

核技术利用建设项目
销售（含建造）和使用 40MeV 加速
器项目
环境影响报告书
(公示本)



生态环境部监制

核技术利用建设项目
销售（含建造）和使用 40MeV 加速
器项目
环境影响报告书



建设单位名称：中国工程物理研究院流体物理研究所

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：四川省绵阳市绵山路 64 号

邮政编码：621000

联系人：廖**

电子邮箱：***

联系电话：0816***

目 录

第一章 概述	1
1.1. 项目名称、地点	1
1.2. 项目概况	1
1.3. 编制依据	3
1.4. 评价标准	6
1.5. 评价范围和保护目标	7
1.6. 安全责任划分	8
1.7. 评价工作程序	8
第二章 自然环境与社会环境状况	10
2.1. 自然环境状况	10
2.2. 社会经济条件	13
2.3. 辐射环境现状	14
第三章 工程分析与源项	15
3.1. 项目内容与规模	15
3.2. 工艺设备与工艺分析	16
3.3. 污染源项	26
3.4. 废弃物	28
第四章 辐射安全与防护	30
4.1. 场所布局及屏蔽设计	30
4.2. 辐射安全与防护措施	30
4.3. 三废治理	33
第五章 环境影响分析	35
5.1. 营运期环境影响评价	35
5.2. 辐射事故影响分析	47
第六章 辐射安全管理	51

6.1. 机构与人员	51
6.2. 辐射安全管理规章制度	52
6.3. 监测管理	53
6.4. 辐射事故应急	54
第七章 利益-代价简要分析	58
7.1. 利益分析	58
7.2. 代价分析	58
7.3. 正当性分析	59
第八章 结论与建议	60
8.1. 项目工程概况	60
8.2. 辐射安全与防护	60
8.3. 环境影响分析	60
8.4. 辐射安全管理	61
8.5. 公众参与	61
8.6. 结论	62
8.7. 承诺	62

附图

附图 1 项目地理位置图（建设单位）

附图 2-1 加速器区平面布置示意图

附图 2-2 加速器区剖面图

附图 3 加速器区辐射安全设施示意图

第一章 概述

1.1. 项目名称、地点

1.1.1. 项目名称

销售（含建造）和使用 40MeV 加速器项目

1.1.2. 建设地点

本项目建设地点位于四川省绵阳市绵山路 64 号中国工程物理研究院流体物理研究所科学城所区及用户单位（销售对象）指定区域。

1.2. 项目概况

1.2.1. 建设单位概况

中国工程物理研究院流体物理研究所（以下简称“一所”或“建设单位”）主要从事尖端武器相关的流体动力学实验及其诊断测试技术、高新技术武器研制、军民两用技术开发及成果转化等。研究领域涉及爆轰物理、冲击波物理、脉冲功率技术、加速器物理、光学与应用电子学、激光与物质相互作用、计算物理与计算力学等多个学科和专业。拥有多个露天和室内爆轰试验场地、高速与超高速系列轻气炮、“X 龙”系列直线感应加速器、Z 缩实验装置等一批大型科研设施及配套的实验诊断技术。几十年来，为国防建设和科技事业发展作出了重大贡献，获得各类科技成果奖约 600 项，出版科技著作 20 余部，涌现出包括 6 名两院院士在内的一大批科技英才。

现有在职职工 900 余人，其中具有高级职称专业技术人员 160 余人，具有硕士以上学历者 280 余人。目前拥有工程力学、流体力学、凝聚态物理、核技术及应用、脉冲功率技术、光学等 6 个专业的硕士、博士授权点和物理学、力学、核科学与技术 3 个学科的博士后流动站。是全国第一个“冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室”和“爆炸与冲击参数测试和效果评价中心”的依托单位，也是《爆炸与冲击》与《高压物理学报》两种中文核心期刊的承办单位和“中国核学会脉冲功率技术及其应用分会”等学术组织的挂靠单位。

1.2.2. 项目由来

本项目所涉及的加速器所引出电子束最大能量为 40MeV，最大引出束流强度 6.75mA。本项目加速器销往用户单位后主要用于用户单位生产放射性同位素，

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），该加速器属于 I 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“**销售（含建造）、使用 I 类射线装置**”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，中国工程物理研究院流体物理研究所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。环评单位接受委托后，随即组织专业人员开展资料收集、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》（HJ10.1-2016）的要求，编制了《销售（含建造）和使用 40MeV 加速器项目环境影响报告书》。

1.2.3. 项目基本情况

建设性质：新建

项目总投资：XX 万元。

1、工程占地情况

本项目建设单位所区仅涉及销售，建造及使用在用户单位，项目不存在新增占地，依托所区现有场所进行销售。

2、建设内容及规模

本项目建设内容包括 40MeV 加速器的销售、安装调试及后续维修维护活动，年最大销售量为 2 台，年安装调试和维修维护量均为 2 台。销售的加速器多用于用户单位生产放射性同位素或其他科研用途。

其中，项目的销售环节在一所内部进行，实行零库存管理模式，一所内部不设装置暂存场所。拟销售加速器系统主体屏蔽工程（辐射工作场所）采用模块化设计，由一所提供统一的工程设计图纸交付用户进行建设。加速器生产/调试部

分，则由一所进行整套加速器系统的设计，并外委进行全部部件的定制加工。部件加工完成且用户单位已建成合格的模块化场所后由一所联系各部件供应商直接发货至用户单位。加速器系统安装（装配）、调试（不出束/出束）等工作由一所的工作人员负责，均在用户单位建成的模块化辐射工作场所内进行。加速器调试完毕可正常运行后，交付用户使用。

1.2.4. 产业政策符合性分析

根据中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 7 号《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，本项目属鼓励类第六项“核能”第 4 条“核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”。本项目不属于国家发展改革委、商务部印发的《市场准入负面清单（2022 年版）》（发改体改规〔2022〕397 号）中规定的禁止准入类与许可准入类事项，为准入行业。

综上所述，项目符合当前国家产业政策。

1.2.5. 项目与“生态环境分区管控符合性”分析

本项目为销售（含建造）和使用 40MeV 加速器项目，其中建造和使用活动均在用户单位指定区域进行，项目与用户单位所在地生态环境分区管控符合性分析由用户单位另行环评分析。

1.2.6. 项目外环境关系与选址合理性分析

本项目为销售（含建造）和使用 40MeV 加速器项目，其中建造和使用活动均在用户单位指定区域进行，项目与用户单位所在地外环境关系和选址合理性分析由用户单位另行环评分析。项目仅销售活动位于建设单位，由于销售活动为纯商务行为，且一所实行零库存管理模式，内部不设装置暂存场所，因此不再对项目建设单位场所外环境关系与选址合理性进行分析。

1.3. 编制依据

1.3.1. 国家相关法律

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

-
- (5) 《中华人民共和国水污染防治法》，2018 年 1 月 1 日施行；
 - (6) 《中华人民共和国噪声污染防治法》，2022 年 6 月 5 日施行；
 - (7) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，2020 年 9 月 1 日施行。

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

1.3.3. 部门规章、规范性文件

- (1) 《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 日施行；
- (2) 《产业结构调整指导目录（2024 年本）》（中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 7 号）；
- (3) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环境保护部第 18 号令，2011 年 5 月 1 日施行；
- (4) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日施行；
- (5) 《放射工作人员职业健康管理规定》，中华人民共和国卫生部令第 55 号，2007 年 11 月 1 日施行；
- (6) 《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 日施行；
- (7) 《关于建立放射性同位素与射线装置事故分级处理和报告制度的通知》，原国家环境保护总局环发〔2006〕145 号，2006 年 9 月 26 日；
- (8) 《关于发布射线装置分类的公告》（环境保护部国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年 第 66 号）；
- (9) 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》，中华人民共和国环境保护部办公厅环办辐射函〔2016〕430 号，2016 年 3 月 7 日；
- (10) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》，生态环境部 公告 2019 年第 57 号，2020 年 1 月 1 日施行；

（11）《生态环境部（国家核安全局）核技术利用项目监督检查技术程序》（2020 年版）。

1.3.4. 地方性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修订，2018 年 1 月 1 日施行；

（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，2016 年 6 月 1 日施行；

（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 日施行；

（4）四川省生态环境厅关于印发《四川省核技术利用单位辐射安全工作指引（2025 年版）》的通知（川环函〔2025〕616 号）。

1.3.5. 相关标准和技术规范

- （1）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- （2）《粒子加速器辐射安全与防护规定》（GB5172-2025）；
- （3）《粒子加速器工程设施辐射防护设计规范》（EJ346-88）；
- （4）《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）；
- （5）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）；
- （6）《核技术利用放射性废物最小化》（HAD 401/11-2020）；
- （7）《核技术利用设施退役》（HAD 401/14-2021）；
- （6）《公众成员的放射性核素年摄入量限值》（WS/T613-2018）；
- （7）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；
- （8）《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）；
- （9）《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）；
- （10）《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ2.1-2016）。

1.3.6. 参考资料

- （1）《辐射防护手册（第一分册）、（第三分册）》（原子能出版社，潘自强编著）；
- （2）《辐射安全手册》（科学出版社，潘自强主编）；

-
- (3) 《放射性同位素手册》（科学出版社，马崇智等编著）；
 - (4) 《辐射防护导论》（原子能出版社，李士骏主编）；
 - (5) 《原子核物理》（原子能出版社， 卢希庭主编）；
 - (6) 《0.1~100MeV 粒子加速器设施辐射防护设计指南》（NCRP51，刘志林编译）；
 - (7) 《实用辐射安全手册》（原子能出版社， 从慧玲主编）。

1.3.7. 与项目相关的文件、资料

建设单位提供的相关资料。

1.4. 评价标准

1.4.1. 电离辐射相关标准

1.4.1.1. 职业及公众剂量约束值

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中的相关标准：

(1) 职业照射：根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 B 剂量限值：应对任何工作人员的职业水平进行控制，使之不超过下述限值：由审管部门决定的连续 5 年的平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv；四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，500mSv。

根据辐射防护最优化的原则，结合建设单位实际情况，其本身已为核技术利用单位，目前建设单位辐射工作人员职业照射年有效剂量约束值按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）职业照射剂量限值 20mSv 的十分之一执行，即 **2mSv/a**。

(2) 公众照射：根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 B 剂量限值：实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：年有效剂量，1mSv。

根据辐射防护最优化的原则，结合本项目实际情况，确定本项目公众照射年有效剂量约束值按《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）公众照射剂量限值的十分之一执行，即 **0.1mSv/a**。

1.4.1.2. 工作场所（调试）剂量当量率控制水平

参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）、《核医学辐射防护与安全

要求》（HJ 1188-2021）和《放射性药物生产场所辐射安全设计要求》（T/CIRA5-2019）中关于工作场所屏蔽要求，结合本项目工艺特点，以屏蔽防护从严为原则，确定本项目剂量率控制目标值如下：射线装置（花瓣电子加速器）所在机房防护门、机房墙体等屏蔽体外表面 30cm 处的剂量当量率应小于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ ；屋顶为不上人屋面的，其周围剂量当量率应小于 $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

1.5. 评价范围和保护目标

1.5.1. 评价范围

本项目建设内容为 40MeV 加速器的销售、安装调试和售后维修维护。销售环节实行零库存管理模式，不设装置暂存场所，属于纯商务行为，不涉及放射性操作。电离辐射主要来自用户单位装置使用场所内的安装调试和售后维修维护环节，同时本项目不涉及放射性同位素操作。

因此，根据《辐射环境保护管理导则核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）“以项目实体边界为中心，放射性同位素生产项目（放射性药物生产除外）的评价范围半径不小于 3km；放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目的评价范围，甲级取半径 500m 的范围，乙、丙级取半径 50m 的范围。放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围（无实体边界项目视具体情况而定，应不低于 100m 的范围），对于 I 类放射源或 I 类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大。”的要求，同时参考与本项目建设内容和特点类似的其他工程的评价范围，结合本项目的特点。本项目加速器为 I 类射线装置，用途多为生产放射性同位素，但本项目仅涉及加速器的安装调试和售后维修维护，运行期间不涉及放射性同位素的生产。因此本项目辐射环境影响的评价范围考虑为用户单位加速器所在建筑实体屏蔽体边界外 500m 的范围。若加速器机房为地下建筑，无实体边界，则以建筑放射性排风口为中心，半径 500m 的范围。

1.5.2. 环境保护目标

本项目保护目标为评价范围内的公众及本项目设备操作人员。其中公众人员因用户单位所在地的不同而不同，且由于加速器的用户单位具有不确定性，本次评价对其不再具体罗列。项目设备操作人员拟定 5 人，其中 3 人负责调试工作，

2 人负责维修维护工作。

1.6. 安全责任划分

本项目涉及项目建设单位及用户单位，其各自的安全责任划分如下：

(1) 本项目建设单位：主要负责加速器的销售、在用户单位使用场所的整体安装调试以及后续的维修维护服务。因此，须负责加速器销售、安装调试及维修维护过程中的安全责任。

(2) 用户单位：用户单位作为加速器的使用方，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；负责加速器投入使用时的安全责任。

