

核技术利用建设项目
新增回旋加速器及配套设施项目
环境影响报告表

建设单位名称：北京大学（公章）

2021年2月

核技术利用建设项目
新增回旋加速器及配套设施项目
环境影响报告表

项目建设单位：北京大学

建设单位法人代表（签名或签章）：郝平

通讯地址：北京市海淀区颐和园路5号

邮政编码：100871

联系人：李恩敬

电子邮箱：hbb@pku.edu.cn

联系电话：010-62757558

目 录

表 1 项目基本情况.....	1
表 2 放射源.....	20
表 3 非密封放射性物质.....	21
表 4 射线装置.....	22
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）.....	24
表 6 评价依据.....	25
表 7 保护目标和评价标准.....	27
表 8 环境质量和辐射现状.....	30
表 9 项目工程分析和源项.....	32
表 10 辐射安全与防护.....	38
表 11 环境影响分析.....	45
表 12 辐射安全管理.....	61
表 13 结论与建议.....	66
表 14 审批.....	68
附图 1 本项目地理位置图.....	69
附图 2 项目周边关系图.....	70
附图 3 一层平面示意图.....	71
附图 5 三层平面示意图.....	73
附图 6 辐射工作场所剖面图.....	74
附图 7 一层辐射工作场所分区图.....	75
附图 8 二层辐射工作场所分区图.....	76
附图 9 一层辐射工作场所人流物流图.....	77
附图 10 二层辐射工作场所人流物流图.....	78
附图 11 回旋加速器辐射安全设备布置图.....	79

附图 12 二层热室辐射安全设备布置图.....	80
附图 13 本项目通风系统布置图.....	82
附图 14 本项目通风系统布置剖面图.....	83
附件 1 委托书.....	84
附件 2 辐射安全许可证.....	85
附件 3 辐射现状监测报告.....	129
附件 4 辐射工作人员基本情况及培训情况.....	136

表 1 项目基本情况

建设项目名称		新增回旋加速器及配套设施项目			
建设单位		北京大学			
法人代表	郝平	联系人	李恩敬	联系电话	62757558
注册地址		北京市海淀区颐和园路 5 号			
项目建设地点		北京大学技术物理大院			
立项审批部门		/		批准文号	/
建设项目总投资（万元）	1070	项目环保投资（万	265	环保投资比例	25%
项目性质		<input type="checkbox"/> 新建 <input checked="" type="checkbox"/> 改建 <input checked="" type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其他		占地面积（m ² ）	127
应用类型	放射源	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		
		使用	<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		
	非密封放射性物质	生产	<input checked="" type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物		
		销售	/		
	射线装置	使用	<input type="checkbox"/> 乙 <input checked="" type="checkbox"/> 丙		
		生产	<input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类		
		销售	<input type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类		
	其他	使用	<input checked="" type="checkbox"/> II 类 <input type="checkbox"/> III 类		
项目概述					
<p>1 单位概况</p> <p>北京大学创建于 1898 年，初名京师大学堂，是第一所国立综合性大学，也是当时中国的最高教育行政机关。辛亥革命后，于 1912 年改为现名。中华人民共和国成立后，全国高校于 1952 年进行院系调整，北京大学成为一所以文理基础教学和研究为主的综合性大学，为国家培养了大批人才。据不完全统计，北京大学的校友和教师</p>					

有近 400 位两院院士，中国人文社科界有影响的人士相当多也出自北京大学，并且产生了一批重大研究成果。

改革开放以来，北京大学进入了一个前所未有的大发展、大建设的新时期，并成为国家“211 工程”重点建设的两所大学之一。

北京大学位于京城西郊，占地 2661581 平方米（3992.277 亩）。现有 201 个博士点、244 个硕士点、101 个本科专业，以及覆盖 139 个专业的 35 个博士后流动站。北京大学拥有的教授、博士生导师、中科院院士及国家重点学科和国家重点实验室的数量均居全国高校之首。

2 建设项目概况

2.1 项目背景

北京大学化学与分子工程学院应用化学系为推动基础科研的进步，建设立足基础科研、面向临床应用的 PET 分子影像与放射化学平台。运用放射化学、核物理、化学生物学、合成化学、分子影像学和核医学等多个学科的技术和手段来发展原创性的放射性药物，切实推动我国精准医疗事业的发展。现阶段，将以解决临床实际问题为目的，发展新型 PET 分子探针以及 PET 影像引导下的精准医疗平台。在未来，也希望通过新 PET 探针的开发，在活体内探索与生命活动相关的分子机制，推动基础科研的进步。

PET 分子影像通常所需的放射性核素半衰期短，短时间内剂量减少快，还必须使用一些因半衰期极短无法购买的科研核素，因而需要一个稳定、可靠、及时的放射性同位素来源以保障放射性分子影像研究需求。小型回旋加速器体积小、易操作、安全可靠，是科研及医用放射性同位素的首选来源。

为此，北京大学拟新建放射性药物研究中心，用于 PET 分子影像与放射化学基础科研，拟新增一台回旋加速器并配套建设 PET 药物生产场所。该项目的建设有以下重大意义：

（1）目前，国际上主流医用核素的供应美国处于绝对的垄断地位，这对我国的经济社会发展造成巨大压力，亟需在该方面取得突破。该项目的实施，将带动我国在医用核素的制备及前沿研究领域的发展，为我国作最为基础的技术储备。

（2）北京大学应用化学系历史上曾培养数十名的两院院士与两弹元勋，是我国核工业人才的摇篮之一，本项目的实施，是对应化系核技术体系的补充与完善，无论

对于化学本科生的核技术兴趣的培养，亦或是对化学研究生、博士生完整培养体系的构建，都发挥着重要作用。

(3) 新核素的相关研究，也在进一步地催生着交叉学科的发展，其对新型材料的研发、生命科学的前沿问题以及医疗健康的发展都有巨大的促进作用。

2.2 项目位置与周围环境

本项目回旋加速器及其配套 PET 药物生产场所位于北京大学技术物理大院（以下简称“技物楼”）放射性药物研究中心，放射性药物研究中心为一栋三层独立建筑，位于技物楼的西北角，其东侧为北京大学射频超导实验室，南侧为北京大学等离子体实验室，西侧为北京科峰公寓，西北侧为中国科学院化学所，北侧为中国科学院过程工程物理所，本项目地理位置图、项目周边关系图见附图 1、附图 2。由附图 1 和附图 2 可知，本项目辐射工作场所 50 米评价范围无自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象。

本项目新增回旋加速器拟放置于放射性药物研究中心一层，配套 PET 药物生产场所拟设置于放射性药物研究中心二层，三层为通风机房，放射性药物研究中心一层、二层和三层平面布局图见附图 3-附图 5。

2.3 改扩建场所的历史情况

拟建放射性药物研究中心，由镭铍中子源实验室拆除后新建而成。

拟建场所的历史情况：原有一枚 Ra-226/Be 中子源，活度为 500 毫居，属于 IV 类放射源。镭铍中子源 1986 年 4 月 30 日在北大建账，为学校放射化学、核物理教学工作的开展而建立的，平时中子源在地下 3 米处，有水泥和水做屏蔽，使用时升起可以活化照射样品。2001 年以前由技术物理系管理，2001 年院系调整后由物理学院技物系管理。2012 年起，该中子源由化学学院应用化学系放射化学实验室管理。该放射源用于教学科研。2017 年 5 月起停止使用。2017 年 7 月 13 日放射源移交至北京城市放射性废物库。

2.4 项目建设内容

本项目拟新增一台回旋加速器并配套建设 PET 药物生产场所。

(1) 14MeV 回旋加速器

新增一台回旋加速器，束流：负氢离子；束流能量：14MeV；引出束流强度：0~300 μ A，属于 II 类射线装置。

(2) 丙级非密封源工作场所

新建配套的 PET 药物生产场所，在热室内进行制备、分装，共操作 4 种核素：F-18、Cu-64、Zr-89、Y-86，该场所的日等效操作量及等级见表 1-1，最大为 1.85E+07Bq，小于 2E+07Bq，属于丙级非密封源工作场所。

表 1-1 制备和分装非密封源工作场所分级

核素名称	日最大操作量 (Bq)	年最大操作量 (Bq)	毒性组别	毒性组别修正因子	操作方式*	理化性质	操作方式修正因子	日等效操作量 (Bq)
F-18	1.85E+09	4.63E+11	低毒	0.01	简单	液态	1	1.85E+07
Cu-64	1.85E+09	4.63E+11	低毒	0.01	简单	液态	1	1.85E+07
Zr-89	1.85E+08	4.63E+10	中毒	0.1	简单	液态	1	1.85E+07
Y-86	3.70E+07	9.26E+09	中毒	0.1	简单	液态	1	3.70E+06
日等效最大操作量**								1.85E+07
非密封源工作场所级别（丙级：豁免活度值以上~2E+7）								丙级
*：本项目对非密封物质的主要操作是：液态样品的制备、分装，根据《辐射防护手册-辐射安全》（第三分册）第 143 页对操作类型具体方式的举例，为简单的操作。								
**：每天只操作一种核素。								

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021），本项目新增 II 类射线装置和丙级非密封源工作场所，需编制环境影响报告表。因此，中国原子能科学研究院受北京大学委托，负责本项目的环评工作（委托书见附件 1）。

2.5 人员配置情况

本项目拟配备 5 名辐射工作人员，拟在本项目中承担的工作见表 1-2。

表 1-2 本项目辐射工作人员配制计划

序号	姓名	性别	辐射防护考核时间	证书编号	在本项目中的工作
1	刘志博	男	2017.05	D1702201	项目运行、项目直接责任人
2	韩宇翔	男	2017.05	D1702200	PET 药物的合成 加速器运行
3	徐梦欣	女	2017.05	D1702202	PET 药物合成
4	傅群峰	男	2017.05	D1702203	加速器运行、核素分离
5	陈俊艺	男	2017.11	D1703158	加速器靶的准备、核素分离

2.6 公示情况

为了了解受影响的公众说明情况，北京大学对本项目环境影响评价范围内涉及的单位：中科院过程工程研究所，采用发放项目资料，实地走访等形式，保障公众的参与权。经过互动沟通，中科院过程工程研究所给予不反对本项目建设的意见，公众参与意见表见图 1-1。

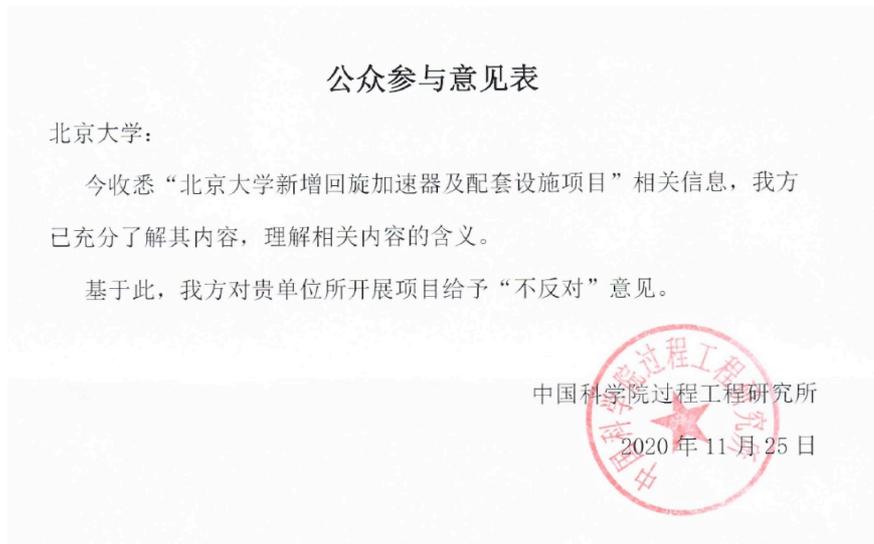


图 1-1 公众参与意见表

本项目于 2021 年 1 月 8 日至 2021 年 1 月 15 日在中国科学院化学所、北京科峰公寓门口张贴了本项目环境影响报告表公众意见征求公告，至意见反馈截止日期，未收到本项目环境影响和环境保护措施相关的建议和意见，公告现场张贴图见图 1-2 和图 1-3。



图 1-2 北京科峰公寓门口公告张贴现场图



图 1-3 中国科学院化学所门口公告张贴现场图

3 核技术及辐射安全管理现状

3.1 核技术利用现状

北京大学于 2020 年 3 月重新申领了辐射安全许可证（国环辐证[00176]，见附件 2），其种类和范围为：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，丙级非密封放射性物质工作场所。

（1）密封源

北京大学使用的密封源具体情况见表 1-3。

表 1-3 北京大学使用密封源明细

序号	核素	活度(贝可)×枚数	类别	场所	用途
1	Mn-54/Co-60/ Cs-137	7.03E+05×1 枚	V	核物理实验室	其它
2	Am-241	2.04E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
3	Sr-90	1.00E+06×1 枚	V	应用化学系放射性开放 实验室	科研实验
4	Co-60	1.52E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
5	Am-241	9.33E+04×1 枚	V	应用化学系放射性开放 实验室	科研实验
6	Am-241	2.70E+04×1 枚	V	应用化学系放射性开放 实验室	科研实验
7	Cs-137	1.26E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
8	Pu-238	7.40E+08×1 枚	IV	基础物理实验中心	科研实验
9	Am-241/Be	1.20E+06×1 枚	V	核物理与核技术国家重 点实验室	科研实验
10	Co-60	1.11E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
11	Tl-204	1.55E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
12	Co-60	1.00E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
13	Co-60	1.85E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
14	Co-60	1.58E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
15	Pu-238	3.70E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
16	Cs-137	1.85E+05×1 枚	V	钴源室	科研实验
17	Co-60	1.11E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
18	Cs-137	1.85E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
19	Tl-204	1.51E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
20	Cs-137	1.85E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
21	Am-241	5.53E+04×1 枚	V	应用化学系放射性开放 实验室	科研实验
22	Cs-137	6.96E+04×1 枚	V	核物理与核技术国家重 点实验室	科研实验
23	Am-241	4.38E+07×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
24	Pu-238	3.70E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
25	Am-241	1.00E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
26	Pu-238	3.70E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
27	Pu-239	1.11E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
28	Pu-239	1.11E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
29	Pu-239	1.11E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
30	Cf-252	2.40E+06×1 枚	V	核物理与核技术国家重 点实验室	科研实验
31	Pu-238	3.70E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
32	Cs-137	7.40E+05×1 枚	V	科技考古与文物保护实 验室	科研实验
33	Fe-55	4.81E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
34	Am-241	5.13E+04×1 枚	V	核物理与核技术国家重 点实验室	科研实验

