

核技术利用建设项目

# 分子探针平台新增回旋加速器 项目环境影响报告表



环境保护部监制

## 目 录

表 1	项目基本情况 .....	1
表 2	放射源 .....	17
表 3	非密封放射性物质 .....	18
表 4	射线装置 .....	19
表 5	废弃物（重点是放射性废弃物） .....	20
表 6	评价依据 .....	21
表 7	保护目标与评价标准 .....	24
表 8	环境质量和辐射现状 .....	37
表 9	项目工程分析与源项 .....	42
表 10	辐射安全与防护 .....	68
表 11	环境影响分析.....	94
表 12	辐射安全管理 .....	118
表 13	结论与建议 .....	123
表 14	审 批 .....	126

### 表 1 项目基本情况

建设项目名称		分子探针平台新增回旋加速器			
建设单位		北京大学			
法人代表	龚旗煌	联系人	刘特立	联系电话	18810645947
注册地址		北京市海淀区颐和园路 5 号			
项目建设地点		北京市怀柔区怀柔新城 11 街区分子探针平台综合实验楼地下一层北侧			
立项审批部门		北京市发展和改革委员会	批准文号	京发改（审）[2023]782 号	
建设项目总投资（万元）	5000	项目环保投资（万元）	1000	投资比例（环保投资/总投资）	20%
项目性质		<input checked="" type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它		占地面积（m <sup>2</sup> ）	850
应用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类		
		<input type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I类（医疗使用） <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类		
	非密封放射性物质	<input checked="" type="checkbox"/> 生产	<input checked="" type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物		
		<input type="checkbox"/> 销售	/		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> 乙 <input type="checkbox"/> 丙		
	射线装置	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
	其他				
	<h4>1.1 单位概况</h4> <p>北京大学创办于 1898 年，初名京师大学堂，是中国第一所国立综合性大学，也是当时中国最高教育行政机关。辛亥革命后，于 1912 年改为现名。2000 年 4 月 3 日，北京大学与原北京医科大学合并，组建了新的北京大学。两校合并进一步拓宽了北京大学的学科结构，为促进医学与人文社会科学及理科的结</p>				

合，改革医学教育和研究奠定了基础。近年来，在“211 工程”和“985 工程”的支持下，北京大学进入了一个新的历史发展阶段，在学科建设、人才培养、师资队伍建设和教学科研等各方面都取得了显著成绩，为将北大建设成为世界一流大学奠定了坚实的基础。今天的北京大学已经成为国家培养高素质、创造型人才摇篮、科学研究的前沿和知识创新的重要基地和国际交流的重要桥梁和窗口。

## **1.2 本项目情况**

### **1.2.1 本项目分子影像与医学诊疗探针创新平台的背景**

我国十分重视居民健康水平，对医药健康领域做出重要部署。党的十八大以来，习近平总书记反复强调了提高人民健康的重要性，指出“没有全民健康就没有全面小康”，并把健康中国提高到优先发展的战略地位，并在十九大报告中明确了建设健康中国的路线图。健康中国的建设首先离不开医学科学的发展。我国人口基数庞大，市场需求潜力巨大，但与发达国家相比，我国的分子影像探针发展相对落后，在探针药物研究、影像设备的原创性、配套支持和平台建设方面均有不足。

基于以上战略发展机遇以及解决我国在分子探针领域的落后局面，计划由北京大学牵头组建，北京市固定资产投资资金支持的国家级“分子影像与医学诊疗探针创新平台”（简称“分子探针平台”）。分子探针平台依托北京大学，紧密结合各领域创新力量，开展分子影像关键技术核心攻关，解决我国放射性药物的“卡脖子问题”，有利于推动多学科知识、技术的交叉融合，通过平台间的交叉融合，建设成为国际领先的精准分子影像探针及药物研发与转化公共服务综合平台，其作为“多模态跨尺度生物医学成像设施”的附属平台，二者缺一不可、互相促进、协同发展。“多模态跨尺度生物医学成像设施”规划建设三大成像装置，覆盖宏观、介观、微观的全生物体尺度，并进行成像模态融合。分子影像探针与成像技术的组合配置，将发挥成像设施与分子影像探针平台的最大效能，平台建成后，将为“多模态跨尺度生物医学成像设施”提供更为有效的靶分子，极大的提升设施的成像水平，二者之间通过相互支撑配合，将开展一系列国际领先的精准分子影像探针研究与开发，极大提高现有设施的装备水平，产生一批有影响力的科技成果。

分子探针平台建设内容包括五个平台：活体化学与探针技术平台(平台 1)、生物影像探针平台(平台 2)、多模态影像探针平台(平台 3)、医学诊疗探针平台(平台 4)和公共服务平台(平台 5)。通过平台间的交叉融合，在基础科研、生物医药、人民健康等领域中实现不同原型技术全流程开发验证，建设成为国际领先的精准分子影像探针及药物研发与转化公共服务综合平台。支持怀柔科学城正在推进的“多模态跨尺度生物医学成像设施”的运行和技术转化，从而提供解决癌症等重大生命科学和医学问题的方案。平台关系图见图 1.2-1。

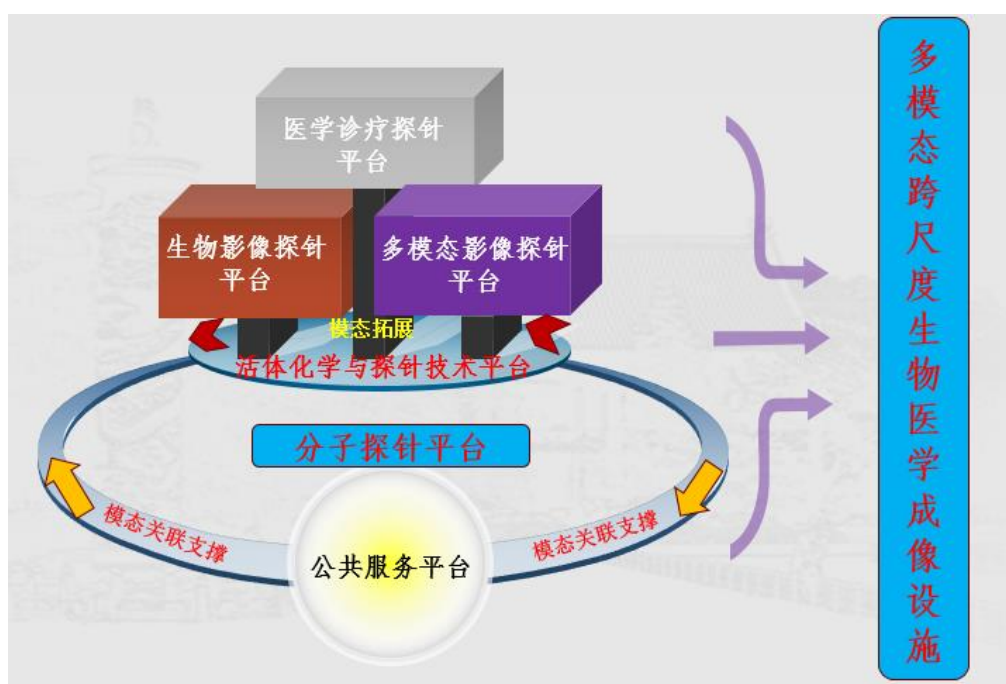


图 1.2-1 平台关系图

### 1.2.2 建设工程概况

本项目拟建于北京市怀柔区怀柔新城 11 街区，东至慧云东路，西至多模态跨尺度生物医学成像设施用地，北至怀柔新峰街，南至怀柔雁栖东七路，地理位置图见图 1.2-2。北京市规划和自然资源委员会怀柔分局于 2023 年 11 月 23 日发布的《关于分子影像与医学诊疗探针创新平台项目“多规合一”协同平台初审意见的函》（京规自（怀）初审函[2023]0034 号）。该平台于 2023 年 12 月取得了北京市发展和改革委员会《关于分子影像与医学诊疗探针创新平台项目建议书(代可研)的批复》（京发改(审)[2023]782 号），于 2025 年 1 月取得了北京市怀柔区生态环境局《关于分子影像与医学诊疗探针创新平台项目环境影

响报告表的批复》（怀环审字[2025]0001号）等审批文件，相关附件见附件1。



图 1.2-2 地理位置图

### 1.2.3 建筑布局

分子探针平台所在的综合实验楼位于怀柔科学城“多模态跨尺度生物医学成像设施”设施东侧，总平面布局图见图 1.2-3 所示。综合实验楼地上 6 层（含设备层），地下 1 层，建筑高度约 30.0m。各实验室分布于建筑地下一层~地上六层，综合实验楼核心技术利用规划建设内容主要集中于综合实验楼地下一层、一层、三层、四层、五层和六层北侧，涉及的 3 个平台，分别为公共服务平台（包括同位素动物实验研究平台、回旋加速器区域、GMP 区域、动物实验区、质控区）、活体化学与探针技术平台（包括电子加速器辐照场所）、医学诊疗探针平台。综合实验楼剖面图见图 1.2-4。

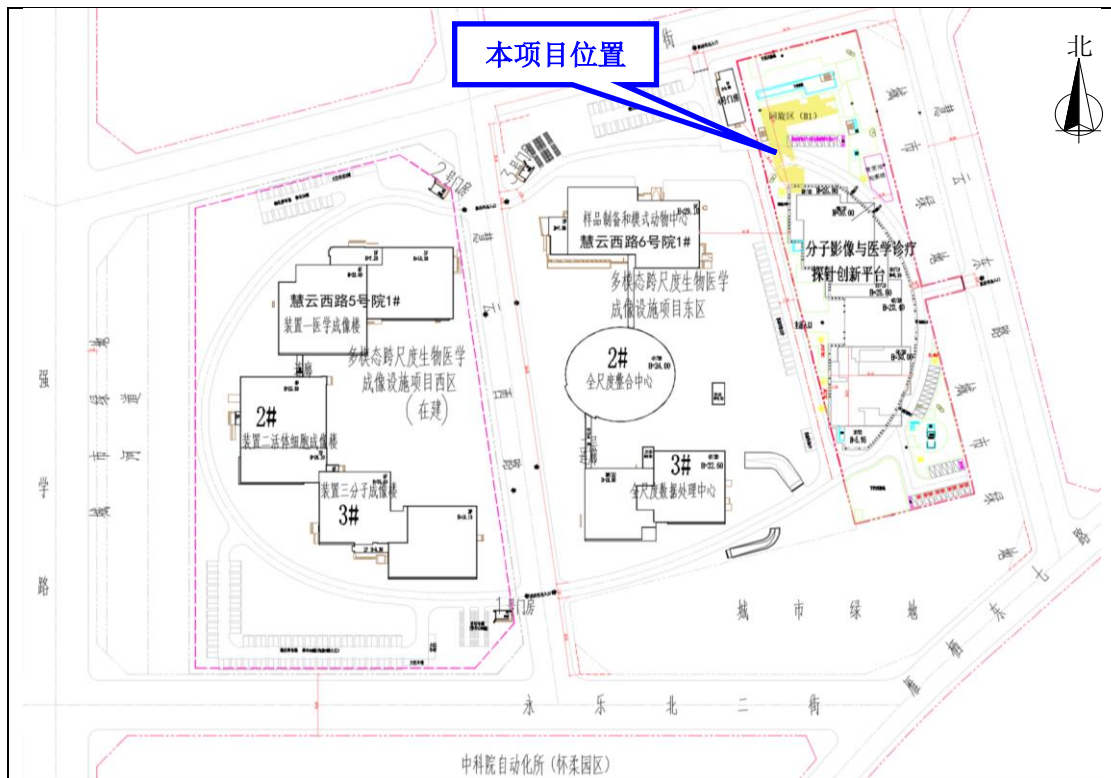


图 1.2-3 总平面布局图

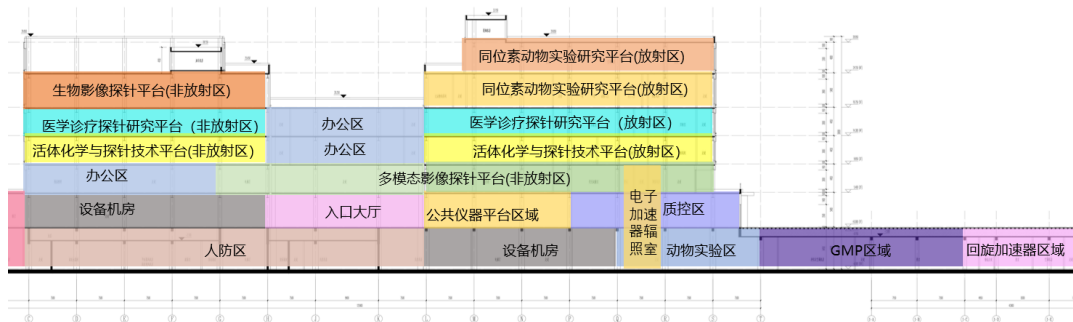


图 1.2-4 综合实验楼剖面图

### 1.2.4 本项目环境影响评价内容

地下一层北侧新建两间回旋加速器室及配套的 positron 核素制备区，拟配带自屏蔽的回旋加速器 2 台，设备加速粒子为质子，玖谊源粒子公司生产的玖源 -11MTS 型（额定参数为 11MeV/100 $\mu$ A）和玖源 -20 型（额定参数为 20MeV/180 $\mu$ A），本次拟制备核素：F-18、C-11、N-13、Ga-68、Cu-64、Zr-89、I-124、Sc-44 共 8 种，两台回旋加速器都能制备 F-18、C-11、N-13、Ga-68、Cu-64、Zr-89，其中 I-124 和 Sc-44 核素只由玖源-20 型回旋加速器制备。

操作这 8 种核素的正电子核素（含固体靶核素）制备区共涉及 2 个，分别为固体靶核素制备区和正电子核素制备区，制备完成的核素转移到平台其他实

实验室进行标记等相关实验。

根据《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）相关规定：对于放射性药品生产、使用场所，如果有相对独立、明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，且有相对独立的辐射防护措施，应当作为一个单独场所进行日等效操作量核算。本项目正电子核素（含固体靶核素）涉及的2个场所：固体靶核素制备区和正电子核素制备区，均满足上述条件，即场所相对独立，有明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，且有相对独立的辐射防护措施，故按照2个工作场所分别核定等级。

各种核素的日最大操作量和年最大用量见表 1.2-1 所示。

**表 1.2-1 本项目核医学科拟使用的核技术情况**

一、拟使用的射线装置情况						
序号	名称	数量	型号及厂家	技术参数	类别	
1	回旋加速器	1	玖源-20, 玖源源粒子公司	20MeV/180μA	II	回旋加速器室1
2	回旋加速器	1	玖源-11MTS, 玖源源粒子公司	11MeV/100μA	II	回旋加速器室2
二、固体靶核素制备区拟使用的核素情况						
序号	核素名称	日最大操作量 (Bq)	年最大使用天数 (天)	年最大用量 (Bq)	用途	来源
1	Sc-44	1.85E+09	100	1.85E+11	制备	回旋加速器自行制备
2	Cu-64	3.70E+09	50	1.85E+11		
3	Ga-68	1.85E+10	50	9.25E+11		
4	Zr-89	3.70E+09	100	3.70E+11		
5	I-124	1.85E+09	50	9.25E+10		
三、正电子核素制备区拟使用的核素情况						
1	F-18	3.70E+10	250	9.25E+12	制备	回旋加速器自行制备
2	C-11	1.11E+10	50	5.55E+11		
3	N-13	1.11E+10	50	5.55E+11		

**1.2.5 核素使用量及场所分级**

《关于明确核技术辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函[2016]430号）相关规定明确了常见的放射性药品生产、使用场所日等效操作量核算中操作因子的选取：放射性药品制备中分装、标记等活动视为“简单操作”；医疗机构使用 F-18、Tc-99m 相关活动视为“很简单的操作”，使用 I-125 粒子源相关活动视为“很简单的操作”，使用 I-131 核素相关活动视为“简单操作”。

依照上述通知精神，对本项目涉及核素的操作方式确定如下：

1) 本项目制备 F-18 为“简单操作”，制备 C-11、N-13、Ga-68、Cu-64、Zr-89、I-124、Sc-44 正电子核素也为“简单操作”。

2) N-13 衰变的  $\gamma$  射线能量与 F-18 相同，且半衰期较 F-18 短，操作 N-13 核素时造成的空气污染和对操作人员的危害程度不高于 F-18，类比确定 N-13 的毒性分组为低毒核素。

3) 其它核素的毒性组别修正因子和状态与操作方式修正因子根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）相关规定给出。

核算后的各种核素的日等效最大操作量如表 1.2-2 所示，都小于非密封放射性物质工作场所的上限（乙级上限  $4 \times 10^9 \text{Bq}$ ）。

表 1.2-2 核素日等效最大操作量

使用场所	核素种类	日最大操作量 (Bq)	毒性组别修正因子	操作方式修正因子	日等效最大操作量 (Bq)	场所等级
固体靶核素制备区	Sc-44	1.85E+09	0.01	简单操作 (液体, 1)	1.85E+07	乙级 (日等效最大操作量为 $9.81 \times 10^8 \text{Bq}$ )
	Cu-64	3.70E+09	0.1	简单操作 (液体, 1)	3.70E+08	
	Ga-68	3.70E+09	0.01	简单操作 (液体, 1)	3.70E+07	
	Zr-89	3.70E+09	0.1	简单操作 (液体, 1)	3.70E+08	
	I-124	1.85E+09	0.1	简单操作 (液体, 1)	1.85E+08	
正电子核素制备区	F-18	3.70E+10	0.01	简单操作 (液体, 1)	3.70E+08	乙级 (日等效最大操作量为 $5.92 \times 10^8 \text{Bq}$ )
	C-11	1.11E+10	0.01	简单操作 (液体, 1)	1.11E+08	
	N-13	1.11E+10	0.01	简单操作 (液体, 1)	1.11E+08	

### 1.2.6 目的和任务的由来

本项目属于使用II类射线装置和制备正电子核素的乙级非密封放射性物质工作场所，根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《建设项目环境影响评价分类管理名录》等相关规定，应当进行环境影响评价，编制环境影响报告表，报生态环境主管部门审批。

根据生态环境部《建设项目环境影响报告书(表)编制监督管理办法》(2019年生态环境部令第9号)最新要求，北京辐环科技有限公司符合第九条第一款规定，无该条第三款所列情形，不属于该条第二款所列单位。公司有专职环评工程师，有能力开展环境影响评价工作。受北京大学的委托，评价机构环评人员在现场踏勘、收集资料的基础上，对该项目建设和运行对环境的辐射影响进行了分析评价，并编制了环境影响报告表。评价主要考虑辐射工作场所对周围环境的辐射影响，对职业人员和公众的辐射影响。

### **1.2.7 产业政策符合性**

根据《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)，本项目属于“鼓励类—六、核能，4、核技术应用：同位素、加速器及辐照应用技术开发”，符合国家产业政策。

### **1.2.8 项目建设正当性**

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中“4.3 辐射防护要求”：“对于一项实践，只有在考虑了社会、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。”

本项目的应用通过医用回旋加速器制备并建立一套常规核素及固体靶核素制备及使用的核素体系，助力其他平台正电子核素放射性探针来源，最终可为医院、科研单位等提供放射性药物，可对放射性药物的新品开发做出贡献，在延缓病情、保证病人健康、挽救病人生命方面能起到十分重要的作用，具有良好的社会效益和经济效益，本项目经采取辐射防护屏蔽和安全管理措施后，其对受电离辐射照射的个人和社会带来的利益要远大于其可能引起的辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中关于辐射防护“实践的正当性”的要求。

### **1.2.9 开展新项目的技术能力**

(1) **人员配备:** 本项目拟新增 6 名辐射工作人员, 其中回旋加速器操作岗位 2 名, 正电子药物制备区岗位 4 名, 能满足本项目的使用需求。

(2) **检测仪器配备:** 本项目拟新增 1 台中子剂量当量监测仪、3 台便携式辐射剂量监测仪、2 台表面污染监测仪、2 台个人剂量报警仪、1 套 7 探头的固定式  $\gamma$  射线辐射监测报警仪和 4 套固定式中子辐射监测报警仪, 能够满足实验室常规的检测要求。

### 1.2.10 周围环境

本项目拟建于北京市怀柔区怀柔新城 11 街区, 用地红线范围东至慧云东路, 西至多模态跨尺度生物医学成像设施用地, 北至怀柔新峰街, 南至怀柔雁栖东 七路。单位地理位置图见附图 1 所示, 平面布局及周围环境图见图 1.2-2 和附图 2。

本项目回旋加速器区位于综合实验楼(地下 1 层, 地面 6 层)地下一层北侧, 该区域包括 11 MeV 和 20MeV 两间回旋加速器室、回旋加速器控制室、设备间、气瓶间、空压站等。两间回旋加速器室相邻设置, 东侧为固体靶核素制备区、走廊、空调机房, 南侧为走道、之外为 6 条同位素制备和实验区, 西侧为土层和消防楼梯, 北侧为控制室、设备间、气瓶间、空压站等, 楼上为绿化区, 无地下室。

回旋加速器配套的正电子核素(含固体靶核素)制备区位于地下一层北侧中部, 其中固体靶核素制备区位于回旋加速器室 1 东侧, 正电子核素制备区位于回旋加速器室南侧。固体靶核素制备区东侧为走廊、空调机房; 南侧为走道、之外为  $\alpha$  核素制备区、 $\beta$  核素制备区、中试研发实验区、实验热室操作区、净化区空调机房等; 西侧为回旋加速器机房、土层和消防楼梯; 北侧为空调机房、原辅料暂存间、走廊、下层庭院; 楼上为绿化区, 无地下室。正电子核素制备区东侧为  $\alpha$  核素制备区、 $\beta$  核素制备区、中试研发实验区、实验热室操作区、净化区空调机房、走廊、空调机房; 南侧为走道、暂存间、动物实验区等, 西侧为走廊、土层, 北侧为走廊、回旋加速器机房等, 楼上为绿化区, 无地下室。本项目回旋加速器及正电子核(含固体靶核素)制备区相关场所位于综合实验楼(地下 1 层, 地面 6 层)地下一层北侧, 楼外除了西侧部分区域为多模态跨尺度生物医学成像设施项目样品制备和模式动物中心(1 号楼局部区域), 其

他都是地面停车位、道路、绿化区及停车位等。根据项目特点及周围毗邻关系，确定主要环境保护目标为评价范围内工作人员，以及场所周围活动的公众人员。

### 1.3 核技术利用及辐射安全管理现状

#### 1.3.1 核技术利用现状情况

北京大学目前持有生态环境部颁发的《辐射安全许可证》（国环辐证[00176]，有效期至2027年9月30日），已许可的活动种类和范围包括：使用I类、II类、IV类、V类放射源；使用II类、III类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。许可证及已许可的射线装置、非密封放射性物质和放射源使用情况见附件2。

#### 1.3.2 近几年履行环保审批情况

北京大学根据《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的规定，在许可的种类和范围内从事密封源、非密封放射性物质及射线装置的使用工作，严格执行辐射安全管理的各项规章制度，于每年1月31日前向生态环境主管部门提交上一年度评估报告，到目前无辐射安全事故发生。北京大学近五年来开展的辐射项目情况统计见表1.3-1。

表 1.3-1 北京大学近几年履行环保审批手续和环保竣工验收手续情况

序号	项目名称	环评批复或备案号	进展
1	北京大学使用射线装置项目（2020年）	202011010800003674	已建成
2	北京大学使用射线装置项目（2021年）	202111010800001090	已建成
3	北京大学使用V类放射源建设项目（2021年）	202111010800001089	已建成
4	新建回旋加速器及配套放射性同位素实验室项目	京环审[2022]129号	于2025年7月自行办理竣工环保验收
5	北京大学使用射线装置项目（2023）	202311010800003007	已建成
6	北京大学生命科学学院放射性开放性实验室退役项目	202311010800003816	已建成
7	北京大学使用射线装置及放射源建设项目（2023）	202311010800003918	已建成
8	新增非密封放射性物质科研场所	京环审[2024]136号	建设中

9	北京激光加速创新中心核技术利用项目	京环审[2025]65号	建设中
10	使用电子加速器辐照装置	京环审[2026]13号	建设中

### 1.3.3 辐射安全管理情况

#### 1.3.3.1 辐射管理机构基本情况

为了加强对辐射安全和防护管理工作，促进同位素和射线装置合法的使用，北京大学设有环境保护办公室、辐射防护室，设有专职工作人员，在辐射防护领导小组和辐射防护专业小组的领导下，协调、完成全校日常辐射防护工作。

北京大学辐射防护领导小组成员由各相关职能部门部长和各院系院长（主任）组成。辐射防护专业小组由专业性强、熟悉院系放射工作的教师组成，详见表 1.3-2。

为落实辐射防护具体工作，各涉源院系成立了相应的工作小组。该小组由分管安全的各院系主任担任小组组长，定期与校环境保护办公室、辐射防护室沟通工作方法和意见，保证辐射防护工作安全、顺利、有效地进行。本项目建成后由北京大学未来技术学院（以下简称“未来技术学院”）具体管理。

表 1.3-2 北京大学辐射防护领导小组成员名单

序号	人员类别	姓名	职务或职称	工作部门	专/兼职
1	组长	张平文	副校长	党办校办	兼职
2	副组长	刘克新	部长	实验室与设备管理部	兼职
3	成员	韦宇	副部长	科学研究部	兼职
4	成员	云虹	院长	北京大学医院	兼职
5	成员	宁杰远	副院长	地球与空间科学学院	兼职
6	成员	吕明泉	副院长	化学与分子工程学院	兼职
7	成员	张通	副院长	工学院	兼职
8	成员	李焱	副院长	物理学院	兼职
9	成员	李恩敬	主任	环境保护办公室	专职
10	成员	廖安	副部长	保卫部	兼职
11	成员	崔剑锋	副院长	考古文博学院	兼职
12	成员	陆克定	党委副书记	环境科学与工程学院	兼职

13	成员	吴军	副部长	房地产管理部	兼职
14	成员	金鑫	副院长	城市与环境学院	兼职
15	成员	崔宏伟	副处长	医学部设备与实验室管理处	兼职
16	成员	谢冰	副院长	信息科学技术学院	兼职
17	成员	彭宜本	副院长	生命科学学院	兼职
18	成员	欧阳晓玲	副院长	现代农学院	兼职

### 1.3.3.2 制定规章制度及落实情况

北京大学已制定较为完善的辐射安全管理制度，并严格按照规章制度执行，具体包括：《北京大学辐射安全与防护管理办法》《辐射防护岗位职责》《北京大学涉源单位安全保卫职责规定》《北京大学辐射工作人员安全与职业健康管理实施细则》《北京大学放射性同位素与射线装置台账管理制度》《北京大学辐射安全事故应急预案》《北京大学废旧放射源和放射性废物管理和处置规定》《化学与分子工程学院放射安全和防护管理相关制度》《物理学院辐射安全和防护管理相关制度》《生命科学学院辐射安全和防护管理相关制度》《城市与环境学院辐射安全和防护管理相关制度》《环境科学与工程学院辐射安全和防护管理制度》《考古文博学院辐射安全和防护管理相关制度》《实验动物中心辐射安全与防护管理制度》《工学院放射安全和防护管理相关制度》《地空学院放射安全和防护管理相关制度》《北京大学医院放射安全和防护管理相关制度》《北京大学信息科学与技术学院辐射装置安全与防护安全管理相关制度》等制度。

### 1.3.3.3 工作人员考核情况

北京大学制定了辐射工作人员培训计划，目前北京大学辐射工作人员共计305名，已全部完成生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，且获得合格证书。《北京大学辐射工作人员安全与职业健康管理实施细则》（校发[2015]1号）中规定新上岗辐射工作人员和现持有辐射安全培训合格证书到期的人员，必须通过生态环境部认可的辐射安全与防护考核且考核合格后，方可从事辐射工作。

今后，全校将按照生态环境部2019年第57号公告、2021年第9号公告要求，定期（五年一次）组织辐射工作人员进行辐射安全防护考核，考核通过

后方可上岗。

#### 1.3.3.4 个人剂量监测

北京大学委托有资质单位承担辐射工作人员的个人剂量监测工作，监测频率为每 3 个月检测一次。在岗的辐射工作人员均已按照规范佩戴了个人剂量计，在个人剂量计佩戴时间每次届满一个监测周期时，由专人负责收集剂量计送检更换，并将每季度的个人剂量检测结果和每年度的个人剂量检测报告存档备案。根据北京大学 2025 年度个人剂量检测结果表明，全校辐射工作人员的最高值为 1.015mSv/a，未超过年剂量管理目标值。

单位设置专人负责个人剂量监测管理工作。发现个人剂量监测结果异常的，将及时调查原因，并将有关情况及时报告单位辐射安全防护领导小组。

单位今后将加强个人受照剂量监测工作，如果某位辐射工作人员的单季度个人剂量监测结果高于年剂量约束值的 1/4，将对其受照原因进行调查，结果由本人签字后存档；必要时将采取调离工作岗位或控制从事辐射工作时间等措施，保障辐射工作人员的健康。

#### 1.3.3.5 工作场所及辐射环境监测

北京大学定期对现有辐射工作场所进行辐射水平监测。同时，每年委托有资质单位进行一次辐射工作场所和周边环境监测，监测数据记录存档。查阅 2025 年度辐射工作场所监测报告，由监测报告可以看出，北京大学辐射工作场所及周围的剂量率水平不大于 2.5 $\mu$ Sv/h， $\beta$  表面污染水平低于 GB18871-2002 中关于监督区的表面污染控制水平（4Bq/cm<sup>2</sup>），空气中 <sup>3</sup>H 活度浓度水平为 (6.13~25.6)Bq/m<sup>3</sup>，都满足 GB 18871-2002 等相关标准要求。

单位已配备的辐射监测仪器，详细清单见表 1.3-3。

表 1.3-3 北京大学现配有辐射监测仪器清单

序号	仪器名称	型号	购置日期	仪器状态	数量	备注
1	X- $\gamma$ 剂量率仪	BH3103B	2017-03-24	正常	1	
2	表面污染检测仪	RAM-SURF-1	2011-01-01	正常	3	
3	表面沾污仪	RadEye B20	2019-12-06	正常	1	
4	辐射监测仪	INSPECTOR.EX P	2011-01-01	正常	3	
5	辐射检测仪	Surveyor 200 0	2002-01-01	正常	3	
6	个人剂量报警仪	BH3084	2017-03-10	正常	4	

7	个人剂量率仪	RadEye G-10	2019-12-06	正常	3	
8	个人剂量仪	PDM-117	2002-01-01	正常	3	
9	环境 $\gamma$ 辐射检测仪	FD-3013B	2013-01-01	正常	1	
10	辐射剂量报警仪	RG1000	2020-08-21	正常	1	
11	辐射剂量报警仪	RG1000	2021-09-01	正常	2	
12	个人辐射剂量计	SOEKS	2021-10-15	正常	1	
13	辐射剂量报警仪	SMACH-RG1000	2021-10-15	正常	1	
14	$\gamma$ 剂量仪探头	DG1305	2009-12-01	正常	1	
15	中子雷姆探测器	FJ1903A	2009-12-01	正常	1	
16	个人剂量仪	PM1621	2006-06-01	正常	1	
17	个人剂量仪	PM1208	2006-10-01	正常	1	
18	手持式多功能沾污 计量仪	Inspector Alert	2006-04-01	正常	1	
19	手持式碘化钠多道 分析仪	ESPEC-2	2001-01-01	正常	1	
20	$\chi\gamma$ 辐射剂量率仪	FJ-1	2001-01-01	正常	1	
21	中子雷姆探 测器	FJ1903A	2009-12-01	正常	1	
22	大面积 $\beta\gamma$ 检查仪	FJ-402	2001-01-01	正常	1	
23	便携式 $\gamma$ 监测器	1692	2001-01-01	正常	1	
24	工作场所 $\gamma$ 监测器	AGM2	2000-11-01	正常	2	
25	环境中子监 测器	ENM2	2000-11-01	正常	1	
26	便携式巡检 谱仪	GR-135	2006-06-01	正常	1	
27	低能辐射仪	FJ-342	1980-01-01	正常	1	
28	个人剂量仪	PM1621	2006-06-01	正常	1	
29	X- $\gamma$ 报警仪	FJ376G	2009-12-01	正常	1	
30	固定多路式监测报 警器	RMS5120	2009-12-01	正常	1	
31	环境中子监测器	ENM3	2000-11-01	正常	3	
32	便携式巡检谱仪	GR-135	2006-06-01	正常	1	
33	$\gamma$ 剂量仪探头	DG1305	2009-12-01	正常	1	
34	工作场所 $\gamma$ 监测器	AGM3	2000-11-01	正常	4	
35	红外对射防盗系统	ALEPH	2003-09-01	正常	1	
36	便携式辐射检测仪	Radeye G-10	2022-01-01	正常	1	
37	个人剂量计	PDM-227	2022-01-01	正常	1	

38	表面污染仪	como170	2022-01-01	正常	1	
39	辐射报警检测仪	Inspector TM	2022-01-01	正常	1	
40	热室 $\gamma$ 剂量率探头	SSTC-15	2022-01-01	正常	2	
41	便携式中子剂量率仪	Ludlum 2241- 4 (42-31H)	2022-01-01	正常	1	
42	便携式 $\gamma$ 剂量率仪	RadEye G-10	2022-01-01	正常	1	
43	个人剂量报警仪	EPD TruDose- $\beta\gamma$	2022-01-01	正常	3	
44	个人剂量报警仪	PDM-227C	2022-01-01	正常	3	
45	固定式 $\gamma$ 剂量率监测系统 (4 探头)	WF-PTM-K	2022-01-01	正常	1	
46	便携式 $\gamma$ 剂量率仪/沾污仪	Ludlum 2241- 2 (44-9/133)	2023-01-01	正常	2	

单位现有的监测方案基本能够满足现有场所使用要求，待本项目建设完成后，将纳入单位辐射监测计划，一并按照现有的频度开展。

### 1.3.3.6 辐射事故应急管理

北京大学依据《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，制定了关于本单位《北京大学辐射安全事故应急预案》，以保证本单位一旦发生辐射意外事件时，能迅速采取必要和有效的应急响应行动，妥善处理放射事故，保护工作人员和公众的健康与安全，同时在预案中进一步明确规定本单位有关意外放射事件处理的组织机构及其职责、事故报告、信息发布和应急处理程序等内容。发生辐射事故时，事故单位应当立即启动本单位的辐射事故应急方案，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康部门报告。