1.7. 评价工作程序

项目评价工作程序见下图。

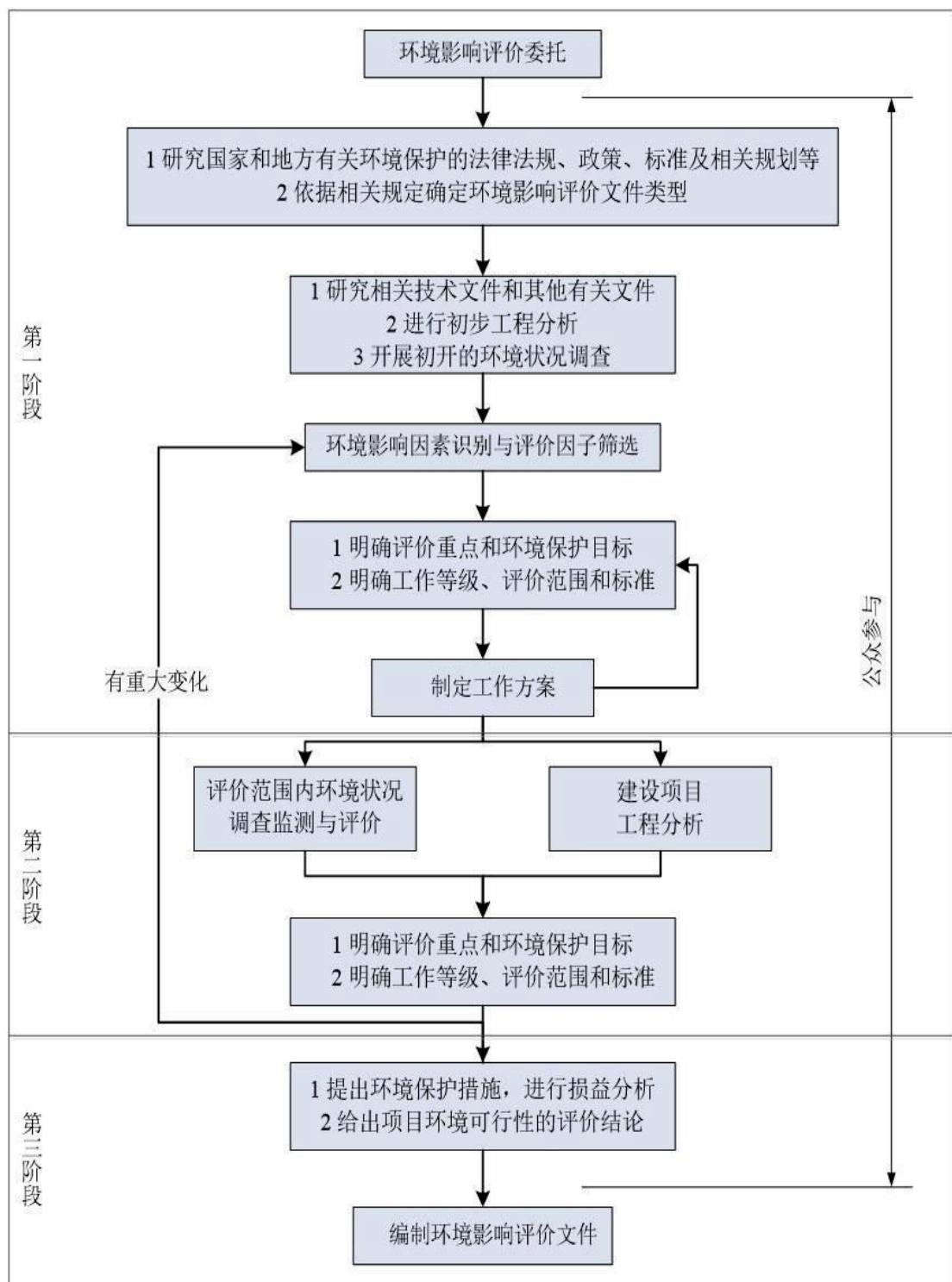


图 1.7-1 环境影响评价工作程序流程图

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

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，西南接德阳市，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、南邻三台县、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。

本项目选址于绵阳市科学城中国工程物理研究院流体物理研究所所区。

2.1.2. 地形地貌与地质条件

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的北部，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200以内，山体宽厚、沟壑和缓，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。

2.1.3. 水文条件

2.1.3.1. 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，岔道较多，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 10400m³/s，最小流量 34.6m³/s，多年平均流量 280m³/s；枯水期流量约 100m³/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 594.9km²，流经市境河段长约 60km，天然落差 63m，平均比降 1.05‰，汇水面积 311.5km²。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。

2.1.3.2. 地下水

游仙区地下水资源丰富，主要赋存于第四系卵石层中及土层裂隙中，受大气降水及涪江补给，排泄以蒸发及地下径流为主。根据钻探揭示，该地区地下水类型为孔隙型潜水，地下水位埋深在 9.0~13.1 米之间，相应水位标高为 435.87~439.90 米。

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°C，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°C
多年极端最高气温:	39.4°C
多年极端最低气温:	-4.5°C
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. 动植物资源

绵阳市植物资源种类繁多，据不完全统计，全市有维管束植物 4500 余种，其中，主要植物有 2471 种。有 39 种属特有、珍稀资源及保护资源。如：珙桐、四川红杉、连香树（山白果）、杜仲等。林木：全市有主要林木树种 60 余科、300 余种。绵阳市属亚热带常绿阔叶林带，北部山区植被垂直分带明显，随海拔高度的增加依次为：亚热带常绿阔叶林带——常绿阔叶林及落叶阔叶混交林带——针、阔叶混交林带——山地针叶林带——高山灌丛和高山草甸带。森林野生

植物资源全市已知野生植物 294 科 4159 种, 占全省 9254 种的 44.9%, 占全国 27150 种的 15.3%。其中, 菌类植物 25 科 297 种, 地衣植物 17 科 110 种, 苔藓植物 30 科 155 种, 蕨类植物 35 科 143 种, 裸子植物 10 科 56 种, 被子植物 177 科 3398 种。列入国家重点保护的珍稀植物 48 种, 其中珍稀树种有珙桐、连香树、厚朴、杜仲、四川红杉、水杉、水青树等 39 种, 占全省保护树种的 52%, 占全国保护树 85 种的 10.1%。

绵阳市动物资源种类繁多, 据不完全统计, 全市有动物 352 种(不含害虫天敌)。其中有家养动物 57 种, 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。尤以大熊猫、金丝猴、牛羚、黑颈鹤、小熊猫、毛冠鹿等驰名中外。水生动物以鱼类为主, 多为鲫鱼、鱲鱼、鲤鱼等常见种, 此外还有白甲、中华倒刺鲃、麦穗鱼、红尾副鳅、短体副鳅、中华细鲫、青鳉、圆尾斗鱼、鲶鱼、泥鳅、黄鳝等。

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、桤木、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 m³, 其中用材林 36.15 万 m³, 占总蓄积量的 72.3%, 其余为防护林、薪炭林、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%。

2.2. 社会经济条件

绵阳市行政区划包括 3 个区、5 个县和 1 个县级市。具体为绵阳市辖涪城区、游仙区、安州区、三台县、盐亭县、梓潼县、平武县、北川羌族自治县, 并代管江油市和四川省政府科学城办事处。

截至 2023 年末, 绵阳市常住人口为 491.10 万人。此外, 绵阳市的户籍人口为 523 万。中心城区建成区面积为 196 平方公里, 常住人口为 165 万。

绵阳市的地理和历史背景也非常丰富。绵阳是四川历史文化名城, 拥有 2200 多年的建城史, 是“两弹一星”精神、抗震救灾精神的重要凝结地。绵阳也是李

白、欧阳修的出生地，孕育了丰富的文昌文化、嫘祖文化、三国文化、李白文化和羌族文化。

2.3. 辐射环境现状

本项目为核技术利用项目，根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ 10.1-2016)中“2.3 环境质量和辐射现状”相关要求，本项目辐射环境监测内容为 500m 评价范围内的大气、地表水、地下水、土壤等环境介质中与项目相关的放射性核素含量及贯穿辐射现状水平。

同时根据《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)，“辐射本底调查指新建设施投料(或装料)运行之前、或在某项设施实践开始之前，对特定区域环境中已存在的辐射水平、环境介质中放射性核素的含量进行全面调查”。因此，辐射环境质量现状调查为针对辐射工作场所周围环境开展的调查。

本项目涉及的工作场所包括销售场所和安装调试、维修维护两个场所，根据对本项目建设内容的分析，销售场所内不设装置暂存场所，属于纯商务活动场所，不涉及放射性操作，不属于辐射工作场所。安装调试和维修维护场所为用户单位装置使用场所，涉及到开机出束。因此，本项目辐射工作场所为各用户单位装置的使用场所。

由于装置使用场所具有不确定性，其周围辐射环境质量现状因用户单位不同而不同。同时，考虑到用户单位在取得使用该装置的资质前，需编制环境影响评价文件，并委托有资质的辐射监测机构对装置使用场所进行辐射环境质量现状调查。用户进行的辐射环境质量现状调查与本项目需要进行的辐射环境质量现状是一致的。

因此，本项目不再单独进行辐射环境质量现状调查。

第三章 工程分析与源项

3.1. 项目内容与规模

3.1.1. 项目建设内容

本项目建设内容包括 40MeV 加速器的销售、安装调试及后续维修维护活动，年最大销售量为 2 台，年最大安装调试量为 2 台，年维修维护量为 2 台。其中，销售环节依托一所现有场所进行，实行零库存管理模式，不设装置暂存场所。拟销售加速器系统主体屏蔽工程（辐射工作场所）采用模块化设计，由一所提供统一的工程设计图纸交付用户进行建设。加速器生产/调试部分，则由一所进行整套加速器系统的设计，并外委进行全部部件的定制加工。部件加工完成且用户单位已建成合格的模块化场所后由一所联系各部件供应商直接发货至用户单位。加速器系统安装（装配）、调试（不出束/出束）等工作由一所的工作人员负责，均在用户单位建成的模块化辐射工作场所内进行。加速器调试完毕可正常运行后，交付用户使用。

表 3.1-1 加速器主要技术指标

略

表 3.1-2 加速器安装调试阶段主要技术指标

略

对于花瓣加速器系统，在电子束流形成、加速、传输和引出等过程中，都会发生束流损失。损失的电子撞击在系统结构部件或转换靶，如偏转磁铁、铝制真空壳、束流传输线及钨转换靶上，会与材料中的原子核发生核反应，产生的光子还会进一步与靶物质发生核反应，产生次级粒子。

根据建设单位提供资料，花瓣加速器系统主要的束流损失点位分布在偏转磁铁、铝制真空壳、束流传输线及钨转换靶上，如下表所示。

表 3.1-3 花瓣加速器束流损失情况一览表

略

3.1.2. 项目组成及主要环境问题

本项目组成及主要环境问题见下表。

表 3.1-4 项目组成及主要环境问题一览表

名称	建设内容及规模		可能产生的环境问题	
			施工期	营运期
主体工程	建设单位	年最大销售 2 台 40MeV 加速器。	/	/
	用户单位	年最大安装（装配）调试 2 台 40MeV 加速器。 年最大维修维护 2 台 40MeV 加速器。	/	x 射线、中子、感生放射性、臭氧、氮氧化物、工作人员生活污水、生活垃圾

3.1.3. 工作制度和劳动定员

本项目拟定辐射工作人员 5 人（3 人调试，2 人维护），均由建设单位现有辐射工作人员中调配，暂未对具体人员进行明确，后续根据运营情况进行人员的增加。

建设单位承诺将依据生态环境部《关于做好 2020 年核技术利用辐射安全与防护培训和考核工作有关事项的通知》（环办辐射函〔2019〕853 号）要求，积极组织项目拟定的辐射工作人员在上岗前参加辐射安全和防护考核，确保所有辐射工作人员考核通过持证上岗。

同时，建设单位已按以下要求做好辐射工作人员档案管理：① 辐射工作人员在上岗前，建设单位应组织其进行岗前职业健康检查，并建立个人健康档案，符合辐射工作人员健康标准的，方可参加相应的辐射工作；② 建设单位应当建立并保存辐射工作人员参加辐射安全防护培训考核取证档案。

3.2. 工艺设备与工艺分析

3.2.1. 主要工艺设备

本项目主要工艺设备为 40MeV 花瓣电子加速器。

（1）设备组成

本项目花瓣电子加速器系统加速粒子最大能量为 40MeV，最大引出束流 6.75mA。主要由粒子注入系统、高频加速系统、束流传输系统、束流诊断系统、控制系统、水冷系统、真空系统、结构支撑与准直系统构成；具体如下：

注入器系统：用于产生初始的已经完成高频聚束的高重频短脉冲电子束，并能够调节进入高频加速腔中的束流横向相空间，使得束流能够在后续加速和传输

过程中以较小的束流损失进行加速。

高频系统：完成束流加速、束流分束的功能。包括用于加速的高频腔、用于分束的分束腔、这些部件的微波功率源、以及实现正常加速所需的微波低电平控制与快保护系统。

束流传输系统：用于实现束流的轨迹和包络控制等。包括各类型磁铁及其电源、束流收集器、真空盒等。

束流诊断系统：实现加速器中束团电荷量、束流位置、束斑形状等加速器运行与调试期间所必须的束流诊断功能。包括 BDOT 探测器、FCT 探测器、闪烁体光测组件、辐射束损探测组件等。

控制系统：实现加速器运行调试所需的各种控制功能，包括设备的远程控制、设备的安全联锁保护、人身安全保护、用户操作界面、运行数据存储及管理等。

水冷系统：实现加速器中高频腔、磁铁等发热部件的恒温冷却。

真空系统：实现加速器中束流加速所需的真空环境。

结构支撑与准直系统：实现加速器中各个部件所需要的结构支撑，对于一些需要精确位置控制的部件，实现较高精度的位置调节并进行准直。

（2）工作原理

花瓣形加速器基本原理：电子枪产生较低能量的电子束（如 40keV），通过聚束腔预聚束，由螺线管调整束流的横向相空间注入到花瓣形加速器的同轴线谐振腔中进行首次加速，电子束经过内筒的无场区期间高频电场反向，使得电子束进入加速腔另一半时仍受到加速场作用。从加速腔出来后，电子束在腔外由二极偏转磁铁产生弯转，使其重新被送入腔内，如此反复得到所需的能量。在加速器中，通过内在的磁压缩机制实现电子束的聚相，从而使得加速器对初始注入束流具有高捕获效率，减小束流损失。花瓣电子加速器原理如图 3.2-1 所示；单个高频加速腔外观示意图见图 3.2-2。