35	Cs-137	2.85E+04×1 枚	V	核物理与核技术国家重点实验室	科研实验
36	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
37	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
38	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
39	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
40	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
41	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
42	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
43	Sr-90/Y	3.70E+07×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
44	Sr-90	3.70E+09×1 枚	V	科技考古与文物保护实验室	科研实验
45	Cm-244	1.85E+07×1 枚	V	科技考古与文物保护实验室	科研实验
46	Co-60	3.70E+07×1 枚	V	科技考古与文物保护实验室	科研实验
47	Pu-239	1.21E+05×1 枚	V	核物理与核技术国家重点实验室	科研实验
48	Cm-244	1.85E+07×1 枚	V	科技考古与文物保护实验室	科研实验
49	Cs-137	1.63E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
50	Cs-137	1.85E+05×1 枚	V	钴源室	科研实验
51	Mn-54,Co-60, Cs-137	2.40E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
52	Co-60	1.60E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
53	Co-60	3.70E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
54	Co-60	1.03E+06×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
55	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
56	Co-60	1.06E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
57	Cs-137	1.24E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
58	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
59	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
60	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
61	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
62	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
63	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
64	Cs-137	3.70E+04×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
65	Cs-137	1.25E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
66	Am-241	1.07E+07×1 枚	V	环境学院辐射实验室	科研实验
67	Pu-238	1.11E+09×1 枚	IV	核物理实验室	科研实验
68	Fe-55	1.48E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
69	Cs-137	7.40E+08×1 枚	V	基础物理实验中心	科研实验
70	Fe-55	1.48E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
71	Fe-55	1.48E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
72	Sr-90	1.48E+09×1 枚	V	环境学院辐射实验室	科研实验
73	Cs-137	7.73E+04×1 枚	V	应用化学系放射性开放实验室	科研实验
74	Cs-137	1.18E+05×1 枚	V	应用化学系放射性开放实验室	科研实验

75	Co-60	1.10E+05×1 枚	V	应用化学系放射性开放实验室	科研实验
76	Cs-137	1.55E+05×1 枚	V	应用化学系放射性开放实验室	科研实验
77	Am-241	4.38E+04×1 枚	V	核物理与核技术国家重点实验室	科研实验
78	Cs-137	3.70E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
79	Kr-85	7.40E+07×1 枚	V	环境模拟与污染控制国家重点联合实验室	科研实验
80	Sr-90	1.48E+09×1 枚	V	科技考古与文物保护实验室	科研实验
81	Sr-90	2.96E+09×1 枚	V	环境学院辐射实验室	科研实验
82	Am-241	1.07E+07×1 枚	V	科技考古与文物保护实验室	科研实验
83	Kr-85	3.70E+08×1 枚	V	环境模拟与污染控制国家重点联合实验室	科研实验
84	Kr-85	3.70E+08×1 枚	V	环境模拟与污染控制国家重点联合实验室	科研实验
85	Co-60	5.365E+14×1 枚	I	钴源室	科研实验
86	Co-60	5.365E+14×1 枚	I	钴源室	科研实验
87	Cs-137	3.70E+08×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
88	Am-241	1.48E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
89	Co-57	1.85E+08×1 枚	V	基础物理实验中心	穆斯堡尔谱仪
90	Am-241	1.40E+05×1 枚	V	核物理与核技术国家重点实验室	科研实验
91	Am-241	1.40E+04×1 枚	V	核物理与核技术国家重点实验室	科研实验
92	Co-60	3.70E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
93	Cs-137	3.70E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
94	Co-60	3.70E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
95	Co-60	3.70E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
96	Co-60	3.70E+05×1 枚	V	核物理实验室	科研实验
97	Co-60	3.70E+05×1 枚	V	核物理与核技术国家重点实验室	科研实验
98	Co-60	4.11E+14×1 枚	I	钴源室	科研实验
99	Co-60	4.18E+14×1 枚	I	钴源室	科研实验
100	Sr-90	1.85E+09×1 枚	V	环境学院辐射实验室	科研实验

(2) 非密封源

北京大学已许可的非密封放射性物质活动种类和范围见表 1-4，均属于丙级非密封放射性物质工作场所。

表 1-4 北京大学许可使用的非密封放射性物质

序号	场所名称	场所等级	核素	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	活动种类
----	------	------	----	---------------	------------	------

1	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Zr-95	1.00E+07	3.00E+10	使用
2	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Zr-89	1.85E+07	4.63E+10	使用
3	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Y-90	1.00E+07	3.00E+10	使用
4	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Y-86	1.85E+07	4.63E+10	使用
5	应用化学系放射性开放实验室	丙级	W-188/Re-188	1.00E+06	1.00E+09	使用
6	应用化学系放射性开放实验室	丙级	V-48	1.00E+05	1.00E+08	使用
7	应用化学系放射性开放实验室	丙级	U-天然	1.00E+07	3.00E+10	使用
8	应用化学系放射性开放实验室	丙级	U-238	1.00E+06	1.00E+10	使用
9	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Tm-170	1.00E+07	3.00E+10	使用
10	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Th-天然	1.00E+07	2.00E+11	使用
11	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Tc-99m	1.00E+07	2.00E+11	使用
12	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Tc-99	1.00E+07	2.00E+11	使用
13	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Sr-89	1.00E+07	3.00E+10	使用
14	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Sr-85	1.00E+07	3.00E+10	使用
15	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Sr-82	1.85E+07	4.63E+10	使用
16	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Sn-133(In-133m)	1.00E+07	2.00E+11	使用
17	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Sm-153	1.00E+07	3.00E+10	使用
18	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Se-79	1.00E+07	2.00E+11	使用
19	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Se-75	1.00E+07	3.00E+10	使用
20	应用化学系放射性开放实验室	丙级	S-35	1.00E+07	3.00E+10	使用
21	应用化学系放射性开放实验室	丙级	S-35	1.00E+07	3.00E+10	使用
22	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Re-188	1.00E+07	3.00E+10	使用
23	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Re-186	1.00E+07	3.00E+10	使用
24	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ra-223	1.85E+07	4.63E+08	使用
25	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Pd-103/Rh-103m	1.00 E+06	1.00E+09	使用

26	应用化学系放射性开放实验室	丙级	P-32	1.00E+07	3.00E+10	使用
27	生命科学学院公用同位素室	丙级	P-32	1.00E+07	3.00E+10	使用
28	应用化学系放射性开放实验室	丙级	P-32	1.00E+07	3.00E+10	使用
29	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Nd-147	1.00E+07	3.00E+10	使用
30	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Mo-99	1.00E+07	1.10E+11	使用
31	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Mn-56	1.00E+06	1.00E+09	使用
32	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Lu-177	1.00E+06	1.00E+09	使用
33	应用化学系放射性开放实验室	丙级	In-111	1.00E+06	1.00E+09	使用
34	应用化学系放射性开放实验室	丙级	I-131	1.00E+07	3.00E+10	使用
35	应用化学系放射性开放实验室	丙级	I-129	1.00E+07	2.00E+11	使用
36	应用化学系放射性开放实验室	丙级	I-126	1.85E+07	4.63E+09	使用
37	应用化学系放射性开放实验室	丙级	I-125	1.00E+07	3.00E+10	使用
38	应用化学系放射性开放实验室	丙级	I-124	1.85E+07	4.63E+10	使用
39	应用化学系放射性开放实验室	丙级	I-123	1.00E+07	2.00E+11	使用
40	应用化学系放射性开放实验室	丙级	I-121	1.00E+07	2.00E+11	使用
41	应用化学系放射性开放实验室	丙级	H-3	1.00E+06	2.00E+10	使用
42	生命科学学院公用同位素室	丙级	H-3	1.00E+06	2.00E+10	使用
43	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ge-68	1.85E+07	4.63E+10	使用
44	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ge-68	1.00E+06	1.00E+09	使用
45	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ga-68	1.85E+07	2E+11	使用
46	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ga-68	1.00E+05	1.00E+09	使用
47	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ga-67	1.00E+07	2.50E+10	使用
48	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ga-66	1.00E+07	2.50E+10	使用
49	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Fe-59	1.00E+07	3.00E+10	使用
50	应用化学系放射性开放实验室	丙级	F-18	1.85E+07	2.00E+11	使用

51	应用化学系放射性开放实验室	丙级	F-18	1.00E+07	2.00E+11	使用
52	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Eu-154	1.00E+06	1.00E+08	使用
53	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Eu-152	1.00E+06	1.00E+08	使用
54	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Er-169	1.00E+07	3.00E+10	使用
55	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Cu-64	1.00E+07	2.00E+11	使用
56	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Cu-61	1.00E+07	2.00E+11	使用
57	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Cs-134	1.00E+07	3.00E+10	使用
58	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Cr-51	1.00E+06	1.00E+10	使用
59	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Co-60	1.00E+07	3.00E+09	使用
60	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Cl-36	1.00E+07	3.00E+10	使用
61	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ce-141	1.00E+07	3.00E+10	使用
62	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ca-45	1.00E+06	1.00E+09	使用
63	应用化学系放射性开放实验室	丙级	C-14	1.00E+07	2.00E+11	使用
64	生命科学学院公用同位素室	丙级	C-14	3.70E+06	7.40E+09	使用
65	应用化学系放射性开放实验室	丙级	C-11	1.85E+07	4.63E+09	使用
66	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Br-76	1.00E+07	2.50E+10	使用
67	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Bi-213	1.85E+07	4.63E+09	使用
68	应用化学系放射性开放实验室	丙级	Ac-225	1.85E+07	4.63E+08	使用

(3) 射线装置

北京大学使用的射线装置明细见表 1-5。

表 1-5 北京大学使用的射线装置明细

序号	装置名称	规格型号	类别	用途	场所
1	X 射线衍射仪	GADSD8 discover	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
2	X 射线成像仪	DZPHASER	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室

3	X 射线衍射仪	D8 GADDS	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
4	X 射线衍射仪	Dmax/2400	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
5	X 射线衍射仪	BrukerD8 Advance	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
6	X 射线衍射仪	PANalytical X'pert 3	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
7	X 射线衍射仪	MultiFlux	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
8	X 射线衍射仪	D/max-pc2500	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
9	X 射线衍射仪	KappaCCD	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
10	X 射线衍射仪	X'pert Pro	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
11	X 射线衍射仪	XRD-6000	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
12	X 射线衍射仪	ProtumR	III	X 射线衍射仪	生命科学学院衍射仪室
13	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
14	材料衍射仪	X'Pert MRD	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
15	材料衍射仪	X'Pert MRD	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
16	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
17	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
18	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
19	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
20	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
21	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
22	X 射线装置	554 81	III	X 射线衍射仪	物理学院III类射线装置实验室
23	X-荧光能谱仪	QuanX/ECD	III	教学科研	科技考古与文物保护实验室
24	便携式变频充气 X 射线探伤机	XXQ-2005	II	教学科研	科技考古与文物保护实验室
25	X 射线衍射仪	BdX3200	III	教学科研	物理学院III类射线装置实验室
26	牙片机	Expert DC	III	口腔（牙科）X 射线装置	校医院

27	牙片机	X-MIND	III	口腔（牙科）X 射线装置	校医院
28	牙片机	X-MIND	III	口腔（牙科）X 射线装置	校医院
29	牙片机	Expert DC	III	口腔（牙科）X 射线装置	校医院
30	加速器	串列静电 NEC5SDH-2	II	粒子能量小于 100 兆电子伏的 非医用加速器	核物理与核技术国 家重点实验室
31	RFQ 加速器	ISR-RFQ-1000	II	粒子能量小于 100 兆电子伏的 非医用加速器	核物理与核技术国 家重点实验室
32	4.5 加速器	单级静电	II	粒子能量小于 100 兆电子伏的 非医用加速器	核物理与核技术国 家重点实验室
33	2X6 加速器	串列静电	II	粒子能量小于 100 兆电子伏的 非医用加速器	核物理与核技术国 家重点实验室
34	RFQ 加速器 中子照相装 置	自制	II	粒子能量小于 100 兆电子伏的 非医用加速器	核物理与核技术国 家重点实验室
35	X 光机	IXS080BP056P064	III	其他不能被豁免 的 X 射线装置： 教学科研	核物理与核技术国 家重点实验室
36	小角 X 光散 射仪	SAXSess	III	其他不能被豁免 的 X 射线装置： 教学科研	化学与分子工程学 院射线装置实验室
37	X 射线荧光 光谱仪	S4—Explorer	III	其他不能被豁免 的 X 射线装置： 教学科研	化学与分子工程学 院射线装置实验室
38	多功能成像 电子能谱仪	AXIS Ultra	III	其他不能被豁免 的 X 射线装置： 教学科研	化学与分子工程学 院射线装置实验室
39	小型动物 CT	Oxford Instrumen Microfocus	III	其他不能被豁免 的 X 射线装置： 教学科研	实验动物中心
40	曲面断层	PM2002	III	其他不能被豁免 的 X 射线装置： 医疗诊断	校医院
41	数字曲面断 层	Gnedex Drthoralix9200	III	其他不能被豁免 的 X 射线装置： 医疗诊断	校医院
42	X 射线生物 学辐照仪	美国 RS2000 型	II	其它非医用加速 器	生命科学学院射线 装置实验室
43	DSA	Artis U	II	血管造影用 X 射 线装置	校医院
44	数字胃肠机	OD	III	医疗诊断	校医院

45	单螺旋 CT	CT/e	III	医用 X 射线计算机断层扫描 (CT) 装置	实验动物中心
46	64 排 CT	SOMATOM	III	医用 X 射线计算机断层扫描 (CT) 装置	校医院
47	乳腺机	700T	III	医用诊断 X 射线装置	校医院
48	1.3GHz 超导粒子加速器	自制	II	粒子能量小于 100 兆电子伏的非医用加速器	核物理与核技术国家重点实验室：技术物理大院
49	X 射线衍射仪	X'Pert Pro MPD	III	X 射线衍射仪	地球与空间科学学院射线装置实验室
50	X 射线荧光光谱仪	ARL ADVANT'XP+	III	其他不能被豁免的 X 射线装置：教学科研	地球与空间科学学院射线装置实验室
51	X 射线衍射仪	SuperNova	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
52	X 射线衍射仪	XtaLAB-PRO	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
53	X 射线衍射仪	D8 ADVANCE	III	X 射线衍射仪	物理学院 III 类射线装置实验室
54	X 射线衍射仪	D8 DISCOVER	III	X 射线衍射仪	物理学院 III 类射线装置实验室
55	骨密度仪	OSTEOVIEW	III	医疗诊断 X 射线装置	校医院
56	电子枪	EFG-HL50-1W	III	其他不能被豁免的 X 射线装置：教学科研	地球与空间科学学院射线装置实验室
57	台式 X 射线衍射仪	DZPHASER	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
58	X 射线光电子能谱仪	AXIS SUP2A	III	其他不能被豁免的 X 射线装置：教学科研	化学与分子工程学院射线装置实验室
59	高分辨粉末 X 射线衍射仪	PANalytical Empyrean	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室
60	X 射线微焦斑单晶衍射仪	SuperNova	III	X 射线衍射仪	生命科学学院衍射仪室
61	X 射线衍射仪	Miniflex600	III	X 射线衍射仪	物理学院 III 类射线装置实验
62	牙科 X 射线机(其他)	NewTomVGi	III	口腔 (牙科) X 射线装置	校医院
63	X 射线衍射仪	D8 ADVANCE	III	X 射线衍射仪	工学院射线装置实验室
64	DR	BR-121M	III	医用诊断 X 射线装置	校医院
65	DR	BR-120M	III	医用诊断 X 射线装置	校医院

66	智能 X 射线衍射仪	SmartLab 9kW	III	X 射线衍射仪	工学院射线装置实验室：技物楼东 106
67	X 射线晶体衍射仪	XtaLab Pro	III	X 射线衍射仪	工学院射线装置实验室：技物楼东 106
68	X 射线衍射仪	RAPID-S	III	X 射线衍射仪	化学与分子工程学院射线装置实验室：技物楼 150-11
69	小动物 PET/CT	Mediso	III	兽用 X 射线装置	应用化学系放射性开放实验室：技物楼 150-3

