

核技术利用建设项目
新增非密封放射性物质科研场所项目
环境影响报告表



核技术利用建设项目
新增非密封放射性物质科研场所项目
环境影响报告表

建设单位名称：北京大学

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：北京市海淀区颐和园路5号

邮政编码：100871

电子邮箱：liuw87@pku.edu.cn

联系人：刘伟

联系电话：18513851657



刘伟

打印编号: 1713431195000

编制单位和编制人员情况表

项目编号	nmal3f		
建设项目名称	新增非密封放射性物质科研场所项目		
建设项目类别	55--172核技术利用建设项目		
环境影响评价文件类型	报告表		
一、建设单位情况			
单位名称 (盖章)	北京大学		
统一社会信用代码	12100000400002259P		
法定代表人 (签章)	龚旗煌		
主要负责人 (签字)	程和平		
直接负责的主管人员 (签字)	任秋实		
二、编制单位情况			
单位名称 (盖章)	核工业北京化工冶金研究院		
统一社会信用代码	12100000400777679W		
三、编制人员情况			
1. 编制主持人			
姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
王文斌	2014035410350000003508410235	BH013934	王文斌
2. 主要编制人员			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
王文斌	项目基本情况、射线装置、废弃物、评价依据、保护目标与评价标准、环境质量和辐射现状、项目工程分析与源项、辐射安全与防护、环境影响分析、辐射安全管理、结论与建议	BH013934	王文斌

表 1 项目基本情况

建设项目名称		新增非密封放射性物质科研场所项目				
建设单位		北京大学				
法人代表	龚旗煌	联系人	刘伟	联系电话	18513851657	
注册地址		北京市海淀区颐和园路 5 号				
项目建设地点		北京市怀柔区雁栖东六路多模态跨尺度生物医学成像设施 1#医学成像楼一层东部和二层东部				
立项审批部门		无		批准文号	无	
建设项目总投资（万元）		19300	项目环保投资（万元）	2000	投资比例（环保投资/总投资） 10.4%	
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 ² ） 1897.5	
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 checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> V类			
	非密封放射性物质	<input type="checkbox"/> 生产	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 type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类			
其它	/					

1.1 建设单位概况

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。近年来，在“211 工程”、“985 工程”和“双一流工程”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、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、创造性人才的摇篮、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。

鉴于生物医学成像技术在生命科学和临床医学中的重要性，世界各国都已逐渐认识到跨尺度、多模态医学成像技术的重要意义。基于我国在生物医学和健康领域的战略部署，面对生物医学基础研究领域和临床应用领域的需求，多模态跨尺度生物医学成像技术可在推动发育与生殖健康、干细胞与再生医学、心脑血管疾病、肿瘤、脑科学与认知科学等重大生物医学问题的研究上率先取得突破。根据《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》中将“多模态跨尺度生物医学成像设施”列为国家重大科技基础设施项目，是我国科学家在生物医学成像领域首倡的大科学设施。

北京大学是多模态跨尺度生物医学成像设施的法人建设单位，该科研设施总投资为17.17亿元，建设地点为北京市怀柔区综合性国家科学中心核心区，项目规划用地面积66711m²，总建筑面积为72000m²。该成像设施由四大核心装置和一个辅助平台构成，包括多模态医学成像装置（装置一）、多模态活体细胞成像装置（装置二）、多模态高分辨分子成像装置（装置三）、全尺度数据处理中心（装置四），以及模式动物中心和全尺度整合中心等辅助平台和配套设施。该成像设施的目标为打通尺度壁垒，以原理创新和自主集成为主，通过研发并有机整合不同成像模态，打造在时空尺度和模态上无缝对接的、从分子到人的“一体化”生物医学成像技术集群，通过互联互通，成像设施将覆盖跨越9个数量级的尺度范围，形成跨尺度、多模态融合、高自动化和高通量的生物医学成像全功能研究平台。

本核技术利用项目建设地点位于北京市怀柔区怀柔科学城雁栖东六路多模态跨尺度生物医学成像设施的装置一：多模态医学成像装置，多模态医学成像装置（以下简称“1#医学成像楼”）主要聚焦于生物活体的成像研究，研究对象包括小至厘米级的啮齿类模式动物（如鼠类）、几十厘米的大型模式动物（如猴类），通过对完整生命体的组织器官的结构和功能进行多种方式的成像，在体研究各类重大疾病（肿瘤、心脑血管等）病理的多参数时空关联性。针对这一定位，1#医学成像楼规划建设了多模态分子医学成像子系统，拟利用各类多模态医学成像装置和放射性同位素开展多模态分子医学成像和新型核素药物的动物试验研究。

多模态跨尺度生物医学成像设施位于北京市怀柔区怀柔科学城雁栖东六路，成像设施所在地块东侧为雁栖东六路，南侧为永乐北二街，西侧为强学路，北侧为新峰街。本项目建设地点所在位于该成像设施的1#医学成像楼内。本项目地理位置示意图见附图1，本项目1#医学成像楼周边关系示意图见附图2。

1.2 核技术利用及辐射安全管理现状

1.2.1 核技术利用现状

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，正本见附件1），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。

(1) 已许可使用的放射源：北京大学已许可使用的放射源具体情况详见表 1-1。

表 1-1 已许可使用的密封源明细

序号	核素	类别	总活度（贝可）/活度（贝可）×枚数	活动种类
1	混合 γ 源	V类	3.70E+05	使用
2	混合 α 源	V类	3.70E+04	使用
3	Zn-65	V类	3.70E+07	使用
4	Zn-65	V类	1.85E+05	使用
5	Tl-204	V类	1.05E+06	使用
6	Tl-204	V类	1.51E+06	使用
7	Tl-204	V类	1.55E+06	使用
8	Tl-204	V类	1.55E+06	使用
9	Sr-90（Y-90）	V类	4.42E+09	使用
10	Sr-90（Y-90）	V类	3.70E+07×8	使用
11	Sr-90（Y-90）	V类	3.70E+07	使用
12	Sr-90	V类	1.00E+06	使用
13	Sr-90	V类	1.04E+06	使用
14	Sr-90	V类	4.76E+05	使用
15	Sr-90	V类	2.66E+05	使用
16	Sr-90	V类	3.70E+07	使用
17	Sr-90	V类	1.48E+09	使用
18	Sr-90	V类	1.40E+09	使用
19	Sr-90	V类	1.40E+09	使用
20	Sr-90	V类	3.70E+09	使用
21	Sr-90	V类	3.70E+09	使用
22	Sr-90	V类	1.48E+09	使用
23	Sr-90	V类	2.96E+09	使用
24	Sr-90	V类	1.85E+09	使用
25	Sr-90	V类	2.96E+09	使用
26	Sr-90	V类	3.70E+09	使用
27	Sr-90	V类	1.48E+09	使用
28	Sr-90	V类	3.70E+09	使用
29	Sr-90	V类	1.48E+09	使用
30	Ra-226	V类	3.70E+05	使用
31	Pu-239	V类	1.21E+05	使用
32	Pu-239	V类	3.17E+04	使用
33	Pu-239	V类	1.11E+05	使用

34	Pu-239	V类	1.11E+05	使用
35	Pu-239	V类	1.11E+05	使用
36	Pu-239	V类	3.17E+04	使用
37	Pu-238	IV类	1.11E+09	使用
38	Pu-238	IV类	7.40E+08	使用
39	Pu-238	V类	3.70E+08	使用
40	Pu-238	V类	3.70E+08	使用
41	Pu-238	V类	3.70E+08	使用
42	Pu-238	V类	3.70E+08	使用
43	Pu-238	V类	3.70E+08	使用
44	Pu-238	IV类	1.11E+09	使用
45	Ni-63	V类	3.70E+08	使用
46	Ni-63	V类	3.70E+08	使用
47	Ni-63	V类	3.70E+08	使用
48	Na-22	V类	3.70E+06	使用
49	Na-22	V类	3.70E+06	使用
50	Na-22	V类	9.00E+06	使用
51	Na-22	V类	3.70E+07	使用
52	Mn-54,Co-60,Cs-137	V类	2.40E+05	使用
53	Mn-54,Co-60,Cs-137	V类	7.30E+05	使用
54	Mn-54	V类	7.40E+05	使用
55	Mn-54	V类	9.00E+06	使用
56	Kr-85	V类	3.70E+09	使用
57	Fe-55	V类	5.55E+08	使用
58	Fe-55	V类	4.81E+08	使用
59	Fe-55	V类	1.48E+08	使用
60	Fe-55	V类	3.70E+07	使用
61	Fe-55	V类	1.48E+08	使用
62	Fe-55	V类	1.48E+08	使用
63	Fe-55	V类	1.67E+09	使用
64	Fe-55	V类	1.66E+09	使用
65	Eu-152	V类	3.70E+07	使用
66	Eu-152	V类	8.00E+06	使用
67	Cs-137	V类	1.18E+05	使用
68	Cs-137	IV类	1.96E+09	使用
69	Cs-137	V类	7.73E+04	使用
70	Cs-137	IV类	1.57E+09	使用
71	Cs-137	V类	1.55E+05	使用
72	Cs-137	II类	2.40E+13	使用
73	Cs-137	V类	6.96E+04	使用
74	Cs-137	V类	1.00E+04	使用
75	Cs-137	V类	2.85E+04	使用
76	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
77	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
78	Cs-137	V类	3.70E+04	使用

79	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
80	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
81	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
82	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
83	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
84	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
85	Cs-137	V类	3.70E+05	使用
86	Cs-137	V类	7.40E+08	使用
87	Cs-137	V类	5.80E+08	使用
88	Cs-137	V类	1.26E+05	使用
89	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
90	Cs-137	V类	1.25E+05	使用
91	Cs-137	V类	3.70E+04	使用
92	Cs-137	V类	1.24E+05	使用
93	Cs-137	V类	1.63E+06	使用
94	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
95	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
96	Cs-137	V类	3.70E+08	使用
97	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
98	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
99	Cs-137	V类	5.05E+05	使用
100	Cs-137	V类	3.70E+07	使用
101	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
102	Cs-137	V类	1.58E+05	使用
103	Cs-137	V类	4.28E+05	使用
104	Cs-137	V类	7.40E+05	使用
105	Cs-137	V类	7.40E+05	使用
106	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
107	Cs-137	V类	1.85E+05	使用
108	Co-60	V类	1.30E+07	使用
109	Co-60	V类	1.10E+05	使用
110	Co-60	V类	1.00E+06	使用
111	Co-60	V类	1.18E+06	使用
112	Co-60	I类	1.85E+15	使用
113	Co-60	V类	3.70E+05	使用
114	Co-60	V类	3.70E+05	使用
115	Co-60	V类	1.44E+06	使用
116	Co-60	V类	1.85E+08	使用
117	Co-60	V类	1.00E+06	使用
118	Co-60	V类	1.85E+05	使用
119	Co-60	V类	1.85E+05	使用
120	Co-60	V类	1.85E+05	使用
121	Co-60	V类	2.00E+08	使用
122	Co-60	V类	6.58E+05	使用
123	Co-60	V类	6.98E+05	使用

124	Co-60	V类	3.70E+05	使用
125	Co-60	V类	1.06E+05	使用
126	Co-60	V类	2.45E+05	使用
127	Co-60	V类	3.70E+07	使用
128	Co-60	V类	1.11E+06	使用
129	Co-60	V类	3.70E+06	使用
130	Co-60	V类	1.11E+06	使用
131	Co-60	V类	1.60E+05	使用
132	Co-60	V类	1.58E+05	使用
133	Co-60	V类	1.11E+06	使用
134	Co-60	V类	1.85E+08	使用
135	Co-60	V类	1.52E+08	使用
136	Co-60	V类	3.70E+06	使用
137	Co-60	V类	1.03E+06	使用
138	Co-60	V类	1.11E+06	使用
139	Co-60	V类	1.58E+06	使用
140	Co-60	V类	3.70E+07	使用
141	Co-60	V类	3.70E+07	使用
142	Co-57	V类	1.11E+08	使用
143	Co-57	V类	1.85E+08	使用
144	Co-57	V类	9.25E+08	使用
145	Co-57	V类	3.70E+06	使用
146	Cm-244	V类	1.85E+07	使用
147	Cm-244	V类	1.85E+07	使用
148	Cm-244	V类	1.85E+07	使用
149	Cm-244	V类	1.85E+07	使用
150	Cf-252	V类	2.40E+06	使用
151	Cd-109	V类	1.51E+08	使用
152	Cd-109	V类	1.48E+08	使用
153	Bi-207	V类	6.00E+06	使用
154	Bi-207	V类	3.70E+07	使用
155	Ba-133	V类	1.00E+06	使用
156	Ba-133	V类	7.00E+05	使用
157	Am-241/Be	V类	1.20E+06	使用
158	Am-241	V类	5.53E+04	使用
159	Am-241	IV类	6.66E+09	使用
160	Am-241	V类	2.70E+04	使用
161	Am-241	V类	9.33E+04	使用
162	Am-241	IV类	6.66E+09	使用
163	Am-241	IV类	6.66E+09	使用
164	Am-241	IV类	6.66E+09	使用
165	Am-241	IV类	6.66E+09	使用
166	Am-241	IV类	6.66E+09	使用
167	Am-241	V类	1.42E+05	使用
168	Am-241	V类	1.01E+05	使用

169	Am-241	V类	4.38E+04	使用
170	Am-241	V类	5.13E+04	使用
171	Am-241	V类	1.00E+06	使用
172	Am-241	IV类	3.70E+09	使用
173	Am-241	V类	1.00E+08	使用
174	Am-241	V类	2.04E+05	使用
175	Am-241	V类	1.00E+06	使用
176	Am-241	V类	1.00E+04	使用
177	Am-241	V类	1.00E+05	使用
178	Am-241	V类	4.38E+07	使用
179	Am-241	V类	1.00E+06	使用
180	Am-241	V类	1.00E+04	使用
181	Am-241	IV类	3.70E+09	使用
182	Am-241	V类	3.70E+07	使用
183	Am-241	V类	3.70E+07	使用
184	Am-241	V类	2.10E+07	使用
185	Am-241	V类	1.10E+07	使用
186	Am-241	V类	1.07E+07	使用
187	Am-241	V类	1.07E+07	使用
188	Am-241	V类	1.07E+07	使用
189	Am-241	V类	7.03E+07	使用
190	Am-241	V类	2.14E+07	使用

(2) 已许可使用的非密封放射性物质：北京大学已许可使用的非密封放射性物质和非密封放射性物质工作场所的具体情况见表 1-2。

表 1-2 已许可使用的非密封放射性物质明细

序号	场所名称	场所等级	核素	日等效最大操作量 (贝可)	年最大用量 (贝可)	活动种类
1	应用化学系放射性药物研究中心	丙级	F-18	7.40E+06	8.88E+10	使用
2	应用化学系放射性药物研究中心	丙级	Y-86	3.70E+06	1.11E+09	使用
3	应用化学系放射性药物研究中心	丙级	Zr-89	5.92E+06	1.18E+09	使用
4	应用化学系放射性药物研究中心	丙级	Cu-64	1.48E+06	1.18E+09	使用
5	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
6	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
7	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
8	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

9	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Lu-177	1.85E+7	4.63E+10	使用
10	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
11	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	V-48	1.00E+05	1.00E+8	使用
12	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Pd-103/Rh- 103m	1.00E+06	1.00E+09	使用
13	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Eu-154	1.00E+6	1.00E+08	使用
14	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ca-45	1.00+06	1.00E+09	使用
15	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
16	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
17	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
18	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
19	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
20	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Cr-51	1.00E+10	1.00E+10	使用
21	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	S-35	1.00 E+07	3.00E+10	使用
22	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Fe-59	1.00E+7	3.00E+10	使用
23	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
24	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
25	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
26	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
27	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
28	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
29	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
30	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Sn-113 (In- 113m)	1.00E+07	2.00E+11	使用

31	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
32	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Bi-212	1.00E+7	2.50E+9	使用
33	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Pb-212	1.00E+7	2.50E+10	使用
34	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ra-224	1.00E+7	2.50E+8	使用
35	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
36	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Cs-134	3.00E+10	3.00E+10	使用
37	应用化学系放射性 开放实验室	乙级	Ce-141	1.00E+07	3.00E+10	使用
38	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
39	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
40	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
41	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
42	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
43	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
44	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
45	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	W-188/Re-188	1.00E+06	1.00E+9	使用
36	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Sr-82	1.85E+7	4.63E+10	使用
47	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	C-11	1.85E+7	4.63E+9	使用
48	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	I-126	1.85E+7	4.63E+9	使用
49	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	F-18	1.85E+7	2.00E+11	使用
50	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ra-223	1.85E+7	4.63E+8	使用
51	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Cu-61	1E+7	2E+11	使用
52	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ga-66	1E+7	2.5E+10	使用

53	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
54	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
55	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	I-124	1.85E+07	4.63E+09	使用
56	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Bi-213	1.85E+7	4.63E+9	使用
57	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ga-68	1.85E+7	4.63E+10	使用
58	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
59	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ga-67	1E+7	2.5E+10	使用
60	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Br-76	1E+7	2.5E+10	使用
61	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ac-225	1.85E+7	4.63E+9	使用
62	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Ga-68	1.85E+7	2.00E+11	使用
63	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	I-121	1E+7	2E+11	使用
64	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
65	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
66	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
67	应用化学系放射性 开放实验室	丙级	Eu-152	1.00E+6	1.00E+08	使用
68	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	F-18	1.85E+7	7.40E+10	使用
69	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Ga-68	1.85E+7	7.40E+10	使用
70	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	S-35	3.70E+6	3.70E+9	使用
71	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Cd-109	7.40E+6	3.70E+9	使用
72	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	C-14	7.40E+6	3.70E+9	使用
73	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	In-111	1.85E+7	7.40E+09	使用
74	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	I-131	1.85E+7	3.70E+9	使用

75	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	P-32	1.85E+6	3.70E+9	使用
76	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Ca-45	3.70E+6	3.70E+9	使用
77	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Co-57	3.70E+6	3.70E+9	使用
78	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	I-125	1.85E+7	9.25E+9	使用
79	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Zr-89	1.85E+07	3.00E+10	使用
80	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Cr-51	1.85E+6	3.70E+9	使用
81	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	H-3	7.40E+6	3.70E+9	使用
82	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Lu-177	1.85E+7	7.40E+9	使用
83	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Cu-64	1.85E+7	7.40E+10	使用
84	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Y-90	1.85E+07	7.40E+09	使用
85	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	P-33	1.85E+6	3.70E+9	使用
86	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	I-123	1.85E+7	7.40E+10	使用
87	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Au-198	1.85E+7	3.70E+10	使用
88	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Re-188	1.85E+7	7.40E+9	使用
89	医药卫生分析中心 同位素室	丙级	Tc-99m	1.85E+07	3.70E+11	使用
90	生命科学学院公用 同位素室	丙级	S-35	1.00E+07	3.00E+10	使用
91	生命科学学院公用 同位素室	丙级	H-3	1.0E+06	2.0E+10	使用
92	生命科学学院公用 同位素室	丙级	P-32	1.00E+07	3.00E+10	使用
93	生命科学学院公用 同位素室	丙级	C-14	3.70E+06	7.40E+09	使用
94	基础医学院放射医 学系	乙级	Re-188	3.70E+9	7.40E+12	使用
95	基础医学院放射医 学系	乙级	Ag-110m	2.20E+8	4.40E+11	使用
96	基础医学院放射医 学系	乙级	Lu-177	3.70E+9	7.40E+12	使用

97	基础医学院放射医学系	乙级	C-14	2.20E+8	4.40E+11	使用
98	基础医学院放射医学系	乙级	Y-90	3.70E+09	7.40E+12	使用
99	基础医学院放射医学系	乙级	H-3	2.20E+08	4.20E+11	使用
100	基础医学院放射医学系	乙级	Co-57	3.70E+9	7.40E+12	使用
101	基础医学院放射医学系	乙级	I-131	3.70E+9	7.40E+12	使用
102	基础医学院放射医学系	乙级	Sr-90(Y-90)	3.70E+09	7.40E+12	使用
103	基础医学院放射医学系	乙级	Tc-99m	3.70E+09	7.40E+12	使用
104	基础医学院放射医学系	乙级	I-125	3.70E+9	7.40E+12	使用
105	基础医学院放射医学系	乙级	In-111	3.70E+9	7.40E+12	使用
106	基础医学院放射医学系	乙级	P-32	2.20E+8	4.40E+11	使用
107	放射性同位素及废物暂存间	丙级	I-125	3.70E+6	1.85E+12	使用
108	放射性同位素及废物暂存间	丙级	Co-57	7.40E+4	1.85E+10	使用
109	放射性同位素及废物暂存间	丙级	Cd-109	2.00E+4	5.00E+9	使用
110	放射性同位素及废物暂存间	丙级	I-131	7.40E+6	1.85E+12	使用
111	放射性同位素及废物暂存间	丙级	P-33	2.00E+4	5.00E+9	使用
112	放射性同位素及废物暂存间	丙级	Ca-45	2.00E+4	5.00E+9	使用
113	放射性同位素及废物暂存间	丙级	P-32	2.00E+4	5.00E+9	使用
114	放射性同位素及废物暂存间	丙级	Ag-110m	2.20E+5	5.50E+10	使用
115	放射性同位素及废物暂存间	丙级	C-14	2.20E+4	5.50E+10	使用
116	放射性同位素及废物暂存间	丙级	Cr-51	2.00E+3	5.00E+9	使用
117	放射性同位素及废物暂存间	丙级	S-35	3.70E+05	9.25E+10	使用
118	放射性同位素及废物暂存间	丙级	Lu-177	7.40E+6	1.85E+12	使用

119	放射性同位素及废物暂存间	丙级	H-3	3.70E+4	9.25E+10	使用
-----	--------------	----	-----	---------	----------	----

(3) 已许可使用的射线装置：北京大学已许可使用的射线装置具体情况详见表 1-3。

表 1-3 已许可使用的射线装置明细

序号	装置名称	类别	装置数量	活动种类
1	智能 X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
2	荧光分析 X 射线管	Ⅲ类	1	使用
3	医用 X 射线机	Ⅲ类	2	使用
4	牙片机	Ⅲ类	2	使用
5	牙片机	Ⅲ类	2	使用
6	便携式变频充气 X 射线探伤机	Ⅱ类	1	使用
7	小型动物 CT	Ⅲ类	1	使用
8	小型动物 CT	Ⅲ类	1	使用
9	小角 X 射线散射仪	Ⅲ类	1	使用
10	小角 X 光散射仪	Ⅲ类	1	使用
11	小角 X 射线散射仪	Ⅲ类	1	使用
12	小动物 PET/CT	Ⅲ类	1	使用
13	胃肠机	Ⅲ类	1	使用
14	台式 X 荧光光谱仪	Ⅲ类	1	使用
15	台式 X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
16	四轴 X 射线散射仪	Ⅲ类	1	使用
17	数字胃肠机	Ⅲ类	1	使用
18	数字乳腺 X 射线机	Ⅲ类	1	使用
19	数字曲面断层	Ⅲ类	1	使用
20	数字 X 射线成像系统	Ⅲ类	1	使用
21	手持式 X 荧光光谱仪	Ⅲ类	1	使用
22	实验鼠体成像分析仪	Ⅲ类	1	使用
23	生物学 X 射线辐照仪	Ⅲ类	1	使用
24	生物学 X 射线辐照仪	Ⅱ类	1	使用
25	生物学 X 射线辐照仪	Ⅲ类	1	使用
26	乳腺机	Ⅲ类	1	使用
27	曲面断层	Ⅲ类	1	使用
28	气溶胶中和器	Ⅲ类	1	使用
29	气溶胶中和器	Ⅲ类	2	使用
30	螺旋 CT	Ⅲ类	1	使用
31	离子源实验台	Ⅲ类	2	使用
32	口腔科专用锥形束 CT	Ⅲ类	1	使用
33	加速器	Ⅱ类	1	使用
34	回旋加速器	Ⅱ类	1	使用
35	骨密度仪	Ⅲ类	2	使用
36	高性能离子源	Ⅲ类	1	使用
37	高性能离子源	Ⅲ类	1	使用
38	高分辨三维 X 射线显微成像系统	Ⅲ类	1	使用

39	高分辨粉末 X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
40	高分辨 X-射线 CT	Ⅲ类	1	使用
41	粉末 X 光衍射仪	Ⅲ类	1	使用
42	电子枪	Ⅲ类	1	使用
43	电子能谱仪	Ⅲ类	2	使用
44	电喷雾气溶胶发生器	Ⅲ类	1	使用
45	单排 CT, CT/e	Ⅲ类	1	使用
46	单螺旋 CT	Ⅲ类	1	使用
47	床边机	Ⅲ类	1	使用
48	便携式荧光光谱仪	Ⅲ类	1	使用
49	便携式 X 荧光光谱仪	Ⅲ类	1	使用
50	便携式 X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
51	X 线骨密度仪	Ⅲ类	1	使用
52	X 射线源辐照测试平台	Ⅲ类	1	使用
53	X 射线荧光光谱仪	Ⅲ类	2	使用
54	X 射线仪	Ⅲ类	2	使用
55	X 射线衍射应力分析仪	Ⅲ类	1	使用
56	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
57	X 射线衍射仪	Ⅲ类	11	使用
58	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
59	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
60	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
61	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
62	X 射线衍射仪	Ⅲ类	13	使用
63	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
64	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
65	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
66	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
67	X 射线衍射仪	Ⅲ类	1	使用
68	X 射线衍射系统	Ⅱ类	1	使用
69	X 射线显微镜	Ⅲ类	1	使用
70	X 射线微焦斑单晶衍射仪	Ⅲ类	1	使用
71	X 射线生物照射系统	Ⅲ类	1	使用
72	X 射线生物学辐照仪	Ⅱ类	1	使用
73	X 射线光电子能谱仪	Ⅲ类	1	使用
74	X 射线光电子能谱仪	Ⅲ类	2	使用
75	X 射线粉末衍射仪	Ⅲ类	1	使用
76	X 射线粉末衍射仪	Ⅲ类	1	使用
77	X 射线单晶衍射仪	Ⅲ类	1	使用
78	X 射线单晶衍射仪	Ⅲ类	1	使用
79	X 射线单晶衍射仪	Ⅲ类	1	使用
80	X 射线单晶衍射仪	Ⅲ类	1	使用
81	X 射线成象仪	Ⅲ类	1	使用
82	X-荧光能谱仪	Ⅲ类	1	使用
83	X-荧光光谱仪	Ⅲ类	1	使用

84	X-光机	Ⅲ类	1	使用
85	SPECT/CT	Ⅲ类	1	使用
86	RFQ 加速器中子照相装置	Ⅱ类	1	使用
87	RFQ 加速器	Ⅱ类	1	使用
88	DSA	Ⅱ类	1	使用
89	DR	Ⅲ类	2	使用
90	CT 机	Ⅲ类	1	使用
91	64 排 CT	Ⅲ类	1	使用
92	4.5 加速器	Ⅱ类	1	使用
93	2X6 加速器	Ⅱ类	1	使用
94	1.3GHz 超导粒子加速器	Ⅱ类	1	使用

1.2.2 近几年履行环保审批手续情况

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，严格执行各项辐射安全管理规章制度，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。北京大学近五年来开展的辐射项目情况统计见表1-4。

表 1-4 北京大学近五年开展的辐射项目情况

序号	项目名称	批复文号或备案号	进展情况
1	北京大学使用射线装置项目（2018年）	201811010800002794	已建成
2	北京大学使用射线装置项目（2020年）	202011010800003674	已建成
3	北京大学使用射线装置项目（2021年）	202111010800001090	已建成
4	北京大学使用V类放射源建设项目（2021年）	202111010800001089	已建成
5	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	建设中
6	北京大学使用射线装置项目（2023）	202311010800003007	已建成
7	北京大学生命科学学院放射性开放性实验室退役项目	202311010800003816	建设中
8	北京大学使用射线装置及放射源建设项目（2023）	202311010800003918	建设中

1.2.3 辐射安全管理情况

（一）辐射安全管理机构

北京大学现已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、完成全校日常辐射安全与防护管理工作。

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。为落实辐射防护具体工作，各涉源院系均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。北京大学目前的辐射防护领导小组名单详见表 1-5。

表 1-5 北京大学辐射防护领导小组的人员组成

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	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

本项目建设和运行部门为北京大学国家生物医学成像科学中心（以下简称“生物医学成像科学中心”）。在本项目投入运行前，生物医学成像科学中心主管领导（职务为主任、副主任或主管领导）须加入北京大学辐射防护领导小组。此外，生物医学成像科学中心还须成立辐射安全与防护工作小组，工作小组组长由中心主管领导担任，并为本项目配备 1 名辐射安全专管员，专职负责本项目辐射安全管理日常工作。

（二）辐射安全管理规章制度及执行情况

北京大学现已制定了较完善的辐射安全管理制度，各项规章制度均已得到严格落实。

北京大学现行的辐射安全管理制度主要包括：

(1) 校级管理制度

- 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》；

(2) 各部门管理制度

- 1) 《化学与分子工程学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 2) 《物理学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 3) 《生命科学学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 4) 《城市与环境学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 5) 《环境科学与工程学院放射安全和防护管理制度》；
- 6) 《考古文博学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 7) 《实验动物中心辐射安全与防护管理制度》；
- 8) 《工学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 9) 《地空学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 10) 《北京大学医院放射安全和防护管理相关制度》；
- 11) 《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》。

本项目投入运行前，生物医学成像科学中心须建立《生物医学成像科学中心辐射安全和防护管理相关制度》，内容至少包括：岗位职责、辐射安全与防护管理规定，设施设备检修维护管理规定、安全保卫制度、台账管理制度、放射性药品使用管理规定、放射源管理规定、放射性废物管理规定、实验动物管理规定、个人剂量监测管理制度、工作场所辐射监测方案等各项制度，制定动物实验操作规程、射线装置操作规程、放射性药品操作规程，制定辐射事故应急相关管理规定。同时，北京大学须结合本项目的开展，更新学校现行的辐射安全管理制度和辐射安全事故应急预案，将本项目纳入到校级辐射安全与防护管理体系内。

(三) 辐射工作人员培训

北京大学严格按照国家相关规定执行辐射工作人员持证上岗制度。目前学校辐射工作人员共计 77 人，均已通过了辐射安全与防护考核或学校自行组织的考核。《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，所有辐射工作人员均须通过辐射安全与防护考核后，方上岗可从事辐射工作。

（四）个人剂量监测和工作场所监测情况

（1）个人剂量监测

北京大学已委托有资质单位定期开展辐射工作人员个人剂量监测工作，监测频次为每三个月 1 次，在岗的辐射工作人员均已按照规范佩戴了个人剂量计。学校已指定专人负责个人剂量监测的管理工作，已为辐射工作人员建立了个人剂量档案并终生保存。根据学校提供的 2023 年度个人剂量监测报告，辐射工作人员年有效剂量最大为 0.60mSv，个人剂量监测结果均无异常，均满足辐射工作人员 2mSv/a 的剂量约束值要求，可见学校目前采取的各项辐射防护和安全管理措施是可行的。北京大学 2023 年度辐射工作人员个人剂量监测报告详见附件 2。

北京大学今后将继续加强辐射工作人员个人剂量监测工作。若发现某辐射工作人员个人剂量监测结果出现异常时（即显著高于其它同岗位工作人员的、单季度有效剂量超出 0.5mSv 的、年有效剂量超出 2mSv 的），应当立即进行核实、调查原因、采取干预措施，并将有关情况形成文字档案，经当事人签字确认后与个人剂量档案一起妥善保存。

（2）工作场所及辐射环境监测

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（原环保部令第 18 号）的要求，北京大学每年均委托有资质单位进行 1 次辐射工作场所环境辐射水平和表面污染水平监测，监测数据均记录存档。根据《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》要求，北京大学已定期开展了工作场所环境辐射水平或表面污染水平自行监测，监测结果均记录存档。

根据北京大学提供的 2023 年度辐射工作场所监测报告，学校现有辐射工作场所的 X- γ 辐射剂量率、中子周围剂量当量率、 α/β 表面污染水平、空气放射性活度浓度等监测结果均满足国家相关标准的要求，可见学校现有辐射工作场所的实体屏蔽和辐射防护设施运行状况良好。

（五）监测仪器和防护用品配备情况

北京大学现已配备有各类便携式和固定式剂量监测仪器、各类表面污染监测仪器和个人剂量报警仪等监测设备，已为辐射工作人员配备了必要的个人防护用品，能够满足目前

辐射工作的需要，北京大学已配备的监测仪器和防护用品情况详情见表 1-6。

表 1-6 北京大学现有辐射监测仪器和防护用品情况

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	红外对射防盗系统	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	手持式多功能沾污剂量仪	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β+γ检查仪	FJ-402	20010101	正常	1
18	便携式γ监测器	1692	20010101	正常	1
19	工作场所γ监测器	AGM2	2000/11/1	正常	2
20	环境中子监测器	ENM2	2000/11/1	正常	1
21	便携式巡检谱仪	GR-135	2006/6/1	正常	1
22	低能辐射仪	FJ-342	1980/1/1	正常	1
23	辐射剂量报警仪	SMACH-RG1000	2021/10/15	正常	1
24	个人辐射剂量检测仪	SOEKS	2021/10/15	正常	1
个人防护用品					
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				

(六) 辐射应急管理情况

北京大学制定了《北京大学辐射安全事故应急预案》，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。北京大学每年均定期开展辐射事故应急演练和应急培训工作。

发生辐射事故时，应立即启动本单位辐射安全事故应急预案，采取必要的应急措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境主管部门报告；射线装置被盗、丢失的，还须向当地公安部门报告；造成或可能造成人员超剂量照射的，还应向当地卫生部门报告。同时，须进行工作人员的意外事故剂量监测和工作场所及周围环境的应急监测，并作好详细的监测记录。

1.3 本项目概况

1.3.1 本项目背景

北京大学多模态跨尺度生物医学成像设施（以下简称“大设施”）建设项目已于 2018 年 12 月 17 日取得《北京市生态环境局关于多模态跨尺度生物医学成像设施环境影响报告表的批复》（京环审[2018]179 号），多模态跨尺度生物医学成像设施项目环评批复详见附件 3，建设工程规划许可证详见附件 4。本项目所在的 1#医学影像楼是多模态跨尺度生物医学成像设施的重要组成部分，主要用于多模态分子医学影像的研究和开发。1#医学影像楼主要聚焦于活体生物体的多模态成像研究，研究对象包括厘米级的啮齿类模式动物（如鼠类）到几十厘米的大型模式动物（如猴类），研究目的是将两个或多种医学成像模态在时间、空间、结构或功能上实现融合，对同一个观测对象实现两个或多个物理量的测量，通过图像数据融合，实现各种医学影像技术的有机结合，从而多侧面、全景式地揭示生命活动进程和各类重大疾病病理。

为完善 1#医学影像楼多模态医学成像装置的科研配套设施，本项目拟在 1#医学影像楼一层和二层新建 2 处非密封放射性物质动物科研场所，拟配置 PET 成像、SPECT 成像、CT 成像、MRI 成像、光声成像、荧光成像等各类生物医学成像设备，并利用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{177}Lu 放射性核素等开展多模态分子医学成像技术和新型核素药物动物试验研究。本项目建成后由北京大学国家生物医学成像科学中心负责运行。

1.3.2 本项目建设内容

本项目建设地点位于怀柔区雁栖东六路多模态跨尺度生物医学成像设施的 1#医学成像楼内，具体建设内容为：

1) 拟在 1#医学成像楼一层东部新建 1 处非密封放射性物质科研场所（以下简称“动物 PET 影像区”），拟使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 和 ^{44}Sc 共 5 种放射性核素开展 PET 医学影像技术和新型核素药物的动物试验研究，拟配备 1 台宽景 PET/CT、1 台高清 PET/CT 和 1 台 PET/MRI 设备用于动物 PET 成像，拟配套使用 6 枚 ^{68}Ge 密封源和 6 枚 ^{22}Na 密封源用于上述 3 台动物 PET 影像设备的质控校准。

2) 拟在 1#医学成像楼二层东部新建 1 处非密封放射性物质科研场所（以下简称“小动物实验区”），拟使用 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 和 ^{177}Lu 共 6 种放射性核素开展小动物多模态分子成像研究，拟配备 1 台小动物五模态分子成像设备、1 台小动物光声/CT 双模成像设备。

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）明确：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。本项目一层动物 PET 影像区和二层小动物实验区工作场所相对独立，各场所有明确的监督区和控制区划分，实验流程连续完整且独立，有独立的辐射防护措施，符合《通知》中提出的原则，因此按 2 个单独的工作场所进行日等效操作量核算。

1.3.3 放射性核素的使用情况

本项目放射性核素的使用情况如下：

（一）动物 PET 影像区

1) 本项目 1#医学成像楼一层动物 PET 影像区工作场所年最多运行 40 周，每周运行 5 个工作日，年运行时间不超过 200 天；动物 PET 影像区拟使用的动物均为 SPF 级实验猴（SPF 级动物是指无特定病原体级实验动物，不带有对人或动物本身致病的微生物），所有实验猴均由大设施的 5#楼模式动物中心负责提供。

2) 本项目动物 PET 影像区主要使用 ^{18}F 核素， ^{18}F 核素最大注射量为 148MBq/次，每日最多使用 6 次，每周最多使用 5 天，年使用天数最多不超过 200 天；

3) ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 四种核素每天最多使用其中 2 种， ^{68}Ga 核素最大注射量为 74MBq/次， ^{64}Cu 核素最大注射量为 74MBq/次， ^{82}Rb 核素最大注射量为 148MBq/次， ^{44}Sc 核素最大注射量为 37MBq/次，每种核素每日最多使用 2 次，年使用均不超过 100 天。

4) 拟使用 1 套 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器用于 ^{82}Rb 核素的淋洗，单个发生器最大活度规格不超过 $7.40\text{E}+08\text{Bq}$ （20mCi），计划每半年订购 1 个，每年最多使用 2 个。

本项目动物 PET 影像区放射性核素的使用情况详见表 1-7。

表 1-7 本项目动物 PET 影像区核素使用情况

序号	核素种类	每只最大注射量 (Bq)	每日最多注射次数*	年最大使用天数* (天)	日最大使用量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	药物来源/用途
1	¹⁸ F	1.48E+08	6	200	8.88E+08	1.78E+11	外购药物；PET 成像研究
2	⁶⁸ Ga	7.40E+07	2	100	1.48E+08	1.48E+10	外购药物；PET 成像研究
3	⁶⁴ Cu	7.40E+07	2	100	1.48E+08	1.48E+10	外购药物；PET 成像研究
4	⁸² Rb	1.48E+08	2	100	1.48E+09*	1.48E+11	发生器淋洗；PET 成像研究
5	⁴⁴ Sc	3.70E+07	2	100	7.40E+07	7.40E+09	外购药物；PET 成像研究
6	⁸² Sr	/	/	/	7.40E+08	1.48E+09 (2 个/年)	外购发生器；淋洗 ⁸² Rb 核素

注* (1) 动物 PET 影像区主要使用 ¹⁸F 核素，每周使用 5 天，年最多使用 200 天；除每天使用 ¹⁸F 核素外，最多还使用 ⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、⁸²Rb、⁴⁴Sc 四种核素中的 2 种，每种核素每天最多使用 2 次，年最多使用 100 天；

(2) 所有正电子核素每日总计注射不超过 10 次，其中 ¹⁸F 核素每日注射 6 次，⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、⁸²Rb、⁴⁴Sc 核素每日总计注射 4 次；

(3) ⁸²Rb 每日最多淋洗 2 次，表中 ⁸²Rb 日最大使用量保守取 ⁸²Sr-⁸²Rb 发生器最大活度 7.40E+08Bq 的 2 倍（淋洗效率保守按 100%计）；

(二) 小动物实验区

1) 本项目 1#医学成像楼二层小动物实验区工作场所年最多运行 40 周，每周运行 5 个工作日，年运行时间不超过 200 天；小动物实验区拟使用的动物为 SPF 级实验鼠（包括小鼠和大鼠），所有实验鼠均由大设施的 5#楼模式动物中心提供。

2) ⁸⁹Zr 核素的最大注射量为 3.7MBq/只（小鼠）和 7.4MBq/只（大鼠），每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），计划每周使用 1 天，年使用不超过 40 天；¹²⁴I 核素的最大注射量为 3.7MBq/只（小鼠）和 18.5MBq/只（大鼠），每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），每周最多使用 2 天，年使用不超过 80 天；^{99m}Tc 和 ¹¹¹In 核素的最大注射量均为 7.4MBq/只（小鼠）和 37MBq/只（大鼠），每种核素每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），每周最多使用 2 天，年最多使用 80 天；¹³¹I 和 ¹⁷⁷Lu 核素的最大注射量均为 18.5MBq/只（小鼠）和 55.5MBq/只（大鼠），每种核素每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），每周最多使用 2 天，年最多使用 80 天。

3) 本项目小动物实验区每天使用的实验鼠总量不超过 30 只（20 只小鼠和 10 只大鼠），每年最多运行 200 天，实验鼠的年累计使用量不超过 4000 只小鼠和 2000 只大鼠。

本项目小动物实验区放射性核素的使用情况详见表 1-8。

表 1-8 本项目小动物实验区核素使用情况

序号	核素种类	物种	每只最大使用量 (Bq)	日最多动物数量* (只)	年最多使用天数* (天)	日最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	核素来源/用途
1	⁸⁹ Zr	小鼠	3.70E+06	10	40	7.40E+07	2.96E+09	外购； 多模态成像研究
		大鼠	7.40E+06	5				
2	¹²⁴ I	小鼠	3.70E+06	10	80	1.30E+08	1.04E+10	外购； 多模态成像研究
		大鼠	1.85E+07	5				
3	^{99m} Tc	小鼠	7.40E+06	10	80	2.59E+08	2.07E+10	外购； 多模态成像研究
		大鼠	3.70E+07	5				
4	¹¹¹ In	小鼠	7.40E+06	10	80	2.59E+08	2.07E+10	外购； 多模态成像研究
		大鼠	3.70E+07	5				
5	¹³¹ I	小鼠	1.85E+07	10	80	4.63E+08	3.70E+10	外购； 多模态成像研究
		大鼠	5.55E+07	5				
6	¹⁷⁷ Lu	小鼠	1.85E+07	10	80	4.63E+08	3.70E+10	外购； 多模态成像研究
		大鼠	5.55E+07	5				

注*：（1）小动物实验区每天使用的实验鼠总量不超过 30 只（20 只小鼠和 10 只大鼠）；
（2）¹²⁴I、^{99m}Tc、¹¹¹In、¹³¹I、¹⁷⁷Lu 实验每周开展 2 次，每种核素每周最多使用 2 天，年最多使用 80 天；⁸⁹Zr 实验周期为 5 天，每周开展 1 次，每周最多使用 1 天，年最多使用 40 天。

1.3.4 拟新增射线装置和放射源情况

本项目一层动物 PET 影像区拟新增 1 台宽景 PET/CT 设备、1 台高清 PET/CT 设备和 1 台 PET/MRI 设备（非射线装置）；拟新增 3 枚 ⁶⁸Ge 校准源和 6 枚 ²²Na 校准源用于宽景 PET/CT 和高清 PET/CT 设备的校准，拟新增 3 枚 ⁶⁸Ge 校准源用于 PET/MRI 设备的校准；二层小动物实验区拟新增 1 台小动物五模态分子成像设备、1 台小动物光声/CT 双模成像设备。本项目拟新增的射线装置和放射源的具体情况详见表 1-9。

表 1-9 本项目拟新增射线装置和放射源具体情况

一、拟新增射线装置情况								
序号	设备名称	类别	数量 (台)	设备型号	CT 球管参数	使用场所	用途	生产厂家
1	宽景 PET/CT	III	1	待定	140kV/667mA	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间	PET/CT 动物成像	深圳安科高技术股份有限公司 粤环辐证[B0099]
2	高清 PET/CT	III	1	待定	140kV/420mA	1#医学成像楼一层 高清 PET/CT 间	PET/CT 动物成像	深圳安科高技术股份有限公司 粤环辐证[B0099]
3	小动物五模态分子成像设备（一体机）	III	1	待定	80kV/0.7mA	1#医学成像楼二层 小动物五模态分子成像间	小动物多模态成像研究	山东麦德盈华科技有限公司 鲁环辐证[13723]

4	小动物光声/CT双模成像设备	III	1	待定	130kV/0.3mA	1#医学成像楼二层 小动物多模成像间	小动物多模 态成像研究	滨松光子学商贸 (中国)有限公司 京环辐证[E0855]
---	----------------	-----	---	----	-------------	-----------------------	----------------	------------------------------------

二、拟新增放射源情况

序号	核素名称	总活度 (Bq) / 活度 (Bq) × 枚数	类别	使用场所	贮存方式与地点	用途	备注
1	⁶⁸ Ge	5.55E+07×2	V	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间和 高清 PET/CT 间	1#医学成像楼 二层放射源库	PET/CT 设备校准	线源
2	⁶⁸ Ge	1.11E+08×1	V	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间和 高清 PET/CT 间	1#医学成像楼 二层放射源库	PET/CT 设备校准	柱源
3	²² Na	3.70E+06×4	V	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间	1#医学成像楼 二层放射源库	PET/CT 设备校准	点源
4	²² Na	1.30E+08×2	V	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间	1#医学成像楼 二层放射源库	PET/CT 设备校准	线源
5	⁶⁸ Ge	5.55E+07×2	V	1#医学成像楼一层 PET/MRI 间	1#医学成像楼 二层放射源库	PET/MRI 质控校准	线源
6	⁶⁸ Ge	1.11E+08×1	V	1#医学成像楼一层 PET/MRI 间	1#医学成像楼 二层放射源库	PET/MRI 质控校准	柱源

注：二层小动物实验区的小动物五模态分子成像设备不进行有源质控；

本项目涉及的III类射线装置和 V 类密封源，在工作场所的设计阶段已考虑了放射源库的防护、III类射线装置机房屏蔽防护和空间要求。根据相关环保法律法规要求，III类射线装置和 V 类放射源对环境影响较小，本项目将对其进行简要分析。

1.3.5 非密封放射性物质工作场所的分级

本项目依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 C 进行工作场所日等效最大操作量的核算和场所分级。根据《关于明确核技术辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐函[2016]430 号）的相关处理原则：满足以下特点的放射性药品生产、使用场所，应当作为一个单独场所进行日等效操作量核算：1.有相对独立、明确的监督区和控制区划分；2.工艺流程连续完整；3.有相对独立的辐射防护措施；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：利用钼锝发生器淋洗 ^{99m}Tc 时，⁹⁹Mo 的操作视为“贮存”；放射性药品生产中分装、标记等活动视为“简单操作”；医疗机构使用 ¹⁸F 相关活动视为“很简单的操作”。根据该《通知》原则，本项目工作场所日等效最大操作量的核算方式如下：

（1）本项目 1#医学成像楼一层动物 PET 影像区和二层小动物实验区均满足《通知》提出的特点，作为 2 个单独场所进行日等效操作量核算；

(2) 本项目放射性核素药物均为科研用途，药物均为液体溶液、静脉注射，不涉及“特别危险的操作”，故将全部放射性核素的使用活动均为视为“简单操作”；利用 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器淋洗 ^{82}Rb 时， ^{82}Sr 的操作视为“源的贮存”；

(3) 毒性组别修正因子、操作方式与状态修正因子依据 GB18871-2002 附录 C 和附录 D 进行取值。

根据上述核算方式，本项目动物 PET 影像区的日等效最大操作量核算详见表 1-10。小动物实验区的日等效最大操作量核算详见表 1-11。

表 1-10 本项目动物 PET 影像区日等效最大操作量核算

核素名称	毒性分组	毒性组别修正因子	状态	操作方式	操作方式与状态修正因子	日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)
^{18}F	低毒	0.01	液态	简单操作	1	8.88E+08	8.88E+06
				源的贮存 ^(a)	100	1.78E+09	1.78E+05
^{68}Ga	低毒	0.01	液态	简单操作	1	1.48E+08	1.48E+06
			液态	源的贮存 ^(a)	100	2.96E+08	2.96E+04
^{64}Cu	低毒	0.01	液态	简单操作	1	1.48E+08	1.48E+06
^{82}Rb	低毒	0.01	液态	简单操作	1	1.48E+09 ^(b)	1.48E+07
^{82}Sr	中毒	0.1	液态	源的贮存	100	7.40E+08	7.40E+05
^{44}Sc	低毒	0.01	液态	简单操作	1	7.40E+07	7.40E+05
场所日等效最大操作量合计 ^(c)							2.83E+07 (乙级)

注：(a) ^{18}F 和 ^{68}Ga 的送药量均按最大用量的 2 倍核算；每日送药 1 次，于当天实验开始前送达；
 (b) ^{82}Rb 每日最多淋洗 2 次。 ^{82}Rb 日最大操作量保守取发生器最大活度的 2 倍；
 (c) 保守将所有核素的日等效最大操作量进行累加（假设所有核素全部在一天内使用）。

表 1-11 本项目小动物实验区日等效最大操作量核算

核素名称	毒性分组	毒性组别修正因子	状态	操作方式	操作方式与状态修正因子	日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)
^{89}Zr	中毒	0.1	液态	简单操作	1	7.40E+07	7.40E+06
^{124}I	中毒	0.1	液态	简单操作	1	1.30E+08	1.30E+07
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	低毒	0.01	液态	简单操作	1	2.59E+08	2.59E+06
^{111}In	中毒	0.1	液态	简单操作	1	2.59E+08	2.59E+07
^{131}I	中毒	0.1	液态	简单操作	1	4.63E+08	4.63E+07
^{177}Lu	中毒	0.1	液态	简单操作	1	4.63E+08	4.63E+07
场所日等效最大操作量合计*							1.41E+08 (乙级)

注*：保守将所有核素的日等效最大操作量进行累加（假设所有核素全部在同一天全部使用）；

由表 1-10 和表 1-11 可知，本项目一层动物 PET 影像区工作场所的日等效最大操作量不超过 $2.83 \times 10^7 \text{Bq}$ ，二层小动物实验区的日等效最大操作量不超过 $1.41 \times 10^8 \text{Bq}$ ，日等效最

大操作量均低于乙级场所上限，均属于乙级非密封放射性物质工作场所。

1.3.6 任务由来和评价内容

本项目属于新建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许可管理办法》和《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021年版）的相关要求，本项目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年生态环境部部令第9号）的要求，核工业北京化工冶金研究院符合第九条第一款规定，不属于该条第二款所列单位，无该条第三款所列情形，核工业北京化工冶金研究院有专职环评工程师，有能力开展环境影响评价工作。受北京大学委托，核工业北京化工冶金研究院组织技术人员对本项目进行了现场踏勘和辐射环境现状监测，收集相关技术资料，整理编制完成了本项目环境影响报告表。评价重点是本项目动物 PET 影像区和小动物实验区工作场所运行期间产生的 γ 射线、 β 射线、X射线和放射性“三废”对职业人员、周围公众和环境所产生的辐射影响。

1.3.7 项目选址与周围环境

本项目建设地点位于北京市怀柔区雁栖东六路多模态跨尺度生物学成像设施 1#医学成像楼，多模态跨尺度生物学成像设施所在地块东侧为雁栖东六路，南侧为永乐北二街，西侧为强学路，北侧为新峰街。该科研设施共包含 6 座科研用楼，包括 1#医学成像楼、2#细胞成像楼、3#分子成像楼、4#全尺度数据处理中心、全尺度整合中心、样品制备和模式动物中心，本项目建设地点所在的 1#医学成像楼位于大设施的西北部。本项目地理位置示意图见图 1-1，多模态跨尺度生物学成像设施的整体效果图见图 1-2，

本项目建设地点位于多模态跨尺度生物学成像设施 1#医学成像楼，1#医学成像楼东部区域为 3 层建筑、西部区域为 4 层建筑，无地下室。1#医学成像楼东侧为雁栖东五路，南侧为楼外道路、绿化区和 2#细胞成像楼，西侧为楼外道路和绿化区，北侧为楼外道路、绿化区和停车场。本项目 1#医学成像楼周边关系示意图见图 1-3。

本项目动物 PET 影像区位于 1#医学成像楼一层东部区域，动物 PET 影像区南侧和西侧均为走廊，东侧和北侧均为楼外道路和绿化区，楼上为小动物试验区，无地下建筑；本项目小动物实验区位于 1#医学成像楼二层东部区域，小动物实验区南侧和西侧均为走廊，东侧和北侧均为楼外区域，楼上主要为室内庭院、超声实验室和配电间，楼下为动物 PET 影像区。本项目 1#医学成像楼一层平面布局图见图 1-4，二层平面布局图见图 1-5。

本项目辐射工作场所选址周围 50m 范围内主要为 1#医学成像楼、楼外道路和绿化区，

周围无居民楼、学校、超市、养老院等人员密集场所和环境敏感目标。本项目辐射工作场所选址相对独立，并与非放射性工作场所有明确的分界隔离，充分考虑了周围区域的辐射安全与防护。预计在采取有效的辐射防护和安全管理措施后，本项目的运行对周围公众人员和环境的影响将十分有限。



