核素半衰期较短（¹¹C、¹³N、¹⁵O 半衰期均<1h），随着时间的推移，核素浓度快速下降，本项目活化空气中核素主要考虑 ³H、⁷Be、⁴¹Ar，排放量采用表 5.2-20 预测数据，具体如下。

表 5.2-23 活化核素源项

核素	年均排放率 Bq/a
³ H	3.82E+06

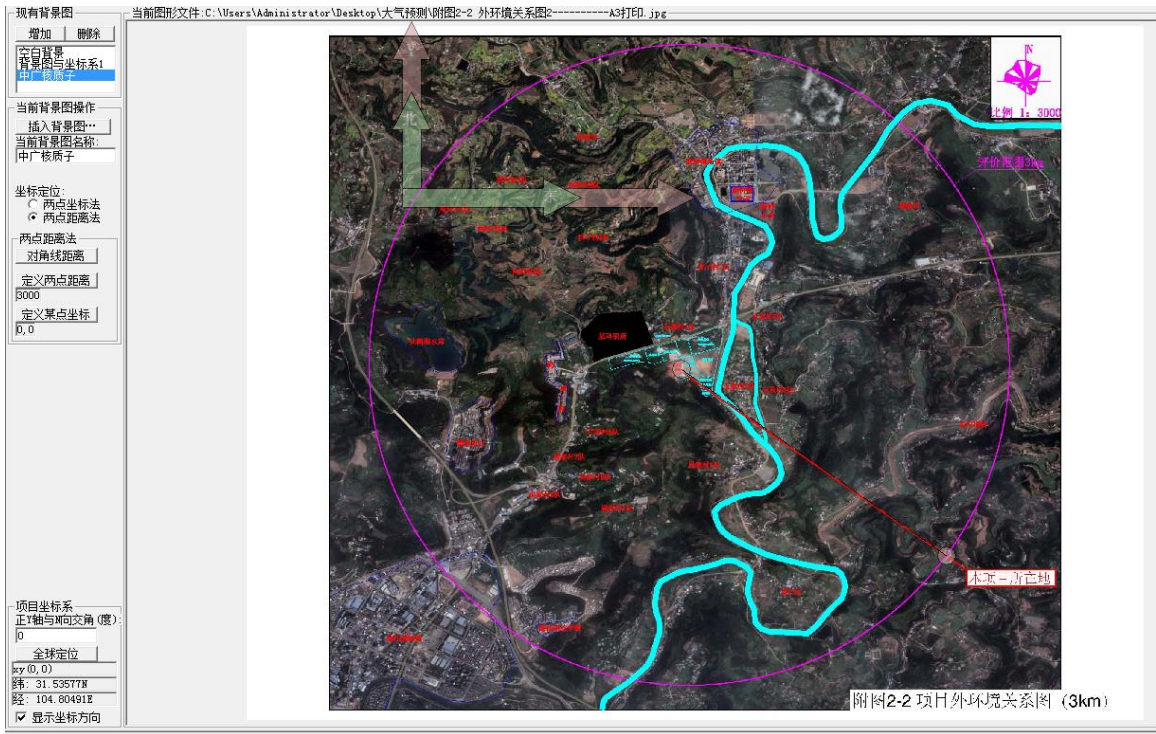
^7Be	1.08E+08
^{41}Ar	1.61E+09
合计	8.04E+09

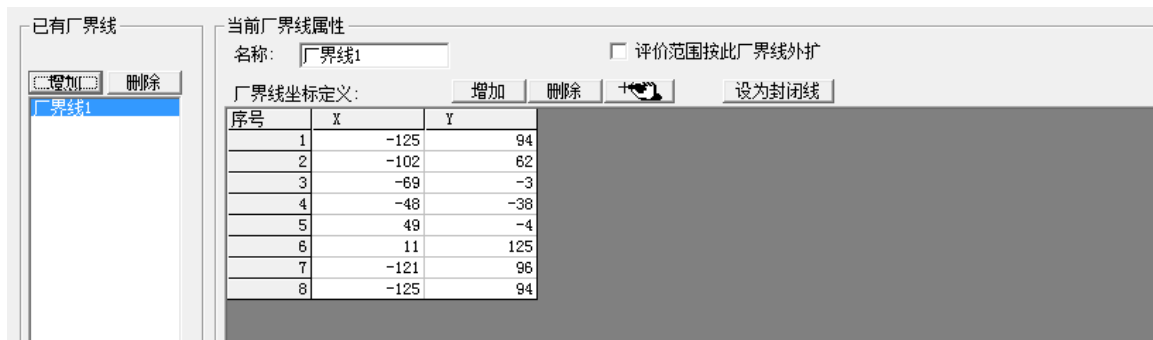
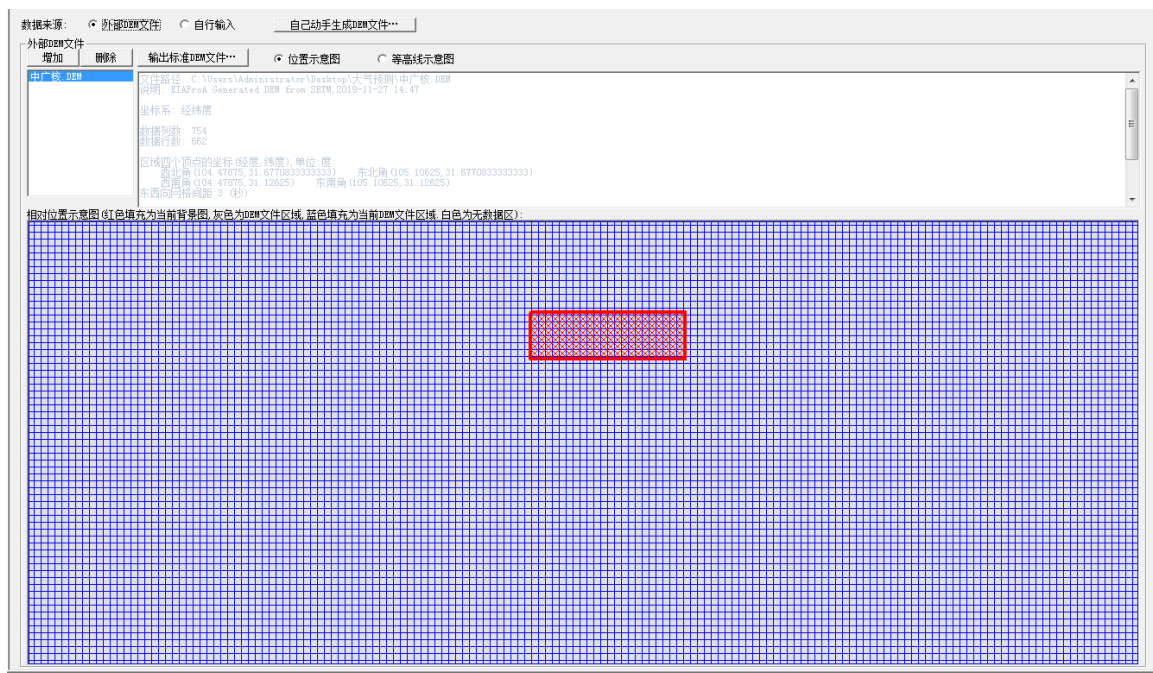
为保守计，评价在估算排放活化空气对公众影响时，均按 ^7Be 进行计算（主要考虑吸入内照射、食入内照射、空气浸没外照射、地面沉积外照射等四种途径）。

表 5.2-24 预测因子源强

排放源	污染因子	年均排放速率	污染物类型	排气筒高度、排气筒出口内径	烟气排放速率	烟气温度	距厂界最近距离
质子治疗系统区	^7Be	8.04E+09Bq/a	点源	H=30m 内径 0.5m	16600m ³ /h	20℃	45m

软件计算过程及结果如下：





工业源(打开)

增加增加多个删除

锁定源类型及名称

表格内容选项...

序号	类型	污染源名称	X	Y	点源H	点源D	点源T	烟气量Qvol	面(体)源高度	面(体)源长度	面(体)源角度	线源X1	线源Y1	线源X2	线源Y2	线源宽度	有效高He	H-3	排放强度单位
1	点源	质子系统排气		0	0	30	5	16600										108	1/s

第 1 个污染源详细参数

污染源类型: 点源

污染源名称: 质子系统排气筒

一般参数

排放参数

基准源强:

单位: 1/s

序号	污染物名称	排放强度
1	H-3	108

排放强度随时间变化

变化因子...

确定

取消

帮助

AERMOD预测方案-H-3

输出AERMOD .INP及相应气象文件...

基本要素

选项与参数

输出内容

预测方案名称: H-3

AERMOD运行方式: 一般方式(非缺省)

AERMOD预测气象: 预测气象20191127

AERMOD平均时间: 1小时2小时3小时4小时6小时8小时12小时日平均月平均年平均

预测因子及类型: H-3普通

AERMOD预测点方案: 预测点方案(320点)

常用模型选项

不考慮地形影响(采用平坦地形)

考虑预测点高地基(测点不在地面上)

不考慮烟囱出口下洗现象

计算总沉和率

计算干沉积率

计算湿沉积率

面源计算考虑干去除损耗

使用AERMOD的ALPHA选项

考虑建筑物下洗

考虑城市效应

考虑NO2化学反应

考虑道路扬尘再悬浮

考虑仅对面源速度优化

考虑扩散过程的衰减

考虑小风处理ALPHA选项

干沉降算法中不考慮干清除

湿沉降算法中不考慮湿清除

忽略夜间城市边界层/白天对流层转换

选择污染源:

名称	类型	摘要	加入顺序号
质子系统排...	工业点源	位置(x,y,z)=(0,0,500),高度H=30,内径D=5,气量Q=16600m³/hr,气温采用环境气温	00000001

确定

取消

帮助

预测计算结果见下表：

表 5.2-25 预测计算结果 (Bq/m³)

角度	方位	径距 (m)									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
360	N	1.93E-05	7.75E-05	1.58E-04	2.01E-04	2.03E-04	1.88E-04	1.65E-04	1.40E-04	1.19E-04	1.01E-04
337.5	NNW	2.71E-05	1.02E-04	2.12E-04	2.68E-04	2.66E-04	2.46E-04	2.18E-04	1.88E-04	1.60E-04	1.34E-04
315	NW	5.10E-05	1.52E-04	2.98E-04	3.55E-04	3.45E-04	3.00E-04	2.55E-04	2.20E-04	1.86E-04	1.53E-04
292.5	WNW	7.07E-05	2.46E-04	4.54E-04	4.88E-04	4.37E-04	3.78E-04	3.20E-04	2.68E-04	2.22E-04	1.87E-04
270	W	7.59E-05	3.79E-04	6.45E-04	6.40E-04	5.67E-04	2.80E-03	7.90E-03	3.29E-04	2.31E-04	1.94E-04
247.5	WSW	7.02E-05	5.12E-04	9.05E-04	2.28E-02	6.29E-04	4.57E-04	3.53E-04	2.83E-04	2.29E-04	1.92E-04
225	SW	8.84E-05	4.10E-04	8.53E-04	4.18E-03	5.03E-04	3.60E-04	2.76E-04	2.18E-04	1.76E-04	1.50E-04
202.5	SSE	7.96E-05	2.37E-04	4.44E-04	1.07E-03	6.50E-04	2.98E-04	2.23E-04	1.76E-04	1.45E-04	1.23E-04
180	S	7.02E-05	1.62E-04	2.70E-04	2.81E-04	4.54E-03	1.76E-04	1.33E-04	1.03E-04	8.11E-05	6.50E-05
157.5	SSE	6.45E-05	1.59E-04	2.76E-04	3.46E-04	2.85E-03	1.82E-02	1.54E-03	2.77E-04	1.59E-04	1.18E-04
135	SE	5.20E-05	1.48E-04	2.40E-04	2.62E-04	2.37E-04	1.97E-04	1.64E-04	1.37E-04	1.17E-04	1.01E-04
112.5	ESE	4.41E-05	1.26E-04	1.97E-04	2.06E-04	1.90E-04	1.65E-04	1.42E-04	1.22E-04	1.06E-04	9.20E-05
90	E	4.86E-05	9.93E-05	1.55E-04	1.79E-04	1.76E-04	1.61E-04	1.41E-04	1.23E-04	1.06E-04	9.36E-05
67.5	ENE	3.41E-05	7.33E-05	1.29E-04	1.61E-04	1.63E-04	1.51E-04	1.33E-04	1.15E-04	9.93E-05	8.53E-05
45	NE	2.14E-05	5.77E-05	1.15E-04	1.54E-04	1.61E-04	1.52E-04	1.37E-04	1.20E-04	1.01E-04	8.53E-05
22.5	NNE	1.94E-05	6.60E-05	1.27E-04	1.61E-04	1.63E-04	1.52E-04	1.36E-04	1.19E-04	1.01E-04	8.27E-05

表 5.2-26 气载流出物所致公众剂量计算结果

最大落地浓度/方位	⁷ Be				
	吸入剂量 (mSv/a)	食入剂量 (mSv/a)	空气浸没剂 量 (mSv/a)	地面沉积剂 量 (mSv/a)	总剂量 (mSv/a)
2.28E-02 (WSW, 200m)	1.32E-03	2.80E-04	1.57E-06	1.07E-04	1.71E-03

由上表可见，本项目排放的活化气体对周边公众最大落地浓度点位于 WSW（西南偏西）200m 处。根据项目周边外环境规划图分析，本项目所在地全年主导风向为东北风。因此，项目排放的活化气体主要影响对象为项目西南侧的零散居民点。同时，项目周边 500m 范围内，其他入驻企业和周边居民也将受到次要影响。

经计算，项目排放的活化气体所致公众个人剂量最大值为 1.71E-03mSv/a，远低于评价给出的公众剂量约束值要求（0.1mSv/a），因此，本项目所排放的活化气体对周边公众影响是极其轻微的。

5.2.2.3 质子加速器系统冷却水的感生放射性

质子治疗系统中，用于冷却磁铁、狭缝、热交换器等器件的冷却水，在由束流损失产生的中子辐射场的照射下会被活化。高能中子与冷却水中的氧发生散裂反应，产生 ³H、⁷Be、¹¹C、¹³N、¹⁵O 等放射性核素。

1、模拟计算条件及结果

根据加速器运行经验，当质子束流损失在偏转磁铁处时，该处的冷却水产生的感生放射性最大。下图给出了给出了磁铁冷却水中感生放射性的计算模型，其中：束流管道厚 0.4cm，长 10cm；磁铁厚 15cm，长 10cm；冷却水厚 3cm，长 10cm。照射强度及照射时间：450nA 强度下 4800 小时。