已针对上述许可使用中可能发生的放射性污染以及大剂量照射等事故/事件，制定了每年一次的演练计划。为规划和加强放射突发事件应急处理能力，同时最大程度地降低放射事件可能造成的后果，保障辐射工作人员及公众的生命安全，于 2025 年 11 月 5 日下午 15 点，应用化学系放射性开放实验室举行了放射性工作场所火灾事故消防演练。共计 50 名师生参加了此次演练。本次模拟了放射性开放实验室 150-10 房间火灾事故及应急响应，对事故上报，初期处置，人员疏散等环节进行了演练。通过此次实战化演练，师生不仅掌握了必要的逃生技能和应急处置程序，也进一步增强了事故防范意识，提升了实验

室整体安全防控能力，筑牢了实验室的安全防线。

#### **1.3.3.7 年度辐射安全评估报告落实情况**

北京大学较圆满地完成了各项辐射安全防护工作，依据法律法规每年对本单位同位素和射线装置的安全和防护状况进行了年度评估，目前已编写上报了2025年度评估报告。

表 2 放射源

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

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

表 3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	Sc-44	液态；低毒	生产	1.85E+09	1.85E+07	1.85E+11	制备PET药物	简单操作	固体靶核素制备操作室	合成分装热室
2	Cu-64	液态；中毒	生产	3.70E+09	3.70E+08	1.85E+11	制备PET药物	简单操作		
3	Ga-68	液态；低毒	生产	3.70E+09	3.70E+07	1.85E+11	制备PET药物	简单操作		
4	Zr-89	液态；中毒	生产	3.70E+09	3.70E+08	3.70E+11	制备PET药物	简单操作		
5	I-124	液态；中毒	生产	1.85E+09	1.85E+08	9.25E+10	制备PET药物	简单操作		
6	F-18	液态；低毒	生产	3.70E+10	3.70E+08	9.25E+12	制备PET药物	简单操作	正电子核素制备操作室	合成分装热室
7	C-11	液态；低毒	生产	1.11E+10	1.11E+08	5.55E+11	制备PET药物	简单操作		
8	N-13	液态；低毒	生产	1.11E+10	1.11E+08	5.55E+11	制备PET药物	简单操作		

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

### 表 4 射线装置

(一) 加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速 粒子	最大能量 (MeV)	额定电流 (mA) /剂量率 (Gy/h)	用途	工作场所	备注
1	回旋加速器	II	1	玖源-20	质子	20	180μA	制备同位素	回旋加速器室1	
2	回旋加速器	II	1	玖源- 11MTS	质子	11	100μA	制备同位素	回旋加速器室2	

(二) X射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大管电流 (mA)	用途	工作场所	备注
	以下无内容								

(三) 中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

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

表5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
放射性固体废物	固态（废弃的试剂容器、手套、棉签、注射器和吸水纸等）	F-18等	/	/	约50kg	$<10^4$ Bq/kg	暂存于放射性废物暂存间内储存。	收集暂存最长核素10倍核素半衰期（42天）后，经检测达标，向生态环境部门申请清洁解控，批准后按普通废物处置，并做好台账记录。
放射性固体废物	固态（手套箱活性炭滤材）	F-18等7种核素	/	/	114kg	$<10^4$ Bq/kg	暂存于放射性废物暂存间内储存。	放置至少10个半衰期，向生态环境部门申请清洁解控，批准后，按危险废物交有资质单位处置。
放射性废水	液态（清洁、清洗、应急淋浴等废水）	F-18等			0.4 m <sup>3</sup>	总 $\beta<10$ Bq/L	169.34m <sup>3</sup> 衰变池暂存	衰变至少180天后，经检测达标后，向生态环境部门申请清洁解控，批准后，排入市政下水管道。严格记录废水排放台帐。
放射性气体废物	气态（手套箱、场所排气）	F-18等7种核素	/	/	少量，可忽略	/	净化过滤后稀释排放。	经手套箱高效过滤和排风管道的活性炭过滤吸附装置过滤后，在高于顶部排放。
放射性气体废物	气态（活化气体）	Ar-41等				$<7.03E-3$ Bq/cm <sup>3</sup>		经高效过滤和活性炭过滤后，在建筑顶部排放。
放射性固体废物	固态（废旧靶膜、真空膜、碳膜、离子源等高活性固废）	Cu-64、Mg-27、Na-24等			0.2kg/年	不排放	回旋加速器室内	委托有放射性固废处理资质的单位处理。

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为mg/L，固体为mg/kg，气态为mg/m<sup>3</sup>；年排放总量用kg。

2. 含有放射性的废物要注明，其排放浓度、年排放总量分别用比活度（Bq/L或Bq/kg或Bq/m<sup>3</sup>）和活度（Bq）。

## 表6 评价依据

法规 文件	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》，中华人民共和国主席令第九号，2015年1月1日起实施。</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，中华人民共和国主席令第二十四号，2018年12月29日修订并实施。</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，中华人民共和国主席令第六号，2003年10月1日起实施。</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》，国务院令 第 682 号修订，2017年6月21日公布，2017年10月1日起实施。</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院令 第 709 号第二次修订，2019年3月2日第二次修订版公布并实施。</p> <p>(6) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021年版）》，生态环境部部令 第 16 号，2020年11月30日公布，2021年1月1日起实施。</p> <p>(7) 北京市生态环境局关于发布《〈建设项目环境影响评价分类管理名录〉北京市实施细化规定（2022年本）》的通告，通告〔2022〕4号，2022年4月1日起实施。</p> <p>(8) 《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部令 第 9 号，2019年9月20日公布，2019年11月1日起施行。</p> <p>(9) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部部令 第 20 号修订，2021年1月4日公布并实施。</p> <p>(10) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，原环境保护部第 18 号令，2011年4月18日公布，2011年5月1日起实施。</p> <p>(11) 《关于发布〈射线装置分类〉的公告》，原环境保护部、原国家卫生计生委公告第 66 号，2017年12月5日。</p> <p>(12) 《关于发布〈建设项目竣工环境保护验收暂行办法〉的公告》，国环规环评[2017]4号，2017年11月20日。</p> <p>(13) 原北京市环境保护局办公室《关于做好辐射类建设项目竣工环境</p>
----------	---

	<p>保护验收工作的通知》，京环办[2018]24号，2018年1月25日。</p> <p>(14) 《北京市城乡规划条例》，北京市人民代表大会常务委员会公告〔十五届〕第61号，2021年9月24日修订版公布并实施。</p> <p>(15) 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》，原环保部，环办辐射函〔2016〕430号。</p> <p>(16) 《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》，原北京市环境保护局文件，京环发〔2011〕347号。</p> <p>(17) 《辐射安全与防护监督检查技术程序》，生态环境部，2020年2月；</p> <p>(18) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》生态环境部公告2019年第57号，2019年12月24日。</p> <p>(19) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》生态环境部公告2021年第9号，2021年3月11日。</p> <p>(20) 《产业结构调整指导目录（2024年）》，国家发展和改革委员会2023年第7号令，2024年2月1日起施行。</p> <p>(21) 《北京市新增产业的禁止和限制目录（2022年版）》，北京市人民政府办公厅，京政发办〔2022〕5号，2022年2月14日起施行。</p>
<p>技术标准</p>	<p>(1) 《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）</p> <p>(2) 《环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）</p> <p>(3) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）</p> <p>(4) 《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）</p> <p>(5) 《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）</p> <p>(6) 公安部《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》（GA1002-2012）</p> <p>(7) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）</p> <p>(8) 《职业性内照射个人监测规范》（GBZ129-2016）</p> <p>(9) 《工作场所有害因素职业接触限值第1部分：化学有害因素》</p>

	<p>(GBZ2.1-2019)</p> <p>(10) 《环境 <math>\gamma</math> 辐射剂量率测量技术规范》 (HJ1157-2021)</p> <p>(11) 《辐射环境监测技术规范》 (HJ61-2021)</p> <p>(12) 《表面污染测定第一部分 <math>\beta</math> 发射体 (<math>E_{\beta\max} &gt; 0.15\text{MeV}</math>) 和 <math>\alpha</math> 发射体》 (GB/T14056.1-2008)</p> <p>(13) 《环境空气质量标准》 (GB3095-2026)</p> <p>(14) 《医疗、工业、农业、研究和教学中产生的放射性废物管理》 (核安全导则 HAD401/16-2023)</p> <p>(15) 《建设项目竣工环境保护设施验收技术规范 核技术利用》 (HJ 1326-2023)</p>
其他	<p>(1) AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirements, Med.Phys. 33 (1), January 2006</p> <p>(2) 《Exposure Rate Constants and Lead Shielding Values for over 1,100 Radionuclides》, David S. Smith and Michael G. Stabin</p> <p>(3) 《Radionuclide Information Booklet》, Canadian Nuclear Safety Commission, 2024.9</p> <p>(4) 原国家环境保护局监督管理司,《中国环境天然放射性水平》,1995年8月。</p> <p>(5) 国际放射防护委员会第94号出版物:非密封放射性核素治疗后的患者出院考虑,北京大学医学出版社,2007年7月。</p> <p>(6) 《辐射安全手册》,科学出版社,2011年。</p> <p>(7) 《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数(续 I)》,辐射防护,2000年第20卷第3期,李士骏</p> <p>(8) 《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数(续 II)》,辐射防护,2000年第20卷第4期,李士骏</p> <p>(9) 北京大学提供的与本项目相关的申请和技术资料。</p>

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

7.1.1 评价内容

本项目回旋加速器及正电子药物制备区使用过程中对周围环境以及工作人员、公众等产生的辐射影响进行分析和评价。

7.1.2 评价范围

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)的规定,并结合该项目辐射为能量流污染的特征,根据能量流的传播与距离相关的特性,确定本项目评价范围为:以放射性同位素实验室控制区实体屏蔽外周界向外围扩展 50m 的区域作为评价范围。本项目评价范围示意图见图 7.1-1 所示,本项目相关场所控制区周围 50m 范围内无学校、居民楼、养老院等敏感目标,无商场和超市等人员密集场所,主要为分子探针平台所在楼、西侧多模态跨尺度生物学成像设施样品制备和模式动物中心(1号楼部分区域)。

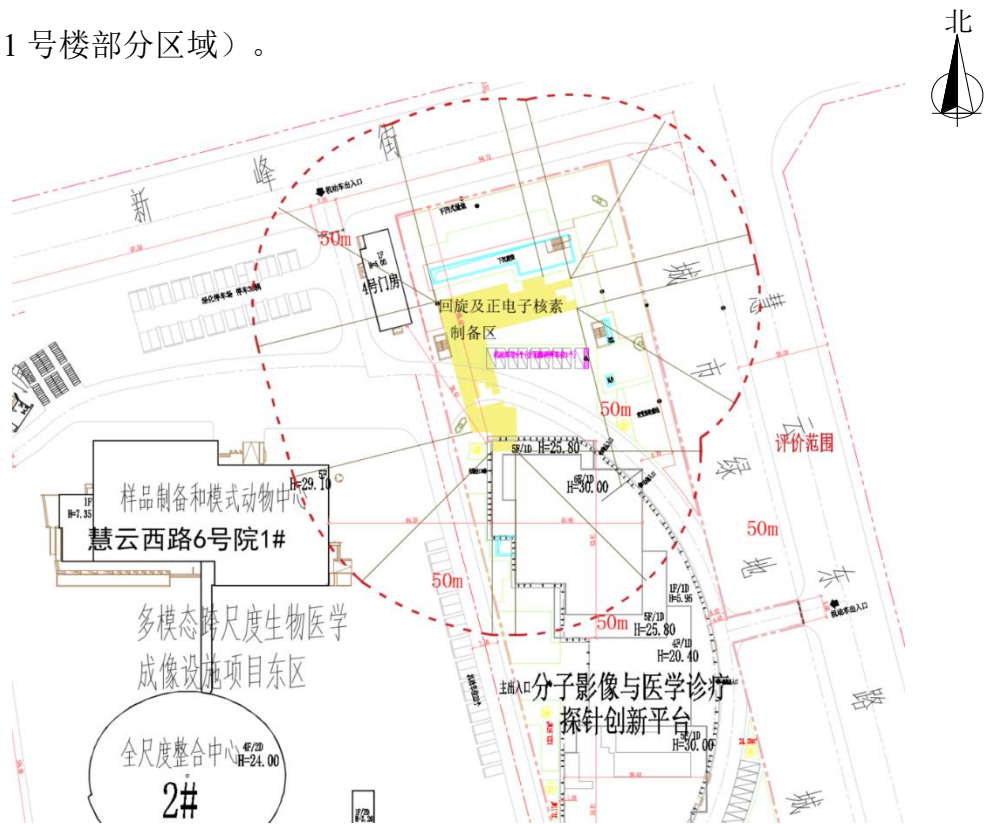


图 7.1-1 本项目评价范围示意图

### 7.1.3 关注问题

(1) 射线装置和非密封放射性物质工作场所安全防护是否满足国家相关标准的要求。

(2) 辐射安全管理情况及污染防治措施是否满足新增辐射工作场所要求。

### 7.1.4 评价因子

本项目的环境影响评价因子为 n、 $\gamma$  射线、 $\beta$  射线、表面污染、放射性“三废”等。

### 7.1.5 评价目的

(1) 评价建设项目在运行过程中对辐射工作人员及公众成员所造成的辐射影响；

(2) 评价辐射防护措施效果，提出减少辐射危害的措施，为生态环境行政主管部门管理提供依据；

(3) 通过项目辐射环境影响评价，为使用单位保护环境和公众利益给予技术支持；

(4) 对不利影响和存在的问题提出防治措施，把辐射环境影响减少到“合理可行、尽量低的水平”；

(5) 为北京大学的辐射环境保护管理提供科学依据。

## 7.2 保护目标

本项目回旋加速器区位于综合实验楼（地下 1 层，地面 6 层）地下一层北侧，该区域包括 11 MeV 和 20MeV 两间回旋加速器室、回旋加速器控制室、设备间、气瓶间、空压站等。两间回旋加速器室相邻设置，东侧为固体靶核素制备区、走廊、空调机房，南侧为走道、之外为 6 条同位素制备和实验区，西侧为土层和消防楼梯，北侧为控制室、设备间、气瓶间、空压站等，楼上为绿化区，无地下室。

回旋加速器配套的正电子核素（含固体靶核素）制备区位于地下一层北侧中部，其中固体靶核素制备区位于回旋加速器室 1 东侧，正电子核素制备区位于回旋加速器室南侧。该区域有 6 条同位素制备和实验区（固体靶核素制备区，正电子核素制备区， $\alpha$  核素制备区， $\beta$  核素制备区，中试研发实验区，实验热室操作区），其中 5 个为净化实验区（GMP），1 个常规实验室，每台

同位素研发线具体包括操作室、后室、一更、二更、检测间、缓冲间、包装间、放射废物暂存间等。楼上为绿化区和停车位，无地下室。

固体靶核素制备区东侧为走廊、空调机房；南侧为走道、之外为 $\alpha$ 核素制备区、 $\beta$ 核素制备区、中试研发实验区、实验热室操作区、净化区空调机房等；西侧为回旋加速器机房、土层和消防楼梯；北侧为空调机房、原辅料暂存间、走廊、下层庭院；楼上为绿化区，无地下室。正电子核素制备区东侧为 $\alpha$ 核素制备区、 $\beta$ 核素制备区、中试研发实验区、实验热室操作区、净化区空调机房、走廊、空调机房；南侧为走道、暂存间、动物实验区等，西侧为走廊、土层，北侧为走廊、回旋加速器机房等，楼上为绿化区，无地下室。本项目回旋加速器及正电子核（含固体靶核素）制备区相关场所位于综合实验楼（地下1层，地面6层）地下一层北侧，楼外除了西侧部分区域为多模态跨尺度生物学成像设施项目样品制备和模式动物中心（1号楼局部区域），其他都是地面停车位、道路、绿化区及停车位等。

回旋加速器区及楼上平面图见图 7.2-1~图 7.2-3，都充分考虑周围场所的安全，评价范围内主要保护目标为本项目辐射工作人员和周边公众（公众主要为综合实验楼内其他科研人员）。场所周围 50m 范围内保护目标的相关情况见表 7.2-1 所示。

表 7.2-1 本项目场所周围 50m 范围内主要保护目标

场所名称	保护目标	距离 (m)	常居留数量 (人)	方位	周围 50m 范围内主要场所或建筑物
两间回旋加速器室	本项目工作人员	紧邻	2	北侧	控制室内
	本项目工作人员	0~10	2	东侧	固体靶核素制备区
	公众	10~25	0		空调机房、走廊等
		0~50	0		地面通道、绿化区、慧云东路等
	平台其他工作人员	0~50	10	南侧	同位素制备和实验区、动物实验区、辐照室、空调机房、库房等
	公众	0~44	0	西侧	地面通道，多模态跨尺度生物学成像设施区停车位、道路、绿化区等
	公众	44~50	10		地面样品制备和模式动物中心
	公众（门房工作人员）	0~50	1	北侧	地面通道、绿化区、4号门房、新峰街等

	公众	0~15	0	楼上	楼上为绿化区
固体靶核素制备区及南侧走廊	本项目工作人员	紧邻	2	/	实验区操作室
	公众	0~7	0	东侧	走廊、空调机房
	公众	0~50	0		地面通道、绿化区、慧云东路等
	平台其他工作人员	0~50	10	南侧	同位素制备和实验区、动物实验区、辐照室、空调机房、库房等
	本项目工作人员	0~19	2	西侧	回旋加速器场所
	公众	0~50	0		地面通道，多模态跨尺度生物医学成像设施区停车位、道路、绿化区等
	公众	0~12	0	北侧	空调机房、排烟机房、原辅料暂存间、下沉庭院
	公众（门房工作人员）	0~50	1		地面通道、绿化区、4号门房、新峰街等
公众	紧邻	0	楼上	地面绿化区及停车位	
正电子核制备区及控制区走廊	本项目工作人员	紧邻	2	/	实验区操作室
	平台其他工作人员	0~26	10	东侧	同位素制备和实验区
	公众	26~33	0		走廊、空调机房
	公众	0~50	0		地面通道、绿化区等
	平台其他工作人员	0~50	10	南侧	动物实验区、辐照室、空调机房、库房等
	公众	0~44	0	西侧	地面通道，多模态跨尺度生物医学成像设施区停车位、道路、绿化区等
	公众	44~50	10		地面样品制备和模式动物中心
	本项目工作人员	0~21	2	北侧	回旋加速器场所、下沉庭院
	公众（门房工作人员）	0~50	1		地面通道、绿化区、4号门房、新峰街等
公众	紧邻	0	楼上	地面绿化区及停车位	



图 7.2-1 本项目回旋加速器及制备区（地下一层）平面布局图

（本项目周围功能区域为规划用途设计示意）



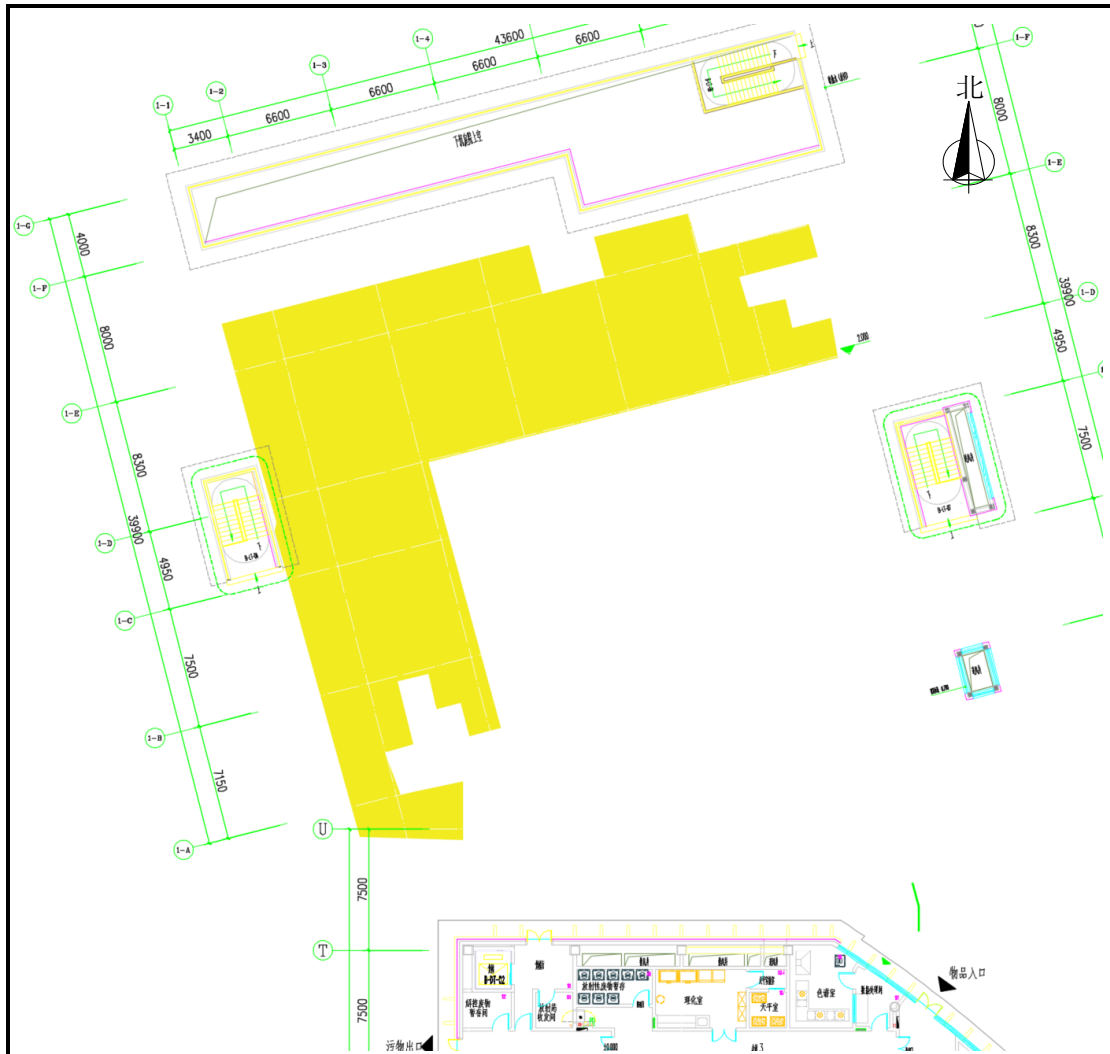


图 7.2-3 本项目楼上（地面）周围关系图  
(本项目周围功能区域为规划用途设计示意)

### 7.3 评价标准

#### 7.3.1 基本剂量限值

电离辐射防护与辐射源安全基本标准 (GB18871-2002) 规定的剂量限值列于表 7.3-1。

表 7.3-1 工作人员职业照射和公众照射剂量限值

职业工作人员	公众
连续五年平均有效剂量 20mSv, 且任何一年有效剂量 50mSv	年有效剂量 1mSv; 但连续五年平均值不超过 1mSv 时, 某一单一年可为 5mSv

#### 7.3.2 剂量约束值

职业照射, 本项目辐射工作人员取 2mSv/a 作为剂量约束值; 公众照射,

本项目取 0.1mSv/a 作为剂量约束值。

本项目所在综合实验楼已审批的《使用电子加速器辐照装置项目》，在加速器机房周围 50m 评价范围内的公众的年附加剂量不大于 0.2 $\mu$ Sv，可以不考虑该项目对其他项目公众年剂量的叠加影响，即使叠加上本项目公众剂量也能满足 100 $\mu$ Sv/a 的要求，为了便于管理，本项目的公众剂量约束值仍取 0.1mSv/a。

### 7.3.3 辐射工作场所边界周围剂量率控制水平

本项目周围公众除满足上述剂量约束要求外，周围剂量率还要满足以下要求，参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）并结合本项目实际情况，本项目辐射工作场所及设施的剂量率控制水平拟从严控制：

（1）在控制区外人员可达处，距屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率控制目标值不大于 2.5  $\mu$ Sv/h。

（2）手套箱/热室外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率不大于 2.5  $\mu$ Sv/h；非人员操作位的周围剂量当量率不大于 25  $\mu$ Sv/h（本项目取 10  $\mu$ Sv/h）。

（3）固体放射性废物收集桶外表面 30cm 处的周围剂量当量率不大于 2.5 $\mu$ Sv/h。

（4）回旋机房底板与土壤交界处

参考日本散裂中子源 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5.5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5mSv/h”作为回旋加速器室底板与土壤交界处的中子剂量当量率控制水平。

### 7.3.4 工作场所放射性表面污染控制水平

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），非密封放射性物质工作场所的放射性表面污染控制水平见表 7.3-2。

表 7.3-2 工作场所的放射性表面污染控制水平（Bq/cm<sup>2</sup>）

类别	$\alpha$ 放射性物质		$\beta$ 放射性物质
	极毒组	其他	
工作台、设备、墙壁、控制区	4	4 $\times$ 10	4 $\times$ 10

地面	监督区	$4 \times 10^{-1}$	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区 监督区	$4 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-1}$	4
手、皮肤、内衣、工作袜		$4 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-1}$

上表中值包括固定污染和松散污染的总数。对于皮肤、内衣、工作袜的污染应及时清理，尽可能达到本底水平。对设备、墙、地面的污染，应适当去污后，残存的污染可适当放宽，但需有审管部门的同意，并不超过表中值的 5 倍。表面污染可按一定的面积计算平均值：工作服、皮肤取  $100\text{cm}^2$ ，地板取  $1000\text{cm}^2$ 。

GB18871-2002 附录 B2.2 条款规定：工作场所中的某些设备与用品，经去污使其污染水平降低到上述表 7-3 中所列设备类的控制水平的五分之一以下时，经审管部门或监管部门授权的部门确认同意后，可当作普通物品使用。

### 7.3.5 放射性废水排放控制要求

本项目拟设放射性废水衰变池（1 号衰变池），排放要求：放射性废水贮存超过至少 10 个半衰期，经检测后达标可直接排入市政污水管网。

本项目主要为应急淋浴和清洗等放射性废水，排到 1 号衰变池内暂存。参照《医疗、工业、农业、研究和教学中产生的放射性废物管理》（核安全导则 HAD401/16-2023）中的相关要求执行，具体如下：

1 号衰变池内废水管理方式：暂存 180d（衰变池废水来源：B1 同位素制备和实验区和 1F 质控区），经监测达标并报生态环境主管部门批准后，排入市政管网。

放射性废液的暂存和处理应安排专人负责，并在“放射性废水暂存、处置管理台账”上详细记录解控排放废水所含核素、体积、废水暂存起始日期，处置人员、处置日期、排放时间、监测结果等信息。

衰变池显著位置应设置电离辐射警示标识，池（罐）底、壁应坚固、耐酸碱腐蚀、无渗透性和具有防泄漏措施。不同存储池应进行编号标记，且具有液位显示、超限溢流、入口切换等装置。

### 7.3.6 放射性固体废物管理

**废物分类要求：**参照 GBZ120-2020，放射性废物分类，应根据实践中产生

废物的形态及其中的放射性同位素种类、半衰期、活度水平和理化性质等，将放射性废物进行分类收集和分别处理。设废物储存登记表，记录废物主要特性和处理过程，并存档备案。

每袋废物的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，质量不超过 20 kg。

废物包装体外表面的污染控制水平： $\beta < 0.4 \text{ Bq/cm}^2$ 。

供收集废物的污物桶应具有外防护层和电离辐射警示标识。污物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物，装满后的废物袋应密封，不破漏，及时转送存储室，放入专用容器中存储。对注射器和碎玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入利器盒中，然后再装入专用塑料袋内。

**放射性固废管理要求：**本项目放射性固体废物的管理参照《医疗、工业、农业、研究和教学中产生的放射性废物管理》（核安全导则 HAD401/16-2023）中对于固体放射性废物的要求执行。

（1）制备过程产生的放射性废物单独收集，暂存至少 42d 后经监测达标并报生态环境主管部门批准解控后，作为危险废物处理。

（2）活性炭滤材以及手套箱自带的高效过滤器滤材，暂存至少 42d（超过 10 倍 I-124 核素半衰期），经监测达标并报生态环境主管部门批准解控后，作为危险废物处理。

（3）对于那些没法解控的放射性固体废物，如回旋加速器废旧靶膜、真空膜、碳膜、离子源等高活性固废统一收集到铅放射性废物桶，委托有放射性固废处理资质的单位处理。

**台账管理要求：**本项目产生的放射性固体废物的暂存和解控应安排专人负责，并建立《放射性固废暂存、解控管理台账》，详细记录放射性废物类别、所含核素名称、重量（kg）、废物产生起始日期、监测结果、清洁解控日期、责任人员、废物去向等信息，每袋放射性固废填写一行记录。

### 7.3.7 放射性废气的排放要求

参照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）关于通风的要求

核医学工作场所通风系统独立设置，应保持核医学工作场所良好的通风条件，合理设置工作场所的气流组织，遵循自非放射区向监督区再向控制区的流向设计，保持含放射性核素场所负压以防止放射性气体交叉污

染，保证工作场所的空气质量。合成和操作放射性分子探针所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。

本项目正电子制备区内安装热室，拟配套有高效过滤器，并设置独立的排风系统；两间回旋加速器室设置独立的排风系统，排风口位于实验楼顶部，高于本建筑物屋顶约 3m。排放前还经过中效过滤器+活性炭吸附过滤+高效过滤器装置，满足相关要求。

本项目放射性同位素实验室共配置了 8 套排风系统，分别如下。

(1) 回旋加速器室设 1 套独立排风管道 (P-7-WD04)，为回旋设备预留排风，废气分别通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，分别经过中效过滤器+活性炭吸附过滤 (14kg)+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

(2) 回旋加速器室两台回旋设备设 1 套独立排风管道 (P-7-WD04')，废气分别通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，分别经过中效过滤器+活性炭吸附过滤 (12kg)+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

(3) 固体靶制备操作室热室设 1 套独立排风管道 (P-7-WD10')，废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤 (14kg)+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

(4) 固体靶制备操作室工作场所设 1 套独立排风管道 (P-7-WD10)，废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤 (16kg)+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

(5) 正电子核素制备操作室热室设 1 套独立排风管道 (P-7-WD7')，废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤 (12kg)+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

(6) 正电子核素制备操作室工作场所设 1 套独立排风管道 (P-7-WD5)，废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤 (16kg)+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

(7) 放射性废物暂存间等场所设 1 套独立排风管道 (P-7-WD08)，废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤

(16kg)+高效过滤器装置过滤后, 与其他区域排风合并高空排放。

(8) 控制区走廊设 1 套独立排风管道 (P-7-WD9), 废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶, 经过中效过滤器+活性炭吸附过滤 (14kg)+高效过滤器装置过滤后, 与其他区域排风合并高空排放。

排放口高于所在建筑物屋面 3m 且高于排口周围 50m 内建筑, 拟配置的活性炭滤芯重量约为 114kg, 过滤效率不低于 75%, 每年更换一次。

#### 7.4 放射性工作场所分级

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002), 非密封源工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级见表 7.4-1。

表 7.4-1 非密封源工作场所的分级

级别	日等效最大操作量/Bq
甲	$>4 \times 10^9$
乙	$2 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$
丙	豁免活度值以上 $\sim 2 \times 10^7$

#### 7.5 放射性同位素操作的放射防护相关要求

按照参考《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 第 6.2 款的有关规定:

- (1) 操作放射性药物应有专门场所, 放射性药物使用前应适当屏蔽;
- (2) 装有放射性药物的给药注射器, 应有适当屏蔽;
- (3) 操作放射性药物时, 应根据实际情况, 熟练操作技能、缩短工作时间并正确使用个人防护用品;
- (4) 操作放射性碘化物等挥发性或放射性气体应在通风柜内进行。通风柜保持良好通风, 并按操作情况必要时进行气体或气溶胶放射性浓度的监测; 操作放射性碘化物等挥发性或放射性气体的工作人员宜使用过滤式口罩;
- (5) 控制区内不应进食、饮水、吸烟、化妆, 也不应进行无关工作及存放无关物品;
- (6) 操作放射性核素的工作人员, 在离开放射性工作场所前应洗手和进行表面污染检测, 如其污染水平超过规定限值, 应采取相应去污措施;

(7) 从控制区取出物品应进行表面污染检测，以杜绝超过规定的表面污染控制水平的物品被带出控制区；

(8) 放射性物质的贮存容器或保险箱应有适当屏蔽。放射性物质的放置应合理有序、易于取放，每次取放的放射性物质应只限于需用的部分；

(9) 放射性物质贮存室应定期进行放射防护监测，无关人员不应入内；

(10) 贮存和运输放射性物质时应使用专门容器，取放容器中内容物时，不应污染容器。容器在运输时应有适当的固定措施；

(11) 贮存的放射性物质应及时登记建档，登记内容包括生产单位、到货日期、核素种类、理化性质、活度和容器表面放射性污染擦拭试验结果等。

## 7.6 非放射性控制值

### (1) 室内空气质量

根据 GBZ2.1-2019, 工作场所空气中 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的浓度限值分别为 0.3mg/m<sup>3</sup> 和 5mg/m<sup>3</sup>。

### (2) 环境空气质量

臭氧和氮氧化物的环境空气质量浓度限值执行 GB3095-2026《环境空气质量标准》中的二级浓度限值，臭氧的 1 小时平均浓度 0.2mg/m<sup>3</sup>，NO<sub>2</sub> 的 1 小时平均浓度 0.2mg/m<sup>3</sup>。

**表 8 环境质量和辐射现状**

**8.1 辐射环境现状监测**

评价单位委托有资质单位于 2025 年 8 月 22 日对本次新增的辐射工作场所周围进行了  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率和中子周围剂量当量率本底监测，检测报告见附件 4。