图 1-1 本项目地理位置示意图



图 1-2 多模态跨尺度生物学医学成像设施的整体效果图



图 1-3 本项目 1#医学成像楼周边关系示意图



图 1-4 本项目 1#医学成像楼一层平面布局图

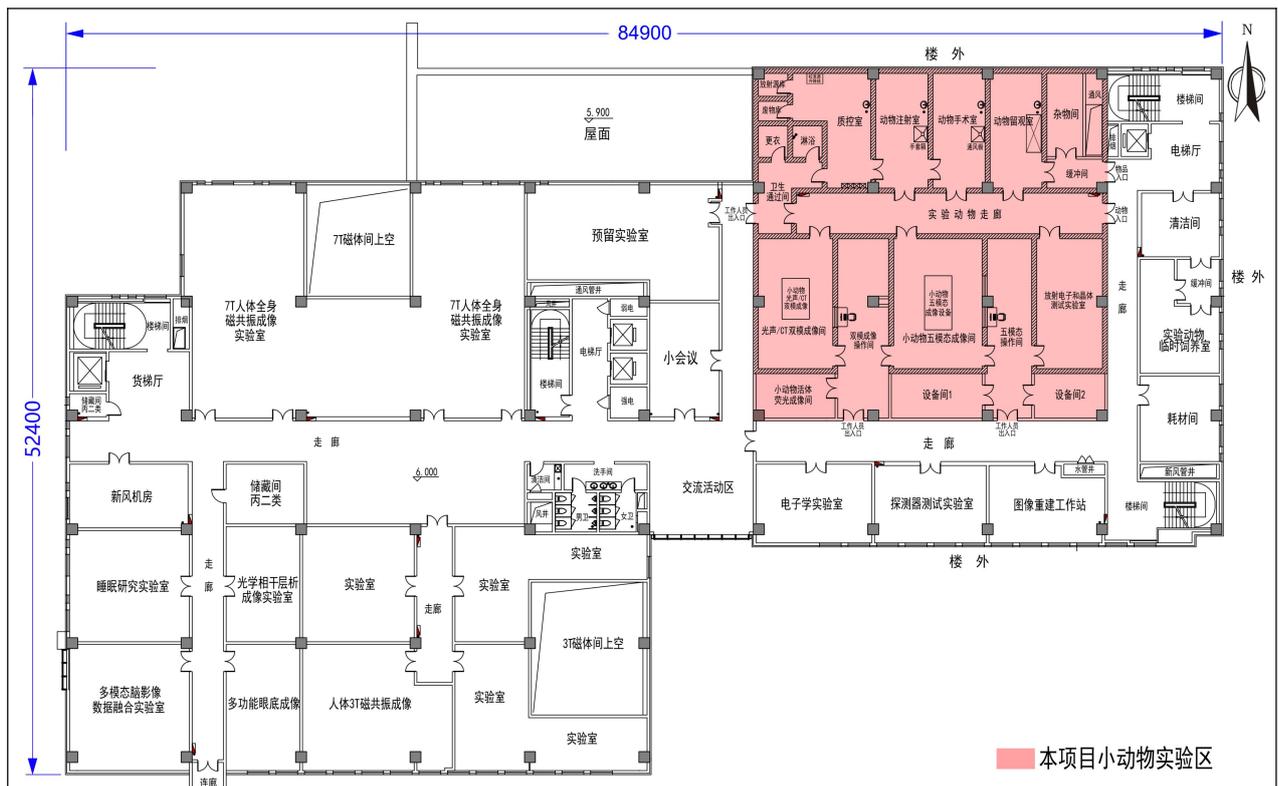


图 1-5 本项目 1#医学成像楼二层平面布局图

1.3.8 项目必要性和实践正当性分析

北京大学多模态跨尺度生物医学成像设施是《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》确定的建设项目，是我国科学家在生物医学成像领域首倡的大科学设施。《北京市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中提出加快多模态跨尺度生物医学成像设施等重大科技基础设施的建设投运，本项目所在的装置一：多模态医学成像装置是该科研设施的主要组成部分之一。

本项目是利用放射性同位素和射线装置开展多模态分子医学影像技术的研发和新型核素药物研究试验工作。本项目配套了 PET 成像、SPECT 成像、CT 成像、MRI 成像、光学成像、荧光成像等多种模态的生物医学成像设备，以本项目小动物五模态分子成像设备为代表，该设备集成并融合了 PET 成像、SPECT 成像、CT 成像、MRI 成像、FMT 荧光成像共 5 种成像模式。利用两种或多种成像模态在时间、空间、结构或功能上的融合，对同一个观测对象实现两个或多个物理量的测量，再通过图像数据的融合，实现各种生物医学成像技术的有机结合，充分发挥各种成像模态的优势，进而更直观、多侧面、全景式地揭示生命活动进程和各类重大疾病病理。本项目拟配备的各类医学影像设备在硬件和图像算法方面都已取得较大的突破，这些设备的不断改进和创新使得医学影像学能够更准确地定位病变，提供更可靠的生物学信息和病理信息。

本项目动物 PET 影像区拟使用放射性同位素包括 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc ，均为

正电子核素。¹⁸F 作为被广泛应用的 PET 显像药物，其各类标记物在医学诊断领域仍有巨大的发展潜力，金属正电子核素 ⁶⁴Cu、⁶⁸Ga、⁸²Rb、⁴⁴Sc 标记的分子探针在 PET 诊断中的研究应用越来越多，这些金属正电子核素具备不同的半衰期、理化性质和特殊生物体内性质，为放射性核素诊疗一体化提供了新的契机，如 ⁶⁴Cu 在乏氧显像中发挥着重要作用，既能用于肿瘤 PET 显像 (β^+)，又能用于肿瘤治疗 (β^-)；⁶⁸Ga 在靶向神经内分泌类 (NET) 肿瘤诊断药物领域发展迅速，⁸²Rb 可用于心肌灌注显像、脑肿瘤所致血脑屏障改变和阿尔茨海默病的诊断；本项目小动物实验区拟使用放射性同位素包括 ⁸⁹Zr、¹²⁴I、^{99m}Tc、¹¹¹In、¹³¹I 和 ¹⁷⁷Lu，¹²⁴I 核素与其他常规正电子核素相比具有较长的半衰期，具有较好的科研价值；⁸⁹Zr 核素有望在免疫 PET 显像、放射免疫治疗和抗体研究药物领域发挥作用；^{99m}Tc 是核医学领域应用最广泛的核素，适宜标记很多核医学显像药物；¹⁷⁷Lu 可以标记成多种治疗用放射性药物，可用于神经内分泌肿瘤治疗等研究。因此，本项目拟使用的放射性同位素均具有较高的科研价值和应用前景，同时也能有效推动本项目多模态医学成像技术的开发和创新，具有充分的必要性。

本项目的建设将进一步完善多模态医学成像装置 1#医学影像楼的科研配套，随着技术积累和进步，本项目的研究成果未来将逐步转化到核医学临床应用中，提升各类重大疾病的诊断精准度和治疗效果，将为临床带来更好的医疗体验和治疗结果。北京大学在开展研究试验期间，将严格按照国家相关法律、法规和标准要求对辐射工作场所采取相应的安全与防护措施，建立各项辐射安全管理的规章制度。因此，本项目的建设运行为国家、社会所带来的利益远高于代价，对社会和公众所带来的利益远大于其辐射影响和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“实践正当性”的原则与要求。

1.3.9 动物实验安排和人员配置

(一) 动物实验安排

(1) 动物 PET 影像区

本项目动物 PET 影像区工作场所年最多运行 40 周，每周 5 个工作日，年运行时间不超过 200 天。PET 成像实验使用 ¹⁸F、⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、⁸²Rb 和 ⁴⁴Sc 核素，主要使用 ¹⁸F 核素。上述 5 种正电子核素每日总计注射不超过 10 次，其中 ¹⁸F 核素每日最多注射 6 次，其他金属正电子核素每日总计注射 4 次。

本项目动物 PET 影像区拟使用的实验动物均为 SPF 级实验猴 (SPF 级动物是指无特定病原体级实验动物，不带有对人或动物本身致病的微生物)，所有实验猴均由大设施的 5#楼模式动物中心提供。本项目大设施的《实验动物生产许可证》和《实验动物使用许可

证》目前均在办理中。

根据校方提供的信息，本项目使用的 SPF 级实验猴繁育周期长，饲养量少，若实验完成后将实验猴处死，付出的代价很大，且实验猴数量不足将严重影响实验效率。基于上述限制条件并与校方沟通核实，本项目实验猴计划不进行人为处死，考虑到本项目正电子核素的注射量较小且半衰期短（半衰期最长 12.7h），实验猴计划采取分批轮换的方式，每批猴子以 1 个月为轮换周期，每批猴子数量不超过 10 只，具体的轮换方式为：

➤ 首先从 5#模式动物中心挑选第一批 10 只实验猴，运送至本项目动物观察室用于 PET 成像实验。每只实验猴每日只接受 1 次药物注射；

➤ 第一批实验猴使用满 1 个月后停止使用，并将其转移至动物暂养室内暂养。此时再从 5#模式动物中心挑选第二批 10 只实验猴，运送至本项目动物观察室用于实验；

➤ 第一批实验猴在动物暂养室内暂养满 1 个月后，经监测动物体表辐射剂量率和 β 表面污染均处于极低水平（即可作为普通实验动物无限制使用）后，送回 5#楼模式动物中心。此时第二批实验猴也已经使用满 1 个月，再将第二批实验猴转移至动物暂养室，继续暂养满 1 个月，经监测满足无限制使用要求后，送回 5#楼模式动物中心；

➤ 再去模式动物中心挑选下一批实验猴…。根据上述方式分批轮换，每批实验猴使用 1 个月再暂养 1 个月后，送回 5#楼模式动物中心。大设施的 5#楼模式动物中心的 SPF 级实验猴的饲养能力为 60 只，可满足本项目实验猴的数量需求。

➤ 本项目动物 PET 影像区拟建立《实验动物出入管理台账》，每批送达的动物、每批送回的动物均应形成台账记录（每批动物登记一行台账），台账记录内容主要包括：每批送达动物数量、送达日期、每批送回动物数量、暂养起始日期、监测结果、送回日期、责任人员等信息。实验和暂养期间实验猴可能出现意外死亡，造成送达数量和送回数量不一致，应在台账上进行详细备注。

对于实验和暂养期间意外死亡的实验猴，应将尸体密封收集、标注核素种类和产生日期后，送至一层废物间冰柜内冷冻暂存不低于 30 天后，经检测满足解控要求后实施清洁解控，解控的动物尸体返回 5#模式动物中心废物库按动物尸体的规定妥善处理。

（2）小动物实验区

本项目小动物实验区工作场所年最多运行 40 周，每周 5 个工作日，年运行时间不超过 200 天；小动物实验区所使用的放射性核素包括 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 共 6 种。小动物实验区拟使用的动物为 SPF 级实验鼠（含小鼠和大鼠），所有实验鼠均由大设施的 5#楼模式动物中心提供。小鼠每日使用量不超过 20 只，大鼠每日使用量不超过 10 只，年累计使用量不超过 4000 只小鼠和 2000 只大鼠。大设施的 5#楼模式动物中心 SPF

级实验鼠饲养能力为 8000 只/年（小鼠）和 4000 只/年（大鼠），有能力保证本项目实验鼠的供应。本项目大设施的《实验动物生产许可证》和《实验动物使用许可证》目前均在办理中。

所有实验鼠均在实验结束后处死，实验鼠尸体应密封、按核素种类分开收集，并标注核素种类和产生日期后，送至二层废物库的冰柜内冷冻暂存，暂存时间超过所含核素最长半衰期的 10 倍且不小于 30 天后（含 ^{131}I 核素尸体冷冻暂存不低于 180 天），方可实施清洁解控，返回 5#模式动物中心废物库按动物尸体的规定妥善处理。本项目小动物实验区拟建立《实验动物使用台账》，记录每日使用的实验鼠数量，每日进行 1 次台账记录。

（二）人员配置

本项目 1#医学成像楼一层动物 PET 影像区拟配备 11 名辐射工作人员，其中包括 1 名具备相关专业知识和能力的动物管理人员、2 名药物操作人员、6 名设备操作人员和 2 名质控人员；二层小动物实验区拟配备 6 名辐射工作人员，其中包括 2 名药物操作人员和 4 名设备操作人员。本项目辐射工作人员均不从事其他辐射工作，一层和二层工作人员工作内容不交叉。本项目所有辐射工作人员均须参加辐射安全与防护考核（考核类别“科研、生产及其他”），通过考核方可上岗从事辐射工作。本项目辐射工作人员配置和工作内容详见见表 1-12。

表 1-12 本项目辐射工作人员配置计划和工作内容

工作场所	人员工作岗位	数量	具体工作内容
动物 PET 影像区	动物管理人员	1 人	实验猴常规检查，确定核素用量，PET 影像分析，实验猴的管理、喂养、视察等；
	设备操作人员	6 人	实验动物摆位，宽景 PET/CT、高清 PET/CT、PET/MRI 设备操作，工作场所辐射水平监测等
	质控人员	2 人	宽景 PET/CT、高清 PET/CT、PET/MRI 设备质控校准，源库和放射源管理、实验计划制定和监督实施；
	药物操作人员	2 人	药物接收、淋洗、分装和注射，注射后动物运输，放射性废物管理、表面污染监测、污物清理清洁等；
小动物实验区	设备操作人员	4 人	实验计划的制定和实施，实验动物摆位，各成像设备和实验设备操作，场所辐射水平监测；
	药物操作人员	2 人	药物接收、分装和注射，实验鼠运输、处死、解剖，放射性废物管理，表面污染监测、场所清洁等；
人员总计	动物 PET 影像区配备 11 名，小动物实验区配备 6 名，共计 17 名		

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
1	Ge-68	5.55E+07×2	V	使用	PET/CT 校准	1#医学成像楼一层宽景 PET/CT 间 和高清 PET/CT 间	1#医学成像楼二层 放射源库	线源
2	Ge-68	1.11E+08×1	V	使用	PET/CT 校准	1#医学成像楼一层宽景 PET/CT 间 和高清 PET/CT 间	1#医学成像楼二层 放射源库	柱源
3	Na-22	3.70E+06×4	V	使用	PET/CT 校准	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间	1#医学成像楼二层 放射源库	点源
4	Na-22	1.30E+08×2	V	使用	PET/CT 校准	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间	1#医学成像楼二层 放射源库	线源
5	Ge-68	5.55E+07×2	V	使用	PET/MRI 校准	1#医学成像楼一层 PET/MRI 间	1#医学成像楼二层 放射源库	线源
6	Ge-68	1.11E+08×1	V	使用	PET/MRI 校准	1#医学成像楼一层 PET/MRI 间	1#医学成像楼二层 放射源库	柱源
	以下空白							

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	F-18	液体	使用	8.88E+08	8.88E+06	1.78E+11	科研	简单操作	1#医学成像楼一层 动物 PET 影像区	动物 PET 影像 区分装质控室
2	Ga-68	液体	使用	1.48E+08	1.48E+06	1.48E+10	科研	简单操作		
3	Cu-64	液体	使用	1.48E+08	1.48E+06	1.48E+10	科研	简单操作		
4	Rb-82	液体	使用	1.48E+09	1.48E+07	1.48E+11	科研	简单操作		
5	Sc-44	液体	使用	7.40E+07	7.40E+05	7.40E+09	科研	简单操作		
6	Sr-82	/	使用	7.40E+08	/	1.48E+09	科研	源的贮存		
7	Zr-89	液体	使用	7.40E+07	7.40E+06	2.96E+09	科研	简单操作	1#医学成像楼二层 小动物实验区	小动物实验区 动物注射室
8	I-124	液体	使用	1.30E+08	1.30E+07	1.04E+10	科研	简单操作		
9	Tc-99m	液体	使用	2.59E+08	2.59E+06	2.07E+10	科研	简单操作		
10	In-111	液体	使用	2.59E+08	2.59E+07	2.07E+10	科研	简单操作		
11	I-131	液体	使用	4.63E+08	4.63E+07	3.70E+10	科研	简单操作		
12	Lu-177	液体	使用	4.63E+08	4.63E+07	3.70E+10	科研	简单操作		
	以下空白									

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
无										

(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
1	宽景 PET/CT	III	1 台	待定	140	667	PET 成像研究	1#医学成像楼一层 宽景 PET/CT 间	动物实验设备
2	高清 PET/CT	III	1 台	待定	140	420	PET 成像研究	1#医学成像楼一层 高清 PET/CT 间	动物实验设备
3	小动物五模态分子 成像设备	III	1 台	待定	80	0.7	多模态成像研究	1#医学成像楼二层 小动物五模态成像间	动物实验设备
4	小动物光声/CT 双模成像设备	III	1 台	待定	130	0.3	多模态成像研究	1#医学成像楼二层 光声/CT 双模成像间	动物实验设备

(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 (μ A)	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	
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	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
放射性固废 (一次性注射器、手套、棉球、吸水纸、清污废物等)	固体	¹⁸ F、 ⁶⁸ Ga、 ⁶⁴ Cu、 ⁸² Rb、 ⁴⁴ Sc	/	/	40kg	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于一层废物间内	暂存超过 30 天后，经监测符合固废清洁解控要求后，作为医疗废物处理；
		¹²⁴ I、 ⁸⁹ Zr、 ^{99m} Tc、 ¹¹¹ In、 ¹³¹ I、 ¹⁷⁷ Lu	/	/	60kg	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于二层废物库内	暂存超过 180 天后（按 ¹³¹ I 考虑），经监测确认符合固废清洁解控要求后，作为医疗废物处理；
放射性废水 (洗手废水、冲厕废水、洗污废水、场所清污废水等)	液体	¹⁸ F、 ⁶⁸ Ga、 ⁶⁴ Cu、 ⁸² Rb、 ⁴⁴ Sc	/	/	68.6m ³	总β<10Bq/L	1#衰变池内暂存有效容积（3×4.0m ³ ）	暂存超过 30 天可直接解控排放，排入大设施污水处理站。
		¹²⁴ I、 ⁸⁹ Zr、 ^{99m} Tc、 ¹¹¹ In、 ¹³¹ I、 ¹⁷⁷ Lu	/	/	14.2m ³	总β<10Bq/L ¹³¹ I<10Bq/L	2#衰变池内暂存有效容积（3×4.0m ³ ）	暂存超过 180 天后（按 ¹³¹ I 考虑），委托有资质单位检测达标并经生态环境部门批准后，排入大设施污水处理站。
放射性废气	气体	¹⁸ F、 ⁶⁸ Ga、 ⁶⁴ Cu、 ⁸² Rb、 ⁴⁴ Sc	/	/	/	/	经过滤吸附后排放	动物 PET 影像区设有 1 套独立排风管道，手套箱设有 1 套独立排风管道。2 条独立排风管道均引至 1#医学成像楼楼顶上方高空排放。手套箱设自带高效过滤器，楼顶排风口处安装活性炭过滤装置，废气经过滤后排放到大气。
		¹²⁴ I、 ⁸⁹ Zr、 ^{99m} Tc、 ¹¹¹ In、 ¹³¹ I、 ¹⁷⁷ Lu	/	/	/	/	经过滤吸附后排放	小动物实验区场所设有 1 套独立排风管道，手套箱设有 1 套独立排风管道。2 条独立排风管道均引至 1#医学成像楼楼顶上方高空排放。手套箱设自带高效过滤器，楼顶排风口处安装活性炭过滤装置，废气经过滤后排放到大气。
废活性炭滤材、废高效过滤器	固体	¹⁸ F、 ⁶⁸ Ga、 ⁶⁴ Cu、 ⁸² Rb、 ⁴⁴ Sc	/	/	共 9kg (3 个)	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于一层废物间内	至少暂存 30 天，经监测符合固废清洁解控要求后，作为危险废物处理；
		¹²⁴ I、 ⁸⁹ Zr、 ^{99m} Tc、 ¹¹¹ In、 ¹³¹ I、 ¹⁷⁷ Lu	/	/	共 13kg (5 个)	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于二层废物库内	暂存不少于 180 天（按 ¹³¹ I 考虑），经监测符合固废清洁解控要求后，作为危险废物处理；

动物尸体或组织	固体	^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc	/	/	<35kg	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于一层废物间冰柜内	消毒后密封收集，冷冻暂存超过 30 天后，经监测符合固废清洁解控要求后，返回模式动物中心废物库按其规定妥善处理；
		^{89}Zr 、 ^{124}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	640kg	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于二层废物库冰柜内	消毒后密封收集打包，冷冻暂存超过 180 天后（按 ^{131}I 考虑），经监测符合固废清洁解控要求后，返回模式动物中心废物库按其规定妥善处理；
动物废物（含排泄物、废弃垫料、毛发等）	固体	^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc	/	/	730kg	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于一层废物间内	消毒后密封收集，暂存超过 30 天后，经监测符合固废清洁解控要求后，作为医疗废物处理；
		^{89}Zr 、 ^{124}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu	/	/	64kg	<10 ⁴ Bq/kg	暂存于二层废物库内	消毒后密封收集，暂存超过 180 天后（按 ^{131}I 考虑），经监测符合固废清洁解控要求后，按医疗废物处理；
废 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器	固体	^{82}Sr 、 ^{82}Rb	/	/	2个	/	暂存于一层废物间内	达到使用寿命后，由供应商及时回收；
退役校准源	固态	^{68}Ge 、 ^{22}Na	/	/	/	/	不长期暂存	及时送交北京市城市放射性废物库贮存；

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

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 9 号，2015 年 1 月 1 日起实施；</p> <p>(2) 《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 6 号，2003 年 10 月 1 日起实施；</p> <p>(3) 《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 24 号，2018 年 12 月 29 日修订并实施；</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 日经国务院令第 709 号修改并实施；</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) 《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>(8) 《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>(9) 《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>(10) 《关于发布<射线装置分类>的公告》，2017 年 12 月 5 日公布并实施；</p> <p>(11) 《关于发布放射源分类办法的公告》，原国家环保总局公告 2005 年第 62 号，2005 年 12 月 23 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 日公布并实施；</p> <p>(13) 关于印发《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》的通知，原北京市环境保护局，京环发[2011]347 号，2012 年 1 月 1 日起实施；</p> <p>(14) 《辐射安全与防护监督检查技术程序》，生态环境部，2020 年版；</p> <p>(15) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》，生态环境部公告 2019 年第 57 号，2020 年 1 月 1 日实施；</p> <p>(16) 《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），2006 年 9 月；</p>
------	--

	<p>(17) 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》，原环境保护部，环办辐射函[2016]430号。</p>
技术标准	<p>(1) 《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》(HJ 2.1-2016)；</p> <p>(2) 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ 10.1-2016)；</p> <p>(3) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)；</p> <p>(4) 《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)；</p> <p>(5) 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)；</p> <p>(6) 《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)；</p> <p>(7) 《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)；</p> <p>(8) 《放射性废物管理规定》(GB14500-2002)；</p> <p>(9) 《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010)；</p> <p>(10) 《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》(EJ380-1989)；</p> <p>(11) 《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>(12) 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2019)；</p> <p>(13) 《表面污染测定 第一部分β发射体 ($E_{\beta\max} > 0.15\text{MeV}$) 和$\alpha$发射体》(GB/T14056.1-2008)；</p> <p>(14) 《北京市水污染物综合排放标准》(DB11/307-2013)；</p> <p>(15) 《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》(GA1002-2012)。</p>
其他	<p>(1) 北京大学提供的本项目建筑图纸、相关文件、技术资料和数据等；</p> <p>(2) 《放射性核素和辐射防护数据手册》，[Radiation Protection Dosimetry.98 (1), 2002]；</p> <p>(3) Bernard Shleien.Handbook of Health Physics and Radiological Health.3rd, 1998；</p> <p>(4) 《辐射安全手册》，潘自强，科学出版社，2011年；</p> <p>(5) 《高等电离辐射防护教程》，夏益华、陈凌，哈尔滨工程大学出版社。</p> <p>(6) 《辐射防护手册第一分册 辐射源与屏蔽》([M]北京：原子能出版社，1987)，李德平，潘自强主编；</p> <p>(7) 《辐射防护手册第三分册 辐射安全》，李德平、潘自强主编；</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

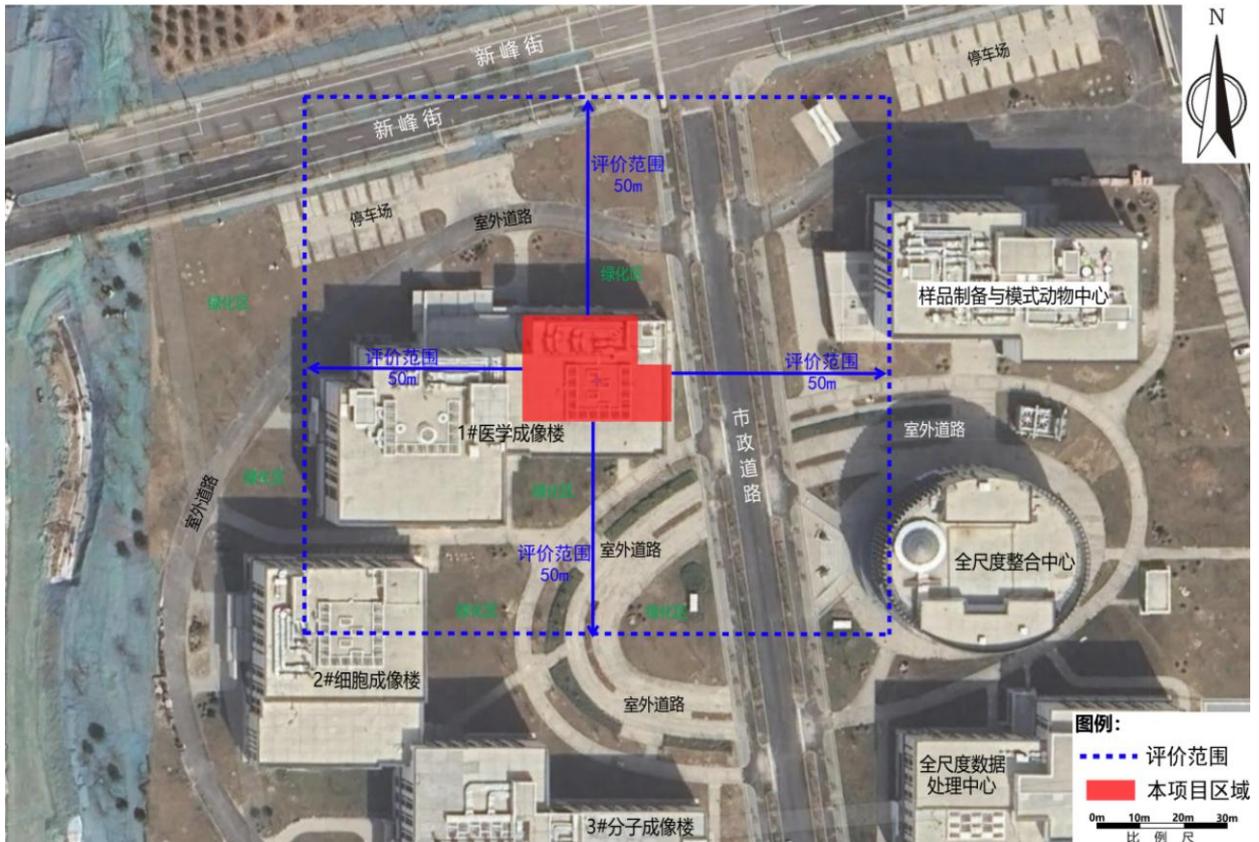
本项目主要就非密封放射性物质工作场所运行期间对周围环境以及工作人员、公众等产生的辐射影响进行分析。

7.1.2 评价因子

本项目主要评价因子为非密封放射性物质工作场所运行期间产生的 γ 射线、X射线、 β 射线和放射性“三废”。

7.1.3 评价范围

根据本项目评价内容，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）要求，本项目辐射环境影响评价范围为：以本项目非密封放射性物质工作场所控制区边界向外围扩展 50m 的区域作为评价范围。本项目评价范围示意图见图 7-1。



7.2 保护目标

本项目拟建动物 PET 影像区位于 1#医学成像楼一层东部区域，场所建成后，其东侧 50m 范围内主要为市政道路；南侧 50m 范围内主要为楼外道路、绿化区和 2#细胞成像楼；西侧 50m 范围内主要为磁共振和脑磁图实验区；北侧 50m 范围内主要为楼外道路、绿化区和停车场；动物 PET 影像区楼上主要为小动物实验区工作区域，无地下建筑。

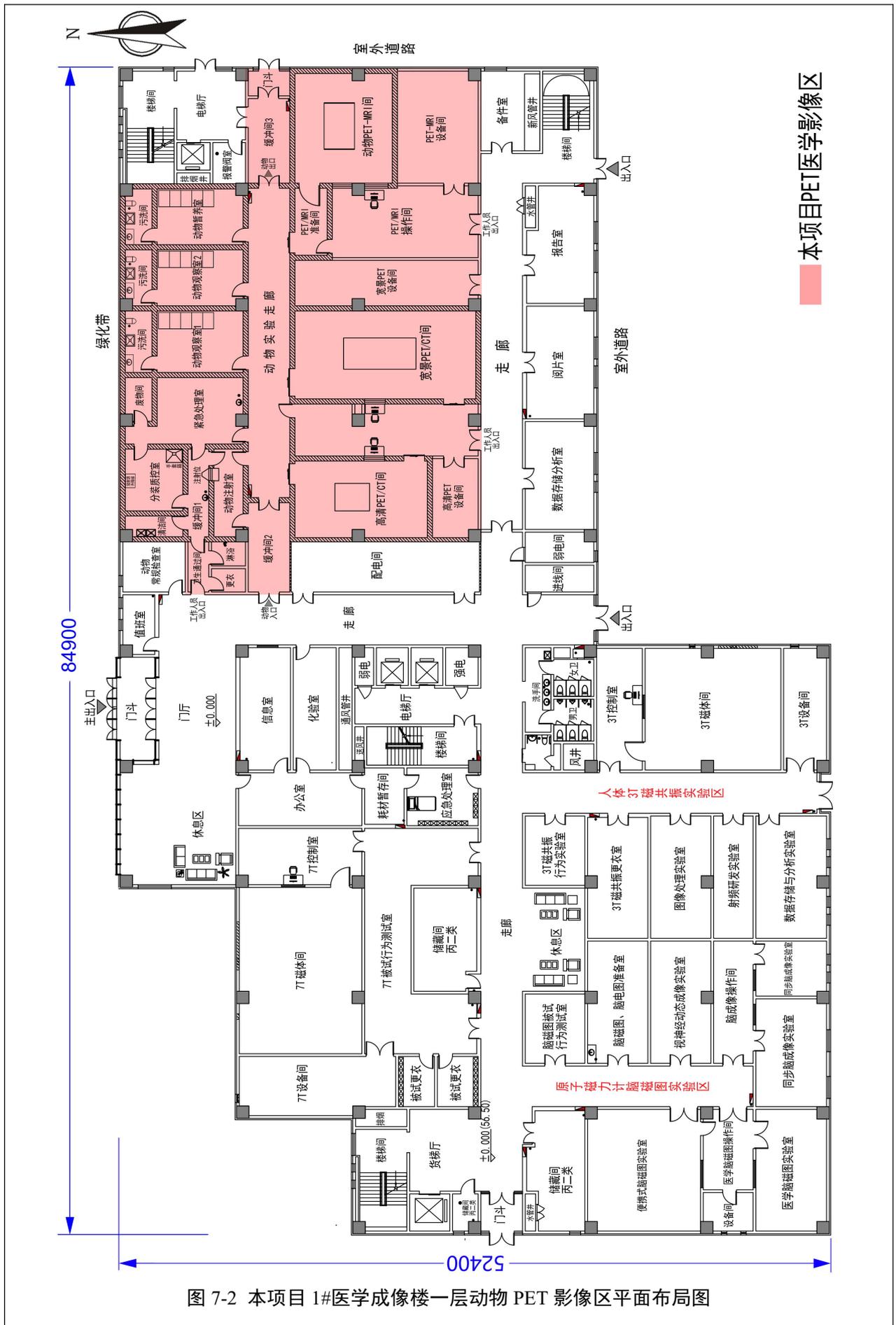
本项目拟建小动物实验区位于 1#医学成像楼二层东部区域，场所建成后，其东侧 50m 范围内主要为市政道路；南侧 50m 范围内主要为楼外道路、绿化区和 2#细胞成像楼；西侧 50m 范围内主要为磁共振和脑磁图实验区；北侧 50m 范围内主要为楼外道路、绿化区和停车场；小动物实验区楼上主要为室内庭院、超声实验室和配电间等，楼下为动物 PET 影像区工作区域。

本项目评价范围内的建筑物主要为 1#医学成像楼，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 1#医学成像楼内其他科研人员）。本项目评价范围内保护目标分布情况见表 7-1。1#医学成像楼一层平面布局示意图见图 7-2，二层平面布局示意图见图 7-3，三层平面布局示意图见图 7-4。

表 7-1 本项目评价范围内保护目标的分布情况

辐射场所	方位	距离	场所	人数	保护对象
1#楼一层 PET 医学 影像区	/	紧邻	PET/CT 操作间、PET/MRI 操作间	7 人	辐射工作人员
	东侧	0~8m	报警阀室、电梯厅、楼梯等	流动人员	公众
		0~40m	市政道路、人行道	流动人员	
		40~50m	样品制备与模式动物中心（局部）	约 10 人	
	南侧	0~3m	走廊	流动人员	公众
		3~9m	数据储存分析室、阅片室、报告室、 备件室	约 5 人	
		9~50m	绿化区、室外道路	流动人员	
	西侧	0~4m	动物常规检查室	2 人	公众
		4~8m	值班室	2 人	
		8~17m	信息室、化验室	约 5 人	
		17~21m	休息区、办公室、应急处理室	约 10 人	
		21~42m	7T 被试行为测试室、7T 控制室、 7T 核磁间	约 10 人	
		42~50m	库房、电梯楼梯、楼外道路等	流动人员	
	西南侧	0~8m	走廊	流动人员	公众
		8~17m	3T 控制室、3T 核磁间	2 人	

		17~29m	3T 磁共振行为实验室、更衣室、图像处理室、研发室、数据分析室等	约 10 人	
		29~39m	脑磁图行为测试室、准备室、视神经成像室、脑成像实验室及其操作间	约 10 人	
		39~50m	医学脑磁图实验室、脑磁图操作间、便携式脑磁图实验室	约 10 人	
		40~50 m	2#细胞成像楼（局部）	约 20 人	
	北侧	0~50m	绿化区、室外道路、停车场等	流动人员	公众
	楼上	紧邻	二层小动物实验区	4 人	辐射工作人员
		紧邻	动物临时饲养室、清洁间	2 人	公众
1#楼二层 小动物实 验区	/	紧邻	多模成像操作间、五模态操作间	4 人	辐射工作人员
	东侧	0~2m	电梯、楼梯、走廊	流动人员	公众
		2~8m	动物临时饲养室、清洁间、耗材间	2 人	
		8~50m	市政道路、人行道	流动人员	
		50m	样品制备与模式动物中心（局部）	约 10 人	
	南侧	0~3m	小动物活体荧光成像室	2 人	公众
		3~6m	走廊	流动人员	
		6~13m	图像重建工作站、探测器实验室、电子学实验室	约 5 人	
		13~50m	绿化区、室外道路	流动人员	
	西侧	0~3m	走廊	2 人	公众
		3~17m	预留实验室、小会议室	约 5 人	
		17~42m	7T 磁共振实验室	约 10 人	
		42~50m	库房、楼梯、楼外道路等	流动人员	
	西南侧	0~3m	走廊	流动人员	公众
		3~8m	交流活动区	约 5 人	
		8~33m	3T 磁共振实验室区域	约 10 人	
		33~50m	多功能实验室、光学成像实验室、数据融合实验室、睡眠研究实验室	约 10 人	
		40~50m	2#细胞成像楼（局部）	约 20 人	
	北侧	0~50m	绿化区、室外道路、停车场等	流动人员	公众
	楼上	紧邻	三层室内庭院、各实验室、配电间	约 15 人	公众
楼下	紧邻	一层动物 PET 影像区	7 人	辐射工作人员	



■ 本项目PET医学影像区

图 7-2 本项目 1#医学成像楼一层动物 PET 影像区平面布局图

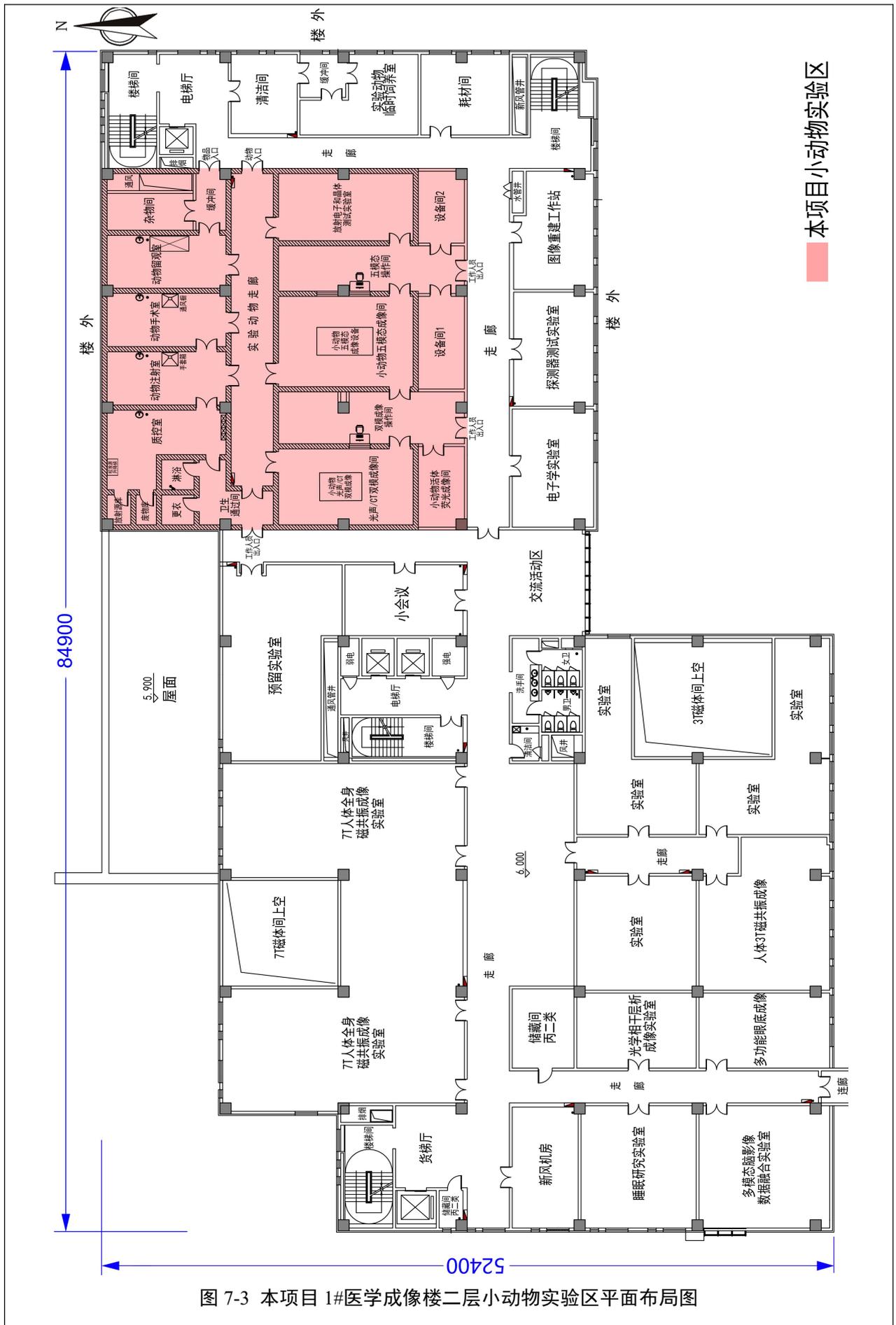


图 7-3 本项目 1#医学成像楼二层小动物实验区平面布局图

■ 本项目小动物实验区

7.3 评价标准

7.3.1 剂量限值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的规定，工作人员的职业照射和公众照射的剂量限值见表 7-2。

表 7-2 个人剂量限值

辐射工作人员	公众关键人群组
连续 5 年的年平均有效剂量不超出 20mSv，且任何一年中的年有效剂量不超出 50mSv。	年有效剂量不超出 1mSv，特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高 5mSv。
眼晶体的当量剂量 150mSv/a；四肢或皮肤的当量剂量 500mSv/a。	眼晶体的当量剂量 15mSv/a；皮肤的当量剂量 50mSv/a。

7.3.2 剂量约束值

本项目拟配备 17 名辐射工作人员，根据本项目特点并遵循辐射防护最优化原则，本评价对职业照射和公众分别设定了年受照剂量约束值：

- (1) 本项目辐射工作人员的剂量约束值取 2mSv/a；
- (2) 本项目公众成员的剂量约束值取 0.1mSv/a。

7.3.3 放射工作场所周围剂量率控制水平

辐射工作人员和公众除满足上述剂量约束值外，还须满足以下剂量率控制要求：根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）并结合本项目的实际情况，本项目动物科研场所周围剂量当量率拟从严控制：

- (1) 在场所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 μ Sv/h；控制区内各房间屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率控制目标值应小于 2.5 μ Sv/h；
- (2) 手套箱/通风橱外表面 30cm 处和操作位处的周围剂量当量率应小于 2.5 μ 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应小于 2.5 μ Sv/h。

7.3.4 工作场所放射性表面污染控制水平

本项目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》（GB 18871-2002）的有关规定执行，见表 7-3。

表 7-3 工作场所的放射性表面污染控制水平（单位 Bq/cm²）

表面类型		β 放射性物质
工作台、设备、墙壁、地面	控制区*	4 \times 10
	监督区	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4

	监督区	
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-1}
注：该区内的高污染子区除外。		

根据 GB18871-2001 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 非密封源工作场所的分级

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 C，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。

表 7-4 非密封源工作场所的分级

界别	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 $\sim 2 \times 10^7$

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 C，放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量（Bq）与该核素毒性组别修正因子的积除以与操作方式有关的修正因子所得的商。放射性核素的毒性组别修正因子及操作方式有关的修正因子分别见表 7-5 和表 7-6。

表 7-5 放射性核素毒性组别修正因子

毒性组别	毒性组别修正因子
极毒	10
高毒	1
中毒	0.1
低毒	0.01

表 7-6 操作方式与放射源状态修正因子

操作方式	放射源状态			
	表面污染水平较低的固体	液体，溶液，悬浮液	表面有污染的固体	气体，蒸汽，粉末，压力很高的液体，固体
源的贮存	1000	100	10	1
很简单的操作	100	10	1	0.1
简单操作	10	1	0.1	0.01
特别危险的操作	1	0.1	0.01	0.001

依据《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）中操作因子选取原则，本项目动物 PET 影像区和小动物实验区所使用的核素均为科研用途，且不涉及“特别危险的操作”，故将本项目所有核素的操作活动均视为“简单操作”；

使用 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器时， ^{82}Rb 相关操作视为“简单操作”， ^{82}Sr 操作视为“源的贮存”。

7.3.6 放射性固废和放射性废水的管理要求

(一) 根据《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 第 8 款的相关规定：

(1) 放射性废物分类，应根据医学实践中产生废物的形态及其中的放射性核素种类、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。

(2) 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。

(3) 放射性废液衰变池应合理布局，池底和池壁应坚固、耐酸碱腐蚀和无渗透性，并有防泄漏措施。

(4) 供收集废物的污物桶应具有外防护层和电离辐射警示标志。

(5) 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。

(6) 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。

(7) 每袋废物的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h ，质量不超过 20kg 。

(8) 储存场所应具有通风设施，出入口设电离辐射警告标志。

(9) 废物袋、废物桶及其他存放废物的容器应安全可靠，并在显著位置标有废物类型、核素种类、存放日期等说明。

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

(二) 根据《北京市水污染物综合排放标准》(DB11/307-2013) 的规定，排入公共污水处理系统的水污染物排放要求：总 α 排放限值为 1Bq/L ，总 β 排放限值为 10Bq/L 。

(三) 本项目放射性固体废物和放射性废水的清洁解控参考《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，根据 HAD401/16-2023 中第 3.7 款的相关规定：

(1) 对于适合清洁解控的废物，当废物中的放射性核素含量低于清洁解控水平时，可参考附录 III，按相关流程进行解控。

(2) 废物产生单位和管理单位应遵守以下关于清洁解控的管理规定：1) 清洁解控水平应依据国家标准或相关规定；2) 应建立程序制度，规定控制措施，确保遵守清洁解控方面的监管要求；3) 不得故意稀释废液或废气使其适合清洁解控，正常操作中的稀释除外；4) 应去除解除监管控制物料上的辐射标识；

(3) 应记录清洁解控物料的信息，按质量保证要求进行保管，并按要求向监管部门报告。

(4) 放射性废物清洁解控前需完成的工作主要包括：1) 确定废物的活度；2) 分拣出计划进行储存衰变的废物；3) 清洁解控前对每批废物取样。

(5) 实施清洁解控前，应确认核素浓度，记录废物信息。只含极短半衰期核素的废物（主要是核医学领域、放射药物研发和检定产生的放射性废物），其清洁解控流程可参考附录III实施。

HAD401/16-2023 附录III：核医学放射性废物清洁解控流程示例

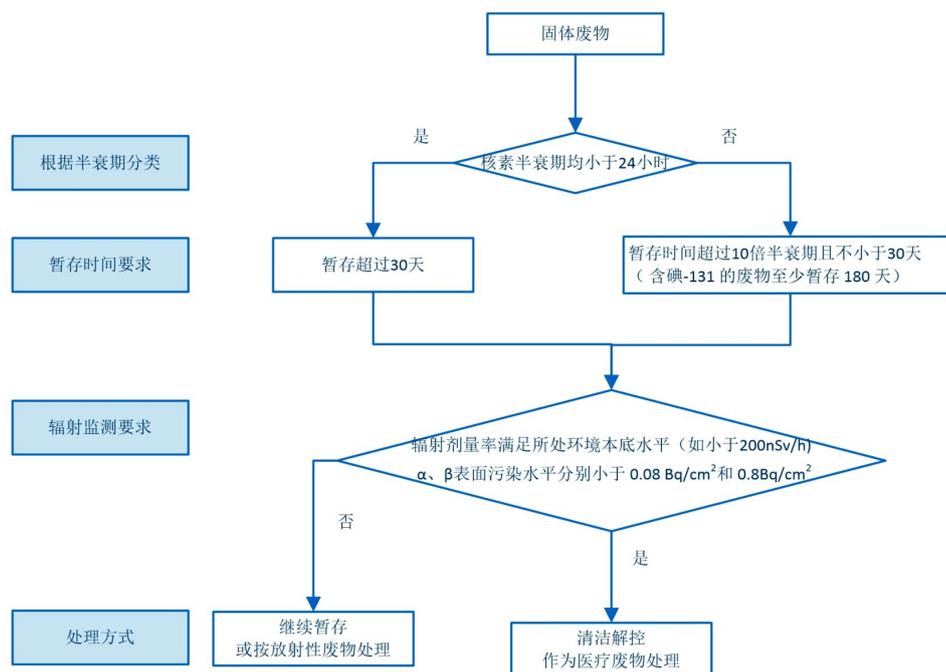


图 7-5 固体废物解控示例

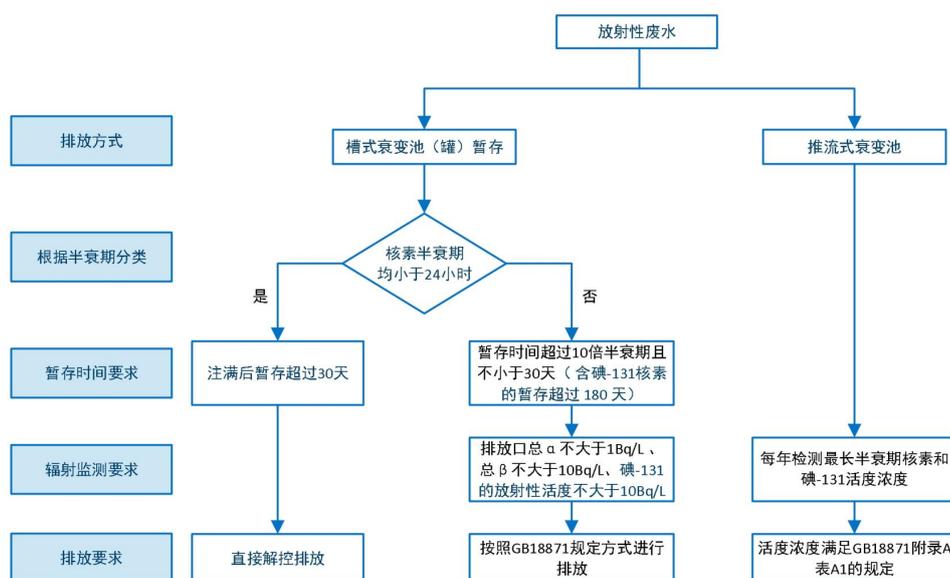


图 7-6 废水排放示例

本项目一层动物 PET 影像区拟使用的放射性核素包括 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 共 5 种，5 种核素的半衰期均小于 24h。根据上述要求，放射性固废应密封收集、标注所含核素种类和产生日期后，送至一层废物间的铅废物桶内暂存，放射性固体废物应暂存超过 30 天后，使用经检定或校准合格的仪器进行监测，废物表面辐射剂量率满足所处环境本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可对固废进行清洁解控并作为医疗废物处理；动物 PET 影像区产生的放射性废水暂存时间应超过 30 天，直接进行解控排放，解控废水均排入大设施配套的污水处理站，经处理后最终排入市政管网。

本项目二层小动物实验区拟使用的放射性核素包括 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 共 6 种，除含 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素半衰期小于 24h 外，其他核素半衰期均大于 24h，为便于放射性固废的有效管理，本项目小动物实验区含 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 和 ^{177}Lu 核素的固废暂存时间均按不少于 180 天进行管理（均按含 ^{131}I 的固体废物考虑）；放射性固废应密封收集、标注所含核素种类和产生日期后，送至二层废物库铅废物桶内暂存，放射性固废达到暂存时间后，使用经检定或校准合格的仪器进行监测，废物表面辐射剂量率满足所处环境本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可对固废进行清洁解控并作为医疗废物处理；动物 PET 影像区产生的放射性废水暂存时间应超过 180 天（按含 ^{131}I 核素的废水考虑），放射性废水达到暂存时间后，应委托有资质（CMA 或 CNAS）的检测机构对拟排放废水中最长半衰期核素的放射性活度浓度进行检测，经检测废水的总 β 不大于 $10\text{Bq}/\text{L}$ 、碘-131 的放射性活度浓度不大于 $10\text{Bq}/\text{L}$ 后，按照 GB 18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。解控废水均排入大设施配套的污水处理站，经处理后最终排入市政管网。

实验动物尸体管理要求：本项目产生的实验动物尸体或组织应按照所含核素种类分类收集，动物尸体或组织装入密封袋、标注所含核素种类和产生日期后，送至对应的固废间的专用冰柜内冷冻暂存；所有实验动物尸体均应冷冻暂存，暂存时间应超过所含核素半衰期的 10 倍且不低于 30 天（其中含 ^{131}I 的动物尸体废物暂存应超过 180 天），动物尸体废物的清洁解控水平与放射性固废的要求一致，解控后的动物尸体废物送至 5#模式动物中心废物库，按 5#模式动物中心动物尸体的规定妥善处理。

台账管理要求：本项目产生的放射性固体废物、实验动物尸体废物的暂存和解控应安排专人负责，并建立《放射性固废和动物尸体暂存、解控管理台账》，详细记录放射性废物类型、废物所含核素名称、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、废物最终去向等信息，每袋放射性固废填写一行记录。本项目放射性废水的暂存和解控应安排专人负责，建立《放射性废水暂存和处理管理台帐》，详细记录放射性废

液所含的核素名称、体积、废液暂存起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。

7.3.7 放射性废气排放管理

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）第 5.2.3 款的有关规定：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。操作放射性药物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。

本项目一层动物 PET 影像区工作场所设 1 套独立排风管道，主排风管道通向 1#医学成像楼楼顶高空排放；一层手套箱拟设置 1 条独立排风管道，手套箱出风口处安装高效过滤器，废气通过 1 条独立管道引至 1#医学成像楼楼顶高空排放。

本项目二层小动物实验区工作场所设 1 套独立排风管道，主排风管道通向 1#医学成像楼楼顶高空排放；二层手套箱拟设置 1 条独立排风管道，手套箱出风口处均配备有高效过滤器，废气通过独立管道引至 1#医学成像楼楼顶高空排放。

本项目 1#医学成像楼楼顶 4 个排风口高度均为 23.9m，排风管道处均设置活性炭过滤装置，所有排风滤材每年至少更换 1 次，更换下来的废弃滤材密封包装收集，按放射性固体废物的要求进行暂存，到达暂存时间后，经监测满足清洁解控水平后实施解控，并作为危险废物处理。

7.3.8 放射性药物操作的放射防护相关要求

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。

7.3.9 工作场所分类管理要求

本项目非密封放射性物质工作场所属于医学科研用途，本评价参考《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）第 5.2.2 条要求，应依据计划操作最大量放射性核素的加权活度对开放性放射性核素工作场所进行分类管理，不同类别核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求见表 7-7。

表 7-7 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求

种类	分类		
	I	II	III
结构屏蔽	需要	需要	不需要
地面	与墙壁接缝无缝隙	与墙壁接缝无缝隙	易清洗
表面	易清洗	易清洗	易清洗
分装柜	需要	需要	不必须
通风	特殊的强制通风	良好通风	一般自然通风
管道	特殊的管道 ^a	普通管道	普通管道
盥洗与去污	洗手盆 ^b 和去污设备	洗手盆和去污设备	洗手盆 ^b

^a 下水道宜短，大水流管道应有标记以便维修检测。
^b 洗手盆应为感应式或脚踏式等手部非接触开关控制

本项目一层和二层工作场所按操作量最大的核素进行核算时，加权活度均大于 50MBq、小于 50000MBq，属于 II 类场所，按照表 7-7 的要求，需采取结构屏蔽，地面与墙壁无缝隙、采用易清洗材料敷设墙面，设分装柜和通风设施，设洗手盆和去污设备。

7.3.10 III 类射线装置机房防护相关要求

本项目拟新增的宽景 PET/CT、高清 PET/CT、小动物五模态分子成像设备、小动物光声/CT 双模成像设备中的 CT 模块均属于 X 射线医学影像设备（III 类射线装置），用于

X 射线医学成像研究，其相关要求可参考《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）的相关要求执行：

（1）参考 GBZ130-2020，III类射线装置机房的屏蔽防护应满足表 7-8 的要求：

表 7-8 不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向铅当量(mm)	非有用线束方向铅当量(mm)
CT 机房（不含头颅移动 CT）	2.5	

（2）X 射线设备机房最小有效使用面积、最小单边长度应符合表 7-9 的规定。

表 7-9 X 射线设备机房使用面积、单边长度的要求

设备类型	机房内最小有效使用面积（m ² ）	机房内最小单边长度（m）
CT 机（不含头颅移动 CT）	30	4.5

7.4 评价目的

（1）对建设项目环境辐射现状进行调查或监测，以评价该地区辐射环境状况及场址周围的辐射环境现状水平；

（2）评价项目在运行过程中对工作人员及公众成员所造成的辐射影响；

（3）评价辐射防护措施效果，提出减少辐射危害的措施，为生态环境主管部门的管理提供依据；

（4）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；

（5）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“可合理达到的尽量低水平”；

（6）评价项目的可行性，从环境保护角度为生态环境主管部门和北京大学进行辐射环境管理提供依据。

7.5 评价原则

依据国家相关法律、法规及部门规章展开评价，严格执行国家和北京市的有关标准。要求辐射防护设计和安全措施必须满足相关标准的规定，并保证各类人员受照剂量在规定的限值以内，满足辐射实践的正当性、辐射防护与安全的最优化原则。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 地理位置和场所位置