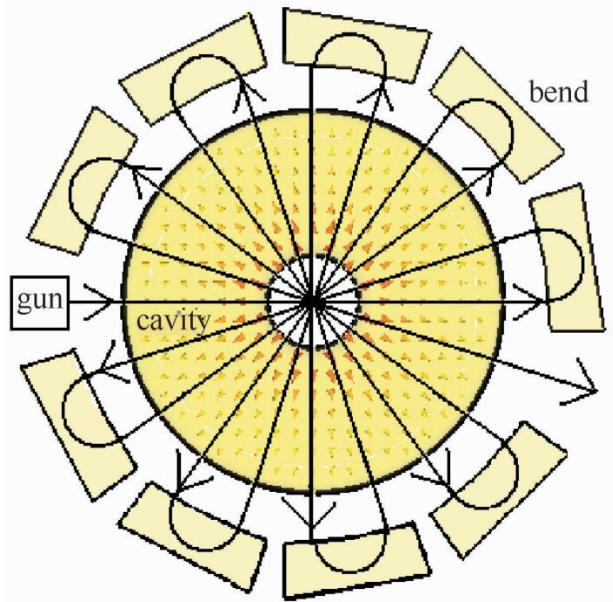


图 3.2-1 花瓣电子加速器原理示意图

略

图 3.2-2 单个高频加速腔外观示意图

本项目 40MeV 花瓣加速器通过将 3 个高频加速腔进行串联，实现 40MeV 电子束。外观示意图见图 3.2-3；部分束流线示意图见图 3.2-4。

略

图 3.2-3 本项目花瓣加速器外观示意图

略

图 3.2-4 部分束流管线示意图

3.2.2. 工艺分析

3.2.2.1. 销售流程

本项目销售阶段工艺流程如下：

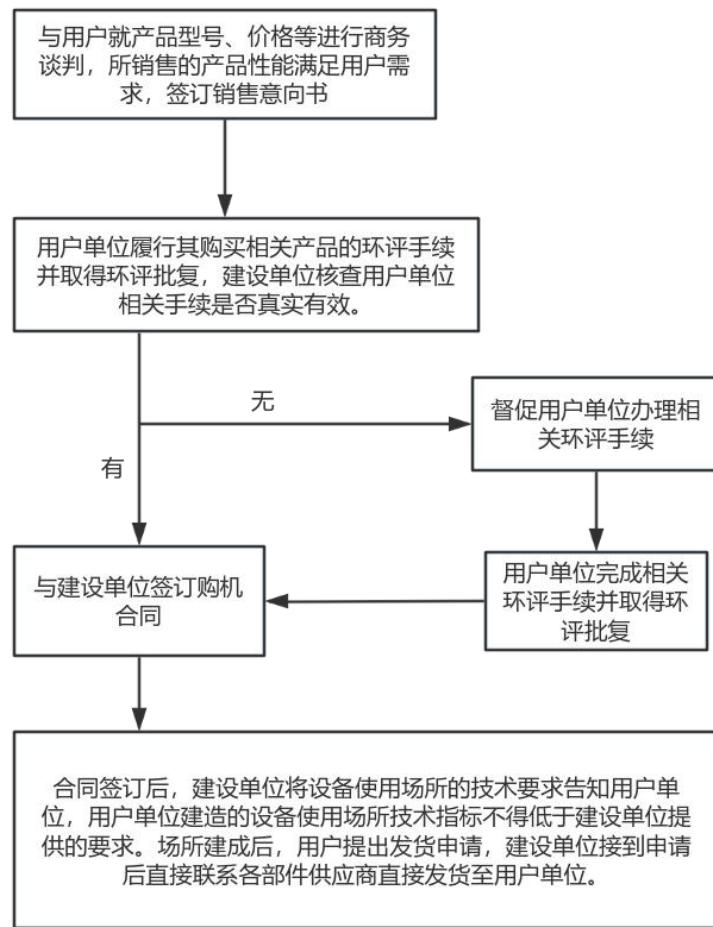


图 3.2-5 加速器销售流程示意图

- (1) 销售过程中，建设单位将严格审查用户单位是否履行了其购买产品的环评手续并取得环评批复，要求用户单位履行的环评手续及取得的环评批复真实有效，否则不允许进行销售活动。
- (2) 建设单位将严格按照《辐射安全许可证》允许的种类和范围进行销售活动，不允许超许可范围和种类开展活动。
- (3) 销售合同签订后，建设单位将设备使用场所的技术要求发于用户单位，用户单位建造的设备使用场所技术指标不得低于建设单位提供的技术要求。
- (4) 用户单位使用场所建造完成后，向建设单位提供发货申请，由建设单位联系各部件供应商直接发货至用户单位。整个运输过程中，建设单位的工作人员不会接触部件装置。

3.2.2.2. 安装调试流程

3.2.2.2.1. 安装调试顺序

建设单位确认用户单位已履行使用该设备的相关环评手续并取得批复，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，通过建筑单位等部门的验收），在各部件装置送达用户使用场所后，安排技术人员在现场先进行各部件的装配，待部件装配成各组件后，进行各组件的安装。

现场安装时，先安装加速器主体部分（包括花瓣电子加速器、输运线）。加速器主体安装完成后，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，方可进行带束调试。加速器主体调试完成后，开始各个靶室的安装调试。各靶室安装调试前，也需确认靶室安全联锁系统、通风系统、水冷系统、电源系统等辅助系统安装并测试完成，方可进行带束调试。

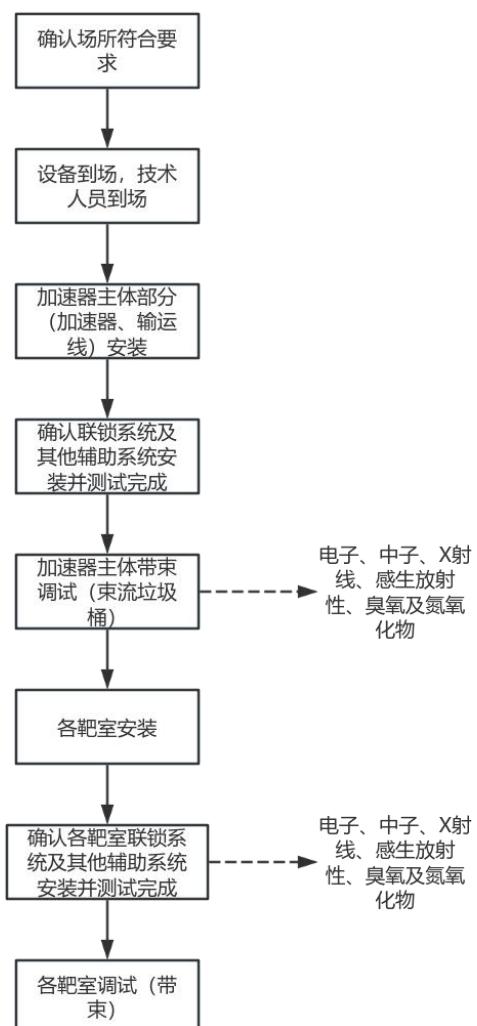


图 3.2-6 加速器安装调试流程示意图

3.2.2.2.2. 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（调试阶段控制间）、配套房间等区域，调试过程中采取的辐射防护措施主要包括：

1、工作人员培训

（1）辐射安全与防护培训

确保所有从事加速器安装调试岗位的工作人员均已参加了环保部门认可的机构举办的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

确保所有从事加速器安装调试的工作人员均需参加建设单位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，培训结束通过考核后方可上岗。

2、安全联锁系统

项目拟建设的加速器及使用场所设计了严密的安全联锁系统，包括门禁控制、巡检按钮、紧急停机装置和工作状态指示灯箱、视频监控等。每个辐射区都受安全联锁系统的控制。设备开始调试前，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，如巡检按钮、急停装置、声光报警等状态正常；
- （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。

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”对各辐射区进行巡检，巡检完毕确保加速器大厅和各靶室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：加速器停机冷却 2 个小时（同步通风）后，先通过区域固定式 X- γ 剂量率仪查看区域内剂量，同时由专门辐射防护人员利用便携式中子/ 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加速器室或靶室：辐射区（包括加速器室和靶室）剂量率水平低于 $20\mu\text{Sv}/\text{h}$ 时允许工作人员进入。

（4）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。

3、工作人员剂量控制

建设单位对本项目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 2mSv 。”

（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戴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）进入辐射区的工作人员

对于因工作需要进入辐射区的工作人员，必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪。

建设单位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。

3.2.2.2.3. 安装调试周期

本项目加速器安装调试时间周期详报告见 P14 页表 3.1-2。

3.2.2.3. 维修维护流程

1、维修流程

本项目加速器维修维护的整个过程，由建设单位的工作人员负责，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。维修维护包括加速器发生故障时的维修和阶段性的维护保养。

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、安全联锁系统和工作人员剂量控制等，本节不再重复描述。本节主要介绍维修环节的流程，具体流程详见下图。具体工艺流程如下：

用户联系一所花瓣加速器团队报修→一所花瓣加速器团队安排工作人员→工作人员视频电话支持（若用户问题得到解决，则结束工作；若用户问题未解决，则继续下述流程）→工作人员到用户单位追踪情况→工作人员在用户单位与操作人员现场沟通，初步分析故障原因→工作人员在控制室内进入操作系统，根据操作日志中的报错信息，判断故障种类和位置→针对具体的故障种类和位置，制定维修方案（对于初步判断可远程解决的问题，工作人员可通过操作系统进行软件的调试和操作）→对于不可远程解决的问题，需要进入辐射区内进行现场检修。

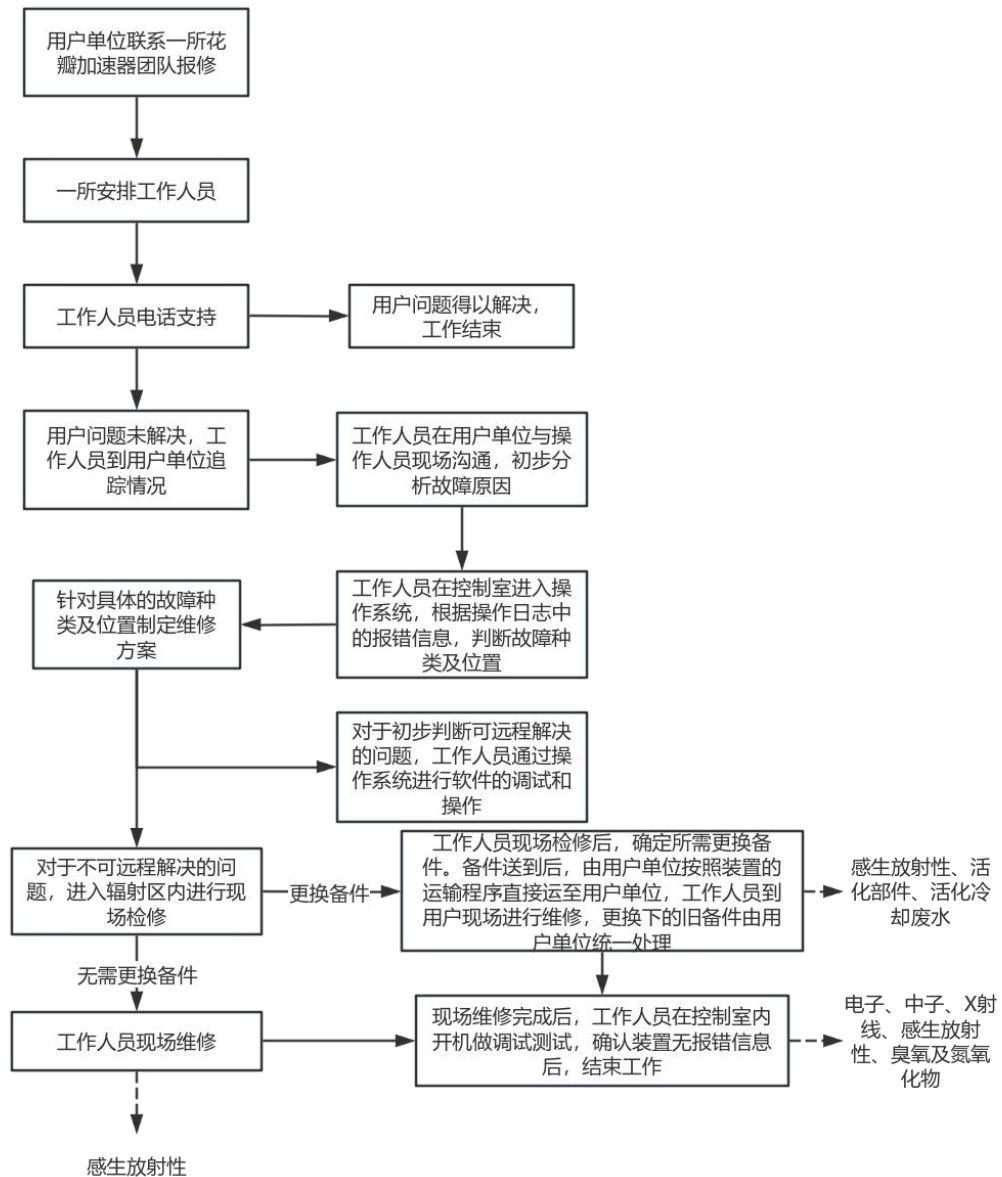


图 3.2-7 加速器维修流程示意图

(1) → 工作人员现场检修后，根据装置运行记录及相应故障信息，确定最后所需要的备件→备件送到后，由用户单位按照装置的运输程序直接运至用户单位，工作人员到用户现场进行维修，更换下的旧备件由用户统一处理（活化部件则交资质单位处理）。→现场维修完成后，工作人员在控制室内开机做调试测试，确认装置无报错信息后，结束工作。

(2) → 如果只是控制软件故障信息，不需要更换备件，工作人员现场完成维修→现场维修完成后，工作人员在控制室内开机做调试测试，确认装置无报错信息后，结束工作。

2、维修调试内容

加速器维修调试的主要内容如下：

（1）设备维修时，工作人员应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。

（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。远程控制系统代码纠错及复位。

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：

加速器停机冷却至少 2 个小时（同步通风）后，先通过区域固定式 X- γ 剂量率仪查看区域内剂量，并由专门辐射防护人员利用便携式中子/ 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加速器室或靶室：辐射区（包括加速器室和靶室）剂量率水平低于 $20\mu\text{Sv}/\text{h}$ 时允许工作人员进入。

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。

建设单位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加速器束流后，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，必须穿工作服，安全眼镜、口罩、手套及鞋套等防护用品，并佩戴指环剂量计。

④工程师现场检修后，根据装置运行记录及相应故障信息，确定最后所需要的备件，备件送到后，由用户单位按照装置的运输程序直接运至用户单位，工作人员到用户现场进行维修，更换下的旧备件由用户统一处理（活化部件则交资质单位处理）。

（5）维修完成后的调试验证

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，交付用户单位使用：

②对于束流聚焦、束流调节等方面的故障维修，维修完成后，经巡检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，交付用户单位使用。

3.3. 污染源项

（1）X 射线

加速器调试运行时，被加速的带电粒子从加速器的真空腔引出后，轰击靶时产生大量高能 X 射线。

（2）中子

本项目花瓣电子加速器运行时，X 射线或电子束打在靶材料产生的韧致辐射与被射物质相互作用而产生中子。

（3）感生放射性

花瓣电子加速器运行时的感生放射性主要来源于初始粒子与加速器部件相互作用产生，以及束流损失产生的次级中子引起的感生放射性。感生放射性强度取决于加速器粒子的能量、种类、流强、加速器运行时间、被照材料性质等因素。