3.2 环保审批的履行情况

北京大学 2018~2020 年期间，申请的辐射项目及履行环保审批情况见表 1-6。

表 1-6 北京大学近三年履行环保审批情况

序号	项目名称	备案号
1	北京大学使用射线装置项目(2018)	201811010800002794
2	北京大学使用射线装置项目（2020）	202011010800003674

3.3 辐射安全管理现状

3.3.1 辐射管理机构

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 1-7。

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。

表 1-7 辐射安全与环境保护管理机构

机构名称		北京大学辐射防护领导小组			
联系人		姓名	李恩敬	电话	62757558
		Email	hbb@pku.edu.cn		
序号	管理人员	姓名	职务或职称	工作部门	专/兼职
1	组长	龚旗煌	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	孙智利	副院长	工学院	兼职

8	成员	刘德英	党委书记	生命科学学院	兼职
9	成员	李焱	副院长	物理学院	兼职
10	成员	李恩静	主任	环境保护办公室	专职
11	成员	杨跃平	副部长	保卫部	兼职
12	成员	张海	副院长	考古文博学院	兼职
13	成员	张剑波	党委副书记	环境科学与工程学院	兼职
14	成员	吴军	副部长	房地产管理部	兼职
15	成员	金鑫	副院长	城市与环境学院	兼职
16	成员	崔宏伟	副处长	医学部设备与实验室管理处	兼职
17	成员	谢冰	副院长	信息科学技术学院	兼职
18	成员	顾红雅	副院长	生命科学学院	兼职

3.3.2 规章制度及落实情况

北京大学已经制定了比较完善的安全管理制度，并严格按照规章制度执行：

- (1) 《北京大学辐射安全与防护管理办法》；
- (2) 《辐射防护岗位职责》；
- (3) 《北京大学涉源单位安全保卫职责规定》；
- (4) 《北京大学辐射工作人员安全与职业健康管理实施细则》；
- (5) 《北京大学放射性同位素与射线装置台帐管理制度》；
- (6) 《北京大学辐射安全事故应急预案》；
- (7) 《北京大学废旧放射源和放射性废物管理和处置规定》；
- (8) 《化学与分子工程学院放射安全和防护管理相关制度》；
- (9) 《物理学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- (10) 《生命科学学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- (11) 《城市与环境学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- (12) 《环境科学与工程学院辐射安全和防护管理制度》；
- (13) 《考古文博学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- (14) 《实验动物中心辐射安全与防护管理制度》；
- (15) 《工学院放射安全和防护管理相关制度》；
- (16) 《地空学院放射安全和防护管理相关制度》；
- (17) 《北京大学医院放射安全和防护管理相关制度》。

3.3.3 人员培训

北京大学规定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 83 名，全部工作人员已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。

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，监测频度为每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。2019年度辐射工作人员的个人剂量检测结果为(0.01~1.14) mSv，低于北京大学辐射项目的剂量约束值2mSv/a，说明北京大学采取的辐射防护和安全管理措施是可行的。本项目辐射工作人员均为已有辐射工作人员，个人剂量检测结果见表1-8。

表1-8 2019年度本项目辐射工作人员的个人剂量检测结果

序号	姓名	个人剂量年度值, mSv
1	刘志博	0.26
2	韩宇翔	0.21
3	徐梦欣	0.33
4	傅群峰	0.18
5	陈俊艺	0.89

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。

3.3.6 监测仪器和防护用品

北京大学的215名放射操作人员都配有个人剂量计(除83名老师外，其余为学生)。北京大学配置的辐射监测仪器和防护用品情况见表1-9，能够满足现在工作的需要。

表1-9 现有辐射监测仪器和防护用品

序号	仪器名称	型号	购置日期	仪器状态	数量
1	个人剂量仪	PM1621	20060601	正常	1
2	X-γ报警仪	FJ376G	20091201	正常	1
3	固定多路式监测报警器	RMS5120	20091201	正常	1
4	环境中子监测器	ENM3	20001101	正常	3
5	便携式巡检谱仪	GR-135	20060601	正常	1
6	γ剂量仪探头	DG1305	20091201	正常	1
7	工作场所γ监测器	AGM3	20001101	正常	4
8	红外对射防盗系	ALEPH	20030901	正常	1
9	γ剂量仪探头	DG1305	20091201	正常	1
10	中子雷姆探测器	FJ1903A	20091201	正常	1
11	个人剂量仪	PM1621	20060601	正常	1

12	个人剂量仪	PM1208	20060601	正常	1
13	手持式多功能沾污计量仪	Inspector Alert	20060401	正常	1
14	手持式碘化钠多道分析仪	ESPEC-2	20010101	正常	1
15	X- γ 个人剂量率仪	FJ-1	20010101	正常	1
16	中子雷姆探测器	FJ1903A	20091201	正常	1
17	大面积 $\beta+\gamma$ 检查仪	FJ-402	20010101	正常	1
18	便携式 γ 监测器	1692	20010101	正常	1
辐射防护用品					
名称		数量		名称	数量
铅衣		30		铅帽	0
铅手套		2		铅眼镜	2
铅围裙		2		铅围脖	0
铅屏风		1		--	--

3.3.7 辐射事故应急管理

北京大学制定了《放射源和射线装置意外事故应急准备与响应计划》，预案中明确了应急指挥机构、人员组成及分工、应急部门及人员职责、应急器材，发生辐射事故时的报告、通讯联络方式、应急处置方式等。

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)	年最大操作量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式和地点
1	F-18	液态	生产、使用	1.85E+09	1.85E+07	4.63E+11	科研	简单操作	PET 药物生产场所	热室铅柜
2	Cu-64	液态	生产、使用	1.85E+09	1.85E+07	4.63E+11	科研	简单操作	PET 药物生产场所	热室铅柜
3	Zr-89	液态	生产、使用	1.85E+08	1.85E+07	4.63E+10	科研	简单操作	PET 药物生产场所	热室铅柜
4	Y-86	液态	生产、使用	3.70E+07	3.70E+06	9.26E+09	科研	简单操作	PET 药物生产场所	热室铅柜
/										

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

表 4 射线装置

(一) 加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各类加速器

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 台	CYCIAE-14	H ⁻	14	0.3mA	制备 PET 核素	放射性药物研究中心一层	/
/										

(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
无									
/									

(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	贮存情况	数量	
无													
/													

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放总量	年排放量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
活化气体	气态	Ar-41、C-11 和 O-15 等	/	/	/	/	/	经过滤后排入大气
靶片、靶室零件	固体	/	/	/	/	/	加速器室废物坑	在加速器室废物坑暂存超过 10 个半衰期后申请解控，经监测达到解控水平后按一般化学废弃物处理
实验容器（滴管、离心管）、核素纯化树脂、注射器、移液枪头、实验手套等劳保用品	固体	F-18、Cu-64、Zr-89、Y-86	/	/	/	/	热室南侧铅柜下腔	暂存超过 10 个半衰期后申请解控，经监测达到解控水平后按一般化学废弃物处理
放射性废液	液态	F-18、Cu-64、Zr-89、Y-86	/	/	/	/	先收集在废液瓶，待废液瓶收集满后暂存在热室南侧铅柜下腔	热室铅柜内暂存，待暂存 10 个半衰期后申请解控，经监测达到解控水平后按普通化学废液处理

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

表 6 评价依据

<p>法规</p> <p>文件</p>	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》2015 年 1 月 1 日；</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》2018 年 12 月 29 日；</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》2003 年 10 月 1 日；</p> <p>(4) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709，2019 年 3 月 22 日修正版）；</p> <p>(5) 《建设项目环境保护管理条例》国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日；</p> <p>(6) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2019 年第三次修正）；</p> <p>(7) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环境保护部第 18 号令，2011 年 5 月 1 日；</p> <p>(8) 《建设项目环境影响评价分类管理名录》(生态环境部部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日起施行)；</p> <p>(9) 《关于发布放射源分类办法的公告》，国家环境保护总局公告 2005 年第 62 号，2005 年 12 月 23 日；</p> <p>(10) 《关于发布<射线装置分类>的公告》，环境保护部 国家卫生和计划生育委员会 公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日；</p> <p>(11) 《关于发布<放射性废物分类>的公告》，环境保护部 工业和信息化部 国家国防科技工业局 公告 2017 第 65 号，2018 年 1 月 1 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；</p> <p>(13) 《关于做好辐射类建设项目竣工环境保护验收工作的通知》，京环办[2018]24 号。</p>
<p>技术</p> <p>标准</p>	<p>(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；</p> <p>(2) 《辐射环境监测技术规范》（HJ/T 61-2001）；</p> <p>(3) 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）；</p>

	<p>(4) 《放射性废物管理规定》(GB14500-2002);</p> <p>(5) 《粒子加速器辐射防护规定》(GB5172-85);</p> <p>(6) 《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010);</p> <p>(7) 《X、γ外照射个人监测规定》(EJ 1153-2004);</p> <p>(8) 《低、中水平放射性固体废物暂时储存规定》(GB11928-1989);</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》(GBZ2.1-2007);</p> <p>(10) 《环境空气质量标准》(GB3095-2012);</p> <p>(11) 《粒子加速器工程设施辐射防护设计规范》(EJ346-1988)。</p>
其他	<p>(1) 建设单位提供的相关技术资料。</p> <p>(2) 《NCRP NO.144 radiation protection for particle accelerator facilities》.</p> <p>(3) 李星洪.《辐射防护基础》.原子能出版社.</p> <p>(4) 夏益华, 陈凌.《高等电离辐射防护教程》.哈尔滨工程大学出版社.</p> <p>(5) 李德平, 潘自强.《辐射防护手册 第一分册》.原子能出版社.</p> <p>(6) 《RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK 2002》.</p>

表 7 保护目标和评价标准

1 评价范围

本项目新增 II 类射线装置和丙级非密封源工作场所，根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）中的规定，本项目评价范围取放射性药物研究中心辐射工作场所屏蔽墙外 50m 的范围。



图 7-1 本项目评价范围图

2 评价目的

通过对本项目内容进行分析和估算，以期达到以下目的：

- (1) 对建设项目环境辐射现状进行调查及辐射环境现状进行监测；
- (2) 评价项目在运行过程中对工作人员及周围公众所造成的辐射影响；
- (3) 评价辐射防护措施效果，提出减少辐射危害的措施。

3 保护目标

本项目新增新增 II 类射线装置和丙级非密封源工作场所位于放射性药物研究中心一层和二层，放射性药物研究中心位于技术楼的西北角，技术楼地理位置

见附图 1，本项目的评价范围为回旋加速器机房周围 50m 的区域，见附图 2。新增辐射工作场所周边环境情况及保护目标分布见表 7-1。

表 7-1 环境保护目标一览表

序号	辐射工作场所	方位	周围场所	相对距离	人员类别	规模	保护要求,
1	回旋加速器室	东侧	控制室	/	工作人员	5 人	2 mSv/a
		南侧	院内道路	1m	公众	/	0.1 mSv/a
		西侧	院墙	1m	/	/	/
		北侧	院墙	1m	/	/	/
		楼上	屋顶	/	/	/	/
		楼下	/	/	/	/	/
2	热室	东侧	气闸 1、穿衣洁净间	/	工作人员	5 人	2 mSv/a
		南侧	/	/	/	/	/
		西侧	加速器室	/	/	/	/
		北侧	气闸 2	/	工作人员	2 人	2 mSv/a
		楼上	通风机房	/	工作人员	2 人	2 mSv/a
		楼下	加速器室迷道	/	/	/	/
3	放射性药物研究中心	东侧	北大射频超导实验室	5m	公众	50 人	0.1 mSv/a
		南侧	北大等离子体实验室	1m	公众	50 人	0.1 mSv/a
		西侧	科峰公寓	13m	公众	300 人	0.1 mSv/a
		北侧	中科院过程物理所	1m	公众	1000 人	0.1 mSv/a
		楼上	无	/	/	/	/
		楼下	无	/	/	/	/

4 评价标准

(1) 剂量限值

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定，工作人员的**职业照射**和**公众照射**的剂量限值如下。

① 职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：审管部门决定连续 5 年的平均有效剂量（但不可作为任何追溯性平均），20mSv。任何一年中的有效剂量不超过 50mSv。

② 公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值：年有效剂量：1mSv。

(2) 剂量约束值

综合考虑到核技术利用现状和项目所在的地点，对本项目工作人员的剂量约束值取 2mSv/a，公众的剂量约束取 0.1mSv/a。

(3) 屏蔽体外剂量率控制水平

回旋加速器机房四周墙外和入口门外 30cm 处附加辐射剂量率均采用 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制值。

(4) 表面污染控制水平

工作人员体表、内衣、工作服、以及工作场所的设备和地面等表面放射性污染的控制应遵循附录 B 表 B11 所规定的限制要求。详见表 7-2。

表 7-2 工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型		β 放射性物质, Bq/cm ²
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	40
	监督区	4
工作服□手套、工作	控制区和监督区	4
手、皮肤、内衣□工作袜		0.4

表 8 环境质量和辐射现状

2017 年 10 月 25 日，天气晴。评价单位对技物楼的西北角的拟建场所进行了本底监测，监测报告见附件 3，监测时，原镭铍中子源实验室尚未拆除。监测内容为 γ 剂量率，中子周围剂量当量率、土壤中总 α 总 β 。采用的监测设备见表 8-1

表 8-1 监测设备及性能指标

仪器名称	型号	出厂编号	主要技术性能指标	检定日期
辐射测量仪	FH40G+ FHZ672 E-10	024979 +0810	测量范围： 1nGy/h~100 μ Gy/h； 能量范围：48keV~6MeV； 相对响应之差： $\leq\pm 15\%$ ； 校准因子：1.01。	2016 年 12 月 2 日
中子周围剂量 当量率仪	LB123+LB6411	178982 -4092+1501	测量范围：50nSv/h ~ 100mSv/h； 能量范围：热中子~20MeV。	2017 年 6 月 16 日

监测方法：

外照射剂量率监测方法：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 4 次，每次间隔 5 秒钟，取平均值。

土壤中总 α 总 β 监测方法：使用专用的取样工具，采用梅花布点法对采样点取 0~10cm 表层土，送实验室用低本底 α 、 β 测量仪分析。

监测结果：

外照射剂量率监测结果见表 8-2 和表 8-3。

表 8-2 拟建场址现有室内部分外照射剂量率监测结果*

监测点位	点位描述	γ 辐射剂量率 nGy/h	中子周围剂量当量率 μ Sv/h
1	东北角	107.8 \pm 1.3	<LLD _{中子}
2	东南角	103.0 \pm 0.8	<LLD _{中子}
3	中部	106.1 \pm 2.2	<LLD _{中子}
4	西北角	112.4 \pm 1.5	<LLD _{中子}
5	西南角	108.6 \pm 0.6	<LLD _{中子}

注：*监测结果含宇宙射线响应值；LLD_{中子}=0.05 μ Sv/h。

表 8-3 拟建场址现有室外部分外照射剂量率监测结果*

监测点位	点位描述	γ 辐射剂量率 nGy/h	中子周围剂量当量率 μ Sv/h
6	房屋外东侧	98.3±1.4	<LLD _{中子}
7	房屋外南侧偏东	118.4±1.0	<LLD _{中子}
8	房屋外南侧偏西	120.7±0.6	<LLD _{中子}