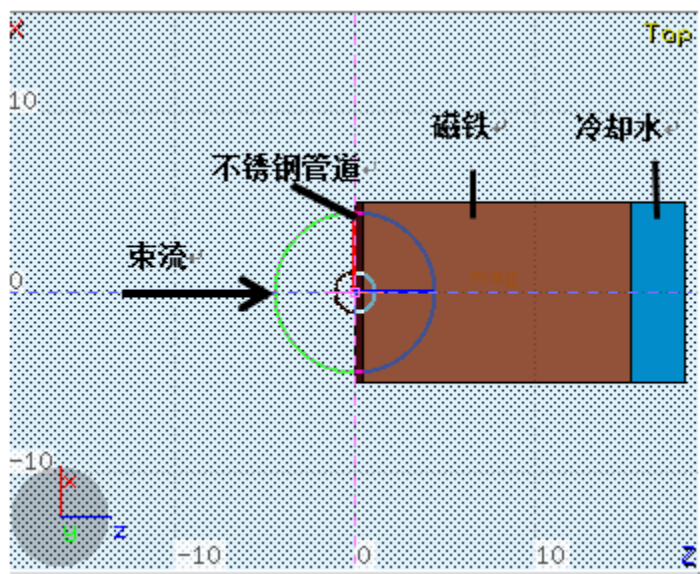


图 5.2-17 磁铁冷却水中感生放射性的计算模型

表 5.2-27 冷却水感生放射性核素及其活度

序号	核素	活度 (Bq)	ALI _{min} (Bq)
1	³ H	1.16E+06	3E+09
2	⁷ Be	1.20E+07	7E+08
3	¹¹ C	4.43E+07	2E+10
4	¹³ N	4.5E+06	1.68E+08
5	¹⁵ O	1.27E+08	1.68E+08

2、修正后源项

根据模拟计算结果修正源项（照射强度及照射时间：50nA 强度下 720 小时以及 300nA 强度下 240 小时），停机时刻设备冷却水感生放射性核素总活度为 1.26E+07Bq。冷却水感生放射性核素及活度见下表。

表 5.2-28 冷却水中产生的感生放射性核素活度

序号	核素	活度 (Bq)	ALI _{min} (Bq)
1	³ H	2.58E+04	3.00E+09
2	⁷ Be	2.67E+05	7.00E+08
3	¹¹ C	9.84E+05	2.00E+10
4	¹³ N	1.00E+05	1.68E+08
5	¹⁵ O	2.82E+06	1.68E+08
合计		1.26E+07	/

本项目设有 1 个闭路循环的水冷系统，对加速器调试区设备、整体调试区设备进行冷却，系统总容量为 4.5m³。正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，仅在冷却水系统检修时或单台加速器系统完成调

试、开展拆除打包作业时排放。本项目每年生产、销售 4 台（套）质子治疗系统，每年更换 4 次冷却水，每季度将排放 4.5 m³ 带有感生放射性的冷却水进入放射性废水收集池。

本项目质子治疗系统在冷水机房设有放射性废水收集池，其中设置两个容积为 5m³ 的并行贮存槽，收集池总容积为 10m³，用于暂存更换下来的冷却水。设计容量达到项目水冷系统总容量的 2 倍以上，可以有效收纳、暂存更换后带有感生放射性的冷却水。

经一定时间暂存后，带有感生放射性的冷却水中短半衰期核素 ¹⁵O、¹³N 和 ¹¹C 等将迅速衰变，浓度也很快降低。本项目冷却水中活化核素主要考虑 ³H、⁷Be。根据建设单位放射性废水收集池容量设计，假设单个放射性废水收集池贮存槽仅暂存一个季度更换下来的废水，则每个贮存槽内冷却水停留时间为 2 个季度（180 天），则估算放射性废水收集池排放浓度见下表。

表 5.2-29 冷却水中产生的感生放射性核素的饱和浓度表，单位：Bq/cm³

核素	年产生活度 Bq	单季度产生活度 Bq	暂存时间 d	半衰期	排放活度 Bq	排放浓度 Bq/L
³ H	2.58E+04	6.45E+04	180d	12.2y	6.27E+03	1.39
⁷ Be	2.67E+05	6.68E+05	180d	53d	6.34E+03	1.41
合计						2.80

由上表 5.2-28 及表 5.2-29 可见，本项目放射性废水排放时，排放活度及活度浓度均符合国家规范要求。建设单位将定时对废水收集池中冷却水进行采样，并监测其活度浓度，在活度浓度达标并经环境主管部门同意后，方可排入市政污水管网。

5.2.2.4 放射性废水的处置

正常运行时，本项目质子治疗系统的活化冷却水循环使用，不对外排放，仅在冷却水系统检修时或单台加速器系统完成调试、开展拆除打包作业时才需要排放。

放射性废水的排放方式为先排到质子治疗系统的废水收集池暂存，

建设单位将定时对废水收集池中冷却水进行取样监测，监测合格并经审管部门同意后，排到本项目所在厂区的废水综合处理池，与其它废水混和并经处理后排入市政污水管网。

依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)，对于放射性废水经净化处理达标后，在经审管部门确认的情况下可排放到流量大于 10 倍排放流量的普通下水道，其排放标准为：每月排放的放射性总活度不超过 $10\text{ALI}_{\min}$ ($\text{ALI}_{\min}$ 是相应于职业照射的食入和吸入年摄入量限值的较小者)，每次排放活度不超过 $1\text{ALI}_{\min}$ ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

为确保达标排放，建设单位应采取如下措施：

(1) 每次水冷系统排放冷却水之前，应测量冷却水中的放射性浓度；

(2) 将排放的废水排到废水收集池中，分区集中贮存，一个贮存槽容积不足后，启用第二个贮存槽；

(3) 定期取样监测收集池中各贮存槽的放射性浓度，通过计算再次核实该收集池中全部废水的总活度，单次排放活度小于 $1\text{ALI}_{\min}$ 值的贮存槽，方可排入本项目所在厂区的污水预处理池；

(4) 污水预处理池废水经处理后排入市政污水管网。

5.2.2.5 放射性固体废物的产生及处置

加速器结构部件的感生放射性主要是粒子直接与结构材料相互作用产生。质子加速器产生感生放射性的主要部位是束流损失较大的部位，如铜靶、离子源/引出隔板、降能器、准直器、狭缝、治疗头、磁铁等，其主要材料为铁、不锈钢（铁）、铜、铝、铍、石墨、钽和镍以及各种烃类制品。相关实验研究表明，加速器关机后所被活化部件中的核素主要是 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 和 ^{60}Co 等半衰期较长的核素。

1、软件模拟条件及结果

加速器部件活化软件模拟条件与气体活化一致，不再复述。各部件的活度与质子治疗系统出束时间与强度有关。下图给出了相应的模拟计算模型，其中靶材料为圆柱体，尺寸为 $\text{Ø}50\text{mm} \times 60\text{mm}$ 。

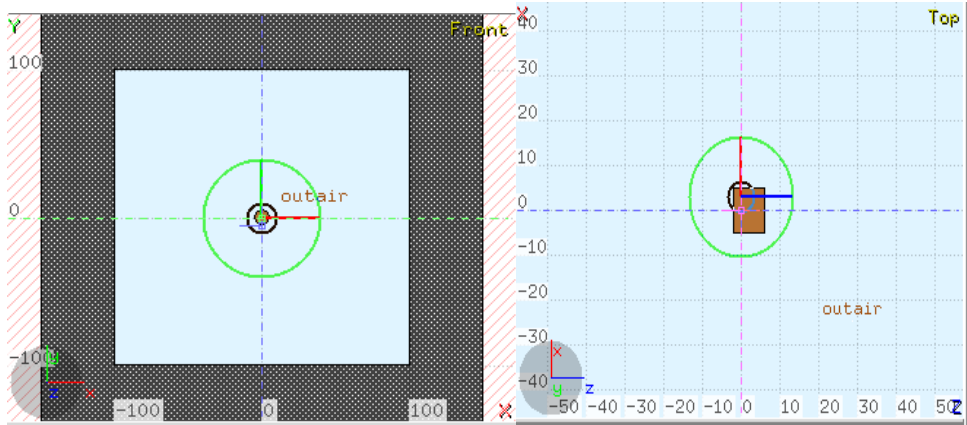


图 5.2-18 加速器部件感生放射性计算模型

回旋加速器 D 盒材料主要为铜，产生的放射性总活度为： $2.998\text{E}+11\text{Bq}$ ；运行 1 年后 D 盒所产生的放射性核素以及活度如下表所示。

表 5.2-30 加速器运行一年后 D 盒 Cu 盒中产生的感生放射性核素

核素	活度 (Bq)	核素	活度 (Bq)
^7Be	$1.39\text{E}+05$	^{56}Co	$1.01\text{E}+10$
^{42}K	$3.11\text{E}+06$	^{57}Co	$1.49\text{E}+10$
^{43}K	$1.01\text{E}+06$	^{58}Co	$2.94\text{E}+10$
^{44}Sc	$5.6\text{E}+07$	^{55}Fe	$2.88\text{E}+09$
$^{44\text{m}}\text{Sc}$	$2.81\text{E}+07$	^{59}Fe	$4.19\text{E}+08$
^{46}Sc	$6.43\text{E}+07$	^{60}Co	$5.28\text{E}+08$
^{47}Sc	$4.07\text{E}+07$	^{57}Ni	$1.52\text{E}+09$
^{48}Sc	$1.39\text{E}+07$	^{60}Cu	$6.80\text{E}+09$
^{48}V	$7.13\text{E}+08$	^{65}Ni	$7.66\text{E}+08$
^{51}Cr	$4.28\text{E}+09$	^{61}Cu	$3.75\text{E}+10$
^{52}Mn	$5.58\text{E}+08$	^{62}Cu	$9.25\text{E}+10$
$^{52\text{m}}\text{Mn}$	$1.55\text{E}+09$	^{64}Cu	$4.44\text{E}+10$
^{54}Mn	$6.23\text{E}+08$	^{63}Zn	$7.35\text{E}+09$
^{65}Zn	$9.16\text{E}+08$		

回旋加速器引出口有粒子损失，引出口管道材料主要为不锈钢；加速器运行一年后引出口管道上产生的放射性核素以及活度如下表所示。

表 5.2-31 加速器运行一年后束流引出口不锈钢管道上产生的感生放射性核素

核素	活度 (Bq)	核素	活度 (Bq)
¹¹ C	6.36E+07	⁵⁶ Co	1.13E+10
²² Na	4.15E+07	¹⁸ F	7.27E+07
²⁴ Na	5.03E+07	⁴³ K	7.7E+07
⁴² K	2.46E+08	⁴⁴ Sc	4.23E+09
^{44m} Sc	2.13E+09	⁵⁷ Co	5.96E+09
⁴⁶ Sc	2.39E+09	⁵⁸ Co	6.55E+09
⁴⁷ Sc	1.07E+09	⁵⁵ Fe	1.19E+10
⁴⁸ Sc	2.42E+08	⁵⁹ Fe	1.65E+07
⁴⁸ V	2.06E+10	⁶⁰ Co	2.70E+07
⁵¹ Cr	5.98E+10	⁵⁷ Ni	4.58E+09
⁵² Mn	1.52E+10	⁶⁰ Cu	2.00E+08
^{52m} Mn	1.33E+10	⁵⁴ Mn	1.45E+10

回旋加速器能量选择系统中，粒子主要损失在选择系统的准直器和散度、动量狭缝中，准直器材料为钽，狭缝材料为镍。在准直器上损失粒子为 3.0375E+11/s，两狭缝损失的总粒子数 1.25E+10/s。则加速器运行一年后能量选择系统的准直器、狭缝上产生的放射性核素以及活度如下表所示。

表 5.2-32 加速器运行一年后 ESS 系统 Ni 上产生的感生放射性核素

核素	活度 (Bq)	核素	活度 (Bq)
⁴² K	1.16E+05	⁴⁴ Sc	5.14E+06
^{44m} Sc	2.58E+06	⁵⁷ Co	3.35E+08
⁴⁶ Sc	1.90E+06	⁵⁸ Co	3.05E+08
⁴⁷ Sc	6.10E+05	⁵⁵ Fe	6.31E+07
⁴⁸ Sc	1.34E+05	⁵⁹ Fe	8.08E+05
⁴⁸ V	5.10E+07	⁶⁰ Co	1.36E+06
⁵¹ Cr	5.98E+10	⁵⁷ Ni	4.58E+09
⁵² Mn	1.52E+10	⁶⁰ Cu	2.00E+08
^{52m} Mn	7.52E+07	⁵⁴ Mn	1.45E+10

表 5.2-33 加速器运行一年后 ESS 系统 Ta 上产生的感生放射性核素

核素	活度 (Bq)	核素	活度 (Bq)
¹⁷⁸ Ta	4.77E+09	⁸⁶ Y	3.83E+05
¹⁸⁰ Hf	8.06E+08	¹²⁰ Sb	3.77E+05
¹⁸² Ta	6.79E+08	¹⁰⁶ Ag	3.66E+05
¹⁸² Ta	6.79E+08	¹¹⁷ Sn	3.56E+05
¹⁷⁹ Hf	2.82E+08	⁸⁵ Sr	3.28E+05
¹⁷⁷ Hf	2.61E+08	¹⁶² Ho	3.27E+05
¹⁷⁴ Lu	3.74E+07	⁹⁴ Tc	2.73E+05
¹⁷⁶ Lu	3.62E+07	⁸⁴ Rb	2.73E+05
¹⁷⁷ Lu	1.29E+07	⁹⁷ Tc	2.67E+05
¹⁶⁵ Lu	8.84E+06	⁵⁸ Eu	2.36E+05
⁸³ Kr	7.51E+06	¹⁵⁰ Eu	2.29E+05
⁹⁹ Tc	4.50E+06	¹¹⁷ In	2.12E+05
¹⁷⁸ Hf	4.18E+06	¹¹³ In	2.00E+05
¹⁷⁹ W	3.97E+06	¹¹⁶ In	1.89E+05