本项目位于北京市怀柔区雁栖东六路多模态跨尺度生物医学成像设施，该设施所在地块东侧为雁栖东六路，南侧为永乐北二街，西侧为强学路，北侧为新峰街。本项目建设地点位于多模态跨尺度生物医学成像设施 1#医学成像楼内，楼东侧为雁栖东五路，南侧为楼外道路、绿化区和 2#细胞成像楼，西侧为楼外道路和绿化区，北侧为楼外道路、绿化区和停车场。本项目地理位置示意图见附图 1，本项目 1#医学成像楼周边关系示意图见附图 2。

本项目拟建动物 PET 影像区位于 1#医学成像楼一层东部区域，动物 PET 影像区南侧和西侧均为走廊，东侧和北侧均为楼外道路和绿化区，动物 PET 影像区楼上为小动物实验区，无地下建筑；本项目拟建小动物实验区位于 1#医学成像楼二层东部区域，小动物实验区南侧和西侧均为走廊，东侧和北侧均为楼外区域，小动物实验区楼上主要为室内庭院、超声实验室、配电间等，楼下为动物 PET 影像区。本项目 1#医学成像楼一层平面布局图见附图 3，二层平面布局图见附图 4。

8.2 环境质量和辐射现状

8.1.1 监测内容

核工业北京化工冶金研究院分析测试中心于 2024 年 3 月 6 日对本项目拟建辐射工作场所及周围环境进行了现状监测。

8.1.2 监测依据

监测方法按照《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）、《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）进行。

8.1.3 监测仪器参数

本次监测所使用的仪器已通过中国计量科学研究院检定，并处于有效期内，检测仪器性能和参数如表 8.1 所示。

表 8.1 检测仪器性能和参数表

仪器名称	X- γ 剂量率仪
仪器型号	AT1123
仪器编号	YQ-HJ-0071
能量响应	25keV~3.0MeV

测量范围	50nSv/h~10Sv/h
检定证书	DLjl2023-08378
检定有效期	2023年7月3日-2024年7月2日

8.1.4 质量保证措施

- 合理布设监测点位，保证各监测点位布设具有代表性、科学性和可比性；
- 采用国家有关部门颁布的标准方法，监测人员经考核并持有合格证书上岗；
- 检测仪器已经过计量部门检定，并处于有效期内；
- 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；
- 检测报告严格实行三级审核制度，经过校对、校核，最后由技术总负责人签发。

8.1.5 监测结果及分析

本项目现状监测结果见表 8.2，现状监测布点图见图 8.1。

表 8.2 辐射环境现状监测结果

点位编号	监测点位描述	检测数据（单位：nGy/h）
1	拟建动物 PET 影像区区域内（一层）	98.2±2.6
2	拟建小动物实验区区域内（二层）	102±2.3
3	拟建小动物实验区域楼上（三层）	108±4.3
4	1#医学成像楼东部北侧绿化带	94.3±2.2
5	1#医学成像楼东侧市政道路	92.5±2.1
6	1#医学成像楼东部南侧绿化带	94.4±2.0
7	1#医学成像楼西部一层区域	101±2.9
8	1#医学成像楼北侧入口门厅处	97.9±2.7
9	1#医学成像楼西侧绿化带	94.8±2.6
10	1#医学成像楼西部南侧道路	92.7±2.5

注：（1）以上监测数据未扣除对宇宙射线的响应；

（2）上述结果已参照《便携式 X、 γ 辐射周围剂量当量（率）仪和监测仪》（JJG393-2018）附录 D 表 D.2 进行换算， $H_K^{(10)}$ 取推荐值 1.20Sv/Gy。

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）。由表 8.2 的辐射环境现状监测结果可知，本项目拟建辐射工作场所区域内及周围环境的 γ 辐射剂量率为 92.7~108nGy/h，处于北京市天然本底水平范围内，未发现辐射水平异常。



图 8.1 本项目辐射环境现状监测布点图

表 9 项目工程分析与源项

9.1 动物 PET 影像区

9.1.1 设备组成及工作原理

(一) PET/CT 工作原理

PET 即正电子发射断层显像技术 (Positron Emission Tomography)，PET 技术采用正电子核素作为示踪剂，通过病灶部位对示踪剂的摄取情况，了解病灶功能代谢状态，可以宏观的显示全身各脏器功能，代谢等病理生理特征，更容易发现病灶；正电子药物 PET 显像剂按功能大致分为脑功能显像剂、心功能显像剂、肿瘤阳性显像剂等，PET 显像原理是将正电子放射性核素标记的化合物注射到生物体内，待正电子标记化合物参与到生物体的代谢循环后并在特定位置聚集后，生物体在 PET 设备有效视野范围内进行 PET 显像。放射性核素发出的正电子在生物体内与组织中的负电子结合发生湮灭效应，产生两个能量相等 (0.511MeV)、方向相反的 γ 光子。PET 探测器系统在特定时间间隔内探测到两个互成 180°、能量均为 0.511MeV 的 γ 光子时，即判定为是一个符合事件，此时探测器分别送出一个时间脉冲，脉冲处理器将脉冲信号整为方波，符合电路对其进行数据分类后，送入工作站进行图像重建，即可得到生物体各部位的 PET 显像图像。

PET/CT 的全称为正电子发射断层显像/X 射线计算机体层成像仪，是将 PET 和 CT 两种技术有机结合在一起的先进影像设备，两种成像技术优势互补，PET 图像提供功能和代谢等分子信息，CT 则提供高分辨率的解剖学图像，通过图像融合技术，能够同时获得生物学活性和解剖学信息，从而提高对疾病的诊断准确性和定位精度，能够更准确、更全面地评估病变，进而指导治疗方案的制定和监测疗效。

本项目拟配置的 TOF PET/CT (本项目简称“宽景 PET/CT”) 拟用于动物全身 PET 成像研究。该设备目前世界上灵敏度最高、成像视野最大、成像速度最快的生物分子影像设备之一。该设备 PET 探测器轴向视野约 2m，单个床位即可完成生物体全身 (动态) 扫描，精确呈现生物体内部各个组织、器官的代谢过程。该 PET 探测器模块采用 LYSO、SiPM 的全数字化设计方案，优化了系统运行效率。整机包含 7 个 PET 探测器环，超过 40 万个信号采集通道，超高的数据采集和处理效率，在保证 <300ps 的 TOF 分辨率的同时兼具 DOI 探测能力，大幅提升了图像的信噪比。该设备是目前全世界唯一一台具备 DOI 校正功能的 PET/CT 成像设备，具有高空间分辨率、高系统灵敏度和高时间分辨率的特点。该设备作为一种精确、全面、高灵敏的动态分子成像技术，将推动人类对生命体的认知，同时在重大慢性疾病的诊疗管理以及新药研发中发挥巨大的功效。



图 9-1 本项目拟配备的 TOF PET/CT 设备外观（同类型设备）

本项目拟配置的脑部高清 PET/CT 设备（本项目简称“高清 PET/CT”）主要用于研究和评估脑部结构和功能。这种设备通常用于临床诊断和科学研究，尤其是在神经退行性疾病、神经精神疾病、肿瘤以及脑部血管病变的研究中有着重要的应用。PET 通过使用放射性标记物来测量脑内代谢活动，这些标记物注入生物体内后会被特定的脑细胞吸收，特别是代谢较为活跃的细胞。脑部高清 PET/CT 设备通过将 PET 图像数据和 CT 图像数据融合，构建出详细的脑部生物学影像。脑部高清 PET/CT 广泛用于临床诊断和治疗计划制定，尤其是在癌症、认知障碍和其他神经系统疾病的评估，比如在阿尔茨海默病的研究中，脑部高清 PET/CT 可以帮助探测大脑中异常蛋白质积累和大脑萎缩的区域。此外，它也是神经科学研究的一个重要工具，可以用于研究脑功能、药物作用机制和疾病治疗前后的变化。脑部专用 PET/CT 的结合使用提供了一种非常有力的手段来同时评估脑部的结构和功能状态，对于提高神经类疾病的诊断精度和治疗有效性具有重要意义。本项目拟配置的高清 PET/CT 设备，除 PET 轴向视野、径向视野和孔径均小于宽景 PET/CT 外，其余技术指标均与宽景 PET/CT 相当。



图 9-2 本项目拟配备的高清脑部 PET/CT 设备外观（同类型设备）

（二）PET/MRI 工作原理

本项目拟配置的 PET/MRI 用于动物成像实验。MRI 是一种生物磁自旋成像技术，它是利用原子核自旋运动的特点，在外加磁场内，经射频脉冲激励后产生信号，用探测器检测并输入计算机，经过计算机处理转换后在屏幕上显示图像。

PET/MRI 由正电子发射计算机断层显像仪（PET）和核磁共振成像术（MRI）二者结合一体化组合成的大型功能代谢与分子影像诊断设备，它可以对在组织中扩散的疾病细胞进行成像。该 PET/MRI 系统可以分别收集 PET 和 MRI 影像，融合了 PET 对病灶的敏感检测优势和 MRI 的多序列成像优势。PET/MRI 检查与其他手段相比，它的灵敏度高、准确性好，对许多疾病（尤其是肿瘤和最为常见的心脑疾病）具有早期发现、早期诊断的价值。



图 9-3 本项目拟配备的动物 PET/MRI 设备外观（同类型设备）

（三） ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器工作原理

^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器的工作原理是利用较长半衰期的母核 ^{82}Sr 不断衰变产生较短半衰期的子体 ^{82}Rb ，随后在发生器中经过一系列的化学分离，连续地洗脱出 ^{82}Rb ，在发生器一端连接 1% 的 NaCl 溶液，另一端用无菌真空瓶收集淋洗液，随后对淋洗液进行标记分装操作。

^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器为成熟产品，具有良好的辐射屏蔽，其表面剂量率相比淋洗下来的 ^{82}Rb 淋洗液可以忽略不计，本项目 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器直接从具备销售资质的单位购买，单枚发生器规格最大为 $7.40\text{E}+08\text{Bq}$ ，计划每半年订购 1 次，每次订购 1 个。

本项目 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器存放于动物 PET 影像区分装质控室手套箱中（ 50mmPb ），辐射工作人员按照 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器的使用方法进行操作， ^{82}Rb 的淋洗、标记操作均在手套箱内进行，每次淋洗、标记的操作过程时间不超过 2min，每日最多操作 2 次。

9.1.2 实验流程及产污环节

本项目 PET 显像实验所使用的放射性药物均为正电子核素标记药物，核素种类包括

^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 共 5 种，拟使用的实验动物为 SPF 级实验猴（SPF 级动物是指无特定病原体级实验动物，不带有对人或动物本身致病的微生物），所有实验猴均由大设施的 5#楼模式动物中心提供。本项目 PET 显像实验流程如下：

(1) 实验前期准备：科研人员首先制定并填写《实验动物研究计划》，提交学校实验动物福利伦理委员会审核批准后，方可准备开展动物实验；实验开始前，科研人员根据实验计划筛选符合要求的实验猴，将实验猴从 5#模式动物中心转移至本项目一层的动物观察室 1 和动物观察室 2 的猴笼内。

(2) 药物预定：科研人员依据实验计划和实验猴情况，提前统计拟使用放射性药物核素类别、药物类型和注射量等信息，向有资质的放射性药物供应单位预定已标记好的成品药物或发生器。放射性药物或发生器在当天早上实验开始前送达，每日仅进行 1 次送药；

(3) 药物接收和质检：预定药物或发生器由供药单位派专人运输，在当天实验开始前将药物或发生器送至本项目动物 PET 影像区分装质控室，药物操作人员核对放射性药品的名称、活度、规格和数量，检查药品包装和外观质量，在分装质控室摄像头的监控下，药物操作工作人员与送药人员办理“点对点”交接手续。放射性药物均暂存在分装质控室手套箱的药物贮存铅罐内，外购 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器暂存在分装质控室的手套箱内。

(4) 药物分装：本项目外购的 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{44}Sc 药物均为已标记完成的成品药物，无需本项目工作人员进行标记，只需进行简单的分装操作后即可用于注射。药物操作人员进入分装质控室，根据计划注射量，在手套箱内完成放射性药物的分装操作，每次分装时间约 1min。分装完成后，将药物注射器放入药物运输铅盒内，等待注射；

(5) ^{82}Rb 淋洗标记：药物操作人员在手套箱内操作 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器进行 ^{82}Rb 的淋洗、标记和分装操作，每次淋洗和标记总操作时间不超过 2min；药物操作完成后，将药物注射器放入药物运输铅盒内，等待注射；

(6) 药物注射：注射开始前，药物操作人员进入动物观察室内挑选实验猴，将实验猴束缚后装入动物转运铅箱内，使用手推车将铅箱运送至动物注射室，在注射台上对实验猴子进行麻醉（从开始注射前直至显像实验结束，实验猴均处于麻醉状态）；放射性药物通过四肢静脉注射，提前给实验猴建立静脉通路，并在实验猴身下铺垫吸水纸；随后药物操作人员将药物运输铅盒运输至注射位，在注射防护窗的防护下打开运输铅盒，将注射器连接在实验猴静脉通路上，推注药物，单次药物注射时间不超过 1min；本项目动物 PET 影像区每日药物注射次数不超过 10 次，其中 ^{18}F 药物最多注射 6 次， ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 药物共计最多注射 4 次；每只实验猴每日只接受 1 次药物注射。

(7) 动物运输和成像前观察：注射完成后，药物操作人员将实验猴装入装入动物转运铅箱（防护厚度 20mmPb）内，使用手推车将实验猴运送至动物观察室进行成像前观察。根据研究目的的不同，成像前观察时间通常为给药后 30min~120min 不等，平均观察时间 40min。注射 ^{82}Rb 的实验猴不进行观察，直接进行 PET 成像实验。

(6) PET 显像扫描：药物操作人员使用手推车将动物转运铅箱运输至对应的 PET 显像间；随后，设备操作人员负责对实验猴摆位，摆位过程需要在扫描床上铺垫吸水纸（吸收扫描期间可能产生的少量动物排泄物），从铅箱内取出实验猴（处于麻醉状态下）固定在扫描床上合适位置，动物摆位时间为 1min/次。摆位完成后设备操作人员退出机房，在操作间内进行设备操作。本项目宽景 PET/CT 显像扫描时间不超过 15min/次，每日至多开展 4 次显像实验；高清 PET/CT 显像扫描时间不超过 15min/次，每日至多开展 3 次显像实验；PET/MRI 平均显像扫描时间为 40min，每日至多开展 3 次显像实验；

(7) 实验结束：PET 显像扫描完成后，设备操作人员进入机房将实验猴连同吸水纸放回动物转运铅箱内。随后药物操作人员使用手推车将实验猴送回动物观察室的猴笼内，将吸水纸等固体废物收集至各动物观察室的铅废物桶内；

(8) 动物污物清理和收集：本项目动物观察室 1、动物观察室 2 和动物暂养室的污物清理工作于每天早上实验开始前进行。实验猴观察和暂养期间产生的排泄物（包括粪便和尿液）由猴笼底部的不锈钢托盘收集，药物操作人员于每天早上实验开始前进入各动物观察室和暂养室，将不锈钢托盘内排泄物倒入洗污间的便池内并刷洗托盘，随后对各动物房间和洗污间的地面、设备台面进行清理和拖洗。当天的污物清理工作全部完成后，对各动物观察室和暂养室进行 1 次 β 表面污染监测。

(9) 动物管理和喂养：本项目动物管理人员负责实验猴的视察和喂养工作，动物管理人员于每天早上实验开始前，进入各动物观察室和动物暂养室视察实验猴的情况，并投喂食物和饮用水。每日仅进行 1 次动物喂养和实地视察，其余时间均通过视频监控观察实验猴情况；

(10) 动物轮换安排：根据本项目动物 PET 影像区的实验猴使用安排，每批实验猴（每批最多 10 只）使用满 1 个月后不再使用，并将完成实验任务的实验猴转移至动物暂养室内，再去 5#楼模式动物中心挑选下批实验猴。每批实验猴应在动物暂养室暂养不低于 1 个月后，经监测动物体表辐射剂量率和 β 表面污染均处于极低水平后，方可送回 5#楼模式动物中心。

(11) 动物出入台账记录：本项目动物 PET 影像区拟建立《实验动物出入管理台账》，每批送达的实验猴、每批送回的实验猴均应形成台账记录（每批动物登记一行台账），台

账的记录内容主要包括：每批送达动物数量、送达日期、每批送回动物数量、暂养起始日期、监测结果、送回日期、责任人员等信息。实验和暂养期间实验猴可能意外死亡，将出现送达数量和送回数量不一致，意外死亡动物应在台账中进行详细备注（意外死亡实验猴尸体应转移至废物间的冰柜内冷冻暂存）。

本项目动物 PET 影像区实验流程及产污环节见图 9-4。

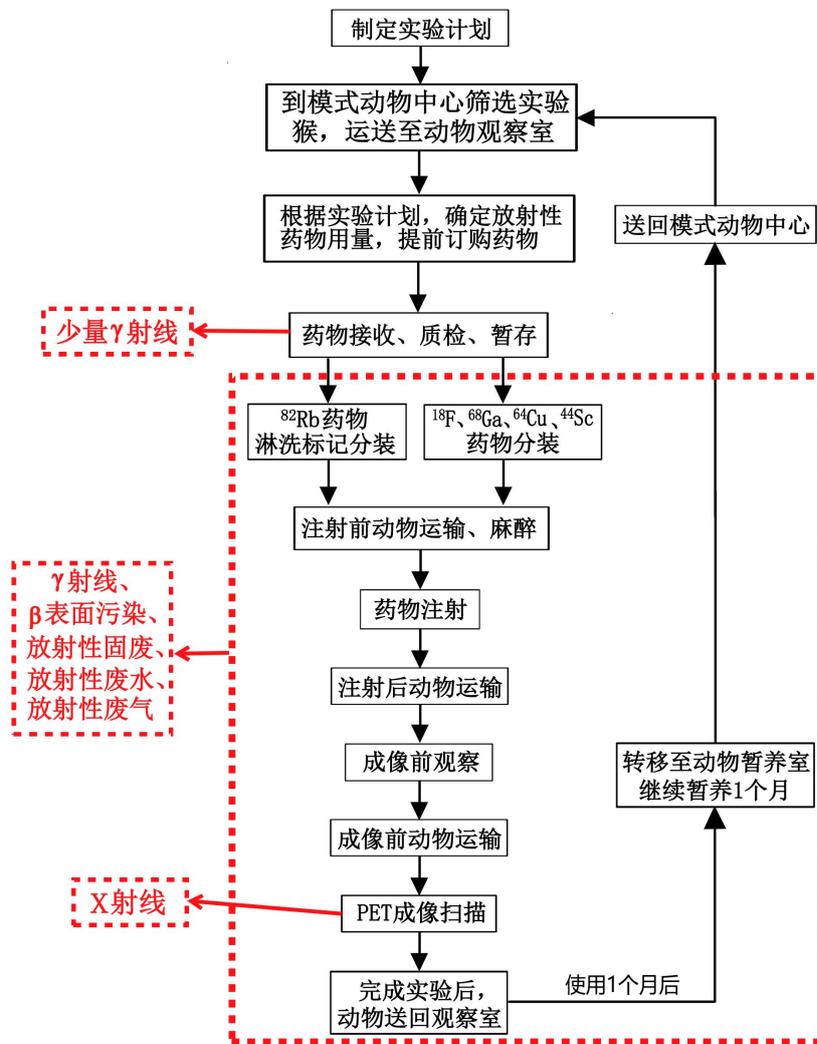


图 9-4 本项目动物 PET 影像区实验流程及产污环节

(三) 校准源质控流程

本项目宽景 PET/CT 设备和高清 PET/CT 设备共配备 3 枚 Ge-68 校准源(由宽景 PET/CT 和高清 PET/CT 共用)，宽景 PET/CT 设备额外还配备有 6 枚 Na-22 校准源；PET/MRI 设备配备 3 枚 Ge-68 校准源。校准源均由质控人员进行 PET 设备质控校准时使用。

在质控校准开始前，质控人员先把校准源源罐从二层的放射源库内推出，放到放射源库旁的升降梯内，利用升降梯将源罐送至一层；质控人员在一层升降梯处接收源罐并运送到 PET 显像间内；质控开始前，质控人员将校准源从源罐内取出，摆放到 PET 设备扫描床

上指定位置，随后退回控制室按规定程序进行质控扫描，扫描完成后结束质控；质控人员进入 PET 显像间，将校准源收回源罐内，用升降梯将源罐送回二层，由工作人员送回放射源库内储存。

本项目动物 PET 影像区的宽景 PET/CT 设备、高清 PET/CT 设备和 PET/MRI 设备计划每周开展 1 次 ^{68}Ge 质控（40 次/年），此外，宽景 PET/CT 设备每月还需再增加 1 次 ^{22}Na 质控（不超过 12 次/年）；校准源不使用时都放于源罐内，并储存在二层放射源库内。本项目拟配备 3 个校准源罐，其中：PET/CT 设备的 3 枚 Ge-68 校准源拟配备 1 个 20mmPb 源罐，6 枚 Na-22 校准源拟配备 1 个 50mmPb 源罐；PET/MRI 的 3 枚 Ge-68 校准源拟配备 1 个 20mmPb 源罐。

9.1.3 核素用量和使用时长

(1) 核素用量

本项目 ^{18}F 核素最大注射量为 148MBq/次（4mCi/次），每日最多使用 6 次，每周最多使用 5 天，年最多使用 200 天（每日均使用）；本项目 ^{68}Ga 核素最大注射量为 74MBq/次（2mCi/次）， ^{64}Cu 核素最大注射量为 74MBq/次（2mCi/次）， ^{82}Rb 核素最大注射量为 148MBq/次（4mCi/次）， ^{44}Sc 核素最大注射量为 37MBq/次（1mCi/次）， ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 四种核素每天最多使用其中的 2 种，每种核素每日最多使用 2 次，年使用均不超过 100 天。拟使用 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器用于 ^{82}Rb 的淋洗，单个发生器活度规格不超过 $7.40\text{E}+09\text{Bq}$ （20mCi），计划每半年订购 1 个，每年最多使用 2 个。

本项目动物 PET 影像区每日药物注射次数不超过 10 次，其中 ^{18}F 药物最多注射 6 次， ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 药物共计注射不超过 4 次；同时用于实验的猴子数量不超过 10 只，每只实验猴每日只接受 1 次药物注射。

(2) 使用时长

本项目动物 PET 影像区每日最多开展 10 次 PET 显像实验，年工作 200 天，其中：宽景 PET/CT 显像实验每日最多开展 4 次，显像扫描时间不超过 15min/次。高清 PET/CT 显像实验每日最多开展 3 次，显像扫描时间不超过 15min/次。PET/MRI 显像实验每日最多开展 3 次，显像扫描时间平均 40min/次。

本项目高清 PET/CT 和 PET/MRI 只使用 ^{68}Ge 校准源，每周各进行 1 次 ^{68}Ge 质控，每次操作裸源时间约 1min；宽景 PET/CT 设备质控使用 ^{68}Ge 和 ^{22}Na 校准源， ^{68}Ge 质控每周进行 1 次， ^{22}Na 质控每月额外进行 1 次，因 PET/CT 设备 PET 轴向视野较长，每次质控操作裸源时间约需 2min。本项目动物 PET 影像区主要工作环节及工作时长统计见表 9-1。

表 9-1 本项目动物 PET 影像区的主要工作环节和工作时长统计

试验类型	主要操作环节	单次操作时间	日最大操作次数	年操作天数	年累计最长操作时间	
PET 显像研究	药物分装	1min	10 次	200 天	33.4h	
	⁸² Rb 淋洗、标记和分装	2min	2 次	100 天	6.7h	
	药物注射	1min	10 次	200 天	33.4h	
	注射后动物的转运	3min	10 次	200 天	100h	
	动物摆位	宽景 PET/CT	1min	4 次	200 天	13.4
		高清 PET/CT	1min	3 次	200 天	10h
		PET/MRI	1min	3 次	200 天	10h
	显像扫描	宽景 PET/CT	15min	4 次	200 天	200h
		高清 PET/CT	15min	3 次	200 天	150h
		PET/MRI	40min	3 次	200 天	400h
	质控校准	宽景 PET/CT (²² Na)	2min	1 次/月	12 月	24min
		宽景 PET/CT (⁶⁸ Ge)	2min	1 次/周	40 周	80min
		高清 PET/CT (⁶⁸ Ge)	1min	1 次/周	40 周	40min
		PET/MRI (⁶⁸ Ge)	1min	1 次/周	40 周	40min

9.1.4 污染源项描述

(一) 放射性核素特性

本项目动物 PET 影像区涉及的放射性核素主要物理参数列于表 9-2。

表 9-2 本项目使用的放射性核素主要物理参数

序号	核素	毒性	半衰期	衰变方式	β最大能量和强度 (MeV/%)	主要γ射线能量和强度 (MeV/%)	用途
1	F-18	低毒	109.8min	β ⁺ 、EC	β ⁺ —0.63 (97%)	γ—0.511 (194%)	PET 成像研究
2	Ga-68	低毒	67.71min	β ⁺ 、EC	β ⁺ —1.9 (88%)	γ—0.511 (178%)、 1.077 (3%)	PET 成像研究
3	Cu-64	低毒	12.7h	β ⁺ 、β ⁻ 、EC	β ⁺ —0.65 (18%) β ⁻ —0.58 (39%)	γ—0.511 (36%)、 1.346 (0.48%)	PET 成像研究
4	Rb-82	低毒	76s	β ⁺ 、EC	β ⁺ —3.35 (96%)	γ—0.511 (192%)、 0.777 (15%)	PET 成像研究
5	Sc-44	低毒	3.97h	β ⁺ 、EC	β ⁺ —1.47 (94%)	γ—0.511 (188%)、 1.157 (99.9%)	PET 成像研究
6	Sr-82	中毒	25.36d	EC	/	/	淋洗 ⁸² Rb

(二) 主要放射性污染物

本项目动物 PET 影像区主要放射性污染物为 ¹⁸F、⁶⁸Ga 等正电子核素产生的γ射线和β射线，各 PET/CT 设备的 CT 机运行产生的 X 射线，以及放射性“三废”、实验动物尸体、废旧 ⁸²Sr-⁸²Rb 发生器和退役 ⁶⁸Ge 和 ²²Na 校准源等。

（三）放射性污染途径分析

（1）正常工况的污染途径

① 贯穿辐射：在进行放射性药物的交接、暂存、药物分装、药物淋洗标记、药物注射、动物运输、动物观察和暂养、动物摆位、动物显像扫描、设备质控、清理污物等工作环节，辐射工作人员及周围停留的公众可能受到放射性核素释放的 γ 射线的外照射影响；此外，PET/CT 设备的 CT 机在运行期间，工作人员及周围公众还会受到 X 射线外照射的影响；

② β 表面污染：本项目使用的正电子核素均为 β 衰变，放射性药物使用期间会对工作台、墙壁、地面、防护服、手套等产生 β 放射性沾污，动物实验和暂养期间的排泄物可能造成局部 β 放射性表面污染；

③ 放射性固废：1.放射性药物操作期间的产生的废弃注射器、针头、空药瓶、棉球、吸水纸和去污废物等；2.动物实验和暂养期间产生的含少量排泄物的动物垫料和吸水纸、毛发、食物残渣、清理污物产生的擦拭废物等；3.排风系统更换下来的活性炭滤芯、手套箱高效过滤器等废弃滤材；4.退役的 ^{68}Ge 、 ^{22}Na 校准源，达到使用寿命的 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器等；

④ 放射性废水：主要包括药物操作区域的洗手池废水；各洗污间产生的动物排泄物、冲厕废水、洗污废水、冲洗拖布废水；清洁间产生的洗污废水等。

⑤ 放射性废气：本项目 ^{18}F 等放射性药物均为液体溶液，不易挥发，且操作时间较短，因此操作期间产生的放射性气体十分微量；本项目 ^{18}F 等药物分装、 ^{82}Rb 药物淋洗标记等操作均在手套箱内进行，放射性废气经手套箱高效过滤器（过滤效率 $\geq 99.9\%$ ）和排风口处活性炭过滤器（过滤效率 $\geq 90\%$ ）过滤吸附后，排放至大气的放射性废气很少，对周边公众和环境的影响很小。

⑥ 实验动物尸体：实验和暂养期间实验猴可能意外死亡，实验猴尸体密封收集、标注所含核素种类和产生日期后，送至一层废物间配备的冰柜内冷冻暂存，暂存超过 30 天，经检测满足解控要求后，送至 5#模式动物中心废物库按动物尸体的规定妥善处理。

（2）事故工况的污染途径

① 药物意外洒漏：在操作放射性药物期间，发生药物容器破碎、药物泼洒等意外事件，可能会污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成手部和皮肤的污染，对局部环境和工作人员造成 β 放射性表面污染；意外泼洒的药物挥发将产生少量放射性废气，清理污染还会产生一定量放射性固体废物和应急排放的放射性废水；

② 发生器破裂： ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器在正常情况下不会发生破损和泄漏，但使用期间可能发生侧翻、跌落、外力撞击等意外事件，导致发生器屏蔽体和密封装置裂缝、破损，可能

造成放射性核素 ^{82}Sr 和 ^{82}Rb 的泄漏，将会对工作人员和周围环境造成额外的辐射影响和局部环境放射性污染；

③ 放射性药物或放射源管理不善，发生遗失或被盗，可能造成局部环境放射性污染，对人员造成额外照射；本项目在分装质控室手套箱内暂存的放射性药品，工作场所采用视频监控和门禁管理；放射源贮存在放射源库中，放射源库采用视频监控、双人双锁、红外防闯入报警等安全管理措施，严格执行放射性物品和放射源使用登记制度，可有效防止放射性物品被盗和丢失事件的发生。

④ 放射性废物管理不善，放射性固体废物、实验动物尸体、放射性废水未暂存足够时间或者未按清洁解控规定擅自处理，可能会造成局部环境的放射性污染，对工作人员和公众产生辐射危害；

9.2 二层小动物实验区

9.2.1 工作原理及设备组成

（一）小动物五模态分子成像设备

本项目拟新增的小动物五模态分子成像设备是多模态医学成像的代表性设备，可用于研发相关分子影像采集、处理与数字化管理软件系统，可应用于重大疾病新药研制及肿瘤靶向分子探针研究，为新药创制及生物医学研究提供技术支撑。五种成像模态分别包括：PET（正电子发射断层显像）、SPECT（单光子发射断层成像）、CT（X射线计算机断层扫描）、MRI（核磁共振成像）和 FMT（荧光分子层析成像）。本项目小动物五模态分子成像设备是融合了 PET、SPECT、CT、MRI 和 FMT 共 5 种成像模式的一体化小动物医学影像设备。通过 5 种成像模态的有机结合，同时获取多种参数的医学影像，由于各种成像模式的成像原理和反映信息各有不同，通过五种模态医学影像的优势互补，能够提供更加全面的医学影像信息。其中，PET 成像技术能够追踪和定量分析生物分子的分布和活性，这对于研究小动物模型中的疾病过程、药物代谢和细胞活动至关重要；SPECT 成像可用于追踪放射性同位素标记的生物分子，适用于心血管疾病或各器官功能的研究；CT 扫描可提供高分辨率的解剖结构图像，可用于定位生物标记物或异常区域；MRI 成像技术提供高对比度、高分辨率的解剖和功能图像，可以用于检测肿瘤、观察器官结构和功能，以及研究神经系统活动；FMT 成像技术则使用荧光物质标记，实现可视化和跟踪特定分子、细胞或生物过程。本项目小动物五模态分子成像设备主要由扫描床、PET 成像模块、SPECT 成像模块、CT 扫描成像模块、MRI 核磁成像模块、FMT 荧光成像模块、数据采集和处理系统、

图像数据融合工作站等部分组成。本项目小动物五模态分子成像设备外观见图 9-5。

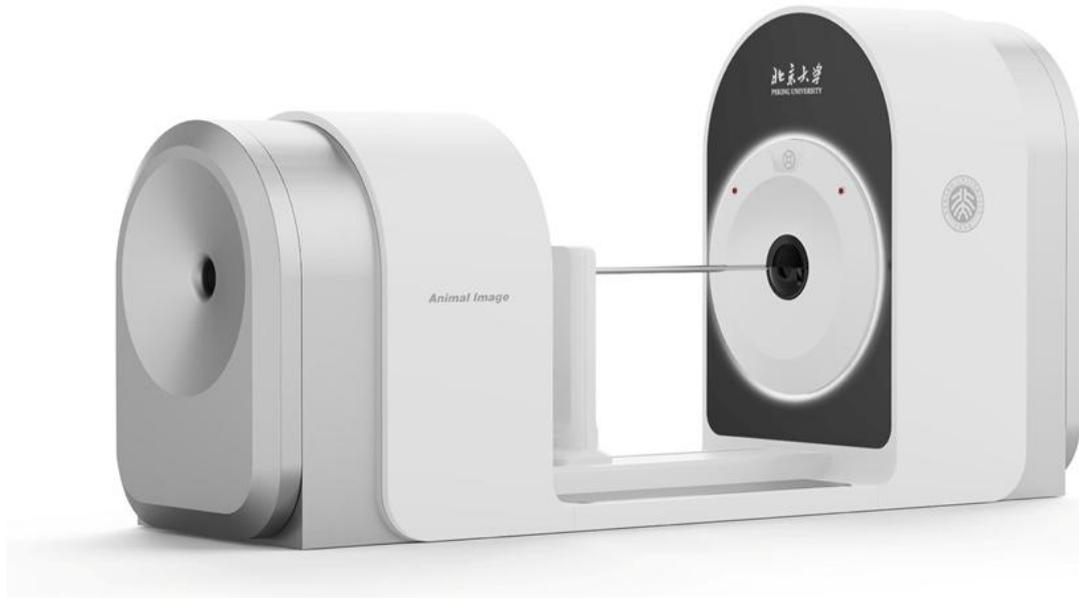


图 9-5 本项目小动物五模态分子成像设备一体机效果图

（二）小动物光声/CT 双模成像设备

小动物光声和 X 射线计算机断层扫描 (X-CT) 双模态成像技术, 是一种将光学成像与 X 射线成像技术结合起来的新型成像手段, 旨在提供更加全面和精确的生物组织成像信息。光声成像 (PAI) 技术是一种基于光声效应的非侵入性生物学成像技术, 它利用纳秒或皮秒级的短脉冲激光照射生物组织, 由于生物组织对光能的吸收不同会产生微小的温度升高, 导致组织局部膨胀产生声波 (即光声波)。这些声波随后被表面或内部的超声探头接收, 经过信号处理后可以构建出组织的光学吸收属性图像, 反映组织的功能和分子水平信息。由于光声成像能提供较高的分辨率和深部成像能力, 因此在小动物成像领域尤其有价值。X-CT (X 射线计算机断层扫描) 技术是一种利用 X 射线穿透生物体, 通过不同组织对 X 射线吸收的差异, 获取组织内部结构的成像方法。在 X-CT 中, 通过旋转样品, 从多个角度获取 X 射线通过样品后的衰减信息, 利用计算机重建算法处理这些数据, 最终得到样品内部的三维结构图像。X-CT 能提供良好的解剖结构信息, 但对软组织的对比度较低。小动物光声和 X-CT 双模态成像将上述两种技术结合起来, 通过单台设备同时获取组织的功能、分子水平信息及其解剖结构信息。在操作过程中, 通常首先进行 X-CT 扫描获取解剖结构图像, 随后进行光声成像获取功能信息, 通过图像融合技术, 将两种成像模式获得的图像进行叠加和对比, 最终实现对生物组织更全面、更精确的成像分析。这种双模态成像技术不仅可以增强成像对比度, 还能提升解剖结构与功能信息之间的相关性理解, 对生物医学研究具有重要意义。本项目小动物光声/CT 双模成像设备示意图见图 9-6。

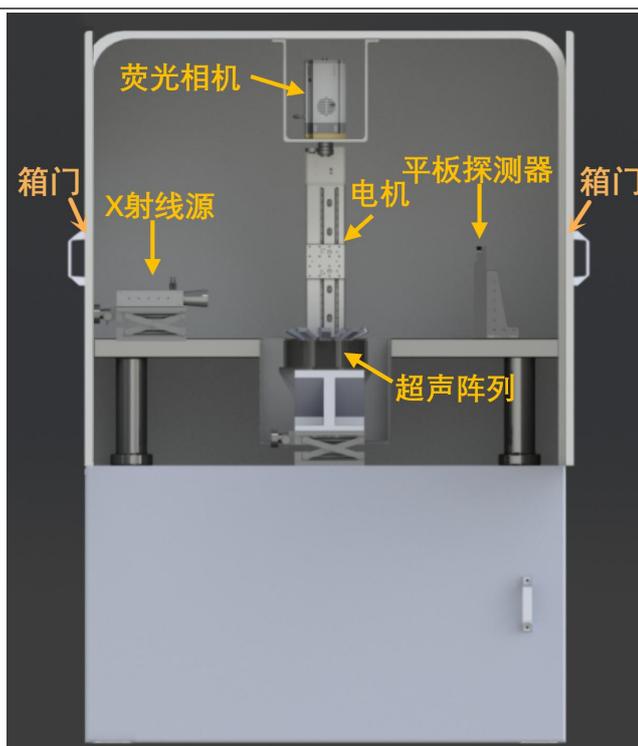


图 9-6 本项目小动物光声/CT 双模成像设备示意图

9.2.2 实验流程及产污环节

本项目二层小动物实验区拟使用的放射性核素包括 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 和 ^{177}Lu 共 6 种，主要用于开展小动物五模态成像实验，小动物实验区拟使用的实验动物均为 SPF 级实验鼠（含小鼠和大鼠），所有实验鼠均由大设施的 5#楼模式动物中心提供。本项目辐射工作人员严格按照动物实验相关规定和操作规程开展实验，本项目小动物实验流程如下：

（一）小动物五模态成像实验

（1）实验前期准备：科研人员首先制定并填写《实验动物研究计划》，提交学校实验动物福利伦理委员会审核批准后，方可准备开展动物实验；实验开始前，科研人员根据实验计划筛选符合要求的实验鼠，转移至本项目二层东侧的实验动物临时饲养室暂养。

（2）药物预定：科研人员提前统计出拟使用放射性药物的核素类别、药物种类和注射量等信息，向有资质的放射性药物供应单位预定已标记好的成品药。放射性药物在当天早上实验开始前送达；每日仅送药 1 次，每次仅订购当天使用的核素。

（3）药物接收和质检：预定放射性药物由供药单位派专人运输，在当天实验开始前将药物送至本项目小动物实验区动物注射室，负责药物注射的工作人员核对放射性药物的名称、活度、规格和数量，检查药品包装和外观质量，在动物注射室摄像头下办理“点对点”交接手续。放射性药物均暂存在动物注射室手套箱的药物贮存铅罐内。本项目外购的放射性药物均为已标记完成的成品药物，无需本项目工作人员进行标记，只需进行简单分装后即可用于注射。

(4) 药物分装和注射：本项目药物分装和药物注射均在动物注射室手套箱内进行。工作人员到动物临时饲养室内挑选实验鼠放入鼠笼内，运送至动物注射室，药物注射人员先对实验鼠进行麻醉。随后根据计划注射量在手套箱内完成药物分装，每次分装时间为 1min；随后在手套箱的托盘上铺垫吸水纸，将实验鼠放于托盘上，通过尾静脉将药物注射到实验鼠体内，每次注射时间不超过 1min；每日最多进行 30 次药物分装和 30 次药物注射。

(5) 动物运输和留观：注射完成后，注射人员将实验鼠装入专用的动物转运容器内，使用手推车运送至动物留观室的负压通风柜（防护厚度 20mmPb）内留观，等待开展成像实验。其中：注射 ^{124}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 的实验鼠平均留观时间为 1h，注射 ^{131}I 和 ^{177}Lu 的实验鼠平均留观时间为 4h， ^{89}Zr 成像实验的周期较长，注射 ^{89}Zr 实验鼠最长留观时间不超过 5 天。实验鼠留观结束后，药物操作人员将实验鼠放到动物转运容器内，运送至五模态成像间，交接给设备操作人员。

(6) 显像扫描实验：设备操作人员在实验鼠身下铺垫吸水纸，在扫描床上对实验鼠进行摆位并固定，摆位时间不超过 1min，摆位完成后退回控制室内，操作设备开展显像扫描。小动物五模态分子成像的扫描时间平均为 10min，每日最多开展 30 次成像实验。实验鼠扫描期间可能产生的少量排泄物用吸水纸收集，扫描完成后对扫描床进行清污，放射性废物收集至动物转运容器内。

(7) 实验鼠处死和解剖：成像实验完成后，设备操作人员将实验鼠装入动物转运容器内。随后注射人员使用手推车将动物转运容器运送至动物手术室，对实验鼠进行处死，处死手术均在动物手术室的通风橱内进行，拟采用过量麻醉等方式执行安死术，处死过程无动物血液流出，处死用时不超过 1min。处死后动物尸体密封收集、标注核素种类和产生日期后，转移至废物库冰柜内冷冻暂存。

根据成像实验结果，会对部分实验鼠尸体进行解剖手术（先处死再解剖），采集器官或组织样本，每次解剖平均用时为 5min，解剖出的动物器官或组织装入样品盒，密封后放入动物转运容器内。剩余动物组织密封收集、标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物库冰柜内冷冻暂存；解剖手术均在动物手术室的通风橱内进行，在不锈钢盘或搪瓷盘上进行操作。解剖结束后对操作台和托盘进行清污，解剖期间产生的动物血液使用吸水纸吸收，按放射性固体废物进行管理。

(8) 数据测试：工作人员使用动物转运容器，将解剖出的动物器官或组织运送至放射电子与晶体测试实验室采集放射性实验数据，采集完成后将动物器官组织密封收集、标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物库的冰柜内冷冻暂存。

(9) 实验鼠使用情况：本项目小动物五模态成像实验每天使用的实验鼠总量不超过 30 只（20 只小鼠和 10 只大鼠）。除注射 ^{89}Zr 实验鼠外，注射其他核素的实验鼠均在当天完成实验后处死，注射 ^{89}Zr 的实验鼠最多进行 5 天留观，完成显像扫描后处死。本项目小动物实验区拟建立《实验动物使用台账》，记录每日使用实验鼠数量和对应的核素种类，每日进行 1 次台账记录。本项目小动物五模态成像实验及产污环节见图 9-7。

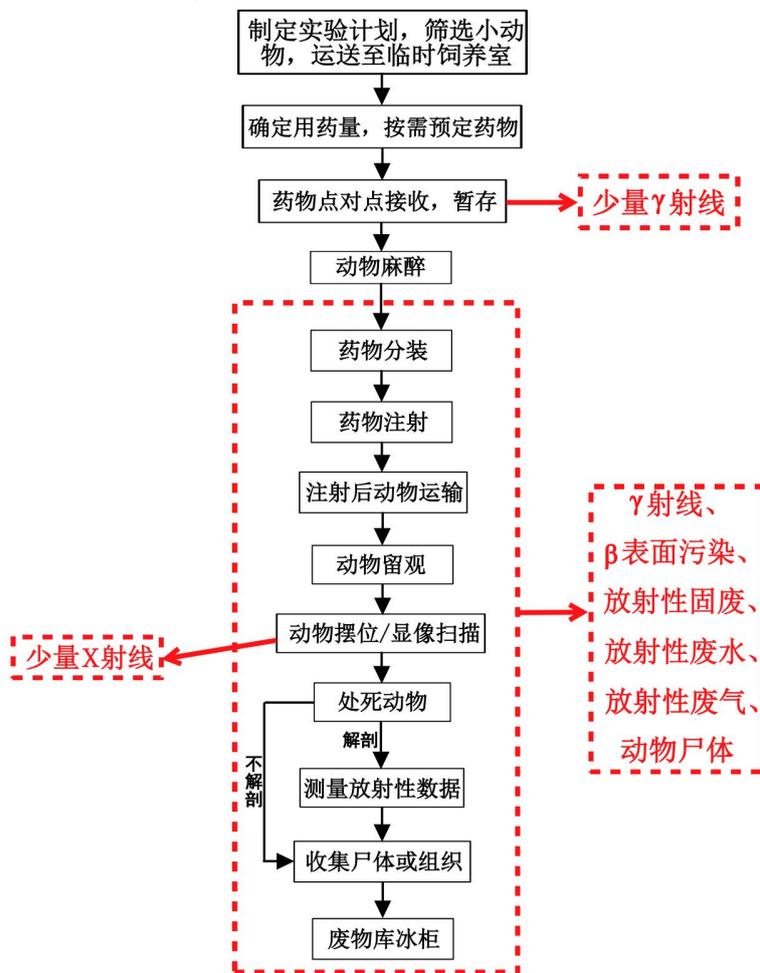


图 9-7 本项目小动物五模态成像实验流程及产污环节

(二) 小动物光声/CT 双模成像实验

本项目小动物光声/CT 双模成像实验的实验鼠不注射放射性药物，光声/CT 双模成像实验流程如下：

- ① 设备操作人员将实验鼠装入鼠笼内，运送至本项目小动物双模成像间。
- ② 打开设备箱体，检查设备无异常后，将实验鼠麻醉后固定在扫描台面上。
- ③ 设备操作人员退回双模成像控制室，确认成像间内无人后，关闭成像间防护门和控制室防护门；
- ④ 设备操作人员在控制台设定 X 射线源曝光参数和曝光时间，随后按下出束按钮，X

射线开始曝光，CT 模块自动完成扫描；

④ CT 扫描完成后，X 射线源自动停止曝光，出束按钮复位。随后进行小动物光声成像，设备操作人员在控制台操作光声成像模块，完成成像。

⑥ 成像完毕，保存并分析图像。设备操作人员进入成像间，继续下次成像实验。

⑦ 双模成像实验完成后，设备操作人员将实验鼠装入鼠笼内，送回小动物实验区东侧的实验动物临时饲养室内。

本项目光声/CT 双模成像实验流程及产污环节见图 9-8。

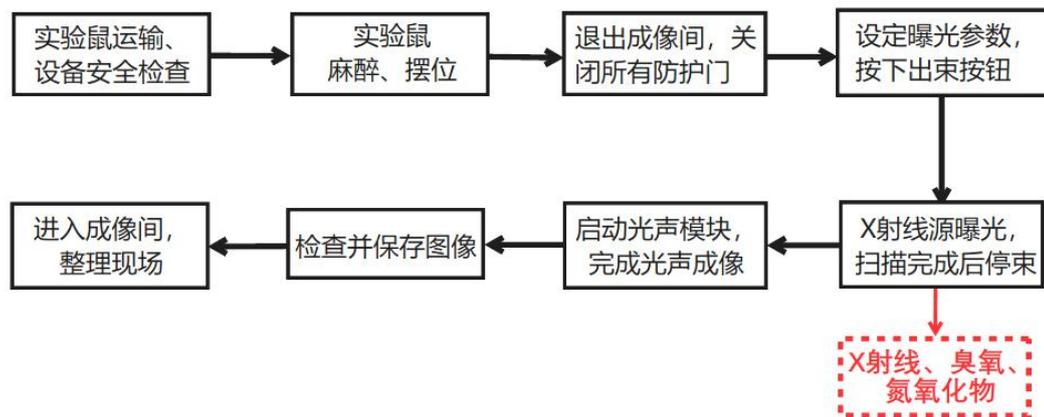


图 9-8 本项目小动物光声/CT 双模成像实验流程及产污环节

9.2.3 核素用量和使用时长

(1) 核素用量

本项目 ^{89}Zr 核素最大注射量为 3.7MBq/只（小鼠）和 7.4MBq/只（大鼠），每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），计划每周使用 1 天，年使用不超过 40 天； ^{124}I 核素的最大注射量为 3.7MBq/只（小鼠）和 18.5MBq/只（大鼠），每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），每周最多使用 2 天，年使用不超过 80 天； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{111}In 核素的最大注射量均为 7.4MBq/只（小鼠）和 37MBq/只（大鼠），每种核素每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），每周最多使用 2 天，年最多使用 80 天； ^{131}I 和 ^{177}Lu 核素的最大注射量均为 18.5MBq/只（小鼠）和 55.5MBq/只（大鼠），每种核素每日最多使用 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠），每周最多使用 2 天，年最多使用 80 天。

(2) 使用时长

本项目小动物五模态成像实验每日最多使用 30 只动物（20 只小鼠和 10 只大鼠），年运行 200 天，年累计实验鼠用量不超过 4000 只小鼠和 2000 只大鼠。小动物五模态分子成像实验平均用时为 10min/次，每日最多开展 30 次成像实验，每日最长实验时间不超过 5h，年累计实验时间为 1000h；放射电子和晶体测试实验室放射性数据测试平均时间不超过

10min/次，每日最多开展 15 次测试，则每日最长实验时间不超过 2.5h，年累计实验时间不超过 500h；实验鼠处死手术用时不超过 1min/次，按每日最多处死 30 只实验鼠计算，每日操作时间不超过 30min，年累计操作时长为 100h；解剖手术按平均 5min/次计算，每日平均开展 15 次解剖手术，每日解剖手术时长不超过 1.25h，每年解剖手术操作时长为 250h。

小动物光声/CT 双模成像实验平均用时为 20min/次（实验鼠不注射放射性药物，实验鼠不处死），每日最多开展 15 次实验，每日最长实验时间不会超过 5h，年累计实验时间不超过 1000h；

本项目小动物实验区的主要工作环节及工作时长统计见表 9-3。

表 9-3 本项目小动物实验区主要工作环节和工作时长

主要操作环节		单次操作时间	日最大操作次数	年最大操作天数	年最大操作时长
药物分装		1min	30 次	200	100h
药物注射		1min	30 次	200	100h
注射后实验鼠转运		3min	30 次	200	300h
实验鼠摆位		1min	30 次	200	100h
动物实验	小动物五模态成像	20min	15 次	200	1000h
	放射电子与晶体测试	10min	15 次	200	500h
	光声/CT 双模成像	20min	15 次	200	1000h
动物手术	实验鼠处死	1min	30 次	200	100h
	实验鼠解剖	5min	15 次	200	250h

9.2.4 污染源项描述

（一）放射性核素特性

本项目小动物实验区拟使用的放射性核素主要物理参数列于表 9-4。

表 9-4 本项目使用的放射性核素主要物理参数

序号	核素	毒性	半衰期	衰变方式	β 最大能量和强度 (MeV/%)	主要 γ 射线能量和强度 (MeV/%)	用途
1	Zr-89	中毒	3.27d	β^+ 、EC	β^+ —0.395 (23%)	γ —0.511 (45%)、 0.909 (99%)	五模态成像实验
2	I-124	中毒	4.18d	β^+ 、EC	β^+ —0.974 (11%)	γ —0.511 (46%)、 0.603 (63%)、 1.691 (11%)	五模态成像实验
3	Tc-99m	低毒	6.02h	IT	/	γ —0.141 (89%)	五模态成像实验
4	In-111	中毒	2.805d	EC	/	γ —0.171 (90%)、 0.245 (94%)	五模态成像实验
5	I-131	中毒	8.02d	β^-	β^- —0.602 (90%)	γ —0.365 (82%)	五模态成像实验
6	Lu-177	中毒	6.647d	β^- 、 γ	β^- —0.206 (79%)	γ —0.208 (10.4%)	五模态成像实验

（二）主要放射性污染物

本项目小动物实验区主要放射性污染物为放射性核素产生的 γ 射线和 β 射线，各动物成像设备的 CT 机运行产生的 X 射线，以及放射性“三废”和实验动物尸体废物等。

（三）放射性污染途径分析

（1）正常工况的污染途径

① 贯穿辐射：在放射性药物交接、暂存，药物分装、注射、动物运输、留观、动物摆位、五模态显像扫描、动物手术等工作环节，辐射工作人员及周围停留的公众可能受到放射性核素释放的 γ 射线的外照射影响；此外，各小动物成像设备的 CT 机在运行期间，辐射工作人员及周围公众还会受到 X 射线外照射的影响。

② β 放射性表面污染：开展实验期间，放射性药物、动物血液和排泄物等可能会对工作台、墙壁、地面、防护服、手套等产生少量的放射性沾污，造成少量的 β 放射性表面污染；此外，少量放射性药物挥发到空气中被工作人员吸入，还可能造成一定的内照射影响；

③ 放射性固废：1.放射性药物操作期间的产生的废弃注射器、针头、空药瓶、棉球、吸水纸和去污废物等；2.动物留观、解剖和实验期间产生的动物排泄物、毛发、废弃垫料、食物残渣、含动物排泄物或血液的吸水纸、清理污物产生的擦拭用品等污物；3.排风系统更换下来的活性炭滤芯、手套箱高效过滤器等废弃滤材；

④ 放射性废水：动物注射室、动物手术室、动物留观室、质控室的工作人员洗手池废水；工作场所的洗污废水等。

⑤ 放射性废气：本项目放射性药物均为液态药物，除含碘核素的药物具有较弱的挥发性外，其他药物均不易挥发。小动物实验放射性药物的操作量小，且操作时间较短，因此操作期间产生的放射性气体较少；放射性药物分装均在动物注射室的手套箱内进行，动物手术均在动物手术室的通风橱内进行留观，动物均在动物留观室负压通风柜内留观，放射性废气经高效过滤器（过滤效率 $\geq 99.9\%$ ）和排风口处活性炭过滤器（过滤效率 $\geq 90\%$ ）过滤吸附后，排放至大气的放射性废气很少，对周边公众和环境的影响很小。

⑥ 实验动物尸体：在实验结束后所有实验鼠均被处死，含放射性核素的动物尸体或组织器官先消毒后，按核素种类分开密封收集，标注所含核素种类和产生日期，转移至废物库冰柜内冷冻暂存，暂存时间超过 10 倍的所含核素半衰期且不低于 30 天（含 ^{131}I 核素尸体冷冻暂存不低于 180 天）后方可实施解控，返回 5#模式动物中心废物库按动物尸体的规定妥善处理。