注：*监测结果含宇宙射线响应值；LLD_{中子}=0.05 μ Sv/h。

由表 8-2 和表 8-3 可知，本项目拟建场址现有室内部分环境地表 γ 辐射剂量率的范围为（103.0~112.4）nGy/h，中子周围剂量当量率监测结果均低于 0.05 μ Sv/h；室外部分环境地表 γ 辐射剂量率的范围为（98.3~120.7）nGy/h，中子周围剂量当量率监测结果均低于 0.05 μ Sv/h。根据《北京市环境天然贯穿辐射水平调查研究》（吴增新等，辐射防护，第 12 卷第 6 期，1992 年 11 月），北京市室内 γ 辐射剂量率水平（含宇宙射线）范围为（71.3~180.6）nGy/h，北京市道路 γ 辐射剂量率水平（含宇宙射线）范围为（47.0~137.3）nGy/h。因此，本项目拟建场址现有室内部分外照射剂量率水平处于北京地区的正常本底范围之内，本项目拟建场址现有室外部分外照射剂量率水平处于北京地区的正常本底范围之内。

拟建场址东侧土壤总 α 总 β 分析结果见表 8-4。

表 8-4 土壤总 α 总 β 分析结果

总 α , Bq/kg	总 β , Bq/kg
(4.08±1.10) E+02	(6.95±0.39) E+02

结论：

北京大学应用化学系放射性药物研究中心拟建场址现有室内部分外照射剂量率水平处于北京地区的正常本底范围之内，本项目拟建场址现有室外部分外照射剂量率水平处于北京地区的正常本底范围之内。拟建场址内东侧土壤样品总 α 分析结果为 408 Bq/kg，总 β 分析结果为 695 Bq/kg。

表 9 项目工程分析和源项

<p>工程设备和工艺分析</p> <p>1 工作原理</p> <p>回旋加速器由水冷、真空、电源、离子源、高频、主磁铁、控制、举升等多个系统组成，加速负氢离子，剥离引出 14MeV 质子束流。再利用质子束流轰击靶物质，制备 PET 核素。</p> <p>回旋加速器的工作原理如图 9-1 所示。在回旋加速器中心部位的离子源经高压电弧放电而使气体电离发射出粒子束流，该粒子束流在称为 Dee 的半圆形电极盒（简称 D 型盒）中运动。D 型盒与高频振荡电源相联为加速粒子提供交变的电场。在磁场和电场的作用下被加速的粒子在近似于螺旋的轨道中运动飞行。设粒子的质量为 m，所带电荷为 q，所具有的运动速度为 v，运动方向垂直于磁场强度为 B 的磁力线，粒子受到垂直于 v 和 B 的 Lorentz 力 F_L 的作用，该力为：</p> $F_L = vBq \quad (9-1)$ <p>粒子轨道的曲率半径 r 由离心力和 F_L 之间的平衡状态来确定：</p> $mv^2/r = vBq \quad (9-2)$ <p>由 (9-2) 可得粒子的速度 v：</p> $v = qBr / m \quad (9-3)$ <p>根据 (9-2) 和动能方程，粒子产生的动能为：</p> $E = mv^2/2 = B^2q^2r^2 / 2 \quad (9-4)$ <p>在回旋加速器中心区域，粒子被拉出后经电场的加速而获得较低的初速度 v_1，同时，磁场也对这些粒子产生作用，两种场作用的结果是粒子在 Dee 间隙（gap）内按螺旋轨道飞行。经过非常短的时间后，粒子经 gap 进入另一个 Dee 电极盒，此后，粒子在该 Dee 电极盒一边飞行到等电势的另一边。每越过一个 gap 后，其轨道半径将比前一次的轨道半径大。粒子运动的瞬时轨道半径将随时间 t 的增加而增大，粒子运动速度的平方与粒子旋转的圈数成比例。被加速粒子运动的螺旋轨道半径 r 与运行时间 t 的平方根成正比。带电粒子经多次加速后，圆周轨道半径达到最大并获得最大的能量，在该点处粒子将被束流提取装置提取引出进入靶室。</p>

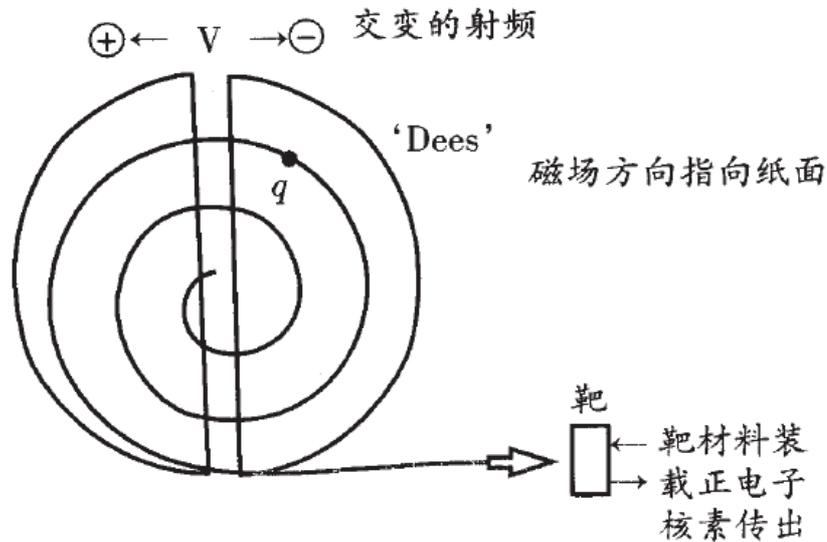


图 9-1 回旋加速器的工作原理简图

加速器制备放射性同位素是利用加速器将带电粒子加速到一定的能量，轰击特定的靶材料，引起核反应而实现的。生产出来的放射性核素一般为缺中子核素，以发射 β^+ 或电子俘获形式进行衰变，能量适度，半衰期短，辐射危害小，适合 PET 显像。

2 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、提取系统、诊断系统、靶系统和冷却系统等主系统组成。

磁场系统提供被加速的带电粒子在所控制的轨道中做圆周运动所需要的磁场强度，由磁铁、线圈、磁场电源配给系统等组成。

射频系统提供加速带电粒子所需的高频振荡加速电压，其频率与粒子多级轨道的旋转频率相等，由射频谐振腔、射频发生器和馈通电缆组成。

离子源系统产生需要加速的负离子，由离子源、离子源电源配给器和气体控制系统组成。离子源的类型是冷阴极电离计，产生氢负离子和/或氘负离子。

束流提取系统直接将加速的带电负离子从真空箱中引出，该系统的基础是剥离膜。被加速的负离子在通过剥离膜时被脱去 2 个电子而转变为质子束流。

靶系统是完成特定核反应而产生正电子核素的装置，各种类型的靶系统主要由靶室、真空绝缘箔、冷却系统组成。本项目的加速器配置两套用于核素生产靶，

分别布置于加速器的两个引出口。靶系统包括靶体、自动加样、靶窗冷却、传靶系统。

真空系统建立离子加速所需要的真空压力水平，降低束流的丢失，为高电压射频场提供绝缘。

冷却系统包括水冷却系统和氦冷却系统。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。氦冷却系统主要在轰击期间对靶室和靶窗的箔膜和钛箔膜之间进行冷却，两个箔膜之间的氦气流提供了所必需的冷却。

3 操作工艺流程

(1) 回旋加速器的操作流程

回旋加速器包括水冷、真空、电源、离子源、高频、主磁铁、控制、举升等多个子系统。控制系统作为整个加速器的监控核心，起着对各个设备的参量采集监控、远程开停、联锁等功能，对整个装置安全可靠、稳定运行起着重要作用。回旋加速器的计算机遥控开机流程如图 9-2 所示。

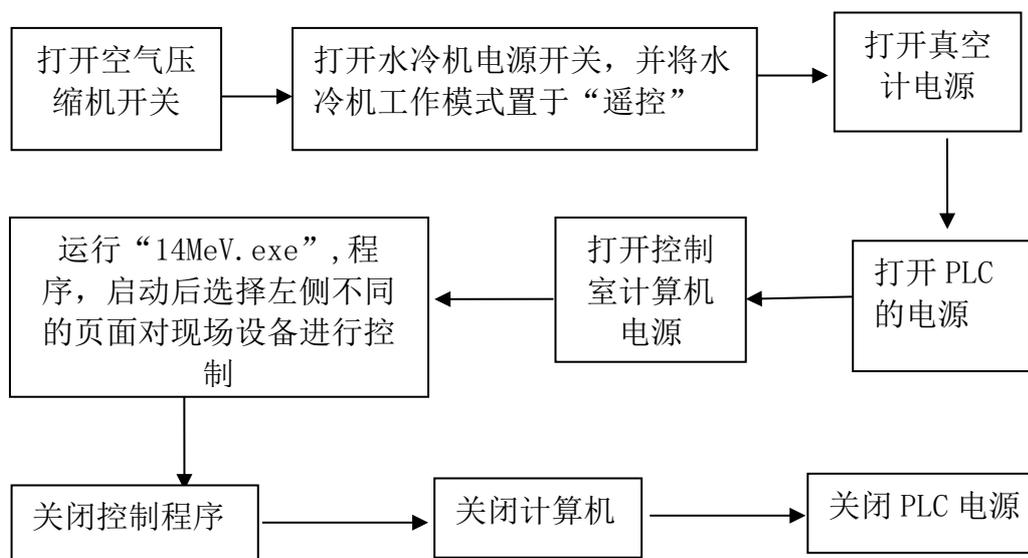


图 9-2 回旋加速器计算机控制系统操作流程

(2) 核素制备

本项目加速器制备质子束流轰击靶物质，制备 4 种核素：F-18、Cu-64、Zr-89、Y-86，其性能参数见表 9-1。

表 9-1 放射性核素性能参数一览表

序号	核素	半衰期	衰变类型	毒性	核反应式	γ 能量 (keV)	空气比释动能率常数 $Gy \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$
1	F-18	1.83h	EC, β^+	低毒	$^{18}O(p,n)^{18}F$	511	3.74E-17
2	Cu-64	12.7h	EC, $\beta^+\beta^-$	低毒	$^{64}Ni(p,n)^{64}Cu$	1346	2.14E-19
3	Zr-89	78.41h	EC, β^+	中毒	$^{nat}Y(p,n)^{89}Zr$	918	4.52E-17
4	Y-86	14.7h	EC, β^+	中毒	$^{86}Sr(p,n)^{86}Y$	1076	1.23E-16

提前一天根据预定的药物数量，向加速器室预定安排第二天的放射性药物生产量。核素制备前对回旋加速器进行调试，设置相应参数。回旋加速器运行期间，工作人员不进入加速器室内，仅在加速器控制室内操作。使用回旋加速器制备核素的流程见图 9-3。

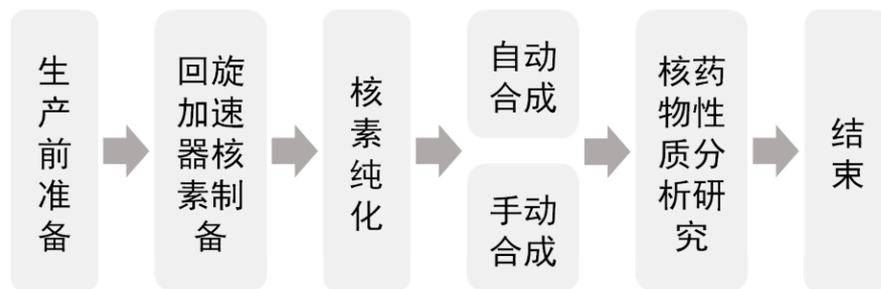


图 9-3 回旋加速器生产核素流程

①生产前准备

回旋加速器在每次正式制备放射性同位素前均进行预处理。用 $^{18}O-H_2O$ 清洗靶和用纯氦吹干药物传递管道，然后注入靶物质，采用液体靶，提前将液体靶及靶材通过管道或跑兔系统运输、装载于加速器束流出口。以一定的束流轰击一定的时间（视所需制备量而定）后，将制备的核素通过专用防护管道系统，在氦气推动下输送至热室的药物合成器内，进入显像药物合成系统，再用高纯氦气将药输送管道吹干。

②核素纯化

使用束流轰击装入靶腔内的液体靶一段时间后，通过气体压力将靶腔内的靶水输送至热室铅柜中，进行纯化。核素纯化工序通过热室中的自动化设备，由操作人员通过计算机控制实现。

③药物合成

根据需要进行放射性合成实验，可在合成热室内由计算机控制的自动化程序完成。操作人员在操作计算机，自动完成药物制备。本项目配备多功能自动放射性示踪剂标记合成系统，该系统装置于放射性自动合成热室中（75mmPb，南一铅柜上腔）。

药物合成也可以通过手工操作，操作人员使用放射性手动合成分装热室（75mmPb，中间铅柜）通过手孔进行操作，普遍的做法是将前体加入核素溶液中，在金属浴上加热，随后使用固相萃取的方法进行分离纯化，或是使用 HPLC 进行分离纯化。

④放射性药物质控及放化实验研究

将纯化后的核素或合成后的放射性药物取出极少的量，使用放置于防辐射通风橱（40mmPb，北一铅柜）中的 iTLC 等设备进行放射性药物质控，包括测定其放射性纯度、稳定性等放射化学性质。

⑤实验结束后的处置

将剩余的放射性药物按放射性废液处置，实验产生的废液直接储存玻璃材质废液瓶中，待齐收满后暂存于热室南侧铅柜下腔。废弃劳保用品、一次性实验用品分装、标记妥当，归置稳妥，转移至废物暂存柜中。

污染源项描述

1 正常工况

（1）回旋加速器的污染源项

本项目主要的污染物是回旋加速器运行过程中产生的射线和少量放射性气体。主要污染途径是外照射。

①中子：加速器运行主要产生中子，污染途径为外照射。

② γ 射线：本加速器的 γ 射线主要来源于加速器部件、靶周围器件、准直器等受中子照射而活化，本项目为液体靶，生成以短半衰期为主的感生放射性。

③空气活化：加速器大厅内的空气受中子照射后可生成放射性活化气体，主要核素有 Ar-41、C-11 和 O-15 等。

④结构材料活化：加速器日常维护更换下来内部构件带有感生放射性，工作人员为了调节实验装置或检修加速器时，可能受到直接外照射。

（2）丙级非密封放射性物质工作场所污染源项

本项目制备核素场所的污染因子为： β/γ 射线。污染途径主要为操作核素对工作人员的外照射影响，可能造成手和皮肤的污染。

2 事故工况

①人员误闯回旋加速器大厅

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、 γ 射线的外照射。

②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。

③同位素传输故障

由于液体靶密封膜片或传输时管线的故障，加速器打靶过程中或打靶后发生同位素不能传输故障，引起同位素泄漏，导致操作现场污染。

表 10 辐射安全与防护

项目安全设施				
1 厂房布局				
新建放射性药物研究中心位于技物楼西北角，见附图 2。一层为主要为加速器机房和控制室，平面图见附图 3。二层主要为作合成、质控等操作核素的热室，平面图见附图 4。三层为通风机房，平面图见附图 5，立面图见附图 6。放射性药物研究中心各房间情况见表 10-1。				
表 10-1 放射性药物研究中心各房间情况				
序号	房间名称		功能	主要工艺设备
1	一层	加速器室	核素打靶	加速器
2		控制室	加速器控制	加速器控制台
3		过渡间	进入迷道过渡	/
4	二层	热室	核素纯化、分析	铅柜
5		后区	设备维修	热室管线设备
6		穿洁净服间	穿着洁净服	/
7		检测间	沾污检测	沾污仪
8		去污间	沾污清洁	喷淋设备
9		换鞋一更	换衣间	/
10		过厅	热室出入准备	/
11		气闸 2	后区过渡间	/
12		气闸 1	人流过渡间	/
13		储藏间	耗材存储	/
14	三层	通风机房	设备机房	空调、通风、冷却主机
2 辐射工作场所分区				
依据管理的需要，将辐射工作场所划分为控制区和监督区。一层、二层辐射工作场所分区的示意图见附图 7、附图 8。				
控制区：一层加速器机房，二层热室、后区、气闸 1、检测间和去污间。				
监督区：一层控制室及过渡间，二层气闸 2、穿洁净服间和换鞋一更间。				
3 实验室人流物流设计				
本设施内人流物流如附图 9、附图 10 所示。加速器生产的核素将由自动化管道传输至热室中。人流物流路线如下：				
(1) 工作人员路线				