⁸⁵ Kr	3.69E+06	¹⁵⁶ Td	1.63E+05
¹⁷⁸ Lu	3.46E+06	¹⁵⁴ Td	1.57E+05
⁹⁰ Y	3.33E+06	⁹⁵ Tc	1.53E+05
⁹¹ Y	2.30E+06	¹⁵⁴ Td	1.46E+05
⁸⁷ Sr	2.10E+06	¹⁵⁶ Td	1.45E+05
¹⁰³ Rh	1.92E+06	¹²⁰ I	1.39E+05
⁸⁰ Br	1.71E+06	¹⁰⁵ Rh	1.37E+05
¹⁶⁰ Ho	1.63E+06	⁹⁶ Tc	1.35E+05
⁹⁵ Nb	1.19E+06	⁹⁸ Nb	1.35E+05
⁸⁷ Y	1.14E+06	¹¹¹ Cd	1.29E+05
⁶⁹ Zn	1.14E+06	¹²³ Te	1.16E+05
⁷¹ Zn	9.72E+05	¹¹⁴ In	1.07E+05
⁷³ Ge	9.70E+05	¹⁰² Rh	6.26E+04
¹⁰⁹ Ag	9.14E+05	⁷⁹ Se	4.21E+04
¹⁶⁸ Lu	7.79E+05	⁶² Co	3.06E+04
⁸¹ Se	7.39E+05	⁹³ Nb	2.38E+04
⁹² Nb	7.22E+05	¹³¹ Ba	1.76E+04
¹⁵⁸ Ho	6.94E+05	⁶⁰ Co	1.14E+04
⁸² Rb	4.85E+05	⁷⁷ Se	9.83E+03
⁹³ Mo	4.83E+05	¹¹³ Cd	9.17E+03
¹⁵⁸ Ho	4.60E+05	¹⁶⁴ Tm	7.77E+03
⁹¹ Nb	4.58E+05	¹⁵³ Ho	6.94E+03
⁹⁷ Nb	4.24E+05	⁸² Br	4.12E+03
¹⁰¹ Rh	3.86E+05	⁹⁴ Nb	3.57E+03
⁸⁹ Y	3.84E+05	¹⁷² Lu	2.36E+03

治疗舱室：治疗舱室中所关注的部件感生放射性主要在喷嘴。喷嘴处的材料为黄铜，损失在上面的粒子数为 2.8125E+10/s。则运行一年后喷嘴出口的黄铜上产生的放射性总活度为：4.2966E+09；产生放射性核素种类及活度如下表所示。

表 5.2-34 加速器运行一年后治疗舱喷嘴 Cu 上产生的主要感生放射性核素

核素	活度 (Bq)	核素	活度 (Bq)
⁶⁵ Zn	1.37E+07	⁵⁶ Co	1.5E+08
⁴² K	4.28E+04	⁵⁷ Co	2.19E+08
⁴³ K	1.80E+04	⁵⁸ Co	4.27E+08
⁴⁴ Sc	8.63E+05	⁵⁵ Fe	4.28E+07
^{44m} Sc	4.34E+05	⁵⁹ Fe	5.91E+06
⁴⁶ Sc	1.00E+06	⁶⁰ Co	7.35E+06
⁴⁷ Sc	5.78E+05	⁵⁷ Ni	2.25E+07
⁴⁸ Sc	2.07E+05	⁶⁰ Cu	9.95E+07
⁴⁸ V	1.06E+07	⁶⁵ Ni	9.81E+06
⁵¹ Cr	6.39E+07	⁶¹ Cu	5.44E+08
⁵² Mn	2.56E+06	⁶² Cu	1.32E+09
^{52m} Mn	2.31E+07	⁶⁴ Cu	6.03E+08
⁵⁴ Mn	4.75E+07	⁶³ Zn	1.10E+08

表 5.2-35 加速器各部件放射性总活度

位置	放射性总活度 (Bq)
回旋加速器大厅 D 盒	2.998E+11
回旋加速器大厅束流引出口	2.60E+11
ESS 系统 Ni	2.462E+09
ESS 系统 Ta	2.188E+11
治疗舱喷嘴黄铜	4.2966E+09

2、源项修正

根据项目实际运行数据对加速器部件活化源项进行修正，在单台质子治疗系统运行调试完毕（调试出束时间以 240h 计），质子治疗系统各部件放射性总活度如下表所示（为保守计，在活度修正时，将活化核素均视为半衰期最长、最难以达到饱和浓度且 γ 能量最高的 ^{54}Mn ）。

表 5.2-36 质子治疗系统单台调试后各部件放射性活度汇总

放射性固废种类	重量	源项修正	预测活度 Bq	活度浓度 Bq/g
加速器 D 形盒	100t	束流损失 150nA，运行时长 240h	1.50E+10	4.11E+02
加速区束流引出口		束流损失 300nA，运行时长 240h	2.60E+10	
降能器	6kg	束流损失 214nA，运行时长 240h	7.20E+09	1.20E+06
准直器	4.0kg	束流损失 214nA，运行时长 240h	1.45E+11	3.63E+07
狭缝	5.1kg	束流损失 9.4nA，运行时长 240h	1.74E+09	3.42E+05
治疗舱	96t	束流损失 4.3nA，运行时长 240h	6.15E+08	6.42

根据建设单位设计资料，本项目预计每年放射性固体废物产生量约 16.8kg，主要为质子治疗系统维修维护、更换的含感生放射性的结构部件。具体废物组成如下表所示。

表 5.2-37 项目放射性固废产生量预测

放射性固废种类	单件重量	年产生量 (总重量/个数)		备注
离子源（钽丝）	0.14kg	1.7kg	12	更换周期 1 个月
降能器挡块-铝	0.1kg	0.1kg	1	仅损坏时更换
降能器挡块-铍	1.5kg	1.5kg	1	仅损坏时更换
降能器挡块-石墨	4.4kg	4.4kg	1	仅损坏时更换
准直器-钽	2kg	4.0kg	2	维护周期 6 个月
狭缝-镍	1.7kg	5.1kg	3	维护周期 24 个月
合计		16.8		
注：其他可能产生感生放射性的主要部件如引出隔板（铁）、治疗头（铜）、磁铁（铁）、铜靶（铜）等无损耗，无需更换，不产生放射性固废。				

根据软件模拟结果，并结合本项目放射性固废产生情况，评价对本

项目放射性固废的活度情况汇总如下表所示。

表 5.2-38 项目放射性固废活度模拟结果

放射性固废种类	年产生固废重量	模拟条件	预测活度 Bq	活度浓度 Bq/g
降能器挡块-铝	0.1kg	束流损失 72nA，运行时长 960h(仅损坏时更换，保守按每年更换 1 次估算)	2.88E+10	4.80E+07
降能器挡块-铍	1.5kg			
降能器挡块-石墨	4.4kg			
准直器-钽	4.0kg	束流损失 214nA，运行时长 480h	2.89E+11	7.23E+07
狭缝-镍	5.1kg	束流损失 9.4nA，运行时长 1920h	1.39E+10	2.72E+06
离子源（钽丝）	1.7kg	非束流集中损失点，活化程度远小于准直器。		

由上表可见，在本项目废弃的加速器结构部件放射性活度浓度最高可达到 7.23E+07Bq/g，超出了豁免水平，需对拆卸下来的废弃部件加强管理，按照《低、中水平放射性固体废物包装安全标准》(GB 12711-2018) 进行包装（包装容器外表面上任意一点的剂量率应 $\leq 0.1\text{mSv/h}$ ）及辐射水平监测、登记，暂存在放射性固废暂存间。

本项目在厂区西南侧建设放射性固废暂存间，暂存间容积为 75m³。拆除的活化的结构部件按国家规范包装后，集中暂存在该储存间，最终将委托项目所在地城市放射性固废处置中心等有资质的单位处置。

本项目放射性固废暂存间为独立单层建筑，建筑墙体采用混凝土浇筑，墙体厚度 30cm。按固废包装容器存放位置与墙体距离不小于 0.5m 进行预测，暂存间墙体外 30cm 处最大剂量率约 2.26 $\mu\text{Sv/h}$ ，对环境的影响可接受。

环评要求：

（1）在进行活化部件维护、替换工作前，首先由辐射防护人员对活化部件外表面的剂量率进行测量，依据测量结果，对活化程度、维修维护的安全性和操作时间进行评估，确定恰当的维修维护方式，制定合理可行的维修维护方案。

（2）对于较高比活度的放射性固体废物：如回旋加速器部件、降

能器、准直器、狭缝等，在加速器停机一段时间后方可进行拆装，严格控制工作人员作业时间，多人轮流作业并采取个人防护措施（如铅衣、铅围裙、铅眼镜、铅手套、剂量报警仪等）。

（3）对于低比活度的放射性固体废物：如束流线上的探测器，治疗头的器件，磁铁等，这些大都是比活度低于豁免水平的放射性部件，可以手工拆除。对于重型部件，比如二极铁，可用吊车叉车装运。低放废物可直接送入暂存间。

（4）定期对储存间废物的放射性进行测量记录，并分类堆放，对于衰变后达到豁免值的废物，报经监管部门同意后，转放到常规设备/废物储存间。其他废物储存到一定量时，报经监管部门同意后，委托城市放射性固废处置中心等有资质的单位处置。

5.2.3 质子加速器系统电磁环境影响分析

本项目产生电磁辐射的回旋加速器自身采取了金属壳体电磁屏蔽屏蔽，以避免其对周围环境及仪表产生的电磁辐射影响。

参照亿比亚公司对质子治疗系统运行过程开展的电磁兼容性监测（监测报告见附件），质子治疗系统电磁辐射（电磁发射）符合《测量控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第 1 部分通用要求》（GBT 18268.1-2010），对周边环境的影响是可接受的。

5.2.4 其他 X 射线装置辐射影响简要分析

图像引导系统是本项目质子治疗设备上一个子系统，主要用于治疗图像引导，包括旋转治疗室中的 CBCT 图像引导系统和固定治疗室中的二维图像系统。两套图像引导系统中射线源均为 X 射线管，均为Ⅲ类医用射线装置（医用 X 射线诊断装置）。

本项目拟依托旋转治疗室开展 CBCT 图像引导系统及二维图像系统联合生产调试工作，年产量均为 20 台/年。根据《医用 X 射线诊断放

射防护要求》(GBZ130-2013)对 CT 机房屏蔽防护设计方案进行分析,具体见下表:

表 5.2-39 CT 调试区域屏蔽防护措施

项目	实际情况	标准要求 (GBZ130-2013)	是否满足要求
机房的大小	旋转治疗室内部尺寸 (不含迷道) 13.7m×10.7m, 146.6m ²	机房最小有效使用面积为 30 m ² , 最小边长为 4.5m。	是
有用线束朝向的墙壁	混凝土墙体, 厚度 3-4.8m (铅当量 30-48mmPb)	2.5mm 铅当量的防护厚度	是
各侧墙	混凝土墙体, 厚度 3-4.8m (铅当量 30-48mmPb)	2.5mm 铅当量的防护厚度	是
天棚	屋面, 厚度 3m (铅当量 30mmPb)	2.5mm 铅当量的防护厚度	是
门	设置有迷道, 迷道内墙混凝土厚度 2.5m (铅当量 25mmPb)	2.5mm 铅当量的防护厚度	是
观察窗防护	不设置观察窗	2.5mm 铅当量的防护厚度	不涉及
机房内布局	依托旋转治疗室布置, 有用线束不直接照射门、窗和管线口位置	要合理, 应避免有用线束直接照射门、窗和管线口位置; 不得堆放与诊断工作无关的杂物	是
排风	设有排风装置	机房应设置动力排风装置, 并保持良好的通风	是
标志、指示灯	安装警示标志和指示灯	机房门外要有电离辐射标志, 并安设醒目的工作指示灯	是
联锁装置	指示灯与机房门联锁; 机房门与 CT 机联锁	机房门应有闭门装置, 且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动	是

由上表可以得知, 本项目 CBCT 图像引导系统以及二维图像系统等 III 类射线装置辐射源强较小, 在使用过程中出束照射时间短, 依托的旋转治疗室符合《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013) 要求, 对外环境的辐射影响可接受。

5.2.5 项目销售、运输过程辐射环境影响简要分析

本项目质子治疗系统销售业务过程中, 对环境造成影响的主要是出束调试后, 含有一定感生放射性的加速器部件。建设单位将委托有资质的运输单位, 按照国家规范要求, 对相应部件进行检测、打包、标识后,

运往用户方所在地开展后续安装、调试作业。

经测算（参见表 5.2-36 质子治疗系统单台调试后各部件放射性活度汇总），单台质子治疗系统加速器完成调试后，其结构部件的放射性活度浓度最高可达到 $3.63\text{E}+07\text{Bq/g}$ ，超出了豁免水平。参照《放射性物品安全运输规程》（GB11086-2019）6.1 条，本项目质子治疗系统在完成出束调试，拆卸打包外运过程中，根据各部件的放射性活度浓度水平，可归属于豁免物品、I 类低比活度物品（LSA-I）、II 类低比活度物品（LSA-II）或 III 类低比活度物品（LSA-III）。

考虑到销售过程中运输环节的环境影响，在运输前包装过程中，建设单位将按照部件的放射性活度进行不同类型的打包作业（放射性活度限值均以 GB11086-2019 中限值最严格的核素 ^{54}Mn 进行考虑）：

1、开展销售运输业务前，建设单位自行或委托有资质单位对拆卸后待运输部件进行分别监测，并根据监测结果采取不同的包装、运输方式，监测结果应存档备查。

2、根据用户加速器部件活度的不同，本项目可能涉及：

1）例外货包（货包中部件放射性处于豁免水平：放射性活度低于豁免活度 $1\text{E}+06\text{Bq}$ 且放射性活度浓度低于豁免活度浓度 10Bq/g ）；

2）IP-1 型工业货包（货包中部件属于 I 类低比活度物品，放射性活度浓度低于 300Bq/g ）；

3）IP-2 型工业货包（货包中部件属于 II 类低比活度物品，放射性活度浓度低于 $3\text{E}+07\text{Bq/g}$ 或货包中部件属于 III 类低比活度物品，但独家使用该工业货包）；

4）IP-3 型工业货包（货包中部件属于 III 类低比活度物品，放射性活度浓度低于 $6\text{E}+08\text{Bq/g}$ ，且非独家使用该工业货包）。

3、在货包包装方面，各型货包均不得装有：1）超过货包设计所允

许的放射性获得的内容物；2）不同于货包设计所允许的放射性核素的内容物；3）在形状、物理和化学形态方面不同于货包设计所允许的内容物。

4、在常规运输条件下，货包外表面上任一点的最高辐射水平不超过 2mSv/h。若货包外表面上任一点的最高辐射水平超过 2mSv/h，则应依据规范要求按独家使用方式运输，独家使用方式运输条件下，货包外表面上任一点的最高辐射水平不得超过 10mSv/h。

5、任何货包外表面的非固定污染不得超过以下限值：1）对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体为 4Bq/cm²；2）对其他所有 α 发射体为 0.4Bq/cm²。

建设单位在委托有资质单位按照国家规范开展销售运输业务、并满足上述环评要求的情况下，本项目质子治疗系统销售业务运输环节对环境的影响是可接受的。

本项目III类射线装置（CBCT 图像引导系统、二维图像系统）的销售业务过程中不产生污染物。

5.2.6 项目运行期放射性环境影响小结

1、瞬发辐射对工作人员的剂量小结

本项目质子加速器在开机运行阶段，整个工作场所处于封闭戒备状况，任何人员不能进入控制区，非工作人员不得进入监督区（控制室居留因子取 1，迷道门外为过程居留因子取 1/4，其他关注点居留因子保守取值 1/16）。