（2）事故工况的污染途径

① 药物意外洒漏：在操作放射性药物的过程中，发生药物容器破碎、药物泼洒等意外事件，可能会污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成手部和皮肤的污染，对局部环境和工作人员造成 β 放射性表面污染；意外泼洒的药物挥发将产生少量放射性废气，清理污染还会产生一定量放射性固体废物和应急排放的放射性废水；

② 放射性药物管理不善，发生遗失或被盗，可能造成局部环境放射性污染，对人员造成额外照射；本项目在动物注射室的手套箱内暂存的放射性药品，工作场所采用视频监控和门禁管理；

③ 放射性废物管理不善，放射性固体废物、放射性废水和实验动物尸体等放射性废物未在指定位置暂存、未暂存足够时间或者未按清洁解控规定擅自处理，可能会造成局部环境放射性污染，对工作人员和公众产生辐射危害；

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全设施

10.1.1 工作场所布局和分区情况

(一) 动物 PET 影像区

本项目拟建动物 PET 影像区工作场所位于 1#医学成像楼一层东部，动物 PET 影像区工作场所区域主要包括：卫生通过间、更衣室、淋浴室、分装质控室、动物注射室、缓冲间 1、清洁间、废物间、紧急处理室、动物观察室 1（含洗污间）、动物观察室 2（含洗污间）、动物暂养室（含洗污间）、动物实验走廊、高清 PET/CT 间及其设备间、宽景 PET/CT 间及其设备间、PET/CT 操作间、PET/MRI 间及其设备间、PET/MRI 操作间、PET/MRI 准备间、衰变池等。工作场所拟按照使用功能划分为控制区和监督区进行管理。

控制区：包括分装质控室、动物注射室、缓冲间 1、清洁间、废物间、紧急处理室、动物观察室 1（含洗污间）、动物观察室 2（含洗污间）、动物暂养室（含洗污间）、动物实验走廊、高清 PET/CT 间、宽景 PET/CT 间、PET/MRI 间、PET/MRI 准备间、衰变池所在区域均划为控制区。

监督区：主要包括卫生通过间、更衣室、淋浴室、缓冲间 2、高清 PET 设备间、宽景 PET 设备间、PET/CT 操作间、PET/MRI 设备间、PET/MRI 操作间、缓冲间 3、动物常规检查室、配电间、衰变池顶部草坪均划为监督区。

本项目动物 PET 影像区工作场所分区管理示意图见图 10-1。

(二) 小动物实验区

本项目拟建小动物实验区工作场所位于 1#医学成像楼二层东部，小动物实验区工作场所区域主要包括：卫生通过间、更衣室、淋浴室、质控室、放射源库、废物库、动物注射室、动物手术室、动物留观室、动物实验走廊、光声/CT 双模成像间、双模成像操作间、小动物五模态成像间、五模态操作间、放射电子和晶体测试实验室、小动物活体荧光成像间、设备间 1、设备间 2、杂物间、缓冲间等功能间。本项目小动物实验区工作场所分区管理情况如下：

控制区：包括质控室、放射源库、废物库、动物注射室、动物手术室、动物留观室、动物实验走廊、光声/CT 双模成像间、小动物五模态成像间、放射电子和晶体测试实验室均划为控制区。

监督区：包括卫生通过间、更衣室、淋浴室、双模成像操作间、五模态操作间、小动物活体荧光成像间、设备间 1、设备间 2、杂物间、缓冲间均划为监督区。

本项目小动物实验区工作场所分区管理示意图见图 10-2。

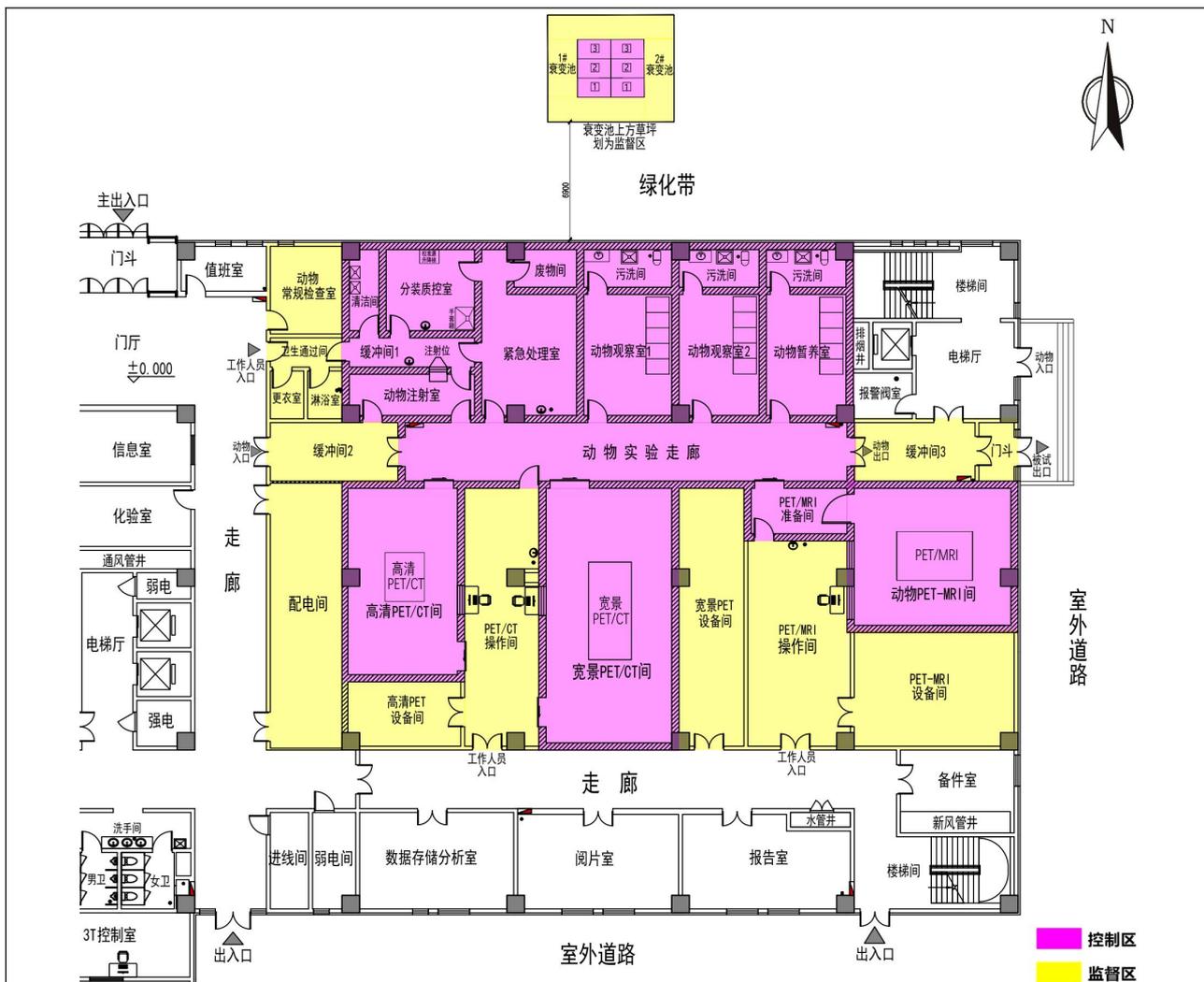


图 10-1 本项目动物 PET 影像区工作场所分区管理示意图

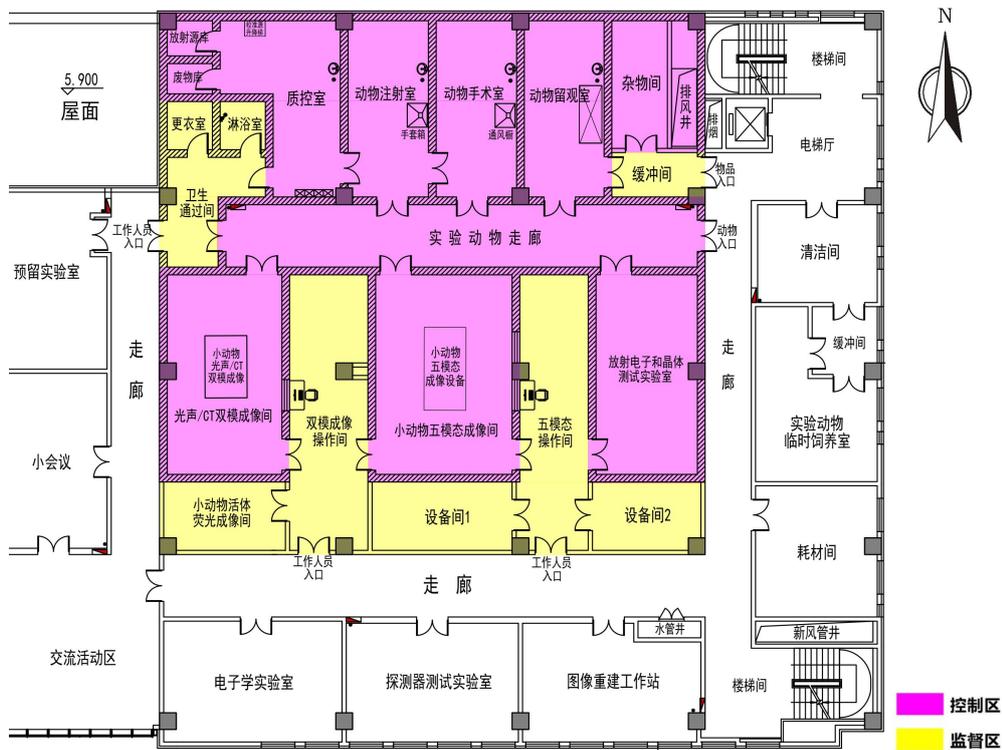


图 10-2 本项目小动物实验区工作场所分区管理示意图

10.1.2 工作场所实体屏蔽设计

(一) 动物 PET 影像区

本项目动物 PET 影像区工作场所内各房间四周墙体均为 370mm 灰砂砖墙（密度不低于 1.5t/m³），屋顶为 200mm 混凝土楼板（密度不低于 2.35t/m³），无地下室。本项目拟采用灰砂砖墙、硫酸钡水泥、铅板、铅防护门和铅玻璃作为屏蔽材料，硫酸钡水泥密度不低于 3.2t/m³，铅板密度为 11.34t/m³，各观察窗为铅玻璃。本项目动物 PET 影像区工作场所的实体屏蔽设计见表 10-1，动物 PET 影像区实体屏蔽设计示意图见图 10-3。

表 10-1 本项目动物 PET 影像区工作场所实体屏蔽设计

房间名称	屏蔽体	屏蔽材料及厚度	屏蔽体外区域	房间内尺寸
分装质控室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	紧急处理室	东西 4.4m 南北 4.0m 面积 17.6m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	缓冲间 1	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	清洁间	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	楼外绿化带	
	东墙防护门	8mmPb	紧急处理室	
	南墙防护门	8mmPb	缓冲间 1	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层质控室	
动物注射室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	紧急处理室	东西 6.3m 南北 2.1m 面积 13.2m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物实验走廊、缓冲间 2	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	淋浴室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	缓冲间 1	
	北墙防护门	8mmPb	缓冲间 1	
	南墙西侧防护门	8mmPb	缓冲间 2	
	南墙东侧防护门	8mmPb	动物实验走廊	
屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层卫生通过间		
缓冲间 1	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	紧急处理室	东西 6.3m 南北 1.5m 面积 9.4m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物注射室	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	卫生通过间	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	分装质控室、清洁间	
	东墙防护门	8mmPb	紧急处理室	
	西墙防护门	8mmPb	卫生通过间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层更衣室、淋浴室	
清洁间	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	分装质控室	东西 1.5m 南北 4.0m 面积 6.0m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	缓冲间 1	

	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物常规检查室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	楼外绿化带	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层放射源库、废物库	
废物间	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	洗污间	东西 3.2m 南北 1.9m 面积 6.0m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	紧急处理室	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	紧急处理室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	楼外绿化带	
	西墙防护门	8mmPb	紧急处理室	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层动物注射室	
紧急处理室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物观察室 1	东西 4.8m 南北 6.2m 面积 29.8m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	分装质控室、动物注射室、缓冲间 1	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	废物间、楼外绿化带	
	南墙防护门	8mmPb	动物实验走廊	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层质控室、动物注射室	
动物观察室 1 (含洗污间 1)	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物观察室 2	东西 4.5m 南北 8.4m 面积 37.8m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	紧急处理室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	楼外绿化带	
	南墙防护门	8mmPb	动物实验走廊	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层动物手术室	
动物观察室 2 (含洗污间)	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物暂养室	东西 4.0m 南北 8.4m 面积 33.6m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物观察室 1	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	楼外绿化带	
	南墙防护门	8mmPb	动物实验走廊	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层动物留观室	
动物暂养室 (含洗污间)	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	楼梯、电梯、报警阀室	东西 4.0m 南北 8.4m 面积 33.6m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物观察室 2	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	楼外绿化带	
	南墙防护门	8mmPb	动物实验走廊	

	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层杂物间、缓冲间	
高清 PET/CT 间	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	PET/CT 操作间	东西 5.5m 南北 9.5m 面积 52.3m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	高清 PET 设备间	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	配电间	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物实验走廊、缓冲间 2	
	机房防护门	8mmPb	动物实验走廊	
	操作间防护门	8mmPb	PET/CT 操作间	
	观察窗	8mmPb	PET/CT 操作间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	光声/CT 双模成像间	
宽景 PET/CT 间	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	宽景 PET 设备间	东西 6.4m 南北 13.0m 面积 83.2m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	PET/CT 操作间	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	动物实验走廊	
	机房防护门	8mmPb	动物实验走廊	
	操作间防护门	8mmPb	PET/CT 操作间	
	观察窗	8mmPb	PET/CT 操作间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	小动物五模态成像间	
PET/MRI 间	东墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	室外道路	东西 7.9m 南北 7.0m 面积 55.3m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	PET/MRI 设备间	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	PET/MRI 操作间、准备间	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	缓冲间 3	
	机房防护门	8mmPb	PET/MRI 准备间	
	观察窗	8mmPb	PET/MRI 操作间	
	屋顶	200mm 混凝土+60mm 硫酸钡板	二层动物临时饲养室	
PET/MRI 准备间	东墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	PET/MRI 间	东西 4.8m 南北 2.0m 面积 9.6m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	PET/MRI 操作间	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	PET 设备间	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+80mm 硫酸钡水泥	动物实验走廊	
	南侧防护门	8mmPb	PET/MRI 操作间	
	南侧观察窗	8mmPb	PET/MRI 操作间	
	屋顶	200mm 混凝土+60mm 硫酸钡板	放射电子测试实验室	
实验走廊	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	缓冲间 3	东西 22.5m 南北 3.0m 面积 67.5m ²
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mmPb 铅板	缓冲间 2	
	东侧出口防护门	8mmPb	缓冲间 3	
	西侧入口防护门	8mmPb	缓冲间 2	
	南侧防护门	8mmPb	PET/CT 操作间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	二层动物实验走廊	

注：1.灰砂砖密度不低于 1.5t/m³，混凝土密度 2.35t/m³，硫酸钡水泥密度大于 3.2t/m³，铅密度 11.34t/m³；
2.动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室内的洗污间隔墙也均为 370mm 灰砂砖墙。

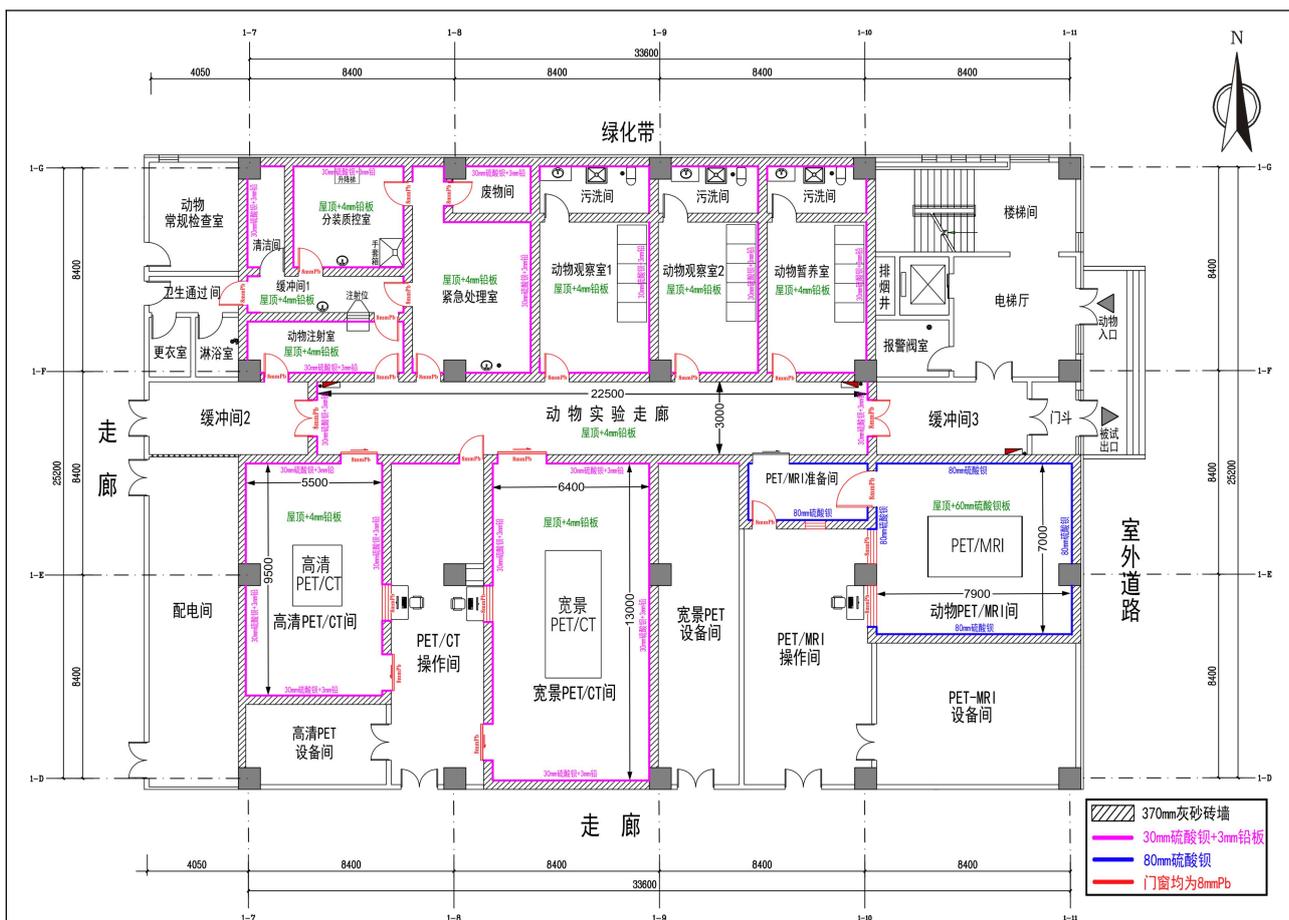


图 10-3 本项目动物 PET 影像区平面布局和防护情况示意图

(二) 小动物实验区

本项目小动物实验区工作场所内各房间四周墙体均为 370mm 灰砂砖墙（密度不低于 $1.5t/m^3$ ），屋顶和地板均为 200mm 混凝土楼板（密度不低于 $2.35t/m^3$ ）。本项目拟采用硫酸钡水泥、铅板、铅防护门、铅玻璃等作为屏蔽材料，硫酸钡水泥密度不低于 $3.2t/m^3$ ，铅板密度为 $11.34t/m^3$ ，各观察窗均为铅玻璃。本项目小动物实验区工作场所的实体屏蔽设计见表 10-2，小动物实验区实体屏蔽设计示意图见图 10-4。

表 10-2 本项目小动物实验区工作场所实体屏蔽设计

房间名称	屏蔽体	屏蔽材料及厚度	屏蔽体外区域	房间内尺寸
质控室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物注射室	东西 5.7m 南北 8.4m 面积 35.6m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	放射源库、废物库、淋浴室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	楼外	
	东墙防护门	6mmPb	动物注射室	
	西墙防护门	6mmPb	卫生通过间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层超高速超声成像室	
地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	分装质控室、紧急处理室		

放射源库	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	质控室	东西 1.6m 南北 2.1m 面积 3.4m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	废物库	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	一层门厅上方屋面	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	楼外	
	东墙防护门	8mmPb	质控室	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层配电间	
	地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层清洁间	
废物库	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	质控室	东西 1.5m 南北 2.1m 面积 3.1m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	更衣室	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	一层门厅上方屋面	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	放射源库	
	东墙防护门	8mmPb	质控室	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层配电间	
	地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层清洁间	
动物注射室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物手术室	东西 3.8m 南北 8.4m 面积 32.0m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	质控室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	楼外	
	东墙防护门	6mmPb	动物手术室	
	南墙防护门	6mmPb	动物实验走廊	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层超声电子学实验室	
	地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层紧急处理室	
动物手术室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物留观室	东西 3.8m 南北 8.4m 面积 32.0m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物注射室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	楼外	
	南墙防护门	6mmPb	动物实验走廊	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层超声电子学实验室	
	地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层动物观察室 1	
动物留观室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	杂物间、缓冲间	东西 3.8m 南北 8.4m 面积 32.0m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物实验走廊	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	动物手术室	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+1mmPb 铅板	楼外	
	东墙防护门	6mmPb	缓冲间	

	南墙防护门	6mmPb	动物实验走廊	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层小动物高频超声室	
	地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层动物观察室 2	
光声/CT 双模 成像间	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	双模成像操作间	东西 5.5m 南北 9.5m 面积 52.3m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	小动物活体荧光成像间	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	走廊	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	动物实验走廊、卫生通过间	
	北墙防护门	6mmPb	动物实验走廊	
	东墙防护门	6mmPb	双模成像操作间	
	观察窗	6mmPb	双模成像操作间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层临床超声成像间	
	地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层高清 PET/CT 间	
	小动物五模态 成像间	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	
南墙		370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	设备间 1	
西墙		370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	双模成像操作间	
北墙		370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	动物实验走廊	
北墙防护门		6mmPb	动物实验走廊	
东墙防护门		6mmPb	五模态操作间	
西墙防护门		6mmPb	双模成像操作间	
观察窗		6mmPb	五模态操作间	
屋顶		200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层室内庭院	
地面		200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层宽景 PET/CT 间	
放射电子和晶体 测试实验室	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	走廊	东西 4.7m 南北 9.5m 面积 44.6m ²
	南墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	设备间 2	
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	五模态操作间	
	北墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	动物实验走廊	
	北墙防护门	6mmPb	动物实验走廊	
	西墙防护门	6mmPb	五模态操作间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层室内庭院	
动物实验走廊	东墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	走廊	东西长 22.5m 南北宽 3.0m 面积 67.5m ²
	西墙	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥 +1mmPb 铅板	卫生通过间	
	东墙防护门	6mmPb	走廊	
	西墙防护门	6mmPb	卫生通过间	
	屋顶	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	三层走廊	
	地面	200mm 混凝土+4mmPb 铅板	一层动物实验走廊	
注：灰砂砖密度不低于 1.5t/m ³ ，混凝土密度 2.35t/m ³ ，硫酸钡水泥密度大于 3.2t/m ³ ，铅密度 11.34t/m ³ ；				

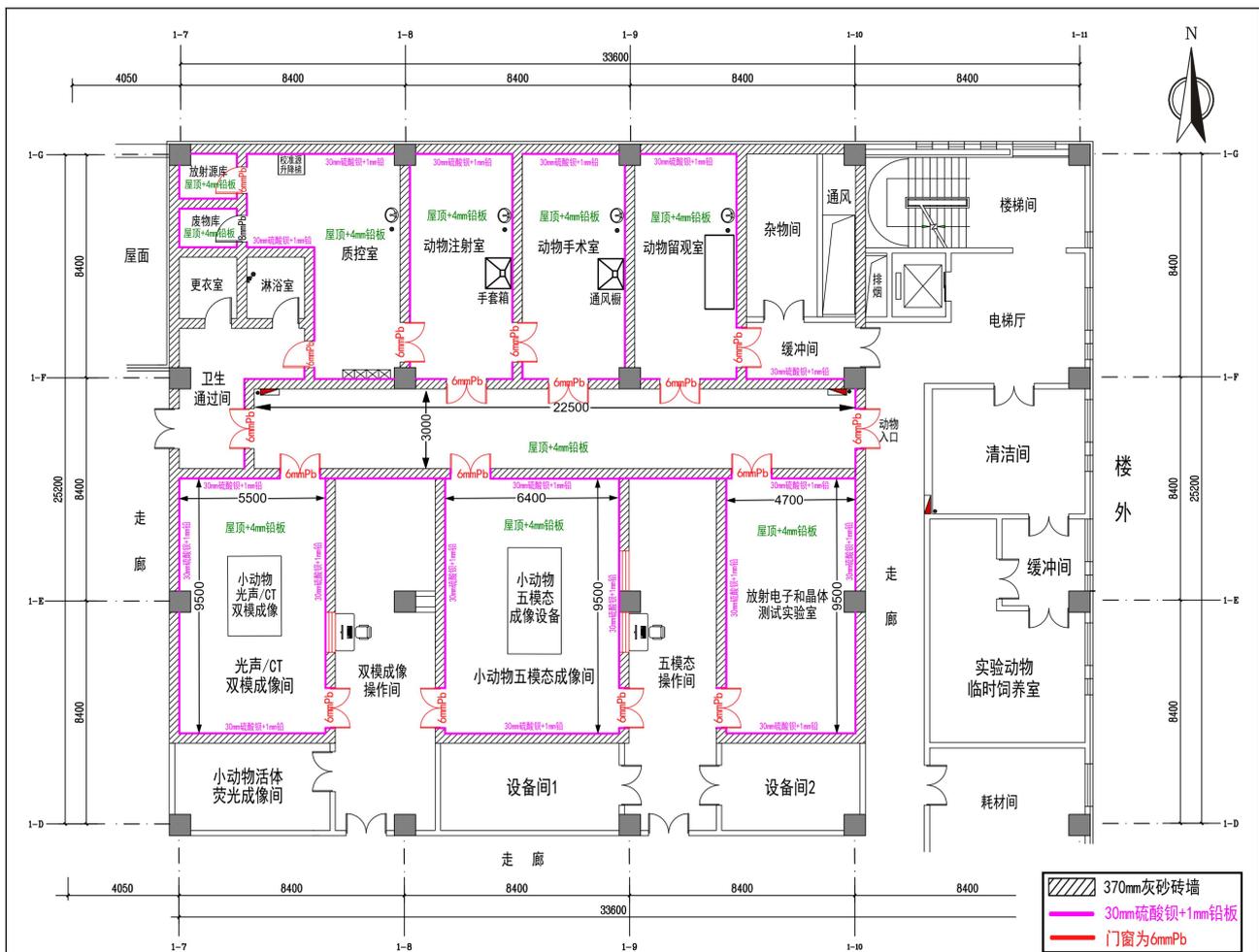


图 10-4 本项目小动物实验区平面布局和防护情况示意图

10.1.3 辐射安全与防护措施

(一) 动物 PET 影像区

(1) 场所安全和警示措施

① 门禁系统：在工作人员出入口、动物实验走廊两端、PET/CT 操作间、PET/MRI 操作间等主要出入口处设置门禁装置，禁止无关人员进入控制区或监督区。

② 警示措施：在工作场所主要出入口门外、控制区内各房间门外均设置电离辐射警告标志和中文警示说明；工作场所内手套箱、药物运输铅盒、动物转运铅箱、铅废物桶等设备外表面均张贴电离辐射标识和中文警示说明；在高清 PET/CT 间、宽景 PCT/CT 间和 PET/MRI 间防护门上方拟设置“射线有害 灯亮勿入”的工作状态指示灯，并安装门灯联动装置，当控制室防护门关闭时，指示灯应自动亮起；

③ 视频监控：拟在分装质控室、动物注射室、紧急处理室、动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室、动物实验走廊内及动物实验走廊出入口缓冲间等处设置视频监控系统，用于实时监控放射性药品情况、监视和观察实验猴行为。

④ 动物防逃逸措施：本项目拟配备专用的不锈钢猴笼，所有实验猴均在猴笼内进行观察和暂养，笼门拟安装锁扣机构，实验猴无逃脱的可能性；在动物转移、药物注射、显像扫描期间，实验猴大部分时间处于麻醉状态，但理论上存在苏醒和挣脱的可能性，本项目动物实验人员上岗前均接受动物实验培训并进行动物实操训练，实验室拟制定严格动物实验操作规程，可有效减少类似事件的发生；

(2) β表面污染控制措施

分装质控室、动物注射区域、废物间、清洁间、紧急处理室、各动物观察室、动物暂养室、各污洗间、动物实验走廊、各显像扫描间等控制区地面拟选用无缝隙、防渗、易去污材料（如PVC地板革），墙面拟采用防渗、易去污材料覆盖（如铝塑板或釉面瓷砖）；手套箱台面、注射窗台面、动物转运铅箱、动物笼具、铅废物桶等设施表面拟采用光滑、耐腐蚀、防渗、易去污的不锈钢材质；工作人员进入辐射工作区，应穿戴防护服和乳胶手套，在药物注射、动物转运和显像扫描期间，应在动物身下铺垫吸水纸或垫料，防止动物排泄物污染工作台面和铅箱。工作人员进行相关操作后应及时监测个人防护用品表面、操作台面和操作场所的β放射性表面污染，发现污染应及时擦拭去污。计划在每日工作开始前，对各动物观察室和动物暂养室进行清理去污，清理动物排泄物并对房间进行清洁。

为辐射工作人员配备足量的防护用品和去污用品，包括但不限于放射性污染防护服、工作鞋、乳胶手套、防护面罩、口罩等防护用品，吸水纸、不易破损废物袋、动物垫料、拖布、去污用品和去污试剂、消毒剂等各类去污用品；涉及非密封放射性物质的操作必须穿戴乳胶手套，不得裸手操作放射性药物和清理放射性污染物。

(3) 外照射防护措施

① 实体屏蔽：本项目工作场所拟采取灰砂砖墙体、混凝土楼板、硫酸钡水泥、铅板和铅玻璃等实体屏蔽措施，确保本项目工作场所控制区边界外30cm处辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，辐射工作人员和公众的年受照剂量低于本项目剂量约束值要求；

② 药物操作的防护：分装注射室拟配备1个防护厚度不低于50mmPb的手套箱，放射性药物相关操作均在手套箱内进行；拟配备1个30mmPb的药物贮存铅罐，外购放射性药物均贮存在铅罐内并在手套箱内暂存；拟配备1个20mmPb的药物运输铅盒，用于放射性药物的转运；工作人员注射位处拟设置1个注射防护窗，防护厚度不低于50mmPb（含铅玻璃），并配备1个钨合金注射防护套；

③ 注射后动物转运的防护：拟配备2个防护厚度不低于20mmPb的动物转运铅箱，用于注射后实验动物的转运，铅箱内部应有足够的空间，并使用手推车或平板车进行运输；

④ 铅废物桶：拟配备不少于 7 个铅废物桶，其中：分装质控室、动物注射室内各配备 1 个 20mmPb 的铅废物桶；动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室内各配备 1 个 5mmPb 的铅废物桶（共 3 个）；废物间内拟配备 2 个 5mmPb 的铅废物大桶（容积不低于 50L），用于轮流暂存放射性固体废物；废物间内拟配备 1 个冰柜，对于意外死亡的实验猴，尸体应密封收集至冰柜内冷冻暂存；

⑤ 动物暂养措施：本项目 2 间动物观察室内拟各配置 5 个独立的猴笼（2 间观察室共 10 个猴笼），每个猴笼内仅放置 1 只实验猴；2 间动物观察室内拟各配备 1 个 5mmPb 的可移动铅屏风，在场所清洁和猴子喂养期间为工作人员提供屏蔽防护；每个猴笼底部均设置不锈钢托盘用于收集动物排泄物，每个猴笼均配备有自动饮水器和投喂口，可尽量缩短工作人员场所清洁和喂养猴子的时间，利用时间防护减少人员受照剂量；

动物暂养室内拟设置 2 组猴子暂养笼具（可满足每批 10 只猴子的暂养），每批实验猴使用满 1 个月后不再使用，完成任务的实验猴于第二天早上转移至动物暂养室的笼具内，继续暂养满 1 个月后，经检测猴子体表辐射剂量率和 β 表面污染均处于极低水平后，方可送回 5#楼模式动物中心。

⑥ 校准源罐：本项目拟配备 3 个校准源罐，其中：PET/CT 设备的 3 枚 ^{68}Ge 校准源拟配备 1 个 20mmPb 源罐，6 枚 ^{22}Na 校准源拟配备 1 个 50mmPb 源罐；PET/MRI 设备的 3 枚 ^{68}Ge 校准源拟配备 1 个 20mmPb 源罐。所有校准源不使用时均放在源罐内并贮存在二层放射源库的保险柜内，保险柜拟采取双人双锁管理。

（4）内照射的防护

分装质控室内拟配备 1 个手套箱，放射性药物的操作均手套箱内进行，手套箱顶部出风口处配备高效过滤器，设置 1 条独立的负压排风管道，放射性废气通过独立排风管道引至 1#医学成像楼楼顶高空排放，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤装置。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，及时监测表面污染情况，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；

本项目动物 PET 影像区内拟设置 1 套独立放射性排风系统，在更衣室、淋浴室、分装质控室、动物注射区域、清洁间、废物间、紧急处理室、2 间动物观察室（含洗污间）、动物暂养室（含洗污间）、动物实验走廊内以及各 PET 成像机房内均设置有排风口，拟采取排风量略大于新风量的控制措施，维持工作场所各房间的负压状态，各房间排风管道内安装止逆阀，防止气体回流。工作场所废气经汇聚后通过 1 条主排风管道引至 1#医学成像楼楼顶排放，楼顶排风机前端拟设置 1 个活性炭过滤器，废气经活性炭过滤后排放；

(5) 妥善收集固体放射性废物

本项目动物 PET 影像区拟配备足够数量的铅废物桶，铅桶内应放置专用塑料袋收纳废物。本项目分装质控室、动物注射室各配备 1 个铅废物桶，药物操作期间产生的废弃注射器、针头、空药瓶、棉球、吸水纸等放射性固废均收集至铅桶内，并于每周工作开始前密封收集、标注所含核素种类和产生日期后转移至废物间的铅废物桶内；动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室内各配备 1 个铅废物桶，动物实验和暂养期间产生的含少量排泄物的动物垫料和吸水纸、动物毛发、食物残渣、清污产生的擦拭用品等动物废物，动物废物的清理和收集于第二天实验开始前进行，应先进行消毒后再收集至铅废物桶内，随后密封收集、标注所含核素种类和产生日期后转移至废物间的铅废物桶内；废物间内设有 2 个铅废物大桶，两桶轮流使用；废物间内配备 1 个冰柜，用于冷冻暂存意外死亡实验猴尸体。

(6) 放射性废水收集处理设施

本项目动物 PET 影像区产生的放射性废水主要包括各动物观察室、暂养室洗污间产生的动物排泄物、冲厕废水、洗污和冲洗拖布废水，分装质控室、注射室的洗手池废水，清洁间产生的洗污废水，以及淋浴室应急淋浴废水等。放射性废水通过专用排水管收集一并排入动物 PET 影像区衰变池（1#衰变池），排水管道均铺设在地下，所有排水管道均设计有一定坡度，可利用重力自流排水；本项目 1#衰变池设计有 3 个衰变槽，单池有效容积为 4.0m³，总容积为 12m³。

(7) 辐射监测设备

① 动物 PET 影像区计划新增配备 2 台表面污染监测仪，其中：放射性药物操作区域（分装质控室、动物注射室等区域）拟设置 1 台，主要用于药物操作台面、设备表面、人员衣物、手部和放射性固废等表面污染监测；动物实验走廊东侧出口处拟设置 1 台，主要用于各动物观察室、动物暂养室、动物实验走廊内、各成像间等工作场所的墙面、地面、台面、笼具等表面污染监测；从控制区离开的人员和物品均须进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，须立即采取去污措施；本项目各动物观察室和暂养室的表面污染监测拟安排在第二天实验开始前，对房间完成清理去污后进行；其他区域的表面污染监测于每日工作结束后进行 1 次；

② 动物 PET 影像区计划新增配备 1 台便携式辐射剂量率仪，用于工作场所周围辐射剂量率水平的自行监测，辐射剂量率水平自行监测频次不少于 1 次/月；

③ 动物 PET 影像区拟新增配备 1 套固定式辐射监测报警仪（拟配备 4 个探头），动物实验走廊西侧门外和东侧门外、PET/CT 操作间内、PET/MRI 操作间内分别设置 γ 剂量率

探头，进行 γ 剂量率水平的实时在线监测，报警阈值为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；

(8) 辐射工作人员和辐射安全管理规章制度

本项目动物 PET 影像区拟新增配备 11 名辐射工作人员，均须通过辐射安全与防护考核（考核类别“科研、生产及其他”）后持证上岗，为所有辐射工作人员均配备个人剂量计，在工作期间应按要求规范佩戴个人剂量计，开展个人剂量监测。拟新增本项目动物实验操作规程和实验室工作制度，辐射工作人员上岗前须熟悉实验操作规程和工作制度，了解各项辐射安全与防护管理措施，涉及放射性药物的操作均在手套箱或注射窗的防护下进行，放射性药物、注射后实验动物的转移均使用铅防护转运容器，并使用手推车进行运输；

拟新增本项目实验室的辐射安全与防护管理制度、岗位职责、安全保卫制度、个人剂量管理制度、监测方案、放射性药品使用管理规定、放射源管理规定、台账管理制度、放射性废物管理规定、实验动物管理规定等各项规章制度，建立放射性药品管理台账、放射性固废管理台账、放射性废水管理台账、实验动物出入管理台账等，建立并健全辐射事故应急预案，确保所有辐射工作都有章可循；

(9) 放射性药品订购和管理

本项目拟使用的放射性药物和发生器均从有资质的放射性药物供应单位订购，按当日的实验安排按需订购放射性药品，由供药单位派专人运输至本项目分装质控室，辐射工作人员在分装质控室摄像头下“点对点”接收放射性药物或发生器，检查并清点数量，登记放射性药品台账。放射性药物和发生器均暂存在分装质控室手套箱内暂存，达到使用寿命的发生器暂存在手套箱内，由供药单位在下次送药时回收。本项目动物 PET 影像区每日送药 1 次，拟安排在每天早上实验开始前送达，以减少对周围人员的影响。

本项目动物 PET 影像区拟配备的防护设施和防护用品统计详见表 10-3。

表 10-3 本项目动物 PET 影像区拟配备的防护设施统计

名称	数量	规格	使用场所
手套箱	1 个	50mmPb（含铅玻璃）	分装质控室
药物贮存铅罐	1 个	30mmPb	分装质控室
药物运输铅盒	1 个	20mmPb	分装质控室、动物注射室
注射防护窗	1 个	50mmPb（含铅玻璃）	动物注射室
注射防护套	1 个	10mmPb 钨合金	动物注射室
动物转运铅箱	2 个	20mmPb	动物注射室、动物观察室、各 PET 显像间
铅废物桶	1 个	20mmPb（容积 5L）	分装质控室
	1 个	20mmPb（容积 5L）	注射操作位

	3 个	5mmPb (容积 10L)	动物观察室 1、动物观察室 2、 动物暂养室各 1 个
	2 个	5mmPb (容积 50L)	废物间
移动铅屏风	3 个	5mmPb	动物观察室 1、动物观察室 2、 动物暂养室各 1 个
校准源罐	3 个	2 个 20mmPb (^{68}Ge 源罐) 1 个 50mmPb (^{22}Na 源罐)	放射源库
冰柜	1 个	不低于 20L	废物间
动物观察室独立猴笼	10 个	\	动物观察室 1 内 5 个、 动物观察室 2 内 5 个
动物暂养室笼具	1 组	\	动物暂养室
人员防护用品	足量	放射性污染防护服、乳胶手套、 防护面罩等	分装质控室内



图 10-5 本项目动物 PET 影像区拟配备防护设施的样图

(二) 小动物实验区

(1) 场所安全和警示措施

① 门禁系统：在工作人员出入口、实验动物走廊两端、东侧缓冲间入口、多模成像操作间、五模态操作间等主要出入口设置门禁装置，防止无关人员进入工作场所区域；

② 警示措施：在工作场所主要出入口门外、控制区内各房间门外均设置电离辐射警告标志和中文警示说明；工作场所内手套箱/通风橱、动物运输容器、铅废物桶、冰柜等设备外表面均张贴电离辐射标识和中文警示说明；在小动物多模成像间、小动物五模态成像间

防护门上方拟设置“射线有害 灯亮勿入”的工作状态指示灯，并安装门灯联动装置，当控制室防护门关闭时，指示灯应自动亮起；

③ 视频监控：拟在质控室、放射源库、废物库、动物注射室、动物手术室、动物留观室、动物实验走廊内及动物实验走廊出入口门外等处设置视频监控系统，用于实时监控放射性药品情况、监视工作场所及周围的情况；

④ 安全保卫措施：放射源库内拟配备保险柜，所有校准源不使用时均放在源罐内并贮存在放射源库的保险柜内，保险柜拟采取双人双锁管理。放射源库设置具有防盗功能的防护门、源库内设置视频监控和红外防闯入报警装置；工作场所内拟设置火灾自动报警、消防器材和应急逃生指示等；

⑤ 动物防逃逸措施：小动物的转移、麻醉和注射、显像实验期间，理论上存在挣脱的可能性，若不慎出现动物挣脱的情况，应及时寻找并捉回动物笼内。工作场所墙角洞口处均设置防鼠网/挡鼠板，防止实验鼠逃逸到实验室外。本项目工作人上岗前均接受动物实验培训并进行动物实操训练，并制定严格的实验操作规程，可有效减少类似事件的发生；

(2) β 表面污染控制措施

动物注射室、动物手术室、动物留观室、质控室、废物库、动物实验走廊、各小动物成像间和实验室等控制区地面拟选用无缝隙、防渗、易去污材料（如PVC地板革），墙面拟采用防渗、易去污材料覆盖（如铝塑板或釉面瓷砖）；手套箱台面、通风橱台面、动物转运容器、铅废物桶等设施表面拟采用光滑、耐腐蚀、防渗、易去污的不锈钢材质；工作人员进入辐射工作区，应穿戴防护服和乳胶手套，在药物注射、动物转运和显像扫描期间，应在动物身下铺垫吸水纸或垫料，防止动物排泄物污染工作台面和设备；动物手术均在通风橱的不锈钢盘或搪瓷盘上进行操作，使用吸水纸妥善收集动物血液，解剖结束后及时对操作台面和托盘进行清污。工作人员进行相关操作后应及时监测个人防护用品表面、操作台面和工作场所的 β 放射性表面污染，发现污染应及时擦拭去污。每日工作结束后，对动物留观室进行清洁，清理动物排泄物并更换动物垫料。

为辐射工作人员配备足量的防护用品和去污用品，包括但不限于放射性污染防护服、工作鞋、乳胶手套、防护面罩、口罩等防护用品，吸水纸、不易破损废物袋、动物垫料、拖布、去污用品和去污试剂、消毒剂等各类去污用品；涉及非密封放射性物质的操作必须穿戴乳胶手套，不得裸手操作放射性药物和清理放射性污染物。

(3) 外照射防护措施

① 实体屏蔽：本项目工作场所拟采取灰砂砖墙体、混凝土楼板、硫酸钡水泥、铅板和

铅玻璃等实体屏蔽措施，确保本项目工作场所控制区边界外 30cm 处辐射剂量率不大于 2.5 μ Sv/h，辐射工作人员和公众的年受照剂量低于本项目剂量约束值要求；

② 药物操作的防护：动物注射室拟配备 1 个防护厚度不低于 40mmPb 的手套箱（含铅玻璃），放射性药物分装和药物注射均在手套箱内进行；拟配备 1 个 20mmPb 的药物贮存铅罐，外购放射性药物均贮存在铅罐内并在手套箱内暂存；

③ 注射后实验动物的防护：拟配备不少于 3 个 10mmPb 的动物转运容器，用于注射后实验鼠或组织器官的转运；动物手术室拟配备 1 个防护厚度不低于 30mmPb 的通风橱（含铅玻璃），所有动物手术均在通风橱内的不锈钢盘或搪瓷盘上进行；动物留观室拟配备 1 个防护厚度不低于 20mmPb 的负压通风柜（含铅玻璃），所有注射后的实验鼠均置于鼠笼内，并放置在负压通风柜内进行留观；

④ 铅废物桶：共配备不少于 8 个铅废物桶。动物注射室、动物手术室、动物留观室和放射晶体实验室内各配备 1 个 10mmPb 的铅废物桶（共 4 个）；废物库内配备 2 个 10mmPb 铅废物桶，用于轮流暂存放射性固体废物。

⑤ 动物尸体废物：小动物实验区废物库拟配备 1 个容积约 600L 的冰柜，并在冰柜内设置 2 个铅废物箱（30mmPb、300L），用于轮流暂存实验动物尸体废物；所有实验鼠尸体或组织器官应消毒后密封收集，标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物库冰柜内冷冻暂存。

⑥ 个人防护用品：本项目小动物实验区使用 ^{99m}Tc 、 ^{177}Lu 等 γ 射线能量较低的核素，个人防护用品可起到较为明显的防护效果。本项目小动物实验区拟配备 4 套 0.5mmPb 铅橡胶个人防护用品，每套包含铅衣、铅围裙和铅围脖；拟为药物操作人员（负责药物操作和动物手术）配备 2 个 0.5mmPb 的铅防护眼镜；

（4）内照射的防护

动物注射室内拟配备 1 个手套箱，放射性药物分装操作和药物注射均手套箱内进行，手套箱顶部出风口处配备高效过滤器，并设置 1 条独立排风管道，放射性废气通过独立排风管道引至 1#医学成像楼楼顶高空排放，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤装置；动物手术室内拟配备 1 个通风橱，动物处死和解剖手术均通风橱内的托盘上进行，通风橱拟设置 1 条独立的排风管。动物留观室内拟配备 1 个负压通风柜，实验鼠均在负压通风柜内进行留观，通风柜拟设置 1 条独立的排风管；一旦发生放射性污染，应妥善收集污染物，先采用吸水纸擦除方法处理，监测表面污染情况，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；

本项目小动物实验区工作场所拟设置 1 套独立放射性排风系统，更衣室、淋浴室、废物库、放射源库、质控室、动物注射室、动物手术室、动物留观室、缓冲间、动物实验走廊、各成像间和实验室内均设置有排风口，动物手术室通风橱配备高效过滤器和独立排风管道，动物留观室负压通风柜配备高效过滤器和独立排风管道；拟采取排风量略大于新风量的控制措施，维持工作场所各房间负压状态，各排风管道处均安装止逆阀，防止气体回流；工作场所废气经管道汇聚后通过 1 条主排风管道引至 1#医学成像楼楼顶排放，主排风管道引至 1#医学成像楼楼顶高空排放，楼顶排风机前端拟设置 1 个活性炭过滤器，废气经活性炭过滤后排放。

(5) 妥善收集固体放射性废物

本项目小动物实验区拟配备足够数量的铅废物桶，铅桶内应放置专用塑料袋收纳废物。本项目动物注射室拟配备 1 个铅废物桶，药物分装和注射期间产生的废弃注射器、针头、空药瓶、棉球、吸水纸等放射性固废均收集至铅桶内，并于每周工作开始前密封收集、标注核素种类和日期后转移至废物间的铅废物桶内；动物手术室、动物留观室和放射晶体实验室内各配备 1 个铅废物桶，动物手术、动物留观和实验期间产生的动物排泄物、食物残渣、毛发、废弃垫料、含动物排泄物或血液的吸水纸、清理污物产生的擦拭用品等污物，应先进行消毒后再收集至铅废物桶内，并于每日实验结束后密封收集、标注核素种类和产生日期后转移至废物间的铅废物桶内；废物库内配备 2 个铅废物桶用于轮流暂存放射性固体废物；废物库拟配备 1 个容积约 600L 的冰柜，冰柜内设置 2 个铅废物箱，所有实验鼠尸体或组织器官应消毒后，按核素种类分开收集，标注所含核素种类和产生日期，转移至废物库冰柜内冷冻暂存。

(6) 放射性废水收集处理设施

本项目小动物实验区产生的放射性废水主要包括动物注射室、动物手术室、动物留观室、质控室的洗手池废水，工作场所的洗污废水，以及淋浴室应急淋浴废水等；放射性废水通过专用排水管收集一并排入小动物实验区衰变池（2#衰变池），主排水管道布设在一层的梁顶下方（吊顶上方），主排水管道穿出控制区的部分拟采取包铅防护，排水管道均设计有一定坡度，可利用重力自流排水；本项目 2#衰变池设计有 3 个衰变槽，单池有效容积为 4.0m³，总容积为 12m³；

(7) 辐射监测设备

① 本项目小动物实验区计划新增配备 2 台表面污染监测仪，其中：动物注射室和动物手术室内拟设置 1 台，主要用于药物操作台面、设备表面、人员衣物、手部和放射性固废

等表面污染监测；动物实验走廊东侧出口处拟设置 1 台，主要用于动物留观室、动物实验走廊内、各成像间和实验室等场所的墙面、地面、设备台面等表面污染监测；从控制区离开的人员和物品均须进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，须立即采取去污措施。工作场所 β 表面污染自行监测于每日工作结束后进行；

② 本项目小动物实验区计划新增配备 1 台便携式辐射剂量率仪，用于工作场所周围辐射剂量率水平的自行监测，辐射剂量率水平自行监测频次不少于 1 次/月；

③ 本项目小动物实验区拟新增配备 1 套固定式辐射监测报警仪（拟配备 4 个探头），在动物实验走廊东侧门外和西侧门外、多模成像操作间内、五模态操作间内分别设置 γ 剂量率探头，进行 γ 剂量率水平的实时在线监测，报警阈值为 2.5 μ Sv/h；

④ 本项目二层废物库和放射源库区域拟安装 1 套固定式辐射监测报警仪（拟配备 2 个探头），在废物库防护门外、放射源库防护门外分别设置 γ 剂量率探头，进行 γ 剂量率水平的实时在线监测，报警阈值为 2.5 μ Sv/h；

（8）辐射工作人员和辐射安全管理规章制度

本项目小动物实验区拟新增配备 6 名辐射工作人员，均须通过辐射安全与防护考核（考核类别“科研、生产及其他”）后持证上岗，为所有辐射工作人员均配备个人剂量计，在工作期间按要求规范佩戴个人剂量计，开展个人剂量监测。拟新增本项目动物实验操作规程和实验室工作制度，辐射工作人员上岗前须熟悉实验操作规程和工作制度，了解各项辐射安全与防护管理措施，涉及放射性药物分装和注射操作均在手套箱的防护下进行，动物手术应在动物手术室的通风橱内操作，注射后实验动物均使用铅防护转运容器进行转移；

须新增本项目实验室的辐射安全与防护管理制度、岗位职责、安全保卫制度、个人剂量管理制度、辐射监测方案、放射性药品使用管理规定、台账管理制度、放射性废物管理规定、实验动物管理规定等各项规章制度，建立放射性药品管理台账、放射性固废管理台账、放射性废水管理台账、实验动物尸体废物管理台账、实验动物使用管理台账等，建立并健全辐射事故应急预案，确保所有辐射工作都有章可循。

（9）放射性药品订购和管理

本项目小动物实验区拟使用的放射性药物均从有资质的放射性药物供应单位订购，按当日的实验安排按需订购放射性药品，由供药单位派专人运输至本项目分装质控室，辐射工作人员在动物注射室的摄像头下“点对点”接收放射性药物，检查并清点数量，登记放射性药品台账，放射性药物均暂存在动物注射室手套箱内。本项目小动物实验区每日送药 1 次，放射性药品拟安排在每天早上实验开始前送达，外购校准源拟安排在周末无人的时间段进行运输，以减少对周围其他人员的影响。

本项目小动物实验区拟配备的防护设施和防护用品统计详见表 10-4。

表 10-4 本项目小动物实验区拟配备的防护设施和防护用品统计

名称	数量	规格	使用场所
手套箱	1 个	40mmPb (含铅玻璃)	动物注射室
药物贮存铅罐	1 个	20mmPb	动物注射室
动物转运容器	3 个	10mmPb	动物注射室、动物手术室、动物留观室、各成像间和实验室
通风橱	1 个	30mmPb (含铅玻璃)	动物手术室
负压通风柜	1 个	20mmPb (含铅玻璃)	动物留观室
铅废物桶	4 个	10mmPb (容积 5L)	动物注射室、手术室、留观室、放射晶体实验室各 1 个
	2 个	10mmPb (容积 50L)	废物库
铅废物箱	2 个	30mmPb (容积 300L)	废物库冰柜内
个人防护用品	4 套	每套含铅衣、铅围裙、铅围脖, 药物操作人员配备铅防护眼镜	动物注射室、动物手术室、动物留观室、五模态成像间和实验室
冰柜	1 个	容积 600L	废物库



(注射室手套箱)



(药物铅罐)



(手术室通风橱)



(动物转运容器)



(留观室通风柜)



(废物库冰柜)

图 10-6 本项目动物 PET 影像区拟配备防护设施的样图

10.1.4 工作场所人流、物流路径的设计

（一）动物 PET 影像区

本项目一层动物 PET 影像区拟设置相对独立的人流和物流路径，本项目动物 PET 影像区人流和物流路径示意图见图 10-7。

（1）工作人员路径：

药物注射人员：进入卫生通过间（入口设门禁）→进入更衣室更衣换鞋后进入缓冲间 1→进入动物观察室挑选实验猴，运送至注射台并实施麻醉→进入分装质控室进行药物的分装等操作→将药物运送到注射台，在注射窗后完成药物注射→将实验猴放入转运铅箱内，使用手推车将实验猴送至动物观察室的猴笼内，随后离开→成像前观察完成后进入动物观察室，使用手推车将实验猴送至对应的 PET 显像间交给设备操作人员→PET 显像实验完成后，使用手推车将实验猴送回动物观察室的猴笼内→实验完成后进行表面污染监测→随后进入卫生通过间→最后进入更衣室更衣换鞋后离开。