**8.1.1 监测项目**

$\gamma$  辐射空气吸收剂量率；环境中子周围剂量当量率。

**8.1.2 监测对象及点位布设**

监测对象：本次监测针对拟建场所周边进行环境辐射现状监测。

监测点位：本次监测对拟建场所在区域及周边进行环境地表  $\gamma$  辐射、中子周围剂量当量率监测，监测点位布设见图 8.1-1 和图 8.1-2。

**8.1.3 监测仪器及方法**

(1) 监测设备

本次监测采用的监测设备见表 8.1-1。

(2) 监测方法

$\gamma$  辐射空气吸收剂量率：采用便携式监测仪表，以定点的测量方式进行。监测时每点测量 10 次，每次间隔 10 秒钟，取平均值。

环境中子周围剂量当量率：采用便携式监测仪表，以定点的测量方式进行。监测时每点测量 5 次，每次间隔 10 秒钟，取平均值。

**表 8.1-1 监测设备及性能指标**

仪器名称	型号/编号	检定/校准证书、有效日期	主要技术性能指标
X、 $\gamma$ 剂量率仪	GH-102A/20170404	DLjl2025-03238、2025-3-13~2026-3-12	测量范围：0.01 $\mu$ Gy/h~100 $\mu$ Gy/h； 能量范围：30keV~8MeV； 相对响应之差：< $\pm$ 15%。
中子周围剂量当量仪	LB123/20170412	DLjs2025-00413、2025-2-20~2026-2-19	测量范围：30nSv/h~100mSv/h； 能量依赖：0keV~10MeV 之间为 $\pm$ 30%。 中子能量响应范围：热中子~20MeV， 热中子检测效率约 90%

**8.1.4 监测依据**

- (1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- (2) 《环境  $\gamma$  辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）。

### 8.1.5 监测结果

$\gamma$  辐射空气吸收剂量率和中子周围剂量当量率的监测数据见表 8.1-2 和表 8.1-3。

表 8.1-2 拟建地下一层北侧区域环境  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率检测结果

场所名称	点位序号	测点描述	$\gamma$ 辐射空气吸收剂量率 (nGy/h)
地下一层北侧	A1	拟建回旋加速器室1室中央	90±10
	A2	拟建回旋加速器室2室中央	80±10
	A3	拟建固体靶制备间	70±10
	A4	拟建固体靶制备后处理操作室	90±10
	A5	走道	80±10
	A6	走道	80±10
	A7	走道	90±10
	A8	拟建原辅料暂存间	90±10
	A9	拟建空调机房	80±10
	A10	过道	90±10
	A11	拟建清洁间1	90±10
	A12	拟建缓冲间1	80±10
	A13	拟建后室	80±10
	A14	走道	80±10
	A15	走道	80±10
	A16	拟建同位素实验室1	80±10
	A17	拟建同位素实验室2	80±10
	A18	拟建同位素实验室3	70±10
	A19	拟建同位素实验室4	70±10
	A20	拟建同位素实验室5	80±10
	A21	拟建同位素实验室 6	80±10
	A22	走道	70±10
	A23	拟建缓冲间2	80±10

A24	拟建包装间2	80±10
A25	拟建包装间3	80±10
A26	拟建缓冲间3	90±10
A27	拟建缓冲间4	80±10
A28	拟建包装间4	80±10
A29	拟建缓冲间5	70±10
A30	拟建包装间5	80±10
A31	拟建缓冲间6	80±10
A32	拟建包装间6	80±10
A33	拟建检测室	90±10
A34	拟建更衣室	80±10
A35	洁净走廊	80±10
A36	拟建清洁间1	80±10
A37	洁净走廊	80±10
A38	洁净走廊	90±10
A39	拟建清洁间2	90±10
A40	拟建清洁间3	80±10
A41	洁净走廊	80±10
A42	拟建回旋加速器室1楼上：地面	70±10
A43	拟建回旋加速器室2楼上：地面	90±10
A44	拟建固体靶制备间楼上：地面	80±10
A45	拟建同位素实验室1楼上：地面	70±10
A46	拟建同位素实验室2楼上：地面	70±10
A47	拟建同位素实验室3楼上：地面	70±10
A48	拟建同位素实验室4楼上：地面	80±10
A49	拟建同位素实验室5楼上：地面	80±10
A50	拟建同位素实验室6楼上：地面	70±10

表 8.1-3 地下一层回旋加速器区域环境环境中子周围剂量当量率检测结果

场所名称	序号	检测点位置	环境中子周围剂量当量率 (nSv/h)
回旋加速器室	A1	拟建回旋加速器室 1 室中央	40±10
	A2	拟建回旋加速器室 2 室中央	30±10
	A3	走道	30±10
	A4	走道	30±10
	A5	拟建固体靶制备间	30±10
	A6	拟建固体靶制备后处理操作室	40±10
	A7	拟建成后室	40±10
	A8	走道	30±10
	A9	走道	30±10
	A10	拟建回旋加速器室 1 楼上：地面	30±10
	A11	回旋加速器室 2 楼上：地面	30±10

注：环境  $\gamma$  辐射剂量率检测结果已扣除仪器在检测点处的宇宙射线响应值（30nGy/h）。

## 8.2 监测结果评价

根据《中国环境天然放射性水平》（1995），北京市天然辐射水平范围为 60~123nGy/h（室外，含宇宙射线）和 69.8~182nGy/h（室内，含宇宙射线）。因此，本项目拟建室外场所  $\gamma$  辐射空气吸收剂量率属于正常本底水平，拟建场所室内中子周围剂量当量率均低于探测下限水平。



表 9 项目工程分析与源项

9.1 正电子核素药物制备区

拟配带自屏蔽的回旋加速器 2 台，设备加速粒子为质子，玖谊源粒子公司生产的玖源-11MTS 型（额定参数为 11MeV/100 $\mu$ A）和玖源-20 型（额定参数为 20MeV/180 $\mu$ A），本次拟制备核素：F-18、C-11、N-13、Ga-68、Cu-64、Zr-89、I-124、Sc-44。

回旋加速器打靶在回旋加速器机房内完成，属于 II 类射线装置的使用范畴，后续放射性药物合成/纯化、质检和分装属于使用非密封放射性物质工作场所范畴，分别描述其污染源项。制备 PET 放射性药物的放射性污染示意图见图 9.1-1，其中本项目不包含质检环节（另单独编写报告）。

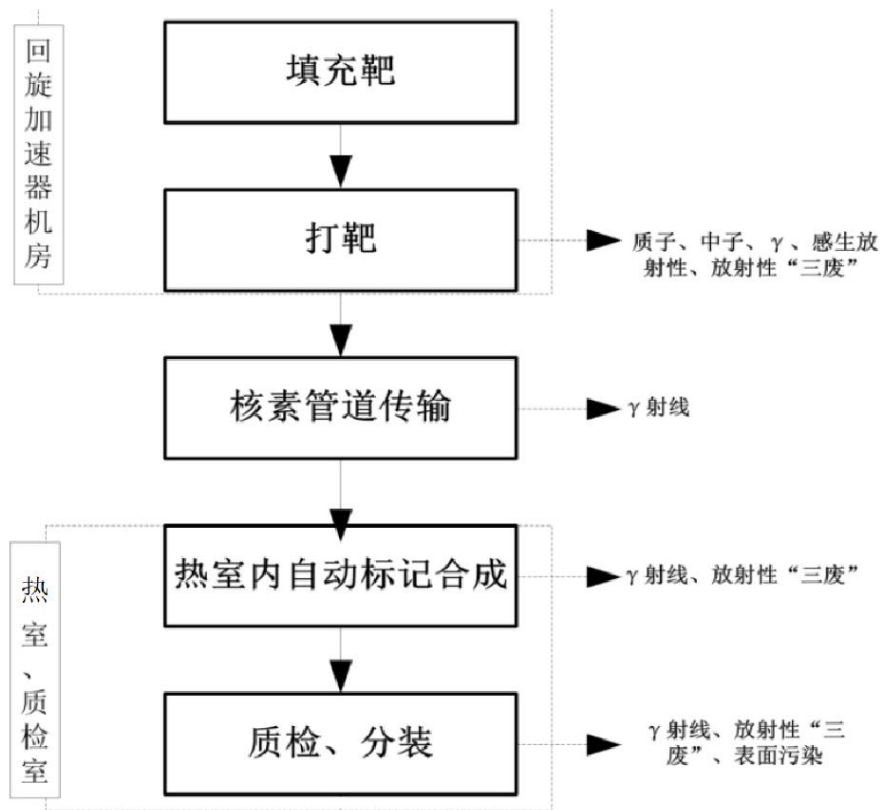


图 9.1-1 回旋加速器制备 PET 放射性药物的放射性污染示意图

9.1.1 回旋加速器的基本原理

回旋加速器的基本原理是带电粒子在磁场中作圆周运动，采用交变电极的方法，使粒子在较低电压下通过多次加速获得很高的动能。最后当带电粒子加速到一定速度到达外围轨道时，粒子束被带相反电荷的偏转板引出 D 型盒外，并通过靶窗轰击靶材料产生核反应而制备放射性核素。

回旋加速器可安装多个靶体,通过注入靶体内靶材料的不同以制备各种正电子核素。入射正离子通过轰击不同靶内物质发生核反应,发射出中子、质子或 $\alpha$ 粒子,同时制备出具有一定阈能的正电子放射性核素如 C-11、N-13 和 F-18 等,其产率取决于束流强度、被轰击靶体内物质的量、核反应截面及轰击时间,回旋加速及剥离原理示意图见图 9.1-2,回旋加速器典型工作原理示意图见图 9.1-3。

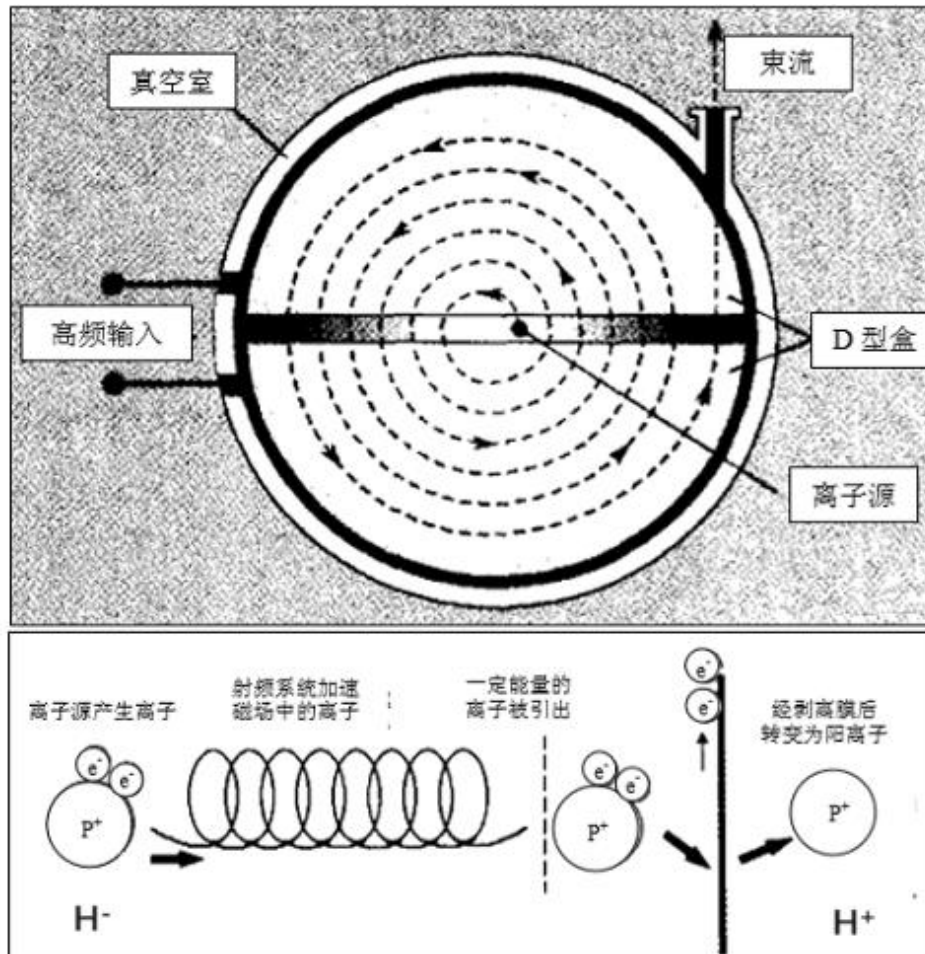


图 9.1-2 粒子加速及剥离工作原理示意图

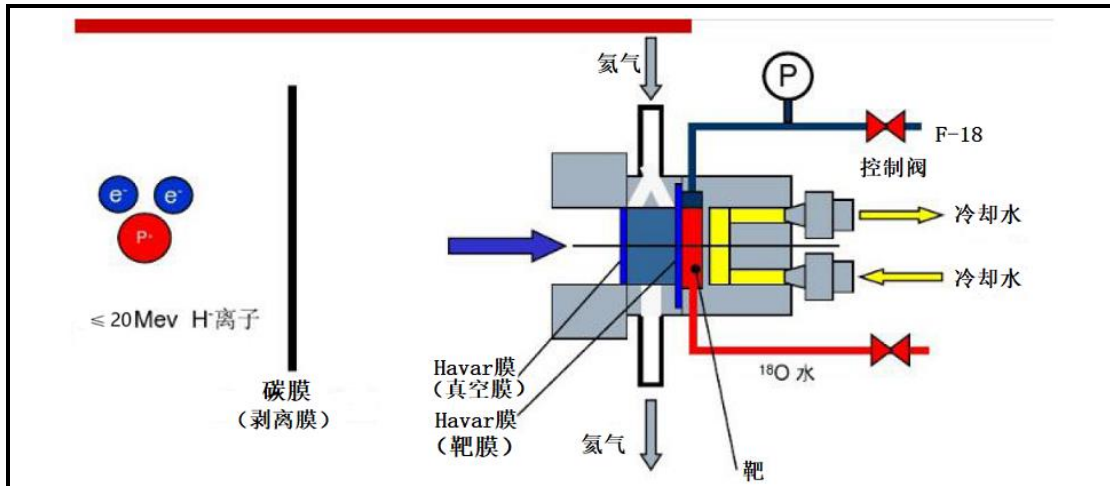


图9.1-3 回旋加速器典型工作原理示意图

回旋加速器靶内产生的核素通过气动方式通过专用的管道运输至热室设备间的药物合成模块，经过化学反应将生成的核素标记到生理性代谢物质上（如葡萄糖、氨基酸、胆碱等），形成所需要的正电子药物，正电子药物最终通过气动形式从热室设备间运输至分装热室，分装成需要的活度送至相应实验室进行实验。本项目正电子药物制备工作流程见图 9.1-4。

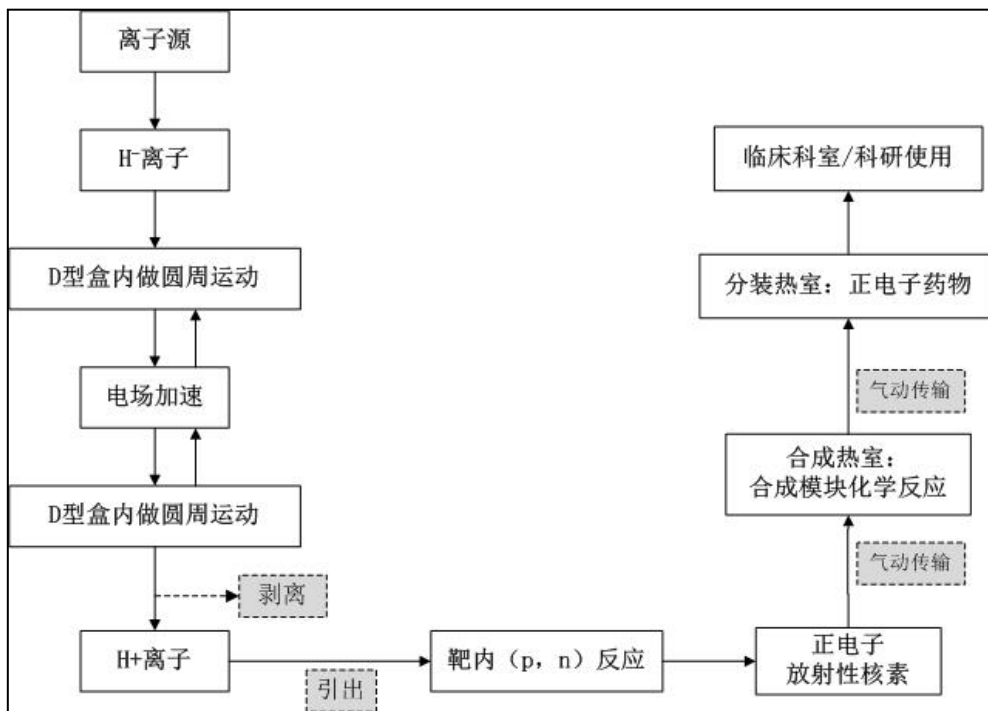


图 9.1-4 正电子药物制备流程示意图

### 9.1.2 医用回旋加速器系统组成

回旋加速器一般由磁场系统、射频系统、真空系统、离子源系统、束流提

取系统、诊断系统、靶系统、冷却系统和自屏蔽系统等组成，各系统的主要作用如下：

**磁场系统：**由上下磁轭、线路极片、磁场线圈、磁场电源等组成，其作用就是提供偏转力使束流维持在上下磁极之间中心平面的准环形轨迹上。磁场线圈使束流在上下磁极之间加速。磁场非匀场，而是采用深谷设计，对束流粒子在加速的中心层面提供了强聚焦力，引导粒子返回中心层面，产生高的束流引出效率。

**射频系统：**包括监测与控制元件、频率合成器、中级放大器、RF 电源振荡器、共轴透射线、耦合网络和 D 型盒结构等，其作用就是对 D 型盒提供一交替的高电压电势，并将能量转至 H<sup>-</sup>离子。随着束流加速得到能量，其轨道半径逐渐增加，这种轨迹被称为准螺旋形。当束流到达提取半径时，其能量也将达到预定能量。正常工作时，射频频率自动受 RF 控制元件调整以维持 D 型盒结构的共振。

**真空系统：**包括真空室、排气泵、仪表和控制元件等。真空仪表和控制元件用于监测并显示真空室的压力以及在系统出现故障时对仪器起到保护作用。真空室需要连续不断地抽气以排除来源于离子源及真空室内表面的气体。

**离子源系统：**包括离子源、ARC 电源、偏向电源与氢气流量控制器等。离子源产生 H<sup>-</sup>离子，在正常操作中不需要进行调试或干预性操作。离子源存在电势差，用于电离氢气形成等离子浓聚体。进入离子源的氢气流量由电子质流控制器调控以与变化的离子源和加速器运行条件相匹配。等离子体的电源（或 ARC）由电流调节的开关型电源提供，在正常运行时，控制系统调节离子源的 ARC 电流以维持期望的靶电流。

**束流提取系统：**包括一个或者两个束流提取器。其作用就是当 H<sup>-</sup>通过碳提取膜时，剥离其与氢核结合松散的两个电子，从而使束流由负电性变成正电性。

**靶系统：**是完成特定核反应而产生正电子核素的装置，一般包括靶体、准直器、靶膜、管路阀门等。靶材料包括液态、气态和固态靶三种类型。中气体靶是由气瓶间通过管道自动输送到加速器，更换气体罐的操作是在气瓶间完成。固体靶是装在靶面板上，可重复使用。对于液态靶，需要工作人员定期进入加速器机房添加靶水，通常每月一次。

冷却系统：从不同系统中将热量带出，带出的热量在二级冷却系统中进行热交换，并将热量传送到初级冷却系统。

自屏蔽系统：本项目拟配的回旋加速器都是带自屏蔽系统，主要由铁+水+聚四氟乙烯等材料组成，确保自屏蔽体表面外 1m 处剂量水平达到出厂指标要求。玖源-11MTS 型自屏蔽体设备尺寸 3.2m×3.1m×2.2m（长×宽×高），玖源-20 型自屏蔽体设备尺寸 3.8m×3.8m×2.36m（长×宽×高）。

本项目回旋加速器外观示意图见图 9.1-5

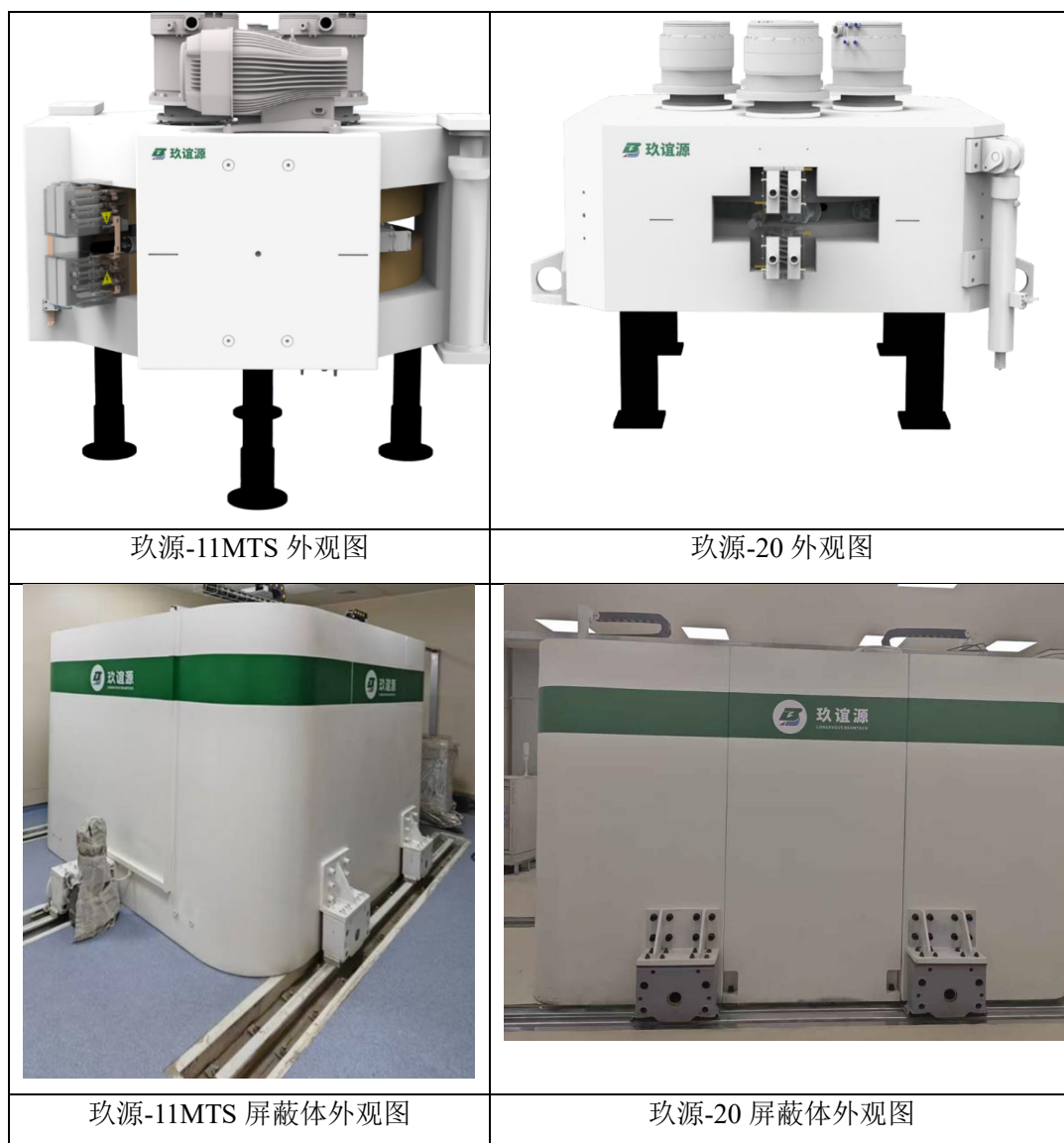


图 9.1-5 本项目回旋加速器外观示意图

### 9.1.3 性能参数

#### (1) 拟配回旋加速器参数

拟配带自屏蔽的回旋加速器 2 台，设备加速粒子为质子，玖源源粒子公司

生产的玖源-11MTS 型（额定参数为 11MeV/100 $\mu$ A）和玖源-20 型（额定参数为 20MeV/180 $\mu$ A），本次拟制备核素：F-18、C-11、N-13、Ga-68、Cu-64、Zr-89、I-124、Sc-44。

这两种型号的制备主要放射性同位素的参数详细见表 9.1-1 和表 9.1-2。实际工作中，常用条件都会比额定参数低，每次使用一个靶（制备一种同位素），平常每天制备核素不超过三种。

**表 9.1-1 玖源-11MTS 型回旋加速器制备主要放射性同位素的参数**

序号	靶材料	核反应	产物	靶材用量	打靶工况		产额 Ci
					轰击时间 min	MeV/ $\mu$ A	
1	N <sub>2</sub> +0.5%~1%O <sub>2</sub> (气体靶)	<sup>14</sup> N (p, $\alpha$ ) <sup>11</sup> C	<sup>11</sup> C	20ml	30	11/30	1.2
2	H <sub>2</sub> <sup>16</sup> O (液体靶)	<sup>16</sup> O (p, $\alpha$ ) <sup>13</sup> N	<sup>13</sup> N	2.5ml	20	11/50	0.15
3	H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O (液体靶)	<sup>18</sup> O (p, n) <sup>18</sup> F	<sup>18</sup> F	3ml	120	11/100	4.0
4	<sup>64</sup> Ni (固体靶)	<sup>64</sup> Ni (p, n) <sup>64</sup> Cu	<sup>64</sup> Cu	150mg	360	11/50	1
5	<sup>89</sup> Y (固体靶)	<sup>89</sup> Y (p, n) <sup>89</sup> Zr	<sup>89</sup> Zr	520mg	180	11/30	0.035
6	<sup>68</sup> Zn (固体靶)	<sup>68</sup> Zn (p, n) <sup>68</sup> Ga	<sup>68</sup> Ga	150mg	60	11/30	1.5

**表 9.1-2 玖源-20 型回旋加速器制备主要放射性同位素的参数**

序号	靶材料	核反应	产物	靶材用量	打靶工况		产额 Ci
					轰击时间 min	MeV/ $\mu$ A	
1	N <sub>2</sub> +0.5%~1%O <sub>2</sub> (气体靶)	<sup>14</sup> N (p, $\alpha$ ) <sup>11</sup> C	<sup>11</sup> C	20ml	30	20/50	3
2	H <sub>2</sub> <sup>16</sup> O (液体靶)	<sup>16</sup> O (p, $\alpha$ ) <sup>13</sup> N	<sup>13</sup> N	2.5ml	20	20/30	0.4
3	H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O (液体靶)	<sup>18</sup> O (p, n) <sup>18</sup> F	<sup>18</sup> F	4.3ml	120	20/100	10
4	<sup>64</sup> Ni (固体靶)	<sup>64</sup> Ni (p, n) <sup>64</sup> Cu	<sup>64</sup> Cu	150mg	360	14/50	1.5
5	<sup>89</sup> Y (固体靶)	<sup>89</sup> Y (p, n) <sup>89</sup> Zr	<sup>89</sup> Zr	520mg	180	14/30	0.075
6	<sup>68</sup> Zn (固体靶)	<sup>68</sup> Zn (p, n) <sup>68</sup> Ga	<sup>68</sup> Ga	150mg	60	14/30	2
7	<sup>124</sup> Te (固体靶)	<sup>124</sup> Te (p, n) <sup>124</sup> I	<sup>124</sup> I	500mg	120	14/20	0.015
8	<sup>44</sup> Ca (固体靶)	<sup>44</sup> Ca (p, n) <sup>44</sup> Sc	<sup>44</sup> Sc	200mg	180	14/30	0.2

## (2) 自屏蔽回旋加速器剂量水平

本项目拟配的两种型号在最大能量和 100 $\mu$ A 束流质子轰击 O-18 靶/Zn-68 靶的情况下，加速器表面 1 米处中子和伽马剂量率分布（垂直于自屏蔽表面）见表 9.1-3，固体靶与液体靶无法同时打靶制备，只能不同时间打靶，且固体靶最大束流不超过 100 $\mu$ A。

表 9.1-3 不同型号最大能量和 100 $\mu$ A 束流下中子和伽马剂量率水平

位置	剂量分布 ( $\mu$ Sv/h)			
	中子		伽马	
	玖源-11MTS 型	玖源-20 型	玖源-11MTS 型	玖源-20 型
东侧	4.69/4.67	0.55/316.23	75.08/63.10	0.0036/9.77
南侧	2.59/0.41	194.98/6.92	291.59/5.25	2.62/0.71
西侧	0.02/0.49	70.79/5.01	19.45/1.95	7.09/0.50
北侧	1.74/3.09	1.12/132.83	3.73/54.95	0.0017/37.84
上方	2.74/3.16	7.94/11.22	13.94/43.65	0.19/4.57
束流垂直 90°（无自屏蔽情况）*	4.0E+03	1.3E+06	9.3E+02	1.28E+04

备注：为自屏蔽体表面 1 米处剂量；其中标注\*为无自屏蔽的周围剂量当量率。

### 9.1.4 回旋加速器操作流程

整机操作流程如下：

#### (1) 巡检

- 1) 运行前必须保持屏蔽体完全闭合。
- 2) 射频功率馈管/馈线必须保持良好接触。
- 3) 确保没有裸露在机箱、设备之外的线头，加速器启动时不可进入加速器间。
- 4) 线圈通电时最高可产生 2T 的强磁场，磁性物质不能靠近线圈、磁铁间隙。
- 5) 机构运动过程中不可进入运动空间。
- 6) 确保设备散热正常、水冷系统开启，设备无报警。
- 7) 确保氢气报警装置正常运行，无报警现象。

8) 携带个人剂量报警仪和佩戴个人剂量计巡检回旋加速器室, 检查急停按钮、辐射安全安全联锁装置是否正常, 并按序按动巡检按钮, 巡查有无人员误留。在确认加速器室内无人员后, 关闭屏蔽门。

#### (2) 回旋加速器操作流程

- 1) 在机器运行前巡检完成后, 进行开机工作。先使水冷系统、真空系统处于开启的状态, 设备状态块中外水冷、内水冷显示为“运行中”, 真空状态显示为“真空满足”。
- 2) 再次检查加速器是否闭合、氮气破空阀是否关闭、离子源气阀是否开启、水冷温度是否 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ 、真空度是否 $\leq 2.0\text{E}-4\text{Pa}$ 、屏蔽体是否闭合。
- 3) 以上条件都满足后, 开启热待机。点击热待机开启按钮, 系统进入热待机启动状态, 直至界面热待机状态显示为“热待机完成”、冷待机状态依然显示为“冷待机完成”。
- 4) 开启热待机的过程中, 磁铁电源、高频、射频、扫频控制、相位闭环、幅度闭环随之依次打开完成, 热待机开启完成后, 需注意各项参数是否存在异常。
- 5) 按计划完成靶材注入及靶材腔保压, 及开启氦冷循环系统。同时打开离子源界面, 将氢气流量设定设置为 5-12sccm, 开启离子源电源, 电流设定为 2/3A。
- 6) 离子源各参数稳定后, 可视为开机完成。
- 7) 将内靶调至  $180^{\circ}$ ; 微调磁铁电源电流, 找到最大束流; 将内靶调至  $90^{\circ}$  后即打靶, 然后微调碳膜角度, 找到最大打靶流强。
- 8) 制备打靶时间、束流根据实际使用需求计算确定。
- 9) 打靶制备结束后, 将降占空比至 6%后, 关闭离子源。待核素传输完成后关闭靶系统等。
- 10) 点击系统关机的关闭按钮, 会慢慢关闭射频系统和磁铁系统, 直至热待机开机按钮由绿色变为灰色, 热待机状态显示为“待机中”, 冷待机状态仍显示为“冷待击完成”, 回旋加速器进入冷待机状态。

#### 9.1.5 不同靶介质操作流程

回旋加速器制备核素采用的靶介质分为液体靶、气体靶和固体靶, 操作方式

略有区别。

### 9.1.5.1 液体靶操作流程

本项目制备正电子放射性核素 F-18、N-13 的靶介质  $^{18}\text{O}$  水、 $^{16}\text{O}$  水为液体，按本项目回旋设备特性，液体靶填充瓶放置于机房内靶外围控制柜上（见图 9.1-6），液瓶容量约为 50ml，可轰击 15 次左右，一定时段后，需由工作人员进入机房更换新靶瓶。制备核素时选择靶及液体靶填充工序，由工作人员在控制室远程操作。根据平台所需液体靶核素操作量，液体靶具体情况及更换频次见表 9.1-4。

表 9.1-4 回旋加速器液体瓶操作情况列表

操作内容		操作频次	操作时间	操作位置
用手动方式 更换液体靶瓶	$^{18}\text{O}$ 水	1 次/周	10s	机房内靶外围 控制柜上
	$^{16}\text{O}$ 水	1 次/月	10s	
利用远程操作方式选择靶		——	——	控制室
利用远程操作方式将液体充填入靶体		——	——	控制室

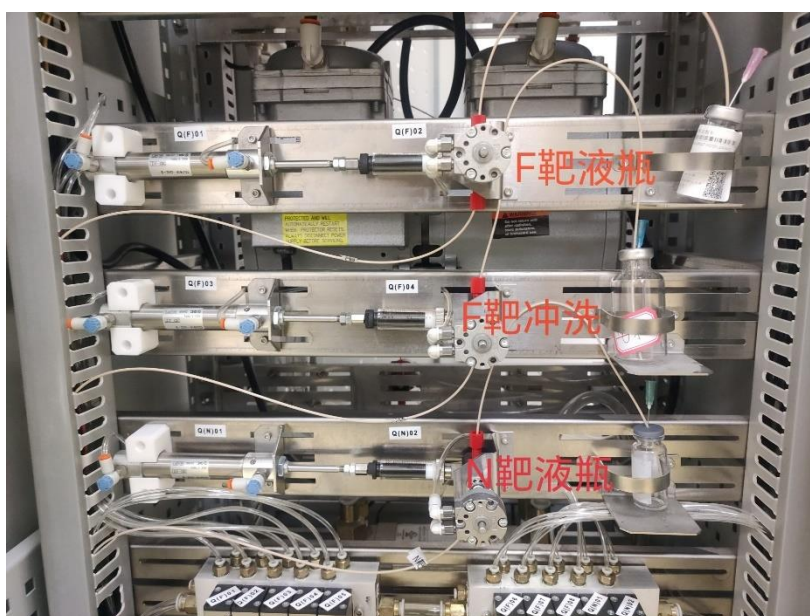


图 9.1-6 本项目回旋加速器液体靶填充瓶照片

### 9.1.5.2 固体靶操作流程

自屏蔽回旋加速器制备 Ga-68、Cu-64、Zr-89、I-124、Sc-44 核素采用 Zn-68 Ni-64、Y-89、Te-124、Ca-44 固体靶片。靶片材料进行电镀或者烧结到固体