花瓣电子加速器运行产生的感生放射性不会对屏蔽体外的环境有贯穿辐射影响，其主要是对加速器停机后，需要进入机房进行检查、操作的工作人员造成

辐射影响，以及排放到环境中的空气活化物质对周围公众造成的辐射影响。本项目主要考虑加速器结构部件、空气和冷却水等部位的感生放射性。

① 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初始粒子直接与结构材料相互作用产生，产生部位集中在束流损失较大的部位，如束流管、偏转磁铁、束流闸等部位，其主要材质多为铁、不锈钢、铜或铝合金。加速器结构部件产生的感生放射性核素种类详见下表。

表 3.3-1 加速器结构部件中的主要感生放射性产物

部位	材质	感生放射性核素	半衰期	辐射类型
束流管、偏转磁铁、 结构材料	不锈钢	⁵⁶ Mn	2.6h	β^- , γ
		⁶⁵ Ni	38min	β^- , γ
	铝	²⁷ Mg	9.5min	β^- , γ
		²⁴ Na	14.9h	β^- , γ
		²⁸ Al	2.3min	β^- , γ
	铜	⁶² Cu	9.7min	β^+ , γ
		⁶⁴ Cu	12.8h	β^+ , γ
		⁶⁶ Cu	5.1min	β^- , γ

备注：引自《辐射防护手册（第一分册）》（李德平，潘自强主编，原子能出版社）

由上表可见，加速器结构部件产生的感生放射性核素多数为短半衰期核素，经过一定时间可衰变至较低水平。

② 空气活化产物

花瓣电子加速器运行时，次级中子与机房内空气中的 H、N、O、Ar 等通过热中子俘获、 (γ, n) 反应和散裂反应等产生 ³H、⁷Be、¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar 等放射性核素。根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296，对于长半衰期核素如 ³H 和 ⁷Be，其产生率较低，可不必考虑。空气感生放射性计算中主要考虑 ¹¹C、¹³N、¹⁵O 和 ⁴¹Ar 等 4 种核素参考同类项目，其中 ¹¹C（半衰期 20.9mins）、¹⁶N（半衰期 7.3s）、¹⁵O（半衰期 2min）半衰期很短，在很短的时间内即可发生衰变，可以不予考虑，主要影响核素为 ⁴¹Ar。

③ 冷却水的活化

花瓣电子加速器冷却水系统为封闭式机械循环回路，主要由水泵、过滤器、闭式水箱、供回水管和板式换热器等设备组成。冷却水系统主要分布于加速器机房、靶室等区域。运行过程时，打靶产生的次级中子与冷却水中的氧发生核反应

产生感生放射性核素，主要是³H、⁷Be、¹¹C、¹³N、¹⁵O 等核素。

表 3.3-2 冷却水中产生的主要感生放射性核素

放射性核素	半衰期	衰变常数, s ⁻¹	生成核反应	反应截面, barns
¹¹ C	20.4min	5.67E-4	¹⁶ O (n, x) ¹¹ C	3.50E-03
¹³ N	9.97min	1.16E-3	¹⁶ O (n, x) ¹³ N	7.00E-04
¹⁵ O	2.04min	5.67E-3	¹⁶ O (n, x) ¹⁵ O	1.40E-02
⁷ Be	53.22d	1.51E-7	¹⁶ O (n,x) ⁷ Be	2.00E-03
³ H	12.3a	1.78E-9	¹⁶ O (n,x) ³ H ² H (n, γ) ³ H	6.00E-03 5.00E-04

由上表可知，冷却水活化产生的¹¹C、¹³N、¹⁵O 半衰期最长仅有 20.4min，衰变很快，经过较短时间可衰变至较低水平，因此主要考虑³H、⁷Be。项目正常调试期间，冷却水在冷却系统管路中循环使用，不外排。

(4) 臭氧及氮氧化物

在加速器大厅或靶室内，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，产生的臭氧对人体健康有害，产生的硝酸可腐蚀设备。

3.4. 废弃物

3.4.1. 废气

3.4.1.1. 放射性废气

本项目花瓣加速器调试周期内加速器大厅空气中产生的感生放射性核素主要考虑⁴¹Ar。

3.4.1.2. 非放射性废气

本项目花瓣加速器调试周期内加速器大厅和各靶室内空气中的氧气、二氧化氮（NO₂）和氮气（N₂）在 γ 射线的照射下发生辐射分解，形成臭氧（O₃）和二氧化氮（NO₂）。

3.4.2. 废水

3.4.2.1. 放射性废水

本项目花瓣加速器调试周期内设备冷却水循环使用不外排，调试期内无放射

性废水产生。设备冷却水共设有 2 套冷却水系统，分别为加速器系统冷却水和靶系统冷却水，加速器系统冷却水水量为 6m^3 ，靶系统冷却水 1m^3 ，维修维护期间若需要向外排放时，单次废水产生量最大为 6m^3 。

3.4.2.2. 非放射性废水

本项目产生的非放射性废水主要为工作人员的生活污水，项目拟配备 5 名辐射工作人员（调试工作人员 3 人，维修工作人员 2 人），工作场所主要位于用户单位，根据《建筑给水排水设计标准》（GB50015-2019），生活用水按 $50\text{L}/\text{人}\cdot\text{d}$ 计。调试周期为 4 个月，每个月工作 21 天，则日用水量为 $0.15\text{m}^3/\text{d}$ ，周期内用水量为 12.6m^3 ；维修周期内工作时间约 10 天，则日用水量为 $0.10\text{m}^3/\text{d}$ ，周期内用水量为 1.0m^3 ，合计用水量为 13.6m^3 。生活污水产生量按用水量的 80% 保守计，则项目每年工作周期内生活污水产生量约为 10.88m^3 。项目涉及到的其他工作人员（销售人员、管理人员等）均为建设单位现有人员，工作场所均在建设单位既有所区，无新增人员，无新增生活废水。

3.4.3. 固体废物

3.4.3.1. 放射性固废

本项目花瓣加速器调试周期内无放射性固废产生。维修维护期间可能产生更换下来的束流装置、靶件等含感生放射性的结构部件，根据建设单位提供资料，其每台加速器单次维修活动产生量约为 90kg 。

3.4.3.2. 非放射性固废

本项目产生的非放射性固体废物主要为工作人员生活垃圾。本项目拟配辐射工作人员 5 人（调试工作人员 3 人，维修工作人员 2 人），工作场所主要位于用户单位，生活垃圾产生量按每人每天 $0.5\text{kg}/\text{d}$ 计。其中调试周期内工作时间约 81 天，生活垃圾产生量约 121.5kg ；维修周期内工作时间约 10 天，生活垃圾产生量约 10kg 。项目合计生活垃圾产生量约 131.5kg/a 。

项目涉及到的其他工作人员（销售人员、管理人员等）均为建设单位现有人员，工作场所均在建设单位既有所区，无新增人员，无新增生活垃圾。

第四章 辐射安全与防护

4.1. 场所布局及屏蔽设计

本项目加速器的使用场所位于用户单位使用射线装置的场所内，建设单位提供给用户方的典型场所布局及屏蔽设计如下图所示。用户单位进行建设时不得削减实验大厅及靶室各侧墙体及顶板的屏蔽厚度。

略

图 4.1-1 加速器大厅及靶室屏蔽平面布置示意图

略

图 4.1-2 加速器大厅及靶室屏蔽 1-1 剖面图

略

图 4.1-3 加速器大厅及靶室屏蔽 2-2 剖面图

略

图 4.1-4 加速器大厅及靶室屏蔽 3-3 剖面图

略

图 4.1-5 加速器大厅及靶室屏蔽 4-4 剖面图

本项目建设单位拟提供的加速器大厅及靶室各侧墙体及顶板材质均为密度 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 的普通混凝土，防护门则采用铅+聚乙烯材料作为屏蔽材料。具体屏蔽设计详见下表。

表 4.1-1 加速器大厅及靶室屏蔽设计一览表

略

4.2. 辐射安全与防护措施

4.2.1. 花瓣电子加速器

4.2.1.1. 加速器系统固有安全性

1、加速器运行参数符合预设值时，加速器系统才能正常运行。若参数偏离值达到设定阈值，加速器系统联锁，停止运行。

2、加速器系统自身配备有在线辐射剂量监测联锁系统，当加速器大厅内辐射剂量值突增至剂量阈值（加速器系统真空未发生明显变化），加速器系统联锁，停止运行。

4.2.1.2. 辐射安全措施

(1) 安全联锁

① 钥匙控制（权限管理）

加速器控制系统采取授权管理，通过设置密码账户登录，对不同的用户开放不同的权限等级，当操作人员下达没有使用权限的加速器指令时，加速器将不会执行相应的指令。权限等级的防护效果优于开关钥匙控制的防护效能，没有取得授权的人员无法开启加速器。

② 门-机联锁

加速器室及靶室均设置了门-机联锁装置，即机房防护门与花瓣电子加速器高压离子源系统联锁。当防护门处于开启状态时，加速器高压装置、离子源系统无法开启；运行过程中防护门意外打开时，加速器高压装置、离子源系统即刻停止工作。

③ 紧急停机装置

在加速器室、靶室内及其控制台人员易接触的位置分别设紧急停机装置，并用中文进行标识。所有紧急停机装置串联，当任意紧急停机装置启动，加速器立即停止出束。当紧急停机装置被启动后，重新启用时，需进行人工复位。

④ 紧急开门按钮

在加速器室及靶室防护门出口内侧墙壁上设紧急开门按钮，并用中文进行标识。当人员误留房间内，可通过紧急开门按钮实现防护门从内部打开，进行紧急逃逸；按下紧急开门按钮的同时，加速器停止运行。

⑤ 巡检开关

在加速器室及靶室内均设置巡检开关，巡检开关与加速器联锁。当机房防护门打开后，巡检开关自动复位，工作人员在关闭防护门前，需先进行巡检，并按下所有巡检开关后，机房防护门方可关闭。若任意巡检开关没有被按下，加速器将无法正常启动，同时防护门也不能正常关闭。

⑥ 火灾报警仪联锁

加速器室及靶室内均安装火灾报警仪，并与加速器联锁，当发生火灾触发报警时，加速器停止工作；同时，消防排烟排风系统开启排风。

⑦ 门与剂量联锁

加速器大厅均安装有固定式剂量监测系统(该系统可测量 X- γ 辐射剂量率), 并与防护门联锁, 当剂量超过设定限值时, 防护门无法从外部开启。

(2) 场所防护设施

① 分区管理

加速器室内以墙体和门等实体划分为控制区, 并在分区边界处的地面相应位置以醒目标线和文字标明, 提醒警告无关人员不要靠近和逗留。

② 电离辐射警告标识

在加速器室及靶室防护门外出入口处醒目位置设置符合 GB18871-2002 附录 F 规定的电离辐射警告标识, 提醒警告无关人员不要靠近和逗留。

③ 视频监控装置

在加速器室及靶室的机房内分别设置无死角全覆盖视频监控装置, 对机房内情况进行实时监控, 防止人员误入或人员滞留在机房内等辐射事故发生。由于在加速器在运行过程中机房内辐射剂量较大, 机房内应选用防辐射摄像头, 确保其长期有效运行。

④ 控制区通风系统

加速器室及靶室的机房内设置排风系统并与加速器控制系统联锁, 机房内废气由排风管道引至厂房楼顶后, 经净化后汇入主排气筒排放。排查系统异常时, 加速器不能开启; 加速器运行过程中, 若排风系统出现异常, 加速器停止运行。

(3) 工作状态指示和警示

① 工作状态指示装置

加速器室及靶室防护门外和控制室内分别安装工作状态指示灯, 分别显示加速器的不同工作状态。

② 声光报警系统

加速器室及靶室防护门外均安装声光报警装置。在加速器出束前发出警示声音和警灯闪烁, 以提醒加速器即将出束, 之后警示灯显示为红色表示装置正在出束, 提醒无关人员远离加速器机房。

略

图 4.2-1 辐射安全设施布置示意图

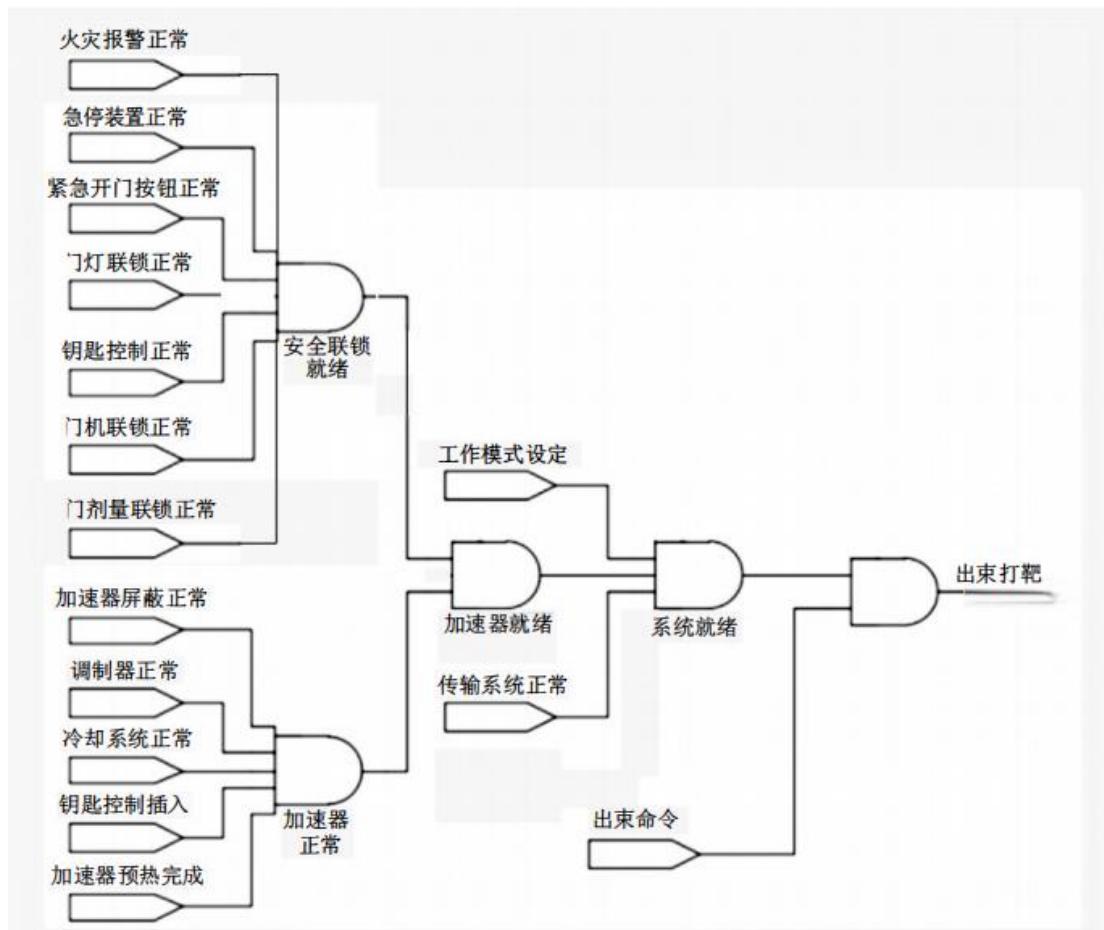


图 4.2-2 项目加速器安全联锁逻辑示意图

4.3. 三废治理

4.3.1. 放射性污染治理措施

4.3.1.1. 放射性废气治理

项目产生的放射性废气主要为加速器运行产生的空气感生放射性，感生放射性核素多为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平，主要考虑影响核素为⁴¹Ar。