设备操作人员：从南侧走廊进入 PET 操作间（入口处均设门禁）→进入各 PET 显像机房对实验猴进行摆位→随后进入各 PET 操作间进行设备操作→显像扫描完成后，将实验猴放回动物转运铅箱内→实验完成后，从各 PET 操作间南侧出口处离开。

动物管理人员：动物管理人员于每日实验开始前，经缓冲间 2 进入动物实验走廊→进入动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室视察实验猴的情况，并投喂食物和饮用水→完成后回到动物实验走廊内，进行表面污染监测→从动物实验走廊西侧防护门再经缓冲间 2 离开。

（2）实验动物路径：在 5#楼模式动物中心挑选 1 批实验猴→实验前实验猴被运至本项目西侧动物入口处→通过缓冲间 2 进入动物实验走廊，送至动物观察室的猴笼内→实验开始前被运送至动物注射室→注射完成后被送回动物观察室猴笼内→成像前观察完成后被运送至对应 PET 显像间→PET 显像扫描完成后被送回动物观察室猴笼内→每批实验猴使用满 1 个月后送至动物暂养室饲养笼内暂养，然后将下一批猴子运送至动物观察室→动物暂养室猴子继续暂养 1 个月后进行剂量率和表面污染监测→监测达标后从东侧动物出口处经缓冲间 3 离开→最终送回 5#楼模式动物中心。

（3）放射性药物路径：供药单位将放射性药品或运输至 1#医学成像楼东北角→进入缓冲间 3，经防护门进入动物实验走廊→经动物实验走廊到达紧急处理室→从紧急处理室北侧防护门进入分装质控室→在分装质控室内摄像头下办理“点对点”交接手续→工作人员记录药品或发生器的活度、规格型号、批次、数量以及收货时间→放射性药品和发生器均暂存在手套箱内→工作人员在手套箱内进行发生器操作和药物分装→使用运输铅盒将药物

运至注射窗进行药物注射→废旧发生器在下次送药时由供药单位回收。

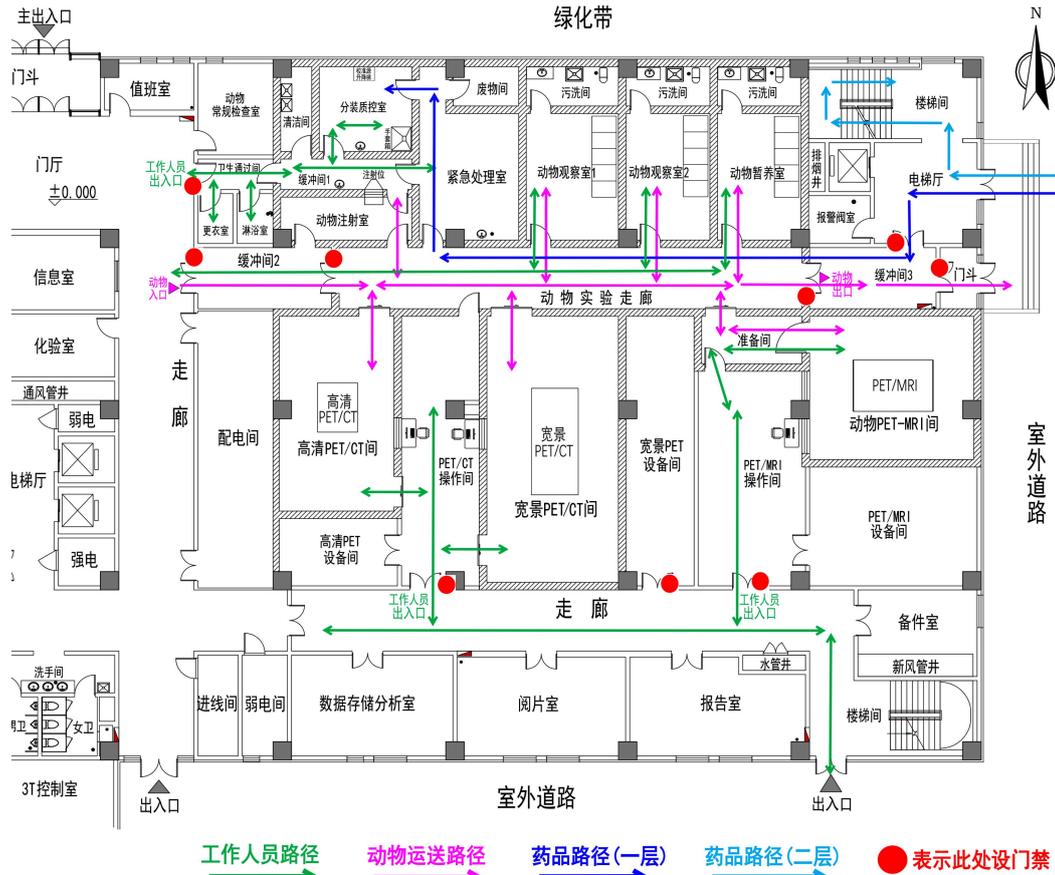


图 10-7 本项目一层动物 PET 影像区人流和物流路径示意图

(二) 小动物实验区

本项目二层小动物实验区拟设置相对独立的人流和物流路径，本项目小动物实验区人流和物流路径示意图见图 10-8。

(1) 工作人员路径：

药物注射人员：进入卫生通过间（入口设门禁）→进入更衣室更衣换鞋后进入质控室→进入动物注射室对实验鼠实施麻醉→在动物注射室手套箱内完成药物分装和药物注射→使用运输容器将实验鼠送至动物留观室负压通风柜内留观，随后离开→留观完成后，使用转运容器将实验鼠送至五模态成像间交接给设备操作人员→显像实验完成后，使用转运容器将实验鼠送至动物手术室→在动物手术室处死实验鼠或处死后解剖→使用转运容器将解剖出的组织器官运至放射电子测试实验室交给设备操作人员→实验全部完成后，将实验鼠尸体和组织器官送至废物库冰柜内→进行表面污染监测→随后进入卫生通过间和更衣室，更衣换鞋后离开。

设备操作人员：从南侧走廊进入各成像操作间（入口设门禁）→进入各成像间或实验室，接收实验鼠并进行摆位或将动物组织器官放入仪器内→随后进入各操作间进行设备操作→成像或测试实验完成后，将实验鼠或动物组织器官放回动物转运容器内→最后从成像

10.1.5 放射性“三废”的防治措施

(一) 放射性固体废物

(1) 动物 PET 影像区

① **固废收集措施：**本项目动物 PET 影像区工作场所拟配备数量足够的铅废物桶，所有废物桶外表面均张贴电离辐射标志，内衬不易破损的塑料袋收纳废物；

分装质控室、动物注射室的铅废物桶主要用于收集药物操作产生的废弃注射器、针头、空药瓶、吸水纸、手套、去污用品等放射性固废，并于每周一工作开始前密封收集、标注所含核素种类和产生日期后转移至废物间的铅废物桶内；

动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室各配备 1 个铅废物桶，动物观察、实验和暂养期间产生的含少量排泄物的动物垫料和吸水纸、动物毛发、食物残渣、清理污物产生的擦拭用品等污物，应先进行消毒后再收集至铅废物桶内。动物废物的清理和收集于每日实验开始前进行，动物废物应先消毒后再密封收集、标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物间的铅废物桶内暂存；废物间内设有 2 个铅废物大桶用于轮流暂存放射性固废，废物间内不得堆放与放射性固废暂存无关的其他物品。

② **固废暂存与解控：**本项目动物 PET 影像区拟使用的放射性核素半衰期均小于 24h，所有放射性固废和动物废物应在废物间铅桶内暂存超过 30 天后，使用经检定或校准合格的仪器进行监测，废物表面的辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可对废物进行清洁解控并作为医疗废物处理。放射性固废的清洁解控拟安排在非实验期间进行。

③ **实验动物尸体说明：**本项目实验猴在实验和暂养期间可能会出现意外死亡，意外死亡的实验猴尸体应消毒后密封收集、标注核素种类和尸体产生日期后，送至一层废物间的冰柜内冷冻暂存，动物尸体冷冻暂存超过 30 天后，经检测表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，方可实施清洁解控，解控的动物尸体返回 5#模式动物中心废物库，按动物中心动物尸体的规定妥善处理。

④ **台账记录：**拟建立放射性固废暂存和处置管理台账，详细记录放射性固体废物（或动物尸体）的废物种类、所含的核素名称、重量、废物暂存的起始日期、责任人员、解控日期和监测结果等信息；

本项目动物 PET 影像区拟建立《实验动物出入管理台账》，每批送达的实验猴、每批送回的实验猴均应形成台账记录（每批实验猴登记一行台账），台账记录内容主要包括：

每批送达实验猴数量、送达日期、每批送回实验猴数量、暂养起始日期、监测结果、送回日期、责任人员等信息。实验和暂养期间意外死亡的实验猴应在台账中进行详细备注。

⑤ **其他放射性固废：**本项目动物 PET 影像区工作场所排风管道楼顶排风口处的 1 个活性炭过滤器、手套箱的 1 个高效过滤器，每年至少更换 1 次。拆下的废弃滤材应妥善收集，密封包装暂存于一层废物间内，暂存时间不少于 30 天后，经监测废弃滤材表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可实施解控并按危险废物处理；达到使用寿命的 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器暂存在手套箱内，在下次送药时由供药单位负责回收处理；退役的 ^{68}Ge 和 ^{22}Na 校准源应及时送交北京市城市放射性废物库贮存。

本项目一层动物 PET 影像区放射性固废的转移路径见图 10-9。

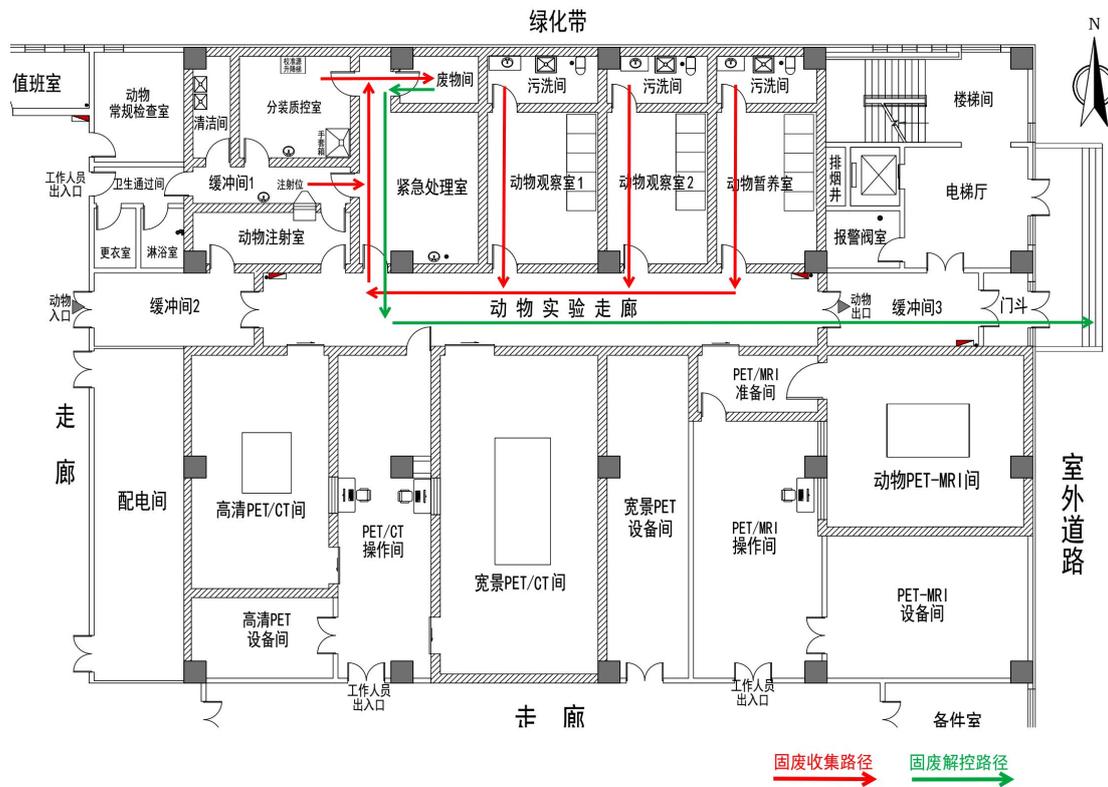


图 10-9 本项目动物 PET 影像区放射性固废转移路径

(2) 小动物实验区

① **固废收集措施：**本项目小动物实验区工作场所已配备数量足够的铅废物桶，所有废物桶外表面均张贴电离辐射标志，内衬不易破损的塑料袋收集废物；本项目小动物注射、动物处死、动物解剖手术等操作均吸水纸上进行，少量的动物血液和排泄物被吸水纸吸收后按放射性固废处理；

动物注射室铅废物桶用于收集药物操作产生的废弃注射器、针头、吸水纸、手套等放射性固废，于每周工作开始前密封收集、标注所含核素种类和产生日期后转移至废物间的

铅废物桶内；

动物手术室、动物留观室、放射电子和晶体测试实验室各配备 1 个铅废物桶，动物留观、解剖和实验期间产生的排泄物、毛发、废弃垫料、食物残渣、含动物排泄物或血液的吸水纸、清理污物产生的擦拭用品等污物，应先消毒后再收集至铅废物桶内，并于当天实验结束后密封收集、标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物间的铅废物桶内暂存；

废物库内配备 2 个铅废物桶，用于轮流暂存放射性固体废物，废物库内不得堆放与放射性固废暂存无关的其他物品。

② **固废暂存与解控：**所有放射性固废和动物废物应在废物库铅桶内暂存不少于 180 天后（均按含 ^{131}I 核素的固体废物考虑），使用经检定或校准合格的仪器进行监测，废物表面的辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可对废物进行清洁解控并作为医疗废物处理。放射性固废的清洁解控拟安排在非实验期间进行。

③ **实验动物尸体：**实验结束后所有实验鼠均被处死，动物尸体和组织应消毒后密封收集，标注所含核素种类和产生日期后，送至二层废物库的冰柜内冷冻暂存；废物库拟配备 1 个容积约 800L 的冰柜，冰柜内设置 2 个铅废物箱，用于轮流暂存实验鼠尸体。

实验动物尸体应在废物库的冰柜内冷冻暂存不少于 180 天后（均按含 ^{131}I 的动物尸体考虑，固定以半年为周期实施解控），经检测表面辐射剂量率处于环境本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，方可实施清洁解控，解控的动物尸体返回 5#模式动物中心废物库，按动物中心动物尸体的规定妥善处理。

④ **固废台账记录：**拟建立放射性固废和动物尸体暂存和处置管理台账，详细记录放射性固体废物、实验动物尸体的废物种类、所含核素名称、重量、废物暂存的起始日期、责任人员、解控日期和监测结果等信息；

⑤ **过滤器废物：**本项目小动物实验区共有 5 处废气过滤装置，分别为：工作场所主排风管道楼顶的 1 个活性炭过滤器、手套箱独立排风管道楼顶的 1 个活性炭过滤器、动物注射室手套箱的 1 个高效过滤器、动物手术室通风橱的 1 个高效过滤器、动物留观室负压通风柜的 1 个高效过滤器。所有过滤器滤芯每年至少更换 1 次，拆下的废弃滤材应妥善收集，密封包装暂存于二层废物库内。上述 5 个废弃滤材拟按照含 ^{131}I 核素固废进行管理，暂存时间应不少于 180 天后，经监测废弃滤材表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可实施解控并按危险废物处理；

本项目二层小动物实验区放射性固废转移路径见图 10-10。

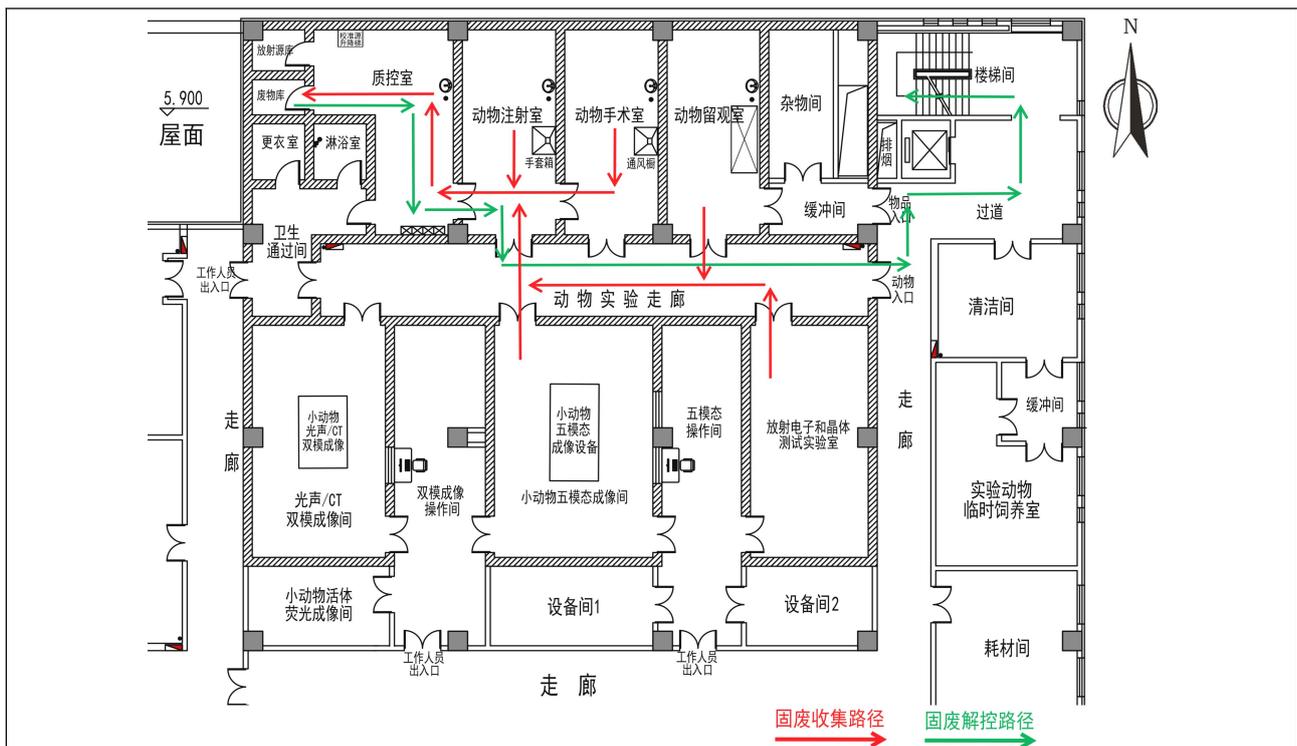


图 10-10 本项目小动物实验区放射性固废转移路径

(二) 放射性废水管理

本项目拟新建 2 套放射性废水衰变系统，1#衰变池用于一层动物 PET 影像区废水的收集（总容积 12m³，4m³/罐×3 罐），2#衰变池用于二层小动物实验区废水的收集（总容积 12m³，4m³/罐×3 罐）。2 套衰变池均位于 1#医学成像楼北侧的绿化带内，距 1#医学成像楼约 6.5m，衰变池正上方对应的绿化带区域拟设置围栏，围栏处设置“禁止停留”的警示语。

(1) 衰变池设计：本项目 2 套废水衰变系统均为埋地式结构，各衰变槽为不锈钢罐。各钢罐之间使用排水管道和电动阀门依次连接，钢罐主体和排水管道均采用 SUS304 不锈钢焊接而成，钢罐内部使用树脂加强防腐效果，罐体的结构坚固、耐酸碱腐蚀，可保证放射性废水无泄漏；

(2) 放射性废液组织路径：本项目一层动物 PET 影像区和二层小动物实验区的排水管道相互独立。所有排水管道均设计有一定坡度，可利用重力自流排水；

本项目一层动物 PET 影像区的排水管道均铺设在地面下方土层内。动物 PET 影像区放射性废水主要包括：各动物观察室、暂养室洗污间产生的动物排泄物、冲厕废水、洗污废水、冲洗拖布废水，分装质控室、注射室的洗手池废水，清洁间产生的洗污废水，以及淋浴室产生的应急废水等。放射性废水经排水管道收集，汇入主管道后排入 1#衰变池。本项目动物 PET 影像区放射性排水路径示意图见图 10-11。

本项目二层小动物实验区的排水管道布设在一层的梁顶下方（吊顶上方），主排水管道穿出控制区的裸漏部分拟外包 5mm 铅皮防护（详见图 10-11 和图 10-12）。小动物实验

区放射性废水主要包括：动物注射室、动物手术室、动物留观室、质控室的工作人员洗手池废水，工作场所的洗污废水，以及淋浴室应急淋浴废水等，放射性废水经排水管道收集，汇入主管道后排入 2#衰变池。本项目小动物区放射性排水路径示意图见图 10-12。

(3) 衰变池的控制和管理：

① 本项目放射性废水衰变池由程控式 PLC 模块程序自动控制，配备远程监控系统，可实时显示液位高度、暂存时间等信息，具备故障自诊断和多状态报警提示功能，可在无人值守状态下实现长时间稳定运行。

② 每套废水衰变系统设置三级衰变钢罐，各衰变罐使用排水管道和电动阀门依次连接，依次使用。为防止液位控制装置失灵导致的废水超位溢流，各衰变罐之间拟设溢流孔，溢流孔设置在衰变罐“液位上限”上方 10cm 处（两套衰变池之间无任何溢流孔）。若衰变池的液位控制系统故障导致电动阀不能自动切换，则超位废液可以自行溢流到另外下一级衰变罐内，避免废液溢出或回流；各衰变罐内置切割式潜水泵，可将固体杂质粉碎成颗粒排出，可防止池内污泥堆积；各衰变罐顶部均设有通气口，可防止罐内超压。

③ 衰变池控制流程：以 1#衰变池为例，衰变系统运行时，废水先流入 1 级衰变罐——待 1 级衰变罐水位达到设计液位后，开启 1 级衰变罐的潜污泵和电动阀，将废水全部泵入 2 级衰变罐，关闭排水潜污泵和电动阀——废水继续流入 1 级衰变罐，在 1 级衰变罐水位达到设计液位前，开启 2 级衰变罐的潜污泵和电动阀，将 2 级衰变罐废水全部泵入 3 级衰变罐，随后关闭潜污泵和电动阀——待 1 级衰变罐水位达到设计液位后，再将 1 级衰变罐废水全部泵入 2 级衰变罐，废水继续流入 1 级衰变罐——当 1 级衰变罐水位再次达到设计液位前，3 级衰变罐内废水已暂存了足够时间，经检测达标后，解控废水从 3 级衰变罐内排出至大成像设施配套的污水处理站；本项目衰变池 3 级衰变罐依据上述流程连续运行，工作场所产生的放射性废水均先排入 1 级衰变罐内，最终均从 3 级衰变罐内实施解控排放。本项目放射性废水暂存和解控排放流程见图 10-13。

(4) 废水暂存和解控排放：本项目一层动物 PET 影像区使用的放射性核素半衰期均小于 24h，放射性废水暂存时间应不低于 30 天后，可直接解控排放，解控废水先排入大成像设施配套的污水处理站，经处理后最终排入市政污水管网。

本项目二层小动物实验区使用的放射性核素中包括 ^{131}I ，放射性废水暂存时间应不低于 180 天（按含 ^{131}I 废水考虑），2#衰变池内放射性废水达到暂存时间后，应委托有 CMA 资质的检测机构对拟排放废水的活度浓度进行检测，拟排放废水中总 β 不大于 10Bq/L、I-131 放射性活度浓度不大于 10Bq/L，方可实施解控排放。解控废水先排入大成像设施配套的污水处理站，经处理后最终排入市政污水管网。

(5) 废水台账记录：本项目实验室拟安排专人负责放射性废水的暂存和解控的管理工作，拟建立放射性废水暂存和解控管理台账，详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息；

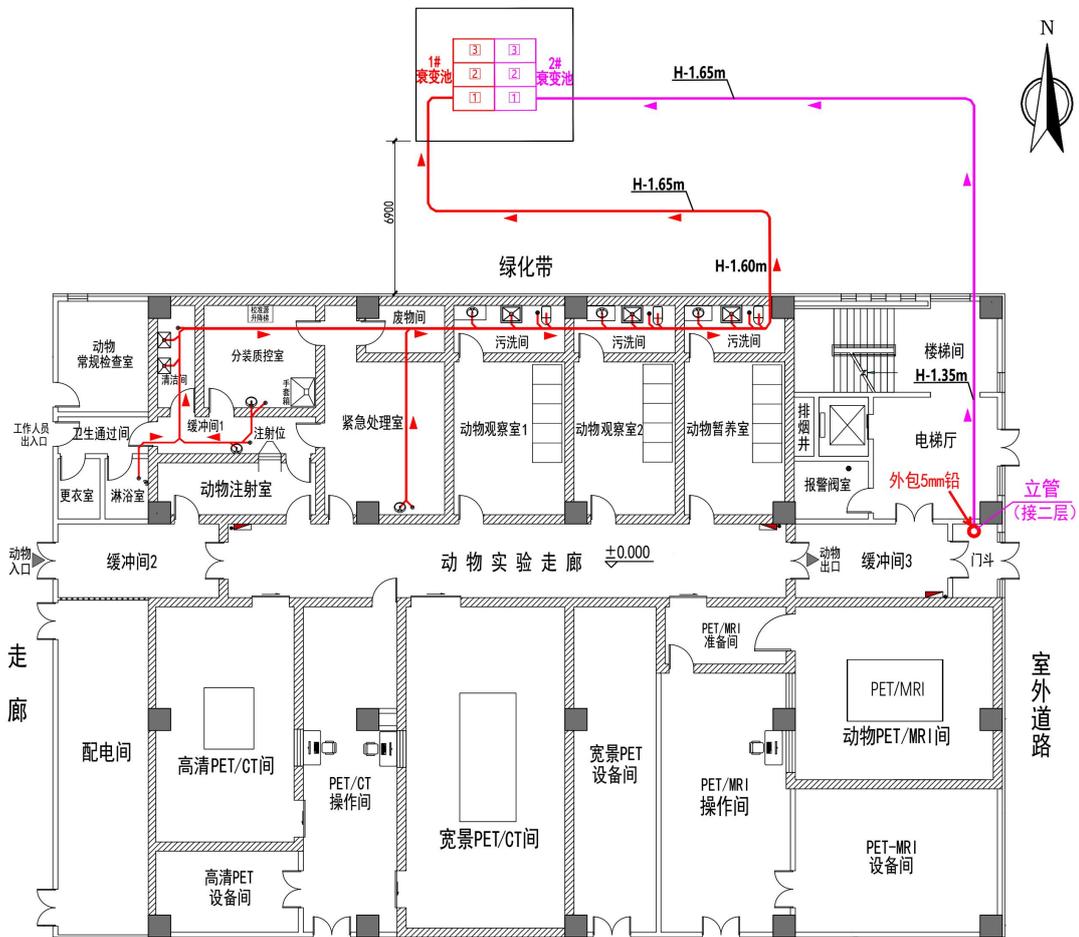


图 10-11 本项目一层放射性排水路径示意图

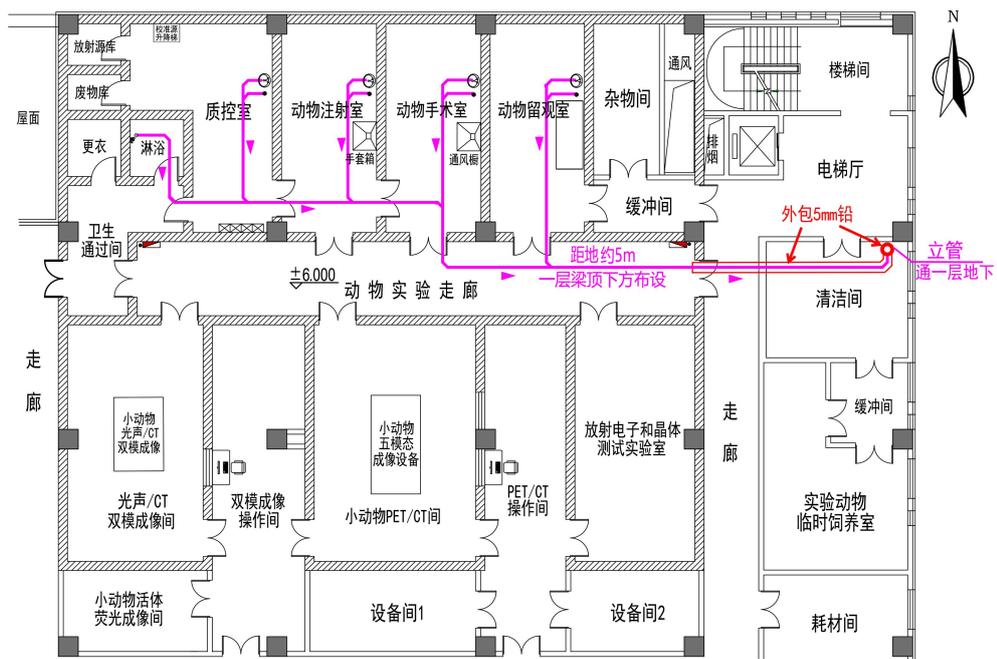


图 10-12 本项目二层放射性排水路径示意图

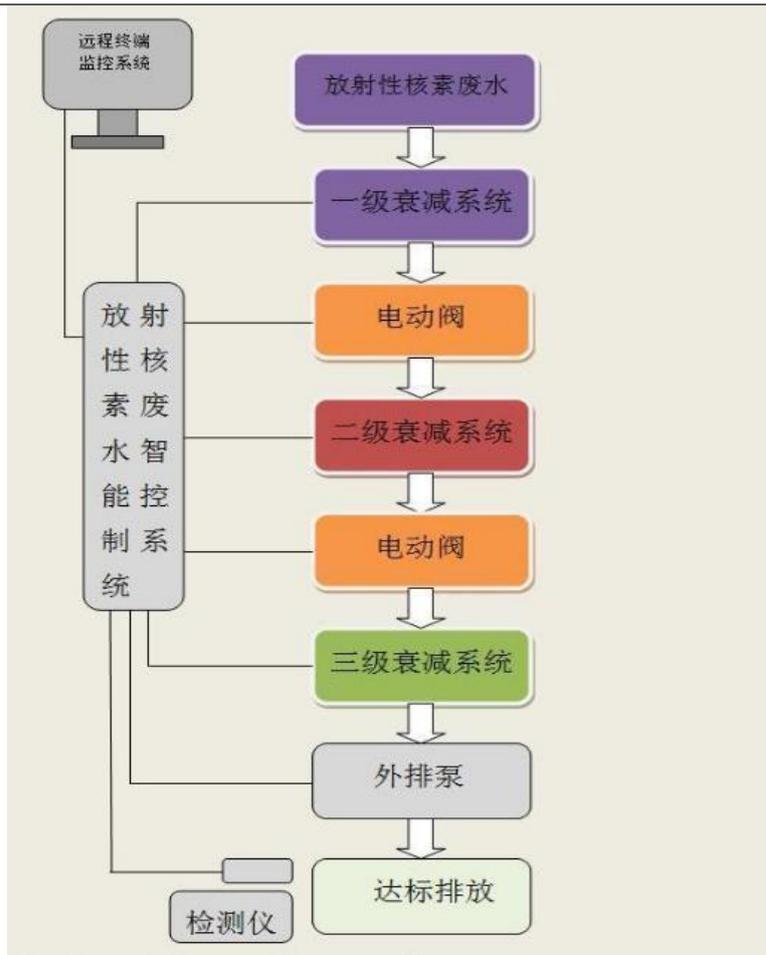


图 10-13 本项目放射性废水暂存和解控排放流程

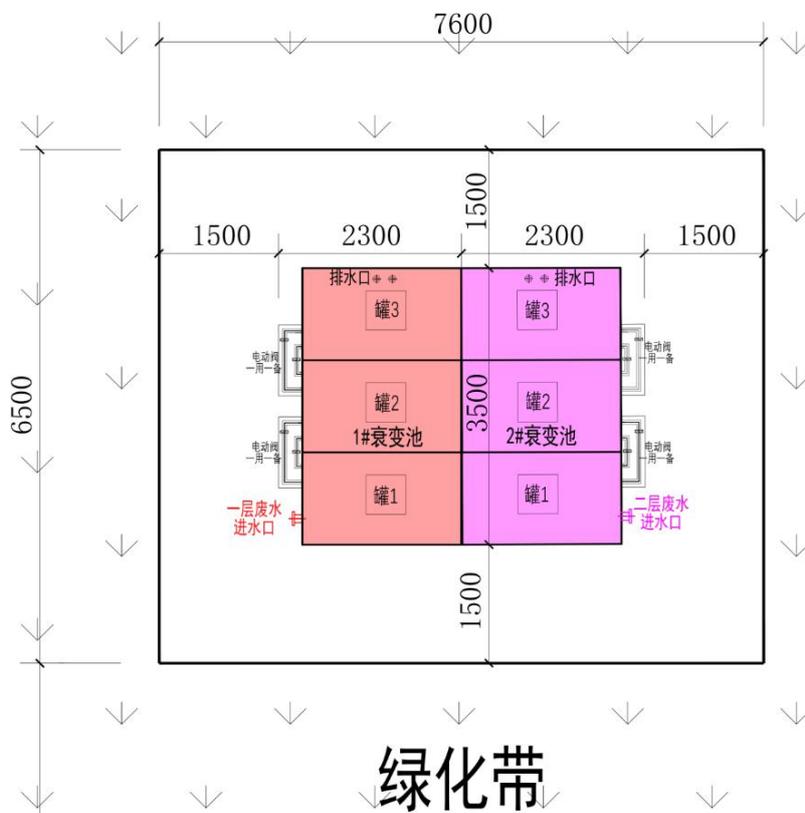


图 10-14 本项目放射性废水衰变池平面布局图

(三) 放射性废气

本项目 1#医学成像楼一层和二层工作场所共设置有 4 条独立的排风系统，包括：一层动物 PET 影像区工作场所设置 1 套独立排风系统、分装质控室手套箱设置 1 条独立排风管道；二层小动物实验区工作场所设置 1 套独立排风系统、动物注射室手套箱设置 1 条独立排风管道。工作场所气流组织按照监督区向控制区的流向设置，拟采取排风量略大于新风量的控制措施，维持各房间负压状态。所有排风口均拟设置止回阀，防止气体倒流。

(一) 动物 PET 影像区

本项目动物 PET 影像区工作场所内拟设置 1 套独立放射性排风系统，在更衣室、淋浴室、分装质控室、动物注射室、清洁间、废物间、紧急处理室、2 间动物观察室（含洗污间）、动物暂养室（含洗污间）、动物实验走廊内以及各 PET 成像机房内均设置有排风口，工作场所废气经汇聚后通过 1 条主排风管道引至 1#医学成像楼的三层楼顶，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤器，废气经活性炭过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m。

分装质控室手套箱拟设置 1 条独立排风管道，手套箱顶部出风口处设置高效过滤器，废气通过 1 条独立排风管道引至 1#医学成像楼的四层楼顶，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤器，手套箱废气经活性炭再次过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m。

(二) 小动物实验区

本项目小动物实验区工作场所内拟设置 1 套独立放射性排风系统，更衣室、淋浴室、废物库、放射源库、质控室、动物注射室、动物手术室、动物留观室、缓冲间、动物实验走廊、各成像间和实验室内均设置有排风口，动物手术室通风橱顶部配备独立排风管（出风口安装高效过滤器），动物留观室负压通风柜顶部配备独立排风管（出风口安装高效过滤器），上述排风管道均汇入 1 条主排风管道，主管道直通 1#医学成像楼的三层楼顶，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤器，废气经活性炭过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m。

动物注射室手套箱拟设置 1 条独立排风管道，手套箱顶部出风口处设置高效过滤器，废气通过 1 条独立排风管道引至 1#医学成像楼的四层楼顶，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤器，手套箱废气经活性炭再次过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m。

(三) 废气过滤装置

本项目排风系统共包括 4 个活性炭过滤器和 4 个高效过滤器（详见图 10-13~10-15）。活性炭过滤器包括：一层场所排风系统楼顶排风口的活性炭过滤器（滤芯重 5kg）、二层场所排风系统楼顶排风口的活性炭过滤器（滤芯重 5kg），以及 2 条手套箱独立排风管道楼顶

排风口的2个活性炭过滤器(滤芯均重2kg);高效过滤器包括:一层手套箱的高效过滤器(滤芯重2kg)、二层动物注射室手套箱的高效过滤器(滤芯重2kg)、二层动物手术室通风橱的高效过滤器(滤芯重2kg)、二层动物留观室负压通风柜的高效过滤器(滤芯重2kg);所有活性炭滤芯和高效过滤器应每年更换1次,拆下来的废气滤材分开收集、密封包装暂存于固废间内,按放射性固体废物进行管理,其中:

① 一层场所排风系统楼顶排风口的活性炭过滤器(滤芯重量5kg)、一层手套箱独立排风管道的高效过滤器(滤芯重量2kg)和楼顶活性炭过滤器(滤芯重量2kg),上述3处废弃滤芯应在一层废物间内暂存不少于30天,经监测滤材表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时,可实施解控并按危险废物处理;

② 二层场所排风系统楼顶排风口的活性炭过滤器(滤芯重量5kg)、动物手术室通风橱的高效过滤器(滤芯重量2kg)、动物留观室负压通风柜的高效过滤器(滤芯重量2kg)、二层动物注射室手套箱独立排风管道的高效过滤器(滤芯重量2kg)和楼顶活性炭过滤器(滤芯重量2kg),上述5处废弃滤材应在二层废物库内暂存不少于180天(按含 ^{131}I 核素的固废进行管理),经监测滤材表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时,可实施解控并按危险废物处理;

本项目一层和二层放射性排风路径示意图详见图10-15和图10-16,1#医学成像楼楼顶排风口位置示意图见图10-17。

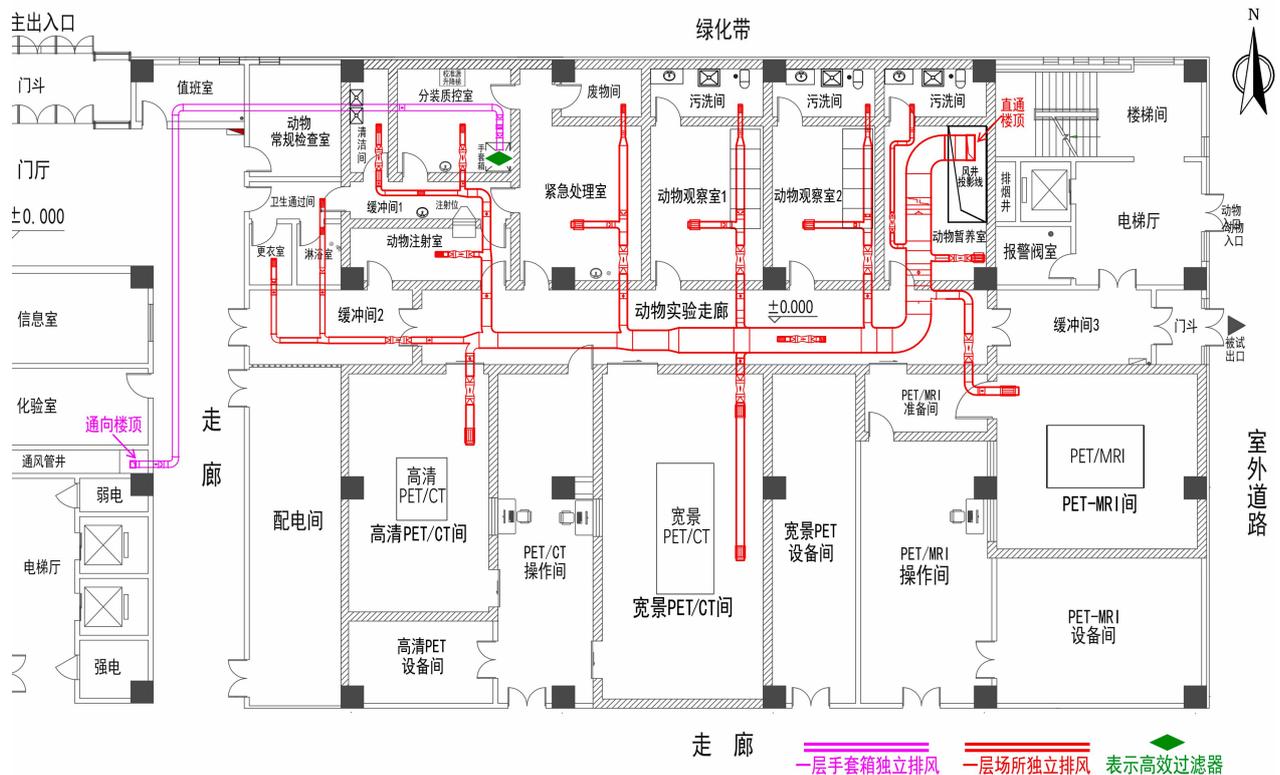


图 10-15 一层工作场所放射性排风路径示意图

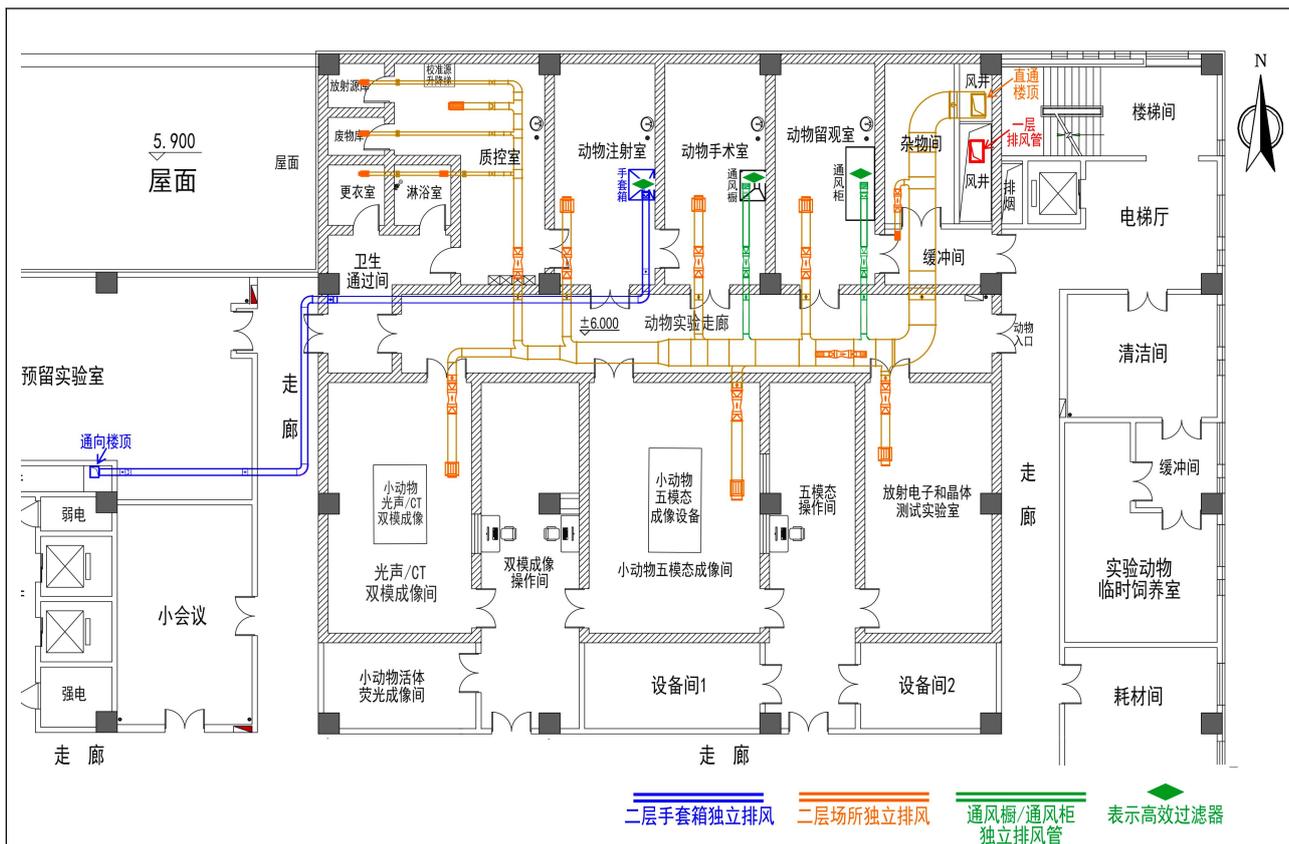


图 10-16 二层工作场所放射性排风路径示意图

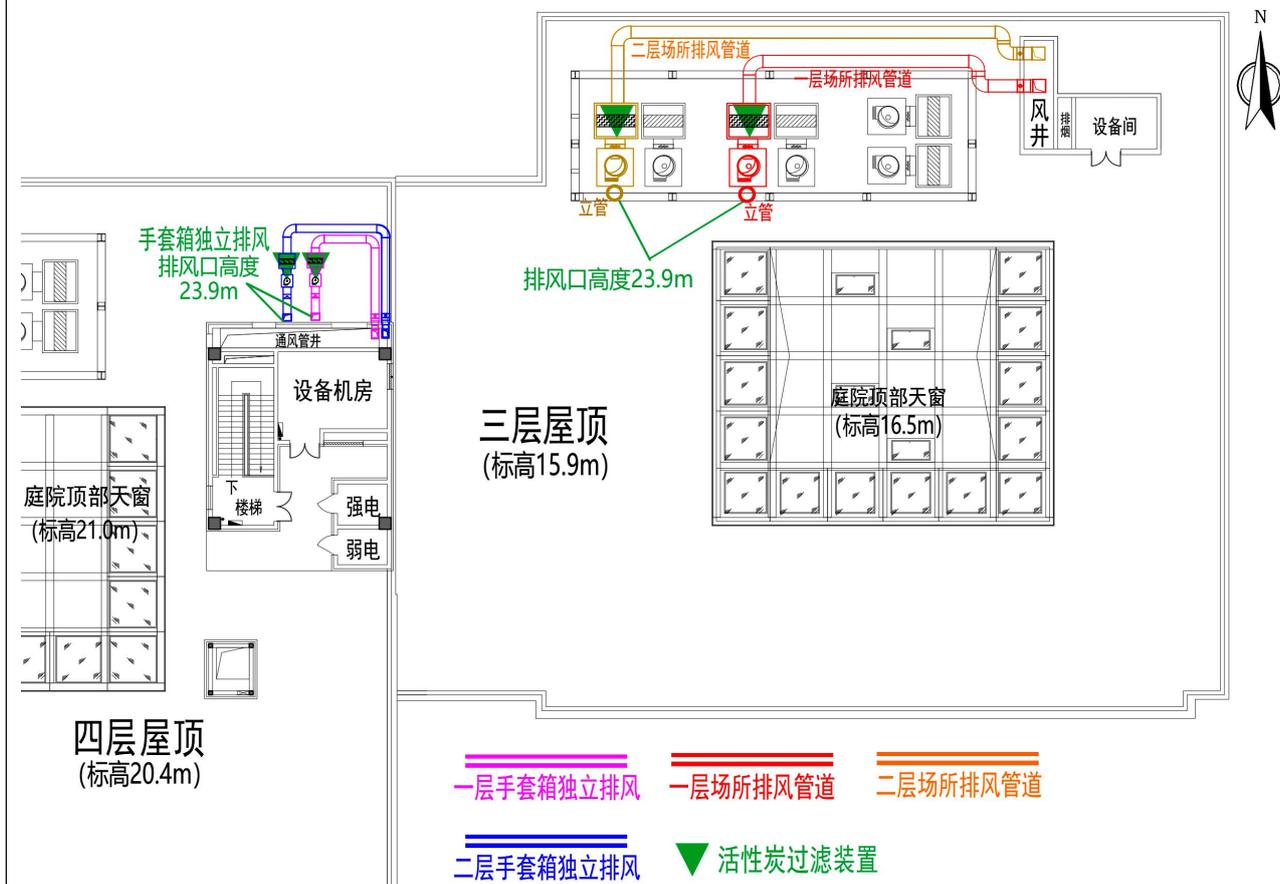


图 10-17 1#医学成像楼楼顶排风口位置示意图

10.2 工作场所辐射安全与防护设施管理

本项目非密封放射性物质工作场所拟设置的辐射安全防护设施对照《中国核与辐射安全管理体系 现场监督检查和执法程序》（2020年版）中“乙级非密封放射性物质操作场所监督检查技术程序”（文件编码：NNSA/HQ-08-JD-IP-006）执行，对照情况见表 10-5。

表 10-5 非密封放射性物质工作场所辐射安全与防护设施设计要求

序号	检查项目	是否设置	备注
1	工作场所功能、设置及分区布局	√	一层工作场所设有放射性药物操作区域、动物观察室、动物暂养室、各 PET 成像间、废物间、洗污间等场所； 二层工作场所设有质控室、动物注射室、动物手术室、动物留观室、各小动物成像间和实验室、放射源库、废物库等场所； 拟将工作场所划分为控制区和监督区进行管理，所有出入口处设门禁装置。
2	场所分区的管控措施及标识	√	各工作场所所有出入口处均设置门禁，控制区、监督区入口门外拟张贴分区管理标识。
3	电离辐射警告标志	√	所有控制区、监督区入口处， 控制区内各房间门外
4	卫生通过间	√	药物操作区域入口处
5	通风系统完整性及效能	√	各工作场所均设有独立的排风系统，工作场所内各房间均设有排风口，楼顶排风管道出口处均设有活性炭过滤装置。 工作场所内的手套箱、通风橱、通风柜均设有高效过滤器和独立排风管。
6	密封箱室	√	拟配备手套箱、通风橱、负压通风柜等
7	屏蔽防护设施	√	各工作场所采取灰砂砖墙体、混凝土楼板、硫酸钡水泥、铅板、铅玻璃等实体屏蔽措施； 工作场所内拟配备铅防护手套箱、通风橱、通风柜、铅防护注射台、铅防护运输容器、铅废物桶、以及个人防护用品等
8	防过热或超压保护	/	/
9	防止放射性液体操作造成污染的措施	√	场所地面和墙面防渗、易去污、无缝隙； 药物操作台面光滑、耐腐蚀、易去污；
10	机械手或其它远距离操作工具	/	/
11	火灾报警仪	√	各工作场所均已配备
12	放射性废水处理系统及标识	√	新建 2 套放射性废水衰变系统，衰变所在区域的上方地面设围栏和警示语；
13	放射性物料与成品暂存场	√	放射性药物和发生器在手套箱内暂存；

		所或设施		校准源在放射源库内暂存；
14		放射性固体废物暂存场所或设施	√	各场所均设有放射性固废暂存间；
15		安保设施	√	工作场所均设置门禁系统、监控系统，源库设防盗门、联网监控、防闯入报警等。
16		防火设备、应急出口	√	场所装修使用不易燃材料，场所内设有灭火器、消防栓、应急逃生指示和应急出口。
17		人员出口污染监测仪	√	共计配备4台表面污染检测仪，其中一层拟配备2台；二层拟配备2台；
18	B 监测设备	固定式辐射监测报警仪	√	共计配备3台固定式辐射监测报警仪； 一层工作场所拟配备1台（4个探头），在动物实验走廊西侧门外、东侧门外、PET/CT操作间、PET/MRI操作间分别设置γ剂量率探头，报警阈值均为2.5μSv/h； 二层工作场所拟配备1台（4个探头），在动物实验走廊西侧门外、东侧门外、多模成像操作间、五模态操作间分别设置γ剂量率探头，报警阈值均为2.5μSv/h； 二层废物库、放射源库区域拟配备1台（2个探头），在废物库防护门外、放射源库防护门外分别设置γ剂量率探头，报警阈值均为2.5μSv/h；
19		固定式或移动式气溶胶取样监测设备	/	/
20		便携式辐射监测仪	√	拟配备2台（一层二层各配1台）；
21		个人剂量计	√	共计17支；
22		个人剂量报警仪	/	/
23	C 防护用品	个人防护用品	√	工作人员防护服、乳胶手套、口罩等； 铅衣、铅围裙、铅围脖、铅眼镜等；
25		去污用品和应急物资	√	拟配备各类应急去污用品和去污试剂；
26	D 防护器材	合适的灭火器材	√	配备足量的干粉灭火器； 动物实验走廊两端均配备消防栓；
27		放射性同位素应急容器	√	拟配备多个铅废物桶

10.3 本项目法规符合情况

10.3.1 与《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

原环保部2011年第18号令《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，本项目与“18号令”要求的对照情况见表10-6。

表 10-6 与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求对照检查情况

安全和防护管理办法要求	本项目情况	符合情况
<p>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。</p>	<p>本项目各辐射工作场所拟实行分区管理，在控制区和监督区出入口门外张贴电离辐射警示标识和中文警示说明，工作场所所有出入口处均设置门禁系统，场所内部拟设置监控系统；本项目各成像机房防护门外均设置电离辐射警示标识和工作状态指示灯，并配备门灯连锁装置；放射源库拟采取防盗门、联网监控和闯入报警等安防措施；工作场所拟配备手套箱、通风橱、转运容器、铅废物桶等防护设施。</p>	<p>落实后符合</p>
<p>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。</p>	<p>北京大学每年均委托有资质单位对所有辐射工作场所开展 1 次辐射水平监测，监测数据均记录存档。 本项目拟利用新增辐射监测设备对工作场所辐射水平和表面污染水平开展自行监测，详细记录监测结果并妥善存档。</p>	<p>落实后符合</p>
<p>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。</p>	<p>北京大学每年 1 月 31 日前均向辐射安全许可证发证机关提交年度评估报告。</p>	<p>符合</p>
<p>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。</p>	<p>北京大学规定所有辐射工作人员上岗前参加辐射安全与防护考核，学校现有的辐射工作人员均已通过辐射安全与防护考核，并取得了合格证书。 本项目拟新增 17 名辐射工作人员，均须通过辐射安全与防护考核后，方可上岗从事辐射工作。</p>	<p>落实后符合</p>
<p>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。</p>	<p>已为所有辐射工作人员配备了个人剂量计，并委托有资质的监测机构，按每季度 1 次的频次开展个人剂量监测工作。</p>	<p>符合</p>
<p>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。</p>	<p>北京大学均委托有资质的单位开展个人剂量监测工作。</p>	<p>符合</p>

10.3.2 与《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

依据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（原环保部“3 号令”，2021 年 1 月 4 日生态环境部令第 20 号修正）第十六条的规定，对使用生产、销售、使用放射性同位素和射线装置的单位提出了具体条件，本项目具备的条件与法规要求的对照检查见表 10-7。