靶片背板上，新靶片放置于相应热室内，通过自动传输装置传输到加速器的固体靶位进行轰击；轰击结束后，靶片掉入传输系统中的胶囊中，然后通过自动传输装置传输到固体靶热室进行分离和溶解，待溶解后的液体传输到合成热室进行标记，加速器固体靶及传输示意图见图 9.1-7。

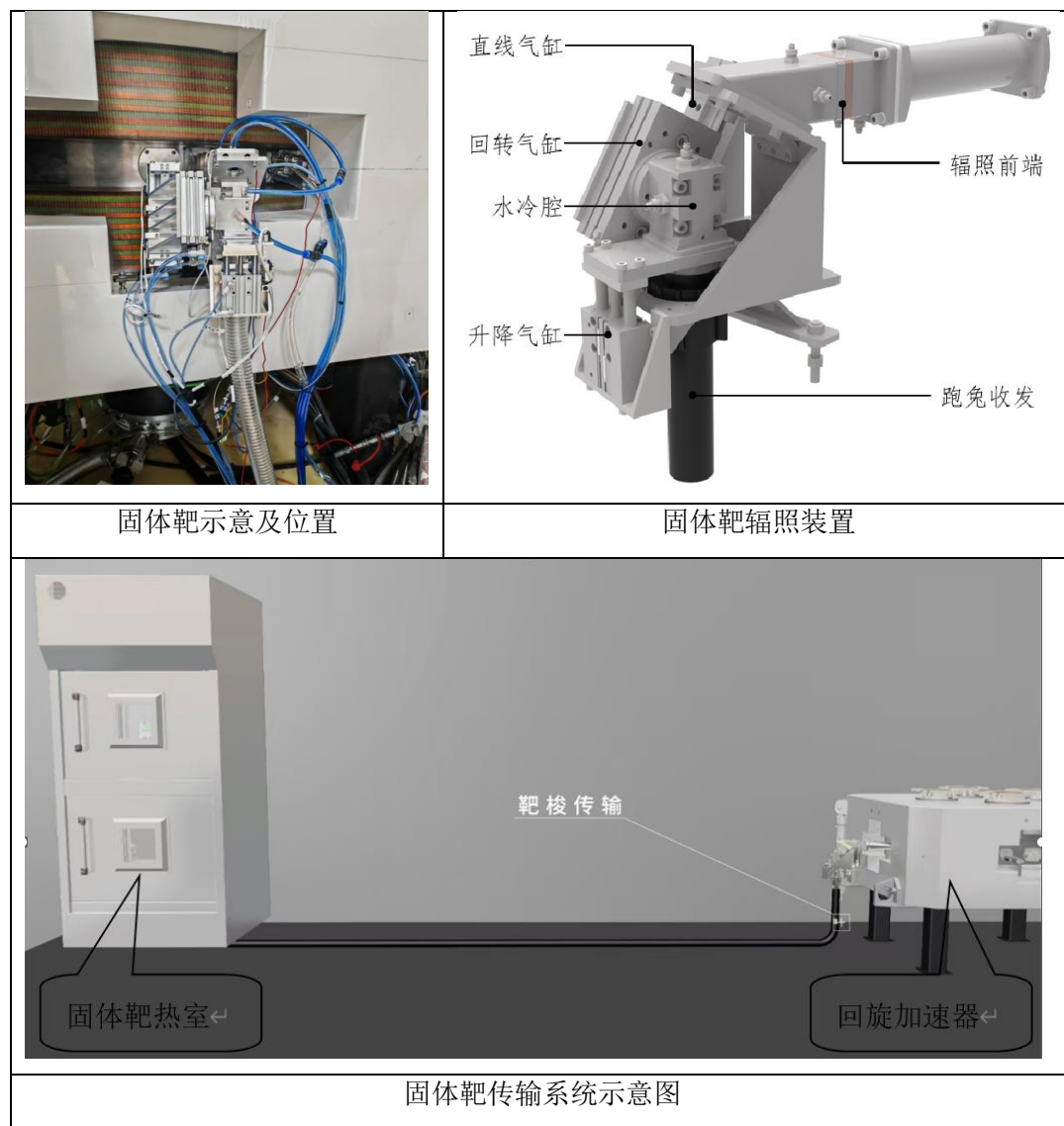


图 9.1-7 回旋加速器固体靶靶片传输示意图

### 9.1.5.3 气体靶操作流程

本项目制备 C-11 核素使用 N-14（氮氧混合气）气体靶，气瓶存储于气瓶间，一般使用期限可长达几年。生产核素时的清洗靶、填充靶、流程操作等均由技师在控制室内完成，无须进入机房。

### 9.1.6 核素传输

回旋加速器机房的核素打靶完成后,通过地沟压力管道以液态或气态或固体靶形式传输到正电子放射性药物制备室的合成模块中,核素传输地沟采用混凝土浇筑,地沟盖板采用 60mm 厚铅防护。

### 9.1.7 制备、合成的工艺流程

#### (1) 核素的制备

负离子在回旋加速器真空腔内被加速达到最大引出半径并通过非常薄的碳膜剥离两个电子。正离子直接导出到相应的靶位中,束流在靶材料中停止发生 (p, n) 或 (p,  $\alpha$ ) 核反应,从而产生核素离子。在回旋加速器正式制备放射性同位素之前,先清洗靶并用纯氦吹干,然后注入靶物质,这些操作均由工作人员在控制室内完成,无须进入回旋加速器机房操作。

本项目回旋加速器制备核素采用的靶分为液体靶、气体靶和固体靶,操作方式略有区别。制备 F-18、N-13 核素采用液体靶,制备 C-11 核素采用气体靶,制备 Cu-64、Ga-68、Zr-89、I-124、Sc-44 核素采用固体靶,均通过管道利用自动加样装置装入靶腔。其中液体靶由自动控制的加液泵经小孔径管道将液态靶物质装载于靶材腔中(液态靶物质无放射特性),设定制备条件,轰击一定时间(视所需制备量而定)生成核素后,通过传输管道传输至合成热室内进行化学合成;气体靶是由气瓶间通过管道自动输送到回旋加速器,更换气体罐的操作是在气瓶间(设备间)完成,操作人员不需要进入加速器机房;Cu-64、Ga-68、Zr-89、I-124、Sc-44 固体靶由固体靶靶梭制备完成后,由安装在合成热室内的固体靶自动溶解传输系统经跑兔管道自动传输至固体靶上,设定制备条件,轰击不同靶位一定时间后,靶梭再经跑兔管道自动传输至合成热室内的固体靶自动溶解传输系统,自动溶解后传输至固体靶核素纯化装置纯化后,再传输至安装有相应核素合成模块的合成热室内进行自动化学合成,或者传输至带防护的热室内进行手动合成。

以上整个过程为全自动控制,无需工作人员进入回旋加速器室内,仅在控制室监控整个过程的执行情况;

**制备工艺:**靶材料准备完毕后,由工作人员在控制室或热室设备间操作回旋加速器,以一定的束流轰击靶物质,制备核素。使用束流轰击装入靶腔内的液体靶或气体靶一段时间后,通过预装在靶线地沟内的特氟龙毛细管,利用高

压氦气将靶腔内的靶物质输送至放化室内的热室中，并进行靶腔清洗，再用高纯氦气将放射性核素输送管道吹干。

以制备  $^{18}\text{F}$ -FDG 为例，先利用回旋加速器将质子加速，使其撞击  $^{18}\text{O}$  发生反应  $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$  而产生  $^{18}\text{F}$ 。回旋加速器在制备  $^{18}\text{F}$  的过程中，是在屏蔽热室内自动完成的，由控制室的计算机根据输入的参数来进行控制。轰击过程中若有不可自动调整的参数偏差，回旋加速器将自动停机。自动制备  $^{18}\text{F}$  的打靶时间可以根据所需  $^{18}\text{F}$  产量预先设定，通常不超过 2h。

使用气体靶系统制备 C-11 时，其产物以  $^{11}\text{CO}$  或  $^{11}\text{CO}_2$  形式导入自动化学合成系统，通常先被转化成  $^{11}\text{CH}_3\text{I}$ 、 $\text{H}^{11}\text{CN}$ 、 $\text{H}^{11}\text{CHO}$  或  $\text{R}^{11}\text{COCl}$  等反应性较大的中间体，然后制备成所需的 C-11 标记的放射性药物。

使用液体靶制备 N-13 时，靶水中 N-13 以  $^{13}\text{NO}_3$ 、 $^{13}\text{NO}_2$ 、 $^{13}\text{NH}_4^+$  和  $^{13}\text{N}$  羟胺形式存在，无需合成系统。

固体靶片加载：将镀镍-64 靶片（镀钪-89、镀碲-124 等）传入固体靶照射单元，利用回旋加速器设定质子能量 11 或 14MeV、束流强度待定  $\mu\text{A}$ 。连续轰击靶位一定时间后，靶梭再经跑兔管道自动传输至合成热室内的固体靶自动溶解传输系统，自动溶解后传输至固体靶核素纯化装置纯化后，再传输至安装有相应核素合成模块的合成热室内进行自动化学合成等。

## （2）化学合成及分装

回旋加速器机房的核素离子制备完成后，会通过地沟压力管道以液态、气态或固体靶形式传输到热室的模块控制箱中。核素传输地沟采用混凝土浇筑，地沟盖板采用 60mm 厚铅防护。热室的模块箱包括两个部分，分别为洁净合成箱和自动分装箱，其中热室所在的操作间为最核心的场所。热室设备间为开展开放性核素操作的场所，固体靶核素制备操作室和正电子核素操作室都规划设置各 5 个热室（其中 4 个合成、1 个分装热室）。

**热室设备间：**加速器制备的放射性核素进入固体靶核素制备操作室和正电子核素操作室内的合成模块，F-18 等在合成热室内制成 F-18 等标记药物（如：FDG 等），整个流程在热室内为全自动操作。合成热室正面（含正面观察窗）采用不低于 70mm 的铅进行防护（详细厚度见表 10.2-2），采用耐腐蚀不锈钢内胆。采用耐腐蚀不锈钢内胆，设有同箱体防护能力相当的铅玻璃观察窗。药

物合成热室安装专用通风系统进行空气净化，通风量约 500m<sup>3</sup>/h，排风经高效过滤器（粒径≥0.3μm 的微粒的过滤效率不低于99.97%）净化后，引至楼顶经活性炭过滤后排放（高度约 32m），分别用于合成 F-18、C-11（N-13 不用合成）、Cu-64、Ga-68、Zr-89、I-124、Sc-44,合成热室外观示意图如图 9.1-8 所示。



图 9.1-8 合成热室模块箱外观图

在洁净合成模块中，计算机自动设置的步骤主要包括以下几种（以 F-18-FDG 为例），FDG 合成流程图见图 9.1-9 所示：

① 捕获淋洗：从加速器传过来的核素离子经过QMA柱，其中核素离子被附着在柱子上，随后用氨基聚醚（K222）溶液将放射性氟离子从QMA柱子上淋洗下来传入反应瓶，废水及其中的杂质离子流到废水瓶中收集，单次产生量为2.5ml/次。用溶液淋洗QMA柱，将上面的核素离子带入反应管。

② 除水：淋洗结束后加热反应管使乙腈与水共沸进行除水。

③ 亲核反应：待冷却完毕后向反应管中加入三氟甘露糖溶液进行亲核反应，F-18取代三氟甘露糖上的一个羟基。

④ 水解：向中间体中加入（碱）水解溶液，按程序自动设定的反应温度加热，完成水解反应。

⑤ 纯化过滤：自动加入注射用水淋洗得到氟[F-18]脱氧葡萄糖粗品溶液，并依次通过几个小柱对粗品溶液进行纯化，去除杂质，得到氟[F-18]脱氧葡萄糖溶液，自动传输至分装热室经0.22μm无菌滤膜过滤收集在产品瓶内，合成结束。

⑥ 分包装、留样和质控：在分装热室内，采用自动或手动方式从产品瓶

内抽取一定体积的药液（如：0.2mL）装入注射器或西林瓶内，放入铅盒或铅罐内并从分装热室内取出，再送至放化质控室用于放射性分析和其他平台实验室进行相关实验。

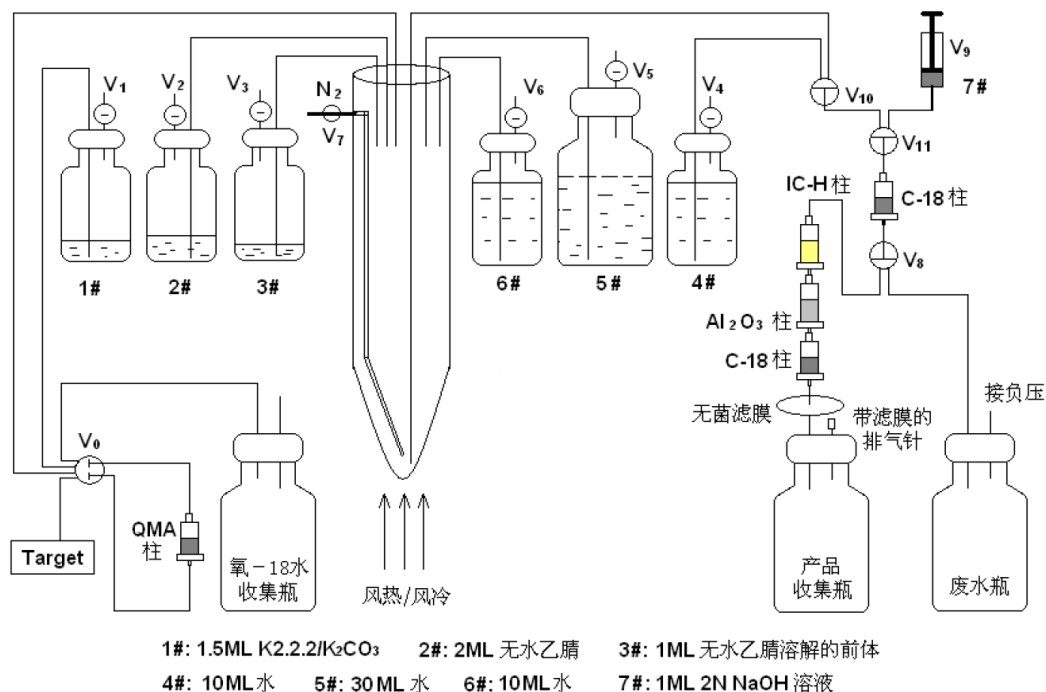


图 9.1-9 药物 FDG 合成流程图

**分装热室：**合成后的<sup>18</sup>F-FDG 等放射性药物，经由屏蔽的专用管路自动传送到分装热室内的收集瓶内，收集瓶被预先放置在药品分装防护装置内，分装人员根据需要利用无菌器皿抽取一定活度（一般低于100mCi）的<sup>18</sup>F-FDG 等药物，装入 10ml 或30ml 的无菌西林瓶内，经压盖密封后放入铅制容器内。分装热室的内部是负压洁净百级的环境，并且具有良好的辐射屏蔽能力，分装人员通过分装热室正面手套孔操作，透过铅玻璃防护视窗来进行操作。分装热室及分装器示意图见图 9.1-10。

热室操作室内拟设置 2 个分装热室，用来分装放射性药物。分装热室安置在合成热室旁，正面屏蔽层采用 60mm 铅板（其他面厚度见表 10.2-2），采用耐腐蚀不锈钢内胆，设有同箱体防护能力相当的铅玻璃观察窗。分装热室安装高效过滤器（滤除粒径≥0.3μm 的微粒的过滤效率不低于 99.97%），引至楼顶部经活性炭过滤后排放（高度约 32m）。

药物分装过程也采用计算机全自动控制，无需人工干预，药物在自动分装模块中将根据预先设计的程序，将试剂分装到各个试剂瓶中，分装程序结束后，

模块箱提示工作人员，此时工作人员戴着专用的手套，使用机械手将分装完成的试剂瓶装载到专用的铅屏蔽容器中（整个过程中类似在手套箱中操作），铅屏蔽容器采用 42mm 的铅当量屏蔽，铅屏蔽容器的尺寸为半径 6cm，高 16cm，铅容器盖子为旋转式卡扣盖子，该过程持续 20min/次。

上述化学合成、纯化模块系统采用精确取液注射泵、气动液路转换装置以及放射性、压力、温度和流量监测单元，核素在模块箱中的合成过程中，无需人员干预，每次合成/纯化前只需补充试剂及更换耗材，放射性药物的合成全部由计算机控制自动完成。合成/纯化后的放射性药物经高效除菌过滤膜过滤被收集在无菌真空瓶中。



图 9.1-10 分装热室模块和药物分装器外观图

分装热室正面采用 60mm 的铅进行防护，其余侧面、顶面、地面采用 50mm 的铅进行防护，观察窗位于热室正面，其屏蔽防护等效于 60mm 的铅当量；正电子药物单次分装操作时间为 20min，每天平均操作四次。

合成出的正电子药物由管路自动输入到成品瓶，根据不同平台的实际使用

活度，技术人员使用机械手分装至注射器内，经标定活度后装入专用转运防护罐中（42mmPb 铅当量），由轨道传送至热室出口；再转到相关的分子探针平台。

### 9.1.8 加速器运行时间

按保守模式制备 F-18、C-11、N-13、Ga-68、Cu-64、Zr-89、I-124、Sc-44。估算运行时间，每台日最大运行时间为 4h/d，每天开机 4 次，年运行天数 250d/a。

### 9.1.9 热室制备同位素的转移流程

加速器制备的放射性核素通过传输管道输送到热室内的工作箱进行分装合成操作，分装并屏蔽好的放射性药物通过东侧的药品传输专用梯送至地下一层核医学科。本项目中采用药物转运防护罐（42mmPb）和注射器转运防护箱（25mmPb），见图 9.1-11，其中药物转运防护罐分为罐体、罐盖两部分，适用于 10ml-30ml 产品的转运，其屏蔽厚度为 42mmPb 当量。经屏蔽后，防护罐表面剂量率低于 25 $\mu$ Sv/h，1m 处剂量率低于 2.5 $\mu$ Sv/h。



图 9.1-11 PET 同位素转运防护罐示意图

转运内容包括：

加速器制备的放射性药物通过传输管道输送到热室设备间内的工作箱进行分装合成操作，分装并屏蔽好的放射性药物通过南侧核素梯送至相关楼层实验室，然后进行相关操作。

### 9.1.10 人流、物流路径

#### （1）人流

回旋加速器控制室路线：电梯下地下一层后，沿着东侧和北侧走道直接到回旋控制室，操作回旋完成后，按照相反路由离开回旋控制室区域。

正电子核素操作室进入路线：电梯下地下一层后，沿着东侧走道→总更（更衣）→一更更衣区（日常服）→二更更衣区（工作服）→级洁净走廊→操作区/前区。

正电子核素操作室退出路线：操作区/前区→级洁净走廊→检测间（便携式表面污染仪检查衣物污染水平。若有污染，沾污外衣脱掉存于专用容器作放射性固废处理）→一更的更衣区（工作服）→总更更衣区（日常服）→离开。

固体靶核素制备操作室进入路线：电梯下地下一层后，沿着东侧走道→一更更衣区（日常服）→二更更衣区（工作服）→级洁净走廊→操作区/前区。

固体靶核素制备操作室退出路线：操作区/前区→级洁净走廊→检测间（便携式表面污染仪检查衣物污染水平。若有污染，沾污外衣脱掉存于专用容器作放射性固废处理）→一更的更衣区（工作服）→总更更衣区（日常服）→离开。

### （2）固废路线

放射性固废流出通道：正电子核素操作室和固体靶核素制备操作室后室每周一上班收集放射性废物，通过后区的包装间转移到放射性废物间→储存10个半衰期以上，然后再转到放射性废物间2并检测满足解控水平后→从电梯（DT-06）运出→由有资质的单位处置。

### （3）放射性同位素路线

回旋制备的同位素通道：提前一天向回旋加速器室订购，由回旋工作人员在正电子核素操作室和固体靶核素制备操作室手套箱分装好的同位素，从内部走廊经DT-02号电梯到达一层货梯厅→工作区走廊→再从DT-06号电梯到达三层或四层等其他平台，在合成前室门口处进行交接，进行“点对点”交接，核对放射性同位素规格和数量，办理签收手续，要求在有监控条件下的点对点交接，由专人负责，有交接记录和台账。

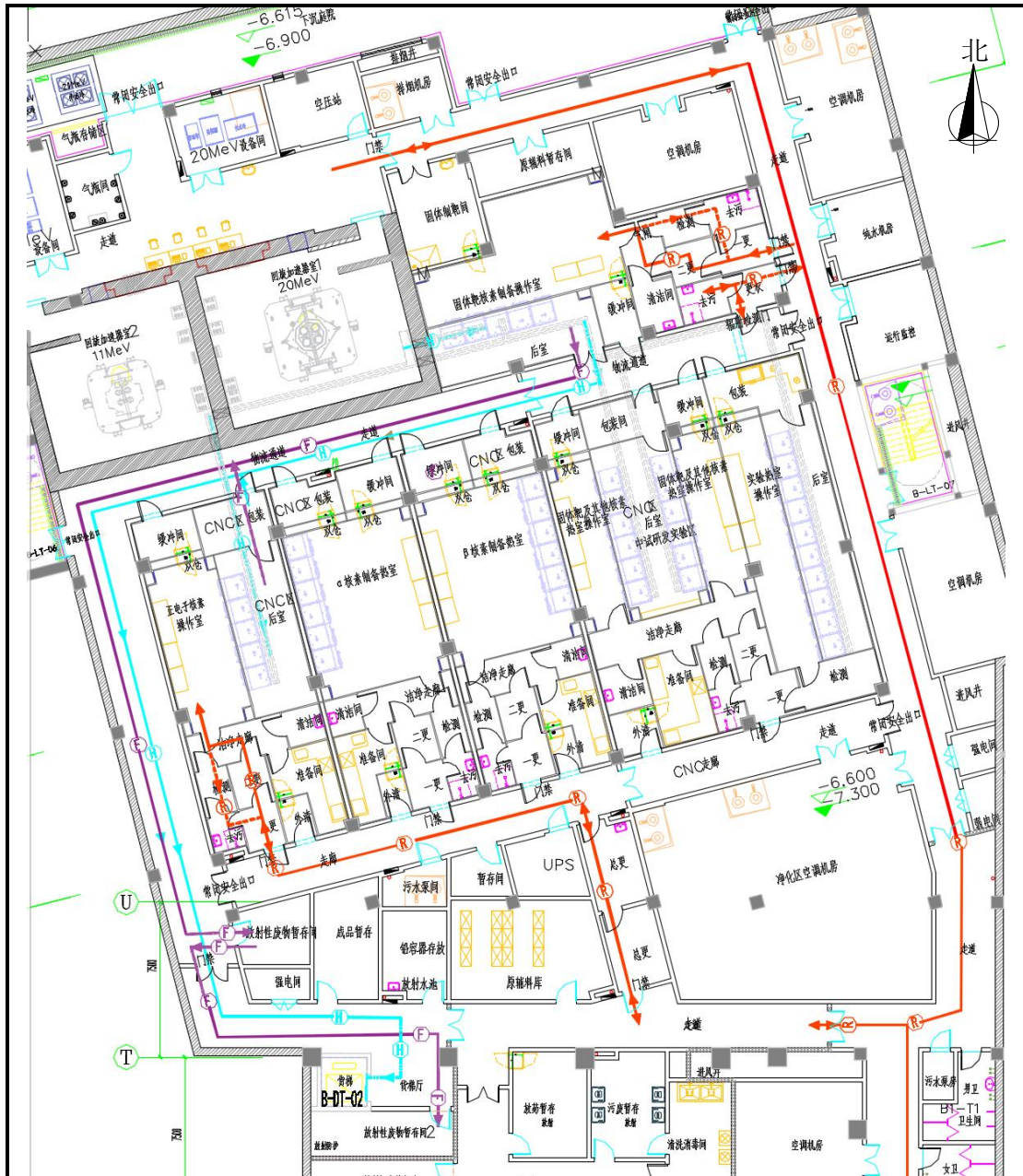


图 9.1-12 核素操作室分区、人流物流和同位路径示意图

## 9.2 污染源描述

### 9.2.1 主要污染物和污染途径

#### (1) 贯穿辐射

被加速的高能带电粒子与靶或结构材料相互作用，会产生中子和  $\gamma$  射线的混合场。中子主要来自于靶以及束流准直器、靶窗（铝、钛等）等回旋加速器部件的（p，n）核反应，其主要来源是质子束流打靶产生的中子，质子在物质中的射程较短，其射程仅为同等能量的电子射程的几十分之一到百分之一，故质子的穿透性很弱，很容易被物质阻挡，其外照射防护在本项目中不作考虑。

贯穿辐射主要是中子和  $\gamma$  射线。

### 1) 中子

中子是回旋加速器的主要污染因子之一。质子轰击靶材料时发生  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  等核反应，核反应发生的位置主要位于靶部位，在生成所制备核素同时，也产生一定量中子，中子的能量主要集中在 2~3MeV 左右，10MeV 以上的中子产额很小，最高中子能量为 10MeV，在极低概率下中子最大能量可达理论值 15MeV，平均能量在 3MeV 左右。

### 2) 回旋加速器运行时 $\gamma$ 射线的来源主要有 3 个方面：

- ①质子与靶物质、中子与靶窗及周围部件作用产生的初级  $\gamma$  射线；
- ②中子与靶物质、中子与靶窗及周围部件作用产生的次级  $\gamma$  射线；
- ③加速器打靶产生的正电子核素，发生正电子湮灭产生的 511keV 的  $\gamma$  射线。

### 3) 正电子放射性核素的制备量

根据分子探针其他平台使用非密封放射性同位素规划，大部分正电子核素药物半衰期都很短，衰减损失严重，本项目拟申请的用量详见表 1.2-1。实际运行时，工作人员会根据其他平台的需求量，确定具体的打靶时间，从而控制放射性药物的制备量，每天的总运行时间不大于 4.0h。本项目拟制备的几种放射性药物，均衰变释放  $\gamma$  射线，会对周围环境有一定的辐射影响。几种放射性药物的辐射特性见表 9.2-1。

**表 9.2-1 本项目使用的显像放射性核素主要参数**

序号	核素名称	毒性	半衰期	衰变类型	主要能量/平均能量 (keV)	周围剂量当量率常数 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$
1	F-18	低毒	109.8min	$\beta^+$ 、EC	$\beta^+635, \gamma511$	0.143
2	N-13	低毒	9.97min	$\beta^+$	$\beta^+1190, \gamma511$	0.148
3	C-11	低毒	20.4min	$\beta^+$	$\beta^+960, \gamma511$	0.148
4	Ga-68	低毒	68.3min	$\beta^+$ 、EC	$\beta^+1899, \gamma511$	0.134
5	Cu-64	低毒	12.7h	$\beta^+$ 、 $\beta^-$ 、EC	$\beta^+651, \gamma511、1346$	0.029
6	Zr-89	中毒	3.3d	EC、 $\beta^+$	$\beta^+396.9, \gamma902$	0.154
7	I-124	中毒	4.176d	EC、 $\beta^+$	$\beta^+973.6, \gamma511、603、1691$	0.185

8	Sc-44	低毒	3.97h	$\beta^+$ 、EC	$\beta^+632.0, \gamma1157$	0.331
---	-------	----	-------	---------------	----------------------------	-------

## (2) 感生放射性

感生放射性是指当射束停止后，仍有“残留”辐射的现象，通常是中子活化的结果，较高能量的粒子加速器（大于 10MeV）都可能通过（ $\gamma$ -n）、（p-n）等核反应产生泄漏或污染中子，进而产生感生放射性。感生放射性衰减较快，一般 2~10 分钟可减少一半或更多，如人员在停止出束后立即进入机房，可能受到感生放射性的照射。

回旋加速器的感生放射性主要是由中子引起的，这是因为不管中子能量如何，均会产生活化，感生放射性的辐射水平取决于加速粒子的能量、种类、束流强度和加速器的运行时间等因素。

对于  $\gamma$  射线引起的感生放射性，从核反应的阈能来看，能够直接产生感生核素的被加速带电粒子能量多数需要在 10MeV 以上，本项目产生的  $\gamma$  射线最高能量约为 10MeV（光子平均能量约 2.0MeV），因此，不需要考虑  $\gamma$  射线再引起的活化。

感生放射性主要产生于回旋加速器的结构材料、冷却水以及加速器厅的空气中，与此同时还伴有放射性废物的产生。

### ① 结构材料活化

回旋加速器引起活化的主要部位是束流损失较大处的部件，如束流管、偏转磁铁、结构材料。该设备使用的材质主要是铜、铝和不锈钢。产生的感生放射性核素主要是  $^{27}\text{Mg}$ 、 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{28}\text{Al}$ 、 $^{62}\text{Cu}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{66}\text{Cu}$ 、 $^{56}\text{Mn}$ 、 $^{65}\text{Zn}$  和  $^{65}\text{Ni}$ ，半衰期是 2.3min~12.8h，辐射类型是  $\beta$ 、 $\gamma$ ，主要产生方式是  $^{27}\text{Al}(\text{n}, \text{p})^{27}\text{Mg}$ 、 $^{27}\text{Al}(\text{n}, \alpha)^{24}\text{Na}$ 、 $^{27}\text{Al}(\text{n}, \gamma)^{28}\text{Al}$ 、 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, 2\text{n})^{62}\text{Cu}$ 、 $^{65}\text{Cu}(\text{n}, 2\text{n})^{64}\text{Cu}$ 、 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 、 $^{65}\text{Cu}(\text{n}, \gamma)^{66}\text{Cu}$ 、 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 、 $^{64}\text{Zn}(\text{n}, \gamma)^{65}\text{Zn}$  和  $^{64}\text{Ni}(\text{n}, \gamma)^{65}\text{Ni}$  反应。随着回旋加速器运行时间的增加，短寿命活化成份很快达到平衡状态，长寿命活化成份会不断累积，且达到平衡状态所需时间较长。

回旋加速器活化产物的辐射剂量场很难准确估算。根据回旋加速器设备厂家提供的资料，设备打靶 2h 后，距加速器靶部件外表面 0.3-0.5m 处，剂量率可达 400-800 $\mu\text{Sv/h}$ 。加速器大修时，RF 线圈，碳剥离膜、离子源等外表面剂量率分别可达 5.6-8.4mSv/h，2-4mSv/h 和 2mSv/h。中国疾病预防控制中心辐

射防护与核安全医学所曾对某型号回旋加速器进行了检测，在打靶 1h 后，靶口处的最大剂量率为 280 $\mu$ Sv/h，1m 处的最大剂量率约为 5 $\mu$ Sv/h。可见，在设备维修和维护时，需特别注意活化部件的外照射问题。辐射工作人员（为厂家工程师）需佩带个人剂量报警仪，以防止长时间工作导致人员受照大剂量照射。设备维修和维护都是由厂家维保工程师完成，不属于本评价范畴。

### ②空气活化

加速器室的空气活化后，产生的感生放射性核素主要是  $^{41}\text{Ar}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{16}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ ，半衰期是 7.3s~1.83h，辐射类型是  $\beta$ 、 $\gamma$ ，主要产生方式是  $^{40}\text{Ar}(\text{n}, \gamma)^{41}\text{Ar}$ 、 $^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{11}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{16}\text{N}$  和  $^{16}\text{O}(\gamma, \text{n})^{15}\text{O}$  反应，引起空气活化的中子由级联中子、蒸发中子以及它们慢化后产生的热中子，由于产生的  $\gamma$  射线能量较低，所以不考虑由  $\gamma$  射线引起的空气活化。空气中氩占大气体积的 0.934%，所以，中子与空气中  $^{40}\text{Ar}$  发生  $^{40}\text{Ar}(\text{n}, \gamma)^{41}\text{Ar}$  核反应生成  $^{41}\text{Ar}$  核素。本项目其他活化气体和放射性气溶胶的危害几乎可以忽略，主要考虑  $^{41}\text{Ar}$ 。

### ③冷却水活化

水冷系统是为设备发热部件冷却而设计的封闭循环系统，是加速器整体部件中的一部分，且该系统在加速器机房内，冷却水不会外排亦不与外界接触。在正常工况下回旋加速器是不会排泄放射性废水的，仅当闭环水管冷却系统意外老化破损时有发生冷却水泄漏的可能。因此采用的处置方法是：在回旋加速水冷机组下方预先设置地坑，地坑底部预埋排水管与放射性衰变池系统连接。通过这些预埋的下水管道设施，意外破损时泄漏的冷却水被暂存在集水坑收集，最后排到 1 号衰变池里。

中子引起加速器冷却水活化，产生的感生放射性核素主要是  $^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{11}\text{C}$ ，半衰期分别是 53.2d、12.33a、20.39min，辐射类型是  $\beta$ 、 $\gamma$ ，对环境影响有意义的放射性核素仅为  $^7\text{Be}$  和  $^3\text{H}$ 。

本项目回旋加速器二级冷却水是闭环水管冷却系统，闭环水容量约 100L，在正常工况下回旋加速器是不会排泄放射性废水的，仅当闭环水管冷却系统意外老化破损时有发生冷却水泄漏的可能。因此采用的处置方法是：在回旋加速水冷机组下方预先设置地坑，地坑底部预埋排水管与放射性废液处理监测系统连接。通过这些预埋的下水管道设施，意外破损时泄漏的冷却水被暂存在放射

性废液处理监测系统收集处理，本项目加速器机房设置地漏，这些意外泄漏冷却水连接到 1 号衰变池。

#### ④墙体表面活化

由于本项目加速器除了底面都是带有自屏蔽系统，自屏蔽体1m处的剂量率水平较低，可不考虑墙体表面活化问题。回旋下方距靶点1m处的中子剂量当量率采用非自屏蔽回旋上方的值，根据厂家提供的玖源-20系列回旋加速器上方距靶点1m处的中子剂量当量率为 $1.3E+06\mu\text{Sv/h}$ 、中子什值层为31.9cm（玖源-11系列回旋加速器1m处的中子剂量当量率为 $4.0E+3\mu\text{Sv/h}$ ），回旋加速器基础底板厚度80cm砼+地面垫层10cm砼（共90cm砼），底板的衰减因子不大于 $1.3E-3$ ，回旋加速器室与土壤交界处（距靶点约1.68m）的中子剂量当量率 $6.0E-1\text{mSv/h}$ ，小于 $5\text{mSv/h}$ 的要求，本场所可忽略土壤和地下水的感生放射性的影响。