加速器大厅及靶室将设置通排风系统，排风系统设高效过滤器，房间内换气次数不小于4次/h。工作人员进入加速器大厅或靶室之前加速器至少需停机冷却2个小时，在此期间同步打开排风系统。因此主要考虑⁴¹Ar对外界环境的影响。

4.3.1.2. 放射性废水治理

本项目产生的放射性废液主要是活化的冷却水。加速器所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于¹⁶O散裂反应可能形成的放射性核素除⁷Be、

³H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。

冷却水在运行期间循环使用，不排放。维修维护期间若需要向外排放时，由用户单位负责收集和后续的暂存、排放。活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足国家相关规定的排放标准《污水综合排放标准》（GB8978-1996）第一类污染物最高允许排放浓度标准要求）（总放射性浓度不大于 10BqL），并经审管部门批准后，方可排放。

4.3.1.3. 放射性固体废物治理

本项目产生的放射性固体废物主要为加速器维修维护环节更换下来的束流装置、靶件等含感生放射性的结构部件，单次维修产生量约为 90kg，包装后交接给用户单位，最终由用户单位委托有资质的单位统一回收处理。

4.3.2. 非放射性污染治理措施

4.3.2.1. 非放废气治理

项目产生的非放废气主要为加速器大厅和靶室内的臭氧（O₃）和二氧化氮（NO₂），安装调试期间，加速器连续运行时间较短，且调试过程中的束流强度较小，其产生的臭氧和二氧化氮饱和浓度极低。同时加速器大厅及靶室将设置通排风系统，排风系统设高效过滤器，房间内换气次数不小于 4 次/h。产生的臭氧及二氧化氮经排风系统收集过滤后排放。

4.3.2.2. 非放废水治理

项目产生的非放射性废水主要为工作人员的生活污水，调试周期内生活污水产生量为 10.88m³。依托用户单位生活污水处理设施进行收集处理后达标排放。

4.3.2.3. 非放固体废物治理

项目产生的非放射性固体废物主要为工作人员生活垃圾。调试周期内生活垃圾产生量约 131.5kg。生活垃圾依托用户单位厂区既有生活垃圾桶收集后交当地市政环卫部门清运。

第五章 环境影响分析

5.1. 营运期环境影响评价

项目无施工期，仅分析营运期环境影响。

5.1.1. 营运期辐射环境影响

本项目加速器区布设 1 个加速器大厅和 3 个靶室，配置 1 套花瓣电子加速器系统，加速电子最大能量为 40MeV，最大引出流强为 6.75mA，属于 I 类射线装置。花瓣电子加速器系统主要技术指标见下表。

表 5.1-1 花瓣电子加速器系统主要技术指标

略

略

图 5.1-1 加速器区平面布置示意图

5.1.1.1. 花瓣加速器辐射影响

对于最大能量>10MV 的加速器可以必须考虑中子和感生放射性的辐射影响。本项目拟使用的 1 套花瓣加速器的最大能量为 40MV，因此，本项目主要分析加速器产生的高能电子束、X 射线、中子的辐射影响。

5.1.1.1.1. 高能电子束的辐射环境影响

根据《辐射防护技术与管理》，电子在物质中最大射程可由下式计算：

$$d = \frac{1}{2\rho} \times E_{\beta \max} \dots \dots \dots \quad (\text{式5-1})$$

式中：d—最大射程，cm；

ρ —防护材料的密度，g/cm³；

η —修正因子；

$E_{\beta \max}$ —电子最大能量，MeV；

本项目拟销售的花瓣加速器电子束最大能量为 40MeV，代入上述公式可知，能量为 40MeV 的电子穿过混凝土 (2.35g/cm³) 的最大射程约 8.51cm。

本项目加速机房四周混凝土墙体厚为 1.5~3.0m、机房顶板混凝土厚 2.3~3.0m。加速器电子束虽然能量相对于 X 射线较高，但其贯穿能力远弱于 X 射线。由此可见，项目加速器机房设计厚度和结构材质完全能满足对电子束的屏蔽，可

不再作特殊的防护要求。

因此，本项目花瓣加速器运行期间产生的电子束对周围环境影响轻微。

5.1.1.1.2. X 射线、中子辐射影响分析

1、关注点的选取

本项目加速器机房的关注点选取详见下表及图。

表 5.1-2 40MV 加速器大厅外主要关注点布置

略

略

图 5.1-2 加速器大厅外关注点位示意图

2、剂量率参考水平

综合参考《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ 1198-2021)条款 6.1.4、《粒子加速器辐射安全与防护规定》(GB 5172-2025)条款 5.3.1、《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)条款 6.1.5、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011)条款 4.2.1，机房外各关注点的剂量率参考控制水平 H_c 由以下方法确定：

①使用工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子，求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $H_{c,d}$ ：

$$H_{c,d} = H_c / (t + U + T) \dots \dots \dots \text{式5-2}$$

式中: $H_{c,d}$ —导出剂量率参考控制水平, $\mu\text{Sv}/\text{h}$;

H_c —一周剂量参考控制水平；本报告提出剂量管理约束值为职业人员
2mSv/a、公众 0.1mSv/a；

U—关注位置方向照射的使用因子；本项目均取值为1；

T—人员在相应关注点驻留的居留因子；

t —年照射时间, h; 对于本项目, t 取值 640h/a (单台 4 个月调试周期)。

②关注点的最高剂量率参考控制水平 $H_{c,max}$:

人员居留因子 $T \geq 1/2$ 的场所, $H_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$;

人员居留因子 $T < 1/2$ 的场所, $H_{c,max} \leqslant 10\mu\text{Sv/h}$;

③取①、②中较小者作为关注的剂量率参考控制水平(H_c)。

由此确定的各关注点的剂量率参考控制水平和主要考虑的居留因子见下表。

表 5.1-3 加速器大厅外各关注点剂量率参考控制水平和居留因子

略

3、屏蔽体外剂量率预测（X 射线、中子）

本项目加速器满足六种模式供束的需要，分别为靶室 1 双向同时供束（A+B 束流）、靶室 1 靶室 2 同时供束（A+C 束流）、靶室 1 靶室 3 同时供束（A+D 束流）、靶室 1 单独供束（A 束流）、靶室 2 单独供束（C 束流）、靶室 3 单独供束（D 束流）。

同时，根据工艺提供条件，本项目运行期分为束流收集器调试、靶室调试两种工况。两种工况的区别在于：1) 束流收集器调试工况采用束流收集器进行束流末端收集，束流最高能量 40MeV，单束流最大强度 0.25mA；2) 靶室调试工况采用靶室内局部屏蔽进行束流末端防护，束流最高能量 40MeV，单束流最大强度 3.375mA。

(1) X 射线源项分析

➤ 束流收集器调试工况源项

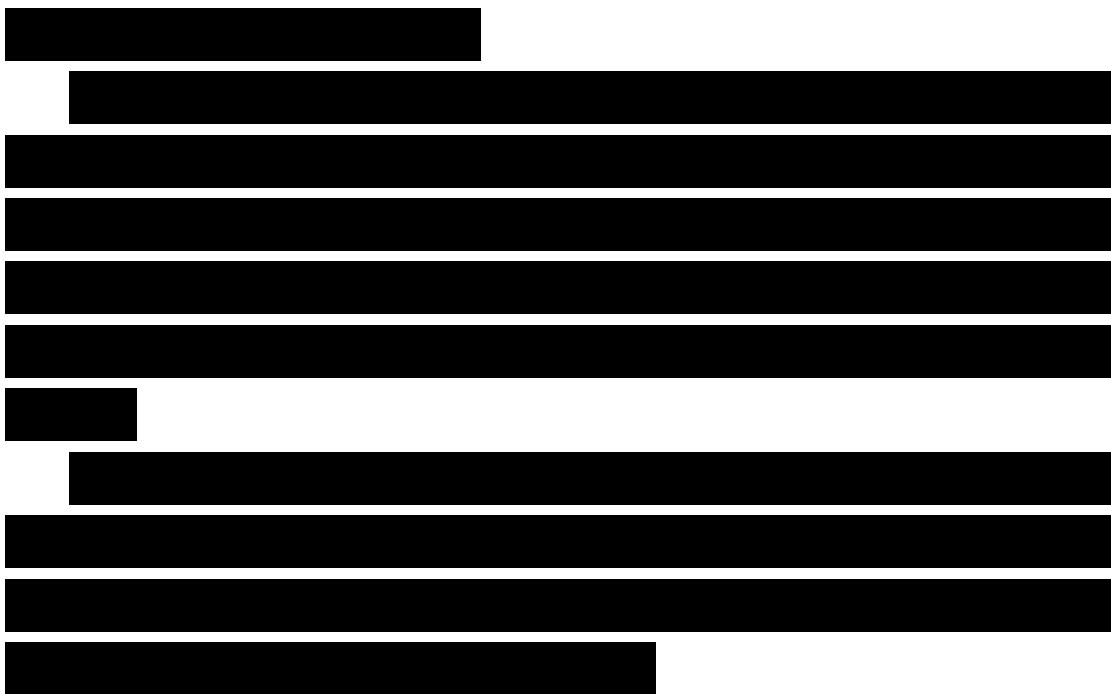
束流收集器调试工况下，采用 40MeV 电子加速器引出电子束流，直接照射靶室内束流收集器开展调试工作。束流收集器结构如下图所示。

略

图 5.1-3 束流收集器结构示意图

束流收集器内层采用铝制层作为转换材料，外层采用约 10cm 厚铅层作为附加屏蔽材料。查询 NCRP 第 51 号报告及其编译本《0.1-100MeV 粒子加速器设施辐射防护指南》附录 E.1 以及附录 E.3，对于铝靶，电子束 0° 角方向 X 射线发射率为 $5.00E+05\text{rads.m}^2/\text{(mA.min)}$ ，电子束 90° 角方向 X 射线发射率为 $5.50E+03\text{rads.m}^2/\text{(mA.min)}$ 。





➤ 靶室调试工况源项

靶室调试工况下，采用 40MeV 电子加速器引出电子束流，对靶室内钨转换靶进行照射，并于转换靶周边设置局部屏蔽体进行辐射防护。局部屏蔽体外观示意图及平面图如下图所示。

略

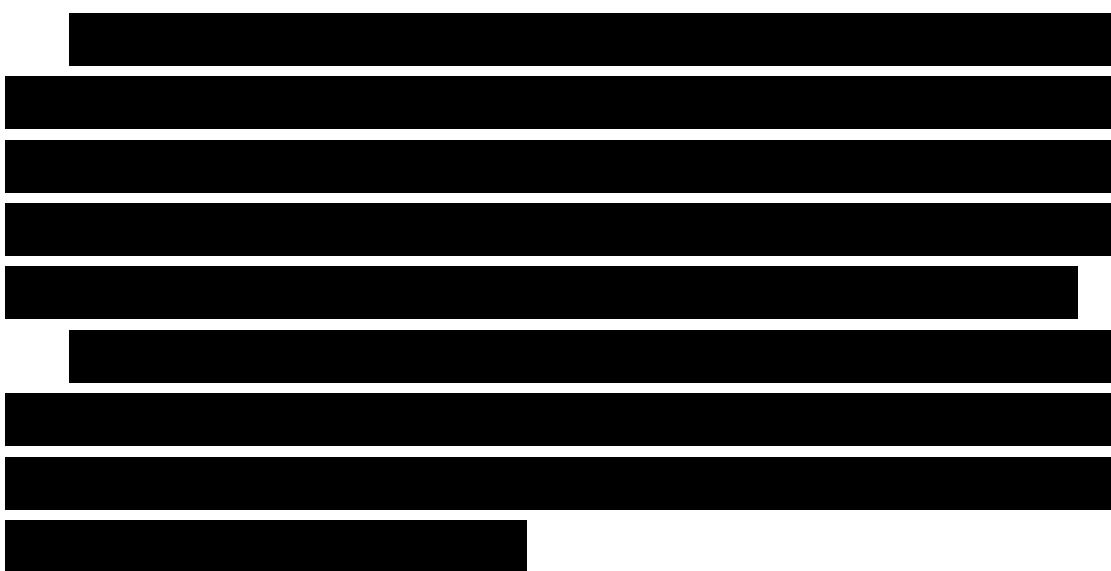
图 5.1-4 靶室内局部屏蔽体立体示意图

略

图 5.1-5 各靶室内局部屏蔽体平面示意图

查询 NCRP 第 51 号报告及其编译本《0.1-100MeV 粒子加速器设施辐射防护指南》附录 E.1 以及附录 E.3，对于钨转换靶，电子束 0° 角方向 X 射线发射率为 $1.00E+06\text{rads.m}^2/(\text{mA.min})$ ，电子束 90° 角方向 X 射线发射率为 $1.10E+04\text{rads.m}^2/(\text{mA.min})$ 。





➤ 源项对比

综上，本项目两种调试工况下的源项对比如下表所示。

表 5.1-4 两种调试工况下源项对比一览表

略

➤ 屏蔽参数对比

由前述描述可知，项目束流收集器调试工况采用束流收集器进行束流末端收集，靶室调试工况采用靶室内局部屏蔽进行束流末端防护，束流收集器屏蔽及靶室内局部屏蔽设计参数如下表所示。