①一层操作人员：由东侧设施入口进入→穿过楼梯间→进入控制室，原路线离开。

②二层实验人员：由东侧设施入口进入→由楼梯进入二楼→穿过二层过厅→进入换鞋—更换鞋→进入穿洁净服间换接洁净服→进入热室进行实验操作→由气闸 1 离开热室→检测间沾污检测（沾污→进入去污间清洁）→换鞋—更→进入过厅由楼梯离开。

(2) 放射性物品路线

①一层废物：加速器部件废物→加速器室内放射性废物坑→（满足解控水平后）进入迷道→经过过渡间→经过楼梯间离开设施。

②二层废物：热室内暂存→（暂存至满足解控水平后）进入过厅→进入楼梯间进入一层→由门口离开设施。

4 辐射防护措施

(1) 加速器机房布局

回旋加速器大厅的内尺寸为 3.3m×4.9m×5.0m。本项目加速器的两个引出口配置两套核素生产靶。机房内加速器安全设备布置见附图 11。

(2) 屏蔽防护

加速器机房屏蔽防护见表 10-2，墙体采用钢筋混凝土（密度 2.3g/cm³）。二层各房间的屏蔽防护见表 10-3。

表 10-2 回旋加速器机房的屏蔽

房间名称	屏蔽体	屏蔽材料	厚度
回旋加速器机房	东侧迷道内墙 1	钢筋混凝	0.6m
	东侧迷道内墙 2	钢筋混凝	1.0m
	迷道外墙	钢筋混凝	1.0m
	西墙	钢筋混凝	1.6m
	南墙	钢筋混凝	1.6m
	北墙	钢筋混凝	1.6m
	屋顶	钢筋混凝	1.5m
	迷道门	硼聚乙烯	2cmPb+25cmPE
加速器	靶头局部屏蔽	聚乙烯	30cmPE

表 10-3 二层各房间的屏蔽防护

工作场所	北墙	南墙	东墙	西墙	楼顶	地面

热室	20cm 混凝土	20cm 混凝土	彩钢夹芯板 10cm	1.6m 混凝土	10cm 混凝土 +10cm 彩钢夹芯板	1.2m 混凝土
穿洁净服间	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	10cm 混凝土 +10cm 彩钢夹芯板	10cm 混凝土
检测间	彩钢夹芯板 10cm	20cm 混凝土	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	10cm 混凝土 +10cm 彩钢夹芯板	10cm 混凝土
气闸	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	10cm 混凝土 +10cm 彩钢夹芯板	10cm 混凝土
去污间	彩钢夹芯板 10cm	20cm 混凝土	20cm 混凝土	彩钢夹芯板 10cm	10cm 混凝土 +10cm 彩钢夹芯板	10cm 混凝土
储藏间	彩钢夹芯板 10cm	彩钢夹芯板 10cm	20cm 混凝土	彩钢夹芯板 10cm	10cm 混凝土 +10cm 彩钢夹芯板	10cm 混凝土

表 10-4 二层热室屏蔽防护

名称	屏蔽防护
自动合成热室 (上下双腔)	<p>1、外观： 外形尺寸 (W×D×H)：1150mm×1150mm×2400mm；内胆尺寸 (W×D×H)：700mm×700mm×650mm；</p> <p>2、防护当量： 正面防护 75mmPb；其他 5 面防护≥40mmPb；</p> <p>3、完整的进风及排风系统，HEPA 高效过滤器(过滤效率≥99.995%)及活性炭过滤器保证了热室内部及外排气体的洁净度，内腔洁净级别达到 B 级</p>
手动合成热室	<p>1、外观： 外形尺寸 (W×D×H)：1150mm×1150mm×2400mm 内胆尺寸 (W×D×H)：850 mm×700mm×700 mm</p> <p>2、防护当量： 正面防护 75mmPb；其他 5 面防护≥40mmPb；</p> <p>3、配有净化过滤排风系统，箱内气体 70%经过净化过滤回流，30%气体经过过滤外排；垂直层流设计，过滤效率 99.99%，滤菌效率 100%，操作区风速 0.3~0.5m/s，回风经 HEPA 过滤器，从而保证室内空气洁净度达到 class100，外排气体则经过活性炭过滤器</p>
通风橱	<p>外观： 外形尺寸 (W×D×H)：1100mm×950mm×2400mm 内胆尺寸 (W×D×H)：850 mm×700mm×700 mm</p> <p>2、防护当量： 正面防护 40mmPb； 背面防护 40mmPb； 其他 4 面防护≥30mmPb。</p> <p>3、内部配有通风过滤装置，满足药物质控使用需求。</p>

5 其它安全措施

(1) 一层加速器大厅：

①警示标识：设置电离辐射警示标志和中文警示说明。

②自屏蔽：加速器大厅自屏蔽采用聚乙烯材料，厚度为 30cmPE，打靶时将自屏蔽推到靶位置。

③安全联锁：本项目加速器大厅设置安全联锁装置，主要包括门机联锁、清场按钮、急停按钮、摄像装置等。加速器开机前，启动通风，15 分钟后运行人员利用供束钥匙关闭供束开关，在厅内剂量安全情况下，打开防护门，进行厅内巡检、之后关门。供束钥匙回到控制台，打开供束开关。在所有急停按钮未被按下情况下，方可进行开机。急停按钮、清场按钮及监测探头位置布局见附图 11。

门机联锁：迷道屏蔽门和加速器联锁，只有当屏蔽门关闭后加速器才能出束，门一旦打开，立即停止出束；

清场按钮：在加速器机房北侧墙壁、南侧墙壁和迷道入口处设有清场按钮，在开机之前必须按照巡行路线在规定时间内完成进行清场，完成清场后，才能关闭屏蔽门，关闭屏蔽门后才能进行供束操作；

急停按钮：在加速器机房北侧墙壁、南侧墙壁、迷道入口和控制台装有醒目的急停按钮，如果有人误留加速器室大厅，则迅速按下急停按钮，加速器立即停止供束；

声光报警：清场以后关闭防护门时，门口的声光报警响起。加速器准备出束前，控制室内联锁装置显示屏会提示“准备供束”。出束时，提示语变成“正在供束”，同时加速器门口的运行状态指示灯由绿色变成红色。在机房内、门外和控制台设信号指示灯，表明加速器的停机和出束状态。

④剂量联锁：加速器机房安装一套固定式伽马监测仪，加速器大厅内安装 2 台固定式伽马监测仪，迷道口安装 1 台固定式伽马监测仪，预设值(2.5 μ Sv/h)，当加速器大厅剂量超过该设置值，同时加速器厅门在外部操作开门不能打开。

(2) 二楼配套 PET 药物生产场所

①警示标识：设置电离辐射警示标志和中文警示说明。

②铅柜的屏蔽：热室内总计 2 台铅柜和 1 台通风橱，其中南侧铅柜上腔为自动合成热室铅柜，下腔为放射性废物暂存柜，铅柜采用 75mmPb 的铅板进行正面屏蔽防护，中间铅柜为手动分装热室铅柜，主要进行药物质检，采用

75mmPb 的铅板进行正面屏蔽防护，北侧为通风橱，采用 40mmPb 铅玻璃进行正面屏蔽防护。

二楼热室辐射安全设施布置图见附图 12。

(3) 监测仪器

本项目拟配备 3 台便携式 γ 剂量率仪，6 台个人剂量报警仪，在加速器机房安装 1 套固定式 γ 剂量率监测系统以及若干个人剂量计等，能满足工作的需要，本项目配备仪表情况见表 10-4。

表 10-4 监测仪表清单

序号	仪器名称	数量	型号	用途	设备情况
1	便携式 γ 剂量率仪/沾污仪	2 台	MODEL2241-2	测量 γ 剂量率/环境沾污检测	正常
2	γ 剂量率监测系统	1 套	WF-PTM-K	场所 γ 剂量率监测	正常
3	个人剂量报警仪	3 台	PDM-227C	测量操作人员 γ 剂量率	正常
4	个人剂量报警仪	3 台	EPD TruDose- $\beta\gamma$	测量操作人员 $\beta\gamma$ 剂量率	正常
5	便携式 γ 剂量率仪	1 台	RadEye G-10	测量环境 γ 剂量率	正常
6	个人剂量计	若干	——	测量人员个人剂量	正常

6 三废的治理

(1) 放射性废水

① 二层配套 PET 药物生产场所

本项目制备的核素是：F-18（半衰期 1.83h）、Cu-64（半衰期 12.7h）、Zr-89（半衰期 78.41h）、Y-86（半衰期 14.7h）4 种短半衰期核素，会产生少量的含有以上核素的放射性废液。本项目热室配有 4 个 2.5L 玻璃材质废液瓶，用于收集放射性废液，实验产生的废液将直接储存在热室内的废液瓶中，待装满后进行密封并登记日期，先暂存在热室南侧铅柜下腔内（见附图 12），待 35 个自然日（10 个半衰期后），经检测达到解控水平后，申请解控按普通化学废液处理。

本项目热室进行操作期间设施内沾染放射性核素的物品都为一次性用品，不产生清洁废水，因此每个实验日产生的放射性废液十分有限（约 10mL），同时还有放射性 LC 产生的低放废液，日产生约 90mL（1mL/min 流速，分析时间 90 分钟），故一个实验日约产生 0.1L 放射性废液。1 个 2.5L 的废液瓶可以满足约 25 个试验日、35 个自然日的废液收集需求。本项目涉及核素中半衰

期最长的放射性核素为 Zr-89，半衰期 3.3 天，其 10 个半衰期为 33 天，两个废液瓶相互轮换即可满足储存衰变需求，因此 4 个废液瓶完全可以满足储存衰变需求。

②一层加速器机房

加速器机房正常运行期间无放射性废水产生。稳妥起见，加速器大厅西北角设置废水坑（见附图 11），用于收集加速器室的废液。废物坑总容积为 0.5m*0.5m*1.5m，收集能力为 125L，东南西侧均为加速器大厅混凝土地基，北侧为 20cm 混凝土，盖板使用 5mm 厚钢板+3mmPb。

（2）放射性废气

本项目加速器运行过程中，加速器机房内的空气受中子照射后可生成放射性活化气体，主要核素有 Ar-41、C-11 和 O-15 等。本项目的丙级非密封放射性工作场所的热室在制备核素的过程中，也会产生少量的放射性气体。

新建放射性药物研究中心加速器室、二层热室和二层其他房间各设一套通风系统独立通风，总计三套通风系统，排风口设在层顶，排风系统布置图见附图 13 和附图 14。

①一层加速器机房通风系统

加速器机房设独立通风系统，设置 GJ2100-L/R 空气净化箱，废气经净化后排出至大气，排气口设置于二楼屋面，通风量 1000m³/h，换气次数不低于 6 次/h。

②二层铅柜通风系统

二层热室铅柜设独立通风系统，设置 GJ2100-L/R 空气净化箱，废气经净化后排出至大气，排气口设置于二楼屋面，通风量 1000m³/h。

③二层洁净实验室通风系统

二层洁净实验室送风口设置于后区气闸、热室，穿洁净服间、换鞋一更、检测间气闸、检测间，使用 JK-1 空调系统作为送排风系统。

（3）放射性固体废物

加速器室可能产生包括靶片、靶室零件等放射性固体废物，二层配套 PET 药物生产场所可能产生实验容器（滴管、离心管）、核素纯化树脂、注射器、移液枪头、实验手套等劳保用品等放射性固体废物。

①一层加速器机房

加速器正常运行不产生放射性固体废物，在进行加速器检修、靶件更换时，可能产生少量低放的金属活化靶件及劳保用品，按每次维护产生 2L 固废计算，每 5 次运行进行一次维护，全年共产生 20 L 放射性固废，主要为低放的金属活化靶件及劳保用品。每次产生固体废弃物后，进行包装，标记，放置于固废暂存坑中，每年对产生的固废进行检测清理，待检测达到解控水平后申请解控，按一般化学废弃物处理。

加速器室西北角设置 1 个 0.5m*0.5m*1m（容积率 80%计算为 200L）的放射性废物处置坑（见附图 11），其盖板使用 5mm 厚钢板+3mmPb，东西北侧均为加速器大厅混凝土地基，南侧为 20cm 混凝土，与废液暂存坑相邻，其容积可以满足加速器大厅产生的固废暂存需求。

②二层配套 PET 药物生产场所

热室产生的放射性废弃物（主要是沾污物和劳保用品），在铅柜中收集后，使用自封袋打包封装，并标记妥当后，转移至废物暂存柜中。废物暂存柜常规地每半年进行整理检测，待检测达到解控水平后申请解控，按一般化学废弃物处理。二层热室每个实验日产生固废体积不大于 1L，每年最多运行 250 实验日，共 250L。

热室（南侧铅柜下层）有 1 个体积为 0.85m*0.7m*0.7m（容积率 80%计算为 333L）的 75mmPb 防护铅柜专用于废物暂存（见附图 12），其容积可以满足一年以上的放射性废物处置暂存条件。