#### （3）放射性废物

放射性废气如上所述，主要考虑 $^{41}\text{Ar}$ 。放射性固体废物主要包括：回旋加速器制备药物产生的过滤网、靶膜等感生放射性废物，放射性药物制取时更换的放射性残留物如硅胶、树脂、氧化铝、滤膜等以及通风系统产生的废活性炭。

在同位素交换反应和洗涤完成后，乙腈和乙醚溶液作为放射性废液处理，每批次大约产生 4ml，采用滤纸吸附的方法将其转化为固体废物（实际操作过程基本不产生废液），存放在废物桶内，符合清洁解控标准后按照普通废物处理。

操作人员清洗去污可能产生少量的放射性清洗废水。应急状态下产生的废液包括清洗废液和加速器冷却水废液。加速器二级冷却水废液约 100L，事故状态下可通过加速器机房内地漏导入 1 号衰变池。

正电子核素化学合成过程中，会产生废弃的一次性用品，如药物制备装置中的产品收集瓶、三通阀、单向阀、连接管材、穿刺针、同位素交换反应柱、无菌滤膜等，还有废注射器、一次性手套等放射性废物，隔日早晨进行收集，暂存于专用废物桶内。每天放射性废物产生量约 0.2kg，每周 1kg 左右，暂存于放射性废物暂存间内的废物桶内。

合成和分装放射性药物的专用热室，设有独立废气排放系统，废气经

高效过滤器和活性炭过滤后，管道经排风竖井到达楼顶排放。回旋加速器机房和设备间分别经过过滤器过滤后并入另一套独立排风系统，管道经排风竖井到达楼顶排放。放射性药物合成和分装过程中，放射性物质挥发量通常低于总量的 1%。当传输系统发生气路、液路泄漏时，短期释放量会增加，有可能会扩散到加速器机房和放化室内。为防止放射性气体对周围环境的污染，本项目除回旋加速器室设专用废气排风系统外，合成及分装热室还设置了独立排风处置系统，少量的放射性废气经过高效过滤器净化过滤（滤除粒径 $\geq 0.3\mu\text{m}$  微粒的过滤效率不低于 99.97%）后，由单独管道引至楼顶经活性炭过滤后在 34.5m 高处排放。

#### （4）非放射性污染物

空气在射线强辐射作用下，吸收辐射能量并通过电离产生臭氧（ $\text{O}_3$ ）和氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）。主要由空气重的二氧化氮（ $\text{NO}_2$ ）在光子照射下形成一氧化氮（ $\text{NO}$ ）和氧原子（ $\text{O}$ ），氧原子与空气中的氧气（ $\text{O}_2$ ）结合生成臭氧。同时，氮气（ $\text{N}_2$ ）分解成氮原子（ $\text{N}$ ），氮原子与氧气作用产生一氧化氮和氧原子，氧原子通过下式反应生成臭氧，而一氧化氮通过与氧气和臭氧反应生成二氧化氮。

#### 9.1.2.2 事故工况

##### （1）人员误入或误留回旋加速器大厅

回旋加速器工作人员误留或非工作人员误闯到正在工作中的加速器机房。由于管理疏忽，在未察觉机房内有停留人员的情况下开机；或加速器联锁装置发生故障时，可能会发生人员停留在正在运行的加速器大厅内，造成人员不必要的照射。停留人员受到中子、 $\gamma$  射线的外照射。

##### （2）加速器冷却水泄漏

水冷系统是为设备发热部件冷却而设计的封闭循环系统，是加速器整体部件中的一部分，正常情况下冷却水不会外排亦不与外界接触。加速器冷却水系统故障或设备失修导致冷却水排出，冷却水中含有少量  $^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{11}\text{C}$  放射性核素，造成机房内表面污染和人员受照。本项目加速器机房设置地漏，连接到 1 号衰变池，当冷却水泄漏时，可将其导入到 1 号衰变池贮存。

二级冷却水为回旋加速器设备闭合循环，总水量大概 100L 左右。二级水

冷却系统主要用于从不同系统中将热量带出，带出的热量在一级冷却系统中进行热交换。因此此二级冷却水可能会造成少量放射性污染，必须通过专门放射性管道收集道衰变池。

一级水冷系统同样使用闭合循环，此部分水量预估为 1 立方米，但一级冷却水不进回旋机房，可不考虑一级冷却水放射性污染的影响，因此不用排入衰变池。

为防止水流入其他区域，加速器机房内拟设置地漏，利用机房内管沟充当集水沟保证水能及时排出。

### （3）靶破裂事故

在核素的制备过程中，加速器中会加入相应的靶材料。该靶在非常高的压力下（高于大气压 600psi）运行。由于靶比较坚固，在正常的操作下，靶窗很少破裂。但对靶体进行有害制冷或不进行靶窗氦气制冷时，靶窗有可能破裂。靶系统在过压条件下会发生破裂，使靶材料溅入或喷入靶屏蔽装置内侧而导致屏蔽装置内侧受到严重污染。

### （4）药物传递管道泄漏

药物传递管道泄漏，导致场所空气发生放射性污染：放射性药物传输管道泄漏，导致放射性核素，特别是 C-11 等气体外泄，并对工作区域空气造成放射性污染。回旋加速器制备 C-11 时，需密切关注固定剂量率的辐射水平，一旦辐射水平显著高于平时数值，有可能是 C-11 泄漏，需立即关闭回旋加速器系统，工作人员迅速撤离，并启动应急措施。

### （5）同位素洒落

操作放射性同位素时发生容器破碎，同位素泼洒等意外事件，有可能污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成周围环境的污染。泼洒的同位素挥发将产生少量放射性废气，污染洗消和清除将产生少量的放射性固体废物。

### （6）拟采取的风险防范措施

1) 本项目利用闭路监视系统，巡检系统防止人员滞留在回旋加速器机房内。利用门机联锁系统防止人员在设备运行时误入回旋加速器机房。

2) 将制定设备维修管理办法，明确设备发生故障后，请设备公司专业人员维修。工程师维护保养设备，在设备停机隔夜后进行，防止未经足够时间衰

变导致人员受到大剂量照射。

3) 若发生回旋加速器装置失灵、损坏、调试和操作失误及制备核素的过程中靶膜破裂,或核素传靶过程中的管子破裂,合成系统管道堵塞或泄漏等情况,加速器将立即自动停机,设备处于关闭状态,并且要经过 24 小时后,加速器才能重新启动或做维修处理。距离发生意外时,加速器机房内泄漏的微量的 F-18 已经过 13 个半衰期(保守以 37GBq F-18 考虑,经 24h 衰变后,残留量为 9.0MBq,此时,50cm 距离处的  $\gamma$  剂量率降为 5.15 $\mu$ Sv/h,人员可以接近并进行应急处理),泄漏的微量的 C-11 已经过 70 个半衰期,放射性活度衰减到豁免水平。若有必要,可继续停机一段时间,再进行换靶和去污。如发生传输管道脱落或破裂等导致放射性药物泄漏事故,应及时采取去污措施防止污染扩散,并对去污后的工作场所进行必要检测。

4) 冷却水泄露采取的措施:系统会自动检测水位,如发生泄露,系统就会自动报错停机。二级冷却水为去离子纯水,总水量约 100L,不会对衰变池造成溢出。水冷系统是为设备发热部件冷却而设计的封闭循环系统,是加速器整体部件中的一部分,且该系统在加速器机房内,冷却水不会外排亦不与外界接触。在正常工况下回旋加速器不会排泄放射性废水,仅当闭环水管冷却系统意外老化破损时有发生冷却水泄漏的可能。处置方法是:在回旋加速水冷机组下方预先设置地坑,地坑底部预埋排水管与放射性废液衰变池。通过这些预埋的下水管道设施,意外破损时泄漏的冷却水转移至收集池,最后排到衰变池里。

中子引起加速器冷却水活化,产生的感生放射性核素主要是  $^{11}\text{C}$ ,半衰期仅有 20.4min,其它活化产物含量很低。

5) 靶破裂事故措施:靶破裂会触发系统自动停机。报修后由厂家(通用电气医疗系统贸易发展(上海)有限公司)维保工作人员来完成,首先要确定制备的核素种类及轰击时间,以便判断辐射剂量和等待时间。待辐射剂量满足安全要求时,进入加速器室进行维修并佩戴个人剂量报警仪。具体需要收集和清除破碎的靶膜,更换靶膜,排查靶膜破裂的原因,恢复使用。如发生靶膜破裂时,此部分冷却系统为高纯氦气。氦冷却系统主要在轰击期间对真空腔真空膜和靶体靶膜之间进行冷却,两个箔膜之间的氦气流提供了所必须的冷却。在打靶过程中破裂会造成放射性气体泄漏。如果是液体靶,会有微量的高活度靶

水溢出（不超过 3ml）。靶水不会溢出到屏蔽体以外空间。即使溢出少量的放射性废气，加速器机房设计为负压，换气次数为不小于 4 次/小时。通过放射性排风管道排放到建筑物顶部，经过活性炭过滤后高空排放。

6) 气体靶放射性泄漏：药物传递管道为整根无接头独立传药管（PEEK 管或不锈钢管），直接从加速器靶出口通过预留的地下专用靶线屏蔽地沟连接至热室内，所以可能存在泄漏的地方就是药物传递管道与加速器靶出口或热室内的二端连接处。加速器在轰靶或放射性核素传输过程中，万一药物传递管道脱落而造成放射性泄漏时，应立即封闭现场，核素封存于热室内，并向单位辐射事故应急响应领导小组报告，领导小组根据事故的情况及时启动应急响应预案。现场工作人员立即采取以下应急措施：立即停止加速器运行或放射性核素传输活动；撤离现场工作人员，封闭事故现场；对现场进行辐射监测，确定辐射安全边界；设置警戒标识，禁止无关人员入内；待放射性核素衰变 1 天后，C-11 已经过 70 个半衰期，放射性活度衰减到豁免水平，由辐射防护人员对现场进行辐射监测，确认无辐射危险后，工作人员可在辐射防护人员的监督下开展检修工作。

加强回旋加速器相关设备的日常维护保养工作，定期检查或更换易损部件，杜绝此类事故的再次发生。

7) 定期维护冷却系统。本项目配置回旋加速器具有冷却水流量检测系统，一旦冷却失效，系统会自动停止运行，故发生靶破裂事故的可能性很低。

## 表 10 辐射安全与防护

### 10.1 工作场所项目辐射安全与防护

#### 10.1.1 选址与布局

本项目回旋加速器及正电子同位素制备区位于综合实验楼（地上 6 层，地下 1 层）地下一层北侧，回旋加速器控制室与正电子同位素制备区拟设有独立的出入口，相对独立布局，便于辐射安全与防护管理，符合同位素实验室选址设在建筑物一端或底层的总体要求。工作人员的出入口都拟设有门禁。

地下一层北侧北部为回旋加速器区，该区域包括 11MeV 和 20MeV 两间回旋加速器室、回旋加速器控制室、设备间、气瓶间、空压站等。两间回旋加速器室相邻设置，东侧为固体靶核素制备操作室和固体制靶间，南侧为走道，西侧为土层和消防楼梯，北侧为控制室，楼上为绿化区，无地下室。

正电子同位素（含固体靶核素）制备区设在回旋加速器的东侧和南侧，该区域有 6 条同位素制备和实验区（固体靶核素制备区，正电子核素制备区， $\alpha$  核素制备区， $\beta$  核素制备区，中试研发实验区，实验热室操作区），其中 5 个为净化实验区（GMP），1 个常规实验室，每条同位制备区具体包括操作室、后室、一更、二更、检测间、缓冲间、包装间、放射废物暂存间等。楼上为绿化区，无地下室。

固体靶核素制备区东侧为走廊、空调机房；南侧为走道、之外为  $\alpha$  核素制备区、 $\beta$  核素制备区、中试研发实验区、实验热室操作区、净化区空调机房等；西侧为回旋加速器机房、土层和消防楼梯；北侧为空调机房、原辅料暂存间、走廊、下层庭院；楼上为绿化区，无地下室。正电子核素制备区东侧为  $\alpha$  核素制备区、 $\beta$  核素制备区、中试研发实验区、实验热室操作区、净化区空调机房、走廊、空调机房；南侧为走道、暂存间、动物实验区等，西侧为走廊、土层，北侧为走廊、回旋加速器机房等，楼上为绿化区，无地下室。本项目回旋加速器及正电子核（含固体靶核素）制备区相关场所位于综合实验楼（地下 1 层，地面 6 层）地下一层北侧，楼外除了西侧部分区域为多模态跨尺度生物医学成像设施项目样品制备和模式动物中心（1 号楼局部区域），其他都是地面停车位、道路、绿化区及停车位等。



## 10.1.2 工作场所分区

### (1) 分区原则

为便于辐射防护管理和职业照射控制，依据 GB18871-2002 将辐射工作场所分为控制区和监督区进行管理，平面布局及辐射分区（控制区、监督区）见图 10.1-2 所示。分区原则如下：

**控制区：**将需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定位控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。对于控制区，在进出口及其它适当位置处设立醒目的规定的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平的指示；入口处提供防护衣具、监测设备和个人衣物贮存柜；出口处提供皮肤和工作服的污染监测仪、被携出物品的污染监测设备、冲洗或淋浴设施以及被污染防护衣具的贮存柜；定期审查控制区的实际状况。

**监督区：**通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。

对于监督区，在入口处的适当地点设立表明监督区的标牌；定期审查该区的条件，以确定是否需要采取防护措施和做出安全规定，或是否需要更改监督区的边界。

实验室地板采用易去污材料敷设，地板与墙壁接缝无缝隙。实验室台面应采用防腐蚀、防渗透、易擦洗、耐酸碱材料做成。放射性废物暂存间地面应敷设具有防渗透功能材料，易清洗耐腐蚀，万一发生泄露便于彻底清除表面污染。放射性废水衰变池的池底和池壁应坚固，防止泄露和渗透，污染土壤和地下水。

### (2) 回旋加速器室场所分区

**控制区：**包括两间回旋加速器室，其运行过程中不允许任何人进入。

**监督区：**控制室、设备间、气瓶间、空压站，无关人员不允许进入。

### (3) 正电子同位素制备区分区

**控制区：**包括操作室、后室、洁净走廊、二更、检测间、去污间、包装间、缓冲间、走廊、放射废物暂存间，制备过程中仅允许辐射工作人员进入。

**监督区：**一更、总更及监督区走道等区域划为监督区，在进行同位素药物

制备、分装的过程中，仅允许辐射工作人员进入。

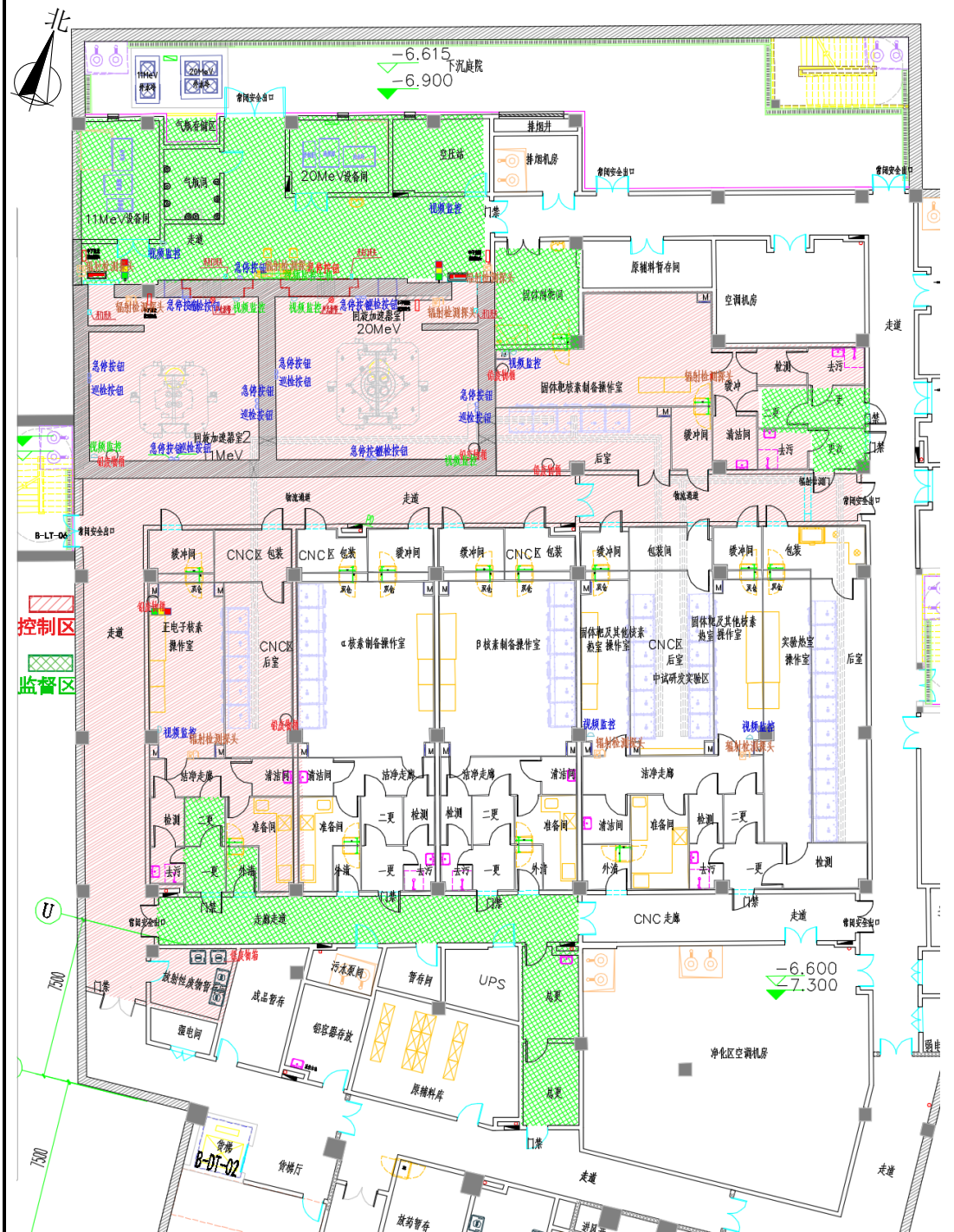


图 10.1-2 回旋加速器室及制备区分区图

## 10.2 回旋加速器室和正电子同位素制备区辐射屏蔽设计

### 10.2.1 回旋加速器室屏蔽方案

回旋加速器室六面墙体拟采用砣（现浇混凝土）屏蔽，防护门采用铅防护门。机房采取的屏蔽措施如表 10.2-1 所示。回旋加速器室平剖面图见图 10.2-

1 和图 10.2-2。回旋加速器室内配备铅屏蔽容器，用于存储放射性固体废物（如靶窗等），屏蔽材料厚度为 5cm 的铅。

表 10.2-1 回旋加速器室屏蔽方案及毗邻环境功能

序号	机房名称	尺寸	屏蔽墙体方向	屏蔽设计	周围环境
1	回旋加速器室 1	9.6×7.6×4.7m (含门口区域)	东	80cm 砼	固体靶处理间
			南	80cm 砼	走道
			西	80cm 砼	回旋加速器室 2
			北	80cm 砼	控制室
			迷路	60cm 砼 (210cm 长)	/
			顶板	70cm 砼+105cm 土层	室外空地
			地面	160cm 砼	土层
			防护门	250mmPE+16mmPb	走道
2	回旋加速器室 2	7.9×7.6× 4.7m (含门口区域)	东	80cm 砼	回旋加速器室 1
			南	80cm 砼	走道
			西	70cm 砼+土层	土层
			北	80cm 砼/60cm 砼	控制室
			迷路	30cm 砼 (210cm 长)	/
			顶板	70cm 砼+105cm 土层	室外空地
			地面	160cm 砼	土层
			防护门	250mmPE+16mmPb	走道

注：铅密度不低于 11.34g/cm<sup>3</sup>；砼(混凝土)密度不低于 2.35g/cm<sup>3</sup>；土密度不低于 1.9g/cm<sup>3</sup>。



墙体连接处设置有效搭接，以免出现防护薄弱环节。通风（排风、进风）管道穿过屏蔽体时将采用直穿过门上方墙体。

### 10.2.2 正电子同位素制备区屏蔽方案

正电子同位素制备区位于地下一层北侧中部。楼板至少采用不低于 25cm 砼（现浇混凝土）屏蔽，实验区相关房间四周采用 2mmpb 硫酸钡涂料+1mmpb 硫酸钡板（铅当量为 3mmPb），防护门为 3mmPb，地下一层层高 6.6m。

场所根据辐射防护要求，配备了铅防护门、铅玻璃，专用热室，放射性废水衰变池和废物间等。此外，还配备有防辐射铅制废物桶，药品盛装铅罐等防护器具等，以及工作服、拖鞋等工作人员防护用品。各热室设备间热室的屏蔽措施见表 10.2-2 所示，各房间采取的屏蔽措施如表 10.2-3 所示。

表 10.2-2 正电子同位素制备区热室屏蔽设计使用情况

序号	热室名称	热室数量	热室厚度	操作核素	安装位置
1	固体靶核素合成热室（单腔）	1	正面 70mmpb,侧面（后、左、右、上、下）60mmpb	Cu-64、Ga-68	固体靶核素制备操作室（从左到右）
2	固体靶热室（双腔）	1	正面 100mmpb,侧面（后、左、右、上、下）80mmpb	I-124、Sc-44、Zr-89	
3	固体靶热室（双腔）	1	正面 70mmpb,侧面（后、左、右、上、下）60mmpb	Cu-64、Ga-68	
4	分装热室	1	正面 60mmpb,侧面（后、左、右、上、下）50mmpb	Cu-64、Zr-89、Ga-68、I-124、Sc-44	
5	固体靶热室（双腔）	1	正面 70mmpb,侧面（后、左、右、上、下）60mmpb	Ga-68	
6	合成热室（双腔）	1	正面 70mmpb,侧面（后、左、右、上、下）60mmpb	F-18	正电子核素制备操作室（从上到下）
7	高当量合成热室（单腔）	1	正面 100mmpb,侧面（后、左、右、上、下）80mmpb	F-18	
8	合成热室（单腔）	1	正面 70mmpb,侧面（后、左、右、上、下）60mmpb	F-18	
9	分装热室	1	正面 60mmpb,侧面（后、左、右、上、下）50mmpb	F-18、N-13、C-11	
10	合成热室（单腔）	1	正面 70mmpb,侧面（后、左、右、上、下）60mmpb	C-11	

注：铅密度不低于 11.34g/cm<sup>3</sup>。

表 10.2-3 正电子同位素制备区主要场所的屏蔽设计

机房名称	屏蔽墙体方向	屏蔽设计	周围环境
------	--------	------	------

固体靶核素制备操作室	东	20cm 混凝土加气砖+3cm 硫酸钡涂料+1.4cm 硫酸钡板	空调机房
		3mmPb	缓冲、清洁间
	南	20cm 混凝土加气砖+3cm 硫酸钡涂料+1.4cm 硫酸钡板	走廊
	西	80cm 砼	回旋加速器室 1
	北	20cm 混凝土加气砖+3cm 硫酸钡涂料+1.4cm 硫酸钡板	固体制靶间、原辅料暂存间
	顶板	25cm 砼+150cm 土层	绿化区
	地面	/	土层
	防护门（东侧、南侧）	3mmPb	缓冲、走廊
正电子核素制备操作室	东	20cm 混凝土加气砖	$\alpha$ 核素制备操作室
	南	3mmPb	洁净走廊
	西	20cm 混凝土加气砖+3cm 硫酸钡涂料+1.4cm 硫酸钡板	热室后室
	北	3mmPb	缓冲间、包装间
	顶板	30cm 砼+145cm 土层	绿化区
	地面	/	土层
	防护门（南侧、北侧）	3mmPb	洁净走廊、包装间

备注：砼（混凝土）密度不低于  $2.35 \text{ g/cm}^3$ ，硫酸钡涂料和硫酸钡板密度不低于  $3.2 \text{ g/cm}^3$ （20cm 混凝土加气砖+3cm 硫酸钡涂料+1.4cm 硫酸钡板等效 11.1cm 砼），土密度不低于  $1.9 \text{ g/cm}^3$ （145cm 土层等效 117cm 砼）。

### 10.3 辐射安全与防护措施

#### 10.3.1 回旋加速器室辐射安全与防护措施

（1）回旋加速器室采用实体屏蔽措施，保证回旋加速器机房边界外 30cm 处辐射剂量率不大于  $2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

（2）在回旋加速器机房出入口处设置电离辐射警告标志和中文警示说明；在回旋加速器机房出入口门外安装回旋加速器工作状态指示灯（红、黄、绿、蓝），回旋加速器出束时，红灯亮起；当射频系统工作时，黄灯亮；从任何靶体转换是激活状态，蓝灯闪烁；主磁体供应电源就绪时，绿灯亮起。回旋加速器机房内拟设置出束声光报警警示灯，当回旋加速器出束时，警示灯亮。

（3）工作场所按照控制区和监督区实行分区管理。本项目两间回旋加速

器室为控制区，控制室、设备间、气瓶间、空压站、走廊等区域划为监督区。

(4) 开关门装置：在回旋加速器控制室墙上安装开关门按钮，在门内侧附近墙上安装紧急开门按钮，当人员被关在机房内紧急情况下按下开关，可实现防护门从内部打开，同时加速器停止出束。

(5) 急停按钮：两间回旋加速器机房东、南、西、北面墙体各设置急停按钮 1 个、控制台上设置 1 个急停按钮，并有明显的标志中文说明此外，按下任一急停按钮，可立即终止加速器运行，按下急停按钮后需人工复位加速器才能重新启动。

(6) 清场按钮：在每间回旋加速器机房内东、南、西、北面墙体各拟设清场巡检按钮 1 个，并有明显的标志，每间机房防护门打开之后需分别按下各自机房内北墙和南墙上清场巡检按钮，否则视为巡检失败，无法进行出束。每打开一次防护门都要进行一次巡检，以确认机房内没有人员停留。

(7) 监视系统：在每间回旋加速器机房内对角各安装 1 个摄像头（每间拟安装 2 个），便于工作人员实时监控机房内状况。

(8) 开机控制：回旋加速器的启动由钥匙控制或由授权人员从用户界面上完成（登录名和密码保护），而且需要在各项联锁系统就绪，且钥匙开关拨至闭合位置，加速器才能出束。

(9) 门机联锁：在每间回旋加速器机房防护门与加速器的高压联锁，当防护门未关闭到位时，回旋加速器无法开启高压出束；当回旋加速器工作过程中误操作打开防护门时，回旋加速器立即停止出束。

(10) 监测仪器：在两间回旋加速器机房拟配备 1 套固定式  $\gamma$  辐射剂量率报警仪（拟在回旋加速器机房内北墙上、门口墙上和控制台上位置设剂量率探头共 5 个探头）；两间回旋加速器机房内拟各配备 1 台固定式中子剂量率报警仪；每间回旋加速器机房配备 2 台个人剂量报警仪；新配备 1 台中子剂量当量监测仪和 1 台便携式辐射剂量监测仪。

(11) 排风系统：两间回旋加速器机房共用 1 套独立排风系统，加速器室回旋加速器机房设计通风量为  $6000\text{m}^3/\text{h}$ ，每小时通风换气次数不低于 9 次，以保证空气及时更新，停止出束后至少再排风 30min 以上。排风系统排放的废气由专用排风管道引至建筑物顶部，经中效过滤器+活性炭吸附过滤+高

效过滤器装置过滤后排放。

(12) 每间回旋加速器机房设置 1 个铅废物桶 (5cmPb)，用来收集更换下来活化部件或靶材料。

(13) 回旋加速器机房内设置二级冷却水 (冷却水泄漏，约 100L) 收集地漏，排水汇入放射性废水 1 号衰变池。

(14) 从事回旋加速器操作人员通过辐射安全与防护考核，持证上岗。

(15) 回旋加速器委托设备制备厂家进行定期维护和故障维修。在维护和维修时不可擅自解除安全联锁系统。

(16) 管沟以及管道屏蔽：加速器机房与热室之间放射性核素输送管沟的上方加盖 6cm 厚铅砖，采用 U 形穿墙管沟，避免漏束情况的发生。

(17) 排风管线：本项目回旋加速器机房内进风口和排风口按照“对角布置、上进下排”的原则设置：排风通风管和送风管采用直穿方式从防护门上方进入机房内 (在机房外风管外围拟用 5mmPb 屏蔽，长度约 50cm)，送风口设置在机房屋顶 (回旋加速器室 1 西北角、回旋加速器室 2 东北角)，排风口设在机房的一角 (回旋加速器室 1 东南角和东北角、回旋加速器室 2 西南角和西北角)。

(18) 门禁：进入控制室出入口处设置门禁装置，仅该区域人员可以授权，防止无关人员进入。

(19) 安装有火灾报警器，配备有灭火器材，设有应急通道。

(20) 本项目所用回旋加速器的固有安全性

1) 本项目回旋加速器设有独立的靶体和束流引出系统，液体靶和气体靶可一次性换靶多次使用，减少职业人员的进入回旋加速器机房的换靶次数，进而可以减少受照剂量。

2) 回旋加速器使用质子加速技术，水平加速和非聚集靶及其快速连接系统，可使操作和维护人员受到的辐射剂量降到最低。

3) 回旋加速器自带冷却水系统、磁铁系统、射频系统、离子源系统、真空系统、靶系统等安全联锁，其中任何一个联锁出现问题，机器将不能开机或自动停止运行。

4) 回旋加速器的操作系统自带靶的密封性自动检测系统，能够及时发



分区的标识。在工作人员出入口拟安装门禁系统，防止无关人员进入控制区。在进行同位素药物制备、分装的过程中，仅允许辐射工作人员进入。控制区出入口、操作区出入口等门上张贴电离辐射警示标识，警示无关人员不要进入。

(2) 放射性表面污染控制措施：各热室操作室、后室、放射废物暂存间和控制区走廊地面用无缝隙、防渗，且容易清洗和去污的材料覆盖(如地胶等)。热室和工作台面选用表面光洁、耐腐蚀、防渗漏、易去污的材料。工作人员进入辐射工作区，穿工作服，涉及放射性药物的操作佩戴乳胶手套。在固体靶核制备区和正电子核制备区的检测室内将各放置 1 台表面污染监测仪器，供工作人员离开药物制备工作场所前进行放射性表面污染监测。在去污间配备去污用品和洗消试剂，一旦发现放射性污染及时去污。拟为工作人员配备工作服、帽子、一次性口罩、一次性手套、一次性鞋套等防护用品。

(3) 外照射防护：至少配备 12 个 10mmPb 铅废物桶/箱（固体靶核素制备操作室和正电子核素操作室各 4 个废物桶，废物暂存间 4 个铅废物箱）、至少 8 个储源铅罐（42mmPb）。实验区根据实际用量情况来设置控制区场所外围墙体，采用实体屏蔽措施，顶棚为混凝土浇筑，进、出通道门安装门禁系统。保证控制区边界外的辐射剂量率不大于 2.5 $\mu$ Sv/h。

(4) 内照射的防护：固体靶核素制备操作室和正电子核素操作室均配备热室，每个热室操作的同位素情况见表 10.2-2。每个热室内都带有高效滤器，设备正面配有铅玻璃观察窗及操作工作孔。在手套箱内分装放射性分子探针。手套箱和通风橱设置专用排风管道，排风口引至综合实验楼楼顶。手套箱和通风橱为负压设备，风量满足要求（风速大于 0.5m/s），过滤效率大于 90%。一旦发生放射性污染，应收集污染物，先采用吸水纸擦除方法处理，监测表面污染状况，采取措施确保表面污染水平低于控制限值，并将擦拭物作为放射性固废处置。此外，实验室控制区区域设置 8 套排风管道（楼顶设 6 个排风口），排风同样由专用排风管道引至建筑物顶部，经中效过滤器+活性炭吸附过滤+高效过滤器装置过滤后排放。

(5) 妥善收集固体放射性废物：每个后室和前室均配备 2 个含铅的废物桶（10mmPb）用于储存场所产生的放射性废物，每周星期一早上转移至放射废物暂存间的铅废物箱内暂存，至少再衰变一个月后，转到放射废物暂存间 2

设置普通废物桶用来贮存废物。放射性固废依照相关要求了解控处置，并详细记录放射性固体废物暂存、处置管理台账，清晰记录放射性废物的暂存、检测、解控、排放等信息。

(6) 放射性废水收集处置设施：正电子同位素制备区的控制区内产生的放射性废水通过专用管道一并进入放射性废水 1 号衰变池（设有轮流使用的 2 个沉淀池）。衰变池采用槽式设计，衰变池总容积不低于  $169.34\text{m}^3$  ( $56.45\text{m}^3 \times 3$  个)。实验区解控排放的废水，排入园区污水处理站，并详细记录“放射性废水暂存、处置管理台账”，清晰记录放射性废水的暂存、检测、解控、排放等信息。

(7) 实验室内转运过程的防护措施：回旋制备的 PET 用正电子核素是由气动方式通过专用的特氟龙等管，经过预留的靶线地沟传输到合成热室内，从回旋加速器室到热室的靶线地沟屏蔽全程覆盖铅砖，防护当量  $6\text{cmPb}$ ，铅砖上面覆盖  $5\text{mm}$  的铁板。正电子同位素制备区在分装热室分装好后同位素，严格遵守操作规程，放入  $42\text{mmPb}$  的储源铅罐内，然后转移至平台其他实验区，并进行随后的实验操作。

#### (8) 辐射安保措施

① 正电子制备区内安保措施：本项目在正电子制备区内（含前区和后区）及周边设置视频监控系统，视频监控系统可对实验室出入口、同位素交接地点等重要场所进行监控，防止外来人员非法进入，确保放射性同位素处于安全位置。