表 10-7 与《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求对照检查情况

应具备的条件	本项目情况	是否符合
使用放射性同位素、射线装置的单位，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作。	北京大学已成立辐射防护领导小组及其办公室，负责全校的辐射安全与环境保护管理工作，已设有专职技术人员负责全校的辐射安全与防护的日常管理工作。	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。	北京大学现有的辐射工作人员均已通过辐射安全与防护考核，并取得了合格证书。本项目拟新增的 17 名辐射工作人员须通过辐射安全与防护考核后，上岗从事辐射工作。	落实后符合
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。	设有符合要求的放射源库，拟采取防盗门、联网监控和红外闯入报警等安防措施，落实放射性同位素的安全保卫措施。	落实后符合
放射性同位素与射线装置使用场所所有防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	本项目各辐射工作场所拟实行分区管理，在控制区和监督区出入口门外张贴电离辐射警示标识和中文警示说明，工作场所所有出入口处均设置门禁系统，场所内部拟设置监控系统；本项目各成像机房防护门外均设置电离辐射警示标识和工作状态指示灯，并配备门灯联锁装置；放射源库拟采取防盗门、联网监控和闯入报警等安防措施；工作场所拟配备手套箱、通风橱、转运容器、铅废物桶等防护设施。	落实后符合
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。	本项目拟新增 3 台固定式辐射监测报警仪、2 台便携式 X-γ 剂量率仪和 4 台表面污染监测仪，可满足本项目的监测要求。	落实后符合
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。	拟新增本项目实验室的辐射安全与防护管理制度、岗位职责、安全保卫制度、个人剂量管理制度、监测方案、放射性药品使用管理规定、放射源管理规定、台账管理制度、放射性废物管理规定、实验动物管理规定等各项规章制度，建立放射性药品管理台账、放射性固废管理台账、放射性废水管理台账、实验动物管理台账等，确保所有辐射工作有章可循。	落实后符合
产生放射性废气、废液、固体废物的，	本项目放射性药物操作均在手套箱内进行，手	落实后

<p>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。</p>	<p>套箱、通风橱等出风口处均设置高效过滤器，各工作场所设置独立排风管道，废气引至医学成像楼顶，经活性炭过滤后排放；</p> <p>本项目拟新建2套放射性废水衰变池系统：一层工作场所放射性废水经专用排水管道排入1#衰变池；二层工作场所放射性废水经专用排水管道排入2#衰变池；废水排放前均委托有资质检测机构检测达标后解控排放；</p> <p>本项目放射性固体废物、动物废物拟分类、密封收集，放入铅制废物桶，在放射性固废间内暂存，暂存时间满足要求并经自行检测达标后，作为医疗废物或危险废物处置；</p> <p>本项目产生的放射性动物尸体拟在废物库冰柜内冷冻暂存，暂存时间满足要求并经自行检测达标后，返回模式动物中心废物库按动物尸体的规定处置；</p>	<p>符合</p>
<p>有完善的辐射事故应急措施。</p>	<p>北京大学拟在现有辐射安全事故应急预案的基础上，根据本项目的实际内容，进一步完善应急预案，并将本项目工作场所纳入应急预案进行管理。</p>	<p>落实后符合</p>

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

本项目在建设阶段和设备安装阶段无辐射产生，不会对周围环境产生辐射影响。

本项目建设过程中，施工活动对环境的影响主要是产生的噪声、粉尘以及振动等，为降低对周围环境的影响，在施工过程中将严格遵守施工安全相关规定，并采取降噪、防尘措施，合理安排施工时间，尽量将产生振动较大的工程安排在下班或节假日进行。本项目设备安装由设备厂家专业安装人员完成，设备安装过程中严格限制无关人员停留，在机房内进行安装活动，对公众和周围环境的影响较小，故不再进行详细评价。

11.2 运行阶段对环境的影响

12.2.1 场所选址和布局合理性分析

（一）场所选址的合理性分析

本项目拟建辐射工作场所均位于多模态跨尺度生物学成像设施 1#医学成像楼内，1#医学成像楼周围 50m 范围内主要为楼外道路、绿化区和 2#细胞成像楼等，周边无居民楼、学校等人员密集场所和环境敏感目标。

本项目辐射工作场所选址相对独立，与周边非放射性工作场所有明确的分界隔离。动物 PET 影像区和小动物实验区工作场所均设有单独的工作人员出入口和动物出入口，所有出入口处均设有门禁，场所内部均设有相对独立的人流、物流通道。本项目小动物实验区楼上主要为各超声实验室和室内庭院，小动物实验区屋顶为 200mm 混凝土楼板，本项目增加 4mm 铅板加强屋顶的屏蔽防护。由于小动物实验放射性核素使用量少，对周围区域的辐射影响较小，在强化了屋顶的实体屏蔽措施后，预计本项目动物实验对三层各超声实验室的辐射影响较小。本项目工作场所的 3 个排风口均设置在 1#医学成像楼楼顶，排风口朝向天空，周边无高层建筑，排风口距离最近建筑物的距离均不低于 50m。综上，本项目的选址各防护设计已考虑了周围区域的辐射安全与防护，总体认为项目选址合理。

（二）场所布局的合理性分析

本项目动物 PET 影像区和小动物实验区分别位于 1#医学成像楼的一层和二层，2 个场所独立布置，有明确的监督区和控制区划分，各工作场所的工艺流程连续完整、相互独立。

（1）动物 PET 影像区

本项目动物 PET 影像区工作场所拟实行分区管理，在控制区和监督区的主要出入口均

设置门禁，控制区的布置相对集中：分装质控室、动物注射室和废物间均集中布置在场所西北角区域，科研人员出入口处设有卫生通过间、更衣室和淋浴室；各动物观察室、动物暂养室布置在场所的东北角区域，各动物用房内均设有专用的洗物间；各 PET 扫描间均布置在动物实验走廊的南侧区域，与药物操作区、动物用房分开布置；

工作场所设置有单独的工作人员出入口和动物出入口，所有出入口处均设有门禁，工作场所内部科研人员、实验动物、放射性药物和放射性废物路径的设计均较为合理。本项目动物 PET 影像区的各功能区布局明确，有利于防止交叉污染和科研实验的开展。

(2) 小动物实验区

本项目小动物实验区工作场所拟实行分区管理，在控制区和监督区的主要出入口均安装门禁系统，可防止无关人员进入实验场所。工作场所内部各功能区布局合理，其中：动物注射室、动物手术室、废物库等高污染区域均布置在动物实验走廊北侧，科研人员出入口处设有卫生通过间、更衣室和淋浴室；各小动物成像间和实验室均布置在动物实验走廊南侧，有利于防止交叉污染和动物实验工作的开展；废物库和放射源库均位于工作场所的西北角，可将放射性废物、放射源贮存期间对工作人员和周围公众的影响降到最低。

小动物实验区设置了相对独立的科研人员、实验动物路径，其中：在工作场所区域的所有出入口处均设有门禁系统，设置有注射前实验动物入口。注射后实验动物、动物组织器官的运输均使用专用的铅防护动物转运容器，且运输路径较为短捷；放射性药物和放射性废物的运输路径的设置均较为合理。

综上，本项目 2 处非密封放射性物质科研场所的控制区、监督区划分明确，各功能区的布置相对独立，科研人员、实验动物、放射性药物和放射性废物等路径设置较为合理，放射性药物、注射后实验动物、放射性废物运送通道均较为短捷；因此，工作场所的布局已考虑了本项目科研实验的特点和周边区域的辐射安全与防护，有利于科研实验工作开展，可防止交叉污染，避免工作人员和公众受到不必要的照射。总体认为本项目工作场所布局较为合理。

11.2.2 动物 PET 影像区辐射环境影响分析

11.2.2.1 场所运行规划

本项目动物 PET 影像区工作场所年计划运行 40 周，每周 5 个工作日，年最多运行时间不超过 200 天，拟使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 共 5 种放射性核素开展动物 PET 成像研究，拟使用的动物均为 SPF 级实验猴。本项目动物 PET 影像区放射性核素的使用情况详见表 11-1。

表 11-1 本项目动物 PET 影像区放射性核素的使用情况

序号	核素种类	每只最大注射量 (Bq)	每日最多注射次数	年最大使用天数* (天)	日最大操作量 (Bq)	用途
1	¹⁸ F	1.48E+08	6	200	8.88E+08	动物 PET 成像研究
2	⁶⁸ Ga	7.40E+07	2	100	1.48E+08	
3	⁶⁴ Cu	7.40E+07	2	100	1.48E+08	
4	⁸² Rb	1.48E+08	2	100	1.48E+09*	
5	⁴⁴ Sc	3.70E+07	2	100	7.40E+07	
6	⁸² Sr	/	/	/	7.40E+08	淋洗 ⁸² Rb

注*：（1）主要使用 ¹⁸F 核素，每周使用 5 天，年最多使用 200 天；⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、⁸²Rb、⁴⁴Sc 四种核素每日最多使用其中的 2 种，每种核素每天最多使用 2 次，年最多使用 100 天；
（2）⁸²Rb 每日最多淋洗 2 次，表中 ⁸²Rb 的日最大操作量保守取 ⁸²Sr-⁸²Rb 发生器最大活度的 2 倍。

本项目动物 PET 影像区每日药物注射次数不超过 10 次，其中 ¹⁸F 药物最多注射 6 次，⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、⁸²Rb、⁴⁴Sc 药物共计注射不超过 4 次；同时用于实验的猴子数量不超过 10 只，每只实验猴每日只接受 1 次药物注射。

本项目动物 PET 影像区每日最多开展 10 次 PET 显像实验，其中：宽景 PET/CT 显像实验每日最多开展 4 次，显像扫描时间不超过 15min/次；高清 PET/CT 显像实验每日最多开展 3 次，显像扫描时间不超过 15min/次；PET/MRI 显像实验每日最多开展 3 次，显像扫描时间平均 40min/次。

11.2.2.2 附加剂量率估算方法

在进行工作场所周围附加剂量率估算时，将放射性药物、注射后实验动物近似作为点源（药液和实验动物均保守视为裸源），依照辐射剂量率和距离成平方反比衰减的规律，同时考虑墙壁、防护门窗的屏蔽作用，计算工作场所周围各关注点的附加剂量率，然后结合人员受照时间，估算职业人员和公众的年受照剂量。

（1）附加剂量率估算公式参考《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中附录 I 中式（I.1），计算公式见式（11-1）：

$$H = \frac{A \times \Gamma}{r^2} \cdot 10^{-x/TVL} \quad (11-1)$$

式中： H ：屏蔽体外关注点的附加剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

A ：放射性核素的活度， MBq ；

Γ ：对应核素的裸源周围剂量当量率常数， $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{MBq} \cdot \text{h})$ ，见表 11-2；

r ：源项中心到关注点的距离， m ；

x ：屏蔽层厚度， mm ；

TVL: 对应屏蔽材料的十分之一值层厚度, mm。

本项目放射性核素计算参数选择详见表 11-2,

表 11-2 本项目动物 PET 影像区放射性核素计算参数

核素	半衰期	单次最大用量 (Bq)	裸源周围剂量当量率常数* $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距裸源 1m 处剂量率 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	TVL 值厚度* (mm)	
					铅	混凝土
^{18}F	109.8min	1.48E+08	0.143	21.2	16.6	176
^{68}Ga	67.7min	7.40E+07	0.134	9.92	17	190
^{64}Cu	12.7h	7.40E+07	0.029	2.15	17	190
^{82}Rb	76s	1.48E+08	0.159	23.5	19.9	218
^{44}Sc	3.97h	3.70E+07	0.2776	10.3	33.2	290

注*: (1) ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 的裸源周围剂量当量率常数取自《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)表 H.1, ^{44}Sc 的裸源周围剂量当量率常数取自《辐射安全手册》表 6.2;

(2) ^{18}F 的 TVL 值取自《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)表 I.1; ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 的 TVL 值取自《放射性核素和辐射防护数据手册》; ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 的 TVL 取值参考《辐射安全手册》和《高等电离辐射防护教程》P93、附表 7 和附表 9;

本项目动物 PET 影像区主要使用 ^{18}F 核素, 通过表 11-2 的数据可知, ^{18}F 周围剂量当量率较高且使用量最大, 对工作场所和人员造成的辐射影响最大, 因此本评价须对 ^{18}F 核素的辐射环境影响进行分析。

^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 四种金属正电子核素每天只使用其中 2 种, 其中 ^{44}Sc 发射的 γ 射线能量最高, 除正负电子湮灭产生 511keV 的 γ 射线外, 主要还发射 1157keV 的 γ 射线(强度 99.9%), γ 射线穿透能力明显强于其他核素。通过表 11-2 的数据可知, ^{44}Sc 核素周围剂量当量率和 TVL 数值均大于 ^{68}Ga 和 ^{64}Cu 核素, ^{82}Rb 的周围剂量当量率虽然比 ^{44}Sc 大, 但 ^{82}Rb 核素衰变极快(半衰期仅 76s), 对工作场所和周围人员造成的辐射影响远小于 ^{44}Sc 等其他核素。因此, 本评价保守选取 ^{44}Sc 代替 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 进行辐射环境影响分析。

综合上述分析, 本评价保守选取辐射环境影响最大的 ^{18}F 和 ^{44}Sc 两种核素进行辐射环境影响分析(按 ^{18}F 每日使用 6 次、 ^{44}Sc 每日使用 4 次进行分析)。此外, 在手套箱内使用发生器淋洗 ^{82}Rb 核素时的操作活度略大, 因此对 ^{82}Rb 操作期间对工作场所和工作人员辐射影响也给予一定考虑。

(2) 职业人员和公众的年受照剂量估算公式见式(11-2):

$$E = \dot{H} \times T \times t \quad (11-2)$$

式中: E : 人员年有效剂量, μSv ;

H : 关注点处的附加剂量率, $\mu\text{Sv}/\text{h}$;

T : 人员的居留因子;

t : 年受照时间, h/a;

11.2.2.3 工作场所附加剂量率的计算

(一) 手套箱外附加剂量率分析

(1) 药物贮存: 本项目外购的放射性药物均密闭存放于 30mmPb 药物贮存铅罐内, 并暂存在分装质控室 50mmPb 的手套箱内。 ^{18}F 的最大注射量为 148MBq/只, 每日最多注射 6 次, 日最大用量为 888MBq, 每日送药 1 次, 日送药量保守按 1800MBq 计算; 其他核素每日总计使用 4 次(均以 ^{44}Sc 计算), ^{44}Sc 的最大注射量为 37MBq/只, 日最大用量为 148MBq, 每日送药 1 次, 日最大送药量按 148MBq 计算。

(2) 药物分装: 本项目放射性药物的分装均在 50mmPb 手套箱内进行, 每次仅分装 1 次的注射量, 每次分装最多只有 148MBq 的 ^{18}F 药液或 37MBq 的 ^{44}Sc 药液在铅罐外(其余药物都在铅罐内), 工作人员的操作距离按 0.6m 计算; 考虑分装期间药物铅罐盖处于打开状态时(即药物正上方无铅罐屏蔽)手套箱顶部的附加剂量率。

(3) ^{82}Rb 淋洗标记: 本项目 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器(最大规格 20mCi)贮存在分装质控室手套箱内, ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器产品自带屏蔽体, 再经过不低于 50mmPb 手套箱屏蔽后, 则发生器贮存期间手套箱周围剂量率可忽略不计; 工作人员在手套箱内操作 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器时, 假设所有 ^{82}Rb 核素都被淋洗出来(不超过 740MBq), 工作人员操作距离按 0.6m 计算;

根据上述源项分析, 本项目动物 PET 影像区手套箱外附加剂量率计算结果见表 11-3。

表 11-3 本项目动物 PET 影像区手套箱外附加剂量率估算结果

项目	计算位置	源项 (MBq)		距离 (m)	屏蔽厚度	衰减因子	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率叠加 ($\mu\text{Sv/h}$)
药物贮存	手套箱正面 30cm 处	^{18}F	1800	0.8	30mmPb+50mmPb	1.52E-05	6.11E-03	2.56E-01
		^{44}Sc	148			3.89E-03	2.50E-01	
	手套箱侧面 30cm 处	^{18}F	1800	0.8	30mmPb+50mmPb	1.52E-05	6.11E-03	2.56E-01
		^{44}Sc	148			3.89E-03	2.50E-01	
	手套箱顶部 30cm 处	^{18}F	1800	1.0	30mmPb+50mmPb	1.52E-05	3.91E-03	1.64E-01
		^{44}Sc	148			3.89E-03	1.60E-01	
药物分装	手套箱正面 人员操作位	^{18}F	148	0.6	50mmPb	9.73E-04	5.72E-02	1.14E+00*
		^{44}Sc	37			3.12E-02	8.90E-01	
	手套箱侧面 30cm 处	^{18}F	148	0.8	50mmPb	9.73E-04	3.22E-02	7.56E-01*
		^{44}Sc	37			3.12E-02	5.00E-01	
	手套箱顶部 30cm 处 (源罐开启)	^{18}F	1800	1.0	50mmPb	9.73E-04	2.50E-01	1.53E+00
		^{44}Sc	148			3.12E-02	1.28E+00	

82Rb 淋洗标记	手套箱正面 人员操作位	82Rb	740	0.6	50mmPb	3.07E-03	1.00E+00	1.26E+00*
	手套箱侧面 30cm 处	82Rb	740	0.8	50mmPb	3.07E-03	5.64E-01	8.20E-01*
	手套箱顶部 30cm 处	82Rb	740	1.0	50mmPb	3.07E-03	3.61E-01	5.25E-01*
注*：药物分装和淋洗标记期间，保守考虑药物贮存的剂量率叠加。								

由表 11-3 的估算结果可知，在手套箱内贮存药物和操作药物期间，手套箱外表面 30cm 处和人员操作位处的周围剂量当量率满足小于 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制要求。

(二) 工作场所各房间周围附加剂量率计算

(1) 剂量率估算源项

保守将所有注射后的实验猴视为裸源，根据表 11-2 可知，注射 148MBq ¹⁸F 的实验猴 1m 处剂量率不超过 21.2 μ Sv/h，注射 37MBq ⁴⁴Sc 的实验猴 1m 处剂量率不超过 10.3 μ Sv/h；

本项目动物 PET 影像区每日注射次数不超过 10 次，其中 ¹⁸F 药物最多注射 6 次，其他核素总计注射 4 次（保守均以 ⁴⁴Sc 计算），每只实验猴每日只接受 1 次药物注射，同时用于实验的实验猴数量不超过 10 只，本项目动物观察室 1 和动物观察室 2 内各放置 5 个猴笼，注射后实验猴均在动物观察室内进行成像前观察。因此，在计算各动物观察室周围附加剂量率时，考虑 5 只注射后实验猴同时观察的辐射影响，保守将 5 只实验猴整体视为 1 个裸源，每间动物观察室按 3 只 ¹⁸F 实验猴和 2 只 ⁴⁴Sc 实验猴进行计算；

每批实验猴（最多 10 只）使用 1 个月后再不再使用，并于第二天早上转移至动物暂养室，此时实验猴体内放射性核素经过十几小时衰变，残余活度已大大降低，在计算动物暂养室周围附加剂量率时，距离实验猴 1m 处剂量率保守按降低 1 个数量级进行计算。

(2) 关注点选取

参考 AAPM108 号报告给出关注点选取原则，并结合本项目情况：本次评价工作场所四周的关注点位置取各房间四周屏蔽墙、防护门（窗）外 30cm 处，楼上关注点位置取地面上方 30cm 处。本项目动物 PET 影像区的各房间净高均为 5.7m，将放射性药物和注射后实验动物均视为点源（裸源），点源的平均高度取 1m。此外，在距离较远的公众长居留场所处也设置有关关注点。本项目工作场所周围关注点示意图详见图 11-1。

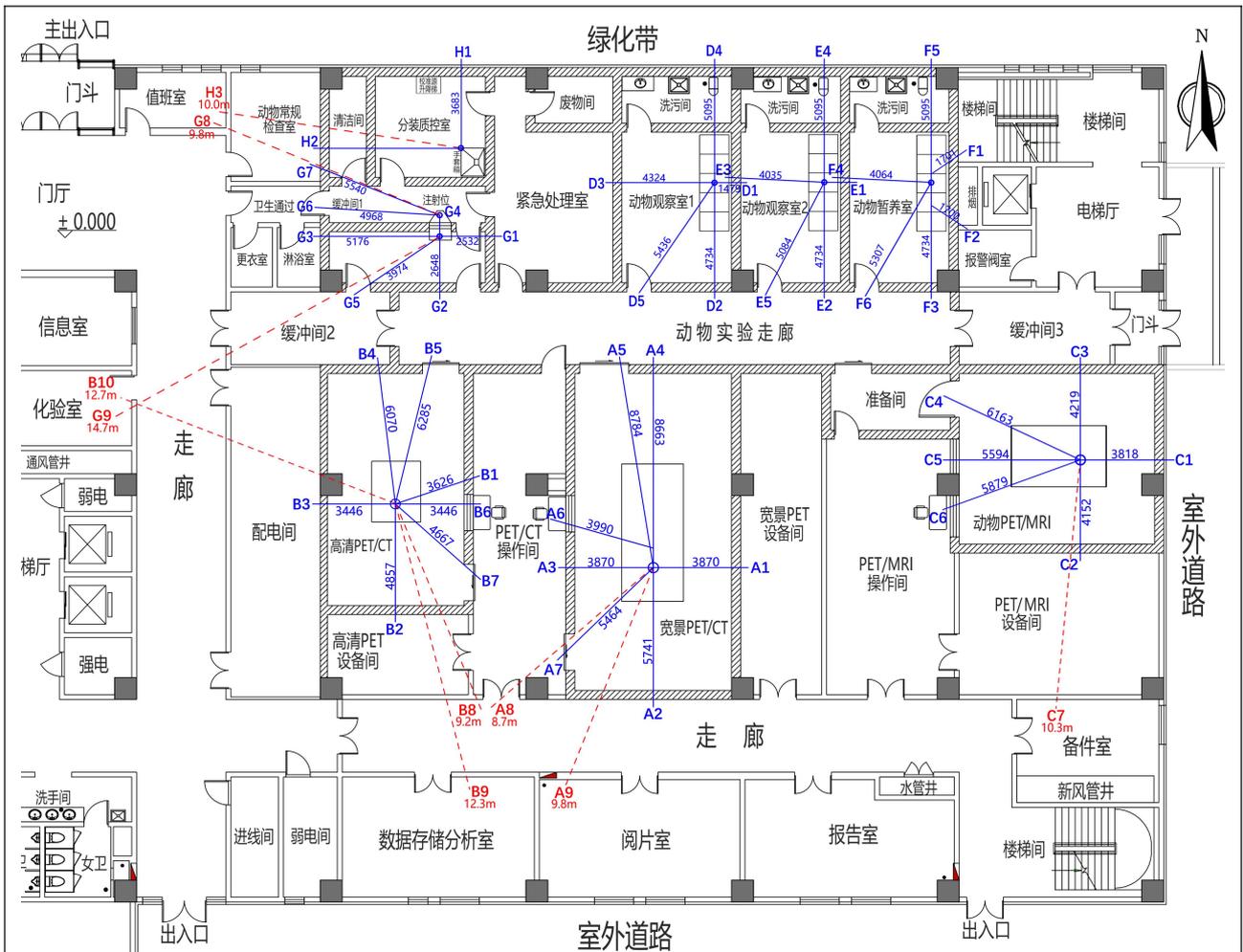


图 11-1 本项目动物 PET 影像区工作场所周围关注点示意图

(3) 工作场所周围附加剂量率计算结果

根据上述源项和公式 (11-1)，本项目动物 PET 影像区周围各关注点处的附加剂量率估算结果见表 11-4。

表 11-4 本项目动物 PET 影像区周围各关注点附加剂量率估算结果

关注点位置		源项	距离 (m)	屏蔽材料与厚度*	衰减因子	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	所处区域
宽景 PET/CT 间 (A)	A1 东墙外设备间	1 只 ^{18}F 实验猴 ($21.2\mu\text{Sv/h}$)	3.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	$1.78\text{E-}02$	$2.48\text{E-}02$	监督区
	A2 南墙外走廊		5.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	$1.78\text{E-}02$	$1.16\text{E-}02$	普通场所
	A3 西墙 PET/CT 操作间		3.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	$1.78\text{E-}02$	$2.48\text{E-}02$	监督区
	A4 北墙动物实验走廊		8.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	$1.78\text{E-}02$	$4.99\text{E-}03$	控制区
	A5 机房防护门外		8.8	8mmPb	$3.30\text{E-}01$	$9.03\text{E-}02$	控制区
	A6 观察窗外		4.0	8mmPb	$3.30\text{E-}01$	$4.37\text{E-}01$	监督区
	A7 操作间防护门外		5.5	8mmPb	$3.30\text{E-}01$	$2.31\text{E-}01$	监督区
	A上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	$4.19\text{E-}02$	$3.29\text{E-}02$	监督区

宽景 PET/CT 间 (A)	A8 操作间南侧走廊	1 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (10.3μSv/h)	8.7	8mmPb	3.30E-01	9.24E-02	普通场所
	A9 南侧阅片室		9.8	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.93E-03	普通场所
	A1 东墙外设备间		3.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	6.15E-02	监督区
	A2 南墙外走廊		5.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	2.88E-02	普通场所
	A3 西墙 PET/CT 操作间		4.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	5.84E-02	监督区
	A4 北墙动物实验走廊		8.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	1.24E-02	控制区
	A5 机房防护门外		8.8	8mmPb	5.74E-01	7.63E-02	控制区
	A6 观察窗外		3.9	8mmPb	5.74E-01	3.87E-01	监督区
	A7 操作间防护门外		5.5	8mmPb	5.74E-01	1.95E-01	监督区
	A _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.55E-01	5.90E-02	监督区
	A8 操作间南侧走廊		8.7	8mmPb	5.74E-01	7.81E-02	普通场所
	A9 南侧阅片室		9.8	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	9.74E-03	普通场所
高清 PET/CT 间 (B)	B1 东墙 PET/CT 操作间	1 只 ¹⁸ F 实验猴 (21.2μSv/h)	3.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.91E-02	监督区
	B2 南墙外设备间		4.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.57E-02	监督区
	B3 西墙外配电间		3.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	3.26E-02	监督区
	B4 北墙外缓冲间 2		6.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.01E-02	监督区
	B5 机房防护门外		6.3	8mmPb	3.30E-01	1.76E-01	控制区
	B6 观察窗外		3.4	8mmPb	3.30E-01	6.05E-01	监督区
	B7 操作间防护门外		4.7	8mmPb	3.30E-01	3.17E-01	监督区
	B _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	4.19E-02	3.29E-02	控制区
	B8 操作间南侧走廊		9.2	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	4.46E-03	普通场所
	B9 南侧数据分析室		12.3	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.49E-03	普通场所
B10 西侧化验室	12.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.34E-03	普通场所		
高清 PET/CT 间 (B)	B1 东墙 PET/CT 操作间	1 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (10.3μSv/h)	3.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	7.22E-02	监督区
	B2 南墙外设备间		4.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	3.90E-02	监督区
	B3 西墙外配电间		3.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	8.09E-02	监督区
	B4 北墙外缓冲间 2		6.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	2.51E-02	监督区
	B5 机房防护门外		6.3	8mmPb	5.74E-01	1.49E-01	控制区
	B6 观察窗外		3.4	8mmPb	5.74E-01	5.11E-01	监督区

	B7 操作间防护门外		4.7	8mmPb	5.74E-01	2.68E-01	监督区
	B _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.55E-01	5.90E-02	控制区
	B8 操作间南侧走廊		9.2	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	1.10E-02	普通场所
	B9 南侧数据分析室		12.3	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	6.18E-03	普通场所
	B10 西侧化验室		12.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	5.80E-03	普通场所
PET/MRI 机房 (C)	C1 东墙外室外道路	1 只 ¹⁸ F 实验猴 (21.2μSv/h)	3.8	236mm+108mm 混凝土	1.11E-02	1.63E-02	普通场所
	C2 南墙外设备间		4.2	236mm+108mm 混凝土	1.11E-02	1.33E-02	监督区
	C3 北墙外缓冲间 3		4.2	236mm+108mm 混凝土	1.11E-02	1.33E-02	监督区
	C4 防护门外准备间		6.2	8mmPb	3.30E-01	1.82E-01	控制区
	C5 观察窗外		5.6	8mmPb	3.30E-01	2.33E-01	监督区
	C6 西墙外人员操作位		5.9	8mmPb	3.30E-01	2.01E-01	监督区
	C _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm+80mm 混凝土	2.57E-02	2.01E-02	普通场所
	C7 南侧备件室		10.3	236mm+108mm 混凝土	1.11E-02	2.22E-03	普通场所
PET/MRI 机房 (C)	C1 东墙外室外道路	1 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (10.3μSv/h)	3.8	236mm+108mm 混凝土	6.51E-02	4.64E-02	普通场所
	C2 南墙外设备间		4.2	236mm+108mm 混凝土	6.51E-02	3.80E-02	监督区
	C3 北墙外缓冲间 3		4.2	236mm+108mm 混凝土	6.51E-02	3.80E-02	监督区
	C4 防护门外准备间		6.2	8mmPb	5.74E-01	1.54E-01	控制区
	C5 观察窗外		5.6	8mmPb	5.74E-01	1.89E-01	监督区
	C6 西墙外人员操作位		5.9	8mmPb	5.74E-01	1.70E-01	监督区
	C _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm+80mm 混凝土	1.08E-01	4.12E-02	普通场所
	C7 南侧备件室		10.3	236mm+108mm 混凝土	6.51E-02	6.32E-03	普通场所
动物观察 室 1 (D)	D1 东墙外动物观察室 2	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6μSv/h)	2.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	7.48E-01	控制区
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6μSv/h)	2.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02		
	D2 南墙外动物实验走廊	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6μSv/h)	4.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.36E-01	控制区
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6μSv/h)	4.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02		
	D3 西墙外紧急处理室	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6μSv/h)	3.8	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.07E-01	控制区
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6μSv/h)	3.8	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02		
	D4 北墙外绿化带	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6μSv/h)	5.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.15E-01	普通场所
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6μSv/h)	5.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02		
	D5	3 只 ¹⁸ F 实验猴	5.4	8mmPb	2.78E-01	9.79E-01	控制区

	观察室 1 防护门外	(63.6 μ Sv/h)		(考虑 30°斜射)				
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	5.4	8mmPb (考虑 30°斜射)	5.27E-01			
	D _上 楼上距地 0.3m 处	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6 μ Sv/h)	5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	4.19E-02	2.17E-01	控制区	
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.55E-01			
动物观察 室 2 (E)	E1 东墙外动物暂养室	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6 μ Sv/h)	2.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	7.48E-01	控制区	
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	2.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
	E2 南墙外动物实验走廊	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6 μ Sv/h)	4.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.36E-01	控制区	
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	4.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
	E3 西墙外动物观察室 1	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6 μ Sv/h)	3.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.46E-01	控制区	
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	3.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
	E4 北墙外绿化带	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6 μ Sv/h)	5.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.15E-01	普通场所	
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	5.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
	E5 观察室 2 防护门外	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6 μ Sv/h)	5.4	8mmPb (考虑 30°斜射)	2.78E-01	9.79E-01	控制区	
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	5.4	8mmPb (考虑 30°斜射)	5.27E-01			
	E _上 楼上距地 0.3m 处	3 只 ¹⁸ F 实验猴 (63.6 μ Sv/h)	5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	4.19E-02	2.17E-01	控制区	
		2 只 ⁴⁴ Sc 实验猴 (20.6 μ Sv/h)	5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.55E-01			
	动物暂养室 (F)	F1 东墙外楼梯间	6 只 ¹⁸ F 暂养 (12.7 μ Sv/h)	1.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.08E-01	普通场所
			4 只 ⁴⁴ Sc 暂养 (4.12 μ Sv/h)	1.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02		
F2 东墙外报警阀室		6 只 ¹⁸ F 暂养 (12.7 μ Sv/h)	1.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.08E-01	普通场所	
		4 只 ⁴⁴ Sc 暂养 (4.12 μ Sv/h)	1.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
F3 南墙外动物实验走廊		6 只 ¹⁸ F 暂养 (12.7 μ Sv/h)	4.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.72E-02	控制区	
		4 只 ⁴⁴ Sc 暂养 (4.12 μ Sv/h)	4.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
F4 西墙外动物观察室 2		6 只 ¹⁸ F 暂养 (12.7 μ Sv/h)	4.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	3.75E-02	控制区	
		4 只 ⁴⁴ Sc 暂养 (4.12 μ Sv/h)	4.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
F5 北墙外绿化带		6 只 ¹⁸ F 暂养 (12.7 μ Sv/h)	5.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.31E-02	普通场所	
		4 只 ⁴⁴ Sc 暂养 (4.12 μ Sv/h)	5.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02			
F6 南侧防护门外		6 只 ¹⁸ F 暂养 (12.7 μ Sv/h)	5.3	8mmPb (考虑 30°斜射)	2.78E-01	2.03E-01	控制区	
		4 只 ⁴⁴ Sc 暂养 (4.12 μ Sv/h)	5.3	8mmPb (考虑 30°斜射)	5.27E-01			
F _上 楼上距地 0.3m 处		6 只 ¹⁸ F 暂养 (12.7 μ Sv/h)	5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	4.19E-02	4.33E-02	监督区	
		4 只 ⁴⁴ Sc 暂养	5.2	200mm 混凝土楼板	1.55E-01			

		(4.12 μ Sv/h)		+4mmPb			
动物注射室 (G)	G1 东墙外紧急处理室	4mCi ¹⁸ F 裸源 (21.2 μ Sv/h)	2.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	6.04E-02	控制区
	G2 南墙外动物实验走廊		2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	5.58E-02	控制区
	G3 西墙外淋浴室		5.2	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.40E-02	监督区
	G4 注射窗后注射位		0.8	40mmPb	3.89E-03	1.29E-01	控制区
	G5 防护门外缓冲间 2		4.0	8mmPb (考虑 45°斜射)	2.08E-01	2.76E-01	监督区
	G6 西侧卫生通过间		5.0	8mmPb	3.30E-01	2.80E-01	监督区
	G7 西侧常规检查室		5.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.25E-02	监督区
	G _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	4.19E-02	3.29E-02	监督区
	G8 西侧值班室		9.8	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	3.93E-03	普通场所
	G9 西侧化验室		14.7	8mmPb (考虑 45°斜射)	2.08E-01	2.04E-02	普通场所
动物注射室 (G)	G1 东墙外紧急处理室	1mCi ⁴⁴ Sc 裸源 (10.3 μ Sv/h)	2.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	1.50E-01	控制区
	G2 南墙外动物实验走廊		2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	1.38E-01	监督区
	G3 西墙外淋浴室		5.2	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	3.46E-02	监督区
	G4 注射窗后注射位		0.8	50mmPb	3.12E-02	5.02E-01	控制区
	G5 防护门外缓冲间 2		4.0	8mmPb (考虑 45°斜射)	4.56E-01	2.94E-01	监督区
	G6 西侧卫生通过间		5.0	8mmPb	5.74E-01	2.36E-01	监督区
	G7 西侧常规检查室		5.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	6.36E-02	监督区
	G _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.55E-01	5.90E-02	监督区
	G8 西侧值班室		9.8	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	9.74E-03	普通场所
	G9 西侧化验室		14.7	8mmPb (考虑 45°斜射)	4.56E-01	2.17E-02	普通场所
分装质控室 (H)	H1 北墙外绿化带	4mCi ¹⁸ F 裸源 (21.2 μ Sv/h)	3.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	2.76E-02	普通场所
	H2 西侧动物常规检查		6.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	1.05E-02	监督区
	H3 西侧值班室		10.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	1.78E-02	3.77E-03	普通场所
	H _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	4.19E-02	3.29E-02	控制区
分装质控室 (H)	H1 北墙外绿化带	1mCi ⁴⁴ Sc 裸源 (10.3 μ Sv/h)	3.7	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	6.83E-02	普通场所
	H2 西侧动物常规检查		6.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	2.60E-02	监督区
	H3 西侧值班室		10.0	236mm 混凝土+40mm 混凝土+3mmPb	9.08E-02	9.35E-03	普通场所
	H _上 楼上距地 0.3m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.55E-01	5.90E-02	控制区
注: 1.灰砂砖密度不低于 1.5t/m ³ , 混凝土密度 2.35t/m ³ , 硫酸钡水泥密度大于 3.2t/m ³ , 铅密度 11.34t/m ³ ;							

2.灰砂砖墙和硫酸钡水泥均按密度折算为普通混凝土,370mm灰砂砖墙约相当于236mm混凝土,30mm硫酸钡水泥约相当于40mm混凝土,80mm硫酸钡水泥约相当于108mm混凝土;

由表 11-4 的估算结果可知,本项目使用放射性核素开展 PET 显像研究期间,工作场所控制区边界和屋顶外 30cm 处的附加剂量率最大为 $6.05E-01\mu\text{Sv/h}$ (高清 PET/CT 间观察窗外 30cm),工作场所控制区内各房间周围 30cm 处的周围剂量当量率最大值为 $9.79E-01\mu\text{Sv/h}$ (动物观察室 1 防护门外),满足本项目小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的剂量率控制要求。

(三) 废物桶外附加剂量率分析

本项目动物注射窗口的铅废物桶防护厚度为 20mmPb ,按每日最多进行 6 次 ^{18}F 注射和 4 次 ^{44}Sc 注射计算。假设 ^{18}F 药物注射时注射器中残留 2% 的药液,经过 20mmPb 铅废物桶的屏蔽后(衰减因子为 $6.24E-02$),则距离废物桶外 30cm 处的辐射剂量率为 $1.06E-01\mu\text{Sv/h}$ (距离取 0.5m),按每半小时注射 1 次考虑,考虑 ^{18}F 核素的衰变,则当天 6 次 ^{18}F 药物全部注射完成后,废物桶外 30cm 处的辐射剂量率为 $4.17E-01\mu\text{Sv/h}$;假设 ^{44}Sc 药物注射时注射器中残留 2% 的药液,经过 20mmPb 铅废物桶的屏蔽后(衰减因子为 $2.50E-01$),则距离废物桶外 30cm 处的辐射剂量率为 $2.06E-01\mu\text{Sv/h}$ (距离取 0.5m),当天 4 次 ^{44}Sc 药物全部注射完成后废物桶外 30cm 处的辐射剂量率为 $8.24E-01\mu\text{Sv/h}$;考虑叠加后,预计距废物桶外 30cm 处的辐射剂量率不超过 $1.24\mu\text{Sv/h}$ (距离取 0.5m),满足距废物桶 30cm 处剂量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。放射性废物于每周一工作开始前转移至废物间的铅废物桶内暂存,废物放射性的活度将大大降低,可满足距废物桶 30cm 处剂量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

(四) 放射源库周围附加剂量率分析

本项目动物 PET 影像区拟使用 ^{68}Ge 和 ^{22}Na 密封源开展各 PET 设备质控。其中:

① 用于宽景 PET/CT 和高清 PET/CT 校准的 3 枚 ^{68}Ge 源的总活度不超过 222MBq ,拟贮存在 1 个 20mmPb 的源罐内。 ^{68}Ge 密封源主要考虑 ^{68}Ga 核素的影响, ^{68}Ga 裸源周围剂量当量率常数 $0.134\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$,则距 222MBq 的 ^{68}Ge 裸源 1m 处的剂量率为 $29.7\mu\text{Sv/h}$ 。 ^{68}Ga 的 γ 射线在铅中的 TVL 取 17mm,在混凝土中的 TVL 取 190mm,经 20mmPb 源罐防护后,则距 ^{68}Ge 源罐周围 1m 处的剂量率约 $1.98\mu\text{Sv/h}$;

② 用于宽景 PET/CT 校准的 6 枚 ^{22}Na 校准源的总活度不超过 274.8MBq ,拟贮存在 1 个 50mmPb 的源罐内。根据《辐射安全手册》P135 表 6.2, ^{22}Na 的周围剂量当量率常数取 $0.281\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$,则距 274.8MBq 的 ^{22}Na 裸源 1m 处的剂量率约 $77.2\mu\text{Sv/h}$ 。 ^{22}Na 核素可发射 1274keV (100%) 和 511keV (181%) 两种能量的 γ 射线, ^{22}Na 核素的 γ 射线在铅中的 TVL 取 35.6mm,在混凝土中的 TVL 取 310mm (取值参考《高等电离辐射防护教程》P93,以及附表 7、附表 9),经 50mmPb 源罐防护后,距 ^{22}Na 源罐周围 1m 处的剂量率约 $3.04\mu\text{Sv/h}$ 。

③ 用于 PET/MRI 校准的 3 枚 ^{68}Ge 源的总活度不超过 222MBq, 拟贮存在 1 个 20mmPb 的源罐内, 经 20mmPb 源罐防护后, 则距源罐周围 1m 处的剂量率约 $1.98\mu\text{Sv/h}$;

所有校准源不使用时均放于各自铅罐内并贮存在二层的放射源库内, 在进行放射源库周围剂量率计算时, 取距源罐 1m 处的剂量率作为源项进行计算, 本项目放射源库周围附加剂量率估算结果见表 11-5, 放射源库周围关注点位示意图见图 11-2。

表 11-5 本项目放射源库周围附加剂量率估算结果

序号	关注点位置	源项	距离 (m)	屏蔽材料与厚度*	衰减因子	总附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
1#	防护门外 30cm 处 (二层质控室)	^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)	1.9	8mmPb	$3.38\text{E-}01$	$8.73\text{E-}01$
		^{22}Na 源罐 ($3.04\mu\text{Sv/h}$)		8mmPb	$5.96\text{E-}01$	
		^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)		8mmPb	$3.38\text{E-}01$	
2#	南墙外 30cm 处 (二层废物库)	^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)	1.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$3.08\text{E-}02$	$2.16\text{E-}01$
		^{22}Na 源罐 ($3.04\mu\text{Sv/h}$)		236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$1.20\text{E-}01$	
		^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)		236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$3.08\text{E-}02$	
3#	西墙外 30cm 处 (不上人屋面)	^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)	1.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$3.08\text{E-}02$	$2.48\text{E-}01$
		^{22}Na 源罐 ($3.04\mu\text{Sv/h}$)		236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$1.20\text{E-}01$	
		^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)		236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$3.08\text{E-}02$	
4#	北墙外 30cm 处 (楼外)	^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)	1.5	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$3.08\text{E-}02$	$2.16\text{E-}01$
		^{22}Na 源罐 ($3.04\mu\text{Sv/h}$)		236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$1.20\text{E-}01$	
		^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)		236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	$3.08\text{E-}02$	
5#	楼下距地 1.7m 处 (一层清洁间)	^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)	4.2	200mm 混凝土+4mmPb	$5.15\text{E-}02$	$4.17\text{E-}02$
		^{22}Na 源罐 ($3.04\mu\text{Sv/h}$)		200mm 混凝土+4mmPb	$1.75\text{E-}01$	
		^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)		200mm 混凝土+4mmPb	$5.15\text{E-}02$	
6#	楼上距地 0.3m 处 (三层配电间)	^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)	5.4	200mm 混凝土+4mmPb	$5.15\text{E-}02$	$2.52\text{E-}02$
		^{22}Na 源罐 ($3.04\mu\text{Sv/h}$)		200mm 混凝土+4mmPb	$1.75\text{E-}01$	
		^{68}Ge 源罐 ($1.98\mu\text{Sv/h}$)		200mm 混凝土+4mmPb	$5.15\text{E-}02$	

注: 1. 灰砂砖密度不低于 1.5t/m^3 , 混凝土密度 2.35t/m^3 , 硫酸钡水泥密度大于 3.2t/m^3 ;
2. 灰砂砖墙和硫酸钡水泥均按密度折算为普通混凝土, 370mm 灰砂砖墙约相当于 236mm 混凝土, 30mm 硫酸钡水泥约相当于 40mm 混凝土;

由表 11-5 的估算结果可知, 本项目二层放射源库四周墙体和防护门外最大附加剂量率为 $8.73\text{E-}01\mu\text{Sv/h}$ (放射源库防护门外 30cm 处), 楼上配电间距地面 30cm 处附加剂量率为

2.52E-02 μ Sv/h, 楼下距地面 1.7m 高度处附加剂量率为 4.17E-02 μ Sv/h, 均满足本项目小于 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制要求。

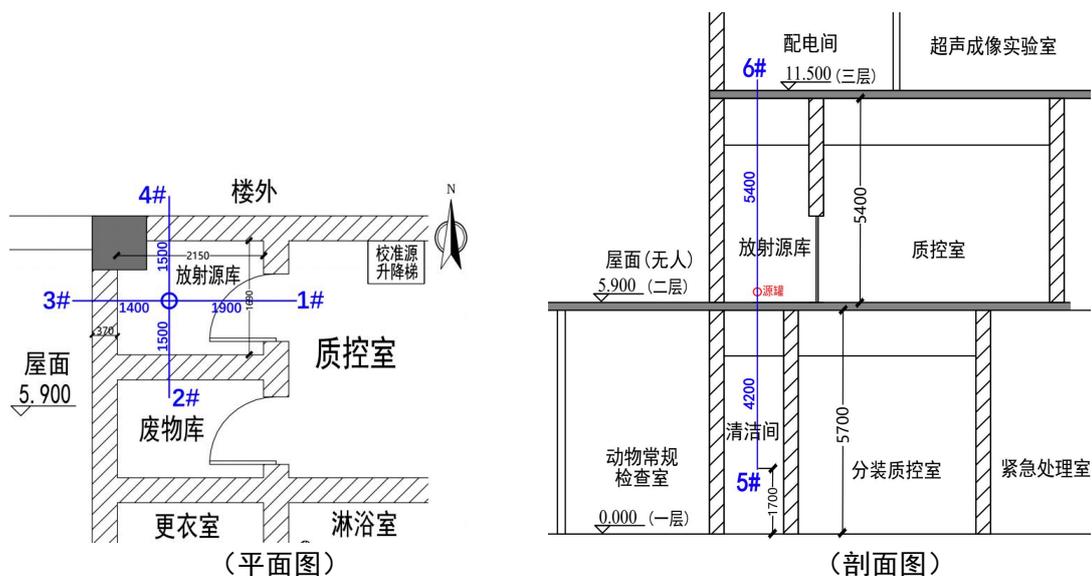


图 11-2 本项目二层放射源库周围关注点示意图

(五) PET/CT 附加剂量率叠加分析

本项目一层宽景 PET/CT 间和高清 PET/CT 间四周墙体均为 370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mm 铅板, 屋顶为 200mm 混凝土+4mm 铅板, 所有防护门屏蔽厚度均为 8mmPb, 观察窗均为 8mmPb 的铅玻璃; 宽景 PET/CT 间内东西长 6.4m, 南北长 13.0m, 净高 5.7m, 使用面积为 83.2m²; 高清 PET/CT 间内东西长 5.5m, 南北长 9.5m, 净高 5.7m, 使用面积为 50.6m²; 本项目宽景和高清 PET/CT 间空间尺寸和屏蔽设计情况见表 11-6 和表 11-7。

表 11-6 本项目各 PET/CT 间空间尺寸和使用面积

机房名称	机房尺寸 (m)	机房使用面积 (m ²)	GBZ130-2020 要求	符合情况
宽景 PET/CT 间	13.0m×6.4m (长×宽)	83.2m ²	机房内最小单边长度 4.5m 机房内最小有效使用面积 30m ²	符合
高清 PET/CT 间	9.5m×5.5m (长×宽)	50.6m ²		

表 11-7 本项目各 PET/CT 间屏蔽防护设计情况

机房名称	屏蔽体	屏蔽材料及厚度	等效铅当量* (mmPb)	GBZ130-2020 要求	符合情况
宽景 PET/CT 间	四周墙体	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mm 铅板	约 8mmPb	所有屏蔽体的铅当量厚度均不小于 2.5mm	符合
	屋顶	200mm 混凝土+4mm 铅板	约 6.26mmPb		
	各防护门	8mmPb	8mmPb		
	观察窗	8mmPb	8mmPb		
高清 PET/CT 间	四周墙体	370mm 灰砂砖墙+30mm 硫酸钡水泥+3mm 铅板	约 8mmPb	所有屏蔽体的铅当量厚度均不小于 2.5mm	符合
	屋顶	200mm 混凝土+4mm 铅板	约 6.26mmPb		

	各防护门	8mmPb	8mmPb		
	观察窗	8mmPb	8mmPb		

注：（1）混凝土密度 2.35t/m³，铅密度 11.34t/m³；硫酸钡水泥密度不低于 3.2t/m³，灰砂砖墙密度不低于 1.5t/m³。

（2）混凝土等效铅当量换算方法依据 GBZ130-2020 附录 C，管电压取 140kV，200mm 混凝土楼板等效铅当量为 2.26mmPb；灰砂砖墙、硫酸钡水泥的等效铅当量取值参考《辐射防护手册-第三分册》P62 表 3.3，保守取 150kV 对应的数值，370mm 灰砂砖墙等效铅当量不低于 3mmPb，30mm 硫酸钡水泥等效铅当量不低于 2mmPb。

由表 11-5 和表 11-6 可知，本项目宽景 PET/CT 间和高清 PET/CT 间的房间尺寸和屏蔽防护设计均符合《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）的相关要求。

本项目各 PET/CT 设备的 CT 机的最大管电压均为 140kV，实际运行时的最大管电流均在 300mA 左右，与普通医用 CT 机运行参数基本一致。环评单位查阅了西门子厂家医用 CT 设备在 140kV 下的剂量率分布曲线，1m 处的杂散辐射为 0.052μGy/mAs（垂直）和 0.051μGy/mAs（水平），射线管电流不超过 300mA，故距 CT 机 1m 处的杂散辐射剂量率最高约 56.16mGy/h，故以此为例评价本项目 PET/CT 设备的 CT 机运行时叠加辐射影响。

本项目各 PET/CT 间的屏蔽防护铅当量厚度均不低于 6.26mmPb，依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）附录 C，计算得到屏蔽透射因子为 1.45E-07（管电压取 140kV），按关注点最近距离不低于 3m 计算，CT 机运行所致各 PET/CT 间周围的附加剂量率不大于 9.05E-04μSv/h，与表 11-4 的计算结果叠加后，预计本项目各 PET/CT 间和 PET/CT 间周围附加剂量率最高为 6.06E-01μSv/h（高清 PET/CT 间观察窗外 30cm），仍满足本项目小于 2.5μSv/h 的剂量率控制要求。

本项目动物 PET 影像区全年共计开展 2000 次 PET 显像实验，每次显像实验 CT 扫描时间保守取 1min，年累计 CT 扫描时间约 33.4h，对各 PET/CT 间周围全居留人员的额外剂量贡献仅为 0.03μSv/a。因此，在保证各 PET/CT 间的辐射防护施工质量的前提下，宽景 PET/CT 和高清 PET/CT 设备的 CT 机运行对周围环境和人员产生的辐射影响可以忽略。

11.2.2.4 公众受照剂量估算

本项目动物 PET 影像区全年计划运行 40 周，每周 5 个工作日，全年工作 200 天。按表 11.1 所列的最大工作量估算，除 ¹⁸F 核素外，⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、⁸²Rb、⁴⁴Sc 四种核素均按 ⁴⁴Sc 保守计算。本项目动物 PET 影像区各环节工作时间统计如下：

（1）本项目动物 PET 影像区每日最多进行 10 次药物分装，其中 ¹⁸F 药物每日分装 6 次，其他核素总计分装 4 次，药物分装时间为 1min/次。⁸²Sr-⁸²Rb 发生器的年操作次数不超过 200 次，每次淋洗和标记的操作时间不超过 2min，年累计操作时间不超过 6.7h/a；综上，

^{18}F 药物累计分装时间为 20h/a，其他核素药物（均以 ^{44}Sc 计算）累计分装时间取 20h/a；

（2）药物注射时间不超过 1min/次，每日最多注射 10 次，年工作 200 天，则 ^{18}F 药物累计注射时间 20h/a， ^{44}Sc 药物累计注射时间 13.4h/a；

（3）宽景 PET/CT 显像实验每日最多开展 4 次，显像扫描时间为 15min/次，累计显像扫描时间 200h/a（按 ^{18}F 显像 120h， ^{44}Sc 显像 80h 估算）；高清 PET/CT 显像实验每日最多开展 3 次，显像扫描时间为 15min/次，累计显像扫描时间 150h/a（按 ^{18}F 显像 90h， ^{44}Sc 显像 60h 估算）；PET/MRI 显像实验每日最多开展 3 次，平均扫描时长为 40min/次，年累计显像扫描时间 400h（按 ^{18}F 显像 240h， ^{44}Sc 显像 160h 计算）；

（4）对于本项目动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室，预计全年均有实验动物停留。动物观察室、动物暂养室周围公众的全居留时间保守取 2000h（即全年 250 天，每天停留 8h），按最大附加剂量率进行剂量估算。实际上，本项目正电子核素的半衰期较短，动物接受药物注射后，随着时间的推移，动物观察室、动物暂养室周围的附加剂量率衰减很快（动物前一天接受药物注射后，到第二天早上时，距动物 1m 处剂量率最高也不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ ），因此估算条件是保守的。

本项目动物 PET 影像区工作场所各出入口均设有门禁，公众无法进入，公众仅会在动物 PET 影像区外围区域活动和停留。根据上述工作时间和表 11-4 的附加剂量率计算结果，本项目动物 PET 影像区周围公众的年受照剂量的估算结果见表 11-8。

表 11-8 本项目动物 PET 影像区公众年受照剂量理论估算结果

位置	关注点位*	最大附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		年最大受照时间 (h/a)	公众居留因子	年最大受照剂量 (mSv/a)	
宽景 PET/CT 间 南侧走廊	A8+B8	A8	^{18}F	9.24E-02	120	1/16	1.15E-03
			^{44}Sc	7.81E-02	80		
	B8		^{18}F	4.46E-03	90		
			^{44}Sc	1.10E-02	60		
宽景 PET/CT 间南 侧数据分析/阅片室	A9+B9	A9	^{18}F	2.93E-03	120	1	1.73E-03
			^{44}Sc	9.74E-03	80		
	B9		^{18}F	2.49E-03	90		
			^{44}Sc	6.18E-03	60		
高清 PET/CT 间 西侧配电间	B3		^{18}F	3.26E-02	90	1/16	4.87E-04
			^{44}Sc	8.09E-02	60		
高清 PET/CT 间 西侧化验室	B10+G9	B10	^{18}F	2.34E-03	90	1	1.26E-03
			^{44}Sc	5.80E-03	60		
	G9		^{18}F	2.04E-02	20		
			^{44}Sc	2.17E-02	13.4		
西北侧值班室	G8+H3	G8	^{18}F	3.93E-03	20	1	4.72E-04
			^{44}Sc	9.74E-03	13.4		