表 5.1-5 两种调试工况下局部屏蔽参数一览表

略

➤ 源项综合对比

对两种调试工况下的源项及屏蔽进行综合分析，综合源项变化情况见下表。

表 5.1-6 两种调试工况下综合源项变化一览表

略

由上表对两种调试工况下的源项及屏蔽进行综合分析可知，靶室调试工况下的源项远大于束流收集器调试工况下的源项。因此，本次评价仅分析靶室调试工况下产生的 X 射线的辐射影响。

(2) 中子源项分析

对于本项目 40MeV 电子加速器，其中子源项主要来自打靶 (γ, n) 核反应产生的光中子，每 μA 靶流强度在厚靶中产生的中子产额 (4π 立体角) 是入射到 X

射线源的电子能量的函数。查NCRP第51号报告附图F.3，评价采用与钨靶原子序数最相近的钽靶数据曲线保守进行中子源项测算，则40MeV能量电子打钽靶产额为 $2.5E+10 n/(s.\mu A)$ 。



综上，由于铅等高 Z 物质对中子屏蔽性能贡献较小，因此仅考虑混凝土墙体对中子的屏蔽效能。由于两种调试工况下混凝土墙体的屏蔽厚度未发生变化，同时靶室调试工况下产生的中子源项远大于束流收集器调试工况下产生的中子源项。因此，本次评价仅分析靶室调试工况下产生的中子的辐射影响。

（3）模拟预测

本次评价通过蒙卡程序 FLUKA 对其进行建模模拟分析。靶室调试工况下，本项目采用 40MeV 电子加速器引出电子束流，对靶室内钨转换靶进行照射，并与转换靶周边设置局部屏蔽体进行辐射防护。

加速器系统束流损失大小、位置详见表 3.1-3，屏蔽设计情况详见表 4.1-1。利用蒙卡程序FLUKA构建所得X-Y平面计算模型见图 5.1-6，X-Z平面计算模型见图 5.1-7，Y-Z平面计算模型见图 5.1-8；模型计算采用的材料参数见表 5.1-7。

表 5.1-7 模拟计算采用的材料参数

略

略

图 5.1-6 FLUKA程序X-Y平面计算模型

略

图 5.1-7 FLUKA程序X-Z平面计算模型

略

图 5.1-8 FLUKA程序Y-Z平面计算模型

根据模拟所得靶室调试工况下加速器大厅及各靶室剂量率分布情况如下图所示。

略

图 5.1-9 各靶室X-Y平面剂量率分布图

略

图 5.1-10 加速器大厅X-Y平面剂量率分布图

略

图 5.1-11 靶室1 Y-Z平面剂量率分布图

略

图 5.1-12 靶室2 Y-Z平面剂量率分布图

略

图 5.1-13 靶室3 Y-Z平面剂量率分布图

略

图 5.1-14 加速器大厅X-Z平面剂量率分布图

综上，根据FLUKA软件模拟计算结果，本项目靶室调试最大工况下各关注点处剂量率水平值详见下表。

表 5.1-8 靶室调试工况下屏蔽体外各关注点FLUKA模拟计算结果

略

由上表可知，通过FLUKA软件进行模拟后，可知项目靶室调试最大工况下屏蔽体外的剂量率仍能满足表 5.1-3中报告提出的剂量率参考控制水平。

(4) 职业人员及公众人员受照剂量分析

①安装调试任务

本项目调试周期内涉及两种调试工况，以最大调试工况和最长出束时间对人员受照剂量进行分析，预测结果详见下表。

表 5.1-9 靶室调试工况下人员受照剂量

略

由上表可知，调试周期内职业人员受照剂量最大约为 $1.53E-01mSv$ ，公众人员受照剂量最大约为 $4.06E-02mSv$ 。由于本项目加速器系统年最大安装调试量为2台，调试人员均为同一批人员，因此职业人员受照剂量应考虑翻倍；公众人员则不存在该情况。因此本项目职业人员（调试）有效受照剂量最大约为 $3.06E-01mSv/a$ ，公众人员有效受照剂量最大约为 $4.06E-02mSv/a$ ，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2mSv/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。

由于本项目人员仍承担建设单位其他辐射工作任务，因此需考虑人员既有受照剂量。根据建设单位提供的2024年四个季度的个人剂量监测报告，其最大受照剂量为0.31mSv，叠加该剂量后，本项目职业人员（调试）有效受照剂量最大约为6.16E-01mSv/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，同时低于本次评价确定的2mSv/a的职业照射剂量约束值。

②维护维修任务

本项目涉及售后服务中的维修维护工作，维修人员区别于安装调试人员，同时维修维护期间属于用户单位正式运行后的阶段，该阶段用户单位加速器的辐射安全与防护措施均已满足相关要求，因此不考虑对屏蔽体的效能进行分析，仅对工作人员的受照剂量进行预测。

由于无法得知实际运行后的加速器屏蔽体外的剂量率，同时维修维护任务过程中工作人员通常需近距离接触设备，考虑活化部件感生放射性的影响，保守按 $20\mu\text{Sv}/\text{h}$ 的进入限值对维修人员的受照剂量进行估算。本项目加速器年维修维护量为2台，维修时间约40h/台，即年维修维护时间为80h，则维修人员受照剂量最大约为1.6mSv/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，同时低于本次评价确定的2mSv/a的职业照射剂量约束值。

同上，由于本项目人员仍承担建设单位其他辐射工作任务，因此需考虑人员既有受照剂量。根据建设单位提供的2024年四个季度的个人剂量监测报告，其最大受照剂量为0.31mSv，叠加该剂量后，本项目职业人员（维修）有效受照剂量最大约为1.91mSv/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，同时低于本次评价确定的2mSv/a的职业照射剂量约束值。

5.1.1.2. 放射性废气环境影响分析

项目产生的放射性废气主要为加速器运行产生的空气感生放射性，感生放射

性核素多为短半衰期核素，经过一段时间后可自行衰变至较低水平，主要考虑影响核素为⁴¹Ar。由表 3.1-3 可知本项目加速器系统束流损失点主要位于靶室内转换靶或束流收集器上，加速器大厅束流损失较小（束流损失率最大约为 0.6%），产生中子活化空气影响较小，因此本项目仅考虑靶室内中子活化空气的影响。同时由于靶室内设有排风系统，工作人员进入靶室之前需开启排风一段时间，因此仅考虑废气排入外环境后对周围公众人员的影响。

根据《原子核物理》（卢希庭主编），活化物质产生量计算公式如下：

$$Q = \lambda \cdot \Phi \cdot R \cdot N \cdot \sigma \cdot t \quad Q = \lambda \cdot \Phi \cdot R \cdot N \cdot \sigma \cdot t \dots \dots \dots \text{ (式 5-3)}$$

式中：

Q —活化物质年排放量，Bq/a。

λ —放射性核素的衰变常数， s^{-1} ；核素⁴¹Ar 的 λ 为 $1.05 \times 10^{-4} s^{-1}$ 。

$H_0(r_0)\varphi$ —中子产额，n/s；根据建设单位提供资料，本项目单束流 3.375mA 对应的中子产额为 $8.44E+13 n/s$ 。

$H_0(r_0)\sigma$ —母核⁴⁰Ar 的活化截面，为 $6.60 \times 10^{-25} cm^2$ 。

R —房间内空气的有效半径，cm；取靶室半径约 300cm。

N —单位体积空气中的⁴⁰Ar 原子数， 2.52×10^{17} 个/ cm^3 。

t —年运行时间，s；根据建设单位提供资料，加速器调试周期内加速器出束时间最大为 640h，其中最大调试工况出束时间约为 80h，本次预测保守按 640h 均为最大调试出束工况。

综上，本项目空气活化产物的产生量如下表所示。

表 5.1-10 项目活化气体（⁴¹Ar）周期内排放量估算结果

略

由于本项目建设单位所区仅涉及销售，建造及使用在用户单位。因此本次预测不考虑地形影响，不考虑周围建筑影响，以最低排气筒高度（15m），靶室内换气次数最低 4 次/h 进行预测。同时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。分析过程截图如下：

略

图 5.1-15 落地浓度预测参数选取示意图

略

图 5.1-16 落地浓度预测结果图

由上图可知, 得到最大落地浓度约为 $6.88E+01\text{Bq}/\text{m}^3$, 距排气口约 100m。 ^{41}Ar 主要考虑空气浸没外照射, 其空气浸没外照射剂量转换因子为 6.20×10^{-14} ($\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^3$) (数据来源于《Federal Guidance Report No. 15: External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil》Table4-6), 空气浸没外照射采用半无限烟云模式, 保守地假设受照个人无屏蔽而且全部时间停留在野外, 计算公式如下:

$$D_i^{in} = C_{Ai} \cdot DF_{in} \cdot Q_f \dots \dots \dots \quad (\text{式 5-4})$$

式中:

C_{Ai} —核素 i 的地面空气浓度, Bq/m^3 ;

DF_{in} —核素 i 的空气浸没外照射有效剂量转换因子, $(\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}) / (\text{Bq}\cdot\text{m}^3)$;

Q_f —浸没在 C_{Ai} 浓度下的年时间份额, 保守认为 Q_f 取 1。

经计算, 项目调试周期内排放的活化气体所致公众个人剂量最大值约为 $9.83E-03\text{mSv}$, 远低于评价给出的公众剂量约束值要求 (0.1mSv/a)。同时, 安装调试期间加速器连续运行时间较短, 且调试期间为能量递增式调试, 不会一直维持最大调试工况, 其产生的放射性废气影响轻微, 其对环境的影响是可以接受的。

5.1.1.3. 放射性废水环境影响分析

项目涉及产生的含放射性水主要是加速器冷却水系统中活化的冷却水。加速器所用冷却水为去离子水, 去离子水在使用过程中, 由于 ^{16}O 散裂反应可能形成的放射性核素除 ^{7}Be 、 ^{3}H 外, 其余核素的半衰期都很短, 放置一段时间就基本可以衰变。

本次评价仅预测调试周期内冷却水活化情况。根据加速器运行经验, 其设备束流损失处的冷却水产生的感生放射性最大, 本项目加速器系统的束流损失点主要位于靶室内转换靶或束流收集器上, 加速器大厅束流损失较小(束流损失率最大约为 0.6%), 因此主要考虑靶室内的冷却水活化。本次采用 FLUKA 软件设置本项目的最大运行时间及最大束流损失源强进行活化模拟。

表 5.1-11 模拟参数取值表

略

略

图 5.1-17 冷却水感生放射性模拟图（x-y）

略

图 5.1-18 冷却水感生放射性模拟图（3D）**表 5.1-12 冷却水感生放射性核素及其活度**

略

由上表可知，在6.75mA强度640h照射下，停机时设备冷却水感生放射性核素总活度约为 $2.11E+08$ Bq，其中主要核素 3H 的活度为 $8.63E+04$ Bq。根据建设单位提供资料，本项目加速器系统靶室冷却水系统中水量为 $1m^3$ ，则此时冷却水中感生放射性核素 3H 的活度浓度为 $8.63E+04$ Bq/ m^3 ，约为 $8.63E-02$ Bq/g。远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）表A.1中 3H 的参考豁免水平相关数值（ 3H ：活度浓度： $1.0E+06$ Bq/g，活度： $1.0E+09$ Bq）。

同时本项目冷却水在调试周期加速器运行期间循环使用，不排放。仅在维修维护期间若需要向外排放时，由用户单位负责收集和后续的暂存、排放。活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足国家相关规定的排放标准《污水综合排放标准》（GB8978-1996）第一类污染物最高允许排放浓度标准要求）（总放射性浓度不大于 10 Bq/L），并经审管部门批准后，方可排放。

综上，项目产生的放射性废水能得到有效处置，不会对项目区域地表水造成不利影响。

5.1.1.4. 放射性固体废物环境影响分析

项目调试周期不会产生放射性固废，仅维修维护环节可能产生更换下的束流装置、靶件等含感生放射性的结构部件。由于维护维修周期较短，且该环节产生的残留的感生放射性主要为用户单位日常运行加速器产生，与本项目关联性较小。因此本次评价仅对调试周期内的加速器系统的结构部件的感生放射性进行预测。

本次采用FLUKA软件设置本项目的最大运行时间及最大束流损失源强进行活化模拟，模拟源强与冷却水活化一致，靶件为钨靶，结构部件考虑材质为铁和

铝。

略

图 5.1-19 结构部件感生放射性模拟图（x-y）

略

图 5.1-20 结构部件感生放射性模拟图（3D）

表 5.1-13 钨靶上产生的感生放射性核素及其活度

略

表 5.1-14 结构部件（铁）上产生的感生放射性核素及其活度

略

表 5.1-15 结构部件（铝）上产生的感生放射性核素及其活度

略

表 5.1-16 靶件和结构部件上产生的感生放射性核素及其活度合计

略

综上，由上表可知，本项目调试阶段以最大调试工况进行模拟预测，其感生放射性主要集中在靶件上，调试周期内靶件不会进行更换，因此不会产生含感生放射性的废靶件。假设调试周期内对结构部件进行了维护更换，根据建设单位提供资料，单次维修维护产生的结构部件量约为90kg，保守按结构部件上产生的感生放射性核素均位于该部分结构部件上，则产生的废弃的结构部件放射性活度浓度最高为 $6.26E+03\text{Bq/g}$ 。该值超出了豁免水平，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 $\leq 0.1\text{mSv/h}$ ）后交接到用户单位，最终由用户单位委托有资质的单位统一回收处理。

项目产生的放射性固废能得到有效处置，不会对周围环境造成不利影响。

5.1.2. 营运期非放环境影响

5.1.2.1. 废气环境影响

项目产生的非放废气主要为加速器大厅和靶室内的臭氧（O₃）和二氧化氮（NO₂），安装调试期间，加速器连续运行时间较短，且调试过程中的束流强度较小，其产生的臭氧和二氧化氮饱和浓度极低。同时加速器大厅及靶室将设置通排风系统，排风系统设高效过滤器，房间内换气次数不小于 4 次/h。产生的臭氧

及二氧化氮经排风系统收集过滤后排放，其对环境的影响是可以接受的。

5.1.2.2. 废水环境影响

项目产生的非放射性废水主要为工作人员的生活污水，调试周期内生活污水产生量为 10.88m³。依托用户单位生活污水处理设施进行收集处理后达标排放。对区域地表水环境影响轻微。