② 正电子制备区进出的安保措施：本项目在放射性工作场所总出入口处设置视频监视系统和门禁系统，只有授权人员才能进入场所，并对进入实验室的授权人员进行统计和管理。门外张贴电离辐射警示标识，警示无关人员不要进入或者不要长久停留。实验室进出口处设置有专门的更衣间，在检测间设置有表面沾污监测设备，防止放射性污染物向外扩散。

#### (9) 配备必要的辐射监测仪器和个人防护用品

① 常规防护用品：为辐射工作人员配备工作服、帽子、工作鞋、手套、口罩、个人剂量计等，涉及放射性物质的操作都应佩戴乳胶手套。不可裸手直接进行非密封放射性物质操作和去除放射性污染的操作。

②便携式监测仪：固体靶核素制备区和正电子核制备区拟分别配置 1 台表面污染监测仪和 1 台便携式辐射剂量监测仪，用于表面污染和剂量率水平的检测。工作人员进入辐射控制区，穿工作服，涉及放射性的操作佩戴乳胶手套，工作结束后，离开控制区前进行体表和相关场所的表面污染监测。

③固定式监测仪：拟为固体靶核素制备操作室和正电子核素操作室设置 1 个探头的固定式辐射监测报警仪（与回旋共用 1 套），探头设在热室对面墙，实时进行剂量率水平连续监测，报警阈值设置为  $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

定期开展工作场所和环境辐射监测。每月自行对辐射工作场所卫生通过间、工作人员操作位、走廊等工作人员可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的区域进行常规的  $\gamma$  剂量率。每天工作结束后，对实验室台面、地面，手套箱台面，注射窗台面等进行表面污染监测，监测数据记录存档  $\beta$  表面污染监测。每年委托有能力的检测单位对辐射场所的剂量率水平和表面污染水平监测。

（10）辐射安全规章制度。制定辐射安全规章制度，要求工作人员严格遵守规章制度。配备必要的辐射监测仪器，按规定进行辐射工作场所监测、个人剂量监测和环境监测。备孕女员工或孕期女员工严禁进入同位素区。平台管理员应关注每一位员工的个人剂量检测结果，出现异常后应及时查找原因；如超出剂量管理约束值，应及时向北京市生态环境局汇报。

（11）人员管理。所有操作人员需经生态环境部辐射安全与防护培训平台进行培训并经考核合格后才能进行实操培训学习，重点掌握每一个操作流程的辐射安全与防护措施，尽可能减少外照射危害。操作熟练后方可进行同位素操作，操作过程尽可能在较短的时间内完成。全部辐射工作人员通过辐射安全与防护考核合格后持证上岗，所有人员拟开展个人剂量监测。

（12）制定辐射事故应急预案。严格要求工作人员按操作规程进行操作，一旦发现放射性污染，组织相关人员应立即收集污染物，采用擦洗方法处理，监测表面污染状况，采取措施确保表面污染水平低于控制限值，并将擦拭物作为放射性固废处置。

（13）安装有火灾报警器，配备有灭火器材，设有应急通道。

### 10.3.3 工作场所安全与防护设施

参照国家生态环境部（国家核安全局）2020 发布的《自屏蔽式加速器生产放射性药物场所监督检查技术程序》（NNSAHQ3-08-JD-IP-009），本项目回旋加速器及正电子制备区的安全与防护设施设计要求见表 10.3-1~表 10.3-2。

**表 10.3-1 回旋加速器机房防护与安全设施**

序号	检查项目		是否拟设置	备注
1*	A 场所设施	加速器工作室为控制区	√	回旋加速器室拟设为控制区
2*		入口电离辐射警示标志	√	防护门外张贴
3*		入口加速器运行状态显示	√	设置 4 色工作状态指示灯
4*		视频监控系统	√	加速器机房设置视频监控
5		语音广播系统	/	未设置
6*		控制区有工作警报装置和警示标志	√	每间机房内拟 1 个设出束声光报警
7*	B 安全联锁	机柜或操作台有防止非工作人员操作的锁定开关	√	机柜或操作台有防止非工作人员专用钥匙
8*		门与加速器高压触发联锁	√	门机联锁系统
9*		控制台有紧急停机按钮	√	急停按钮 1 个
10*		加速器室内设置紧急停机按钮或紧急开门按钮	√	加速器室内急停按钮 4 处，开门按钮 1 处
11		火灾报警仪与加速器联锁	√	火灾报警仪与加速器联锁
12		热室门与加速器药物传输系统联锁	√	热室门与药物传输系统联锁
13*	C 监测	加速器室内有固定式 $\gamma$ 辐射剂量监测仪	√	设置多探头固定式剂量率报警仪
14*	D 感生放射性	强活化部件表面或适当位置标有电离辐射警告标志	√	储存靶部件的废物桶上粘贴电离辐射警告标志
15*		更换下来的活化部件有专设的存放地	√	配置废物桶，贮存更换下来活化部件
16*	E 其他	控制区通风系统	√	设置 1 套通风系统
17		停机后，控制区通风	√	停机后机房通风 30min
18		灭火器材	√	气体灭火器

注：加\*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

表 10.3-2 同位素制备场所辐射防护与安全

序号	检查项目	是否拟设置	备注
1*	场所分区布局是否合理及有无相应措施/标识	√	分为控制区和监督区，地面设有文字标注
2*	入口处电离辐射警示标志	√	场所入口、热室设备间门口粘贴电离辐射警示标志
3*	卫生通过间	√	设一更、二更、检测间
4*	人员出口配备表面污染监测仪	√	检测间设置表面污染监测仪
5*	单独的放射性通风设施	√	热室设置有独立通风系统
6*	设置有高效过滤器的工作箱	√	每个操作室拟配备 5 个热室，均设有高效过滤器的工作箱
7*	易去污的工作台面和防污染覆盖材料	√	台面采用不锈钢
8*	放射性液体容器不易破裂或有防止破裂的包装	√	采用塑料瓶收集
9*	放射性下水系统或暂存设施	√	设置放射性废水暂存池。制备场所设置专用下水管线和地漏
10	放射性下水系统标识	√	特殊下水和地漏粘贴警示文字
11*	放射性同位素暂存设施	√	在分装热室内暂存合成后的放射性同位素
12*	放射性固体废物暂存设施	√	前室和后室配备废物桶，衰变一个月后转至放射性废物暂存间
13	安保设施	√	热室设备间墙上设监控
14	B 防护用品	√	配备一次性医用口罩和手套
15*	C 应急物资	√	配备洗涤灵等去污用品
16	灭火器材	√	气体灭火器

注：加\*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

#### 10.3.4 实验室拟配的防护设施

实施后回旋加速器及正电子同位素制备区拟配备的防护设施见表 10.3-3。

**表 10.3-3 回旋加速器及正电子同位素制备区拟配防护设施情况**

名称	数量 (个)	规格	使用场所
手套箱（热室）	5	60~100mmPb	固体靶核素制备操作室
	5	60~100mmPb	正电子核素制备操作室
铅罐	8	42mmPb	固体靶核素制备操作室、正电子核素制备操作室
铅盒	2	20mmPb	标记间
放射性废物桶	4	10mmPb	固体靶核素制备操作室
	4	10mmPb	正电子核素制备操作室
放射性铅废物箱	4	10mmPb	放射性废物暂存间

#### 10.4 放射性三废的治理

##### 10.4.1 放射性废气

###### (1) 同位素实验室排风系统

分子探针平台排风同位素实验室共分为 8 套排风系统，各排风机出口处都设置活性炭过滤装置。具体如下：

①回旋加速器室设 1 套独立排风管道（P-7-WD04），为回旋设备预留排风，废气分别通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，分别经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（14kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

②回旋加速器室两台回旋设备设 1 套独立排风管道（P-7-WD04'），废气分别通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，分别经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（12kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

③固体靶制备操作室热室设 1 套独立排风管道（P-7-WD10'），废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（14kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

④固体靶制备操作室工作场所设 1 套独立排风管道（P-7-WD10），废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（16kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

⑤正电子核素制备操作室热室设 1 套独立排风管道（P-7-WD7'），废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（12kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

⑥正电子核素制备操作室工作场所设 1 套独立排风管道（P-7-WD5），废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（16kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

⑦放射性废物暂存间等场所设 1 套独立排风管道（P-7-WD08），废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（16kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

⑧控制区走廊设 1 套独立排风管道（P-7-WD9），废气通过 1 条独立管道引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤（14kg）+高效过滤器装置过滤后，与其他区域排风合并高空排放。

本项目控制区的排风图见图 10.4-1，楼顶排风口位置图见图 10.4-2（楼顶 6 个排风口）。

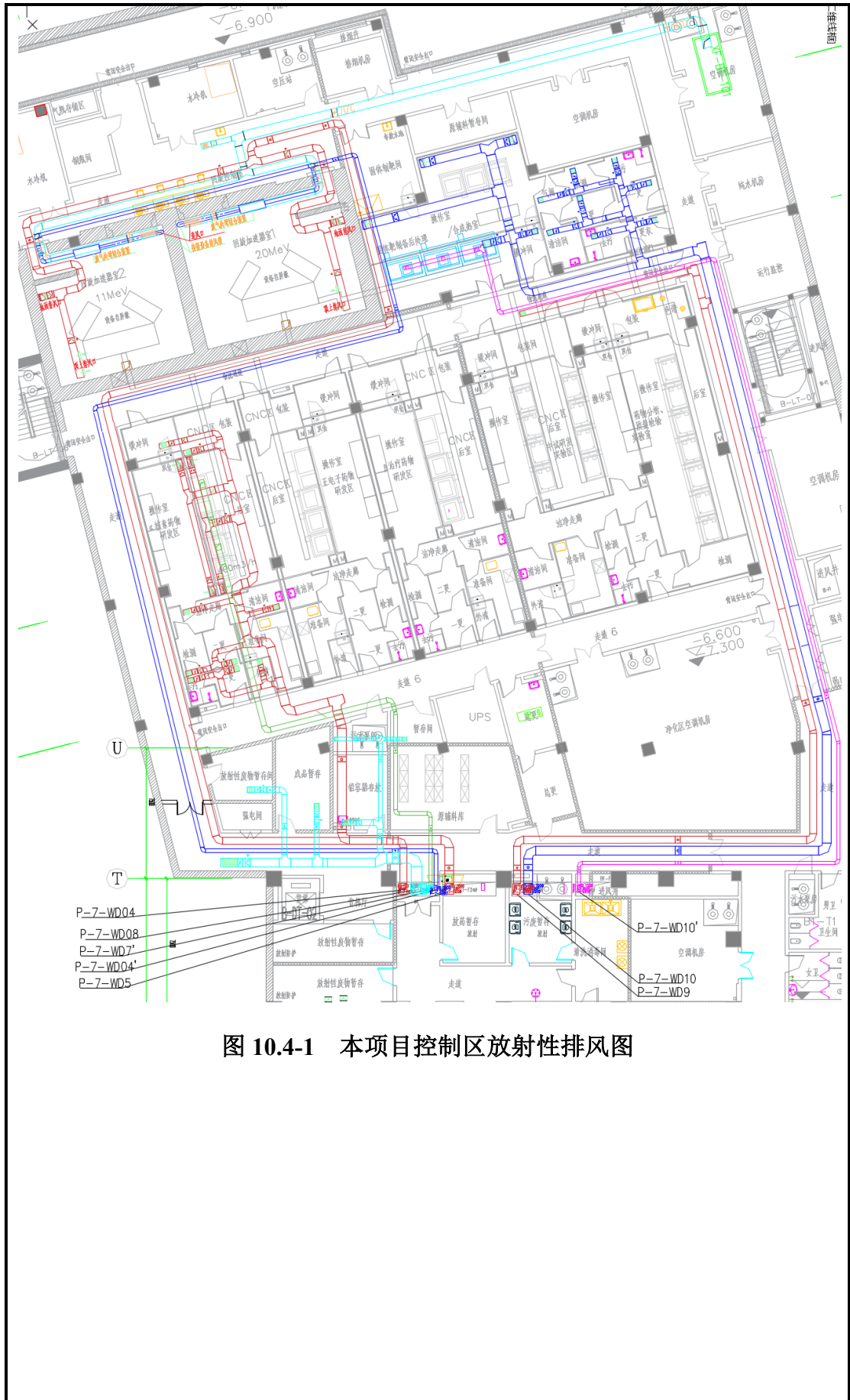


图 10.4-1 本项目控制区放射性排风图

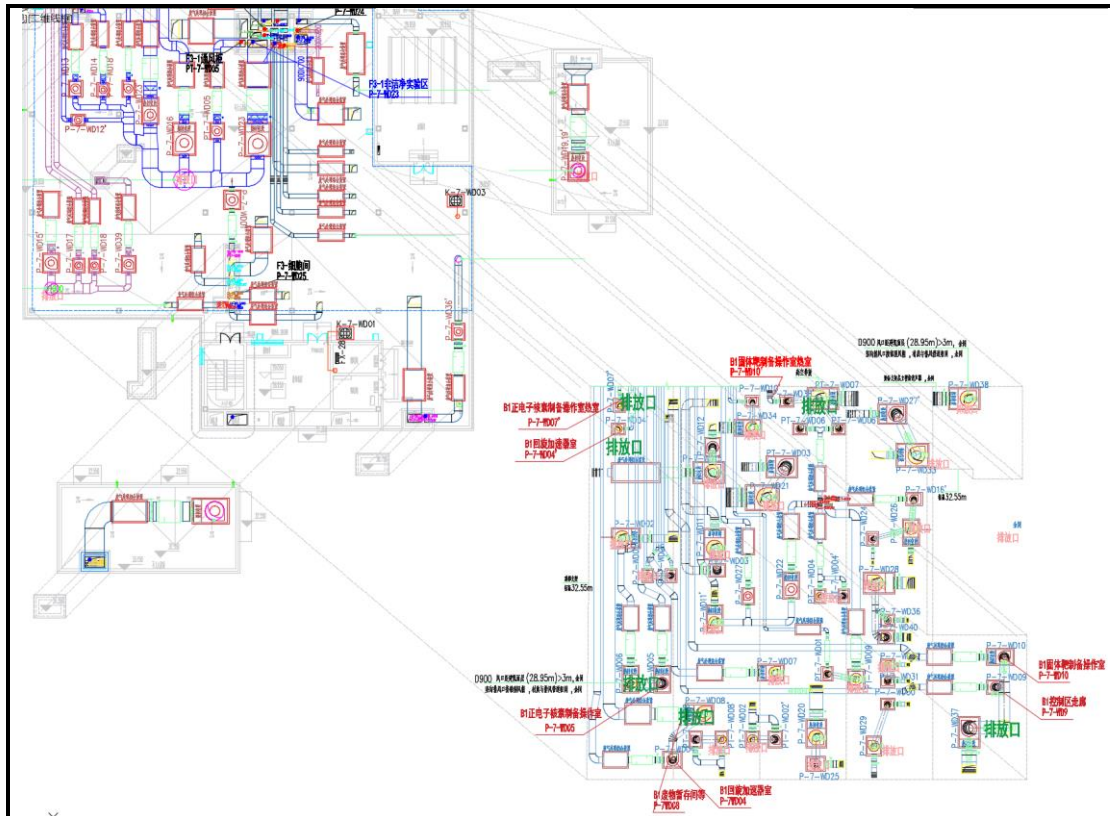


图 10.4-2 楼顶放射性排风排放口位置图

## (2) 放射性废气

在同位素合成和分装的过程中，可能会产生少量的放射性气体。本项目使用放射性核素除 F-18 为挥发性核素外，其余核素均为非挥发性核素，故只可考虑 F-18 的影响。

各手套箱相对房间负压（-50Pa 以上），涉及放射性同位素的标记操作均在手套箱内进行。手套箱均自带高效过滤器，排风先经高效过滤器过滤一次进入排风系统，废气通过独立管道引至综合实验楼楼顶，再经过中效过滤器+活性炭吸附过滤+高效过滤器装置过滤后排放。本项目场所功能区还配置了 8 套排风系统，分别引至综合实验楼楼顶，经过中效过滤器+活性炭吸附过滤+高效过滤器装置过滤后排放。放废气排放口位于所在建筑物楼顶，排口高度约 32m，高于周围 50m 范围的建筑物。

气体过滤装置为可更换式，计划每年更换一次，如果排风压差异异常或者失效，也将及时更换。

## 10.4.2 放射性废水

### (1) 放射性废水暂存和排放

分子探针平台拟设有 3 套放射性废水池，位于楼外东侧地下（衰变池上方至少还有 0.6m 土层，最高水位距地面至少 2.5m），衰变池平剖面图见图 10-5，1 号衰变池（槽式，3 池总容积约为  $169.34\text{m}^3$ ， $56.45\text{m}^3 \times 3$ ），2 号衰变池（槽式，3 池总容积约为  $169.34\text{m}^3$ ， $56.45\text{m}^3 \times 3$  个），3 号衰变池（槽式，3 池总容积约为  $163.3\text{m}^3$ ， $54.43\text{m}^3 \times 3$ ）。本项目实验室和一层质控区产生的放射性废水统一排到 1 号衰变池。

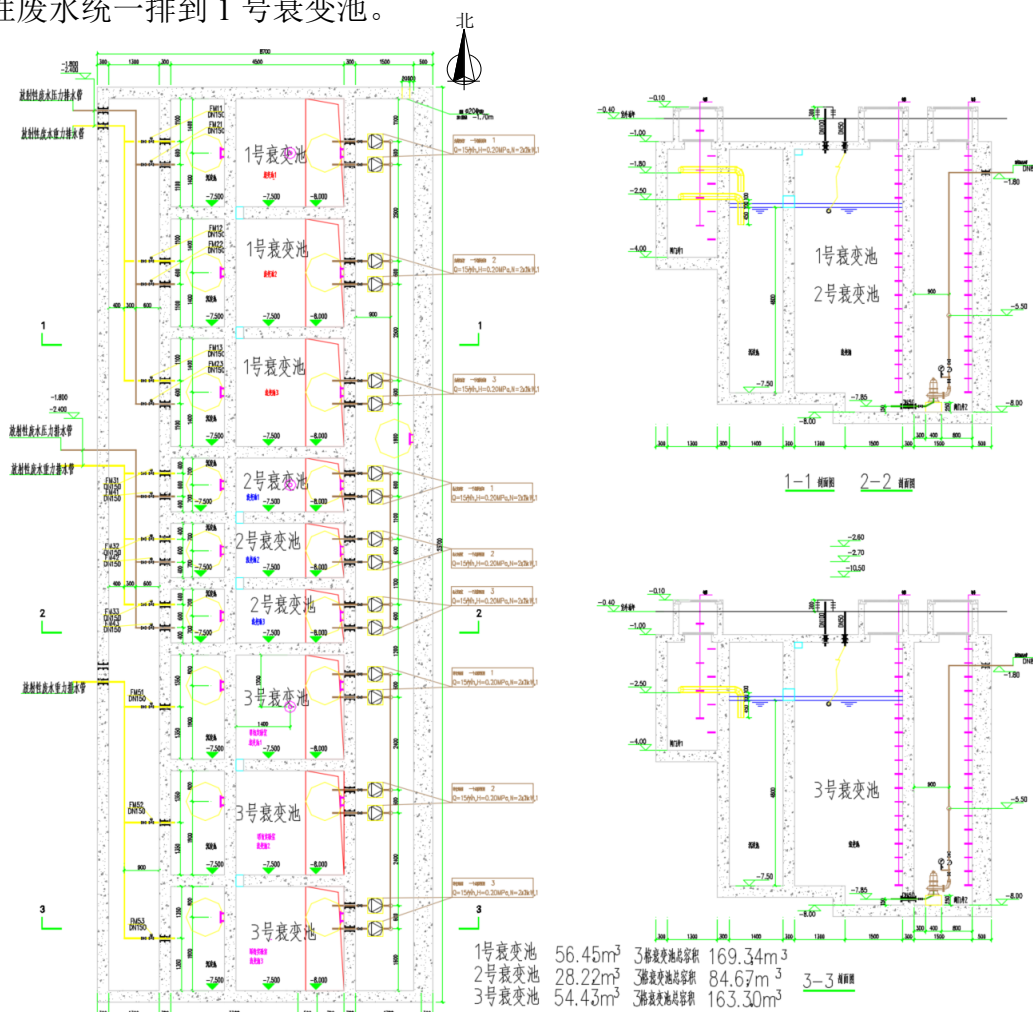


图 10.4-3 衰变池平剖面图

本项目同位素实验室产生的放射性废水排放情况如下：

清洁废水、洗涤废水、应急淋浴水等，这些放射性废水经独立的排水管道从地面下排入 1 号衰变池，衰变池的废水排出前，至少经 180 天衰变并检测合格后经园区污水管网，排至市政污水处理厂，1 号衰变池收集排放系统示意图见图 10.4-4。

放射性同位素实验室的废水路由图见图 10.4-5。



## 2) 衰变池控制和管理

设计液位指示装置，自动进、排水阀门。智能控制系统、人性化操作管理、通过PLC 和触摸屏设定工作参数和状态提醒机制。

衰变池独立工作，为防止“液位控制装置失灵导致衰变池盛满后不能自动切换”情况发生，在衰变池之间设溢流孔。溢流孔设置在“液位上限”上方 20cm 处。如果衰变池液位控制系统故障，电动阀不能自动切换，废液可以自行溢流到另外一个衰变池内（后续轮流使用的衰变池），避免放射性废液倒灌至核医学科场所，发生放射性污染。

所有运行状态自行监控，可在无人值守状态下实现全自动稳定运行。废水衰变系统整体采用“储存式衰变”方式，各衰变池循环运作。内置设备泵体采用切割式潜水泵，可将固体杂质粉碎成颗粒排除，阀门采用电/手动双控制球阀，为后续设备维护检修提供保障。

放射性区域废水流入衰变区域，衰变池进水管设电动阀，出水采用潜水泵压力排出。运行时先开启 1 池进水管电动阀，关闭 2-3 池进水管电动阀，待 1 池水位达到设计液位后，关闭 1 池进水管电动阀，打开 2 池进水管电动阀，使排水进入 2 池。按照相同的操作方式。使排水依次进入 3 池。待第 3 池开始进水时，第 1 池已过 10 个半衰变期（衰变池的废水至少暂存 180 天的要求），检测达标后开动潜水泵排放。待第 3 池水位达到设计液位后，重复向 1 池进水（此时为排空状态）完成进水一个循环。

池壁和池底采取防渗措施。施工单位要进行严格的渗漏检测，确保放射性废水在暂存期间不发生渗漏，防止污染地下水。

### 10.4.3 放射性固体废物

放射性固体废物主要来源于实验用品，如一次性移液器枪头，分子探针合成传输管线，西林瓶，试纸等，和过滤系统滤材等。

同位素操作实验室每个房间放置一个铅防护放射性废物桶，每个容积 20L；在放射性废物暂存间内至少共设置 4 个铅防护废物桶（每个不低于 100L）。

（1）一般性放射性固体废物：实验使用的手套、棉签、一次性移液器枪头，分子探针合成传输管线，西林瓶，试纸等先收集在场所放射性废物桶中，

每周一转移至放射性废物暂存间的废物箱内。定期履行解控手续，解控后按照危险废物处置。

(2) 更换下来的过滤器滤芯，装袋密封后暂存在放废间，袋上标明储存日期，待储存超过 42d 后，履行解控手续，解控后按照危险废物处置。

#### 10.4.4 “三废”的治理

回旋加速器使用过程中，产生放射性“三废”。放射性废气为活化气体，经通风系统的活性炭过滤后在综合实验楼顶部高空排放。少量放射性废水排入放射性废水 1 号衰变池，统一暂存和处置。放射性固体废物暂存在回旋加速器机房和固废间的废物桶内，定期进行解控处置。废靶经检测后分类处置，不能解控的送交北京市城市放射性废物库。

固体靶核素制备操作室和正电子核素操作室同样产生放射性“三废”。放射性废气经通风系统的活性炭过滤后，在综合实验楼顶部排放。放射性废水分别汇入放射性废水 1 号衰变池，暂存后解控处置。放射性固体废物分类贮存于废物间内，定期进行解控处置。

#### 10.5 法规符合情况

依据《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》规定，现对北京大学从事本项目辐射活动能力评价列于表 10.5-1 和表 10.5-2。

##### 10.5.1 对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求的满足情况

表 10.5-1 汇总列出了本项目对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》对使用放射性同位素和射线装置单位承诺的对应检查情况。

**表 10.5-1 执行《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求对照表**

序号	应具备条件	落实情况	符合情况
1	使用放射性同位素、射线装置的单位，应当配有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作。	已成立辐射防护领导小组，并在该机构设有专职管理人员。	符合
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。	规定所有新增辐射工作人员，在上岗前将接受生态环境的辐射安全与防护考核，并经考核合格后上岗。每 5 年重新参加考核，并制定了辐射工作	落实 后符合

		人员考核计划。 本项目新增 6 名辐射工作人员, 在通过辐射安全与防护考核合格后持证上岗。	
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贮存库或设备。	辐射工作场所拟设工作人员专用门禁、视频监控等安全防范设施、技术防范系统等, 落实放射性同位素安全保卫措施。	落实 后符合
4	放射性同位素与射线装置, 应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	在辐射工作场所控制区出入口处, 出入口门、实验室门、废物间门上等位置拟设置放射性警告标识和中文警示说明。出入口拟设有门禁系统。	落实 后符合
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。	本项目新配 1 台中子剂量当量监测仪、3 台便携式辐射剂量监测仪、2 台表面污染监测仪、2 台个人剂量报警仪、1 套 7 探头的固定式 $\gamma$ 辐射监测报警仪和 4 套固定式中子辐射监测报警仪, 能够满足现在工作的需要。	符合
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、射线装置使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	进一步完善规章制度、操作规程、岗位职责及辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员考核计划、监测方案等。	落实 后符合
7	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。	设置放射性废水衰变池、废物暂存间, 设置有 8 套排风系统, 放射性废气经活性炭过滤后排放, 可确保放射性废物处理达标排放, 处理能力和处理方案可行。	落实 后符合
8	有完善的辐射事故应急措施。	拟完善辐射事故应急处理预案。	落实 后符合

### 10.5.2 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求的满足情况

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》对拟使用射线装置和放射性同位素的单位提出了具体条件, 本项目具备的条件与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求的对照检查如表 10.5-2 所示。

**表 10.5-2 执行《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求对照表**

序号	安全和防护管理办法要求	落实情况	是否符合要求
1	第五条 生产、销售、使用、贮存放射性同位素与射线装置的场所, 应当按照国家有关规定设置明显的放射性标志, 其入口处应当按照国家有关安全和防护	拟设置醒目的电离辐射警告标志及配有“当心电离辐射”的中文警示说明。实验室拟设工作人员专用门禁、视频监控等安全防范设施、技术防范系统等。控制	落实 后符合

	标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全连锁、报警装置或者工作信号。	区出入口均设有门禁系统。	
2	第九条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。	将委托有辐射水平监测资质单位每年对放射工作场所周围的辐射水平进行一次监测。将每年使用辐射剂量仪，对工作场所内和控制区周边环境进行自行监测，做好监测记录并妥善保存监测报告。每天对标记实验室、注射区、实验区的表面污染进行自行监测，并做好记录。	落实 后符 合
3	第十二条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当对本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年1月31日前向发证机关提交上一年度的评估报告。	在每年1月31日前向生态环境局提交年度评估报告。	落实 后符 合
4	第十七条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲，对直接从事生产、销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗。	规定所有新增辐射工作人员，在上岗前将接受生态环境的辐射安全与防护考核，并经考核合格后上岗。每5年重新参加考核，并制定了辐射工作人员考核计划。 本项目新增6名辐射工作人员，在通过辐射安全与防护考核合格后持证上岗。。	落实 后符 合
5	第二十三条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测；发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。	所有从事放射性工作的人员配备个人剂量计，并委托有资质单位进行个人剂量监测（每季度1次）。	落实 后符 合
6	第二十四条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，不具备个人剂量监测能力的，应当委托具备条件的机构进行个人剂量监测。	拟委托有资质单位对辐射工作人员进行个人剂量监测。	落实 后符 合

## 表 11 环境影响分析

### 11.1 建设或安装过程的环境影响

本项目在建设和安装阶段无辐射产生，对周围环境没有辐射影响。

本次评价项目涉及到屏蔽体的浇筑、建筑装饰、设备安装等，在项目的建设过程中，应采取污染防治措施，减轻对周边地区的环境影响。项目建设期主要的污染因子有：噪声、废水、固体废弃物和扬尘等，建楼环评于 2025 年 1 月取得了北京市怀柔区生态环境局《关于分子影像与医学诊疗探针创新平台项目环境影响报告表的批复》（怀环审字[2025]0001 号），本项目简要说明。

#### 1、声环境影响分析

该项目施工期的噪声主要来自机房屏蔽体浇筑、相关设施的安装调试等阶段，但该评价项目的建设工程，影响期短暂，对周围环境影响小。因此，合理安排施工时间，夜间禁止高噪声机械作业，对周围的影响不大。

#### 2、环境空气影响分析

施工期，扬尘来自于材料搬运、装卸等施工活动，由于扬尘源多且分散，属于无组织排放。受施工方式、设备、气候等因素制约，产生的随机性和波动性大。本项目施工量较少，施工范围较小，对环境影响较小，土建工程结束后即可恢复。

#### 3、水环境影响分析

本工程施工污水主要来自少量施工废水。施工废水主要包括砂石料加工水。施工废水含泥沙和悬浮物，直接排出会阻塞排水管道和对附近水体造成污染。对此，施工单位应对施工废水进行妥善处理。

#### 4、固体废物影响分析

施工期间固体废物主要为建筑垃圾。施工过程中的建筑垃圾和生活垃圾必须集中处理，严禁随意堆放和倾倒。生活垃圾应置于单位内部垃圾收集箱内。施工建筑垃圾委托有资质的渣土运输公司处置，运垃圾的专用车每次装完垃圾后，用苫布盖好，避免途中遗洒和运输过程中造成扬尘。可以使工程建设产生的垃圾处于可控制状态。

综上所述，建设工程在施工期的环境影响是短暂的、可逆的，随着施工期的结束而消失。施工单位应严格按照有关规定采取上述措施进行污染防治，并

加强监管，使本项目施工对周围环境的影响降低到最小。

## 11.2 回旋加速器室和相关场所运行（使用）后对环境的影响

### 11.2.1 回旋加速器室

#### 11.2.1.1 估算方法

加速器机房屏蔽的主要对象是质子核反应产生的中子和  $\gamma$  射线。由于正电子核素发生  $\beta^+$  衰变经湮没后发出的  $\gamma$  射线能量为 0.511MeV，小于加速器产生的  $\gamma$  射线的能量，因此加速器机房的屏蔽设计在考虑了加速器产生的  $\gamma$  射线时，对正电子核素产生的  $\gamma$  射线的辐射影响也能包容。

屏蔽估算时，本项目保守考虑最大束流操作生产正电子核素。本项目加速器拟可制备不同的核素，所有靶都导致类似的中子能谱，其中液体和气体靶位于回旋的西南侧，固体靶位于东北侧。固体靶与液体靶无法同时打靶制备，且固体靶最大束流不超过 100 $\mu$ A，由于 F-18 的制备是回旋加速器设备的主要活动，且用量也最大，本项目用最大束流质子轰击 O-18 靶/Zn-68 靶的情况下来估算回旋加速器机房周围附加剂量率水平。

(1)参照 GBZ120-2020 标准推荐的方法和参数，依据设备厂家给出的回旋加速器外等剂量曲线数据，估算回旋加速器机房周围附加剂量率水平。估算公式见下式。

$$\dot{H}_R = \left(\frac{r_0}{R}\right)^2 \times (\dot{H}_n \times 10^{-X/T_n} + \dot{H}_\gamma \times 10^{-X/T_\gamma}) \quad (\text{公式 11-1})$$

式中：

$\dot{H}_R$ —回旋加速器外关注点的剂量当量率， $\mu$ Sv/h；

$r_0$ —参考点距靶心的距离，m；

$R$ —墙外关注点距靶心的距离，m；

$X$ —屏蔽墙厚度，cm；

$\dot{H}_n$ —参考点  $r_0$  处的中子剂量当量率， $\mu$ Sv/h（这里取距自屏蔽体表面 1m 处的中子剂量当量率，详见表 11.2-1 和表 11.2-2）；

$\dot{H}_\gamma$ —参考点  $r_0$  处的  $\gamma$  剂量当量率  $\mu$ Sv/h（这里取距自屏蔽体表面 1m 处的  $\gamma$  剂量当量率，详见表 11.2-1 和表 11.2-2）；

$T_n$ —中子 1/10 减弱层厚度，cm，最高中子能量为 10 MeV，平均能量约 3MeV，本项目混凝土取 34cm（参照辐射安全手册，厂家提供的为 31.9cm）；

$T_{\gamma}$ — $\gamma$  射线 1/10 减弱层厚度, cm。 $\gamma$  射线能量 (连续谱) 最高为 10MeV, 平均能量约 3.1MeV, 混凝土取 41cm, 铅取 5.7cm (参照 NCRP151, 厂家提供的为 38.6cm)。

(2) 迷路口中子反散射辐射按下列公式估算。

$$\dot{H}_S = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdots \alpha_n \cdot A_1 \cdot A_2 \cdots A_n}{d_1^2 \cdot d_2^2 \cdots d_{n+1}^2} \cdot \dot{H}_0 \text{-----} \quad (\text{公式 11-2})$$

$$\alpha_n(E_0, \theta_0, \theta) = \frac{F(E_0) \cos \theta_0 \cos \theta}{\cos \theta_0 + \cos \theta} \text{-----} \quad (\text{公式 11-3})$$

$$F(E_0) = E_0 \cdot \exp(0.9719 - 2.895\sqrt{E_0} + 0.3417E_0) \text{----} \quad (\text{公式 11-4})$$

$$E_{sc} = 0.24\overline{E_0} \text{-----} \quad (\text{公式 11-5})$$

式中:

$n$ —散射次数;

$\alpha$ —反散射系数, 与入射平均能量  $E_0$ 、入射角  $\theta_0$ 、散射角  $\theta$  有关;

$E_{sc}$ —散射能量, MeV;

$\dot{H}_0$ —散射处的中子剂量当量率,  $\mu\text{Sv/h}$ ;

$d_1$ —入射距离, 取 1.0m;

$d_{2-n}$ —散射距离, m;