表 11 环境影响分析

<p>建设阶段对环境的影响</p> <p>本项目的厂房建造和设备安装过程中会产生零星的噪声和少量的固体废物，因此，建设阶段对环境的影响很小，可忽略不计。</p>																				
<p>运行阶段对环境的影响</p> <p>1 加速器运行的辐射环境影响分析</p> <p>(1) 源项</p> <p>回旋加速器在运行时，产生的中子、γ 射线以及因中子活化而产生的感生放射性，对人产生直接外照射。回旋加速器年最大开机时间 100 小时。</p> <p>①中子</p> <p>回旋加速器运行时，产生中子的最大能量为 14MeV，FDG 靶单靶的最大束流 150μA，运行期间为双靶同时打靶，总的束流强度为 300μA。利用 MCNP 程度模拟单个质子（14MeV）与水靶作用产生的中子谱，如下表 11-1 所示。</p> <p>表 11-1 14MeV 的单个质子与水靶作用产生的中子产额</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>中子能量 E_n, MeV</th> <th>中子产额 (n/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$E_n < 1.00E+00$</td> <td>1.69E-03</td> </tr> <tr> <td>$1.00E+00 < E_n < 5.00E+00$</td> <td>3.09E-03</td> </tr> <tr> <td>$5.00E+00 < E_n < 1.00E+01$</td> <td>3.58E-04</td> </tr> <tr> <td>$1.00E+01 < E_n < 1.40E+01$</td> <td>1.53E-05</td> </tr> <tr> <td>总计</td> <td>5.15E-03</td> </tr> </tbody> </table> <p>由此可见，能量高于 5MeV 的中子产额约占中子产额的 7%，因此，本次评价按能量对总中子产额进行划分，如下表 11-2 所示。</p> <p>表 11-2 据靶源 1 米处不同能量的中子注量率</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>中子能量 E_n, MeV</th> <th>1 米处中子注量率 (n/cm²/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$E_n \leq 5.00E+00$ (评价时取 5MeV)</td> <td>3.57E+07</td> </tr> <tr> <td>$E_n > 5.00E+00$ (评价时取 14MeV)</td> <td>2.79E+06</td> </tr> <tr> <td>总计</td> <td>3.85E+07</td> </tr> </tbody> </table> <p>②放射性气体 Ar-41 的排放量</p> <p>感生放射性气体是装置运行期间中子与空气的作用产生的，其中 Ar-41 对环境的影响最大，故本项目以中子与空气作用产生的 Ar-41 做具体分析。</p>	中子能量 E_n , MeV	中子产额 (n/s)	$E_n < 1.00E+00$	1.69E-03	$1.00E+00 < E_n < 5.00E+00$	3.09E-03	$5.00E+00 < E_n < 1.00E+01$	3.58E-04	$1.00E+01 < E_n < 1.40E+01$	1.53E-05	总计	5.15E-03	中子能量 E_n , MeV	1 米处中子注量率 (n/cm ² /s)	$E_n \leq 5.00E+00$ (评价时取 5MeV)	3.57E+07	$E_n > 5.00E+00$ (评价时取 14MeV)	2.79E+06	总计	3.85E+07
中子能量 E_n , MeV	中子产额 (n/s)																			
$E_n < 1.00E+00$	1.69E-03																			
$1.00E+00 < E_n < 5.00E+00$	3.09E-03																			
$5.00E+00 < E_n < 1.00E+01$	3.58E-04																			
$1.00E+01 < E_n < 1.40E+01$	1.53E-05																			
总计	5.15E-03																			
中子能量 E_n , MeV	1 米处中子注量率 (n/cm ² /s)																			
$E_n \leq 5.00E+00$ (评价时取 5MeV)	3.57E+07																			
$E_n > 5.00E+00$ (评价时取 14MeV)	2.79E+06																			
总计	3.85E+07																			

③ γ 射线

由于质子回旋加速器（14MeV）运行时，机房的屏蔽厚度在满足加速器产生的中子辐射屏蔽要求时认为同时能满足 γ 射线的防护要求，因此运行过程主要考虑中子屏蔽计算，不再计算 γ 射线。

对于打靶产生的感生 γ 射线， γ 射线的主要来源为质子轰击靶体产生的放射性核素，产生感生放射性的主要设备为靶的准直器，准直器材料为纯铝，产生感生放射性的核素主要是 Si-27（半衰期 4.15 秒）。在至少通风 1 小时后加速器屏蔽门才打开，人员方能进入，铝制准直器的活度几乎可以忽略不计。通过以上分析，本项目 γ 射线对周围环境的影响很小。

(2) 加速器机房外中子剂量率估算

①中子透射至墙外参考点处中子剂量率

i)关注点位

本项目机房拟设置于技物楼的西北角的放射性药物研究中心一层，计算点位主要关注 7 个点，如图 11-1 所示。从图 11-1 可以看出，本项目回旋加速器左右两侧各一个靶，在进行屏蔽体外中子剂量率估算时保守估计两边同时打靶，继而对屏蔽体外中子剂量率进行叠加。

A 点：北墙外；

B 点：西墙外；

C 点：南墙外；

D 点：东墙外；

E 点：入口外；

F 点：北墙外；

G 点：机房顶。

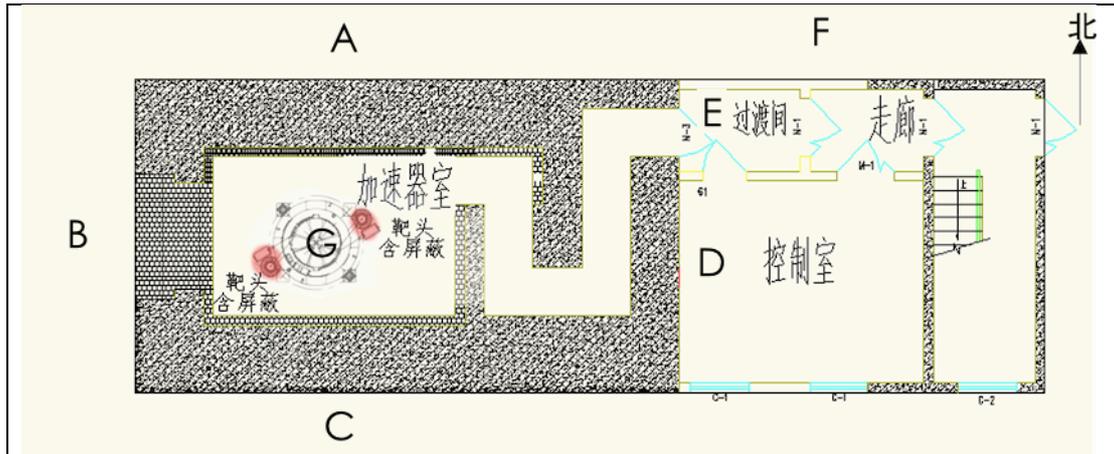


图 11-1 计算点位示意图

ii) 估算公式及参数选取

中子的直接照射剂量参照下式进行估算 (11-1)。

$$D_n = \frac{\phi_0 f_H}{r^2} 10^{-\frac{d}{\Delta_{1/10}}} \quad (11-1)$$

式中：

D_n 为屏蔽体外中子剂量率，mSv/h；

ϕ_0 为中子注量率，n/cm²·s；

f_H 为中子的注量率-剂量率转化系数，(mSv/h) / (n/cm²·s)；

r 为源与计算点之间的距离，cm；

$\Delta_{1/10}$ 是中子在屏蔽体内的 1/10 减弱厚度，cm；

d 为屏蔽体厚度，cm。

计算中所用参数及其取值见下表。

表 11-3 中子剂量率计算参数及其取值

参数	取值		取值来源
ϕ_0	5MeV: 3.57E+07n/cm ² ·s; 14MeV: 2.79E+06 n/cm ² ·s;		根据 MCNP 程序模拟得出
f_H	5MeV : 1.47E-03 (mSv/h) / (n/cm ² ·s) 14 MeV : 1.53E-03 (mSv/h) / (n/cm ² ·s)		《粒子加速器辐射防护规定》表 B1, 查找 5MeV 和 14MeV 中子注量率-剂量当量率转换系数
r (左侧靶)	A 北墙外	423.4 cm	CAD 图纸测量
	B 西墙外	301.3 cm	
	C 南墙外	286.5 cm	
	D 东墙外	868.6 cm	
	E 防护门外	785.9 cm	

r (右侧靶)	F 北墙外	915.2 cm	CAD 图纸测量
	G 屋顶	580 cm	
	A 北墙外	324.5 cm	
	B 西墙外	488.3 cm	
	C 南墙外	385.6 cm	
	D 东墙外	681.7 cm	
	E 防护门外	701.2 cm	
	F 北墙外	884.7 cm	
G 屋顶	580 cm		
$\Delta_{1/10}$	5MeV: 混凝土: 22cm, 聚乙烯: 22cm 14MeV: 混凝土: 34cm, 聚乙烯: 34cm		辐射防护手册第一分册 p348 图 6.8e 和图 6.8f
d	自屏蔽 ^①	30cm 聚乙烯	设计资料
	A 北墙外	160cm 混凝土	CAD 图纸测量
	B 西墙外	160cm 混凝土	
	C 南墙外	160cm 混凝土	
	D 东墙外 ^②	160cm 混凝土	
	E 防护门外 ^③	100cm 混凝土, 25cm 聚乙烯	
	F 北墙外 ^④	105cm 混凝土, 25cm 聚乙烯	
	G 屋顶	150cm 混凝土	

备注: ①估算均考虑自屏蔽体的屏蔽作用, 即 0.3m 聚乙烯的屏蔽作用。②D 点的屏蔽厚度保守只考虑了 0.6m 厚的迷道内墙 1 和 1m 厚东侧迷道外墙两道墙, 实际 D 点所在控制室多数位置还有 1m 厚迷道内墙 2 的屏蔽。③E 点的屏蔽考虑了 1m 厚迷道内墙 2 和 25cm 聚乙烯(防护门)两重防护。④ F 点屏蔽体按射线斜穿过的最短距离 1.05m 混凝土墙体以及 0.25m 聚乙烯防护门考虑, 不考虑过渡间北侧墙体的屏蔽。

iii)估算结果

本项目中子透射至加速器室屏蔽体外各关注点计算结果见下表。

表 11-4 屏蔽体外中子剂量率计算结果

屏蔽体位置	屏蔽体中子外剂量率 (5MeV), $\mu\text{Sv/h}$	屏蔽体中子外剂量率 (14MeV), $\mu\text{Sv/h}$	合计, $\mu\text{Sv/h}$
A 北墙外	1.83E-06	1.66E-04	1.68E-04
B 西墙外	1.84E-06	1.67E-04	1.69E-04
C 南墙外	2.29E-06	2.08E-04	2.10E-04
D 东墙外	4.21E-07	3.83E-05	3.87E-05
E 防护门处	1.72E-05	4.30E-04	4.47E-04
F 北墙外	6.92E-06	2.07E-04	2.14E-04
G 屋顶	2.05E-06	3.32E-05	3.53E-05

②中子散射至参考点处剂量率估算(迷道口)

i)关注点位

经过迷道的弯折，中子散射至迷道出口处的路径如下图所示，出于保守估计，假设本项目两个靶点均处于右侧靶点处同时出束进行估算。

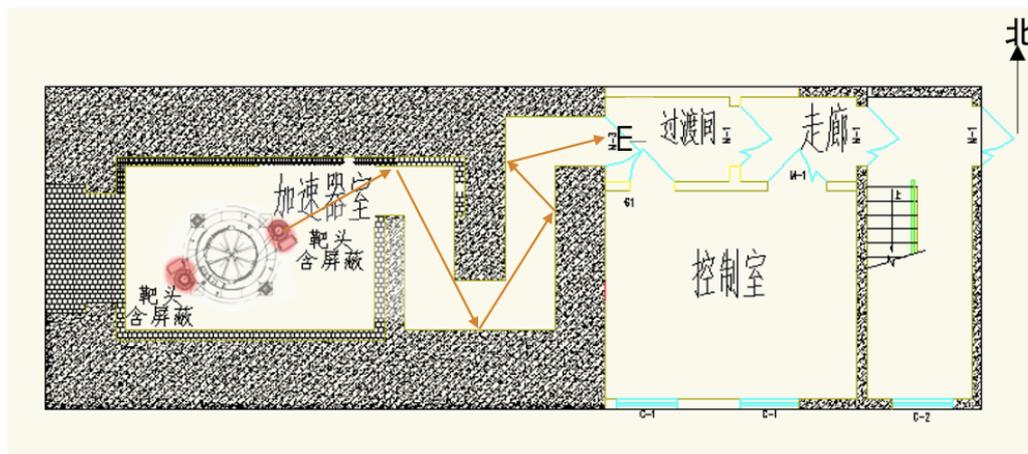


图 11-2 本项目中子在迷道散射路径图

ii)估算公式及参数选取

根据 Tesch 提出计算多折迷宫中子剂量当量的计算公式，被 NCRP144 号报告推荐使用，第一折迷道(迷道直通靶点)的计算公式为：

$$H(r_1) = 2H_0(r_0)(r_0/r_1)^2 \quad (11-2)$$

其中：

$H(r_1)$ 代表第一折迷道出口处的中子剂量当量 (Sv)；

$H_0(r_0)$ 代表迷宫内入口处的中子剂量当量 (Sv)；

r_0 是从靶到迷道内入口的距离 (m)；

r_1 是从靶到第一折迷道出口的距离 (m)。

对于第二折及以上弯折的迷道内中子剂量当量的计算公式为：

$$H(r_i) = \frac{e^{-r_i/0.45} + 0.022A_i^{1.3}e^{-r_i/2.35}}{1 + 0.022A_i^{1.3}} H_{0i} \quad (11-3)$$

其中 $H(r_i)$ 代表第 i 折迷道出口处的中子剂量当量 (Sv)；

H_{0i} 代表第 i 折迷道入口处的中子剂量当量 (Sv)；

r_i 是第 i 折迷道长度 (m)；

A_i 是第 i 折迷道的截面积 (m²)。

iii)估算结果

根据实际计算需求，本项目估算各点位处的剂量率，因此将公示中的源项转换成剂量率，第一折迷道出口处的剂量率结果见下表。

表 11-5 第一折迷道出口处剂量率估算结果

位置	1m 处剂量率 Sv/h	$H_0(r_0)$,Sv/h	r_0 , m	r_1 ,m	Hr_1 ,Sv/h
右侧靶	2.83*	6.29E-01	2.12	3.15	5.70E-01
左侧靶	2.83*	1.58E-01	4.23	5.26	2.04E-01

备注：*根据中子注量率和 f_{in} 估算得出，均考虑自屏蔽，且考虑两个靶同时出束

中子通过 5 折迷道到达防护门处，各折 ($r>1$) 迷道出口处的剂量率估算结果见下表。

表 11-6 各折迷道出口处剂量率估算结果

位置	序号	r_i ,m	A_i , m^2	H_{0i} ,Sv/h	$H(r_i)$,Sv/h	屏蔽透射比	防护门外 剂量率 (μ Sv/h)	合计 (μ Sv/h)
右侧靶	i=2	2.47	5	5.70E-01	3.22E-02	7.31E-02*	6.99E-01	9.49E-01
	i=3	1.94	5	3.22E-02	2.50E-03			
	i=4	3.38	5	2.50E-03	9.08E-05			
	i=5	1.55	5	9.08E-05	9.57E-06			
左侧靶	i=2	2.47	5	5.70E-01	3.22E-02	7.31E-02*	2.51E-01	
	i=3	1.94	5	3.22E-02	2.50E-03			
	i=4	3.38	5	2.50E-03	9.08E-05			
	i=5	1.55	5	9.08E-05	9.57E-06			

备注：*考虑防护门（25cm 聚乙烯）的屏蔽作用

通过估算上表可知，中子散射至参考点处剂量率为 9.49E-01 μ Sv/h。

③加速器机房屏蔽体外剂量率总和

综上，本项目加速器机房屏蔽体外剂量率总和见下表。

表 11-7 屏蔽体外中子剂量率计算结果

屏蔽体位置	透射至关注点剂量率， μ Sv/h	散射至关注点剂量率， μ Sv/h	合计， μ Sv/h
A 北墙外	1.68E-04	/	1.68E-04
B 西墙外	1.69E-04	/	1.69E-04
C 南墙外	2.10E-04	/	2.10E-04
D 东墙外	3.87E-05	/	3.87E-05
E 防护门处	4.47E-04	9.49E-01	9.49E-01
F 北墙外	2.14E-04	/	2.14E-04
G 屋顶	3.53E-05	/	3.53E-05