本项目两个不同的运行情况下，区域内人员所受到的剂量见表 5.2-40 及表 5.2-41。

表 5.2-40 质子治疗系统区域关注点个人剂量（西侧加速器调试+东侧整体调试）

序号	区域描述	剂量率 $\mu\text{Sv/h}$	年工作 时间 h	居留因 子	关注点 性质	个人剂量 mSv/a
1	1#加速器室西北侧迷道外墙	1.26	240	1/16	职业	1.89E-02
2	1#加速器室迷道外墙	3.03	240	1/16	职业	4.55E-02
3	1#加速器室西侧外墙物流区	3.38	240	1/16	职业	5.07E-02
4	1#加速器室南侧室外	1.08	240	1/16	公众	1.62E-02
5	2#加速器室南侧室外	1.42	240	1/16	公众	2.13E-02
6	治疗室东侧室外	0.607	240	1/16	公众	9.59E-03
7	治疗室迷道入口	4.37	240	1/4	职业	2.62E-01
8	辅助设备间	2.44	240	1/8	职业	7.32E-02
9	2#加速器室迷道入口	1.46	240	1/4	职业	8.76E-02
10	1#加速器室迷道入口	0.244	240	1/4	职业	1.46E-02
11	控制室	1.58	240	1	职业	3.79E-01
12	1#加速器室房顶	人员无法到达屋面，不考虑个人剂量。				
13	2#加速器室房顶					
14	治疗室房顶					

表 5.2-41 质子治疗系统区域关注点个人剂量（西侧加速器调试+东侧加速器调试）

序号	区域描述	剂量率 $\mu\text{Sv/h}$	年工作 时间 h	居留因 子	关注点 性质	个人剂量 mSv/a
1	1#加速器室西北侧迷道外墙	1.26	720	1/16	职业	5.67E-02
2	1#加速器室迷道外墙	3.03	720	1/16	职业	1.36E-01
3	1#加速器室西侧外墙物流区	3.38	720	1/16	职业	1.52E-01
4	1#加速器室南侧室外	1.08	720	1/16	公众	4.86E-02
5	2#加速器室南侧室外	0.237	720	1/16	公众	1.07E-02
6	治疗室东侧室外	3.29E-02	720	1/16	公众	1.48E-03
7	治疗室迷道入口	1.15E-02	720	1/4	职业	2.07E-03
8	辅助设备间	3.00E-02	720	1/8	职业	2.70E-03
9	2#加速器室迷道入口	0.244	720	1/4	职业	4.39E-02
10	1#加速器室迷道入口	0.244	720	1/4	职业	4.39E-02
11	控制室	9.77E-04	720	1	职业	7.03E-04
11	1#加速器室房顶	人员无法到达屋面，不考虑个人剂量。				
12	2#加速器室房顶					

2、感生放射性对工作人员的剂量小结

（1）加速器运行时，控制区保持大于 6 次/h 的通风频率，确保活化空气不会泄漏到工作场所；停机检修时，控制区保持 1 次/h 的通风频

率以维持负压，工作人员在 1 小时后再进入控制区，活化空气已经基本排空。因此，空气对放射性工作人员的剂量很小，可以忽略。

(2) 活化冷却水管流经的场所，无人员长时间驻留，对放射性工作人员的剂量很小，可以忽略。

(3) 对于加速器设备检修及打包外运的辐射工作人员，其感生放射性分别主要来源于部件的活化，项目采取控制时间、距离和增加个人防护措施等技术手段，结合个人剂量仪定期检测等管理措施，以降低他们受到的辐射剂量。

本项目加速器的感生放射性主要位于束流损失较大处如回旋加速器的 D 盒，回旋引出口的束流管道，能量选择系统的降能片，终端治疗室的喷头以及最后的束流收集器等加速器部件位置。

评价以最大束流强度工况作活化产物分析：质子治疗系统整体调试运行周期 12 周，调试出束时间 240 小时。引出粒子为质子，最大运行能量为 230MeV，回旋加速器 D 盒上损失流强 150nA，引出口上损失的流强 300nA，准直器损失的流强 274nA，狭缝损失的流强 9.4nA，治疗室内末端损失 4.3nA。完成调试后，各部件放射性总活度如下表所示。

表 5.2-42 调试后质子治疗系统各部件放射性总活度汇总表

位置	放射性总活度 (Bq)
回旋加速器大厅 D 盒-Cu	1.50E+10
回旋加速器大厅束流引出口-Cu	2.60E+10
降能器-C/Al/Be	7.20E+09
准直器-Ni	1.45E+11
狭缝-Ta	1.74E+09
治疗舱喷嘴-Cu	6.15E+08
合计	1.50E+10

为保障人员辐射安全，建设单位对本项目需要进入控制区开展调试作业的辐射工作人员采取与用户方调试队伍同样的辐射安全防护措施，主要包括场所屏蔽防护、人员培训、人机安全联锁系统、工作人员剂量控制等四个方面。其中工作人员剂量控制方面，本项目进入控制区开展

部件安装、调试、打包、维修维护等作业的辐射工作人员，均实行累积剂量控制方式，其剂量控制目标为“单次受照剂量不超过 1mSv，每周受照剂量不超过 1mSv，每年进入控制区总受照剂量不超过 3mSv。

3、剂量叠加分析

(1) 调试剂量叠加

职业工作人员及公众个人剂量叠加情况见下表。

表 5.2-43 质子治疗系统区域关注点个人剂量叠加分析

序号	区域描述	西侧加速器调试+ 东侧加速器调试	西侧加速器调试+ 东侧整体调试	个人剂量 叠加 mSv/a	关注点性质
1	1#加速器室西北侧迷道外墙	5.67E-02	1.89E-02	7.56E-02	职业
2	1#加速器室迷道外墙	1.36E-01	4.55E-02	1.82E-01	职业
3	1#加速器室西侧外墙物流区	1.52E-01	5.07E-02	2.03E-01	职业
4	1#加速器室南侧室外	4.86E-02	1.62E-02	6.48E-02	公众
5	2#加速器室南侧室外	1.07E-02	2.13E-02	3.20E-02	公众
6	治疗室东侧室外	1.48E-03	9.59E-03	1.11E-02	公众
7	治疗室迷道入口	2.07E-03	2.62E-01	2.64E-01	职业
8	辅助设备间	2.70E-03	7.32E-02	7.59E-02	职业
9	2#加速器室迷道入口	4.39E-02	8.76E-02	1.32E-01	职业
10	1#加速器室迷道入口	4.39E-02	1.46E-02	5.86E-02	职业
11	控制室	7.03E-04	3.79E-01	3.80E-01	职业

(2) 活化部件所致剂量叠加

本项目需严格控制在加速器、准直器等部件附近进行检修、打包的时间，并通过控制时间、距离和增加个人防护措施等技术手段，结合个人剂量仪定期检测等管理措施，来确保相应辐射工作人员受到的年剂量在与瞬发辐射叠加后低于管理目标值 5mSv/a。

本项目如自行开展部件打包作业，在控制辐射工作人员开展相应作业时，单人所受剂量不超过 3mSv/a 的前提下，叠加所受瞬发辐射剂量，职业人员个人剂量将达到 3.264mSv/a。

4、项目运行期放射性环境影响汇总

(1) 厂区内放射性环境影响

本项目对厂区内工作人员及公众的辐射剂量主要来自瞬发辐射及活化部件近距离辐射，其具体剂量参见表 5.2-40 及表 5.2-41。

经校核，本项目所建设的质子治疗系统屏蔽体的效能符合国家标准规范及本评价提出的限值要求。

经过理论预测，本项目质子加速器生产、调试所致工作人员职业照射剂量最大为 3.264mSv/a（瞬发辐射剂量 0.264 mSv/a，活化部件辐照剂量 3mSv/a），所致公众照射的有效剂量最大为 0.0648 mSv/a，均满足 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》规定的 20mSv/a 的职业照射有效剂量基本限值和 1mSv/a 的公众照射有效剂量基本限值。也低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

（2）厂区外放射性环境影响

本项目对厂区外公众的辐射剂量主要来自放射性废气，其具体剂量分布参见表 5.2-26。

通过预测，本项目排放的放射性废气对周边公众最大落地浓度点位于 WSW（西南偏西）方向 200m 处。通过计算，项目排放的活化气体所致公众个人剂量最大值为 $1.71\text{E-}03\text{mSv/a}$ ，低于评价给出的公众剂量约束值要求（0.1mSv/a），因此，本项目所排放的活化气体对周边公众影响是极其轻微的。

（3）放射性废水环境影响

放射性废水的排放方式为先排到质子治疗系统的废水收集池暂存，建设单位将定时对废水收集池中冷却水进行取样监测，监测合格并经审管部门同意后，排入市政污水管网。

本项目放射性废水严格按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）规范，在监测合格并经审管部门确认的情况下进行

排放，符合放射性废水排放标准，对周边地表水影响是可接受的。

(4) 放射性固废环境影响

本项目预计每年放射性固体废物产生量约 16.8kg，主要为含感生放射性的结构部件。

本项目在厂区西南角设置放射性固废暂存间，暂存间建筑面积 30m²，暂存容积约 75m³。拆除的活化的结构部件按国家规范包装后，集中暂存在该储存间，最终将委托项目所在地城市放射性固废处置中心等有资质的单位处置。本项目放射性固废可获得有效处置，不外排至周边环境，对周边环境无影响。

(5) 电磁辐射环境影响

本项目产生电磁辐射的回旋加速器自身采取了金属壳体电磁屏蔽屏蔽，以避免其对周围环境及仪表产生的电磁辐射影响。

参照亿比亚公司对质子治疗系统运行过程开展的电磁兼容性监测（监测报告见附件），质子治疗系统电磁辐射（电磁发射）符合《测量控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第 1 部分通用要求》（GB/T 18268.1-2010），对周边环境的影响是可接受的。

(6) 其他 X 射线装置辐射影响

本项目 CBCT 图像引导系统以及二维图像系统等 III 类射线装置辐射源强较小，在使用过程中出束照射时间短，且设计有专门的曝光室（旋转治疗室），符合《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）要求，对外环境的辐射影响可接受。

5.2.7 项目运行期非放射性环境影响

5.2.7.1 运行期环境空气影响分析

项目运行过程中的废气主要包括臭氧（O₃）、二氧化氮（NO₂）及焊接烟气。

1、臭氧、二氧化氮

在加速器辐射区，空气中的氧气、二氧化氮（NO₂）和氮气（N₂）均可吸收 γ 射线的辐射能量，发生辐射分解，形成氧原子（O）和一氧化氮（NO）。

其中产生的氧原子（O）与空气中的氧气（O₂）结合生成臭氧（O₃）；产生的一氧化氮（NO）通过与氧气（O₂）或臭氧（O₃）反应生成二氧化氮（NO₂），二氧化氮（NO₂）与空气中的水分子反应生成硝酸（HNO₃）。

其中，产生出的臭氧对人体健康有害，产生出的硝酸可腐蚀加速器设备。参照 NCRP-144 号报告，照射期间，臭氧的浓度满足下面的平衡方程：

$$\frac{dN}{dt} = gI - \alpha N - \kappa IN - \frac{QN}{V} \quad (5.22)$$

式中，各物理量含义如下：

$\frac{dN}{dt}$ ：单位体积单位时间臭氧形成的速率（m⁻³.s⁻¹）；

N：辐照时间 t 后单位体积的臭氧数目 m³；

I：空气中单位体积单位时间的光子能量沉积（eV.m⁻³.s⁻¹）；

g：空气中单位光子能量沉积形成的臭氧分子数目（eV⁻¹）；

α：臭氧分子的化学分解速率（s⁻¹）；

κ：单位光子能量沉积的臭氧分子的辐照离解速率（eV⁻¹.m³）；

Q：通风速率（m³.s⁻¹）；

V：被辐照空气的体积（m³）。

该方程的解为下式：

$$N(t) = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + \frac{Q}{V}} \left[1 - e^{-(\alpha + \kappa I + \frac{Q}{V})t} \right] \quad (5.23)$$

在长时间照射条件下，即上式 $t \rightarrow \infty$ ，得到臭氧的饱和浓度为：

$$N_{\text{sat}} = \frac{gI}{\alpha + \kappa I + \frac{Q}{V}} \quad (5.24)$$

计算中，各物理量参照 NCRP-144 号报告，取值如下：

(1) g 值在高剂量率 ($> 5 \times 10^8 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$) 下取 0.103 eV^{-1} , 低剂量率下取值 0.074 eV^{-1} , 本装置属低剂量率情形, 取后者;

(2) α 和 κ 分别取值 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.4 \times 10^{-16} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^3$;

(3) 通风频率 $\frac{Q}{V}$ 保守取值为 1 次/h (停机状态通风频率);

表 5.2-44 给出了各辐射区在 1 次/h 的通风频率下的臭氧和二氧化氮的饱和浓度和排放速率。

表 5.2-44 各辐射区在 1 次/h 的通风频率下的臭氧和二氧化氮的饱和浓度和排放速率

辐射区	空气体积 $V(\text{m}^3)$	O_3 饱和浓度 (mg/m^3)	O_3 排放速率 (kg/h)	NO_2 饱和浓度 (mg/m^3)	NO_2 排放速率 (kg/h)
加速器调试区	6.29E+02	5.51E-07	4.11E-10	3.42E-07	2.55E-10
整体调试区	1.93E+03	1.14E-10	1.48E-13	7.06E-11	9.17E-14
合计	/	/	4.16E-10	/	2.59E-10

由表 5.2-44 结合国家标准分析如下:

(1) 各辐射区中, 在 1 次/h 的通风频率下, 有害气体浓度最大的是加速器室, 其臭氧和二氧化氮的饱和浓度比《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》(GBZ2.1-2019) 中控制值 $0.3 \text{ mg}/\text{m}^3$ 和 $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ 低多个数量级。在 1 次/h 的通风频率下, 本项目室内有害气体臭氧不会对工作人员造成危害, 1 次/h 的通风频率即可完全满足防治有害气体的要求, 在无温湿度要求的情况下, 无需提高换气频率。

(2) 有害气体排放到环境中去将受到大气的稀释, 本项目排放臭氧造成周围空气中臭氧浓度同样远低于 GB3095-2012 环境空气质量标准中的二级浓度限值; 本项目排放氮氧化物浓度远低于 GB16297-1996 《大气污染物综合排放标准》排放限值。

因此, 臭氧及氮氧化物等的产生和排放对工作场所和周边环境的影响均很微小, 其饱和浓度、排放速率及在环境空气中造成的浓度皆大大低于相应标准规范的控制限值。

2、焊接烟气

本项目 2#生产厂房内组装作业涉及少量焊接工序。本项目焊接工序

主要用于不同部件或部件与支架间的焊接连接，焊接方式为钎焊（铜焊丝配合氧乙炔焊）。

本项目仅设置 1 台钎焊机，年使用铜焊丝约 0.02t，根据经验参数，每公斤焊丝约产生 5-8 g 烟尘，保守取值 8g，则焊接烟尘排放量约为 0.16kg/a。