$A_{1-n}$ —对应的散射面积,  $\text{m}^2$ 。

### 11.2.1.2 回旋加速器机房辐射屏蔽分析

#### 1、回旋加速器辐射剂量估算源强及参数

(1) 本项目拟配玖源公司的两种型号 (玖源-11MTS 和玖源-20 型) 的自屏蔽回旋加速器的资料, 设备在最大功率 (11MeV/100 $\mu\text{A}$ 、20MeV/180 $\mu\text{A}$ ) 运行时, 本项目拟配的两种型号最大能量和束流加速器表面 1 米处中子和伽马剂量率分布 (垂直于自屏蔽表面) 见表 11.2-1 和表 11.2-2。根据表中的剂量率, 两间回旋加速器室东、北墙外以 Zn-68 靶的剂量水平来估算回旋加速器机房周围附加剂量率水平、南、西墙外以轰击 O-18 靶的剂量水平来估算回旋加速器机房周围附加剂量率水平, 顶上以较大值来估算。

表 11.2-1 玖源-11MTS 型自屏蔽回旋加速器源项

方向	射线类型	位置 (距自屏蔽体表面距离, m)	剂量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	备注
	中子	1.0	4.69/4.67	

东侧	$\gamma$	1.0	75.08/63.10	
南侧	中子	1.0	2.59/0.41	
	$\gamma$	1.0	291.59/5.25	
西侧	中子	1.0	0.02/0.49	
	$\gamma$	1.0	19.45/1.95	
北侧	中子	1.0	1.74/3.09	
	$\gamma$	1.0	3.73/54.95	
顶面	中子	1.0	2.74/3.16	
	$\gamma$	1.0	13.94/43.65	

注：靶填充  $^{18}\text{O}$ -富氧水/Zn-68 靶；上表数值按  $100\mu\text{A}$  束流。

表 11.2-2 玖源-20 型自屏蔽回旋加速器源项

方向	射线类型	位置（距自屏蔽体表面距离，m）	剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）	备注
东侧	中子	1.0	0.99/316.23	
	$\gamma$	1.0	0.0065/9.77	
南侧	中子	1.0	350.94/6.92	
	$\gamma$	1.0	4.72/0.71	
西侧	中子	1.0	127.42/5.01	
	$\gamma$	1.0	12.76/0.50	
北侧	中子	1.0	2.02/132.83	
	$\gamma$	1.0	0.0031/37.84	
顶面	中子	1.0	14.29/11.22	
	$\gamma$	1.0	0.34/4.57	

注：靶填充  $^{18}\text{O}$ -富氧水/Zn-68 靶；上表数值按  $180\mu\text{A}$  束流修正（固体靶按  $100\mu\text{A}$  估算）。

(2) 根据设备厂家资料，玖源源粒子公司玖源-11MTS 型、玖源-20 型回旋加速器自屏蔽外型尺寸分别约为  $3.2\text{m} \times 3.1\text{m} \times 2.2\text{m}$ 、 $3.8\text{m} \times 3.8\text{m} \times 2.36\text{m}$ （长×宽×高），靶位距离地面高度分别约为  $0.70\text{m}$ 、 $0.68\text{m}$ 。靶位都位于设备一侧。设备摆放后，玖源-11MTS 型  $\text{O}-18$  靶距离南墙、西墙和顶外表面距离分别为  $3.1\text{m}$ 、 $4.1\text{m}$  和  $5.9\text{m}$ （Zn-68 靶距离东墙、北墙外表面距离分别为  $4.2\text{m}$ 、

5.0m)；玖源-20 型 O-18 靶距离南墙、西墙和顶外表面距离分别为 3.6m、4.9m 和 5.9m(Zn-68 靶距离东墙、北墙外表面距离分别为 4.9m、4.2m)。玖源-11MTS 型估算靶位距离设备自屏蔽外表面垂直距离约分别为 1.03m（东侧）、1.03m（南侧）、1.03m（西侧）、1.03m（北侧）、1.50m（顶），玖源-20 型估算靶位距离设备自屏蔽外表面垂直距离约分别为 1.23m m（东侧）、1.21m（南侧）、1.23m（西侧）、1.21m（北侧）、1.68m（顶）。

## 2、回旋加速器室周围辐射剂量率

估算时机房外各关注点位置见图 11.2-1 和图 11.2-2 所示，根据公式及表中相关参数，周围剂量当量率估算结果如表 11.2-3 和表 11.2-4 所示。

表 11.2-3 回旋加速器室 1 关注点周围剂量当量率估算结果

位置	$r_0$ , (m)	$R$ , (m)	屏蔽材料及厚度	参考点剂量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		关注点周围剂量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		位置描述
						中子/ $\gamma$	合计	
A1	2.23	5.2	80cm 砼	316.23	中子	2.58E-01	2.78E-01	固体靶核素制备操作室
	2.23	5.2		9.77	$\gamma$	2.01E-02		
B1	2.21	3.9	80cm 砼	350.96	中子	5.00E-01	5.17E-01	走廊
	2.21	3.9		4.72	$\gamma$	1.70E-02		
C1	2.23	5.2	80cm 砼	127.42	中子	1.04E-01	1.30E-01	回旋加速器室 2
	2.23	5.2		12.76	$\gamma$	2.63E-02		
D1	2.21	4.5	80cm 砼	132.83	中子	1.42E-01	2.44E-01	控制室
	2.21	4.5		37.84	$\gamma$	1.02E-01		
M1	2.21	7.9	39.7cm 砼 +250mmPE +16mmPb	132.83	中子	6.42E-02	2.31E-01	门口
	2.21	7.9		37.84	$\gamma$	1.67E-01		
H1	2.68	6.2	70cm 砼 +105cm 土层 (等效 155cm 砼)	14.29	中子	7.37E-05	8.43E-05	绿化区
	2.68	6.2		4.57	$\gamma$	1.05E-05		
D11	2.21	3.4	0cm 砼	132.83	中子	1.78E+01	/	北墙内墙
	2.21	3.4		37.84	$\gamma$	1.08E+00	/	

备注：土层密度不低于 1.9g/cm<sup>3</sup>，105cm 土相当于 84.9cm 砼；砼（混凝土）密度不低于 2.35 g/cm<sup>3</sup>；铅密度不低于 11.34g/cm<sup>3</sup>。

表 11.2-4 回旋加速器室 2 关注点周围剂量当量率估算结果

位置	$r_0$ , (m)	$R$ , (m)	屏蔽材料及厚度	参考点剂量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		关注点周围剂量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		位置描述
						中子/ $\gamma$	合计	
A2	2.03	4.5	80cm 砼	4.67	中子	4.22E-03	1.48E-01	回旋加速器室 1
	2.03	4.5		63.1	$\gamma$	1.44E-01		
B2	2.03	3.4	80cm 砼	2.59	中子	4.10E-03	1.17E+00	走廊
	2.03	3.4		291.59	$\gamma$	1.16E+00		
C2	2.03	4.4	70cm 砼	0.02	中子	3.72E-05	8.13E-02	土层、楼梯间
	2.03	4.4		19.45	$\gamma$	8.12E-02		
D2	2.03	5.3	80cm 砼	3.09	中子	2.01E-03	9.22E-02	控制室
	2.03	5.3		54.95	$\gamma$	9.02E-02		
E2	2.03	5.3	62.2cm 砼	3.09	中子	7.79E-03	2.85E-01	控制室
	2.03	5.3		54.95	$\gamma$	2.77E-1		
M2	2.03	6.6	38.1cm 砼 +250mmPE +16mmPb	3.09	中子	5.83E-03	5.03E-01	门口
	2.03	6.6		54.95	$\gamma$	4.98E-01		
H2	2.5	6.2	70cm 砼 +105cm 土层 (等效 155cm 砼)	3.16	中子	1.42E-05	1.19E-03	绿化区
	2.5	6.2		43.65	$\gamma$	1.18E-03		
A21	3.13	4.5	0	4.67	中子	2.26E+00	/	回旋加速器室 1
	3.13	4.5		63.1	$\gamma$	3.05E+01	/	

从表 11.2-3 和表 11.2-4 估算结果，回旋加速器机房外周围剂量当量率都小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  的要求。

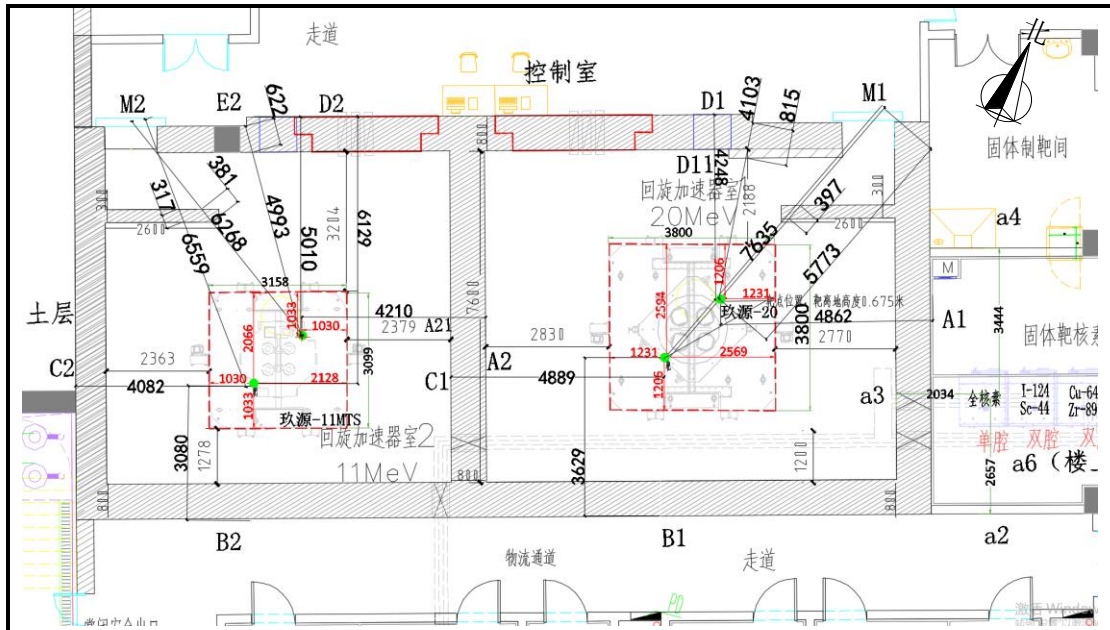


图 11.2-1 回旋加速器机房关注点平面位置图

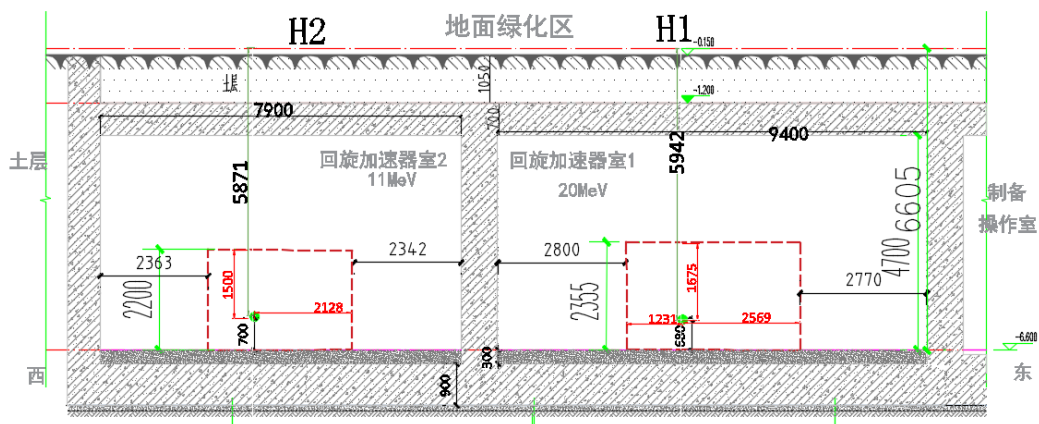


图 11.2-2 回旋加速器机房关注点剖面位置图

### 3、防护门外散射辐射估算

防护门外辐射剂量水平除了直接经过迷路墙衰减的剂量值外（见表 11.2-3 和表 11.2-4 估算结果），主要由透射过迷路屏蔽墙的中子和迷路口反散射辐射引起。 $\gamma$  射线散射因子较小（不大于  $10^{-2}$ ），再经距离衰减后其剂量可忽略。根据以上玖谊源公司的加速器估算结果，中子散射辐射可按公式 11-2 估算，中子反散射估算参数与结果见表 11.2-5，散射路径见图 11.2-3。根据估算结果，防护门迷道口处中子反散射剂量不大于  $7.95E-2\mu\text{Sv/h}$ ，再经过门体衰减至少再降低一个数量级，可以不考虑叠加的影响。

表 11.2-5 门口中子散射剂量当量率估算结果

场所名称	散射次数	入射能量 $E_0$ (MeV)	入射角 $\theta_0$ ( $^\circ$ )	散射角 $\theta$ ( $^\circ$ )	散射距离 $d_n$ (m)	散射面积 $A_n$ (m <sup>2</sup> )	反散射系数 $\alpha_n$	剂量 $H_s$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
加速器室 1	1	3	18	58	2.1	8.9 (1.9×4.7)	0.0667	2.40
	2	0.72	58	18	2.5	12.2 (2.6×4.7)	0.075	7.95E-2
加速器室 2	1	3	3	32	9.4	7.5 (1.59×4.7)	0.0667	1.28E-2

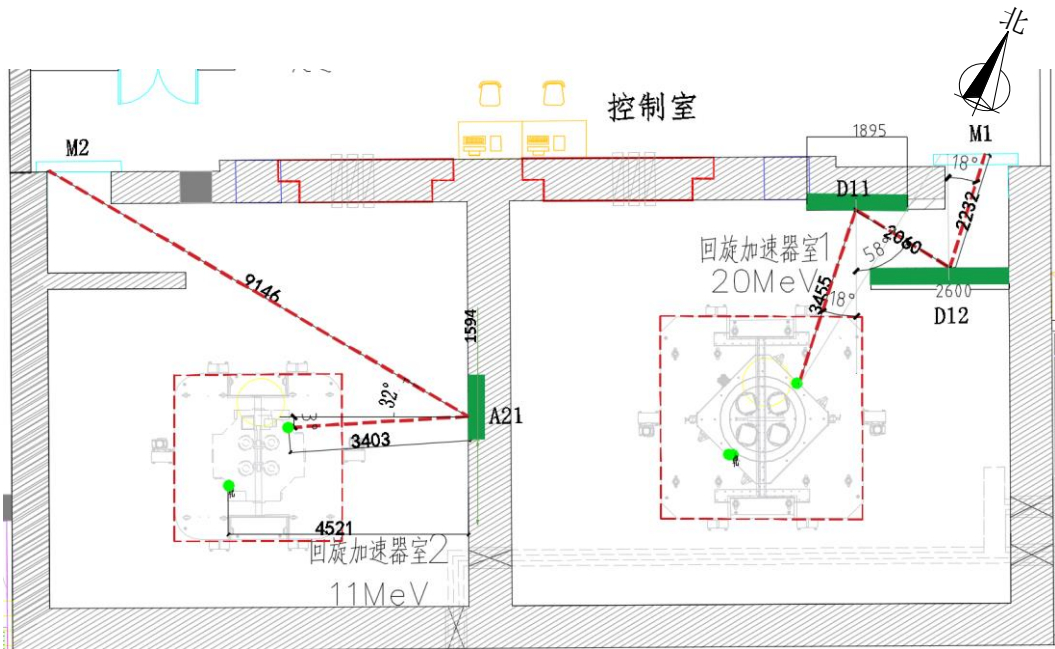


图 11.2-3 中子反散射路径示意图

综上所述，本次项目回旋加速器机房屏蔽设计满足本项目的自屏蔽加速器相关型号的辐射屏蔽要求，且经过估算预测的机房外关注的辐射剂量率都满足  $2.5\mu\text{Sv/h}$  要求。

### 11.2.1.3 人员受照剂量分析

回旋加速器每次出束打靶时间不超过 2h，每个机房每天最多打靶 4h，年工作 250 天，因此年出束时间为 2000h（保守每个场所都按 2000h 估算）。估算各个关注点人员的年有效剂量见表 11.2-6。

表 11.2-6 回旋加速器致周围人员年有效剂量

场所名称	估算对象	位置编号	场所位置	$T$	年受照时间 (h)	剂量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	年有效剂量, $\mu\text{Sv}$
回旋加速器室 1	工作人员	D1	控制室	1	2000	2.44E-1	4.88E+02
		M1	防护门	1/8	2000	2.31E-1	5.78E+01

	公众	H1	地面公众	1/16	2000	8.43E-5	1.05E-02
回旋加速器室 2	工作人员	E2	控制室	1	2000	2.85E-1	5.70E+02
		M2	防护门	1/8	2000	5.03E-1	1.26E+02
	公众	H2	地面公众	1/16	2000	1.19E-3	1.49E-01

由表 11.2-6 中可知，本项目回旋加速器室工作人员所受剂量为 570 $\mu$ Sv/a，公众人员所受剂量最大约为 1.49E-1 $\mu$ Sv/a。

### 11.2.2 制备操作室辐射剂量估算

#### (1) 制备操作室环节工作人员的受照剂量

正电子核素制备操作室和固体靶核素制备操作室分别规划设置 5 个热室（外尺寸约为 121cm $\times$ 118cm，共 10 个热室），其中固体靶核素制备操作室 3 个热室是双层热室，另外 2 个都是单层热室，本项目 3 个合成热室正面（含正面观察窗）采用不低于 70mm 的铅进行防护；1 个分装热室正面（含正面观察窗，含操作 N-13 核素）不低于 60mm 的铅进行防护；正电子核素制备操作室 1 个热室是双层热室，另外 4 个都是单层热室，本项目 4 个合成热室正面（含正面观察窗）采用不低于 70mm 的铅进行防护；1 个分装热室正面（含正面观察窗，含操作 N-13 核素）不低于 60mm 的铅进行防护，热室铅厚度见表 10.2-2。药物合成、活度测量和分装等操作为全自动化，工作人员在控制台观察合成、分装进程，过程持续 20min/次，此环节提前把试剂瓶装载到专用的铅屏蔽容器中（自动分装后药品是储存在铅罐里），铅屏蔽容器采用 42mm 的铅当量屏蔽，铅屏蔽容器的尺寸为半径 6cm，高 16cm，铅容器盖子为旋转式卡扣盖子。

采用下列公式估算热室模块箱外表面的剂量率：

$$\dot{D} = K \times A \times r^{-2} \times 10^{-d/TVL} \text{-----} \quad (\text{公式 11-6})$$

式中：

$\dot{D}$ —热室模块箱外的  $\gamma$  剂量率  $\mu$ Sv/h；

$K$ —剂量率常数，详见表 11.2-7；

$A$ —为点源活度，MBq；

$r$ —关注点（热室外表面 30cm 处）距源中心的距离，0.9m；

$d$ —屏蔽厚度，mm；

$TVL$ — $\gamma$  射线 1/10 值层厚度，详见表 11.2-7；

表 11.2-7 使用的放射性同位素的基本参数

序号	核素名称	$TVL_{铅}$ (mm)	$TVL_{铅}$ (mm)	周围剂量当量率常数 $\mu Sv \cdot m^2 / (h \cdot MBq)$
1	F-18	16.6	176	0.143
2	N-13	17.2/13.9	240/143.7	0.148
3	C-11	17.2/13.9	240/143.7	0.148
4	Ga-68	18.3/18.6	242/148	0.134
5	Cu-64	18.2/19.4	242/148.8	0.029
6	Zr-89	34/29.8	267/179	0.154
7	I-124	35.1/47.5	266.7/207	0.185
8	Sc-44	32.1	280	0.331

备注： $TVL$  数值参考《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）、《Exposure Rate Constants and Lead Shielding Values for over 1,100 Radionuclides》、《radionuclide information booklet》和《辐射安全手册》；“/”前面为第一什值层，后面为平衡什值层。

本项目回旋制备的 F-18、C-11、N-13、Ga-68、Sc-44、Cu-64、Zr-89、I-124 核素，目前主要用于其他平台的实验，考虑到这些平台的使用情况，本项目 F-18、C-11、N-13、Ga-68、Sc-44、Cu-64、Zr-89、I-124 每天最大制备量分别不大于为 37GBq、11.1GBq、11.1GBq、3.7GBq、1.85GBq、3.7GBq、3.7GBq、1.85GBq。

固体靶核素制备操作室：固体靶核素制备操作室涉及操作的核素有 Ga-68、Sc-44、Cu-64、Zr-89、I-124，5 个热室以 Ga-68、Sc-44 代表核素进行估算，其中每次最大制备量不大于 3.7GBq（Sc-44 和 I-124 制备量为 1.85GBq），每次分装按 0.74GBq 估算，且都是储存在 42mmPb 的铅罐里。由于热室都是紧邻设置，中间热室左右两侧未进行估算，则热室外表面的剂量率估算结果如表 11.2-8 所示。

正电子核素制备操作室：涉及操作的核素有 F-18、C-11、N-13，5 个热室以 F-18、C-11、N-13 代表核素进行估算。其中 F-18 为一天两次制备，每次最大生产量不大于 18.5GBq，C-11 热室保守按 C-11 的 11.1GBq 估算，分

装热室保守按 N-13 的 11.1GBq 估算,实际每次 F-18 分装一般不超过 3.7GBq,且都是储存在 42mmPb 的铅罐里。由于热室都是紧邻设置,中间热室左右两侧未进行估算,则热室外表面的剂量率估算结果如表 11.2-9 所示。

表 11.2-8 固体靶核素制备操作室热室及周围的剂量率估算结果

热室序号	核素名称	初始活度, MBq	位置	屏蔽厚度, cm	距离 (m)	衰减因子	附加剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	操作核素
1	Ga-68	3.70E+3	正面 30cm 处	7 铅	0.9	1.66E-04	1.02E-01	Cu-64、Ga-68
			后面 30cm 处 (平常无人区)	6 铅	0.9	5.73E-04	3.51E-01	
			右侧 30cm 处	6 铅	0.9	5.73E-04	3.51E-01	
			上方 30cm 处	6 铅	1.3	5.73E-04	1.68E-01	
			南侧走廊 a2	6 铅+11.1 砷*	3.0	1.02E-04	5.61E-03	
			西侧回旋加速器室 a3	6.0 铅+80 砷	2.3	2.25E-09	2.11E-07	
			北侧固体制靶间 a4	6 铅+11.1 砷*	3.7	1.02E-04	3.69E-03	
楼上地面绿化区 a6	6 铅+142 砷*	5.9	1.46E-13	2.08E-12				
2	Sc-44	1.85E+3	正面 30cm 处	10 铅	0.9	7.67E-04	5.80E-01	I-124、Sc-44、Zr-89
			后面 30cm 处 (平常无人区)	8 铅	0.9	3.22E-03	2.43E+00	
			上方 30cm 处	8 铅	0.9	3.22E-03	2.43E+00	
			南侧走廊 a2	8 铅+11.1 砷*	3.0	1.29E-03	8.79E-02	
			北侧固体制靶间 a4	8 铅+11.1 砷*	3.7	1.29E-03	5.78E-02	
			楼上地面绿化区 a6	8 铅+142 砷*	5.9	2.73E-08	9.61E-07	
3	Ga-68	3.70E+3	正面 30cm 处	7 铅	0.9	1.66E-04	1.02E-01	Cu-64、Ga-68
			后面 30cm 处 (平常无人区)	6 铅	0.9	5.73E-04	3.51E-01	
			上方 30cm 处	6 铅	0.9	1.02E-04	6.24E-02	
			南侧走廊 a2	6 铅+11.1 砷*	3.0	1.02E-04	5.61E-03	

			北侧固体制靶间 a4	6 铅+11.1 砷*	3.7	1.46E-13	5.28E-12	
			楼上地面绿化区 a6	6 铅+142 砷*	5.9	5.73E-04	8.16E-03	
4	Sc-44	7.40E+2	正面 30cm 处	6 铅	0.9	5.95E-04	1.80E-01	Cu-64、Zr-89、Ga-68、I-124、Sc-44 (分装热室)
			后面 30cm 处 (平常无人区)	5 铅	0.9	2.77E-02	8.37E+00	
			上方 30cm 处	5 铅	1.3	2.77E-02	4.01E+00	
			东侧空调机房 a1	5 铅+11.1 砷*	8.2	1.11E-02	4.05E-02	
			南侧走廊 a2	5 铅+11.1 砷*	3.0	1.11E-02	3.03E-01	
			楼上地面绿化区 a6	5 铅+142 砷*	5.9	2.35E-07	1.65E-06	
5	Ga-68	3.70E+3	正面 30cm 处	7 铅	0.9	1.72E-04	1.06E-01	Ga-68
			后面 30cm 处 (平常无人区)	6 铅	0.9	5.95E-04	3.64E-01	
			左侧 30cm 处	6 铅	0.9	5.95E-04	3.64E-01	
			上方 30cm 处	6 铅	1.3	5.95E-04	1.74E-01	
			东侧空调机房 a1	6 铅+11.1 砷*	7.4	1.06E-04	9.57E-04	
			南侧门外 a5	6.3 铅	3.0	4.10E-04	2.26E-02	
			楼上地面绿化区 a6	6 铅+142 砷*	5.9	1.51E-13	2.15E-12	

备注：20cm 混凝土加气砖+3cm 硫酸钡涂料+1.4cm 硫酸钡板等效 11.1cm 砷；145cm 土层等效 117cm 砷；分装时基本都是储存在 42mmPb 的铅罐里，估算值至少还能低一个数量级。

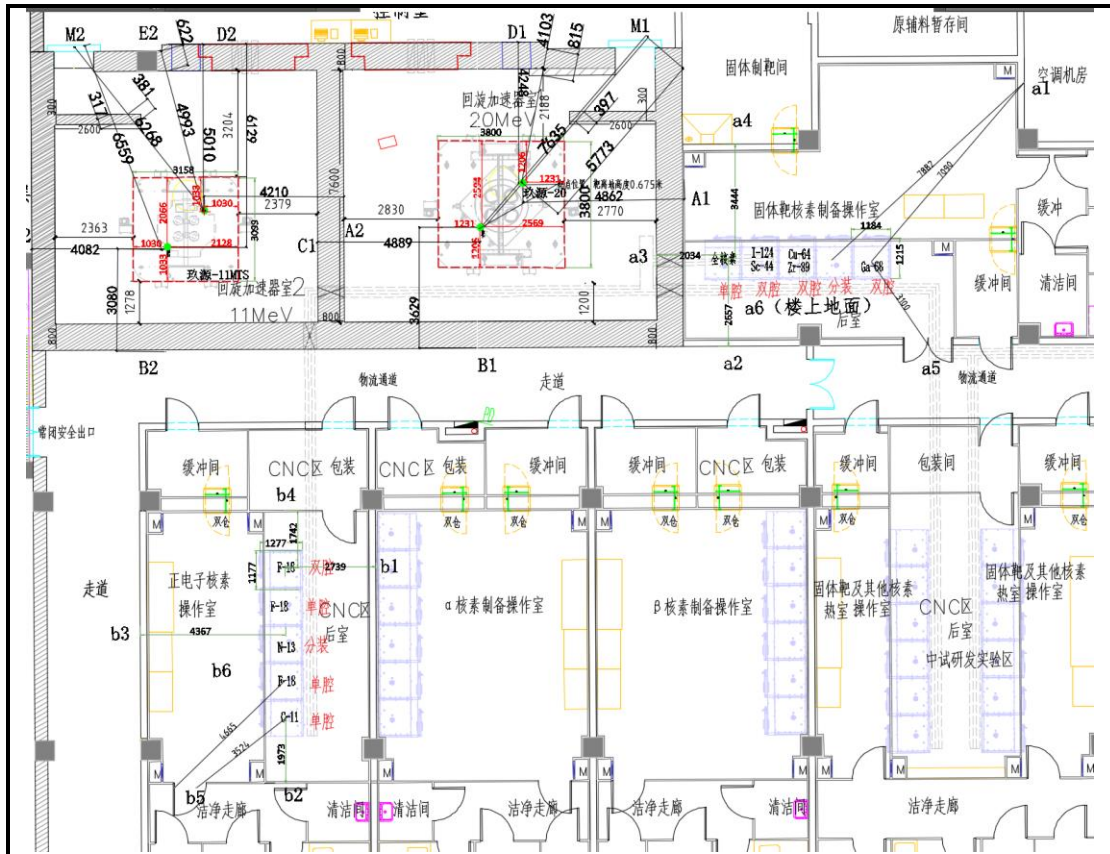


图 11.2-3 热室设备间热室周围估算点位图

表 11.2-9 正电子核素制备操作室热室及周围的剂量率估算结果

热室序号	核素名称	初始活度, MBq	位置	屏蔽厚度, cm	距离 (m)	衰减因子	附加剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	操作核素
1	F-18	1.85E+4	正面 30cm 处	7 铅	0.9	6.07E-05	1.98E-01	F-18
			后面 30cm 处 (平常无人区)	6 铅	0.9	2.43E-04	7.94E-01	
			左侧 30cm 处	6 铅	0.9	2.43E-04	7.94E-01	
			上方 30cm 处	6 铅	0.9	2.43E-04	7.94E-01	
			东侧 $\alpha$ 核素制备操作室 b1	6 铅+5.1 砼*	3.0	1.25E-04	3.66E-02	
			西侧走廊 b3	6 铅+11.1 砼	4.7	5.69E-05	6.81E-03	
			北侧包装区 b4	6.3 铅	2.0	2.43E-04	1.61E-01	
			楼上地面绿化区 b6	6 铅+147 砼*	5.9	1.08E-12	8.20E-11	
2	F-18	1.85E+4	正面 30cm 处	10 铅	0.9	9.46E-07	3.09E-03	F-18

			后面 30cm 处 (平常无人区)	8 铅	0.9	1.52E-05	4.95E-02	
			上方 30cm 处	8 铅	1.3	1.52E-05	2.37E-02	
			东侧 α 核素制备操作室 b1	8 铅+5.1 砷*	3.0	7.78E-06	2.29E-03	
			西侧走廊 b3	8 铅+11.1 砷	4.7	3.55E-06	4.25E-04	
			楼上地面绿化区 a6	8 铅+147 砷*	5.9	6.74E-14	5.12E-12	
3	F-18	1.85E+4	正面 30cm 处	7 铅	0.9	6.07E-05	1.98E-01	F-18
			后面 30cm 处 (平常无人区)	6 铅	0.9	2.43E-04	7.94E-01	
			上方 30cm 处	6 铅	1.3	2.43E-04	3.80E-01	
			东侧 α 核素制备操作室 b1	6 铅+5.1 砷*	3.0	1.25E-04	3.66E-02	
			西侧走廊 b3	6 铅+11.1 砷	4.7	5.69E-05	6.81E-03	
			楼上地面绿化区 a6	6 铅+147 砷*	5.9	1.08E-12	8.20E-11	
4	N-13	1.11E+3	正面 30cm 处	6 铅	0.9	8.33E-05	1.69E-02	F-18、N-13、C-11 (分装热室)
			后面 30cm 处 (平常无人区)	5 铅	0.9	4.37E-04	8.86E-02	
			上方 30cm 处	5 铅	1.3	4.37E-04	4.25E-02	
			东侧 α 核素制备操作室 b1	5 铅+5.1 砷*	3.0	1.93E-04	3.53E-03	
			西侧走廊 b3	5 铅+11.1 砷	4.7	7.40E-05	5.51E-04	
			南门洁净走廊 b5	5.3 铅	5.0	2.66E-04	1.75E-03	
			楼上地面绿化区 a6	5 铅+147 砷*	5.9	2.70E-14	1.28E-13	
5	C-11	1.11E+3	正面 30cm 处	7 铅	0.9	1.59E-05	3.23E-03	C-11
			后面 30cm 处 (平常无人区)	6 铅	0.9	8.33E-05	1.69E-02	
			右侧 30cm 处	6 铅	0.9	8.33E-05	1.69E-02	
			上方 30cm 处	6 铅	1.3	3.69E-05	3.58E-03	
			东侧 α 核素制备操作室 b1	6 铅+5.1 砷*	3.0	8.33E-05	1.52E-03	

			南门洁净走廊 b2	6.3 铅	2.3	5.07E-05	1.57E-03
			西侧走廊 b3	6 铅+11.1 砷	4.7	1.41E-05	1.05E-04
			南门洁净走廊 b5	6.3 铅	3.8	5.07E-05	5.77E-04
			楼上地面绿化 区 a6	6 铅+147 砷*	5.9	5.16E-15	2.43E-14

估算得到，模块箱表面正面的最大剂量率为  $5.80E-1\mu\text{Sv/h}$ ，热室后面最大剂量率为  $8.37\mu\text{Sv/h}$ （平常无人区，只有故障时厂家维修或维护时才进入，且维修或维护时无同位素合成成分装等操作），满足剂量率的要求。制备操作室外剂量率水平不大于  $3.03E-01\mu\text{Sv/h}$ ，公众区域不大于  $4.05E-02\mu\text{Sv/h}$ （固体靶核素制备操作室东侧空调机房 a1）。

对应于回旋加速器打靶次数，合成分装年操作次数最多为 1000 次，每次合成分装工作人员在热室模块箱周围停留 10min，年受照时间为 167h，人员年受照剂量为  $5.80E-1\mu\text{Sv/h}\times 167\text{h}=96.9\mu\text{Sv}$ 。预计对周围公众的年受照剂量不超过  $4.05E-02\mu\text{Sv/h}\times 333\text{h}\times 1/16=0.84\mu\text{Sv}$ （20min/次）。

#### （2）工作人员为药物转运环节工作人员的受照剂量

本项目中正电子核素采用药物转运防护罐（42mmPb）或注射器转运防护箱（25mmPb）运输，1m 处剂量率低于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，运输过程中距工作人员的距离按 50cm 估算（剂量率不大于  $10\mu\text{Sv/h}$  估算）。每次药物从热室到高活室手套箱转运平均时间以 5min 估算，则运转到注射位时工作人员的受照剂量为  $10\mu\text{Sv/h}\times 5\text{min}/\text{人}\times 1000\text{次}\times 1/60\text{min/h}\approx 833\mu\text{Sv}$ 。