④空气浸没外照射

根据《加速器保健物理》(H.W.帕特森, R.H.托马斯) P296 公式 (12) 和 NCRP NO.144 报告 P345 公式 (6.25~6.27), 在考虑通风的情况下, 装置连续运行 t 时间后, 停机时刻以及运行 t 时间, 再停机通风 t_c 时间后, 房间内空气活化产生的感生放射性核素活度可由下面的公式计算得到:

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) \quad (11-3)$$

$$C_{t_c} = C_t \cdot e^{-(\lambda + r_2)t_c} \quad (11-4)$$

$$N = \frac{\rho}{M} \times f \times N_A \quad (11-5)$$

由于空气中感生放射性核素的半衰期相对于装置的运行时间较短, 核素的浓度很容易达到饱和, 因此, 可将式 11-3 简化为计算饱和浓度, 用饱和浓度评价也是偏安全的。

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi \quad (11-6)$$

式中,

C_t 为装置运行 t 时间后, 停机时刻房间内空气中感生放射性核素的活度浓度, Bq/cm^3 ;

C_{t_c} 为装置运行 t 时间, 停机通风 t_c 时间后, 房间内空气中感生放射性核素的活度浓度, Bq/cm^3 ;

λ 为放射性核素的衰变常数, s^{-1} ; $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$;

r_1 为正常运行时房间内的换气次数, $2.22\text{E}-03\text{s}^{-1}$;

r_2 为停机通风时房间内的换气次数, $2.22\text{E}-03\text{s}^{-1}$;

N 为单位体积空气中靶核的数目, $\text{个}/\text{cm}^3$, 其估算结果见 11-8;

σ 为靶核的活化截面, cm^2 , $6.60\text{E}-25 \text{cm}^2$, 参考献《Dosimetry for radiological protection at high energy particle accelerators. In: Kase KR, Bjarngard BE, Attix FH, eds. The dosimetry of ionizing radiation, Volume III..New York, NY:Academic Press;1990:1-161. Swanson WP, Thomas RH.》和文献《Induced Radioactivity at Accelerators, Submitted to: Proceedings of the Health Physics Society 2008

Professional Development School- Topics in Accelerator Health Physics(Oakland CA, January 2008), FERMILAB-PUB-07-201-ESH. J.Donald Cossairt》；

ϕ 为中子注量率和光子注量率, $\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$, $7.69\text{E}+07 \text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$;

ρ 为空气的密度, g/cm^3 ;

M 为靶核的原子质量, g ;

f 为母核在空气中的质量份额;

N_A 为阿伏伽德罗常数, $6.023\text{E}+23$ 。

表 11-8 单位体积空气中靶核数目的计算结果

核素	M, g	f	ρ , g/cm^3	θ , %	N_A	N, 个/ cm^3
^{40}Ar	40	1.30E-02*	1.21E-03	99.6	6.02E+23	2.37E+17

备注: 参考 NCRP NO.144 报告 P344 Table 6.5

经上式计算, 可得加速器机房运行期间放射性气体 ^{41}Ar 的浓度见下表。

表 11-9 加速器室空气感生放射性核素的活度浓度, Bq/m^3

核素	加速器机房
Ar-41	5.55E+05

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”, 加速器运行期间和停机通风期间向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由式 11-7 和式 11-8 计算。

$$\begin{aligned}
 Q_t &= \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda+r_1} N \sigma \phi (1-e^{-(\lambda+r_1)t}) R_t dt = \frac{\lambda}{\lambda+r_1} N \sigma \phi R_t \int_0^t (1-e^{-(\lambda+r_1)t}) dt \\
 &= \frac{\lambda}{\lambda+r_1} N \sigma \phi R_t \left(t - \frac{1}{\lambda+r_1} + \frac{e^{-(\lambda+r_1)t}}{\lambda+r_1} \right) \quad (11-7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{t_c} &= \int_0^{t_c} C_{t_c} R_{t_c} dt = \int_0^{t_c} C_t e^{-(\lambda+r_2)t_c} R_{t_c} dt = C_t R_{t_c} \int_0^{t_c} e^{-(\lambda+r_2)t_c} dt \\
 &= C_t R_{t_c} \frac{1-e^{-(\lambda+r_2)t_c}}{\lambda+r_2} \quad (11-8)
 \end{aligned}$$

式中,

Q_t 和 Q_{t_c} 分别加速器运行 t 时间和停机排放 t_c 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度, Bq ;

R_t 和 R_{t_c} 分别为加速器统常运行和停机通风状态下的通风速率, cm^3/s , 运行和停机时均为 $2.78\text{E}+05\text{cm}^3/\text{s}$;

由此可计算得出本项目加速器运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素量和年均排放速率, 列于下表。

表 11-10 本项目加速器系统运行期间每年排入环境的空气感生放射性核素和年均排放速率

核素	年排放量, Bq	年平均排放速率, Bq/s
Ar-41	5.50E+10	1.74E+03

⑤天空反散射

穿过屏蔽墙射向天空的各种辐射, 由于空气的散射作用, 将有部分又回到地面。天空散射几乎完全由中子引起。透过屏蔽墙的快中子以及少量残存的高能中子在空气中不能被有效地阻止, 在空气中发生一次次散射, 低能中子被散射回地面。这些中子就是天空散射辐射的来源。天空散射随加速器开机产生, 加速器停机便立刻消失。其对公众的剂量贡献取决于屏蔽体的厚度。

根据前面的计算结果, 屋顶外剂量率为 $3.53E-05\mu\text{Sv/h}$ 。因此, 可不考虑天空反散射的影响。

(3) 环境影响分析

①本项目运行工作人员受照剂量估算

本项目加速器运行期间, 工作人员所受瞬时辐射照射剂量由下式计算。

$$H=D\times t \quad (11-9)$$

式中,

H 为工作人员年受照剂量, mSv/a ;

D 为工作人员所在区域剂量率, mSv/h ;

t 为工作人员年受照时间, h/a 。

本项目估算辐射工作人员受照剂量时, 选取加速器机房外最大剂量率 (防护门外: $9.49E-01\mu\text{Sv/h}$) 进行估算, 估算结果见下表。

表 11-11 工作人员受照剂量估算结果

工作区域	剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$	受照时间, h	受照剂量, mSv/a
东墙外 (控制室)	9.49E-01	100	9.49E-02

②换 HAVA 膜的剂量估算

本项目的装载生产靶是将液体靶及靶材通过管道或跑兔系统运输、装载于加速器束流出口, 人员在热室内操作, 故不考虑换生产靶的剂量估算。

加速器的定期维护需要更换 HAVA 膜。根据加速器运行经验数据, 本项目加速器运行停机 24 小时后, 距离氦冷窗膜片 (HAVA 膜) 1cm 处的剂量为

10mSv/h。预计每年换 HAVA 膜频率为 2 次，每次人员接触时间 10s，年接触时间 20s/a。则换靶人员的年受照剂量为： $10 \times 20 / 3600 = 5.56E-02$ (mSv/a)。

③本项目运行所致公众年受照剂量

本项目正常运行时对周围公众的辐射影响主要来自加速器开机出束产生的瞬时辐射的直接照射以及感生放射性气体的排放造成的空气浸没外照射。

i) 加速器开机运行产生的瞬时辐射照射

瞬时照射影响对象主要考虑技物楼院内除本项目工作人员以外的工作人员，所受瞬时辐射照射剂量由下式 11-10 计算，处于保守估计，剂量率采用加速器机房墙体外剂量率。

$$H = D \times t \times T \times 1 \quad (11-10)$$

H 为公众的年受照剂量，mSv/a；

D 为公众所在区域剂量率，mSv/h；

t 为公众年受照时间，h/a。

T 为居留因子。

各参数的取值和计算结果见下表。

表 11-12 院内其他工作人员所受瞬时辐射照射剂量的计算参数和计算结果

位置	周围环境	剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	年受照时 间，h	居留 因子	受照剂 量，mSv/a
A 北墙外	围墙	2.14E-04	100	1/16	1.34E-06
B 西墙外	围墙	1.69E-04	100	1/16	1.06E-06
C 南墙外	北大等离子体实验室	2.10E-04	100	1	2.10E-05
G 屋顶	/	3.53E-05	100	1/4	8.82E-07

由此可以看出，南墙外北大等离子体实验室人员所受瞬时辐射照射剂量最大，为 2.10E-05mSv/a。

ii)放射性气体排放造成的辐射影响

根据前面的分析，本项目排放的放射性气体主要为 Ar-41，其照射途径主要考虑空气浸没外照射，主要影响主要考虑加速器机房外的其他工作人员。

根据《核设施正常工况气载放射性排出物后果评价推荐模式》（方栋和李红，2002，辐射防护，22（6）：343~348），适用于小型核设施或核技术应用项目的简单稀释模式。

若释放高度 $H \leq 2.5H_b$, 且 $x \leq 2.5A_b^{0.5}$ (A_b 为最靠近接收点的建筑物的最大截面积, 取 100m), 而接收点又不在释放点所在的建筑物表面, 则其他建筑物人员 (3m) 所处地面空气浓度为:

$$Ca.i = (P_p \cdot Q_i) / (\pi \cdot u_a \cdot H_b \cdot K) \quad (11-11)$$

式中, $Ca.i$: 下风向 x (m) 距离处的核素 i 的地面空气浓度, Bq/m^3 ;

P_p : 一年中风吹向接受点, 在扇形方位 P 的时间份额, 保守取 0.25;

Q_i : 放射性核素 i 的年均排放率, $1.74E+03 Bq/s$ (表 11-10);

u_a —释放高度上的平均风速, m/s , 取值 $2m/s$;

H_b : 邻近最高建筑物的高度, 单位 m , 取 $10m$;

K : 经验常数, 单位为 m , 取 $K=1m$ 。

空气浸没外照射计算公式如下:

$$DA = t \cdot Sf \cdot Ci \cdot GA \quad (11-12)$$

式中, DA : 年空气浸没全身剂量当量, Sv/a ;

t : 年受照时间, $365 \times 24 \times 3600s/h \times 1/16 = 1.97E+06s/a$;

Sf : 建筑物屏蔽产生的剂量减弱因子, 对于个体, 取 0.7;

Ci : 地面空气浓度, $6.94Bq/m^3$;

GA : 烟云浸没照射剂量当量转换因子, 对于 $Ar-41$ 为 $2.63E-13 Sv/s \cdot Bq \cdot m^3$ 。

气载放射性流出物致公众 (3m) 的最大个人有效剂量为 $2.52E-03mSv/a$, 关键核素为 $Ar-41$, 关键照射途径为空气浸没外照射。

④小结

经以上估算, 本项目加速器运行所致本项目工作人员和周围公众的年受照剂量见下表。

表 11-13 人员所受剂量, mSv/a

人员类型	直接外照射	浸没外照射	换靶	总计
工作人员	$9.49E-02$	$2.52E-03$	$5.56E-02$	$1.53E-01$
公众	$2.10E-05$	$2.52E-03$	—	$2.54E-03$

可见, 加速器正常运行对工作人员最大剂量 $1.53E-01mSv/a$, 对公众的最大剂量为 $2.54E-03mSv/a$ 。

3 操作非密封源的辐射环境影响分析

加速器室打靶生产出放射性核素后，由自动化的跑兔装置将靶水送入热室铅柜后，在自动化淋洗与纯化装置上进行放射性纯化，在控制室远程操作完成，此过程不需要人员近距离操作。

获得的放射性核素用于核药物的合成。核药物的合成可以在自动化模块远程操作进行，也可以在人员手动操作完成。手动操作步骤在铅柜的防护下进行，包括进行核素分析、核药物的合成与放射化学研究，以及离体的核药物研究。

所有的放射性操作均在热室完成，热室内配备两台铅柜(南侧铅柜上腔为自动合成热室、中间铅柜为手动合成热室)和通风橱，通风橱主要用于低剂量的放射化学分析，高剂量操作在自动合成热室和手动合成热室完成，该热室采用75mm铅当量的铅板和铅玻璃进行屏蔽防护，工作人员的操作距离为0.5m。

本项目热室每天仅操作一种核素，每日操作时间2小时，按年工作时间250天计，即年操作时间为500h。

(1) 源项

对 β 放射性的屏蔽要设置原子序数低的材料和原子序数高的材料，进行 β 核素的放射性操作时，铅柜铅玻璃厚75mm，可以完全屏蔽轻带电粒子。因此主要考虑 γ 射线屏蔽计算。

(2) 屏蔽体外剂量率估算方法

本项目热室每天最多操作一种核素，且高剂量操作均在手动合成热室完成，主要估算工作人员在手动合成热室操作位操作时屏蔽体外的剂量率。热室的屏蔽主要考虑铅柜的屏蔽作用，且该楼层活动人员主要为本项目辐射工作人员，且该楼层处在二层，四周无紧邻工作区域，因此仅考虑本项目工作人员在热室操作时受到的辐射影响。计算结果见表11-11。

$$H = 3600 \times \frac{A \cdot \Gamma}{r^2} \times 10^{\frac{d_{\text{铅}}}{\text{TVL}}} \quad (11-13)$$

式中 H: 剂量率, Gy/h;

A: 源的活度, Bq;

Γ : 空气比释动能率常数, $\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;

r: 距点源的距离, m;

d: 屏蔽材料铅的厚度, mm;

TVL: 十分之一层, mm。

表 11-14 手动合成热室操作位剂量率估算结果

核素名称	日最大操作量, Bq	空气比释动能率常数 $Gy \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$	d, mm	TVL*, mm	B	r, m	热室操作位剂量率, $\mu Sv/h$
F-18	1.85E+09	3.74E-17	75	17	3.87E-05	0.5	3.86E-02
Cu-64	1.85E+09	2.14E-19	75	50	3.16E-02	0.5	1.80E-01
Zr-89	1.85E+08	4.52E-17	75	35	7.20E-03	0.5	8.67E-01
Y-86	3.70E+07	1.23E-16	75	39.3	1.23E-02	0.5	8.09E-01

备注*参考辐射安全手册 6.2: γ 射线及屏蔽 P146 图 6.4。

从估算结果可知, 在操作核素 Zr-89 时, 工作人员在屏蔽体外受到的剂量率最大为 **8.67E-01** $\mu Sv/h$ 。

(3) 环境影响分析

①本项目热室操作期间工作人员所受年剂量计算如下:

$$E = H_0 \times t \times T \times K \quad (11-14)$$

式中:

E: 年有效剂量, Sv/a;

H_0 : 工作人员或公众所在位置的剂量率, Gy/h;

t: 受照时间, h/a;

K: 有效剂量与吸收剂量换算系数, 取 $K=1$, Sv/Gy;

T: 居留因子。

本项目操作非密封源对人员所致剂量的估算参数和结果见下表。

表 11-15 手动合成热室中操作非密封源对工作人员所致剂量情况

序号	核素名称	热室操作位剂量率, $\mu Sv/h$	年受照时间, h	居留因子	年受照剂量, mSv/a
1	F-18	3.86E-02	500	1	1.93E-02
2	Cu-64	1.80E-01	500	1	9.01E-02
3	Zr-89	8.67E-01	500	1	4.33E-01
4	Y-86	8.09E-01	500	1	4.05E-01