5.1.2.3. 噪声环境影响

项目调试期间加速器连续运行时间较短，同时加速器噪声源位于厂房内，通过基础减振和建筑隔声等降噪措施后，其对周边声环境影响轻微。

5.1.2.4. 固体废物环境影响

项目产生的非放射性固体废物主要为工作人员生活垃圾。调试周期内生活垃圾产生量约 131.5kg。生活垃圾依托用户单位厂区既有生活垃圾桶收集后交当地市政环卫部门清运。对周围环境影响轻微。

5.2. 辐射事故影响分析

5.2.1. 事故分级判断依据

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 449 号），根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故（I 级）、重大辐射事故（II 级）、较大辐射事故（III 级）和一般辐射事故（IV 级）等四级，详见下表。

表 5.2-1 国务院令第 449 号辐射事故等级分级一览表

事故等级	事故情形
特别重大辐射事故	I类、II类放射源丢失、被盗、失控造成大范围严重辐射污染后果，或者放射性同位素和射线装置失控导致 3 人以上（含 3 人）急性死亡。
重大辐射事故	I类、II类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致 2 人以下（含 2 人）急性死亡或者 10 人以上（含 10 人）急性重度放射病、局部器官残疾。
较大辐射事故	III类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致 9 人以下（含 9 人）急性重度放射病、局部器官残疾。
一般辐射事故	IV类、V类放射源丢失、被盗、失控，或放射性同位素和射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射

同时根据《职业性外照射急性放射病诊断》（GBZ104-2017），急性放射病发生参考剂量见下表。

表 5.2-2 急性放射病的发生率、死亡率与辐射剂量的关系

急性放射病	分度	受照剂量范围参考值
骨髓型急性放射病	轻度	1.0Gy~2.0Gy
	中度	2.0Gy~4.0Gy
	重度	4.0Gy~6.0Gy
	极重度	6.0Gy~10.0Gy
肠型急性放射病	轻度	10.0Gy~20.0Gy
	中度	/
	重度	20.0Gy~50.0Gy
	极重度	/
脑型急性放射病	轻度	50Gy~100Gy
	中度	
	重度	
	极重度	100Gy
	死亡	

5.2.2. 辐射事故识别

本项目建设内容包括 40MeV 加速器的销售、安装调试及后续维修维护活动，可能涉及发生辐射事故的场景有安装调试、维护维修两种，其中安装调试期间加速器可达到最大工况，因此考虑安装调试期间可能发生的辐射事故。安装调试期间可能存在的辐射事故风险隐患如下表。

表 5.2-3 项目辐射事故风险识别

序号	工作场所	设备或物质	类型	风险因子	可能发生的辐射事故
1	加速器室、靶室	花瓣电子加速器	I类射线装置	X 射线、中子	① 由于安全联锁系统失效，在防护门未关闭的情况下即进行出束操作，对误入机房内的人员或在防护门附近活动人员造成不必要的照射。 ② 工作人员还未全部撤离机房，控制室内人员误操作启动设备，造成机房内滞留人员的误照射。

5.2.3. 辐射事故影响分析

5.2.3.1. 加速器误照射事故

（1）事故情景

加速器安装调试以及维修维护过程中，电离辐射源主要来自瞬时辐射，这些瞬时辐射随着加速器运行的停止而消失，不再引起空气以及设备冷却水的活化。设备首次安装调试时，工作场所内没有公众，主要是从事安装调试的工作人员。设备发生故障进行维修以及维护保养前，需要对工作场所进行清场，将其他公众等清离设备的工作场所，且工作场所不允许公众进入。

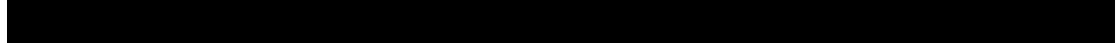
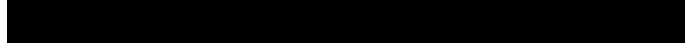
因此，本项可能发生的事故主要是安装调试和维修维护过程中，工作人员在加速器开机出束的情况下滞留或误入加速器室或靶室造成的人身伤害。

（2）事故源项

假设当人员非法闯入或滞留靶室时，加速器正在进行出束作业（能量最大）。

（3）事故后果预测及评价

当人员非法闯入或滞留靶室时，根据建设单位提供资料，靶室调试工况下源项最大。查询 NCRP 第 51 号报告及其编译本《0.1-100MeV 粒子加速器设施辐射防护指南》附录 E.1 以及附录 E.3，对于钨转换靶，电子束 0° 角方向 X 射线发射率为 $1.00E+06\text{rads.m}^2/\text{(mA.min)}$ ，电子束 90° 角方向 X 射线发射率为 $1.10E+04\text{rads.m}^2/\text{(mA.min)}$ 。



由于靶室内设有紧急停机装置和紧急开门装置，假设受照时间为 10s，不考虑靶室局部屏蔽情况，则其受照剂量为 5630Gy，导致人员受照剂量超过《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中职业 20mSv 的剂量限值，且超过 100Gy 受照剂量可造成人员死亡，构成重大辐射事故。

5.2.4. 辐射事故防范及应急措施

1、事故防范措施

① 加速器设计有功能齐全，具有高安全等级的安全联锁系统，采用巡检、紧急停机、分区控制、警报装置等安全设备和措施，确保当设备某一区域有束流时，该区域的门无法打开，工作人员不能进入该区域；当设备某一区域有人时，束流也不能被传输到该区域。能够保证工作人员在安装调试和维修调试过程中的安全。工作人员工作前应检查各项安全联锁装置是否异常。

② 从事加速器安装调试和维修调试的工作人员均由经过辐射防护培训和专业培训的人员担任，并严格按操作管理规程对设备进行操作运行。

③ 加强工作场所出入口的管理并加强员工安全教育和培训，尽可能避免人员误照射事故的发生。

2、事故应急措施

建设单位针对本项目按照相关要求完善《辐射事故应急预案》相关内容并严格执行，确保在发生辐射事故时，能有序、迅速地采取正确的处理措施，缓解事故后果，控制辐射事故的发展，将事故对人员、财产和环境的损失减少到最低限度。由于项目射线装置的安装调试、维护维修场所均为用户单位，建设单位应提前与用户单位沟通，若发生辐射事故，用户单位应协助建设单位工作人员采取应急措施。若发生辐射事故，应迅速、有效的采取以下应急措施：

- ①发现误照射事故时，现场工作人员应立即切断电源，将人员撤出加速器室或靶室，关闭防护门，同时向建设单位辐射安全管理小组以及用户单位相关机构报告。
- ②发生射线装置事故时，应立即疏散所有与处理事故无关人员，保护好事故现场，对在事故中可能受到照射的人员及时送到医院进行医学检查和治疗。
- ③事故发生后的 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地环境保护主管部门和公安部门报告。造成或可能造成超剂量照射的，还应向卫生行政部门报告。
- ④分析确定辐射事故的原因，记录发生事故时射线装置工作状态、事故延续时间，以便确定事故时受照个体所接受的剂量。
- ⑤查明事件与事故原因。排除故障，并经专门检验确认装置已恢复正常。按国家辐射事故管理规定结案并建立事故档案。

第六章 辐射安全管理

6.1. 机构与人员

6.1.1. 辐射安全与环境保护组织机构

建设单位成立已按照有关规定成立有辐射安全与环境保护管理机构，由该机构负责全单位的辐射安全与环境保护工作，机构成员主要职责应涉及以下几方面：

- (1) 严格遵守和执行国家及四川省的辐射安全与环境保护相关法律、法规；宣传国家和上级安全部门有关射线装置和放射性核素安全使用的方针、政策、法律法规、行业标准，落实安全措施，不断提高职工的劳动保护和安全防护意识。
- (2) 接受上级及属地主管部门的监督管理和检查。
- (3) 组织制定辐射事故应急预案，应急期间充分调动人力和物力资源，实施统一指挥，统一行动，最大限度减少辐射可能带来的危害。
- (4) 负责及时向上级和属地有关部门报告单位营运期内发生的辐射事故和事件。
- (5) 根据单位射线装置和放射性操作相关设备及防护环境实际情况，制定辐射防护与安全有关制度，并实施。
- (6) 组织制订射线装置工作场所岗位职责及操作规程，并做好各项制度的落实。
- (7) 负责组织相关辐射项目的安全和环境、职业卫生评价。
- (8) 督促辐射工作场所监测和辐射工作人员个人剂量监测管理等工作，督促辐射工作人员按要求参加辐射防护培训并参加职业健康体检。
- (9) 定期组织安全检查，及时发现并消除安全隐患，防止辐射事故发生。

在营运期间，辐射安全防护与环境保护工作领导小组应定期总结经验，提升管理实效，并根据国家相关法规等要求，及时修订完善各项规章制度。

6.1.2. 辐射工作人员配备情况

本项目建成后拟配备辐射工作人员 5 人（调试 3 人，维修 2 人），均由建设单位现有辐射工作人员中调配。

根据《放射性同位素与射线装置安全与防护管理办法》规定，建设单位需

做好以下工作：

（1）项目所有辐射工作人员在上岗前，建设单位应组织其进行岗前职业健康检查，并建立个人健康档案，符合辐射工作人员健康标准的，方可参加相应的辐射工作。

（2）所有辐射工作人员应在上岗前参加辐射安全与防护考核，考核合格持证上岗；建设单位应当建立并保存辐射工作人员培训考核档案。

（3）根据国家核安全局《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发〔2015〕40号）的要求：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。因此，本项目应设置辐射安全关键岗位1个，为辐射防护负责人，最少在岗人数1名；且辐射安全关键岗位在申领辐射安全许可证前须由注册核安全工程师担任。

6.2. 辐射安全管理规章制度

建设单位已制定的辐射安全与防护管理制度涵盖了《辐射安全与环境保护管理机构》《辐射工作场所安全管理规定（综合性文件）》《操作规程》《岗位职责》《辐射安全和防护设施维护维修制度》《设备检修维护制度》《人员培训计划》《个人剂量监测方案》《辐射环境监测方案》《设备使用登记和台账管理制度》。建设单位应针对本项目完善已有辐射安全与防护管理制度，以满足管理需要。

项目制定的辐射安全与防护管理制度重点如下：

（1）辐射安全与环境保护管理机构文件：以正式文件成立辐射安全与环境保护管理机构，明确相关人员的管理职责，全面负责单位辐射安全与环境保护管理工作。建设单位承诺在项目建成时按照有关规定成立辐射安全与环境保护管理机构，并明确相关管理职责。

（2）辐射工作场所安全管理规定（综合性文件）：根据单位具体情况制定辐射防护和安全保卫制度，重点是射线装置工作场所运行时的辐射安全管理。建设单位将针对各涉及放射性操作内容，制定《辐射安全管理规定》。

（3）操作规程：针对本项目拟制定加速器安装调试、维修维护操作规程。

明确辐射工作人员的资质条件要求，明确操作流程及操作过程中应采取的具体防护措施，重点是明确操作步骤，并明确射线装置使用前，工作人员检查装置的性能，对辐射安全措施的检查等，确保辐射安全措施的有效性，明确对药物运送过程中人员的清场等，确保辐射工作安全有效运转。工作时必须佩戴个人剂量计，避免事故发生。各操作规程应张贴在相应辐射工作场所内辐射工作人员可看见的醒目位置。

（4）岗位职责：建设单位制定有《辐射工作人员岗位职责》《辐射工作人员培训制度》《辐射工作人员个人剂量管理制度》。明确管理人员、工作人员的岗位责任，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任，并层层落实。

（5）辐射安全和防护设施维护维修制度：建设单位拟针对项目加速器采取的辐射安全防护措施特点，完善《辐射安全防护设施维护与维修制度》。主要内容为制订辐射工作场所主要辐射安全防护设施设备维护计划，明确维修记录和在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施，确保各项设施设备保持良好的工作状态。

（6）人员培训计划：明确培训对象、内容、周期、方式及考核的办法等内容。及时组织辐射工作人员参加辐射安全和防护培训，辐射工作人员须通过考核后方可上岗。本项目拟配备辐射工作人员均为建设单位现有辐射工作人员，均已通过辐射安全与防护培训考核，持合格证上岗。

（7）个人剂量监测方案：明确辐射工作人员开展辐射工作时均佩戴个人剂量计，个人剂量计定期送有资质部门进行监测；明确个人剂量计的佩戴和监测周期，个人剂量监测结果及时告知辐射工作人员，使其了解个人剂量情况；以个人剂量检测报告为依据，严格控制职业人员受照剂量，防止个人剂量超标；明确辐射工作人员进行职业健康体检的周期，建立个人累积剂量和职业健康体检档案。

6.3. 监测管理

由前述分析可知，本项目加速器销售环节不涉及放射性操作，不需要进行监测。本项目辐射监测主要针对安装调试和维修维护过程进行，监测内容包括工作场所监测、环境监测和个人剂量监测。

6.3.1. 工作场所监测

本项目需要进行的工作场所与用户单位使用射线装置时进行的工作场所一

致。因此，本项目安装调试和维修维护期间的工作场所监测主要依托用户单位配备的区域固定式监测仪表进行。此外，建设单位配备有中子巡测仪和 γ 剂量巡测仪，在安装调试和维修维护期间，定期对工作场所进行巡测。

6.3.2. 环境监测

用户单位在使用加速器时，需要制定辐射监测计划并进行环境监测。本项目需要进行的环境监测与用户单位使用加速器时进行的环境监测一致。因此，本项目安装调试和维修维护期间的环境监测主要依托用户单位配备的辐射监测仪表进行，不再单独进行环境监测。

6.3.3. 个人剂量监测

建设单位为本项目从事设备安装调试及维修调试的辐射工作人员配备了个人剂量计和直读式个人剂量报警仪，进入辐射工作场所工作时必须佩戴。其中，个人剂量计每季度委托有资质的单位监测一次，并建立辐射工作人员个人剂量档案长期进行信息跟踪、监控。此外，根据辐射工作人员实际从事的工作内容，对进入辐射区进行维修维护，并可能接触高活化部件的工作人员，工作完成的当月即将其个人剂量计送检。

直读式个人剂量报警能够实时显示工作人员每次工作的受照剂量和场所的剂量率水平。对于进入辐射区域内接触到活化水平较高的部件的工作人员，建设单位为其建立档案，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。