### 11.2.3 回旋加速器感生放射性

#### （1）结构部件的活化

回旋加速器引起活化的主要部位是束流损失较大处的部件，如束流管、偏转磁铁、结构材料。该设备使用的材质主要是铜、铝和不锈钢。产生的感生放射性核素主要是  $^{27}\text{Mg}$ 、 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{28}\text{Al}$ 、 $^{62}\text{Cu}$ 、 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{66}\text{Cu}$ 、 $^{56}\text{Mn}$ 、 $^{65}\text{Zn}$  和  $^{65}\text{Ni}$ ，半衰期是 2.3min~12.8h，辐射类型是  $\beta$ 、 $\gamma$ ，主要产生方式是  $^{27}\text{Al}(\text{n}, \text{p})^{27}\text{Mg}$ 、 $^{27}\text{Al}(\text{n}, \alpha)^{24}\text{Na}$ 、 $^{27}\text{Al}(\text{n}, \gamma)^{28}\text{Al}$ 、 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, 2\text{n})^{62}\text{Cu}$ 、 $^{65}\text{Cu}(\text{n}, 2\text{n})^{64}\text{Cu}$ 、 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 、 $^{65}\text{Cu}(\text{n}, \gamma)^{66}\text{Cu}$ 、 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 、 $^{64}\text{Zn}(\text{n}, \gamma)^{65}\text{Zn}$  和  $^{64}\text{Ni}(\text{n}, \gamma)^{65}\text{Ni}$  等反应。

这些活化产物主要为靠近质子束的内层部件，活化活度非均匀分布，又有部件自身的自屏蔽作用，难于估算其周围的 $\gamma$ 射线外照射剂量场。

本项目装载液体靶、气体靶和固体靶采用注射驱动控制系统或者传输系统，换靶和补充原料均不用打开回旋自屏蔽系统，人员在控制室操作，换气体靶和固体靶人员不用进入加速器机房，不用考虑受照剂量。根据侯长松等《某回旋加速器调试机房辐射水平测量结果与分析》（《中华放射医学与防护杂志》2008，28（3）），在16.5MeV能量、20 $\mu$ A束流持续照射15min，靶体表面5cm处的感生放射性为：停机20min后的感生放射性水平约为5.7mSv/h，0.5h后约为测量时的一半，3h后约为测量时的5%（285 $\mu$ Sv/h），之后感生放射性水平衰变趋于平缓。可见，在设备维修和维护时（此环节由厂家工程师完成），需特别注意活化部件的外照射问题（本项目最大束流为180 $\mu$ A，保守取检测值的5倍，感生放射性水平较高）。辐射工作人员（厂家工程师）需佩戴个人剂量报警仪，以防止长时间工作导致人员受照大剂量照射，厂家规定每月对个人剂量计进行检测一次，1mSv/月，每年不超过10mSv，超过年度限值后就暂停维护工作。

加速器的定期维护需要更换钛膜、Hava膜，每年约2次，每次需1min，类比同类型HM-20回旋加速器更换Hava膜时，打开真空腔后，距离机器外表面20cm处 $\gamma$ 的周围剂量当量率为512 $\mu$ Sv/h，则更换Hava膜的受照剂量约17 $\mu$ Sv（此环节也由回旋厂家工程师完成）。工作人员（厂家工程师）更换Hava膜时，必须佩戴个人剂量报警仪和巡测仪器跟踪测量，操作时应戴防污染手套、穿工作服，并于操作后检测表面污染。在加速器停机后，应经过24h才能进入机房。

## （2）空气活化

回旋加速器运行时，产生次级辐射与自屏蔽体内空气以及加速器机房内的空气相互作用产生活化气体，主要为N-13、O-15、C-11和Ar-41。自屏蔽体外，中子当量剂量率大幅降低，中子导致机房内空气活化的份额可忽略不计。

本项目其他活化气体和放射性气溶胶的危害几乎可以忽略，主要考虑Ar-41，Ar-41为惰性气体，被人员吸入后多数会再次呼出，故吸入所致内照射可以忽略。考虑到核素Ar-41的半衰期较长（1.83h），且 $\beta$ 射线能量（2.492MeV）

和  $\gamma$  射线能量 (1.677MeV) 较高, 故估算其排放到环境后对排风口周围停留的公众的浸没外照射贡献。采用下式估算其浓度:

$$A = \frac{2R_0\lambda\sigma Y\rho A_0 f_n f_m}{(\lambda+F/V)GV} \left[ 1 - e^{-(\lambda+\frac{F}{V})t} \right] \text{----- (公式 11-7)}$$

式中:

$A$ —核素的浓度, Bq/cm<sup>3</sup>

$R_0$ —自屏蔽体积等效球的半径, 201cm/173cm

$\lambda$ —核素的衰变常数, 1.05E-4s<sup>-1</sup>

$\sigma$ —母核的核反应截面, 0.61E-24cm<sup>2</sup>

$Y$ —束流损失点中子产额, 1.98×10<sup>12</sup>n/s (玖源-11MTS 型 8.81×10<sup>11</sup>n/s)

$\rho$ —空气的密度, 0.0012g/cm<sup>3</sup>

$A_0$ —阿伏伽德罗常数, 6.022E+23/mol

$f_n$ —母核的天然丰度, 1

$f_m$ —母核在空气的重量百分比, 0.013

$G$ —母核的摩尔质量, 39.95g/mol

$t$ —加速器的运行时间, 14400s

$F$ —通风速率, 1.67×10<sup>6</sup>cm<sup>3</sup>/s

$V$ —机房的体积, 3.36×10<sup>8</sup>cm<sup>3</sup>/2.82×10<sup>8</sup>cm<sup>3</sup>

按照上式的估算公式, 本项目回旋加速器室 1 内 Ar-41 饱和浓度为 7.03E-3Bq/cm<sup>3</sup> (回旋加速器室 2 饱和浓度为 2.70E-3Bq/cm<sup>3</sup>), 假设有 0.1%Ar-41 气载放射性物质经高效过滤 (两级过滤, 两级均为 99%过滤效率) 后排入大气, Ar-41 产生的空气浸没外照射估算模式为

$$\dot{D}_A = t \cdot S_f \cdot C_i \cdot G_A \text{----- (公式 11-8)}$$

式中:

$\dot{D}_A$ —年空气浸没全身剂量, Sv/a;

$t$ —年受照时间, s/a, 3.6E+6s/a;

$S_f$ —建筑物屏蔽产生的剂量减弱因子, 对于个体, 取0.7;

$C_i$ —地面空气浓度, Bq/m<sup>3</sup>;

$G_A$ —烟云浸没照射剂量转换因子, Ar-41为6.13E-14Sv·s<sup>-1</sup>/Bq·m<sup>-3</sup>。

根据以上公式, 不考虑大气稀释作用以排风口的浓度进行公众剂量估算,

估算结果不大于 1.1 $\mu$ Sv，再考虑大气稀释作用和人员居留等因素的影响，远小于公众受照剂量约束值。

### 11.2.5 非放射性气体影响分析

本项目两间回旋加速器机房配有独立的通风系统，通风量约为 6000m<sup>3</sup>/h。臭氧和二氧化氮的产额比例为 10:4.8，为简化起见，只估算臭氧的产生浓度，然后按照比例关系推出二氧化氮的浓度，采用下式估算回旋加速器机房臭氧的浓度 C<sub>p</sub> (ppm)。

$$C_p = \frac{Y_\gamma E_\gamma f S G}{2.463 \times 10^7 L V (a' + \frac{RP}{V} + \frac{KF}{V})} [1 - e^{-(a' + \frac{RP}{V} + \frac{KF}{V})t}] \text{----- (公式 11-9)}$$

式中：

$Y_\gamma$ —束流损失时产生的  $\gamma$ -光子的产额，约 5.83 $\times 10^{12}$  光子/s (玖源-11MTS 型 2.36 $\times 10^{12}$  光子/s)

$E_\gamma$ — $\gamma$  光子的平均能量，2.5MeV

$f$ —空气吸收  $\gamma$ -光子能量的份额，取 0.5

$S$ — $\gamma$ -光子在空气中行经的平均路程，等于自屏蔽体积等效球的半径，201cm/107cm

$L$ — $\gamma$ -光子在空气中的减弱长度，122cm

$V$ —机房区域的体积，3.36 $\times 10^8$ cm<sup>3</sup>/2.82 $\times 10^8$ cm<sup>3</sup>

$K$ —混合不均匀系数，取 1/3

$a'$ —臭氧的化学衰变常数，2.31 $\times 10^{-4}$ s<sup>-1</sup>

$R$ —臭氧的辐照分解常数，1.6 $\times 10^{-16}$ cm<sup>3</sup>/eV

$F$ —机房区域的通风率，1.67 $\times 10^6$ cm<sup>3</sup>/s

$P$ —空气吸收 ( $\gamma$ -光子) 的功率，eV/s， $P = 10^6 Y_\gamma E_\gamma f s / L$

$G$ —臭氧的产额，0.1 分子/eV

$t$ —辐照时间，14400s

两间回旋加速器机房臭氧估算结果分别为 0.0766ppm、0.0273ppm，1ppm 臭氧约等于 2.14mg/m<sup>3</sup>，故臭氧浓度不大于 1.64E-1mg/m<sup>3</sup>，二氧化氮浓度约为臭氧的一半。该浓度能够满足《工业场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》(GBZ2.1-2019)规定的工作场所的臭氧和二氧化氮允许浓度(O<sub>3</sub>：

0.3mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub>: 5mg/m<sup>3</sup>) ; 也远小于《环境空气质量标准》(GB3095-2026)中臭氧和二氧化氮二级标准限值(O<sub>3</sub>: 160mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub>: 40mg/m<sup>3</sup>), 排放后经大气扩散稀释, 浓度将进一步降低, 不会对周围大气环境产生不良影响。

### 11.2.6 放射性药物合成过程释放的放射性气溶胶

制备含 F-18、Ga-68、C-11、N-13 等药物, 均在热室内完成。合成/纯化过程中可能有少量含放射性气溶胶逸出。全部的热室均设置了单独一套排风系统, 废气管道联通到北侧核医学科专用通风井, 放射性排风管道沿通风井里面至楼顶。热室少量气溶胶经热室设置的高效过滤器净化后, 再经屋顶热室周围和顶活性炭两级过滤器净化后排放。

制备好的放射性药物, 物理性质稳定, 在进行分装和质检时, 均为简单湿法操作, 正常不会产生气溶胶和蒸汽。保守估计, 在 PET 药物自动合成装置制备放射性药物过程中, 进入到废气中核素活度不足投料总活度的 1%。本评价简单采用气溶胶排放浓度和剂量换算因子估算公众成员吸入所致内照射剂量。

以制备 F-18 为例, 热室中一次最大操作量 37GBq (1.0Ci), 完成一次合成操作大约需要 20min。假设在操作过程中, 保守假设有 1% (370MBq) F-18 气载放射性物质经两级高效过滤 (过滤效率以 99.9%计) 后排入大气, 通风量取 1000m<sup>3</sup>/h (热室的设计通风量为 2000m<sup>3</sup>/h), 则排气口 F-18 的释放率约为 3.08×10<sup>2</sup>Bq/s。

根据建设单位提供的资料, 本项目产生的F-18经风机排至室外大气。热室共用一套排风, 排风口高约35.5m, 排风量为2000m<sup>3</sup>/h。采用AERSCREEN估算模式预测F-18排放的环境影响, 预测参数和结果见表11.2-10。

**表11.2-10 F-18排放预测参数和结果**

参数	F-18
排放速率 (Bq/s)	3.08×10 <sup>2</sup>
排气口高度 (m)	35.5
排气口内径 (m)	0.95
风机量 (m <sup>3</sup> /h)	2000
出口流速 (m <sup>3</sup> /s)	0.56

排放温度 (°C/K)	25/298.15
最大落地浓度 (Bq/m <sup>3</sup> )	3.58×10 <sup>-2</sup>
最大落地距离 (m)	25

注：不考虑地形和岸线熏烟。

根据上表估算结果，估算地面最大浓度为 3.58×10<sup>-2</sup>Bq/m<sup>3</sup>（25m 处）。

采用下式估算：

$$H_{h,i} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \text{-----} \quad (\text{公式 11-10})$$

式中： $H_{h,i}$ —吸入内照射待积有效剂量，Sv；

$T$ —年受照时间，600h；

$u$ —为个人正常情况下的呼吸率，m<sup>3</sup>/h，成人取 1.2m<sup>3</sup>/h；

$C_{a,i}$ —评价点的空气浓度，Bq/m<sup>3</sup>；保守取 3.58×10<sup>-2</sup>Bq/m<sup>3</sup>；

$g_{h,i}$ —为吸入放射性核素  $i$  产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq，根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》附表 B3, F-18 公众取 9.3×10<sup>-11</sup>Sv/Bq。

估算得出公众受到的内照射剂量为 2.4×10<sup>-3</sup>μSv，可见，热室合成过程中排出的 F-18 等放射性核素对周围公众的内照射剂量贡献几乎可以忽略。

## 11.2.7 放射性废物产生及排放情况

### 11.2.7.1 放射性废水

本项目放射性废水主要包括：在正常运行过程中回旋加速器制备核素时的淋洗废液；应急状态下产生的废水包括清洗废水和事故情况下加速器冷却水废水。

#### (1) 回旋加速器制备核素的淋洗废液

本项目回旋加速器在制备核素时，会产生极少量的含有杂质离子的合成标记废液，单次产量约 6.8ml，按照各个核素的年最大累计操作次数 1000 次估算，年废液产生量约为 6.8L/年，采用滤纸吸附的方法将其转化为固体废物（实际操作过程基本不产生废液），存放在废物桶内，符合清洁解控标准后按照普通废物处理。

#### (2) 应急清洗废水

本项目应急清洗废水主要来源于应急情况下冲手、淋浴、以及加速器冷却水、模块管路冲洗水，废水的产生量如表 11.2-11 所示。

表 11.2-11 清洗废水产生量

工作过程	废水来源	最大发生次数	一次水量(L)	每个合计(L)	备注
F-18 等合成、分装	应急冲手	8 次/月	1	96L/年	进入 1 号衰变池
	应急淋浴	1 次/年	50	50L/年	
回旋加速器	加速器冷却水	200L (意外全部流出)			
各制备热室	模块管路冲洗	46/月	0.1	55.2L/年	
总计	/	/	/	401.2L/年	

### 11.2.7.2 放射性废气

本项目回旋加速器机房内感生放射性核素  $^{41}\text{Ar}$  总饱和最大浓度较低，在正常工况下，经过两级过滤装置的过滤后（一级在模块箱，一级在排风口，两级均为 99%过滤效率）对公众的影响很小。

### 11.2.7.3 放射性固废

(1) 高活性放射性废物：在 F-18 等正电子药物制备环节，放射性固体废物主要是来自加速器维修更换产生的废弃件（碳膜支架和靶膜），产生量很少，年总量约 0.2kg。这些高活性固废统一收集到铅放射性废物桶，最后委托有放射性固废处理资质的单位处理。

(2) 一般放射性固体废物：在核素药物的制备过程中产生极少量的沾污放射性核素的硅胶、树脂、氧化铝、滤膜及过滤柱、废注射器、一次性手套等放射性废物，每天产生的固体废弃物的量约为 0.2kg，每年按 250 个工作日估算，年产生量约 50kg/年，经检测并经生态环境主管部门批准后解控为危险废物处置。

(3) 通风系统活性炭滤芯：同位素实验室设置 8 套通风系统，分别在楼顶排放前都设置中效过滤器+活性炭吸附过滤+高效过滤器装置过滤后排放，拟配置的活性炭滤芯重量约为 114kg，计划每年更换一次，更换下来的滤芯按照放射性废物管理，年产生量约 114kg。用塑料袋密封后转移到放射性废物暂存间暂存衰变。同样，至少暂存 10 个半衰期后，经检测并经生态环境主管部门批准后解控为危险废物处置。

因此，本项目产生的放射性固体废物合计约 164.2kg/年。处置过程详细记

录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

### 11.2.8 回旋加速器场所受照剂量合计

根据以上估算结果工作人员的受照剂量分别为回旋加速器室  $570\mu\text{Sv/a}$ ，热室及转运  $929.9\mu\text{Sv/a}$  ( $96.9\mu\text{Sv}+833\mu\text{Sv}$ )，即使各环节都累加后约为  $1500\mu\text{Sv/a}$ ，公众附加剂量不大于  $10\mu\text{Sv/a}$ ，满足本项目工作人员、公众年剂量约束值  $2\text{mSv/a}$  和  $0.1\text{mSv/a}$  的要求。

### 11.3 本项目异常事件分析与防范措施

#### (1) 人员误入或误留加速器机房

回旋加速器运行中可能发生的最严重事故是误入和误留在正在产生脉冲辐射的高辐射区——加速器机房内而造成的人员受超剂量照射事故。但正常情况下，由于加速器机房和加速器控制室分处两个独立的房间，加速器的运行是由远端的程序进行控制，加速器的操作人员不在加速器机房内，且无关工作人员不允许进入到核素制备场所，所以发生上述事故的概率极低。

对所有操作场所进行严格的分区管理，设置控制区和监督区，控制区禁止无关人员进入，设置门禁系统、警示灯，悬挂电离辐射警示标识；设置巡检按钮，每次退出机房前均需确认无人员误留并按下巡检按钮；回旋加速器机房、迷路及控制室均设置急停按钮。

#### (2) 正电子核素泄漏预防及处理措施

①回旋加速器运行前检查靶密封膜片和传输时管线的气密性。

②如果靶物质泄漏会导致加速器机房剂量增高，一旦在打靶或者核素传输过程中，出现固定式剂量率（大于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ）报警情况，将立即采取如下措施：立即停机，关闭通风，人员撤离，控制出入口。利用正电子核素半衰期短的特性，等待其自行衰减。

③隔日，待场所的放射性水平恢复安全水平，再进行处理或者管路维修。更换下来的物件装入放射性废物桶暂存。现场人员做好个人防护，使用个人剂

量报警仪。

### (3) 冷却水泄漏预防及处理措施

早期发现冷却水泄漏，系统自动立即停止回旋加速器运行，将冷却水排入回旋加速器机房内放射性废水地漏内，冷却水收集进入衰变池统一解控处置。如果冷却水溢流在机房地面，先将其扫入地漏，之后对于地面残留的少量冷却水用易吸水材质吸收干净，并妥善收集擦拭物，采用表面污染检测仪对进行检测，确保表面污染符合标准要求后再进行维修活动。用于擦拭和清洁的材质（如棉布等）作为放射性固体废物处理。

(4) 靶系统在过压条件下会发生破裂，使靶材料溅入或喷入靶屏蔽装置内侧而导致屏蔽装置内侧受到严重污染。

在操作过程中应降低靶压，如果要打开屏蔽装置，必须戴上双层手套、袖套、头罩和靴子等适当的个人防护设备。打开屏蔽装置时，同时检测辐射场所的辐射水平。

事故发生时，任何溅出的靶材料都将留在屏蔽装置内侧，等到核素衰变后，清除屏蔽装置内侧溅出的材料。真空罐内部的辐射可被屏蔽，待材料衰变 10 个半衰期（下一次打靶前）后，再打开真空罐进行维修。该事故影响局限在回旋加速器机房内部，不会对外环境和公众产生影响。

### (5) 操作放射性同位素时发生容器破碎，同位素泼洒等意外事件。

在同位素污染事故工况下，辐射工作人员有可能受到表面沾污，一旦发生人员表面沾污，工作人员立即脱去手套及防护工作服，一次性手套作为放射性固体废物处理，防护工作服则放置于指定地点待处理（放置时间至少为所沾核素的十个半衰期时间后再进行清洁）。使用手足污染仪对人员进行监测，如接近本底水平，则人员正常离去，如明显高于本底水平，则人员到车间洁具室的专用水龙头下进行清洗，清洗废水作为放射性事故废水流入衰变池内衰变处理。

在完成去污后，采用表面污染检测仪对房间地面、墙面、实验台表面进行检测，确保其 $\beta$ 放射性符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中表B11对于控制区的要求，即 $\beta$ 表面污染水平小于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ 。

根据《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的

通知》（环发[2006]145号）要求，当发生或发现辐射事故后，应立即向单位的辐射安全领导小组组长和法定代表人报告，立即启动辐射事故应急预案，并在2h内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成较大辐射事故或人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康行政部门报告。

## 表 12 辐射安全管理

### 12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

#### 12.1.1 辐射安全管理小组

北京大学已经设置了北京大学辐射防护领导小组作为专门管理机构，并指定了专人负责辐射安全与环境保护管理工作。人员构成具体情况见表 1.3-2 所示。

辐射安全管理小组的职责：

1. 在北京大学辐射安全与防护领导小组组长、副组长的领导下，负责北京大学辐射安全防护的管理工作。

2. 贯彻执行国家、北京市政府部门有关法律、法规、规章、相关标准及有关规定。负责对学校相关部门和人员进行法律、法规及相关标准的培训、教育、指导和监督检查等工作。

3. 制定、修订北京大学辐射安全防护管理制度及仪器设备操作规程。

4. 制定、修订辐射事故应急预案，配备相应的事故处理物资仪器、工具，一旦发生辐射意外事故或情况，在辐射安全与防护领导小组组长的指挥下负责事故现场的应急处理工作。

5. 负责办理辐射安全许可证的申请、登记、换证及年审等工作。

6. 建立装置档案，组织北京大学有关部门和人员对使用的装置及剂量监测仪器进行检查和维护保养，保证正常使用。

7. 对北京大学从事辐射工作的人员进行条件和岗位能力的考核，组织参加专业体检、培训并取得相应资格证。

8. 组织实施对从事辐射工作人员的剂量监测，做好个人剂量计定期检测工作，对数据进行汇总、登记、分析等工作。做好北京大学年度评估报告工作，认真总结、持续改进并上报有关部门。

#### 12.1.2 辐射工作人员

本项目拟新增 6 名辐射工作人员，将按照生态环境部 2019 年第 57 号公告、2021 年第 9 号公告要求，定期（五年一次）组织辐射工作人员进行辐射安全防护考核，辐射工作人员按要求每五年考核一次，考核通过后方可上岗。

### 12.2 辐射安全管理规章制度

包括《北京大学辐射安全与防护管理办法》《辐射防护岗位职责》《北京大

学涉源单位安全保卫职责规定》《北京大学辐射工作人员安全与职业健康管理实施细则》《北京大学放射性同位素与射线装置台账管理制度》《北京大学辐射安全事故应急预案》《北京大学废旧放射源和放射性废物管理和处置规定》《化学与分子工程学院放射安全和防护管理相关制度》《物理学院放射安全和防护管理相关制度》《生命科学学院放射安全和防护管理相关制度》《城市与环境学院放射安全和防护管理相关制度》《环境科学与工程学院放射安全和防护管理制度》《考古文博学院放射安全和防护管理相关制度》《实验动物中心放射安全与防护管理制度》《工学院放射安全和防护管理相关制度》《地空学院放射安全和防护管理相关制度》《北京大学医院放射安全和防护管理相关制度》《北京大学信息科学与技术学院辐射装置安全与防护安全管理相关制度》等制度。

本项目实施后，北京大学将结合新项目的开展，在重新申领辐射安全许可证前，组织相关人员完善相关制度，如《回旋加速器操作规程》《放射性同位素制备操作规程》《放射性废物暂存和解控管理规定》，还需对项目涉及的岗位职责、辐射安全和防护管理相关制度和监测方案等修订工作。

## **12.3 辐射监测**

### **12.3.1 个人剂量监测**

北京大学已制订有关辐射工作人员个人剂量监测的管理要求，并将辐射工作人员个人剂量监测工作作为北京大学辐射监测计划体系的管理目标之一，要求北京大学辐射工作人员按要求接受个人剂量监测，并建立相应的个人剂量监测档案。北京大学每年对全校所有辐射工作场所至少监测一次，监测频度为每3个月检测一次。北京大学将严格要求辐射工作人员按照规范佩戴个人剂量计，规定在个人剂量计佩戴时间届满一个监测周期时，由专人负责收集剂量计送检更换，北京大学严格按照国家法规和相关标准进行个人剂量监测和相关的防护管理工作。

如发现监测数据异常，将立即暂停其辐射工作，查明原因并妥善解决后方可继续开展辐射工作。

### **12.3.2 辐射监测仪器配备**

北京大学已配置必要的辐射监测仪器，本项目拟新增1台中子剂量当量监测仪、3台便携式辐射剂量监测仪、2台表面污染监测仪、2台个人剂量报警仪、1套7探头的固定式 $\gamma$ 射线辐射监测报警仪和4套固定式中子辐射监测报警仪，

能够满足辐射防护和环境保护的要求。仪器名称、数量要求见表 12.3-1。

表 12.3-1 监测仪器配置表

序号	仪器名称	型号	数量	备注
1	便携式辐射剂量监测仪	待定	3 台	新增
2	表面污染监测仪	待定	2 台	新增
3	个人剂量报警仪	待定	2 台	新增
4	固定式 $\gamma$ 射线辐射监测报警仪	待定	1 套 (7 探头)	新增
5	固定式中子辐射监测报警仪	待定	4 套	

### 12.3.3 辐射工作场所监测

#### (1) 委托监测

每年委托有资质的单位对辐射工作场所进行 1 次辐射水平监测，监测数据记录存档。本项目辐射工作场所监测布点参照见图 11.2-1~图 11.2-2 估算点（人员可达处）。

#### (2) 本项目自行监测方案

自行监测采用安装固定式在线监测仪表和便携式监测仪表相结合的方式，其固定式在线监测设备安装位置分别见图 10.1-2。本项目辐射工作场所监测计划见表 12.3-2。

本项目实施后，工作人员使用拟配备的辐射剂量仪、表面污染监测仪，对拟建辐射工作场所进行监测，本项目自行监测方案如下。

- 1) 监测项目： $X/\gamma$  剂量率水平， $n$  剂量率水平，表面污染水平
- 2) 检测设备： $X-\gamma$  辐射剂量巡测仪，中子剂量当量率仪，表面污染监测仪
- 3) 检测频次：剂量率水平每年不少于 1 次（有代表性点位不少于 1 次/月），表面污染每天工作后检测 1 次。
- 4) 工作场所  $\gamma$  剂量率水平监测点位：回旋加速器室及正电子同位素制备区周围等位置的剂量率水平，衰变池上方的剂量率水平。监测数据记录存档。
- 5) 工作场所  $n$  剂量率水平监测点位：回旋加速器室周围的剂量率水平。监测数据记录存档。
- 6) 表面污染水平监测点位设置：每天工作结束后，对正电子同位素制备区场所台面、地面等进行表面污染监测，该项工作由实验室工作人员自行完成，监测数据记录存档。监测情况表见表 12.3-2 所示。

表 12.3-2 回旋加速器室及正电子同位素制备区监测情况表

序号	场所名称	监测点位	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	表面污染, $\text{Bq/cm}^2$	剂量率监测频次
1	回旋加速器室	热室			1 次/月
		地面			
		台面			
2	回旋加速器室	机房四周 (含防护门外)		/	$\gamma/n$ , 1 次/年

#### 12.4 辐射事故应急管理

北京大学已制定《北京大学辐射事故应急制度》。本项目实施后,北京大学将严格依据《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求,完善使用同位素和射线装置有关的管理制度,确保运行过程中的辐射安全。在应急预案中进一步明确规定处理的组织机构及其职责分工、事故分级、应急措施、报告程序、联系方式等内容,能够满足北京大学实际辐射工作的需要。

发生辐射事故时,应当立即启动本单位的辐射事故应急方案,采取必要防范措施,并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》,向当地生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的,还应同时向当地卫生健康行政部门报告。北京大学将每年至少组织一次应急演练。

#### 12.5 项目环保验收内容建议

建议本项目的环保验收内容列于表 12.5-1 中。

表 12.5-1 项目环境保护竣工验收内容

验收内容	验收要求
环保资料	本项目审批后的环境影响报告表、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。
辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定了相应的安全责任、制定了相应的规章制度等。
人员要求	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核,考核合格后上岗,并开展个人剂量监测。
剂量约束值和剂量率控制	根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)和环评报告建议,公众、职业照射剂量约束值执行 0.1mSv/a 和 2mSv/a。辐射工作场所周围屏蔽及防护门外 30cm 处(人员可达处)辐射剂量率不大于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ (手套箱/热室外表面非人员操作位的周围剂量当量率满足 10 $\mu\text{Sv/h}$ )。

电离辐射标志和中文警示	控制区出入口、回旋加速器室、废物暂存间等门上张贴电离辐射警示标识和中文说明
布局和屏蔽设计	回旋加速器室及正电子同位素制备区控墙体、屋顶、地板和防护门屏蔽射线的能力满足辐射防护的要求。
辐射安全设施	全部放射性工作场所实行分区管理、实体屏蔽、放射性警告标识和中文警示说明、工作状态指示灯、门禁系统、门灯联锁、辐射剂量监测等，落实本报告表表 10 中提出的各项辐射安全与防护措施。
辐射监测	有满足管理要求的辐射监测制度，每年进行辐射监测和开展自行监测，监测记录存档；1 台中子剂量当量监测仪、3 台便携式辐射剂量监测仪、2 台表面污染监测仪、2 台个人剂量报警仪、1 套 7 探头的固定式 $\gamma$ 射线辐射监测报警仪和 4 套固定式中子辐射监测报警仪。辐射工作人员进行个人剂量监测，建立健康档案。
规章制度	制定有相应的辐射安全防护制度，从业人员辐射安全培训制度、各项操作规程、设备检修维护制度、辐射防护和安全保卫制度、台账管理制度、环境监测及个人剂量监测制度，并有效贯彻落实。
应急预案	针对人员受照大剂量照射，以及导致环境污染后果等情景，建立有应急预案，并落实必要的应急装备，制定有辐射事故（件）应急演练计划。

## 表 13 结论与建议

### 13.1 结论

#### 13.1.1 正当性分析

北京大学本项目的应用通过医用回旋加速器制备并建立一套常规核素及固体靶核素制备及使用的核素体系，助力其他平台正电子核素放射性探针来源，最终可为医院、科研单位等提供放射性药物，可对放射性药物的新品开发做出贡献，在延缓病情、保证病人健康、挽救病人生命方面能起到十分重要的作用，具有良好的社会效益和经济效益，其获得的利益远大于辐射效应可能造成的损害，符合实践正当性原则，同时平台具备了技术、人员和经费等条件。

#### 13.1.2 选址合理性分析

本项目工作场所相对独立设置，功能齐全；各功能区布局上按照放射性区域与非放射性区域分别布置；设置工作人员通道、药物转运通道及放射性废物转运通道，工作人员进出放射性区域位置设置缓冲间，处入口设置门禁系统等。

将该回旋加速器室及正电子同位素制备区辐射工作场所划分为控制区和监督区管理，辐射工作场所设计布局充分考虑了周围场所的防护与安全，以及科研应用的便利性，其地址、建筑结构和布局设计基本合理，控制区和监督区划分明确，满足辐射工作场所安全使用的要求。

#### 13.1.3 辐射防护屏蔽能力分析

在设置辐射工作场所时已充分考虑了其性能和特点、周围工作场所的防护与安全，对辐射工作场所选址和布局设计进行了综合考虑，辐射工作场所屏蔽设计原则符合辐射工作场所使用和辐射防护安全的要求。

#### 13.1.4 辐射环境评价

(1) 根据场所周围关注点辐射剂量估算结果可知，本项目回旋加速器室及正电子同位素制备区场所运行后，场所控制区周围附加辐射剂量率满足  $2.5\mu\text{Sv/h}$ （手套箱/热室外表面非人员操作位的周围剂量当量率满足  $10\mu\text{Sv/h}$ ）的控制要求，预计工作人员和公众的年受照剂量均低于相应剂量约束限值（ $2\text{mSv/a}$ 、 $0.1\text{mSv/a}$ ），符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于“剂量限值”的要求。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况，单位应该进行调查并报生态环境部门备案。

## (2) 主要环境问题

本项目主要环境问题是电离辐射和放射性“三废”。

## (3) 放射性“三废”管理

运行过程中，放射性废水经暂存衰变后能够符合排放限值要求，最终解控为危险废物处置不会对周边环境造成不良影响；放射性固体废物将收集暂存，最终解控为危险废物处置，不会对周边环境造成不良影响。少量放射性气体经管道组织至排风机房，并经活性炭过滤器过滤后在楼顶排放，对环境影响十分轻微，可以忽略。

(4) 辐射安全防护管理：学校设有辐射防护领导小组，负责辐射安全管理和监督工作。按要求已制定的《北京大学辐射安全与防护管理办法》《辐射防护岗位职责》《北京大学涉源单位安全保卫职责规定》《北京大学辐射工作人员安全与职业健康管理实施细则》《北京大学放射性同位素与射线装置台账管理制度》《北京大学辐射安全事故应急预案》《北京大学废旧放射源和放射性废物管理和处置规定》，及相关学院的辐射安全和防护管理相关制度等并有效执行。本项目实施后，北京大学将结合新项目的开展，在重新申领辐射安全许可证前，组织相关人员完善相关制度，如《回旋加速器操作规程》《放射性同位素制备操作规程》《放射性废物暂存和解控管理规定》，还需对项目涉及的岗位职责、辐射安全和防护管理相关制度和监测方案等修订工作。

(5) 与《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》的规定对照检查，满足要求。

### 13.1.5 结论

综上所述，北京大学分子探针平台新增回旋加速器项目，相应的辐射安全制度和辐射防护措施基本可行，在落实项目实施方案和本报告表提出的污染防治措施及建议前提下，其运行对周围环境产生的辐射影响可控，符合环境保护的要求。故从辐射环境保护角度论证，本项目的运行是可行的。

### 13.2 承诺

为了保护环境，保障人员健康，北京大学承诺：

(1) 遵守有关法律、法规的规定，执行管理制度，落实管理责任。不违规操作和不弄虚作假。

(2) 妥善处理群众信访和投诉，做好公众宣传、解释和沟通工作；

(3) 辐射工作人员全部参加辐射安全与防护考核，考核合格后方可上岗，定期组织在岗人员参加辐射安全知识继续教育。

(4) 严格按照辐射监测方案定期对辐射工作场所和参与辐射工作的工作人员进行监测，并将监测记录保存留档；

(5) 项目竣工后，及时自行组织开展竣工环境保护验收。运行期间接受生态环境管理部门的监督检查。

## 表 14 审 批

下一级环保部门预审意见：

公 章

经办人

年 月 日

审批意见：

公 章

经办人

年 月 日