本项目使用焊机数量少，焊接烟尘产生量极小，且使用时间分散，焊接烟尘排放速率低，焊接烟尘通过焊接设备（钎焊机）自带或另行购置的焊接烟气收集净化装置净化后，由厂房通排风系统排出厂房，对周边环境的影响轻微。

3、有机废气

项目组装测试阶段点胶、擦拭等过程使用的螺纹胶、无水乙醇、丙酮等辅料将产生一定量的有机废气，有机废气采用集气罩收集后，引至 2#厂房楼顶的一套活性炭吸附装置处理后（设计净化效率 90%）排放，排气筒高度 15m。有机废气收集系统排风量以 2000m³/h 考虑，全年工作时间以 2000 小时（8 小时/天，250 天/年）估算，有机废气排放浓度为 1.351mg/m³，排放速率为 0.022kg/h，低于 DB51/2377-2017《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》表 3 “第二阶段排气筒挥发性有机物排放限值（常规控制污染物项目）”中最高允许排放浓度 60 mg/m³，15m 排气筒最高允许排放速率 3.4kg/h 的限值要求，对周边大气环境影响是可以接受的。

5.2.7.2 运行期水环境影响分析

本项目运行期废水主要为清洗废水及人员生活污水。清洗废水集中收集暂存于废水暂存池中，定期交有资质的单位收运处理；人员生活污水经预处理后排入当地市政污水管网，对周边地表水无影响。

5.2.7.3 运行期声环境影响分析

项目运行过程中的噪声源主要为冷水机组、冷却水泵及通排风机噪声。噪声源强约为 65dB(A)~90dB(A)。

表 5.2-45 噪声源强及控制措施表 单位 (dB(A))

序号	设 备	噪声源所在位置	数量	声级范围	控制措施	降噪效果 (dB (A))
1	新风机组	质子治疗系统 1#生产 厂房空调机房	1	80-90	选用低噪声设备， 减振基座，墙体隔 声	10-15
2	冷却水泵	质子治疗系统 1#生产 厂房冷却水设备间	2	80-90	选用低噪声设备， 减振基座，墙体隔 声	10-15
3	通排风机	质子治疗系统 1#生产 厂房通风设备间	2	65-75	选用低噪声设备， 减振基座，墙体隔 声	5-10
4	恒温恒湿 机组	质子治疗系统 1#生产 厂房外	16	65-75	选用低噪声设备， 减振基座	5-10

评价标准采用《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008) 的 3 类标准值。

从噪声源到受声点的噪声总衰减量，是由噪声源到受声点的距离、墙体隔声量、空气吸收及建筑屏障的衰减综合而成。为保守计，本预测只考虑距离的衰减和建筑墙体的隔声量，考虑到各噪声源距离厂界预测点的距离，将噪声源简化为点声源处理。

根据本项目噪声源的分布，对厂址的厂界四周进行预测计算，将各个厂界的预测值与背景值进行叠加，与所执行的标准进行比较。

表 5.2-46 厂界噪声预测结果表 单位: dB (A)

厂界 项目	源强	南面厂界		西面厂界		北面厂界		东面厂界	
		昼间	距离 m	昼间	距离 m	昼间	距离 m	昼间	距离 m
新风机组	80	58.4	12	46.9	45	38.1	125	43.5	67
冷却水泵	83	50.5	42	49.0	50	43.4	95	47.4	60
通排风机	68	46.4	12	34.9	45	26.1	125	31.5	67
恒温恒湿 机组	77	57.0	10	42.2	55	34.9	127	46.4	34
预测值		61.3	/	51.7	/	45.0	/	50.9	/
标准限值		65							
达标分析		达标		达标		达标		达标	

经预测，本项目排放噪声均能够满足 GB12348-2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》3类标准限值要求。

5.2.7.4 运行期固体废弃物影响分析

项目质子治疗系统运行过程中，在组装、调试、检修等阶段将产生一定量的工业废物，年产生量预计约 100kg/a，主要为废包装材料、不含放射性的不合格部件等，经集中收集后，与人员生活垃圾一并交环卫部门清运处理。

同时，本项目在设备调试、检修过程中将产生一定量废润滑油、废含油棉纱、废含油手套等废物，年产生量预计约 50kg/a。该部分废物属于危险废物，废物类别“HW08 废矿物油与含矿物油废物”，建设单位拟将其集中收集至危险废物暂存桶中，暂存至 2#生产厂房危险废物暂存间，定期交由有资质单位回收。

由上述分析可以得知，本项目所产生的固体废弃物均得到了有效处置，不会对周边环境造成负面影响。

5.3 事故影响分析

根据本次评价主要对项目拟配置的质子治疗系统在使用过程中可能发生的辐射事故进行分析，预测其环境影响后果。

5.3.1 事故谱

对本项目质子治疗系统的操作使用进行分析，得出项目运行期间可能发生的各类辐射事故见表 5.3-1，同时在表 5.3-1 中简要描述了事故的原因、可能导致的后果以及事故的预防减缓措施。

表 5.3-1 本项目运行期间潜在事故（事件）一览表

序号	事故（事件）描述	可能原因	后果	减缓措施	主要预防措施
1	加速器大厅端误入	①分区管理失效； ②安全连锁装置失效； ③工作人员误操作。	误入人员受到超过年剂量照射，导致急性放射病或死亡发生（重大事故）	①立即停止出束； ②启动辐射事故应急预案； ③划出警戒线，疏散非事故处理人员； ④进行现场辐射环境监测 ⑤对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施。	①加强分区管理和巡察力度； ②定期对安全连锁的有效性进行检查； ③加强工作人员的技能培训与考核； ④严格按照安全操作规程进行操作。
2	加速器治疗室人员误入	①分区管理失效； ②安全连锁装置失效； ③工作人员误操作。	误入人员受到超过年剂量照射，导致急性放射病或死亡发生（重大事故）	①立即停止出束； ②启动辐射事故应急预案； ③划出警戒线，疏散非事故处理人员； ④进行现场辐射环境监测 ⑤对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施。	①加强分区管理和巡察力度； ②定期对安全连锁的有效性进行检查； ③加强工作人员的技能培训与考核； ④严格按照安全操作规程进行操作。
3	加速器大厅、束流输运线及治疗室通风系统故障	①断电； ②风机故障； ③人员误操作造成停机。	增加工作人员和公众照射（一般事故）	①立即停止出束，对通风系统进行检查、维修； ②检查风机，若发生故障，立即维修或更换。	①加强检查和监测； ②定期对风机进行检查； ③设置备用风机和备用电源； ④加强管理和培训。

4	加速器冷却水泄漏	①设备老化破损； ②自然灾害（地震）； ③火灾，人为误操作导致破坏	增加工作人员和公众照射 （一般事故）	①立即停止出束，启动排水泵，通过屏蔽体内设置的地面排水管，将泄露的冷却水排入冷却水机房中的废水收集池。 ②对冷却水系统进行检查、维修。	①加强检查和监测； ②定期对冷却水系统、地面排水系统进行检查； ③加强管理和培训。
---	----------	---	-------------------------------------	--	---

5.3.2 最大可信事故的影响

对表 5.3-1 所列事故进行分析, 综合考虑装置类别、事故类型、事故所致辐射影响后果等因素, 本次评价认为误入事故后果较为严重, 发生概率较高, 是本项目的最大可信事故。评价通过对误入事故的辐射影响后果预测计算与分析评价, 来反映本项目的最大辐射事故影响。

1、事故情景假设

由于回旋加速器的门机联锁安全装置失效, 有人员在加速器运行期间误入治疗终端或加速器大厅。

2、事故后果计算

误入治疗终端的人员可能受到质子束流的直接照射, 也可能受到质子束流损失产生的次级中子的辐射; 误入加速器大厅的人员可能会受到质子束流损失产生的次级中子的辐射。

1) 对受到质子束直接照射的误入人员的辐射影响

误入人员身体局部(或某器官)受到质子束流的照射; 误入人员位于治疗终端等中心处, 治疗终端等中心处的辐射剂量率按同类质子治疗系统设计最大剂量 1.36Gy/min 计; 则误入人员身体局部(或某器官)受到的辐射剂量如下表所示。

表 5.3-2 质子束直接照射的误入人员受照剂量值

距源距离 (m)	各事故持续时间段的中子所致有效剂量率 (Sv)					
	10s	30s	1min	2min	3min	5min
0.5	0.91	2.72	5.44	10.88	16.32	27.20
1	0.23	0.68	1.36	2.72	4.08	6.80
2	0.06	0.17	0.34	0.68	1.02	1.70
5	0.01	0.03	0.05	0.11	0.16	0.27

注: 根据《辐射防护手册(第五分册) 辐射危害与医学监督》表 6.35 “急性放射病的六度分类”, 人体短时间受到 15Gy 以上照射剂量, 死亡率将达到 100%, 因此, 评价不再对更长时间条件下, 检修人员事故剂量值进行预测。

2) 对受到中子辐射的误入人员的辐射影响

误入人员处于质子束流损失产生的次级中子辐射场中, 身体受到全身照射; 误入人员位于距质子束流损失点 0.5m 处; 距质子束流损失点

0.5m 处中子场辐射剂量按最大 0.014Gy/min 计；则误入人员受到的全身照射剂量如下表所示。

表 5.3-3 次级中子辐射场照射的误入人员受照剂量值

距源距离 (m)	各事故持续时间段的中子所致有效剂量率 (Sv)					
	10s	30s	1min	2min	3min	5min
0.5	0.002	0.007	0.014	0.028	0.042	0.070
1	0.001	0.002	0.004	0.007	0.011	0.018
2	1.46E-04	4.38E-04	8.75E-04	1.75E-03	2.63E-03	4.38E-03
5	2.33E-05	7.00E-05	1.40E-04	2.80E-04	4.20E-04	7.00E-04

3、事故后果评价

根据《实用辐射安全手册》(丛慧玲, 北京: 原子能出版社.2007.8) 给出的主要组织、器官发生确定性效应的阈剂量水平 (见表 5.3-4)。

表 5.3-4 急性放射病的发生率、死亡率与辐射剂量的关系

辐射剂量/Gy	急性放射病发生率%	辐射剂量/Gy	死亡率/%
0.70	1	2.00	1
0.90	10	2.50	10
1.00	20	2.80	20
1.05	30	3.00	30
1.10	40	3.20	40
1.20	50	3.50	50
1.25	60	3.60	60
1.35	70	3.75	70
1.40	80	4.00	80
1.60	90	4.50	90
2.00	99	5.50	99

本项目若发生回旋加速器误入事故, 人员误入治疗室若受到质子束直接照射, 可能导致人员死亡; 人员误入加速器大厅, 则可能受到超剂量照射。

根据《放射源同位素与射线装置安全和防护条例》(国务院令第 449 号) 的规定, 本项目若发生回旋加速器治疗终端误入和加速器大厅误入的情况, 可导致发生**重大辐射事故**。

5.3.3 应急响应

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管

理办法》的相关规定，项目单位应根据可能发生的辐射事故风险，制订完善的辐射事故应急预案，主要内容应包括：应急处理机构职责、具体应急措施、应急救援条件保障、事故分级、应急响应、应急能力保持、应急工作人员的防护等。

在制定上述辐射事故应急预案的基础上，环评要求：

（1）项目建成后应立即确认完善应急处理领导小组人员名单及联系方式；

（2）补充对参与实施应急的人员的培训计划；

（3）针对可能发生的每一种辐射事故，补充细化事故的应急处理措施，并将事故应急措施操作要点设置在相应工作场所的醒目位置（措施上墙），方便工作人员及时采取正确的应对措施；

（4）细化辐射事故的调查、报告与处理程序，特别是与消防、公安等部门联系获取支援的程序；

（5）补充发生辐射事故的信息公开、公众宣传方案。

第六章 辐射安全管理

本报告依据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第二章第十六条对辐射安全许可证申领单位的要求，对申请者中广核医疗科技（绵阳）有限公司从事相应辐射活动的技术能力、辐射安全和防护措施等分析评价如下。

6.1 机构与人员

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，应当设置专门的辐射安全与环境保护管理机构，或至少安排 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。

同时，根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发〔2015〕25 号）第一条第三款“生产、使用放射性药物且场所等级达到甲级的单位，非医疗使用 I 类源单位，销售（含建造）、使用 I 类射线装置单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，**最少在岗人数 1 名。**”结合本项目申请的核技术应用类型（有申请生产、销售、使用 I 类射线装置），本项目应至少配备 1 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人。

项目单位应按此要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。

6.1.1 辐射工作人员培训

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，申请者应对从事辐射工作的人员（本项目为放射诊疗设备的操作人员、相关的工作人员以及项目单位的辐射防护管理人员）进行辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训，并进行考核，合格后持证上岗。

本项目回旋加速器（为 I 类射线装置）的相关工作人员应当通过辐

射安全培训并考核合格执政上岗。取得辐射安全培训合格证书的人员，若要继续从事辐射工作，应当每 5 年接受一次复训。

项目单位拟从事辐射工作的人员需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，方可满足要求。

6.1.2 辐射工作场所

本项目设计建造质子治疗系统的治疗室或机房，经预测分析评价，治疗室或机房的屏蔽设计满足辐射防护要求；治疗室或机房设计采用安全联锁装置等防止误操作、防止工作人员和公众意外照射的安全措施；且设计采取出入门禁、视频监控等实体保卫措施。项目的设计方案满足辐射防护与安全、以及放射性固废的安全存放要求。

项目单位应按照设计方案进行施工建设，经验收合格后投入使用。在此基础上，辐射工作场所硬件设施满足辐射防护与安全、以及放射性固废安全存放要求。

6.2 辐射安全管理规章制度

申领者应有健全的设备操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、射线装置使用台账、人员培训计划、工作人员个人剂量监测与管理、工作场所辐射监测方案等。

项目单位应按此要求，为每台/套放射诊疗设备或其使用场所，制订相应的设备操作规程、岗位职责和设备检修维护制度；制订全单位的辐射防护和安全保卫制度、人员培训计划以及工作人员个人剂量监测与管理制度；制订合理有效的工作场所辐射监测方案等。在此基础上，项目单位的各项操作规程与管理制度是满足要求的。

6.2.1 放射性“三废”处理

本项目设计采取通排风系统排出回旋加速器运行产生的少量感生放射性气体，排出的感生放射性气体对环境和公众的辐射影响很小。设

计采用设置放射性固体废物暂存间，规范收集、包装、暂存产生的少量感生放射性固体废物，并及时送交有资质单位处置；放射性废水均贮存衰变经监测达标后，经有关监管部门同意方可外排。项目设计采取的“三废”治理措施/方案可行。