6.3.4. 监测设备

根据前述监测计划，本项目拟配置辐射环境监测设备见下表。

表 6.3-1 监测仪器一览表

序号	仪器名称	数量
1	x- γ 剂量监测仪	2
2	γ 巡检仪	1
3	中子监测仪	1
4	直读式个人剂量报警仪	5（按主操作人员）

6.4. 辐射事故应急

为了加强对射线装置的辐射安全和防护监督管理，促进射线装置的安全应

用，保障人体健康，保护环境，针对本项目特点，建设单位拟针对本项目对现有《辐射事故应急预案》进行完善，已制定的应急预案要点内容主要包括以下内容。

6.4.1. 应急响应机构

6.4.1.1. 应急组织机构

建设单位已成立有辐射事故应急小组。

6.4.1.2. 应急组织机构职责

应急总指挥职责：

- (1) 贯彻落实国家和地方有关辐射事故应急管理的法律法规。
- (2) 负责建设单位辐射事故（事件）的应急响应指挥。
- (3) 领导和保证应急预案可随时启动，保障应急响应所需人力和物资。
- (4) 发生辐射事故时，负责及时向有关行业行政主管部门报告。

应急副总指挥职责：

- (1) 总指挥的第一替代人。
- (2) 协助总指挥工作，负责应急救援人员的调配和组织、应急物资的保障及现场救援工作，对总指挥负责。

辐射安全部门职责：

辐射安全部门是建设单位应急响应活动的日常管理部门，主要职责如下：

- (1) 负责应急预案的编制和修订。
- (2) 负责辐射事故的受理和接报。
- (3) 协助应急总指挥实施应急响应工作。
- (4) 辐射事故发生后，赶赴现场按照应急指挥部的指示进行事故处理。
- (5) 对辐射事故现场进行应急监测，组织事故现场工作人员进行应急处理，控制应急人员受照剂量，划定警戒范围，组织人员疏散等。
- (6) 负责辐射监测设备的日常维护和检定、校准或比对。
- (7) 负责组织日常应急演练及应急培训工作。
- (8) 事故发生后向有关部门提交报告。
- (9) 参与辐射事故（事件）原因调查，落实上级部门整改要求。

6.4.2. 应急响应

6.4.2.1. 应急启动

发生辐射事故时，应立即报告现场专职辐射安全管理人员，并落实现场警戒和处理措施；同时联系用户单位相关机构，请求其协助现场警戒及处理措施。在接到报告后由应急办公室通知应急总指挥和各相关专业人员，根据应急总指挥指令启动辐射事故应急响应程序。

6.4.2.2. 应急响应行动

辐射事故应急小组根据辐射事故类型特点，提供专业技术支持，以便更好地处理放射性物质与恢复环境。

辐射事故应急小组根据现场情况设立事故警戒区，人员进入现场须经批准，离开现场须经辐射监测和必要的去污，保障事故处理人员、设备或物资路径通畅。

辐射防护人员对现场的辐射水平进行监测，检查应急处置人员防护设备，设置环境监测点，开展人员污染监测和剂量估算，根据事故处理进展提供防护建议。

对有急性照射或摄入核素的人员进行必要的医疗救治，为现场事故处理人员提供辐射防护。

立即向用户单位所在地所属生态环境部核与辐射安全监督站、省生态环境厅等相关部门报告，并在事故发生后 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》上报用户单位所在地所属生态环境部核与辐射安全监督站和省生态环境厅。

根据监管部门的要求填写《辐射事故后续报告表》上报用户单位所在地所属生态环境部核与辐射安全监督站和省生态环境厅。

6.4.2.3. 应急终止

应急终止需满足以下条件：

- (1) 事故得到控制，事故影响已经消除。
- (2) 事故现场的各种专业应急处置行动已无继续的必要。

应急总指挥确认终止条件和时机，发布应急终止命令。

建设单位应急办公室向上级主管部门应急办公室提交辐射事故初始报告表和后续报告表，组织事故原因调查和经验反馈，改进安全措施。

6.4.3. 应急物资与保障

根据应急预案的职责分工，准备好应对辐射事故的人力、物资、车辆、通讯和资金等保障工作。

建设单位应定期检查应急物资的性能状况，确保随时处于可用状态。

6.4.4. 应急培训与演练

6.4.4.1. 培训

承担应急任务的人员每年应参加不低于一次本项目辐射事故应急预案培训，熟悉项目辐射源项、可能的事故类型、危害与处置程序，从而能正确理解应急响应要求，有效执行应急响应程序，并将应急培训记录存档。

6.4.4.2. 演练

(1) 每年开展针对加速器误照射事故的应急演练，使相关人员熟悉辐射事故应急预案和应急处置程序，并能做到有序、协调配合。

(2) 每次演练后，针对演练中发现的问题，及时对应急预案进行修订和完善，以提高应对突发辐射事故的应急处置能力。

6.4.5. 小结

建设单位已制定有较为完善的辐射事故应急预案，建设单位在针对本项目完善已有预案内容后，能满足本项目在运行期间可能发生的辐射事故应急需要，具有较强的针对性和可操作性。单位在营运期间应严格执行各项辐射安全管理规章制度，将辐射安全和防范措施落实到工作实处，防患于未然。

第七章 利益-代价简要分析

7.1. 利益分析

我国同位素药物行业起步于 20 世纪 90 年代，起步较晚，2017 年人均同位素药物支出 3.2 元，仅为美国的 5.7%，同位素药物市场在中国属于方兴未艾的阶段，与国外市场相比，我国同位素药物市场规模小，但增速快，未来发展空间巨大。根据 2019 年 Frost&Sullivan 机构统计数据显示，2017 年国内同位素药物市场约 43.8 亿元，2013~2019 年复合增长率约为 12.1%，随着我国人均 GDP 超过 1 万美元，步入中高等收入国家，人民群众对健康服务的需求日益增加，2022 年同位素药物市场已超过 100 亿元，2019-2022 年复合增长率高达 19.4%，国内同位素药物市场迎来高速发展期。

放射性药物具有独特的特点，在心血管、脑神经、肿瘤等诊断方面具有独特的不可替代的作用；在肿瘤治疗方面相对于化学药、生物药也具有独特的特点，放射性是低剂量药物，研发成本相对较低，研发成功率高于 80%，远高于普药研发成功率 30%。

此外，放射性同位素作为放射性药物的原料，其制备可由加速器打靶制备，本项目销售的 40MeV 加速器可满足目前市场上绝大部分放射性同位素的制备需求，建成后投资收益可稳固提高，实现长期盈利，具有较好的经济效益。

本项目的建设符合新兴产业发展需要，有利于促进当地经济快速发展，增强企业的综合经济能力，增加就业机会。

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。

本项目加速器销售环节依托一所现有场所进行，实行零库存管理模式，不设装置暂存场所。安装调试和售后维修维护环节在用户单位使用射线装置的场所内进行，由一所的工程师负责。社会资源损失可忽略；能源损耗可忽略。

7.2.2. 经济代价

经济代价主要包括以下三方面的成本：

- (1) 建筑场地成本：本项目不涉及。

-
- (2) 设备投资成本：本项目建设单位为设备销售方。
 - (3) 环保投资：本项目建设单位为销售方，在设备使用场所仅进行设备安装调试，设备使用场所环保措施由用户单位设计布置。

7.2.3. 环境代价

本项目环境代价主要表现在：

加速器安装调试及后续维修维护期间将产生电离辐射、放射性废气、放射性废水以及放射性固体废物，同时对职业人员及公众造成一定辐射影响。

通过理论预测，项目电离辐射对辐射工作人员和周边公众造成的附加剂量值低于本报告提出的剂量约束值（职业人员 2mSv/a、公众 0.1mSv/a）。

7.3. 正当性分析

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）关于辐射防护“实践的正当性”要求，在考虑了社会、经济和其他有关因素之后，其对受照个人或社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时，该实践才是正当的。

本项目销售的 40MeV 加速器可用于放射性药品原料（放射性同位素）的生产、以及一些科研的需求等，具有明显的经济效益和社会效益。

综上所述，通过对本项目的利益-代价的简要分析，考虑社会、经济、环境各方面的因素，本项目为接受治疗的个人和给社会所带来的利益远大于其引起的辐射影响，项目符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践的正当性”的原则与要求，项目的实践具有正当性。

第八章 结论与建议

8.1. 项目工程概况

本项目为“销售（含建造）和使用 40MeV 加速器项目”，项目建设内容包括 40MeV 加速器的销售、安装调试及后续维修维护活动，年最大销售量为 2 台，年最大安装调试量为 2 台，年最大维修维护量为 2 台。其中，销售环节在一所内部进行，实行零库存管理模式，一所内部不设装置暂存场所。拟销售加速器系统主体屏蔽工程（辐射工作场所）采用模块化设计，由一所提供统一的工程设计图纸交付用户进行建设。加速器生产/调试部分，则由一所进行整套加速器系统的设计，并外委进行全部部件的定制加工。部件加工完成且用户单位已建成合格的模块化场所后由一所联系各部件供应商直接发货至用户单位。加速器系统装配、调试（不出束/出束）等工作由一所的工作人员负责，均在用户单位建成的模块化辐射工作场所内进行。加速器调试完毕可正常运行后，交付用户使用。

8.2. 辐射安全与防护

8.2.1. 电离辐射防护

本项目涉及的加速器的安装调试及维修维护场所位于用户单位，用户单位需根据具体情况设计加速器大厅的屏蔽，且大厅的屏蔽效能不低于建设单位提供的数值且能够满足相关标准要求。

8.3. 环境影响分析

（1）辐射环境影响分析结论

建设单位对其辐射工作人员采用“累积剂量控制”的方式，分析结果表明，项目 40MeV 加速器首次安装调试和售后维修维护过程中，工作人员的最大个人年有效剂量不会超过其剂量约束值 2mSv/a。公众所受的最大个人年有效剂量低于其剂量约束值 0.1mSv/a。因此，本项目正常运行时对环境的影响是可以接受的。

（2）放射性“三废”影响分析结论

① 放射性废气

项目产生的放射性废气主要为加速器安装调试期间加速器出束造成的空气活化。安装调试期间，加速器连续运行时间较短，且调试过程中的束流强度较小，其产生的放射性废气影响轻微，其对环境的影响是可以接受的。

② 放射性废水

项目产生的放射性废水主要是活化的冷却水。加速器所用冷却水为去离子水，去离子水在使用过程中，由于¹⁶O 散裂反应可能形成的放射性核素除⁷Be、³H 外，其余核素的半衰期都很短，放置一段时间就基本可以衰变。

冷却水在运行期间循环使用，不排放。维修维护期间若需要向外排放时，由用户单位负责收集和后续的暂存、排放。活化的冷却水在排放前必须进行取样测量，满足国家相关规定的排放标准《污水综合排放标准》（GB8978-1996）第一类污染物最高允许排放浓度标准要求）（总放射性浓度不大于 10BqL），并经审管部门批准后，方可排放。

③ 放射性固体废物

项目产生的放射性固体废物主要为加速器维修维护环节更换下来的束流装置、靶件等含感生放射性的结构部件，包装后交给用户单位，最终由用户单位委托有资质的单位统一回收处理。

8.4. 辐射安全管理

建设单位已成立有辐射安全与环境保护领导小组，负责建设单位辐射安全与环境保护工作。建设单位已按相关规定要求制定有一系列辐射安全管理制度。

建设单位现有辐射工作人员均已参与了辐射安全与防护培训及考核，且考核合格持证上岗，并按要求为辐射安全关键岗位配备了足够的注册核安全工程师。

建设单位已制定有《辐射事故应急预案》，其内容包括目的、使用范围、职责分工、事故处理程序、应急总结、事故预防措施、应急设备及保障、记录与报告、通讯等内容。建设单位需针对本项目内容对已有应急预案内容进行完善。

本项目配备了相应的辐射监测仪器，并制定有相应的监测制度。同时依托用户单位环境监测制度，各监测计划应包含监测项目、监测频次、监测点位及监测方法，监测方案须满足相关环境监测规范要求，满足本项目环境监管要求。

8.5. 公众参与

项目环境影响评价信息公示发布后，截止至意见反馈日期，未收到与本项目环境影响和环境保护有关的建议和意见。

8.6. 结论

对建设单位辐射工作能力的分析评价表明，建设单位在严格落实人员培训计划后，其辐射工作人员的能力能够达到相关要求；建设单位设立有专门的辐射安全与环境保护管理机构，能够做到职责和分工明确，满足管理要求；建设单位在射线装置调试场所采取的安全防护措施，能够满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。配备了工作人员个人防护用品和辐射监测仪表；建设单位已制定相关辐射安全管理制度，按要求制定完善并严格落实以后，能够确保本项目 40MeV 加速器销售、安装调试和维修维护过程中的安全；在严格按照国家相关法律法规以及技术规范制定管理制度，完善以上提出的各项要求后，能够满足国家相关的管理及技术层面要求。

综上所述，建设单位在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，本项目的建设对环境的影响符合环境保护的要求，故从环境保护角度考虑，本项目的建设是可行的。

8.7. 承诺

项目建设单位——中国工程物理研究院流体物理研究所针对本项目作出以下承诺：

- (1) 在建设和运营过程中严格落实项目设计及本报告书提出的各项污染防治措施与辐射安全防护措施。
- (2) 在申请辐射安全许可证之前，注册并登录全国核技术利用辐射安全申报系统（网址：<http://rr.mee.gov.cn/rsmsreq/login.jsp>），对本项目所用I类射线装置的相关信息进行申报。
- (3) 定期进行辐射事故应急演练，检验应急预案的可行性、可操作性，并根据演练反映的问题，总结、完善事故应急预案。
- (4) 在销售本项目加速器时，对用户使用I类射线装置的资质进行审核，用户应具有使用本项目相关产品的环评手续及环评批复；若用户尚未取得相关环评批复，用户应承诺将履行使用本项目相关产品的环评手续且取得环评批复。建设单位有义务协助用户单位办理相关手续。
- (5) 严格遵守国家相关规定，在取得本项目环评批复后方可开展 40MeV 加

速器销售、安装调试及维修调试活动。

（6）所有辐射工作人员须通过辐射安全与防护考核，保证所有辐射工作人员考核通过持证上岗。并在后续的营运期间，按相关规定对辐射工作人员进行再培训教育。

（7）运行期间，严格管理保护环境和相关人群安全。