		H3	¹⁸ F	3.77E-03	20		
			⁴⁴ Sc	9.35E-03	20		
西北侧常规检查室	G7		¹⁸ F	1.25E-02	20	1	1.10E-03
			⁴⁴ Sc	6.36E-02	13.4		
动物观察室 1 北墙外绿化带	D4	1.15E-01			2000	1/16	1.44E-02
动物暂养室 东墙外楼梯间	F1	2.08E-01			2000	1/16	2.60E-02
动物暂养室 东墙外报警阀室	F2	2.08E-01			2000	1/16	2.60E-02
PET/MRI 间北墙外 缓冲间 3	C3		¹⁸ F	1.33E-02	240	1/16	5.80E-04
			⁴⁴ Sc	3.80E-02	160		
PET/MRI 间东墙外 室外道路	C1		¹⁸ F	1.63E-02	240	1/16	7.09E-04
			⁴⁴ Sc	4.64E-02	160		
PET/MRI 间南侧 备件室	C7		¹⁸ F	2.22E-03	240	1/4	3.86E-04
			⁴⁴ Sc	6.32E-03	160		
PET/MRI 间楼上 动物临时饲养室	C _上		¹⁸ F	2.01E-02	240	1/4	3.85E-03* (叠加)
			⁴⁴ Sc	4.12E-02	160		
注：（1）各关注点位处的附加剂量率均考虑剂量率叠加； （2）PET/MRI 间上方的动物临时饲养室考虑小动物实验区运行时的叠加影响，见表 11-19； （3）除 PET/MRI 间楼上公众可到达外，其他房间楼上均为小动物实验工作区域，公众无法到达。							

由表 11-8 的估算结果可知，本项目动物 PET 影像区周围公众的受照剂量不超过 2.60E-02mSv/a（动物暂养室西侧报警阀室），满足本项目 0.1mSv/a 的公众剂量约束值。

除 PET/MRI 间楼上区域公众可到达外，其他区域楼上均为小动物实验工作区域，公众均无法到达。上述公众的年受照剂量计算仅考虑了辐射影响最大的 ¹⁸F 和 ⁴⁴Sc 两种核素，若考虑其他核素的使用，公众的年受照剂量将低于上述理论计算值。

11.2.2.5 职业人员附加剂量估算

在进行辐射工作人员附加剂量估算时，主要考虑 ¹⁸F 核素的影响，⁶⁸Ga、⁶⁴Cu、⁸²Rb、⁴⁴Sc 四种核素保守均按 ⁴⁴Sc 考虑，根据以下工作环节估算本项目动物 PET 影像区辐射工作人员的受照剂量：

（1）药物分装和淋洗环节的受照剂量：

拟使用的放射性药物均在手套箱内进行分装，每日最多进行 10 次药物分装，全年工作 200 天，药物分装时间为 1min/次；⁸²Sr-⁸²Rb 发生器年操作次数不超过 200 次，每次淋洗标记时间不超过 2min；因此，工作人员在手套箱内分装药物和操作发生器的累计时间不超过 40h/a，手套箱外工作人员操作位的剂量率保守按 2.5μSv/h 计算，则工作人员的附加剂量为 100μSv/a；

(2) 药物转运环节的受照剂量

本项目放射性药物注射器均使用 20mmPb 的药物运输铅盒进行运输，其中：

^{18}F 药物的最大活度为 148MBq，运输过程中工作人员距离按 0.5m 估算，经铅盒屏蔽后（衰减因子 $6.24\text{E-}02$ ），工作人员处剂量率约为 $5.3\mu\text{Sv/h}$ ，单次运输时间按 20s/次（年最多 1200 次），年累计运输时间为 6.7h，则工作人员受照剂量为 $35.5\mu\text{Sv/a}$ ；

^{44}Sc 药物的最大活度为 37MBq，运输过程中工作人员距离按 0.5m 估算，经铅盒屏蔽后（衰减因子 $2.50\text{E-}01$ ），工作人员处剂量率约为 $10.3\mu\text{Sv/h}$ ，单次运输时间按 20s/次（年最多 800 次），年累计运输时间约 4.4h，则工作人员受照剂量为 $45.8\mu\text{Sv/a}$ ；

综上，药物转运环节工作人员总受照剂量为 $35.5\mu\text{Sv/a}+45.8\mu\text{Sv/a}=81.3\mu\text{Sv/a}$ 。

(3) 药物注射环节的受照剂量：

① 本项目动物注射室注射窗的防护厚度为 50mmPb，在进行药物注射时使用 10mmPb 注射器防护套； ^{18}F 药物注射器的最大活度为 148MBq，注射时操作距离保守取 30cm，经 50mmPb 注射窗屏蔽后（50mmPb 的衰减因子为 $9.73\text{E-}04$ ），则人员注射位剂量率为 $0.23\mu\text{Sv/h}$ ； ^{44}Sc 药物注射器的最大活度为 37MBq，注射时操作距离保守取 30cm，经 50mmPb 注射窗屏蔽后（50mmPb 的衰减因子为 $3.12\text{E-}02$ ），则人员注射位剂量率为 $3.57\mu\text{Sv/h}$ ；考虑到注射窗无法屏蔽工作人员所有身体部位，注射位处的附加剂量率保守按 $10\mu\text{Sv/h}$ 进行计算，药物注射时间不超过 1min/次，年最多实施 2000 次药物注射，累计注射时间 33.4h/a，则工作人员受照剂量不超过 $334\mu\text{Sv/a}$ 。

② 动物多次注射的辐射影响：本项目实验猴实行轮换制度，每批 10 只实验猴在动物观察室内将使用 1 个月（实验猴使用 1 个月后再不接受注射，随后转移至动物暂养室暂养），存在 1 只实验猴多次接受注射的情况；本项目每只实验猴每日只接受 1 次药物注射，假设某只实验猴在前一天工作结束前接受了药物注射，到第二天早上 8:00 实验开始前（按经过 14h 计算），该实验猴体内残余放射性核素活度的估算结果见表 11-9。

表 11-9 实验猴体内残余放射性核素活度和体外剂量率

核素	半衰期	最大注射活度 (MBq)	注射后体外 1m 处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	衰变时间 (h)	活度衰减系数*	体内残余活度 (MBq)	衰减后体外 1m 处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
^{18}F	109.8min	148	21.2	14	$4.98\text{E-}03$	$7.37\text{E-}01$	0.105
^{68}Ga	67.71min	74	9.92	14	$1.84\text{E-}04$	$1.36\text{E-}01$	0.002
^{64}Cu	12.7h	74	2.15	14	$4.66\text{E-}01$	34.5	1.000
^{82}Rb	76s	148	23.5	14	$2.34\text{E-}200$	$3.47\text{E-}186$	0
^{44}Sc	3.97h	37	10.3	14	$8.68\text{E-}02$	3.21	0.891

注*：未考虑放射性核素通过排泄物排出动物体外。

根据表 11-9 可知，即使实验猴在前一天工作结束前注射了放射性药物，到第二天早上实验开始前，距实验猴体外 1m 处的剂量率最高也不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ 。在第二天进行药物注射前，要先对实验猴实施麻醉并预埋注射针，每次操作时间不超过 3min，年最多操作 2000 次，累计操作时间不超过 100h/a，假设工作人员操作位处剂量率均按 $1\mu\text{Sv/h}$ 进行计算，对工作人员的额外剂量贡献不会超过 $100\mu\text{Sv/a}$ ；

综上，动物麻醉和注射环节工作人员总受照剂量为 $334\mu\text{Sv/a}+100\mu\text{Sv/a}=434\mu\text{Sv/a}$ 。

(4) 动物转运环节的受照剂量：

本项目实验猴的转运均使用 20mmPb 动物转运铅箱，并使用手推车或平板车进行运输，考虑到将实验猴移入和移出铅箱时的操作距离较近，运输期间工作人员与实验猴的平均距离保守取 0.6m。注射 ^{18}F 实验猴体外 1m 处剂量率为 $21.2\mu\text{Sv/h}$ ，经铅箱屏蔽后（衰减因子 $6.24\text{E-}02$ ），工作人员处剂量率约为 $3.67\mu\text{Sv/h}$ （距离取 0.6m），每只实验猴的总运输时间按 3min 计算（先运至动物观察室，再运至各显像机房，最后再送回动物观察室），年最多实施 1200 次运输，年累计运输时间为 60h，则工作人员受照剂量为 $220\mu\text{Sv/a}$ ；注射 ^{44}Sc 实验猴体外 1m 处剂量率为 $10.3\mu\text{Sv/h}$ ，经铅箱屏蔽后（衰减因子 $2.50\text{E-}01$ ），工作人员处剂量率约为 $7.15\mu\text{Sv/h}$ （距离取 0.6m），年最多实施 800 次运输，年累计运输时间为 40h，则工作人员受照剂量为 $286\mu\text{Sv/a}$ ；

综上，注射后动物转运环节工作人员总受照剂量为 $220\mu\text{Sv/a}+286\mu\text{Sv/a}=506\mu\text{Sv/a}$ 。

(5) 动物摆位环节的受照剂量

① 宽景 PET/CT 显像：每日最多开展 4 次实验，年最多进行 800 次摆位，摆位时间为 1min/次，累计摆位时间 13.4h/a；摆位期间工作人员与实验猴的平均距离取 0.5m，由于 ^{18}F 实验猴体外 1m 处剂量率更高，假设全部按 ^{18}F 实验猴摆位估算，则工作人员摆位环节的受照剂量为 $1136\mu\text{Sv/a}$ ；

② 高清 PET/CT 显像：每日最多开展 3 次实验，年最多进行 600 次摆位，摆位时间为 1min/次，累计摆位时间 10h/a；摆位期间工作人员与实验猴的平均距离取 0.5m，均按 ^{18}F 实验猴估算，则工作人员摆位环节的受照剂量为 $848\mu\text{Sv/a}$ ；

③ PET/MRI 显像：每日最多开展 3 次实验，年最多进行 600 次摆位，摆位时间为 1min/次，累计摆位时间 10h/a；摆位期间工作人员与实验猴的平均距离取 0.5m，均按 ^{18}F 实验猴估算，则工作人员摆位环节的受照剂量为 $848\mu\text{Sv/a}$ ；

(6) 设备操作环节的受照剂量

宽景 PET/CT 显像实验每日最多开展 4 次，显像扫描时间为 15min/次，累计显像扫描时间 200h/a；高清 PET/CT 显像实验每日最多开展 3 次，显像扫描时间为 15min/次，累计显像扫描时间 150h/a；PET/MRI 显像实验每日最多开展 3 次，平均扫描时长为 40min/人次，年累计显像扫描时间 400h；

根据表 11-4 可知，各 PET 显像间观察窗外 30cm 处人员操作位处附加剂量率， ^{18}F 的计算结果均高于 ^{44}Sc ，保守计算仅考虑 ^{18}F 扫描时操作间内附加剂量率。由于宽景 PET/CT 和高清 PET/CT 共用操作间，操作间内附加剂量率考虑宽景 PET/CT 和高清 PET/CT 同时扫描时的剂量率叠加；

本项目设备操作环节工作人员附加剂量核算结果见表 11-10

表 11-10 本项目设备操作环节工作人员年附加剂量估算

工作内容	操作位剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年工作时间 (h/a)	年附加剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)
宽景 PET/CT 设备操作	1.04E+00(叠加)	200	208
高清 PET/CT 设备操作	1.04E+00(叠加)	200	208
PET/MRI 设备操作	2.33E-01	400	93.2

(7) 质控环节的受照剂量

① 使用校准源

宽景 PET/CT 质控：本项目宽景 PET/CT 设备每周均开展 1 次 ^{68}Ge 质控检测，该环节需要将 2 枚 ^{68}Ge 线源从源罐内取出，放于 PET/CT 扫描床上，随后在控制室进行操作，质控完成后将 ^{68}Ge 校准源放回源罐，送回放射源库。 ^{68}Ge 发射的光子平均能量仅约 9.2keV，但其子体 ^{68}Ga 发射正电子发生湮灭效应产生 511keV 的 γ 射线，故该环节主要考虑 ^{68}Ga 的影响。本项目 2 枚 ^{68}Ge 线源的总活度不超过 111MBq， ^{68}Ga 的 K_{γ} 常数为 $0.134\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$ ，操作距离取 0.5m，操作位剂量率为 $59.5\mu\text{Sv/h}$ ，每次操作裸源的总时间不超过 2min，年开展 40 次（每周 1 次），累计操作时间不超过 1.33h/a。宽景 PET/CT 设备每月还需额外进行 1 次 ^{22}Na 质控，该环节需要将 2 枚 ^{22}Na 线源从源罐内取出（PET 探测器轴向视野为 2m），放于宽景 PET/CT 扫描床上，随后在控制室进行操作，质控完成后将 ^{22}Na 校准源放回源罐，送回放射源库。根据《辐射安全手册》P135 表 6.2， ^{22}Na 的周围剂量当量率常数为 $0.281\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$ ，本项目 2 枚 ^{22}Na 线源的总活度不超过 260MBq，平均操作距离取 0.5m，操作位剂量率为 $308.8\mu\text{Sv/h}$ ，每次操作裸源的总时间不超过 2min，年开展 12 次（每月 1 次），累计操作时间不超过 0.4h/a。

高清 PET/CT 质控：本项目高清 PET/CT 设备每周开展 1 次 ^{68}Ge 质控检测，本项目单枚 ^{68}Ge 校准源活度最大为 111MBq，操作距离取 0.5m，操作位剂量率为 $59.5\mu\text{Sv/h}$ ，每次操

作裸源的时间不超过 1min，年开展 40 次（每周 1 次），累计操作时间不超过 0.67h；

PET/MRI 质控：本项目 PET/MRI 设备每周开展 1 次 ^{68}Ge 质控检测，本项目单枚 ^{68}Ge 校准源活度最大为 111MBq，操作距离取 0.5m，操作位剂量率为 $59.5\mu\text{Sv/h}$ ，每次操作裸源的时间不超过 1min，年开展 40 次（每周 1 次），累计操作时间不超过 0.67h；

② 稳定性检测

质控人员定期使用 ^{18}F 药物开展设备稳定检测（包括灵敏度、空间分辨力等各项指标）。预计每台 PET 设备每年稳定性检测共需要使用 74MBq 的 ^{18}F 药物，工作人员操作距离取 0.5m，距 74MBq 的 ^{18}F 药液 50cm 处的剂量率为 $42.3\mu\text{Sv/h}$ ，累计操作时间取 10min/a。

本项目质控检测环节工作人员的受照剂量核算结果见表 11-11。

表 11-11 本项目设备质控环节工作人员年附加剂量核算

工作内容	工作环节	操作位剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年操作时间 (h/a)	年附加剂量 (mSv/a)
宽景 PET/CT 质控	^{68}Ge 质控	59.5	1.33	209.7
	^{22}Na 质控	308.8	0.4	
	稳定性检测	42.3	0.167	
高清 PET/CT 质控	^{68}Ge 质控	59.5	0.67	46.9
	稳定性检测	42.3	0.167	
PET/MRI 质控	^{68}Ge 质控	59.5	0.67	46.9
	稳定性检测	42.3	0.167	

(8) 动物污物清理和喂养期间的受照剂量

本项目动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室内的动物排泄物、毛发、食物残渣、废弃垫料等动物废物需要及时清理和更换，实验猴还需要每天投喂食物和饮用水。实验猴笼污物清理、动物喂养工作每天只开展 1 次，拟安排在第二天早上实验开始前进行。辐射工作人员于每天早上实验开始前进入动物观察室和暂养室，其中：药物操作人员负责清理排泄物、收集废物和表面污染监测，动物管理人员负责投喂食物和饮用水并查看实验猴行为状态有无异常。

本项目猴笼底部拟设置不锈钢托盘收集动物排泄物，拟配备自动饮水器和投喂口，可有效缩短工作人员清理污物、观察投喂的时间。预计工作人员进行清理污物、观察投喂的总用时不超过 15min/d，按全年运行 200 天考虑，累计工作时间不超过 50h/a。根据表 11-9 的分析，在当天实验开始前，前一天注射药物实验猴体内残留的放射性活度已经明显降低，距实验猴体外 1m 处的剂量率均不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ ，因此，在当天实验开始前，各动物观察室和暂养室内的辐射剂量率保守按 $10\mu\text{Sv/h}$ （按 10 只猴子）估算，工作人员累计受照时间不

超过 50h/a，预计该环节单名工作人员的附加剂量不超过 $10\mu\text{Sv/h}\times 50\text{h/a}=500\mu\text{Sv/a}$ ；

(9) 动物 PET 影像区工作人员受照剂量总结

综合以上结果，本项目动物 PET 影像区工作人员附加有效剂量总结见表 11-12。

表 11-12 本项目动物 PET 影像区工作人员附加有效剂量总结

人员岗位	工作环节		最大附加剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)	总附加剂量 (mSv/a)	备注
药物操作人员	药物分装、 ^{82}Rb 淋洗		100	1.621	2 人轮换 (单人 0.811mSv)
	药物转运		81.3		
	麻醉和药物注射		434		
	实验动物转运		506		
	污物清理和污染监测		500		
设备操作人员	宽景 PET/CT	动物摆位	1136	1.344	2 人轮换 (单人 0.672mSv)
		设备操作	208		
	高清 PET/CT	动物摆位	848	1.056	2 人轮换 (单人 0.528mSv)
		设备操作	208		
	PET/MRI	动物摆位	848	0.941	2 人轮换 (单人 0.471mSv)
		设备操作	93.2		
质控人员	宽景 PET/CT 质控		209.7	0.304	2 人轮换 (单人 0.152mSv)
	高清 PET/CT 质控		46.9		
	PET/MRI 质控		46.9		
动物管理人员	动物视察和投喂		500	0.500	1 人

由表 11-12 的计算结果可知，本项目动物 PET 影像区单名药物操作人员的附加有效剂量不超过 0.811mSv/a，单名设备操作人员的附加有效剂量不超过 0.672mSv/a，单名质控人员的附加有效剂量不超过 0.152mSv/a，动物管理人员的附加有效剂量不超过 0.5mSv/a。

本项目动物 PET 影像区的控制区的楼上正对小动物实验区，还应考虑二层小动物实验区运行对辐射工作人员剂量叠加影响，根据下节计算结果，小动物实验区楼下距地面 1.7m 处的最大剂量率为 $0.104\mu\text{Sv/h}$ （废物库和源库楼下），保守考虑本项目动物 PET 影像区工作人员在控制区内累计停留时间为 500h/a，则工作人员附加剂量约增加 0.052mSv/a。在考虑剂量叠加后，本项目动物 PET 影像区单名药物操作人员的附加有效剂量不超过 0.863mSv/a，单名设备操作人员的附加有效剂量不超过 0.724mSv/a，单名质控人员的附加有效剂量不超过 0.204mSv/a，动物管理人员的附加有效剂量不超过 0.552mSv/a，均满足本评价设定的职业人员 2mSv/a 的剂量约束值要求。本项目动物 PET 影像区辐射工作人员均不从事其他辐射工作，与二层小动物实验区的工作不交叉，不存在其他剂量叠加情况。

上述计算结果主要考虑了辐射影响最大的 ^{18}F 和 ^{44}Sc 两种核素，若考虑其他辐射影响

较小核素的使用，预计本项目实际运行后，辐射工作人员的年有效剂量将低于上述理论计算值。本项目辐射工作人员在上岗前均须通过辐射安全与防护考核，熟悉本项目动物实验操作规程和实验室工作制度，了解实验室各项辐射安全与防护设施和管理措施，充分利用时间防护、距离防护、屏蔽防护的方法降低受照剂量。

11.2.3 小动物实验区辐射环境影响分析

11.2.3.1 工作场所运行规划

本项目小动物实验区工作场所年计划运行 40 周，每周 5 个工作日，年最多运行时间不超过 200 天，拟使用 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 共 6 种放射性核素开展小动物五模态成像实验，拟使用的实验动物均为 SPF 级实验鼠（含小鼠和大鼠）。本项目小动物实验区放射性核素的使用情况详见表 11-13。

表 11-13 本项目小动物实验区放射性核素使用情况

序号	核素种类	物种	每次最大使用量 (Bq)	日最多使用数量 (只)	年最大使用天数 (天)	日最大使用量 (Bq)	用途
1	^{124}I	小鼠	3.70E+06	10	80	1.30E+08	小动物五模态成像实验
		大鼠	1.85E+07	5			
2	^{89}Zr	小鼠	3.70E+06	10	40	7.40E+07	
		大鼠	7.40E+06	5			
3	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	小鼠	7.40E+06	10	80	2.59E+08	
		大鼠	3.70E+07	5			
4	^{111}In	小鼠	7.40E+06	10	80	2.59E+08	
		大鼠	3.70E+07	5			
5	^{131}I	小鼠	1.85E+07	10	80	4.63E+08	
		大鼠	5.55E+07	5			
6	^{177}Lu	小鼠	1.85E+07	10	80	4.63E+08	
		大鼠	5.55E+07	5			

注*：（1）小动物实验区每天使用的实验鼠总量不超过 30 只（20 只小鼠和 10 只大鼠）；
 （2） ^{124}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 实验每周开展 2 次，每种核素每周最多使用 2 天，年最多使用 80 天； ^{89}Zr 实验周期为 5 天，每周开展 1 次，每周最多使用 1 天，年最多使用 40 天；
 （3）开展光声/CT 双模成像的实验动物不注射放射性药物。

本项目小动物实验区每天使用的实验鼠总量不超过 30 只（20 只小鼠和 10 只大鼠），每年最多开展 200 天实验，实验鼠的年使用量累计不超过 4000 只小鼠和 2000 只大鼠；小动物五模态分子成像实验平均用时为 20min/次，每日最多开展 15 次成像实验，每日最长实验时间不超过 5h；小动物多模成像实验平均用时为 10min/次，每日最多开展不超过 30 次实验，每日最长实验时间不超过 5h；放射电子和晶体测试实验室放射性数据测试平均操作

时间不超过 5min/次，每日最多开展 15 次测试，则每日最长实验时间不超过 1.25h；

11.2.3.2 剂量估算方法

在进行工作场所周围附加剂量率估算时，将放射性药物、注射后小动物近似作为点源（药液和实验动物均视为裸源），依照辐射剂量率和距离成平方反比衰减的规律，同时考虑墙壁、防护门窗的屏蔽作用，计算工作场所周围各关注点的附加剂量率，然后结合人员受照时间，估算职业人员和公众的年受照剂量。附加剂量率估算公式见式（11-1），年受照剂量估算见式（11-2），本项目放射性核素计算参数选择详见表 11-14，

表 11-14 本项目动物 PET 影像区放射性核素计算参数

核素	半衰期	大鼠的最大注射量 (Bq)	裸源周围剂量当量率常数* $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{MBq}\cdot\text{h})$	距大鼠 1m 处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	TVL 值厚度* (mm)	
					铅	混凝土
^{124}I	4.18d	1.85E+07	0.185	3.42	31	284
^{89}Zr	3.27d	7.40E+06	0.1944	1.44	33.9	301
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.02h	3.70E+07	0.0303	1.12	1	110
^{111}In	2.805d	3.70E+07	0.0771	3.08	3	145
^{131}I	8.02d	5.55E+07	0.0595	3.30	11	170
^{177}Lu	6.647d	5.55E+07	0.00517	0.26	2	130

注*：（1） ^{124}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 的裸源周围剂量当量率常数取自《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）表 H.1， ^{89}Zr 、 ^{111}In 、 ^{177}Lu 的裸源周围剂量当量率常数取自《辐射安全手册》表 6.2；

（2） $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 的 TVL 值取自 GBZ120-2020 附录 I 表 I.1； ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 ^{111}In 、 ^{177}Lu 的 TVL 值取自《放射性核素和辐射防护数据手册》和《高等电离辐射防护教程》P93、附表 7 和附表 9；

通过表 11-2 的数据可知， ^{124}I 和 ^{89}Zr 两种正电子核素的周围剂量当量率常数、 γ 射线能量和 TVL 数值均明显大于其他核素，因此 ^{124}I 和 ^{89}Zr 对工作场所和周围人员的造成辐射影响最强。因此，本评价保守选取 ^{124}I 和 ^{89}Zr 两种核素代替其他核素辐射环境影响分析，当 ^{124}I 和 ^{89}Zr 核素的使用满足辐射防护要求时，其他核素同样可以满足要求。根据工作场所使用规划，小动物实验区每日最多实施 30 次药物注射（20 只小鼠和 10 只大鼠），按最不利情况进行考虑，即 ^{124}I 和 ^{89}Zr 每日均使用了 15 次（10 只小鼠和 5 只大鼠）；

11.2.3.3 工作场所附加剂量率的计算

（一）手套箱外附加剂量率分析

（1）药物贮存：小动物实验区根据实际用量按需订购放射性药物，每日仅订购当天使用的药物。放射性药物由供药厂家负责于每天早上实验开始前送达，每日送药 1 次。药物均密闭存放于 30mmPb 药物贮存铅罐内，并暂存在动物注射室 40mmPb 的手套箱内；

^{124}I 药物日最大送药量 130MBq，经过药物铅罐和手套箱屏蔽后（70mmPb 的衰减因子为 5.52E-03）， ^{124}I 药物储存期间手套箱外 30cm 处剂量率为 2.07E-01 $\mu\text{Sv/h}$ （距离取 0.8m）；

^{89}Zr 药物日最大送药量 74MBq，经过药物铅罐和手套箱屏蔽后（70mmPb 的衰减因子为 5.52E-03）， ^{89}Zr 药物储存期间手套箱外 30cm 处剂量率为 1.94E-01 $\mu\text{Sv/h}$ （距离取 0.8m）；

另外， ^{131}I 药物每日最大用量为 463MBq，则 ^{131}I 药物储存期间（70mmPb 的衰减因子为 4.33E-07）手套箱外 30cm 处剂量率仅为 1.86E-05 $\mu\text{Sv/h}$ ，远小于 ^{89}Zr 和 ^{124}I 的计算结果，可见，在本项目的实体屏蔽条件下， ^{89}Zr 对工作场所周围产生的外照射影响大于 ^{131}I 。因此选取 ^{124}I 和 ^{89}Zr 代替其他核素进行预测是保守的。

（2）药物分装：本项目放射性药物的分装均动物注射室在 40mmPb 手套箱内进行，每次仅分装 1 次的注射量，即最多只有 18.5MBq 的 ^{124}I 药液或 7.4MBq 的 ^{89}Zr 药液在铅罐外（其余药物都在铅罐内），工作人员的操作距离按 0.6m 计算；考虑分装期间药物铅罐盖处于打开状态时（即药物正上方无铅罐屏蔽）手套箱顶部的附加剂量率。

（3）药物注射：本项目药物注射均动物注射室手套箱内托盘上进行，每次仅操作 1 只实验鼠（按大鼠考虑），最大注射量为 18.5MBq 的 ^{124}I 或 7.4MBq 的 ^{89}Zr ，工作人员的操作距离按 0.6m 计算；

（4）动物手术：本项目实验鼠处死和解剖手术均在 30mmPb 通风橱内进行，每次仅操作 1 只实验鼠（按大鼠考虑），将实验鼠视为裸源，注射 ^{124}I 的大鼠 1m 处剂量率为 3.42 $\mu\text{Sv/h}$ ，注射 ^{89}Zr 的大鼠 1m 处剂量率不超过 1.44 $\mu\text{Sv/h}$ ，手术操作距离按 0.5m 计算；

根据上述源项分析，本项目小动物实验区手套箱外附加剂量率计算结果见表 11-15。

表 11-15 本项目小动物实验区手套箱外附加剂量率估算结果

项目	计算位置	源项* (MBq)		距离 (m)	屏蔽厚度	衰减因子	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	剂量率叠加 ($\mu\text{Sv/h}$)
药物贮存	手套箱正面 30cm 处	^{124}I	130	0.8	30mmPb+40mmPb	5.52E-03	2.07E-01	4.01E-01
		^{89}Zr	74			8.61E-03	1.94E-01	
	手套箱侧面 30cm 处	^{124}I	130	0.8	30mmPb+40mmPb	5.52E-03	2.07E-01	4.01E-01
		^{89}Zr	74			8.61E-03	1.94E-01	
	手套箱顶部 30cm 处	^{124}I	130	1.0	30mmPb+40mmPb	5.52E-03	1.33E-01	2.57E-01
		^{89}Zr	74			8.61E-03	1.24E-01	
药物分装	手套箱正面 人员操作位	^{124}I	18.5	0.6	40mmPb	5.12E-02	4.87E-01	1.15E+00*
		^{89}Zr	7.4			6.60E-02	2.64E-01	
	手套箱侧面 30cm 处	^{124}I	18.5	0.8	40mmPb	5.12E-02	2.74E-01	8.23E-01*
		^{89}Zr	7.4			6.60E-02	1.48E-01	
	手套箱顶部 30cm 处 (源罐开启)	^{124}I	130	1.0	40mmPb	5.12E-02	1.23E+00	2.18E+00
		^{89}Zr	74			6.60E-02	9.49E-01	

药物注射	手套箱正面 人员操作位	¹²⁴ I	18.5	0.6	40mmPb	5.12E-02	4.87E-01	1.15E+00*
		⁸⁹ Zr	7.4			6.60E-02	2.64E-01	
	手套箱侧面 30cm 处	¹²⁴ I	18.5	0.8	40mmPb	5.12E-02	2.74E-01	8.23E-01*
		⁸⁹ Zr	7.4			6.60E-02	1.49E-01	
	手套箱顶部 30cm 处	¹²⁴ I	18.5	1.0	40mmPb	5.12E-02	1.75E-01	5.27E-01*
		⁸⁹ Zr	7.4			6.60E-02	9.50E-02	
动物手术	通风橱正面 人员操作位	¹²⁴ I	18.5	0.5	30mmPb	1.08E-01	1.48E+00	/
		⁸⁹ Zr	7.4			1.30E-01	7.50E-01	
	通风橱侧面 30cm 处	¹²⁴ I	18.5	0.8	30mmPb	1.08E-01	5.77E-01	/
		⁸⁹ Zr	7.4			1.30E-01	2.93E-01	
	通风橱顶部 30cm 处	¹²⁴ I	18.5	1.0	30mmPb	1.08E-01	3.69E-01	/
		⁸⁹ Zr	7.4			1.30E-01	1.87E-01	
注*：（1）考虑最不利情况，即 ¹²⁴ I 和 ⁸⁹ Zr 都达到了每日最大用量； （2）在进行药物分装和药物注射时考虑药物贮存的剂量率叠加。								

由表 11-15 的估算结果可知，在手套箱内进行药物贮存、分装和注射期间，手套箱外表面 30cm 处和人员操作位处的周围剂量当量率满足小于 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制要求；在通风橱内进行动物手术时，通风橱外表面 30cm 处和人员操作位处的周围剂量当量率均满足小于 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制要求。

（二）工作场所各房间周围附加剂量率计算

（1）剂量率估算源强

本项目五模态成像间内同一时间仅有 1 只实验鼠接受显像扫描（均按大鼠考虑），将所有注射后实验鼠视为裸源，注射 ¹²⁴I 的大鼠 1m 处剂量率为 3.42 μ Sv/h，注射 ⁸⁹Zr 的大鼠 1m 处剂量率不超过 1.44 μ Sv/h；放射电子与晶体测试实验室主要用于测定动物组织器官的放射性数据，动物组织器官的放射性活度假设也按活体大鼠考虑。此外，光声/CT 双模成像的实验动物不注射放射性药物，光声/CT 双模成像间内的源项为 CT 设备发射的 X 射线，光声/CT 双模成像间周围剂量率的计算见下节。

动物注射室和动物手术室内同一时间仅操作 1 只实验鼠（均按大鼠考虑）。动物留观室内实验鼠数量较多，所有注射后的实验鼠均置于鼠笼内，在动物留观室的负压通风柜（20mmPb）内进行留观，考虑最不利情况，保守按每天的 30 只实验鼠同时留观，将 15 只 ¹²⁴I 实验鼠整体视为裸源，总活度不超过 130MBq，1m 处的总剂量率为 24.1 μ Sv/h；将 15 只 ⁸⁹Zr 实验鼠整体视为裸源，总活度不超过 74MBq，1m 处的总剂量率为 14.4 μ Sv/h；

(2) 关注点选取

参考 AAPM108 号报告给出关注点选取原则，并结合本项目情况：本次评价工作场所四周的关注点位置取各房间四周屏蔽墙、防护门（窗）外 30cm 处，楼上关注点位置取地面上方 30cm 处，楼下关注点位置取楼下距地面 1.7m 高度处。本项目小动物实验区的各房间净高均为 5.4m，将放射性药物和注射后实验鼠均视为点源（裸源），点源距地面平均高度取 1m。此外，在距离小动物实验区较远的公众长居留场所处也设置有关注点位。本项目小动物实验区工作场所周围关注点示意图见图 11-3。

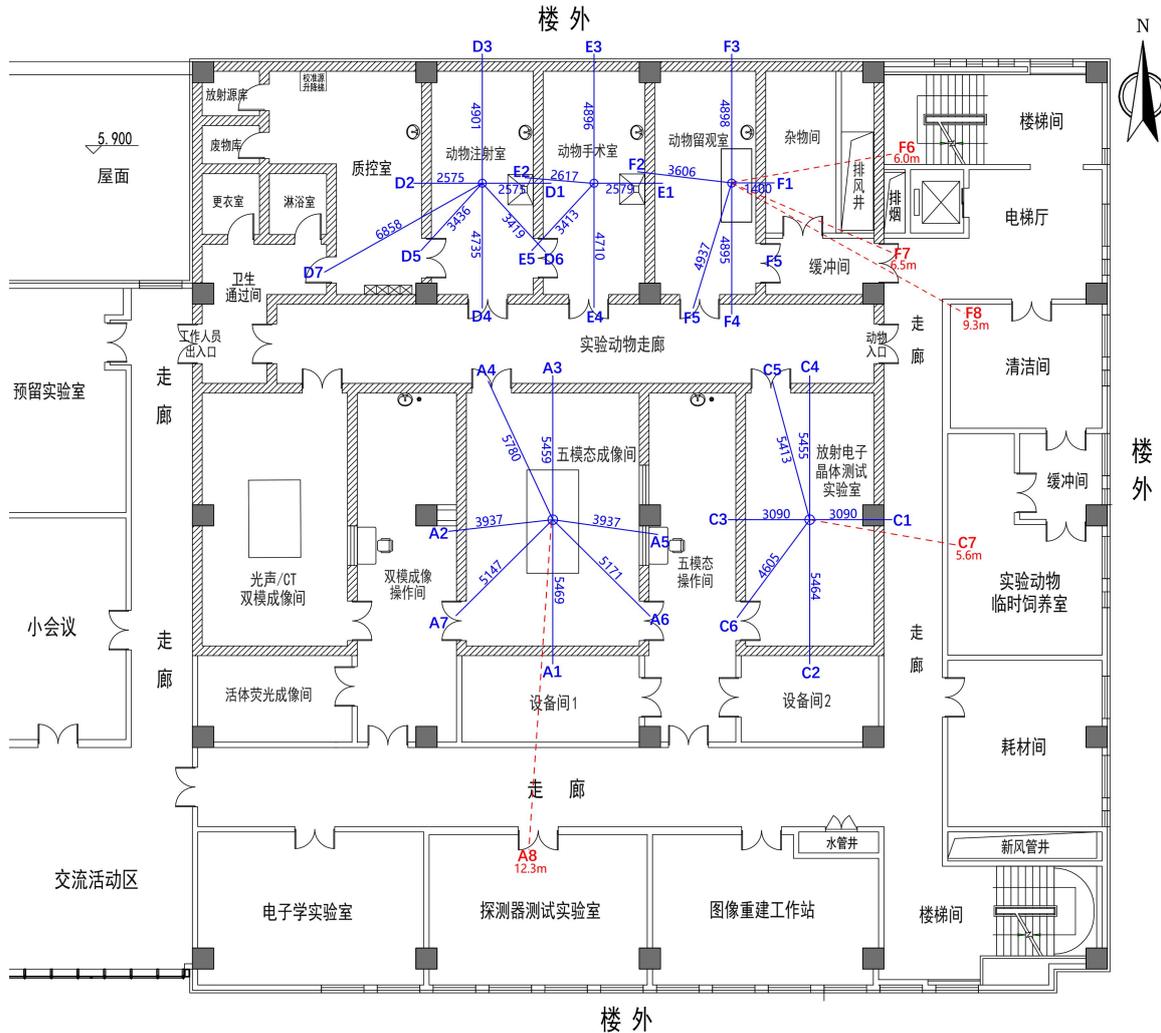


图 11-3 本项目小动物实验区工作场所周围关注点示意图

(3) 工作场所周围附加剂量率计算结果

根据上述源项和公式（11-1），本项目小动物实验区周围以及楼上、楼下各关注点处的附加剂量率估算结果见表 11-16。

表 11-16 本项目小动物实验区周围各关注点附加剂量率估算结果

关注点位置		源项*	距离 (m)	屏蔽材料与厚度*	衰减因子	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	所处区域
五模态成像间	A1 南墙外设备间 1	^{124}I 大鼠 (3.42 $\mu\text{Sv/h}$)	5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	1.16E-02	监督区

(A)	A2 西墙多模成像操作间		3.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	2.23E-02	监督区
	A3 北墙外实验动物走廊		5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	1.16E-02	控制区
	A4 北墙防护门外		5.7	6mmPb	6.40E-01	6.74E-02	控制区
	A5 东墙观察窗外		3.9	6mmPb	6.40E-01	1.44E-01	监督区
	A6 东墙防护门外		5.1	6mmPb	6.40E-01	8.42E-02	监督区
	A7 西墙防护门外		5.1	6mmPb	6.40E-01	8.42E-02	监督区
	A _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板+4mmPb	1.47E-01	2.09E-02	普通场所
	A _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板+4mmPb	1.47E-01	1.86E-02	控制区
	A8 南侧探测器实验室		12.3	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	2.24E-03	普通场所
五模态成像间 (A)	A1 南墙外设备间 1	⁸⁹ Zr 大鼠 (1.44μSv/h)	5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	5.58E-03	监督区
	A2 西墙多模成像操作间		3.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	1.07E-02	监督区
	A3 北墙外实验动物走廊		5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	5.58E-03	控制区
	A4 北墙防护门外		5.7	6mmPb	6.65E-01	2.95E-02	控制区
	A5 东墙观察窗外		3.9	6mmPb	6.65E-01	6.30E-02	监督区
	A6 东墙防护门外		5.1	6mmPb	6.65E-01	3.68E-02	监督区
	A7 西墙防护门外		5.1	6mmPb	6.65E-01	3.68E-02	监督区
	A _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板+4mmPb	1.65E-01	9.90E-03	普通场所
	A _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板+4mmPb	1.65E-01	8.79E-03	控制区
	A8 南侧探测器实验室		12.3	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	1.08E-03	普通场所
放射电子晶体测试实验室 (C)	C1 东墙外走廊	¹²⁴ I 大鼠 (3.42μSv/h)	3.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	3.53E-02	普通场所
	C2 南墙外设备间 2		5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	1.16E-02	监督区
	C3 西墙外五模态操作间		3.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	3.53E-02	监督区
	C4 北墙实验动物走廊		5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	1.16E-02	控制区
	C5 北墙防护门外		5.4	6mmPb	6.40E-01	7.51E-02	监督区
	C6 西墙防护门外		4.6	6mmPb	6.40E-01	1.03E-01	监督区
	C _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板+4mmPb	1.47E-01	2.09E-02	普通场所
	C _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板+4mmPb	1.47E-01	1.86E-02	监督区
	C7 西侧动物临时饲养室		5.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	1.08E-02	普通场所
放射电子晶体测试	C1 东墙外走廊	⁸⁹ Zr 大鼠 (1.44μSv/h)	3.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	1.69E-02	普通场所

实验室 (C)	C2 南墙外设备间 2		5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	5.58E-03	监督区
	C3 西墙外五模态操作间		3.1	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	1.69E-03	监督区
	C4 北墙实验动物走廊		5.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	5.58E-03	控制区
	C5 北墙防护门外		5.4	6mmPb	6.65E-01	3.28E-02	监督区
	C6 西墙防护门外		4.6	6mmPb	6.65E-01	4.53E-02	监督区
	C _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.65E-01	9.90E-03	普通场所
	C _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.65E-01	8.79E-03	监督区
	C7 西侧动物临时饲养室		5.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	5.19E-03	普通场所
动物 注射室 (D)	D1 东墙外动物手术室	¹²⁴ I 大鼠 (3.42μSv/h)	2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	5.01E-02	控制区
	D2 西墙外质控室		2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	5.01E-02	控制区
	D3 北墙楼外		4.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	1.41E-02	普通场所
	D4 南墙防护门外		4.7	6mmPb	6.40E-01	9.91E-02	控制区
	D5 西墙防护门外		3.4	6mmPb	6.40E-01	1.89E-01	控制区
	D6 东墙防护门外		3.4	6mmPb	6.40E-01	1.89E-01	控制区
	D7 质控室入口门外		6.8	6mmPb+6mmPb	4.10E-01	3.03E-02	监督区
	D _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.47E-01	2.09E-02	普通场所
	D _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.47E-01	1.86E-02	控制区
动物 注射室 (D)	D1 东墙外动物手术室	⁸⁹ Zr 大鼠 (1.44μSv/h)	2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	2.41E-01	控制区
	D2 西墙外质控室		2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	2.41E-01	控制区
	D3 北墙楼外		4.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	1.13E-01	6.78E-03	普通场所
	D4 南墙防护门外		4.7	6mmPb	6.65E-01	4.33E-02	控制区
	D5 西墙防护门外		3.4	6mmPb	6.65E-01	8.28E-02	控制区
	D6 东墙防护门外		3.4	6mmPb	6.65E-01	8.28E-02	控制区
	D7 质控室入口门外		6.8	6mmPb+6mmPb	4.43E-01	1.38E-02	监督区
	D _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.65E-01	9.90E-03	普通场所
	D _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.65E-01	8.79E-03	控制区
动物 手术室 (E)	E1 东墙外动物留观室	¹²⁴ I 大鼠 (3.42μSv/h)	2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	5.01E-02	控制区
	E2 西墙外动物注射室		2.6	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	5.01E-02	控制区
	E3 北墙楼外		4.9	236mm 混凝土+40mm 混凝土+1mmPb	9.91E-02	1.41E-02	普通场所

	E4 南墙防护门外		4.7	6mmPb	6.40E-01	9.91E-02	控制区
	E5 西墙防护门外		3.4	6mmPb	6.40E-01	1.89E-01	控制区
	E _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.47E-01	2.09E-02	普通场所
	E _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.47E-01	1.86E-02	控制区
动物 手术室 (E)	E1 东墙外动物留观室	⁸⁹ Zr 大鼠 (1.44μSv/h)	2.6	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+1mmPb	1.13E-01	2.41E-01	控制区
	E2 西墙外动物注射室		2.6	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+1mmPb	1.13E-01	2.41E-01	控制区
	E3 北墙楼外		4.9	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+1mmPb	1.13E-01	6.78E-03	普通场所
	E4 南墙防护门外		4.7	6mmPb	6.65E-01	4.33E-02	控制区
	E5 西墙防护门外		3.4	6mmPb	6.65E-01	8.28E-02	控制区
	E _上 楼上距地 0.3m 处		4.9	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.65E-01	9.90E-03	普通场所
	E _下 楼下距地 1.7m 处		5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb	1.65E-01	8.79E-03	控制区
动物 留观室 (F)	F1 东墙外杂物间	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	1.4	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	2.42E-02	5.26E-01	控制区
		15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	1.4	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	3.11E-02		
	F2 西墙外动物手术室	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	3.6	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	2.42E-02	7.96E-02	控制区
		15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	3.6	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	3.11E-02		
	F3 北墙楼外	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	4.9	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	2.42E-02	4.29E-02	普通场所
		15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	4.9	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	3.11E-02		
	F4 南墙外动物实验走廊	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	4.9	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	2.42E-02	4.29E-02	控制区
		15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	4.9	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	3.11E-02		
	F5 南墙防护门外	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	4.9	6mmPb+20mmPb	1.45E-01	2.48E-01	控制区
		15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	4.9	6mmPb+20mmPb	1.71E-01		
	F _上 楼上距地 0.3m 处	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	4.9	200mm 混凝土楼板 +4mmPb+20mmPb	3.32E-02	5.87E-02	普通场所
		15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	4.9	200mm 混凝土楼板 +4mmPb+20mmPb	4.24E-02		
	F _下 楼下距地 1.7m 处	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb+20mmPb	3.32E-02	5.22E-02	控制区
		15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	5.2	200mm 混凝土楼板 +4mmPb+20mmPb	4.24E-02		
F6 东侧楼梯间	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	6.0	472mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	3.56E-03	4.43E-03	普通场所	
	15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	6.0	472mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	5.12E-03			
F7 东侧缓冲间门外走廊	15 只 ¹²⁴ I 动物 (24.1μSv/h)	6.5	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	2.42E-02	2.44E-02	普通场所	
	15 只 ⁸⁹ Zr 动物 (14.4μSv/h)	6.5	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	3.11E-02			

F8 东侧清洁间	15 只 ^{124}I 动物 (24.1 $\mu\text{Sv/h}$)	9.3	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	2.42E-02	1.19E-02	普通场所
	15 只 ^{89}Zr 动物 (14.4 $\mu\text{Sv/h}$)	9.3	236mm 混凝土+40mm 混 凝土+20mmPb	3.11E-02		
注: 1.灰砂砖密度不低于 1.5t/m ³ , 混凝土密度 2.35t/m ³ , 硫酸钡水泥密度大于 3.2t/m ³ , 铅密度 11.34t/m ³ ; 2.灰砂砖墙和硫酸钡水泥均按密度折算为普通混凝土, 370mm 灰砂砖墙约相当于 236mm 混凝土, 30mm 硫酸钡水泥约相当于 40mm 混凝土;						

由表 11-16 的估算结果可知, 本项目小动物实验区工作场所周围和楼上楼下关注点处的附加剂量率最高为 5.26E-01 $\mu\text{Sv/h}$ (动物留观室东墙外 30cm 处杂物间), 满足本项目小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 的剂量率控制要求。

(三) III类射线装置辐射影响分析

(1) 小动物五模态分子成像设备

本项目五模态分子成像设备的 CT 机最大管电压为 80kV, 最大管电流为 0.7mA, 其运行参数远远低于普通 CT 机。本项目五模态成像间的四周墙体、门窗、屋顶、地板的铅当量厚度均不低于 6mmPb, 依据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)附录 C 计算屏蔽透射因子为 8.00E-10 (管电压保守取 90kV), 设备与成像间外关注点的距离按 3m 估算, 计算可得, 五模态成像间周围关注点的附加剂量率仅为 1.17E-08 $\mu\text{Sv/h}$, 可忽略不计。因此, 在保证辐射防护施工质量的前提下, 小动物五模态分子成像设备的 CT 机运行对周围环境辐射影响可以忽略。

(2) 小动物光声/CT 双模成像设备

本项目小动物光声/CT 双模成像设备的 CT 机最大管电压为 130kV, 最大管电流为 0.3mA。光声/CT 双模成像设备间的四周墙体、门窗、屋顶、地板的铅当量厚度均不低于 6mmPb, 依据《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)附录 C 计算屏蔽透射因子为 2.45E-07 (管电压保守取 140kV), 设备与成像间外关注点的距离按 3m 估算, 计算可得, 光声/CT 双模成像设备间周围关注点的附加剂量率仅为 1.53E-06 $\mu\text{Sv/h}$, 可忽略不计。因此, 在保证辐射防护施工质量的前提下, 小动物光声/CT 双模成像设备运行对周围环境辐射影响可以忽略。

(四) 废物库周围附加剂量率分析

本项目废物库周围的附加剂量率主要由实验动物尸体决定, 本项目所有实验鼠均处死, 实验鼠尸体均密封收集、标注所含核素种类和产生日期后, 转移至废物库冰柜的铅废物箱内冷冻暂存。本项目小动物实验区拟使用的核素包括 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 共 6 种, ^{124}I 核素每周用量最多为 260MBq, ^{89}Zr 核素每周用量最多为 74MBq, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 核素每周用量最多为 518MBq, ^{111}In 核素每周用量最多为 518MBq, ^{131}I 核素每周用量最多为

925MBq, ¹⁷⁷Lu 核素每周用量最多为 925MBq。

保守假设每周使用放射性核素最多有 80%残留在实验鼠尸体或组织内, 随后进入废物库, 考虑到实验动物尸体在废物库内不断累积, 同时尸体放射性活度又随着时间不断衰减, 当工作场所长期连续运行时, 废物库内放射性动物尸体的最大活度理论估算值见表 11-17。

表 11-17 废物库中放射性废物最大活度的理论计算值

核素	半衰期	每周最大用量 (MBq/w)	每周进入废物库的活度 (MBq/w)	衰变常数 (w ⁻¹)	废物库内平衡的活度 (MBq)	将废物视为裸源时 1m 处剂量率 (μSv/h)
¹²⁴ I	4.18d	260	208	1.16	303	56.1
⁸⁹ Zr	3.27d	74	59	1.48	76.4	14.8
^{99m} Tc	6.02h	518	414	19.3	414	12.5
¹¹¹ In	2.805d	518	414	1.73	503	38.8
¹³¹ I	8.02d	925	740	0.605	1630	97.0
¹⁷⁷ Lu	6.647d	925	740	0.73	1428	7.38

注: 达到最大活度的计算方式为: $A = \sum_{t=0}^n A_0 e^{-\lambda t}$, 其中 A_0 表示每周进入废物库的活度, λ 为衰变常数, t 表示时间 (周), A 表示废物库内平衡时的最大活度;

本项目实验鼠尸体和组织均在废物库冰柜的铅废物箱 (防护厚度 30mmPb) 内冷冻暂存, 根据表 11-17 的计算结果, 本项目废物库周围附加剂量率计算结果见表 11-18, 废物库周围关注点位示意图见图 11-4。

表 11-18 本项目小动物实验区废物库周围附加剂量率估算结果

序号	关注点位置	源项	距离 (m)	屏蔽材料与厚度*	衰减因子	附加剂量率 (μSv/h)	总附加剂量率 (μSv/h)
1#	防护门外 30cm 处 (二层质控室)	¹²⁴ I 动物尸体 (56.1μSv/h)	2.3	30mmPb+8mmPb	5.94E-02	6.30E-01	8.48E-01
		⁸⁹ Zr 动物尸体 (14.8μSv/h)			7.57E-02	2.12E-01	
		^{99m} Tc 动物尸体 (12.5μSv/h)			1.00E-38	2.36E-38	
		¹¹¹ In 动物尸体 (38.8μSv/h)			2.15E-13	1.58E-12	
		¹³¹ I 动物尸体 (97μSv/h)			3.51E-04	6.44E-03	
		¹⁷⁷ Lu 动物尸体 (7.38μSv/h)			1.00E-19	1.40E-19	
2#	南墙外 30cm 处 (二层更衣室)	¹²⁴ I 动物尸体 (56.1μSv/h)	1.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+31mmPb	1.07E-02	3.06E-01	4.19E-01
		⁸⁹ Zr 动物尸体 (14.8μSv/h)			1.47E-02	1.11E-01	
		^{99m} Tc 动物尸体 (12.5μSv/h)			3.10E-34	1.98E-33	
		¹¹¹ In 动物尸体 (38.8μSv/h)			5.80E-13	1.15E-11	
		¹³¹ I 动物尸体 (97μSv/h)			3.63E-05	1.80E-03	
		¹⁷⁷ Lu 动物尸体 (7.38μSv/h)			2.38E-18	8.96E-18	

3#	西墙外 30cm 处 (不上人屋面)	¹²⁴ I 动物尸体 (56.1μSv/h)	1.2	236mm 混凝土+40mm 混凝土+31mmPb	1.07E-02	4.17E-01	5.70E-01
		⁸⁹ Zr 动物尸体 (14.8μSv/h)			1.47E-02	1.51E-01	
		^{99m} Tc 动物尸体 (12.5μSv/h)			3.10E-34	2.69E-33	
		¹¹¹ In 动物尸体 (38.8μSv/h)			5.80E-13	1.56E-11	
		¹³¹ I 动物尸体 (97μSv/h)			3.63E-05	2.45E-03	
		¹⁷⁷ Lu 动物尸体 (7.38μSv/h)			2.38E-18	1.22E-17	
4#	北墙外 30cm 处 (放射源库)	¹²⁴ I 动物尸体 (56.1μSv/h)	1.4	236mm 混凝土+40mm 混凝土+31mmPb	1.07E-02	3.06E-01	4.19E-01
		⁸⁹ Zr 动物尸体 (14.8μSv/h)			1.47E-02	1.11E-01	
		^{99m} Tc 动物尸体 (12.5μSv/h)			3.10E-34	1.98E-33	
		¹¹¹ In 动物尸体 (38.8μSv/h)			5.80E-13	1.15E-11	
		¹³¹ I 动物尸体 (97μSv/h)			3.63E-05	1.80E-03	
		¹⁷⁷ Lu 动物尸体 (7.38μSv/h)			2.38E-18	8.96E-18	
5#	楼下距地 1.7m 处 (一层清洁间)	¹²⁴ I 动物尸体 (56.1μSv/h)	4.4	200mm 混凝土 +4mmPb+30mmPb	1.58E-02	4.58E-02	6.25E-02
		⁸⁹ Zr 动物尸体 (14.8μSv/h)			2.15E-02	1.64E-02	
		^{99m} Tc 动物尸体 (12.5μSv/h)			1.52E-36	9.81E-37	
		¹¹¹ In 动物尸体 (38.8μSv/h)			1.94E-13	3.98E-13	
		¹³¹ I 动物尸体 (97μSv/h)			5.40E-05	2.71E-04	
		¹⁷⁷ Lu 动物尸体 (7.38μSv/h)			2.89E-19	1.10E-19	
6#	楼上距地 0.3m 处 (三层配电间)	¹²⁴ I 动物尸体 (56.1μSv/h)	5.2	200mm 混凝土 +4mmPb+30mmPb	1.58E-02	3.28E-02	4.48E-02
		⁸⁹ Zr 动物尸体 (14.8μSv/h)			2.15E-02	1.18E-02	
		^{99m} Tc 动物尸体 (12.5μSv/h)			1.52E-36	7.03E-37	
		¹¹¹ In 动物尸体 (38.8μSv/h)			1.94E-13	2.78E-13	
		¹³¹ I 动物尸体 (97μSv/h)			5.40E-05	1.94E-04	
		¹⁷⁷ Lu 动物尸体 (7.38μSv/h)			2.89E-19	7.89E-20	