6.2.2 辐射安全与防护监督检查

为了规范本项目辐射安全与防护监督检查工作，进一步提高辐射安全现场监督检查，推动本项目辐射安全监管工作科学化、制度化、精细化管理，根据本项目的实际情况及环保部辐射安全管理司制定的《辐射安全与防护监督检查技术程序》（第三版）内容得出以下项目辐射安全与防护监督检查表 6.2-1、表 6.2-2。

表 6.2-1 质子（重离子）加速器治疗场所监督检查表

A场所内的安全与联锁设施

序号	检查内容	加速器厅与传输通道		治疗装置机架室		治疗装置室	
		设施	状态	设施	状态	设施	状态
A1*	监控摄像头	已设计	/	已设计	/	/	/
A2	语音提示装置	已设计	/	已设计	/	/	/
A3*	加速器运行状态显示	已设计	/	已设计	/	/	/
A4*	准备出束铃声警告	已设计	/	已设计	/	/	/
A5*	巡更清场联锁	已设计	/	已设计	/	/	/
A6*	固定的剂量监测探头（ γ 、n量）	已设计	/	已设计	/	/	/
A7	1* 紧急停机按钮	已设计	/	已设计	/	/	/
	2 有自锁的复位按钮	已设计	/	已设计	/	/	/
	3 按钮处醒目标识	已设计	/	已设计	/	/	/

A8*	束流转向及传输出口闸门联锁	已设计	/	已设计	/	/	/
A9	闸门开、关状态显示	已设计	/	已设计	/	/	/
A10	1 独立的通风设施	已设计	/	已设计	/	/	/
	2 通风设施联锁	已设计	/	已设计	/	/	/
A11	部件活化较高剂量率区的放射警示标志	已设计	/	已设计	/	/	/
A12	火灾报警系统	已设计	/	已设计	/	/	/

B出入口与防护门的安全设施

序号	检查内容	加速器厅与传输通道		治疗装置机架室		治疗装置室	
		设施	状态	设施	状态	设施	状态
B1*	门外加速器工作状态显示	已设计				已设计	
B2*	门外电离辐射警示标志	已设计					
B3	门内紧急开门按钮	已设计					
B4*	门与加速器高压触发联锁	已设计					
B5	1* 开门钥匙开关	已设计					
	2* 门禁系统 刷卡出入	已设计					
	3 读卡记录进入人员编码、总数	已设计					
	4 人员总数清零与出束连锁	已设计					
B6*	门与束流传输出口闸门及粒子束联锁	已设计					
B7*	门与场所的辐射剂量率联锁	已设计					
B8*	门与通风联锁	已设计					
B9	停束后延时开门联锁	已设计					
B10	1* 治疗装置室紧急开门设施（门外）	已设计					
	2* 治疗装置室紧急开门设施（控制台）	已设计					

序号	检查内容	安全门		物品门	
		设施	状态	设施	状态
B11*	设备门外出束状态显示	已设计	/	/	/
B12*	门外显著位置电离辐射警示标志	已设计	/	/	/
B13*	门机连锁	已设计	/	/	/
B14	控制台显示门的开关状态	已设计	/	/	/
B15	安全门内紧急开门	已设计	/	/	/
B16	1 物品门内机械锁	/	/	/	/
	2 机械锁钥匙专人严管	/	/	/	/

C 控制台的安全设施

序号	检查内容	设施	状态
C1*	束流钥匙开关	已设计	/
C2*	固定监测点场所剂量读出	已设计	/
C3*	摄像监控图像屏幕显示	已设计	/
C4*	语音广播系统	已设计	/
C5*	紧急停束按键	已设计	/
C6	束控部件工作状态显示	已设计	/
C7*	对讲机和电话通讯设备	已设计	/
C8	治疗剂量和时间控制与显示	已设计	/
C9*	场所辐射安全设施工作状态显示	已设计	/
C10	准予复位按钮	已设计	/

D 加速器设备束控部件的工作状态显示

序号	检查内容	设施	状态
D1	离子源供电电源	已设计	/
D2	加速器调频调制器	已设计	/
D3	能量选择系统入口束闸	已设计	/
D4	能量选择系统出口束闸	已设计	/
D5	独立的安全控制系统	已设计	/

E 剂量监测设备

序号	检查内容	设施	状态
E1*	个人剂量报警仪（台数）	拟配备	/
E2*	γ 射线和中子个人剂量计	拟配备	/
E3*	便携式 γ 射线和中子剂量监测仪	拟配备	/

E4	放射性物质表面污染监测仪	拟配备	/
E5*	控制区固定式辐射剂量监测仪	拟配备	/
E6	环境 γ 或中子固定式辐射剂量监测仪	拟配备	/

F 活化产物与其它

序号	检查内容	设施	状态
F1	通风系统与火灾报警系统联锁	已设计	/
F2	特种气体和易燃易爆气体探测器	拟配备	/
F3	不间断电源配置	拟配备	/
F4	治疗装置可移动部件移动中的音响警告	已设计	/
F5	治疗控制条件与调试计划一致性验证联锁	已设计	/
F6	控制区内有对讲机和电话通讯设备	已设计	/
F7	1 更换下来的活化部件专门处所存放	已设计	/
	2 已存有活化部件局部屏蔽	已设计	/
	3 患者专用模块专门存放	已设计	/
F8	一回路冷却水备用存储池	已设计	/
F9	用过的去离子树脂专设存放处	已设计	/

表 6.2-2 III类医用射线装置生产、使用场所监督检查表

序号	检 查 项 目	设计 建造	运行 状态	备注
1*	A 场 所 设 施	隔室操作或防护屏	已设计	/
2*		观察窗防护	/	/
3*		门窗防护	已设计	/
4*		候诊位设置合理或有合适的防护	/	/
5		辅助防护用品	/	/
6		通风设施	已设计	/
7*		入口处电离辐射警示标志	已设计	/
8*		入口处机器工作状态显示	已设计	/
9*	B 其 它	个人剂量计	拟配备	/
10		灭火器材	拟配备	/

6.3 辐射监测

本项目辐射防护监测包括工作场所辐射水平监测、辐射工作人员个人剂量监测和环境监测三个方面。根据回旋加速器的辐射场的特点，工作场所辐射监测系统拟采用建设单位自行监测结合委托有资质单位监测的方案。

6.3.1 工作场所辐射水平监测

本项目回旋加速器和其他放射诊断设备（射线装置）工作场所辐射防护监测分别描述如下。

1、验收监测：本项目竣工后，建设单位自行开展环境保护竣工验收监测，对加速器机房区域进行全面的辐射水平巡测，做出辐射安全状况的评价；监测因子为环境 X- γ 辐射剂量率、 α/β 表面污染、中子剂量率及各人工核素等。

2、年度监测：对辐射场所监督区域进行年度例行监测，每年 1 次，委托有资质单位开展相应监测工作。

3、日常监测：为了保障加速器日常的的安全管理工作，本项目在运行过程中，除了完成年度的监测工作外，还应定时进行日常例行监测，对辐射场所监督区域进行监测。

4、巡测：定期（每周）对加速器机房周围进行剂量率水平的巡测，在辐射源项增强时（测试能量提升、测试束流强度提升）应同步开展额外巡测。在巡测时，对各关注点的局部屏蔽和缝隙进行重点检测，包括机房的四面墙体、顶棚、机房的门、观察窗、管线洞口等。若监测数据发现异常，立即暂停辐射工作，及时查找原因，维修妥善解决并经检测符合标准要求后方可继续开展辐射工作。

5、质子治疗系统工作场所辐射水平监测系统

（1）工作场所辐射水平监测系统组成

工作场所辐射剂量监测系统可以有效监测放射性装置工作场所的剂量水平，切实保护放射性装置工作人员的安全，防止辐射事故的发生。

建设单位配备了固定式和移动式工作场所辐射水平监测系统。

固定式工作场所辐射剂量监测系统结构如图 6.3-1 所示。系统包括中控系统、数据采集管理网络、场所伽玛监测器、场所中子监测器等组成部分。移动式工作场所辐射水平监测系统由移动式中子监测器和移动式伽玛监测器组成。

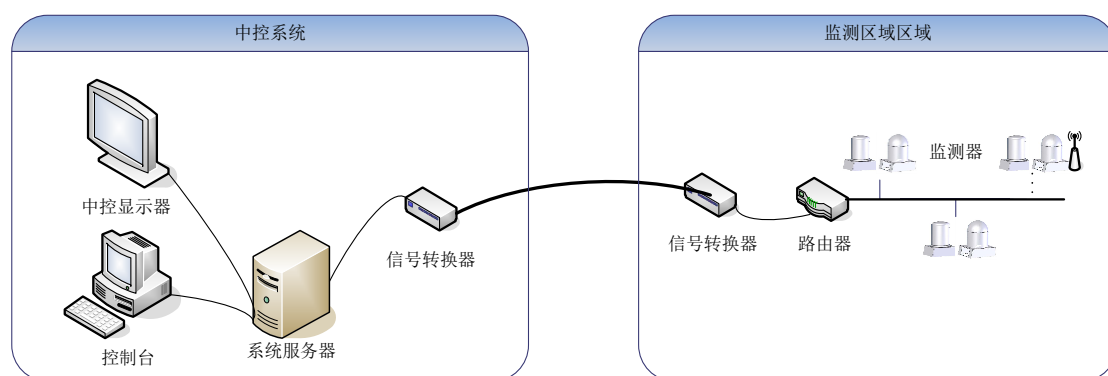


图 6.3-1 工作场所辐射剂量监测系统

(2) 工作场所剂量监测布点

工作场所辐射剂量监测系统关注的是工作人员的受照射情况，需要根据工作人员的活动特点和辐射场情况决定监测点的位置。有两类位置是重点监测对象，一类是高辐射水平场所的出入口，例如治疗室迷道，这类位置的监测点可以让工作人员在进入高辐射水平场所之前先了解场所内的辐射场强度，避免加速器开机时误入造成的过量照射；另一类是临近高辐射水平场所人员活动密集的位置，例如治疗室的控制间，有人长时间在其中工作，需要实时监测辐射剂量率，确保工作环境安全。

本项目固定式工作场所辐射剂量监测系统拟设 19 个监测点，每个监测点由一台中子和一台伽玛监测器组成。监测点分布见图 6.3-2。

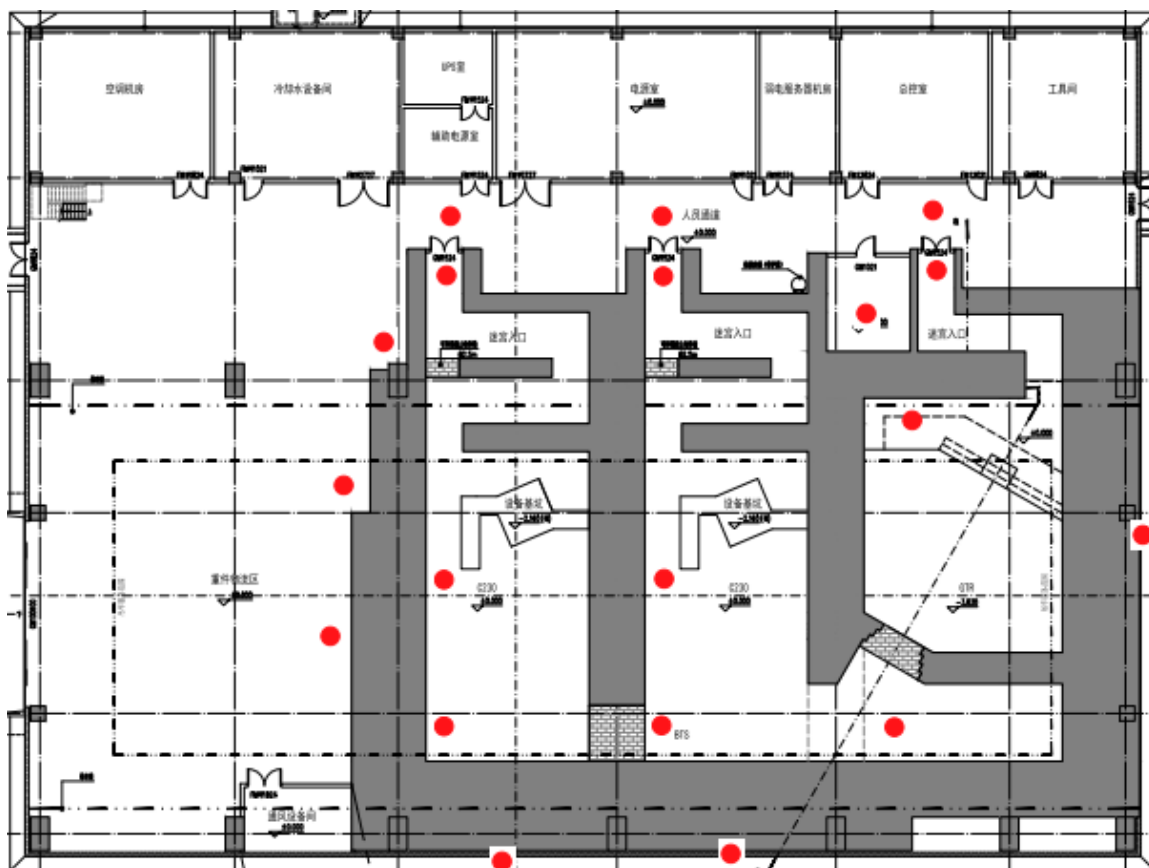


图 6.3-2 固定式工作场所辐射剂量监测点位置分布

(3) 监测项目、监测时段、监测频次

监测项目：X- γ 辐射剂量率、中子剂量当量率

监测时段：质子治疗系统设备开机至加速器设备关闭后 1 小时。

监测频次：固定监测点实时监测、移动式监测设备定期（每周）巡测，辐射源项增强时开展额外巡测。

监测管理：移动式监测设备定期监测时，对监测记录异常形成记录，立即上报并开展排查处置。

6、CBCT 图像引导系统及二维图像系统调试工作场所辐射水平监测

CBCT 图像引导系统及二维图像系统调试工作区为旋转治疗室，依

托整体运行所配置的监测设备开展监测作业，不再独立布置监测计划。

6.3.2 个人剂量监测

1、体检

辐射工作人员上岗前需进行职业健康体检，工作过程中，按照《放射工作人员健康要求及监护规范》（GBZ98-2020）要求，每 2 年进行一次职业健康体检，身体条件无法满足辐射工作岗位的要求，及时予以调离。离岗前需进行离岗职业健康体检。

1、质子治疗系统

（1）个人剂量计

工作人员上岗时均应佩戴 X- γ 照射剂量计与全能谱中子剂量计。定期委托有资质部门对工作人员的个人剂量计进行测量、读数与统计。

（2）个人剂量报警仪

在工作中或停机后，要求到控制区内进行维护工作的人员佩戴可监测中子和 γ 照射剂量的个人剂量报警仪是十分必要的。个人剂量报警仪可以瞬时辐射剂量至超出设定阈值时报警提示工作人员迅速撤离现场。这对评价工作人员在控制区内工作所受到的辐射剂量非常重要。个人剂量报警仪和个人剂量计配合使用，不仅能准确评价工作人员所受辐射情况，更主要的是可以预先估计工作人员受到的照射水平，及时采取措施，以达到保护工作人员的目的。