由上表可知, 在手动合成热室中进行的操作对工作人员所致的最大年剂量为 **4.33E-01**mSv/a。本项目的丙级非密封源工作场所在实验过程中只有本实验室工作人员, 周围无紧邻工作区域, 因此, 对公众的剂量可忽略不计。

②考虑本项目辐射工作人员其他辐射工作叠加影响

本项目的工作人员同时在北京大学应用化学系放射性开放实验室从事放射化学研究工作, 主要操作非密封放射性物质, 所涉及最高剂量许可的放射源为

Ga-66（日最大操作量 100MBq）和 F-18（日最大操作量 1850MBq），据最新年度个人剂量监测报告可知，本项目辐射工作人员最大年受照剂量为 0.89mSv/a。

4 小结

通过以上分析可知，本项目加速器运行期间本项目工作人员年最大受照剂量为 $1.53E-01\text{mSv/a}$ ，本项目操作非密封源期间工作人员的最大受照剂量为 $4.33E-01\text{mSv/a}$ ，叠加 2019 年本项目辐射工作人员的年剂量监测结果 0.89mSv/a ，得到本项目运行后工作人员的最大受照剂量为 1.48mSv/a ，低于工作人员的剂量约束值 2mSv/a ；

本项目加速器运行对公众的最大剂量为 $2.54E-03\text{mSv/a}$ ，操作非密封源对公众的剂量可忽略不计，低于公众的剂量约束值 0.1mSv/a 。

事故影响分析

1 事故分析

（1）回旋加速器工作人员误留或非工作人员误闯加速器大厅

由于分区管理失效，安全联锁装置失效或工作人员误操作人员等原因，造成工作人员误留机房或非工作人员误闯正在运行的加速器大厅，致使误入人员受到超过年剂量照射。

预防措施：

- ①加强分区管理和巡察力度；
- ②定期对安全联锁的有效性进行检查；
- ③加强工作人员的技能培训与考核；
- ④严格按照安全操作规程进行操作。

应急措施：

- ①立即停止出束；
- ②启动辐射事故应急预案；
- ③划出警戒线，疏散非事故处理人员；
- ④进行现场辐射环境监测；
- ⑤对受误照射人员进行生命体征检查，采取医疗救治措施。

（2）火灾、电源故障等其他事故

电源故障、着火等事故，不会对环境造成辐射污染。

(3) 液体靶泄漏

液体靶在照射和传输过程中，液体靶密封膜片破裂或传输时管线老化破损可能会造成非密封放射性物质泄漏，使加速器机房表面沾污。

(4) 热室内同位素洒落

在操作放射性同位素时有可能污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成周围环境的污染。

本项目在热室内进行同位素的纯化、合成、分装或封装等操作时，由于操作不慎发生容器破碎，同位素泼洒等意外事件，造成热室内局部污染。

2 风险防范措施

(1) 误入加速器机房预防措施

①为防止加速器工作状态下误入加速器机房，在加速器机房的防护门上安装门机连锁。只有当防护门完全关闭后，加速器才能运行、出束。

②安全连锁装置定期检查、维护，确保始终保持在良好的工作状态，门机连锁正常方可开机。

③在加速器工作之前，工作人员必须确认没有其他无关人员在机房内滞留，然后方可关闭门。

④加速器机房外设工作状态指示灯及电离辐射危险标志，在加速器启动前，声光报警装置发出警告信号，以便人员在产生辐射前安全撤离。

⑤加速器北侧、南侧、迷道入口墙壁和控制台装有醒目的急停按钮，一旦发现异常情况，按下急停按钮可立即切断供束。

(2) 靶泄漏预防及处理措施

①实验前检查液体靶密封膜片和传输时管线的性能，确保性能良好。

②如果靶物质泄漏会导致加速器主厅剂量增高，一旦发现打靶引起的异常升高，加速器运行人员应立即采取措施，立即停机。使用表面污染监测仪确定污染范围，控制现场，防止交叉污染。

③由训练有素的专业工作人员进入加速器机房去污，配置合适的去污剂、合理选择去污方法，在去污过程中要防止交叉污染和扩大污染。或者控制现场等泄漏的放射性衰变到可接受安全水平，再进行处理。对去污产生的放射性废

物进行收集，装入放射性废物桶暂存。现场去污人员做好个人防护，使用个人剂量报警仪和表面污染监测仪，并佩戴防护用品。

（3）热室内同位素洒落处理措施

若操作不慎将同位素泼洒到热室地面或台面，按照操作规程，发生这类事故时，工作人员迅速使用镊子夹干的吸水纸或棉花收集洒落液（注意防止污染扩散），使用药棉擦洗污染工作台面，然后放入放射性废物桶内进行安全存贮（包括被污染的容器碎片）。

表 12 辐射安全管理

<p>1 辐射安全与环境保护管理机构的设置</p> <p>北京大学已设有辐射安全管理机构,并成立辐射防护领导小组及其办公室,完成全校日常辐射防护工作。由主管副校长担任组长,成员由各相关职能部门部长和各院系院长(主任)组成,下设专职辐射防护人员,见表 1-7,现有的辐射安全管理机构能够满足本项目的要求。</p>
<p>2 辐射安全管理规章制度</p> <p>北京大学化学与分子工程学院已建立了放射安全和防护管理相关制度,包括:关于辐射安全与防护管理的规定、钴源管理办法、钴源安全操作规程、放射性物质操作规程、同位素库房管理制度、同位素库房管理人员岗位职责、放射化学实验室管理人员岗位职责、化学与分子工程学院辐射防护小组组长岗位职责、放射性同位素管理办法、放射性同位素台帐管理制度、化学与分子工程学院技物楼红外防盗报警系统管理办法及操作规程、设备检修与维护制度、辐射事故应急预案、放射性废物处理预案等。针对本项目,化学与分子工程学院将制定回旋加速器及核素制备配套设施相关安全操作规程,补充该制度后辐射安全管理制度能够满足本项目的需要。</p> <p>3 工作人员培训</p> <p>学校现有工作人员已全部按照计划参加辐射安全与防护考核并取得合格证书。本项目配备 5 名辐射工作人员,其基本情况及培训情况见附件 4。</p> <p>4 辐射监测</p> <p>学校已制定了监测制度,包含个人剂量监测、工作场所监测、辐射环境监测,监测结果存档。新增的辐射工作场所应纳入原有的工作场所和辐射环境监测计划中。</p> <p>对本项目新增辐射工作人员的个人剂量监测,监测频度为每季度一次。辐射工作人员均按规范佩戴个人剂量计,按照监测频度定期送检,监测结果和每年度个人剂量检测报告存档备案。</p> <p>新增工作场所的监测计划如下:利用便携式 X-γ辐射巡测仪对加速器机房屏蔽墙外四周、防护门外以及控制室进行定期巡测,监测项目为 X-γ空气吸收</p>

剂量率，监测频次为 1 次/半年。每次制备核素利用表面污染仪测量二层实验室的表面污染水平。

本项目放射工作场所的自行监测，监测频次为每季度对各机房及周围环境进行一次监测。本项目拟配备的辐射监测仪器和防护用品见表 12-1。

表 12-1 本项目拟配辐射监测仪器和仪表

序号	仪器名称	型号	数量
1	便携式 γ 剂量率仪/沾污仪	MODEL 2241-2	2
2	γ 剂量率监测系统	WF-1000-4B	1
3	个人剂量报警仪	PDM-227C	3
4	个人剂量报警仪	EPD TruDose- $\beta\gamma$	3
5	便携式 γ 剂量率仪	RadEye G-10	1
辐射防护用品			
名称	数量	名称	数量
铅衣	2	铅帽	2
铅眼镜	4	铅围裙	2
铅围脖	2	铅屏风	2

6 与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的符合情况

根据环保部《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》使用射线装置的单位应具备的条件与法规的符合情况见表 12-2。对照结果表明，该项目采取的安全措施和辐射安全管理能够满足管理办法的要求。

表 12-2 项目执行《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	管理要求	项目单位情况	检查结果
1	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标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全联锁、报警装置或者工作信号。	设置电离辐射警示标志，机房门上设有工作状态指示灯，加速器设置安全联锁装置。	符合
2	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。	委托有资质的单位对各辐射工作场所进行年度监测。	符合
3	建设项目竣工环境保护验收涉及的辐射监测，应委托经省级以上人民政府环境保护主管部门批准的有相应资质的辐射环境监测机构进行。	将委托符合要求的监测单位进行竣工的辐射监测。	符合

4	应当加强对本单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况的日常检查。	设有较为完善辐射安全管理制度。	符合
5	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。	制定放射工作年度评估报告。	符合
6	应进行辐射安全培训，并进行考核。	已通过生态环境部门认可的考核并取得合格证书。本项目涉及的辐射工作人员已参加考核，且处于有效期内	符合
7	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。	委托有资质的单位进行个人剂量监测。	符合

7 对《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求满足情况

根据环保部《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》使用放射性同位素、射线装置应具备的条件与法规的符合情况见表 12-3。对照结果表明，该项目单位能够满足管理办法的要求。

表 12-3 项目执行《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求对照表

环保部令第 3 号	项目单位情况	结论
使用 I 类、II 类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	北京大学成立了辐射防护领导小组及其办公室作为辐射安全与环境保护管理机构，负责北京大学的辐射安全与环境保护工作。	符合
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。	从事辐射工作的相关人员，已通过生态环境部门认可的考核并取得合格证书。本项目涉及的辐射工作人员已参加考核，且处于有效期内	符合
使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	本项目产生的放射性同位素将在热室中妥善封装，短期保存于铅柜内。	符合
放射性同位素与射线装置使用场所所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	设置辐射警示标志，加速器机房设置辐射安全联锁装置，防止工作人员和公众受到意外照射。满足关于操作场所设置防止误操作的安全措施的要求。	符合
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。使用非密封放射性物质的单位还应当有表面污染监测仪。	配备有个人剂量计若干、个人剂量测量报警仪、辐射监测仪器、表面污染仪等。	符合

有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	制定了各种管理制度，对设备有定期检修维护的规定，有人员培训计划和监测方案。	符合
有完善的辐射事故应急措施	对事故情况制定了《放射源和射线装置意外事故应急准备与响应计划》。	符合
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。	废气经通风机房外的排放系统，由活性炭过滤器组成的过滤装置过滤净化后排入环境。 一层加速器机房产生的放射性废液和废物分别暂存于机房内废物坑和废液坑。二层热室产生的放射性废液先暂存在热室的铅柜内，待暂存 10 个半衰期后，经检测达到解控水平后，申请解控按普通化学废液处理。放射性固废暂存于热室南侧铅柜下腔，废物暂存柜常规地每半年进行整理检测，待检测达到解控水平后申请解控，按一般化学废弃物处理	符合

8 辐射事故应急

北京大学制定了《放射源和射线装置意外事故应急准备与响应计划》，此外，化学与分子工程学院制定了《辐射事故应急预案》，明确了应急机构、成员及分工、应急程序、事故报告程序、联络方式、事故处理等，能够满足本项目的需要。

项目环保验收内容建议

根据项目实际情况，建议本项目竣工环境保护验收的内容见表 12-4。

表 12-4 项目环保验收内容建议表

验收内容	验收要求
剂量限值	剂量限值执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 规定。公众执行 0.1mSv/a；职业照射剂量约束值执行 2mSv/a。
剂量率控制水平	场所周围(包括四周、顶和底) 30cm 处的剂量率不大于 2.5 μ Gy/h。
电离辐射标志和中文警示	设置明显的辐射警告标识、中文警示说明、工作状态指示灯。
布局和屏蔽设计	工作场所分区管理。屏蔽墙和防护门的辐射防护屏蔽能力满足辐射防护法规和标准的要求。
监测仪器	配备 3 台便携式 γ 剂量率仪，6 台个人剂量报警仪，在加速器机房安装 1 套固定式 γ 剂量率监测系统以及若干个人剂量计等。
规章制度	制定有《放射性物质操作规程》、《同位素库房管理制度》、《化学与分子工程学院辐射防护小组组长岗位职责》、《设备检修与维护制度》、《辐射事故应急预案》、《放射性废物处理预案》等辐射安全防护规章制度。

人员培训	辐射安全防护负责人和全体辐射工作人员均通过生态环境部门认可的考核。
应急预案	制定有辐射事故应急预案。辐射事故应急预案符合工作实际，应急预案明确了应急处理组织机构及职责、处理原则、信息传递、处理程序和处理技术方案等。配备必要的应急器材、设备。应急预案已进行过演练。

表 13 结论与建议

<p>结论</p> <p>(1) 北京大学拟申请新增回旋加速器及配套设施项目，计划使用 1 台 14MeV 回旋加速器，用于制备 PET 放射性核素；同时配套建设 1 处丙级非密封源工作场所作为 PET 药物的生产场所，日等效操作量为 $1.85E+07Bq$。项目地点在技物楼的放射性药物研究中心，用于 PET 分子影像与放射化学基础科研。本项目符合实践正当性的要求。</p> <p>(2) 本项目拟建场址及周围的本底辐射水平在北京市本底辐射水平范围内，属于正常水平。</p> <p>(3) 本项目射线装置的工作场所装有安全联锁装置，对辐射工作场所进行了分区，制定了操作规程并严格执行，这些安全措施能够保证北京大学辐射工作的安全运行。</p> <p>(4) 在正常情况下，本项目工作人员个人年剂量为 $1.48mSv/a$，小于剂量约束值 $2 mSv/a$。对公众所致的最大个人年剂量是 $2.54E-03mSv/a$，小于剂量约束值 $0.1mSv/a$。对环境的影响是可以接受的。</p> <p>(5) 本项目辐射工作场所设置独立通风系统，产生的放射性废气经过滤后在屋顶排入空气。热室放射性废液暂存在热室的南侧铅柜下腔内，暂存至少 35 个自然日（10 个半衰期后），经检测达到解控水平后，申请解控按普通化学废液处理。热室放射性固体废物暂存在加速器机房和热室内南侧铅柜下腔内，废物暂存柜常规地每半年进行整理检测，待检测达到解控水平后申请解控，按一般化学废弃物处理。加速器机房放射性废液及放射性固体废物暂存于机房内的废液坑和废物坑中，每年对产生的固废进行检测清理，待检测达到解控水平后申请</p> <p>(6) 北京大学制定了辐射事故应急预案，并定期组织实施辐射事故应急预案的演练，通过应急演练不断完善应急预案。</p> <p>综上所述，从辐射环境保护角度分析，本项目是可行的。</p>
<p>建议和承诺</p> <p>为了保护环境，保障人员健康，北京大学承诺：</p>

(1) 严格执行已有的辐射防护与安全管理制度，绝不弄虚作假、绝不违规操作。

(2) 完善规章制度并保证各种规章制度和操作规程的有效执行，并接受环保部门的监督检查并及时整改检查中发现的问题；

(3) 本项目竣工后，建设单位应根据“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）”及国家相关规定的要求及时组织该建设项目竣工环境保护验收，编制环境保护验收监测报告。确保建设项目配套建设的环境保护设施验收合格后，主体工程方可投产运行。