2、其他射线装置

CBCT 图像引导系统及二维图像系统的辐射工作人员也将在治疗室控制室内工作，个人剂量计及个人剂量报警仪配置与质子治疗系统辐射工作人员一致。

建设单位应委托有资质的机构定期（必须每季度一次）对工作人员的个人剂量计进行测量、读数与统计，结果记入工作人员个人剂量档案。

6.3.3 环境剂量监测

环境剂量监测的内容包括：环境辐射监测系统、水气流出物放射性活度检测、低活度环境样品检测和环境本底调查等。其中，环境本底调查应在本项目质子加速器运行前 1 至 2 年开始进行，一直延续到本项目质子加速器正式运行后 3 到 5 年，用以评价本项目质子加速器装置对其周围环境的影响。

1、环境剂量监测系统

对装置运行期间的环境杂散辐射的监测，是使用与场所辐射监测相同的连续监测方法。中子探测器可采用包有慢化体的 BF₃ 正比计数管，它具有较好的中子、 γ 分辨率，能对入射的脉冲中子进行慢化，使中子脉冲宽度展宽。灵敏度为 $17.0 \pm 3 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s}$ ，量程范围 $2\text{E-}03 \sim 20 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ 。伽玛监测器选用 EM-250 型环境辐射水平高气压电离室，它属单片机控制智能恒温式探测器。其灵敏度为 0.11 cpm/nSv/h ，能响范围 $50 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$ ，测量范围为 $0.01 \sim 1\text{E}4 \mu\text{Sv/h}$ 。监测器设在项目新建的环境监测站内，监测数据通过无线传输方式传输、贮存到本项目质子加速器辐射剂量监测系统中。本项目质子治疗系统环境剂量监测系统拟设置 4 个环境监测站。站点布置见图 6.3-3。

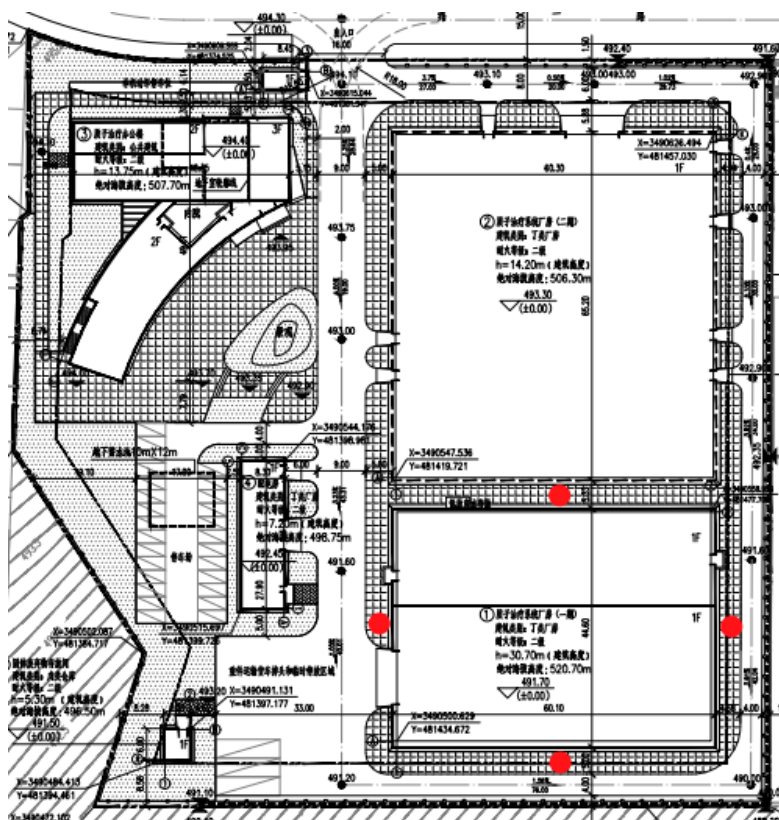


图 6.3-3 环境剂量监测站点位置分布（最东侧为参考站位置）

2、水、气流出物活度监测

本项目质子加速器所产生的感生废弃和冷却系统活化水中的活度浓度采用 γ 能谱法进行测量。监测系统包括：低本底铅室、高纯锗探测器、气体采集回路等组成。空气中气体放射性浓度监测采用同加速器运行同步的在线连续测量，冷却系统水的活化浓度采用离线采样测量。处理数据用专用多道分析器和 PC 机。

空气中气体放射性浓度监测的取样点应合理设置取样点，在 1#厂房排放口及厂区外敏感点位置。

冷却系统水中的浓度监测，为定期（半年）在冷却系统水中取样，进行 H-3 和总 β 的测量。由于冷却系统泄漏（或检修排水）而产生的放

射性废水，将收集到专用活化水池中，排放前将取样监测。

3、辐射环境监测计划

根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）表 12 的规范要求，本项目辐射环境监测计划如下表所示。

表 6.3-1 项目辐射环境监测计划表

监测对象	点位布设	监测项目	监测频次	
			运行前/次	运行期间(次/年)
外照射	环境敏感点	γ 辐射空气吸收剂量率	1	连续
		中子剂量当量率	1	1
	加速器主体建筑墙外 30cm 处开展巡测。选择主体建筑墙外、楼顶及厂界相应的关注点开展定点监测	γ 辐射空气吸收剂量率	1	1
		中子剂量当量率	1	1
空气	加速器主体建筑楼顶，环境敏感点	^{14}C	1	1
气溶胶/活化气体	厂内建筑物楼顶，厂外敏感点	^7Be	1	1
土壤	厂界四周，厂外敏感点	总 β 、 ^7Be	1	1
地表水	厂区周边地表水	总 β 、 ^7Be	1	1
地下水	厂区周边地下水	总 β 、 ^7Be	1	1
生物	厂区周边	总 β 、 ^7Be	1	1
循环冷却水	/	总 β 、 ^7Be	1	1
固体废物外表面	/	γ 辐射空气吸收剂量率	/	1
		^7Be 、 ^{54}Mn	/	收集及送贮时

6.3.4 监测的质量保证体系

本项目环境放射性监测的对象为低水平环境辐射场的测量与低放射性核素含量样品的测量。采取切实的质量保证措施保证监测结果的正确性是至关重要的。为了保证监测点的可重现性以及监测结果达到规定的准确度和精密度的要求，在将来的监测中拟采取以下的措施和手段。

1、样品采集、运输、贮存中的质量控制

(1) 环境样品的采样计划和程序

①采样点的选择要避开一些有干扰的、代表性差的地点，选择合理的采样时间、频率和方式。

②严格制定出各类样品的采样、包装、运输和贮存的详细操作程序，

例如操作步骤、记录方法、格式、标签等。尽量采用国家或国际标准程序。

（2）样品的采集和制作

在样品的采集和制备中准确地测量样品的重量、体积或流量，其误差控制在国家标准中规定的值 $\leq 10\%$ 。采空气和水样时，其采样装置的流量计至少每年校准一次，收集效率原则上采用厂家给出的数据。

（3）采集平行样品

在采集样品的同时，定期采集平行的瞬时样品，在平行样品上标上采样地点和时间并进行平行测量，以确定采样的不确定度，数量占常规样品总数的 5%~20%。

（4）保留被测样品

环境样品分析测量后做上标记以保存备查，运行前本底调查样品部分保存到本项目退役后十年。

2、分析测量中的质量控制

（1）样品预处理和分析测量方法采用国家规定的标准方法，或者是经过鉴定和验证过的方法。

（2）分析测量实验室和仪器设备使用时应把环境样品和流出物样品分开使用，避免交叉污染。

（3）在每批环境样品中抽出部分样品(占总样的 5~10%)，进行平行样测量，另外要定期分析标样和空白样，以确定分析测量过程中的不确定度。

（4）准确地配制载体和标准溶液，使用的试剂要检查质量。

（5）经常参加国家和有关主管部门组织的实验室间的各种比对活动及国际比对。

（6）分析测量系统定期进行核定、校正和检验。更换仪器时新旧两

种仪器应进行比对测量，使新旧仪器的测量数据有可比性。

(7) 每个环境样品测量的相对标准偏差控制在 5%~10%以保证其有足够精密度。

3、数据的记录、处理和管理

(1) 每个样品从采样、预处理到分析测量、结果计算全过程中的每一步都清楚、详细、准确的记录。记录格式、标签等统一要求。

(2) 测量仪器的检定、维修，实验室间的比对结果，各种标准源的使用情况等详细、准确的记录。

(3) 测量数据的处理尽量采用国家标准方法，减少处理过程中产生的误差。计算后要进行审核。

(4) 环境监测结果保存到本供热堆退役后十至几十年。

(5) 环境监测中采用的量、单位和符号统一按国家颁布的标准。

4、对监测人员的质量要求

从事环境监测工作的人员，选有一定专业知识，大专以上文化程度，有一定工作能力的人来承担。并且经常进行技术培训、考核、鉴定等工作，使从事监测人员不断提高操作技术，适应不断发展的技术水平。

5、完善质保监督制度

成立质量保证的检查、核查组织机构。定期核查有关质量保证计划的执行情况和计划的有效性。对存在问题采取改进措施，使质量保证计划不断完善。

以上辐射监测系统的设置可以满足本项目的辐射环境监测需求。

6.4 辐射事故应急

建设单位应根据可能发生的辐射事故风险，制订完善的辐射事故应急预案，主要内容应包括：应急处理机构职责、具体应急措施、应急救援条件保障、事故分级、应急响应、应急能力保持、应急工作人员的防

护等。在制定上述辐射事故应急预案的基础上，建设单位应当：

（1）项目建成后应立即确认完善应急处理领导小组人员名单及联系方式；

（2）完善对参与实施应急的人员的培训计划；

（3）针对可能发生的每一种辐射事故，给出事故的应急处理措施，并将事故应急措施操作要点设置在相应工作场所的醒目位置（措施上墙），方便工作人员及时采取正确的应对措施；

（4）明确辐射事故的调查、报告与处理程序，特别是与消防、公安等部门联系获取支援的程序；

（5）配备发生辐射事故的信息公开、公众宣传方案。

6.5 辐射工作能力综合评价

对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（环境保护部令第3号）第二章第十六条之规定，针对中广核医疗科技（绵阳）有限公司从事申请活动种类（生产、使用、销售Ⅰ类、Ⅲ类射线装置）的能力进行综合分析评价，结果见表6.4-1。

表 6.4-1 辐射安全工作条件与本项目评价结果对照一览表

序号	环境保护部令第3号要求	评价结果
1	使用Ⅰ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名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	项目单位应按要求建立健全辐射安全与环境保护管理机构，配备齐相应资质的专业人员，方可满足要求。
	依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	项目单位已备有1名注册核安全工程师，方可满足要求。
2	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。	项目单位拟从事辐射工作的人员需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，方可满足要求。
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	本项目不涉及

4	放射性同位素与射线装置使用场所所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施	设计满足要求
5	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，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。	设计满足要求
6	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。	制订完善后满足要求
7	有完善的辐射事故应急措施。	制定完善后满足要求
8	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	设计满足要求
9	使用放射性同位素和射线装置开展诊断和治疗的单位，还应当配备质量控制检测设备，制定相应的质量保证大纲和质量控制检测计划，至少有1名医用物理人员负责质量保证与质量控制检测工作	按要求配备人员、制订相应的质保体系后满足要求

6.5 小结

依据本章节分析，通过完善环评要求的各项措施后，建设单位中广核医疗科技（绵阳）有限公司具备从事使用、销售（含建造）Ⅰ类射线装置，生产、使用、销售Ⅲ类射线装置的技术能力，辐射安全和防护措施有效可行。

第七章 利益和代价简要分析

7.1 利益分析

7.1.1 社会效益

质子和重离子肿瘤治疗技术是目前国际上较先进和成熟高端医疗技术，是肿瘤治疗的主要手段之一。国际上仅有少数国家具有研发与生产质子和重离子肿瘤治疗装置能力，建成的质子和重离子肿瘤治疗机构主要分布在发达国家，亚洲地区主要在日本、韩国和台湾等地。

我国很重视质子技术的引进和研发。1995 年国家科委启动了国家攀登计划“核医学与放射治疗中先进技术的基础研究”，明确了我国发展先进放射治疗技术基础研究的战略。

2002 年，中国淄博万杰肿瘤医院在世界银行国际金融组织的支持下，投巨资引进世界上最先进的质子治疗设备而组建成国内第一家质子治疗中心，于 2004 年 12 月建成并开始治疗患者，至今已治疗了大量患者，取得了较好的效果。

2005 年医疗质子加速器的研制被列入国家科研计划。随着我国国民经济的飞速成长，人们对保健医疗要求的不断提高，上海、北京、合肥等地的一些有条件的大医院均在积极引进建造质子治疗中心。

本项目的实施有利于项目所在地产业结构的调整和医疗水平的提高。也有利我国高端制造业的发展。

本项目建成后，将有力的提升绵阳市乃至四川省的医疗水平，可满足绵阳市及周边乃至全国人民群众的就医需求，对促进社会基础设施建设有着重要而深远的意义，对四川省的医疗卫生事业发展也将起到极大的推动作用，从而提高社会效益。

7.1.2 直接效益

本项目预计的直接经济利益如下：

目前，欧美、日本质子治疗加速器销售价格在 4000-5000 万美元之间，本项目建成后每年可以实现销售收入 21130 万元，实现利润约 4387 万元，项目具有较好的经济效益，同时不确定性分析表明该项目具有一定的抗风险能力。

7.1.3 环境效益

本项目建成后，各建筑掩映在绿树、鲜花、芳香、绿地之中，形成安静优美的环境，并达到建筑与绿化的和谐统一，是一座花园式的绿色研发工程，极大地改善了区域景观及生态环境。

7.2 代价分析

7.2.1 社会代价

社会代价主要考虑两个方面，一是资源，二是能源。

资源方面，项目单位主要占用一定的土地资源。

能源方面，项目单位运行期间主要消耗水、电等能源，年耗量见表 7.2-1。

表 7.2-1 项目运行期间能源消耗情况一览表

名称	年耗量	来源	主要化学成分
电能	2259.09 万 kWh	城市供电系统	/
水	37843.2t	城市给水管网	H ₂ O

7.2.2 经济代价

经济代价主要为建设投资 100000 万元，其中环保投资约 1157.3 万元，占总投资额的 1.16%，主要包含环保设施、环境管理、环境监测、环境影响评价及事故防范措施等费用。本项目拟采取的污染防治（辐射防护）措施及环保投资估算见表 7.2-2。

表 7.2-2 项目拟采取的污染防治（辐射防护）措施及环保投资一览表

项目	污染物及其防治（辐射防护）措施		投资(万元)	备注
废水治理	非放射性废水	工作人员生活污水，预处理后排入市政污水管网	/	/
	放射性液态流出物	感生放射性冷却水暂存于废水收集池衰变，监测达标后，经有关监管部门同意方可外排。	10.0	/
废气治理	非放射性废气	通过各放射性工作场所通风系统，外排大气环境	60.0	/
	放射性气态流出物			
噪声治理	噪声	基础减震、建筑墙体隔声和距离衰减	/	纳入工程费用
固体废物处置	非放射性固体废物	工业垃圾收集后由物资公司回收利用。 生活垃圾由环卫部门统一集中收集后处理	/	配备垃圾桶，垃圾清运费纳入年度支出
	放射性固体废物	分类包装后暂存于放射性固废暂存间，定期送交有资质单位处置	10.0	/
其他辐射防护措施	工程屏蔽措施：机房墙体及屋顶严格按照设计要求的厚度进行建设。		/	纳入工程费用
	辐射工作人员培训、辐射工作场所管理及公司辐射安全与管理制度的修订完善等管理措施		8.0	/
	辐射工作场所辐射防护分区		10	/
	放射性标志		1.0	/
	监控摄像头		12.0	
	语音提示装置		0.8	
	搜索清场按钮		0.6	
	紧急停机按钮		1.9	
	联锁门禁系统		19.0	
	有自锁的复位按钮		0.3	
	按钮处醒目标识		0.2	
	搜索清场完成显示		0.1	

	门磁与束流开关联锁	0.6	
	门卡	0.1	
	设备门外出束状态显示	0.3	
	束流钥匙开关	0.4	
	摄像监控图像显示屏	3.6	
	控制区内有对讲机和电话通讯设备	1.0	
	PLC 机柜	8.0	
	报警灯	0.3	
	X 射线开显示	0.1	
	治疗室与治疗控制室对讲系统	0.8	
	视频监控系统	13.0	
	固定的剂量监测探头 (γ 、n, 数量)	380	
	独立的通风设施		
	部件活化较高剂量率区的放射警示标志	0.5	
	火灾报警系统	250	
	门外加速器工作状态显示	0.1	
	门外电离辐射警示标志	0.1	
	门外显著位置电离辐射警示标志	0.5	
	不间断电源配置	200	
	更换下来的活化部件专门处存放		
	已存有活化部件局部屏蔽		
	冷却水废水收集池	25	
	用过的去离子树脂专设存放	5	
辐射监测	个人剂量报警仪 (台数)	6	
	γ 射线和中子个人剂量计		
	便携式 γ 射线和中子剂量监测仪		
	放射性物质表面污染监测仪	3	
	控制区固定式辐射剂量监测仪	80.0	

	环境 γ 或中子固定式辐射剂量监测仪		
	通风系统与火灾报警系统连锁		
	特种气体和易燃易爆气体探测器		
	辐射监测仪器：高辐射水平中子监测器， γ 探测器等。		
	辐射工作场所常规监测		纳入年度支出
	辐射环境监测委托	5.0	纳入年度支出
环保验收	/	10.0	落实“三同时”制度
风险防范措施	辐射工作场所应急物品：包括应急监测仪器，应急器材，应急警戒、公告用品，应急救护用品和应急通讯工具等	30.0	/
合计	/	1157.3	/

7.2.3 环境代价

绵阳质子医疗装备制造基地项目的环境代价主要为项目运行期间向环境排放的放射性流出物。项目运行期间产生和向环境排放的放射性气态流出物、放射性液态流出物及放射性固体废物量见表 7.2-3。

表 7.2-3 项目运行期各类放射性废物年产生量和向环境排放量一览表

放射性废物种类	年产生量	年排入环境量
放射性气态流出物	1.55E+10Bq/a	1.55E+10Bq/a
放射性液态流出物	18m ³ /a	废水收集池暂存，监测合格后经审管部门同意排入环境
放射性固体废物	16.8kg/a	交有资质单位处置，不进入环境

通过预测，项目运营期间质子回旋治疗加速器运行所产生的感生放射性核素排放进入环境所致评价范围内最大公众剂量为 1.71E-03mSv/a，远低于项目辐射剂量约束值，对公众的辐射影响很小。

此外，项目运营期间产生的放射性固体废物交由有资质单位处理，不外排进入环境，不对项目所在区域环境造成影响；但最终的永久处理会付出一定的经济代价，消耗一定的土地资源。

综上所述，本项目有很好的经济效益和社会效益，扣除一定的环境负面影响成本后，项目的综合效益是正的。因此本项目的实施是正当的。

7.3 正当性分析

质子肿瘤治疗临床研究表明，质子能量集中沉积在射程末端区，对照射路径沿途健康组织损伤小；射束定位精度高，可对深部肿瘤实施精确治疗；可有效杀死乏氧肿瘤细胞，不存留肿瘤核，治愈率高。与常规射线放疗相比，质子治疗肿瘤具有独特的深度剂量分布和高相对生物学效应等优势，被认为是当代最理想的放疗用射线。项目拟配置的 CBCT 图像引导系统及二维图像系统也是现在医院放射诊疗所采用的常用设备。

本项目拟配置的回旋加速器等放疗设备设计建造完善的辐射防护与安全设施来尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响完全满足国家相关标准要求，本项目对患者和社会所带来的利益（主要是患者的健康有利）是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术应用实施活动是正当的。

第八章 结论与建议

8.1 项目工程概况

中广核医疗科技（绵阳）有限公司拟在四川省绵阳市游仙区游仙街道石垭村 2 社新建绵阳质子医疗装备制造基地项目。

项目主要建设内部包括：新建质子治疗系统生产 1#生产厂房、质子治疗系统 2#生产厂房、质子医疗办公楼及配电房、放射性固体废物暂存间等配套设施。项目总投资额 15263 万元，其中环保投资 1157.3 万元，占总投资额的 7.58%。

本项目建成后，将具备质子治疗系统整体设计、组装、测试、总装、集成、调试能力，形成 4 台/年的质子治疗系统的使用、销售（含建造）能力。同时，本项目建成后还将配套形成 CBCT 图像引导系统及二维图像系统各 20 台/年的生产、使用、销售能力。

本项目所集成、建造的质子治疗系统，所引出质子最大能量为 230 兆电子伏特，额定束流 750nA，引出连续最大束流 300nA，属 I 类射线装置。项目配套生产的 CBCT 图像引导系统及二维图像系统为质子治疗系统放射治疗图像引导装置，均属于 III 类射线装置。

中广核医疗科技（绵阳）有限公司申请生态环境行政主管部门核发“辐射安全许可证”的活动种类和范围为：使用、销售（含建造）I 类射线装置，生产、使用、销售 III 类射线装置。

8.2 辐射安全与防护

通过分析本项目辐射防护工程的设计、放射性三废的治理措施、环境监测计划及各个场所的管理控制措施，评价认为：本项目严格按照以上内容进行实施与管理后，本项目辐射安全与防护完全满足国家法律法规的相

关要求。

8.3 环境影响分析

本项目施工期将产生废水、废气、噪声、固体废物等污染。由于施工期时间有限，影响范围以局部污染为主，施工期的影响将随着施工期的结束而结束。施工期针对各污染物采取的措施经济技术基本可行且有效，施工期对外环境的影响是可接受的。

经校核，本项目所建设的质子治疗系统屏蔽体的效能符合国家标准规范及本评价提出的限值要求。

经过理论预测，本项目质子加速器生产、调试所致工作人员职业照射剂量最大为 3.264mSv/a （瞬发辐射剂量 0.264 mSv/a ，活化部件辐照剂量 3mSv/a ），所致公众照射的有效剂量最大为 0.0648mSv/a ，满足 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》规定的 20mSv/a 的职业照射有效剂量基本限值和 1mSv/a 的公众照射有效剂量基本限值，也低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

经过理论预测，项目排放的活化气体所致公众个人剂量最大值为 $1.71\text{E-}03\text{mSv/a}$ ，远低于评价确定的 0.1mSv/a 公众剂量约束值要求，因此，本项目所排放的活化气体对周边公众影响极其轻微。

本项目臭氧和二氧化氮的室内浓度及排放浓度达到标准限值，焊接烟气及有机废气净化后排放；生产废水收集暂存，定期交有资质单位处理；生活废水排入市政污水管网，不会直接排入当地水体；本项目运行期噪声

源主要为水泵噪声、冷水机组噪声、通排风机噪声，经预测其厂界噪声排放达标；一般废物及生活垃圾由环卫部门收集处置，危险废物集中暂存后交有资质单位处理。非放射性污染物均得到了有效治理与处置，对环境影响轻微。

8.4 辐射安全管理

建设单位拟建立一套相对完善的工作制度，通过对比分析，评价认为，通过完善环评要求的各项措施后，建设单位中广核医疗科技（绵阳）有限公司具备从事使用、销售（含建造）Ⅰ类射线装置，生产、使用、销售Ⅲ类射线装置的技术能力，辐射安全和防护措施有效可行。

8.5 环境影响评价要求及建议汇总

1) 施工建设要求

①穿过机房外屏蔽体的各种管道和电缆线禁止直线穿越屏蔽体，应弯成 S 形或 U 形，其开口不得正对辐射源和工作人员经常停留的地点。②为防止辐射泄漏，门与墙，或通风口屏蔽板与墙的重叠宽度至少为空隙的 10 倍，门的底部与地面之间的重叠宽度至少为空隙的 10 倍。③项目建成后，如因科研或销售需求，调整现有建设区域布局或扩大建设区域的情况，应按照国家法规要求，根据项目变动情况，补充开展辐射安全分析、环境影响后评价或重新进行环境影响评价。

2) 工作人员应采取的辐射防护措施要求

①应为工作人员配备铅衣、铅围裙、铅手套、铅眼镜等防护用具，测试时佩戴个人防护用具，以尽量减少工作人员的职业照射剂量；②室内应

保障通风措施有效，降低空气中放射性物质浓度；③如发生污染，应妥善处置放射性污染物和废弃物。

3) 在控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的、符合规定 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》要求的电离辐射标志和电离辐射警告标志，并给出相应的辐射水平指示；在监督区入口处的适当地点设立表明监督区的标牌。

4) 项目单位应按照《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》(GB 11928-1989)的相关要求，产生的放射性固体废物经分类收集、包装后，装入带有分类标记的专用口袋或容器，送入放射性固体废物暂存间暂存。放射性固体废物暂存量超过暂存间 50%容积 (37.5m^3) 后，应及时送交城市放射性固废处置中心等有资质单位处理。

5) 辐射事故应急要求：项目单位应根据可能发生的辐射事故风险，制订完善的辐射事故应急预案，主要内容应包括：应急处理机构职责、具体应急措施、应急救援条件保障、事故分级、应急响应、应急能力保持、应急工作人员的防护等。

8.6 “三同时”竣工验收一览表

根据《中华人民共和国环境影响评价法》的要求，本项目除履行环境影响审批手续外，还应落实环保验收制度。验收内容见表 8.6-1。

表 8.6-1 项目“三同时”竣工验收一览表

序号	类别	验收内容		验收标准
1	辐射安全防护措施	工程屏蔽	机房墙体及屋顶严格按照设计要求的厚度进行建设，屏蔽体外剂量率符合规范限值及环评约束值要求。	《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）
2		安全联锁系统	辐射工作场所安全联锁装置严格按照设计方案进行建设，包括联锁门禁系统、搜索清场按钮、经济停机按钮、视频监控系统、警示灯、工作状态显示系统、不间断电源、火灾报警系统等。	
3		电离辐射警告标志	屏蔽体外显眼处、迷道防护门均设置规范的电离辐射警告标志	
4		通风系统	有效的维持屏蔽内负压状态，换气次数及通风风量符合设计要求，排气口朝向开阔处。	
5		辐射监测	严格按照项目监测方案，开展工作场所监测、工作人员监测以及辐射环境监测。辐射监测仪器配置到位。	
6	放射性三废治理	放射性液态流出物	感生放射性冷却水暂存于废水收集池衰变，监测达标后，经有关监管部门同意方可外排。废水收集池总容积 10m ³ ，设有两个平行收集单元。	《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）
7		放射性气态流出物	通过各放射性工作场所通风系统，外排大气环境。	
8		放射性固体废物	分类包装后暂存于放射性固废暂存间，定期送交有资质单位处置。放射性固废暂存间容积 75m ³ ，放射性固废包装符合规范要求。	《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》（GB 11928-1989）
9	管理制度	辐射安全管理机构	成立辐射防护工作领导小组、明确人员及职责	《放射性同位素与射线装置安全许可办法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》
10		辐射安全与防护培训	全部辐射工作人员均需参加由有资质单位组织的辐射安全与防护专业知识培训和考核，并取得合格证书。配备 1 名注册核安全工程师。	
11		监测制度	制定并执行项目监测方案	
12		职业健康体检制度	全部辐射工作人员上岗前均需进行职业健康体检。	
13		操作规程、岗位职责、检修维护制度	制定完善的操作规程、岗位职责、检修维护制度等并严格实施。	
14		辐射事故应急预案	制定完善的辐射事故应急预案。	

8.7 建设单位承诺

为了保证人员和环境安全，中广核医疗科技（绵阳）有限公司承诺：

（1）项目建设完成后，项目单位将按要求完善健全辐射安全与环境保

护管理机构，配备齐相应资质的专业人员；按要求对拟从事辐射的工作人员进行辐射安全与防护方面的专业培训，通过考核后持证上岗，定期参加复训。

（2）项目单位将严格遵守国家相关规定，在取得《辐射安全许可证》后方可开展质子治疗系统、CBCT 图像引导系统、二维图像系统的调试工作。

（3）项目单位将按照 GB 11928-1989《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》的要求，做好放射性固体废物的分类收集、包装和暂存工作。

（4）项目单位将按照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（环境保护部令第 3 号）第四十二条之规定编写放射性同位素安全与防护状况年度评估报告，于每年 1 月 31 日前报送辐射安全许可证发证机关。

（5）本项目投入运行之前，将配备足额的注册核安全工程师。

8.8 结论

本项目符合国家产业政策，符合当地城市建设与产业发展规划；综合考虑项目的经济、社会和环境等方面的利益与代价，实施本项目具有正当性；项目设计采取的放射性污染防治措施和非放射性污染防治措施有效合理，可确保项目运行产生的各项污染物达标排放；项目建成后运行对公众和工作人员的辐射影响很小，满足评价标准要求，是可接受的；项目运行产生的非放射性废气、废水、噪声等对周围环境影响轻微。项目的建设在严格遵守国家有关法律法规要求、严格按照建设项目“三同时”制度要求、贯彻落实本环境影响报告书提出的各项环境保护（包括防治放射性污染）措施和风险防范措施并加强管理的前提下，从环境保护角度而言是可行的。