注: 1.灰砂砖密度不低于 1.5t/m³, 混凝土密度 2.35t/m³, 硫酸钡水泥密度大于 3.2t/m³;
2.灰砂砖墙和硫酸钡水泥均按密度折算为普通混凝土, 370mm 灰砂砖墙约相当于 236mm 混凝土, 30mm 硫酸钡水泥约相当于 40mm 混凝土。

由表 11-18 的估算结果可知, 本项目小动物实验区废物库四周墙体和防护门外 30cm 处最大附加剂量率为 8.48E-01μSv/h (废物库防护门外 30cm 处), 楼上距地面 30cm 处附加剂量率为 4.48E-02μSv/h, 楼下距地面 1.7m 高度处附加剂量率为 6.25E-02μSv/h, 满足本项目小于 2.5μSv/h 的剂量率控制要求。

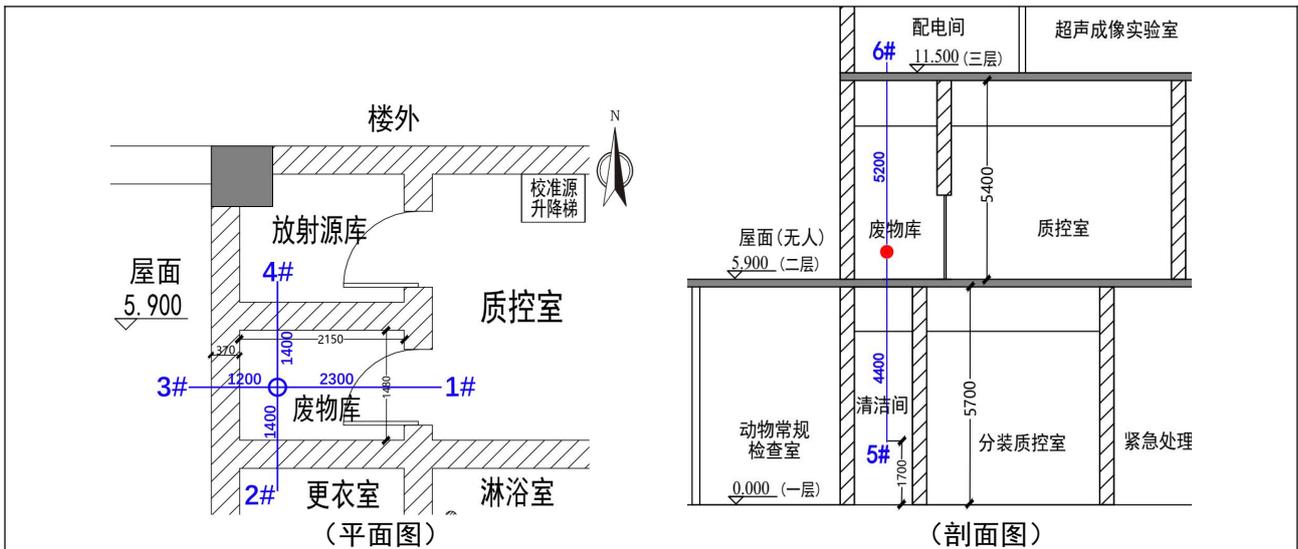


图 11-4 本项目二层废物库周围关注点示意图

本项目小动物实验区废物库与放射源库相邻，应考虑剂量率叠加。根据表 11.5 的计算结果，在考虑剂量率叠加后，废物库和放射源库楼上配电间距地面 30cm 处附加剂量率不超过 $7.00E-02\mu\text{Sv/h}$ ，楼下清洁间距地面 1.7m 高度处附加剂量率不超过 $1.04E-01\mu\text{Sv/h}$ ，西墙外 30cm 处的剂量率不超过 $8.18E-01\mu\text{Sv/h}$ ，均满足小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的剂量率控制要求。

11.2.3.4 公众受照剂量估算

本项目小动物实验区全年计划运行 40 周，每周 5 个工作日，全年运行 200 天。按最不利情况考虑，保守选取 ^{124}I 和 ^{89}Zr 两种高能核素代替其他核素进行计算。本项目小动物实验区各环节工作时间统计如下：

(1) 本项目小动物实验区每日最多使用 30 只动物，年工作 200 天，年使用动物总量不超过 6000 只，假设按 3000 只 ^{124}I 实验鼠和 3000 只 ^{89}Zr 实验鼠进行计算。

(2) 每日最多进行 30 次药物分装和 30 次药物注射，年累计进行 6000 次药物分装和 6000 次，药物分装和药物注射时间均为 1min/次， ^{124}I 药物分装和注射累计不超过 100h/a， ^{89}Zr 药物分装和注射累计不超过 100h/a；

(3) 实验鼠处死手术用时不超过 1min/次，按每日最多处死 30 只实验鼠计算，每日操作时间不超过 30min，年累计操作时长为 100h；实验鼠解剖手术按平均 5min/次计算，每日平均开展 15 次解剖手术，每日解剖手术操作时长不超过 1.25h，则年累计操作时长为 250h；因此，本项目动物处死和解剖手术时间累计不超过 350h/a，其中 ^{124}I 实验鼠手术时长按 175h/a、 ^{89}Zr 实验鼠手术时长按 175h/a 进行计算。

(4) 小动物五模态分子成像实验平均用时为 10min/次，保守按每日最多开展 30 次实验，年累计实验时间不超过 1000h（假设按 ^{124}I 和 ^{89}Zr 各 500h 进行计算）；放射电子实验

室测试最多不超过 10min/次，每日最多开展 15 次测试，年累计实验时间不超过 500h（假设按 ^{124}I 和 ^{89}Zr 各 250h 进行计算）；

（5）动物留观室： ^{124}I 实验鼠平均留观时间为 1h，按每天 15 只 ^{124}I 实验鼠同时留观，年累计留观时间 200h 进行计算； ^{89}Zr 实验鼠留观时间较长，动物留观室楼上小动物高频超声室内公众的停留时间按 1600h/a 计算。

（6）本项目放射源库和废物库正上方为三层配电间，配电间内公众的停留时间按 360h/a（保守按每日停留 1h）估算。

本项目小动物实验区工作场所各出入口处均设有门禁，公众无法进入，公众人员仅会在小动物实验区的周边和楼上区域活动和停留。根据上述工作时间和表 11-16 和 11-18 的附加剂量率计算结果，本项目小动物实验区周围公众的年受照剂量的估算结果见表 11-19。

表 11-19 本项目小动物实验区公众年成员受照剂量估算结果

方位	关注点位*	最大附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		年最大受照时间 (h/a)	居留因子	年最大受照剂量* (mSv/a)
五模态成像间南侧各实验室区域	A8	^{124}I	2.24E-03	500	1	1.66E-03
		^{89}Zr	1.08E-03	500		
五模态成像间楼上室内庭院	A _上	^{124}I	2.09E-02	500	1/4	3.85E-03
		^{89}Zr	9.90E-03	500		
放射电子实验室东侧走廊	C1	^{124}I	3.53E-02	250	1/16	1.53E-03* (与一层叠加)
		^{89}Zr	1.69E-02	250		
放射电子实验室东侧动物临时饲养室	C7	^{124}I	1.08E-02	250	1/4	3.85E-03* (与一层叠加)
		^{89}Zr	5.19E-03	250		
放射电子实验室楼上室内庭院	C _上	^{124}I	2.09E-02	250	1/4	1.93E-03
		^{89}Zr	9.90E-03	250		
动物注射室和手术室楼上超声成像实验室	D _上	^{124}I	2.09E-02	100	1	8.47E-03
		^{89}Zr	9.90E-03	100		
	E _上	^{124}I	2.09E-02	175		
		^{89}Zr	9.90E-03	175		
动物留观室东侧楼梯间	F6	^{124}I	2.38E-03	200	1/16	2.35E-04
		^{89}Zr	2.05E-03	1600		
动物留观室东侧缓冲间门外走廊	F7	^{124}I	1.38E-02	200	1/16	1.23E-03
		^{89}Zr	1.06E-02	1600		
动物留观室东侧清洁间	F8	^{124}I	6.74E-03	200	1/4	5.26E-03* (与一层叠加)
		^{89}Zr	5.18E-03	1600		
动物留观室楼上小动物高频超声室	F _上	^{124}I	3.33E-02	200	1	4.73E-02
		^{89}Zr	2.54E-02	1600		
废物库、放射源库楼上配电间	/	/	7.00E-02	360	/	2.52E-02

注*：（1）各关注点位处的附加剂量率考虑剂量叠加；

（2）放射电子实验室东侧区域考虑一层 PET/MRI 运行的叠加影响，见表 11-8。

根据表 11-19 的估算结果可知，本项目小动物实验区周围公众的受照剂量不超过 4.73E-02mSv/a（动物留观室楼上小动物高频超声室），估算结果均满足本项目 0.1mSv/a 的公众剂量约束值。

11.2.3.5 职业人员附加剂量估算

在进行辐射工作人员附加剂量估算时，按最不利情况考虑，保守选取 ^{124}I 和 ^{89}Zr 两种高能核素代替其他核素进行计算。本项目小动物实验区每日最多使用 30 只动物，年工作 200 天，年使用动物总量不超过 6000 只，假设按 3000 只 ^{124}I 实验鼠和 3000 只 ^{89}Zr 实验鼠进行计算。根据以下工作环节估算本项目小动物实验区辐射工作人员的受照剂量：

(1) 药物分装和注射环节的受照剂量：

拟使用的放射性药物分装和放射性药物注射均在手套箱内进行，年累计进行 6000 次药物分装和 6000 次药物注射，药物分装和药物注射时间均为 1min/次，则年累计药物分装和药物注射总时间不超过 200h；药物分装和药物注射时，手套箱外人员操作位的剂量率保守按 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 考虑，则药物分装和注射环节工作人员的附加剂量不超过 500 $\mu\text{Sv/a}$ ；

(2) 动物转运环节的受照剂量：

本项目实验鼠（或组织器官）的转运均使用专用的动物转运容器（防护厚度 10mmPb），动物运输期间，工作人员使用手推车进行运输（平均距离取 0.6m），先将实验鼠运送至动物留观室，留观完成后送至五模态成像间，成像完成后送回动物手术室处死或解剖，最后将动物尸体运送至废物库冰柜，完成上述动物转运过程的总运输时间按 3min/只计算。

假设按每年 3000 只 ^{124}I 实验鼠（1000 大鼠和 2000 小鼠）计算， ^{124}I 实验鼠累计运输时间为 150h/a，其中大鼠运输 50h/a，小鼠运输 100h/a；假设按 3000 只 ^{89}Zr 实验鼠（1000 大鼠和 2000 小鼠）计算， ^{89}Zr 实验鼠累计运输时间为 150h/a，其中大鼠运输 50h/a，小鼠运输 100h/a；根据上述假设，动物转运环节工作人员受照剂量估算结果见表 11-20。

表 11-20 小动物实验区动物转运环节工作人员受照剂量

工作内容	核素种类	最大注射活度 (MBq)	10mmPb 衰减因子	距离 (m)	操作位剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年运输时间 (h/a)	受照剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)	
动物转运	^{124}I	大鼠	18.5	4.76E-01	0.6	4.52	50	226
		小鼠	3.7	4.76E-01	0.6	0.91	100	91
	^{89}Zr	大鼠	7.4	5.07E-01	0.6	2.04	50	102
		小鼠	3.7	5.07E-01	0.6	1.02	100	102
总计							521	

(3) 动物手术环节的受照剂量

实验鼠的处死和解剖均在动物手术室通风橱内的托盘上进行，实验鼠处死手术用时不超过 1min/次，按每日最多处死 30 只实验鼠计算，每日操作时间不超过 30min，年累计操作时长为 100h；实验鼠解剖手术按平均 5min/次计算，每日平均开展 15 次解剖手术，每日解剖手术操作时长不超过 1.25h，则年累计操作时长为 250h；因此，本项目动物处死和解剖手术时间累计不超过 350h/a，动物手术室通风橱外人员操作位的剂量率按均 2.5 μ Sv/h 保守考虑，则动物手术环节工作人员的附加剂量不超过 2.5 μ Sv/h \times 350h/a=875 μ Sv/a。

(4) 动物摆位环节的受照剂量

① 小动物五模态成像实验每日最多开展 30 次实验，摆位时间为 1min/次，工作人员摆位距离取 0.5m。由于 ^{124}I 实验鼠和 ^{131}I 实验鼠的周围剂量率最高（无屏蔽时），因此每日的 30 只实验鼠按 15 只 ^{124}I 实验鼠和 15 只 ^{131}I 实验鼠保守计算，假设每年完成 3000 只 ^{124}I 实验鼠摆位（1000 大鼠和 2000 小鼠），则 ^{124}I 实验鼠累计摆位时间为 50h/a，其中大鼠摆位 16.7h/a，小鼠摆位 33.3h/a；假设每年完成 3000 只 ^{131}I 实验鼠摆位（1000 大鼠和 2000 小鼠），则 ^{131}I 实验鼠累计摆位时间为 50h/a，其中大鼠摆位 16.7h/a，小鼠摆位 33.3h/a；

② 在放射电子实验室内进行放射性测试时，工作人员需要将装有动物组织器官的样品盒放入测试仪器内，测试完成后取出样品盒，每次操作样品盒的时间取 1min/次，年最多操作 3000 次，累计操作时间为 50h/a，样品盒外剂量率保守均按 2.5 μ Sv/h 考虑。

根据上述分析，本项目动物摆位环节工作人员受照剂量估算结果见表 11-21。

表 11-21 小动物实验区动物摆位环节工作人员受照剂量

工作内容	核素种类	距动物 1m 处剂量率 (μ Sv/h)	距离 (m)	操作位剂量率 (μ Sv/h)	年操作时间 (h/a)	年受照剂量 (μ Sv/a)
五模态成像实验 动物摆位	^{124}I	大鼠	3.42	0.5	13.7	16.7
		小鼠	0.68	0.5	2.74	33.3
	^{131}I	大鼠	3.30	0.5	13.2	16.7
		小鼠	1.10	0.5	4.4	33.3
放射性测试	\	\	\	2.5	50	125

(5) 隔室操作环节的受照剂量

小动物五模态分子成像实验平均用时为 10min/次，保守按每日最多开展 30 次实验，年累计实验时间不超过 1000h；光声 CT 双模成像实验平均用时为 20min/次，每日最多开展 15 次成像实验，年累计实验时间为 1000h；放射电子实验室测试实验最多不超过 10min/次，每日最多开展 15 次测试，年累计实验时间不超过 500h；由于五模态操作间与放射电子实验室操作间存在共用情况，五模态操作间内的工作人员考虑剂量叠加；本项目设备操作环节工作人员附加剂量计算结果见表 11-22。

表 11-22 本项目设备操作环节工作人员年附加剂量估算

位置	最大附加剂量率 (μ Sv/h)	年累计工作时间 (h/a)	年附加剂量 (μ Sv/a)
----	-----------------------	---------------	---------------------

五模态操作间	1.44E-01 (成像)	1000	196
	1.03E-01 (测试)	500	
双模成像操作间	8.42E-02	1000	84.2

(6) 小动物实验区工作人员受照剂量总结

综合以上分析，本项目小动物实验区工作人员附加有效剂量总结见表 11-23。

表 11-23 本项目小动物实验区工作人员附加有效剂量总结

人员岗位	工作环节		最大附加剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)	总附加剂量 (mSv/a)	轮换情况
药物操作人员	药物分装和注射		500	1.896	2 人轮换 (单人 0.948mSv)
	注射后动物转运		521		
	动物手术		875		
设备操作人员	五模态成像实验	动物摆位	687	1.008	2 人轮换 (单人 0.504mSv)
		设备操作	196		
		放射性测试	125		
	多模态成像实验	设备操作	84.2	0.084	2 人轮换 (单人 0.042mSv)

由表 11-23 的计算结果可知，本项目小动物实验区药物操作人员的附加有效剂量不超过 0.948mSv/a，设备操作人员的附加有效剂量不超过 0.504mSv/a。

本项目小动物实验区控制区楼下正对动物 PET 影像区，还应考虑一层动物 PET 影像区运行对辐射工作人员附加剂量的叠加影响，根据上节的计算结果，动物 PET 影像区楼上距地面 0.3m 处的最大附加剂量率为 $2.17\text{E-}01\mu\text{Sv/h}$ （动物观察室楼上），保守辐射工作人员在工作人员在控制区内累计停留时间为 500h/a，则工作人员附加剂量约增加 0.11mSv/a。在考虑剂量叠加后，本项目小动物实验区药物操作人员的附加有效剂量不超过 1.06mSv/a，设备操作人员的附加有效剂量不超过 0.614mSv/a，均满足本评价设定的职业人员 2mSv/a 的剂量约束值要求。本项目小动物实验区工作人员均不从事其他辐射工作，与一层动物 PET 影像区的工作不交叉，不存在其他剂量叠加情况。

上述计算结果主要选取辐射影响较大的 ^{124}I 、 ^{89}Zr 等高能核素代替其他核素进行分析，实际情况下，若考虑 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{177}Lu 等低能核素和个人防护用品的使用，预计实际运行后，本项目辐射工作人员的年有效剂量将低于上述理论计算值。本项目辐射工作人员在上岗前须通过辐射安全与防护考核，熟悉本项目动物实验操作规程和工作制度，了解各项辐射安全与防护设施和管理措施，充分采取时间防护、距离防护、屏蔽防护的方法降低受照剂量。

11.2.4 辐射工作人员和公众的附加剂量汇总

综合 11.2.2 节和 11.2.3 节的计算结果，本项目各辐射工作场所运行期间，辐射工作人

员和周围公众的年最大附加剂量汇总结果见表 11.24。

表 11.24 本项目辐射工作人员和公众年最大附加剂量汇总结果

辐射工作场所	人员类别	最大附加剂量 (mSv/a)	剂量约束值 (mSv/a)	
动物 PET 影像区	辐射工作人员	药物操作人员	0.863	2
		设备操作人员	0.724	
		质控人员	0.204	
		动物管理人员	0.552	
	公众	2.60E-02	0.1	
小动物实验区	辐射工作人员	药物操作人员	1.06	2
		设备操作人员	0.614	
	公众	4.73E-02	0.1	

由表 11.24 的汇总结果可知，本项目各辐射工作场所运行期间，辐射工作人员和公众的最大附加剂量均低于本评价设定的职业人员 2mSv/a 和公众 0.1mSv/a 的剂量约束值要求。

11.3 放射性“三废”环境影响分析

11.3.1 放射性固废环境影响分析

(一) 动物 PET 影像区

(1) **放射性固体废物**：主要包括放射性药物分装和注射期间产生的废注射器、针头、空药瓶、吸水纸、口罩和被污染的一次性用品等。本项目动物 PET 影像区全年最多开展 2000 次 PET 成像研究实验，每年最多进行 2000 次药物分装和药物注射，平均每次产生放射性固体废物保守按 20g（含注射器等）计算，预计年产生量约为 40kg；上述放射性固体废物先收集到分装质控室和动物注射室的铅废物桶内，于每周一工作开始前密封打包，并标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物间的铅废物大桶内暂存；

(2) **动物废物**：主要包括动物在实验和暂养期间产生的含少量排泄物的动物垫料和吸水纸、动物毛发、食物残渣、清理污物产生的擦拭用品等污物。对于上述动物废物，平均每日产生量保守取 0.1kg/只，按最多有 20 只实验猴（10 只实验+10 只暂养）计算，每日产生量不超过 2kg，预计年产生总量不超过 730kg（保守按全年 365 天计算）。本项目动物废物清理和收集于每天实验开始前进行，动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室内各配备 1 个铅废物桶，上述动物废物应消毒后暂时收集到铅废物桶内，待当天的清理工作全部完成后，将所有动物废物密封打包，标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物间的铅废物桶内暂存；

(3) **固废暂存与解控**：放射性固废和动物废物均在废物间的铅废物桶内暂存，废物间内配备 2 个铅废物桶轮流使用。本项目动物 PET 影像区拟使用的放射性核素半衰期均小于

24h，所有放射性固废和动物废物暂存超过 30 天后，使用经检定或校准合格的仪器进行监测，废物表面的辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可对废物进行清洁解控，作为医疗废物处理。放射性废物的清洁解控工作均安排在非实验期间进行。

(3) 实验猴返回动物中心的辐射影响：本项目动物 PET 影像区使用的实验猴不进行人为处死，每批实验猴完成实验任务后，于第二天早上全部转移至动物暂养室内暂养，暂养时间不低于 1 个月后，经监测动物体表的辐射剂量率和 β 表面污染均处于极低水平（即可作为普通实验动物无限制使用），方可将该批实验猴送回 5#楼模式动物中心。本评价对实验猴返回动物中心的辐射影响进行分析，选取 1 只实验猴作为参考，假设该参考猴体内的放射性核素活度为 370MBq （远大于本项目药物注射活度），则暂养 1 个月后，该参考猴体内残余放射性核素活度的理论计算结果见表 11-25。

表 11-25 本项目实验猴暂养 1 个月后体内残余活度和体外剂量率

核素	半衰期	暂养开始时体内活度 (Bq)	暂养时间 (d)	活度衰减系数*	暂养后体内残余活度 (Bq)	体外 1m 处剂量率 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	GB18871 豁免活度*	GB18871 豁免活度浓度*
^{18}F	109.8min	$3.70\text{E}+08$	30	$2.65\text{E}-119$	$9.81\text{E}-111$	$1.40\text{E}-105$	$1\text{E}+06$	$1\text{E}+01$
^{68}Ga	67.71min	$3.70\text{E}+08$	30	~ 0	~ 0	~ 0	/	/
^{64}Cu	12.7h	$3.70\text{E}+08$	30	$8.58\text{E}-18$	$3.18\text{E}-09$	$9.21\text{E}-17$	$1\text{E}+06$	$1\text{E}+02$
^{82}Rb	76s	$3.70\text{E}+08$	30	~ 0	~ 0	~ 0	/	/
^{44}Sc	3.97h	$3.70\text{E}+08$	30	$2.54\text{E}-55$	$9.40\text{E}-47$	$2.61\text{E}-53$	/	/

注*：（1）仅考虑该核素的物理半衰期，不考虑放射性核素随排泄物排出体外；

（2）“/”表示 GB18871 中未给出该核素的豁免指导水平。

根据表 11-25 可以看出，本项目实验猴暂养 1 个月后，猴子体内残留的放射性活度和体外剂量率均接近于 0。按每年最多 120 只（12 批）猴子被送回动物中心，且被送回的猴子均被作为普通实验动物无限制使用，则在任何可能使用条件下，对公众成员造成的有效剂量也接近于 0，符合 GB18871 中附录 A 中给出的豁免准则和豁免水平要求。由上述分析可知，实验猴返回动物中心不会对环境和公众人员造成额外的辐射影响。

(4) 实验猴尸体废物说明：本项目实验猴在实验和暂养期间可能会出现意外死亡，保守按每年意外死亡 5 只实验猴，实验猴平均体重保守取 7kg（主要为恒河猴或食蟹猴），则每年产生的实验动物尸体不超过 35kg。意外死亡的实验猴尸体应先进行消毒，然后密封收集、标注所含核素种类和尸体产生日期后，送至一层废物间的冰柜内冷冻暂存，冷冻暂存超过 30 天后，经检测尸体表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，方可实施清洁解控，解控的动物尸体返回 5#模式动物中心废物库，按模式动

物中心动物尸体的规定妥善处理。

(5) 放射性固废台账记录和实验动物台账记录

① 本项目动物 PET 影像区拟建立《放射性固废暂存和处置管理台账》，详细记录放射性固体废物（或动物尸体）的废物种类、所含的核素名称、重量、废物暂存的起始日期、责任人员、解控日期和监测结果等信息；

② 本项目动物 PET 影像区拟建立《实验动物出入管理台账》，每批送达的实验猴和每批送回的实验猴均应形成台账记录（每批实验猴登记一行台账），台账记录内容主要包括：每批送达实验猴数量、送达日期、每批送回实验猴数量、暂养起始日期、监测结果、送回日期、责任人员等信息。实验或暂养期间意外死亡实验猴应在台账中详细备注。

(6) 其他放射性废物：本项目一层工作场所排风系统楼顶排风口的 1 个活性炭过滤器（滤芯重量 5kg）、手套箱的 1 个高效过滤器（滤芯重量 2kg）、手套箱独立排风管道的 1 个活性炭过滤器（滤芯重量 2kg），每年均更换 1 次，预计每年将额外产生约 9kg 的固体废物。上述 3 处废弃滤材应妥善收集，密封包装后暂存于一层废物间内，暂存时间不少于 30 天后，经监测废弃滤材表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可实施清洁解控，并按危险废物处理；本项目达到使用寿命的 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器暂存在手套箱内，在下次送药时由供药单位负责回收处理；退役的 ^{68}Ge 和 ^{22}Na 校准源应及时送交北京市城市放射性废物库贮存。

(二) 小动物实验区

(1) 放射性固体废物：主要包括放射性药物操作期间的产生的废弃注射器、针头、吸水纸、手套和被污染的一次性用品等。本项目小动物实验区全年最多使用 6000 只实验鼠，每年最多进行 6000 次药物分装和药物注射，平均每次产生放射性固体废物保守按 10g（含注射器、吸水纸等）计算，预计年产生量约为 60kg；上述放射性固体废物先收集到动物注射室的铅废物桶内，于每周一工作开始前密封打包，并标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物间的铅废物桶内暂存；

(2) 动物废物：主要包括动物留观、解剖和实验期间产生的动物排泄物、动物毛发、食物残渣、废弃垫料、含动物排泄物或血液的吸水纸、清理污物产生的擦拭用品等污物，对于上述动物废物，产生量保守按动物体重的 10% 计算，预计年产生总量约 64kg。本项目动物手术室、动物留观室、放射电子和晶体测试实验室各配备 1 个铅废物桶，上述动物废物应先进行消毒，然后收集到各房间的铅废物桶内，并于当天实验工作结束后密封打包，标注所含核素种类和产生日期后，转移至废物间的铅废物桶内暂存；

(3) 固废暂存与解控：放射性固废和动物废物均在废物间的铅废物桶内暂存，废物库内配备 2 个铅废物桶，用于轮流暂存放射性固体废物。本项目含 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 ^{111}In 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 核素的固体废物暂存不少于 180 天（均按含 ^{131}I 核素的固体废物考虑）后，使用经检定或校准合格的仪器进行监测，废物表面的辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，可对废物进行清洁解控，作为医疗废物处理。建立放射性固体废物暂存和处置管理台账，详细记录内容包括放射性固体废物所含的核素名称、重量、废物暂存的起始日期、责任人员、解控日期、辐射剂量率和 β 表面污染监测结果等信息。放射性废物的解控均安排在非实验期间进行。

(4) 动物尸体废物：本项目小动物实验区全年至多使用 4000 只小鼠和 2000 只大鼠，均由大成像设施 5#楼的模式动物中心提供。本项目使用小鼠的体重约 20~40g（平均体重取 30g），大鼠体重一般在 170g~350g 不等（平均体重取 260g），所有实验鼠在完成实验后全部处死，则年产生的动物尸体废物（含组织器官）最多约 640kg。

实验动物尸体及组织应先进行消毒，然后装入密封袋，标注所含核素种类和尸体产生日期，随后转移至废物库的冰柜内冷冻暂存。本项目小动物实验区废物库设置 1 个容积 600L 的冰柜，冰柜内设置 2 个铅废物箱，用于轮流贮存实验动物尸体。本项目实验鼠尸体废物计划暂存不少于 180 天（按每半年为周期实施解控）后，经检测废物表面辐射剂量率处于环境本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，方可实施清洁解控，解控的动物尸体返回 5#模式动物中心废物库，按动物中心动物尸体的规定妥善处理。建立放射性固废和动物尸体暂存和处置管理台账，详细记录实验动物尸体所含核素名称、重量、废物暂存的起始日期、责任人员、解控日期和辐射剂量率和 β 表面污染监测结果等信息。

(5) 动物尸体的暂存和解控分析：

本项目实验鼠尸体所含核素按半衰期最长的 ^{131}I 考虑： ^{131}I 的最大注射量为 $5.55\text{E}+07\text{Bq}$ /只（大鼠）和 $1.85\text{E}+07\text{Bq}$ /只（小鼠），实验鼠尸体暂存不低于 180 天后，放射性活度将衰减为 9.27Bq /只和 3.09Bq /只，活度浓度约 $0.036\text{Bq}/\text{g}$ （大鼠按 260g）和 $0.103\text{Bq}/\text{g}$ （小鼠按 30g），远低于 GB18871 中 ^{131}I 的豁免活度和豁免活度浓度要求（ ^{131}I 豁免活度为 $1.0\text{E}+06\text{Bq}$ ，豁免活度浓度为 $1.0\text{E}+02\text{Bq}/\text{g}$ ），可满足清洁解控要求。

本项目小动物实验区每半年产生的动物尸体废物最多不超过 320kg，体积约 320L。本项目二层废物库拟设置 1 个容积 600L 的冰柜，冰柜内设置 2 个 300L 铅废物箱，预计可满足本项目动物尸体冷冻暂存的要求。

(6) 废弃滤材：本项目二层工作场所排风系统楼顶排风口的 1 个活性炭过滤器（滤芯

重量 5kg)、动物注射室手套箱的 1 个高效过滤器(滤芯重量 2kg)、手套箱独立排风管道的 1 个活性炭过滤器(滤芯重量 2kg)、动物手术室通风橱的 1 个高效过滤器(滤芯重量 2kg)、动物留观室负压通风柜的 1 个高效过滤器(滤芯重量 2kg), 每年均更换 1 次, 预计每年将额外产生约 13kg 的固体废物。上述 5 处废弃滤材应妥善收集, 密封包装后暂存于二层废物库内, 暂存时间 180 天(按含 ^{131}I 核素的固废进行管理)后, 经监测滤材表面辐射剂量率为所处环境的本底水平且 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时, 可实施解控并按危险废物处理;

(三) 本项目放射性固废情况统计

根据以上分析, 本项目产生的放射性废物类别、年最大产生量、暂存和解控管理要求的统计情况见表 11-26。

表 11-26 本项目放射性固废统计和管理要求

工作场所	废物类别	最大产生量 (kg/a)	暂存位置	最低暂存时间	解控后要求
一层 动物 PET 影像区	一般放射性固废	40	一层废物间	30 天	按医疗废物处理
	动物废物	730			按医疗废物处理
	动物尸体	35			返回动物中心废物库
	废弃滤材	9			按危险废物处理
二层 小动物实验区	一般放射性固废	60	二层废物库	180 天	按医疗废物处理
	动物废物	64			按医疗废物处理
	动物尸体	640			返回动物中心废物库
	废弃滤材	13			按危险废物处理

11.3.2 放射性废水环境影响分析

本项目拟新建 2 套独立的放射性废水衰变池, 其中 1#衰变池用于一层动物 PET 影像区废水的收集(总容积 12m^3 , $4\text{m}^3/\text{罐}\times 3$ 罐), 2#衰变池用于二层小动物实验区废水的收集(总容积 12m^3 , $4\text{m}^3/\text{罐}\times 3$ 罐)。2 套衰变池均为地埋式, 位于 1#医学成像楼北侧的绿化带内。

(一) 动物 PET 影像区

(1) 放射性废水产生量

动物 PET 影像区产生的废水主要包括: 各动物观察室、暂养室洗污间产生的冲厕废水、洗污废水、冲洗拖布废水, 分装质控室、注射室的洗手池废水, 清洁间产生的洗污废水, 淋浴室的应急淋浴废水, 上述废水均排入 1#衰变池。

本项目动物 PET 影像区内最多有 20 只实验猴同时停留, 其中 2 间动物观察室各 5 只, 动物暂养室内最多 10 只, 预计各观察室和暂养室内全年均有实验猴停留。实验猴观察和暂

养期间产生的排泄物（包括粪便和尿液）由猴笼底部的不锈钢托盘收集，工作人员于每日早上实验开始前，将每个托盘内的排泄物倒入洗污间的便池内。上述过程中，每只实验猴每日排泄量保守按 0.5L 计算（含尿液和粪便），20 只实验猴每日排泄物的体积约 10L，全年产生排泄物约 3.65m³；洗污间冲厕用水不超过 10L/次，按 2 间动物观察室洗污间各冲厕 1 次、动物暂养室洗污间冲厕 2 次考虑，每天最多冲厕 4 次，全年产生冲厕废水约 14.6m³；猴笼托盘刷洗用水按 1L/个，每天最多清洗 20 个，全年产生洗污废水约 7.3m³；每日对各动物房间和洗污间的地面、台面进行 1 次拖洗，会产生冲洗墩布废水，清理工作完成后还会产生工作人员洗手废水，对于这些废水，按每个房间每天平均产生 30L 计算，3 个房间每日平均产生 90L 废水，全年产生废水量约 32.8m³；此外，高活区洗手池的工作人员洗手废水按 20L/d，年累计产生废水 4m³，清洁间墩布池废水按 20L/d，累计产生废水 6m³，此外，保守假设每年出现 1 次应急情况，应急废水排放量 0.2m³。

综上，本项目动物 PET 影像区产生放射性废水总量为 68.6m³/a。

（2）放射性废水达标排放分析

本项目 1#衰变池有效容积为 4m³/罐×3 罐，总容积为 12m³，动物 PET 影像区放射性废水总量为 68.6m³/a，废水注满单个衰变罐约需 0.7 个月，放射性废水最长可在衰变池内停留 42 天（即 1.4 个月），满足放射性废水暂存时间超过 30 天的要求，可达标排放。

本项目 1#衰变池放射性废水暂存衰变超过 30 天后可直接解控排放，排入大成像设施配套的污水处理站，最终排入市政管网。工作人员详细记录“放射性废水暂存和解控管理台账”，记录内容包括废水所含核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。

（二）小动物实验区

（1）放射性废水产生量

小动物实验区产生的废水主要包括：动物注射室、动物手术室、动物留观室、质控室的工作人员洗手池废水，工作场所的洗污废水，以及淋浴室应急淋浴废水等；

本项目小动物实验区每日使用的动物数量不超过 30 只，全年实验次数不超过 6000 次。本项目动物注射室工作人员每次洗手用水 0.5L，每天最多进行 30 次药物分装和注射，洗手废水为 15L/d，年累计产生废水约 3m³；动物手术室工作人员洗手用水按 0.5L/次，手术器具和托盘清洗用水按 0.5L/次，每天最多进行 15 次解剖手术，则年累计产生废约水 3m³；质控室洗手池废水按 10L/d 进行计算，年累计产生废水约 2m³；在每日实验全部结束后对工作场所进行 1 次清洁，对工作场所地面、设备台面、动物容器等进行擦拭去污，每日总用

水量不超过 30L，年累计产生废水约 6m³；此外，保守假设每年出现 1 次应急情况，应急废水排放量 0.2m³。

综上，本项目小动物实验区满负荷运行时产生放射性废水总量为 14.2m³/a。

(2) 放射性废水达标排放分析

本项目 2#衰变池有效容积为 4m³/罐×3 罐，总容积为 12m³，小动物实验区放射性废水总量为 14.2m³/a，放射性废水注满单个衰变罐约需 3.4 个月，放射性废水最长可在衰变池内停留 204 天（即 6.8 个月），满足放射性废水暂存时间不低于 180 天（按含 ¹³¹I 核素的废水考虑）的要求。

本项目小动物实验区 ¹³¹I 核素的日用量最高，本评价对解控废水中的 ¹³¹I 活度浓度进行简单估算，参考《核医学放射性废水槽式衰变池容积的评价与设计》（中华放射医学与防护杂志,2022,42(3):219-224）中推荐的方法，本项目小动物实验区放射性废水中 ¹³¹I 的放射性活度浓度计算方法如下：

$$C = \frac{1000A}{V} \quad (11-3)$$

$$A = \frac{A_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) \cdot e^{-\lambda t_2} \quad (11-4)$$

式中：C— 解控前废水中 ¹³¹I 核素的放射性活度浓度，Bq/L；

A— 解控前废水中 ¹³¹I 核素的放射性活度，MBq；

V— 单个衰变槽的有效容积，本项目取 4.0m³；

A₀— 单位时间（天）内注入衰变池的 ¹³¹I 活度，MBq/d。本项目 ¹³¹I 核素的单日的最大用量为 925MBq，保守假设：¹³¹I 核素每天均使用且单日最大用量的 80%均排入衰变池，则平均每日注入衰变池的 ¹³¹I 活度 A₀保守取 740MBq/d；

λ— ¹³¹I 核素的衰变常数，单位取 d⁻¹，数值取 8.64×10⁻²；

t₁— 注满单个衰变槽的时间，取 102d；

t₂— 衰变槽注满后的继续暂存衰变的时间，取最短暂存时间 180d；

将上述各参数代入式（11-3）和（11-4）计算可得，本项目小动物实验区放射性废水后暂存 180 天后，则废水中 ¹³¹I 核素的活度浓度不超过 0.377Bq/L，¹³¹I 活度浓度满足不大于 10Bq/L。其他五种核素 ¹²⁴I、⁸⁹Zr、¹¹¹In、^{99m}Tc、¹⁷⁷Lu 的半衰期均短于 ¹³¹I，废水中其他核素活度浓度均不会超过 ¹³¹I。根据以上分析，预计本项目小动物实验区废水暂存满 180 天后，拟解控废水中的放射性活度浓度可满足“总β不大于 10 Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不

大于 10Bq/L”的排放限值要求，可达标排放，

本项目 2#衰变池放射性废水暂存衰变超过 180 天后，应委托有资质的检测机构对拟解控排放废水的放射性活度浓度进行检测，经检测废水中总 β 不大于 10Bq/L、 ^{131}I 活度浓度不大于 10 Bq/L，可对废水实施解控排放，排入大成像设施配套的污水处理站，最终排入市政管网。工作人员详细记录“放射性废水暂存和解控管理台账”，记录内容包括废水所含核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。

（三）衰变池的辐射防护安全管理

本项目 2 套衰变系统的各衰变钢罐均采用 SUS304 不锈钢密封焊接而成，结构坚固，罐体内部拟使用树脂加强防腐蚀效果，可保证暂存期间放射性废水无泄漏；衰变池配备远程监控系统，可显示液位高度、暂存时间等信息，具备故障自诊断和报警功能，可实现长时间全自动运行。

本项目拟建的 2 套衰变池均位于 1#医学成像楼北侧的绿化带地下，衰变池正上方对应的绿化带区域拟设置围栏，围栏处设置电离辐射警告标志和禁止停留的警示语，提醒周围公众人员不要靠近此区域。本项目实验室拟指派专人管理放射性废水的暂存、检测、解控排放和台账记录工作，并每周巡视衰变系统的运行情况，加强放射性废水的管理工作。放射性废水应暂存足够时间，解控排放前应委托有 CMA 资质的检测单位检测达标后，方可按照相关规定解控排放。

11.3.3 放射性废气环境影响分析

本项目 1#医学成像楼一层和二层工作场所共设置有 4 条独立的排风系统，包括：一层动物 PET 影像区工作场所设置 1 套独立排风系统、手套箱设置 1 条独立排风管道；二层小动物实验区工作场所设置 1 套独立排风系统，手套箱设置 1 条独立排风管道。工作场所气流组织按照监督区向控制区的流向设置，拟采取排风量略大于新风量的控制措施，维持工作场所各房间内负压状态。所有排风口均拟设置止回阀，防止气体倒流。

本项目一层动物 PET 影像区的更衣室、淋浴室、分装质控室、动物注射室、清洁间、废物间、紧急处理室、2 间动物观察室（含洗污间）、动物暂养室（含洗污间）、动物实验走廊内以及各显像扫描机房内均设置有排风口，工作场所废气经汇聚后通过 1 条主排风管道引至 1#医学成像楼楼顶，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤器（过滤效率 $\geq 90\%$ ），废气经活性炭过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m；分装质控室手套箱拟设置 1 条独立排风管道，手套箱顶部出风口处设置高效过滤器（过滤效率 $\geq 99.9\%$ ），废气通过 1 条独立排风管道引至 1#医学成像楼楼顶，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤器（过滤效率

≥90%)，手套箱废气经活性炭再次过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m。

本项目二层小动物实验区的更衣室、淋浴室、废物库、放射源库、质控室、动物注射室、动物手术室、动物留观室、缓冲间、动物实验走廊、各成像间和实验室内均设置有排风口，动物手术室通风橱顶部配备独立排风管（出风口安装高效过滤器），动物留观室负压通风柜顶部配备独立排风管（出风口安装高效过滤器），上述排风管道均汇入 1 条主排风管道，主管道直通 1#医学成像楼楼顶，楼顶排风机的前端拟设置 1 个活性炭过滤器（过滤效率≥99.9%），废气经活性炭过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m。动物注射室手套箱拟设置 1 条独立排风管道，手套箱顶部出风口处设置高效过滤器（过滤效率≥99.9%），废气通过 1 条独立排风管道引至 1#医学成像楼楼顶，手套箱废气经活性炭再次过滤后高空排放，排风口高度为 23.9m。

本项目动物 PET 影像区使用的 ^{18}F 等正电子核素药物的分装和 ^{82}Rb 淋洗标记等操作均在手套箱内进行， ^{18}F 以及其他金属正电子药物均为成品药液，物理性质稳定且不易挥发，药物操作时间也较短，因此使用期间产生的气载放射性物质极少；小动物实验区放射性药物均为液态药物，药物分装在手套箱内进行，动物手术在通风橱内进行，除含碘核素的药物具有弱挥发性外，其他药物均不易挥发。小动物实验放射性药物的操作量小，且操作时间较短，使用期间产生的气载放射性物质很少；本项目工作场所产生的含少量放射性物质的废气经手套箱、通风橱、通风柜和各房间排风口的强制排风，并经高效过滤器（过滤效率≥99.9%）和活性炭过滤器（过滤效率≥90%）过滤后在 1#医学成像楼楼顶高空排放。放射性废气经过滤后，排放至环境大气的放射性物质很少，且排风口周边没有高层建筑物。废气经大气扩散后落地浓度极低，对周围公众和环境的辐射影响可忽略不计。

本项目动物 PET 影像区涉及实验猴的暂时饲养，实验猴暂养过程中会产生少量恶臭气体，主要来源于动物粪便和尿液等。为降低恶臭气体带来的影响，本项目动物 PET 影像区的动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室、废物间和小动物实验区的废物库内均设置紫外线灯用于消毒除臭，于每日早晚各进行 1 次进行除臭杀菌。动物暂养产生的恶臭气体经紫外线灯分解+工作场所负压排风系统+楼顶排风口的活性炭过滤吸附后，可以有效控制，对周围其他场所和环境的影响较小。

11.4 异常事件分析与防范建议

11.4.1 本项目运行期间有可能发生以下异常工况

① 药物意外洒漏：在操作放射性药物的过程中，由于工作人员操作不熟练或其他意外

情况导致容器破碎、药物泼洒等事故，会污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成手部和皮肤的污染，对局部环境和工作人员造成 β 放射性表面污染；意外泼洒的药物挥发将产生少量放射性废气，清理污染还会产生一定量放射性固体废物和应急排放的放射性废水；

② 放射性物品保管不善：放射性药物、 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器、校准源发生遗失或被盗，造成局部环境的放射性污染，对工作人员和公众造成额外照射；

③ 放射性废物管理不善：放射性固体废物、实验动物尸体、放射性废水未暂存足够时间或者未按清洁解控规定擅自处理，可能会造成局部环境的放射性污染，对工作人员和公众产生辐射危害；

④ 发生器意外破裂： ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器在使用期间发生侧翻、跌落、外力撞击等意外事件，可能会导致发生器屏蔽体和密封装置裂缝、破损，可能造成放射性核素 ^{82}Sr 和 ^{82}Rb 的泄漏，将会对工作人员和周围环境造成额外的辐射影响和局部环境放射性污染；

⑤ 未按规定采取铅防护措施：在放射性药物、注射后动物转运过程中没有放置在铅防护运输容器内，或在放射性药物操作过程中未按规定使用铅防护设施和防护用品，有可能造成工作人员受到超出年剂量约束值的照射。

11.4.2 事故风险防范和应急处理措施

针对在非密封放射性物质工作场所运行过程可能出现的事故，应采取一系列预防措施，避免事故的发生，尽可能控制或缓解事故后果和影响：

(1) 建立放射性药物使用管理制度，制定放射性药物操作规程，加强辐射工作人员的辐射安全知识和操作培训，增强辐射工作人员的安全意识。辐射工作人员上岗前须熟练掌握放射性药物操作技能和辐射防护基本知识，有能力正确处置意外情况，上述措施可有效避免因操作失误导致的工作场所局部放射性污染事件的发生；

(2) 在操作放射性同位素过程中，一旦发生容器破碎、药物意外泼洒造成放射性污染时，应及时采取擦拭方法去污，并用表面污染监测仪进行检测，直至表面污染水平满足 GB18871-2002 要求，清污废物。工作人员离开药物操作区域，在缓冲间更换工作鞋和工作服，防止放射性污染扩散至控制区之外。

(3) 放射性药物操作区域配备铅废物桶，收集放射性固体废物，并在放射性固废间内暂存。动物 PET 影像区含 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 、 ^{44}Sc 核素的放射性固废暂存时间不得低于 30 天；小动物实验区含 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 ^{111}In 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 核素的放射性固废暂存 180 天；经自行监测达到清洁解控水平后方可实施清洁解控。本项目产生的含放射性核素的动物尸体应在放射性固废间的冰柜内冷冻暂存，按放射性固体废物的要求进行暂存和解控，

建立“放射性固体废物、实验动物尸体暂存和处置管理台账”并详细记录。本项目 1#衰变池放射性废水暂存不得低于 30 天，2#衰变池放射性废水暂存不得低于 180 天，2#衰变池废水解控排放前委托有资质检测机构进行检测，废水的活度浓度和总 α 、总 β 满足排放限值方可进行解控排放，建立“放射性废水暂存和解控管理台账”；辐射工作场所区域内、放射性药物操作箱体设置独立的排风系统，并安装高效过滤器和活性炭过滤器，所有过滤器每年更换 1 次，拆卸下来的废弃滤材按放射性固体废物进行暂存和解控，解控后作为危险废物处置；上述措施可有效防止放射性“三废”对环境造成的污染和辐射影响。

(4) 严格落实个人剂量监测制度和辐射工作场所监测方案，利用辐射监测仪器开展辐射环境自行监测，监测记录存档。辐射防护管理小组须定期检查安全规章和制度落实情况，发现问题及时纠正；加强工作场所分区管理措施，控制区只允许辐射工作人员进入，严格限制无关人员进入监督区。

(5) 本项目放射源库拟安装防盗门、监控系统和红外防闯入装置，分装质控室等放射性药物操作区域均应安装闭路监视系统。若放射性药物或放射源不慎发生遗失或被盗，实验室当值人员应保护好现场，立即向实验室负责人和辐射安全专职人员报告，启动辐射事故应急预案，并上报当地公安部门和生态环境主管部门，并协助公安部门开展侦查和追缴；

(6) 在发生意外事件与事故时，当值的工作人员应当立即向实验室负责人、辐射安全管理专职人员报告，启动辐射事故应急预案。辐射防护管理小组等相关人员立刻到达现场，保护现场，控制污染范围，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和公安部门报告。怀疑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。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构

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、完成全校日常辐射安全与防护管理工作。

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、熟悉院系辐射工作的教师组成。为落实辐射防护具体工作，各涉源院系均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。北京大学辐射防护领导小组名单详见表 12-1。

表 12-1 北京大学辐射防护领导小组组成

序号	管理人员	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

本项目建设和运行部门为北京大学国家生物医学成像科学中心（以下简称“生物医学成像科学中心”）。在本项目投入运行前，生物医学成像科学中心主管领导（职务为主任、副主任或主管领导）须加入北京大学辐射防护领导小组。此外，生物医学成像科学中心还须成立辐射安全与防护工作小组，工作小组组长由主管领导担任，并为本项目配备 1 名辐射安全专管员，专职负责本项目辐射安全管理日常工作。

12.2 辐射安全管理规章制度

北京大学现已制定了较完善的辐射安全管理制度，各项规章制度均已得到严格落实。北京大学现行的辐射安全管理制度主要包括：

（1）校级管理制度

- 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》；

（2）各部门管理制度

- 1) 《化学与分子工程学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 2) 《物理学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- 3) 《生命科学学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- 4) 《城市与环境学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- 5) 《环境科学与工程学院辐射安全和防护管理制度》；
- 6) 《考古文博学院辐射安全和防护管理相关制度》；
- 7) 《实验动物中心辐射安全与防护管理制度》；
- 8) 《工学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 9) 《地空学院放射安全和防护管理相关制度》；
- 10) 《北京大学医院放射安全和防护管理相关制度》；
- 11) 《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》。

本项目投入运行前，生物医学成像科学中心须建立《生物医学成像科学中心辐射安全和防护管理相关制度》，内容至少包括：岗位职责、辐射安全与防护管理规定，设施设备检修维护管理规定、安全保卫制度、台账管理制度、放射性药品使用管理规定、放射源管理规定、放射性废物管理规定、实验动物管理规定、个人剂量监测管理制度、工作场所辐射监测方案等各项制度，制定动物实验操作规程、射线装置操作规程、放射性药品操作规程，制定辐射事故应急相关管理规定。同时，北京大学须结合本项目的开展，更新学校现行的辐射安全管理制度和辐射安全事故应急预案，将本项目纳入到校级辐射安全与防护管

理体系内。

12.3 辐射安全与防护培训

北京大学严格按照国家相关规定执行辐射工作人员持证上岗制度。目前学校辐射工作人员共计 77 人，均已通过了辐射安全与防护考核或学校自行组织的考核。《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，所有辐射工作人员均须通过辐射安全与防护考核后，方上岗可从事辐射工作。

本项目拟新增配备 17 名辐射工作人员，其中动物 PET 影像区配备 11 名（1 名动物管理人员、6 名设备操作人员、2 名药物操作人员、2 名质控人员），小动物实验区拟配备 6 名（4 名设备操作人员、2 名药物操作人员），辐射工作人员均须参加辐射安全与防护考核，通过考核后方可上岗从事辐射工作。

12.4 辐射监测

（1）个人剂量监测

北京大学已委托有资质单位定期开展辐射工作人员个人剂量监测工作，监测频次为每季度 1 次，在岗的辐射工作人员均已按照规范佩戴了个人剂量计。学校已指定专人负责个人剂量监测的管理工作，已为辐射工作人员建立了个人剂量档案并终生保存。北京大学拟为本项目新增的 17 名辐射工作人员配备个人剂量计，开展个人剂量监测工作。

北京大学今后将继续加强辐射工作人员个人剂量监测工作。若发现某辐射工作人员个人剂量监测结果出现异常时（即显著高于其它辐射工作人员的、单季度有效剂量超出 0.5mSv 的或年有效剂量超出 2mSv 的），应当立即进行核实、调查原因或采取干预措施，并将有关情况形成文字档案，经当事人签字确认后与个人剂量档案一起妥善保存。

（2）辐射工作场所监测

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（原环保部令第 18 号）的要求，每年应委托有资质单位对本项目辐射工作场所进行辐射工作场所环境辐射水平和表面污染水平监测，监测数据应记录存档。

根据《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》要求，本项目拟利用新增的便携式 X-γ 剂量率仪和表面污染监测仪开展工作场所进行自行监测，本项目工作场所自行监测方案如下：

- 监测项目：β 表面污染水平、X-γ 剂量率水平；
- 监测设备：表面污染监测仪、便携式 X-γ 剂量率仪；
- 监测频次：辐射工作场所 β 表面污染水平监测于每日工作结束后进行，工作场所周围

X-γ剂量率水平自行监测频次不少于1次/月，

➤β表面污染监测点位：

本项目动物 PET 影像区的β表面污染监测点位包括：手套箱、注射窗的操作台面，分装质控室、动物注射室墙面和地面，动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室（含洗污间）的墙面、地面、设备台面和笼具，高清 PET/CT 间、PET/CT 间、PET/MRI 间墙面、地面和扫描床，动物实验走廊的墙面、地面，以及其他必要位置（如废物桶表面、动物转运铅箱、工作人员手部、防护服、拖鞋等）；

小动物实验区的β表面污染监测点位包括：手套箱、通风橱的操作台面，质控室、动物注射室、动物手术室、动物留观室墙面、地面和设备台面，五模态成像间和放射晶体实验室墙面、地面、扫描床等设备表面等，动物实验走廊的墙面、地面，以及其他必要位置（如废物桶、动物转运容器、工作人员手部、防护服、铅衣、拖鞋等处）；

➤ X-γ剂量率监测点位：

动物 PET 影像区的 X-γ剂量率监测点位包括：手套箱外 30cm 处、高清 PET/CT 间、宽景 PET/CT 间、PET/MRI 间四周墙体、防护门和观察窗外 30cm 处，PET/MRI 间楼上区域、废物间北墙外和防护门外 30cm 处、各动物观察室北墙外和防护门外 30cm 处、动物暂养室防护门外东墙外 30cm 处和楼上，以及控制区边界外 30cm 处辐射剂量率水平和衰变池上方的剂量率水平；

小动物实验区的 X-γ剂量率监测点位包括：废物库和放射源库防护门外 30cm 及楼上，光声/CT 双模成像间、小动物五模态成像间、放射电子和晶体测试实验室四周墙体、防护门和观察窗外 30cm 和楼上，动物注射室和动物手术室防护门外及楼上，动物留观室东墙外、防护门外 30cm 处和楼上，以及控制区边界外 30cm 处等位置的剂量率水平；

本项目工作场所β表面污染和 X-γ剂量率自行监测点位分别见表 12-2 和表 12-3，自行监测点位图见图 12-1、图 12-2 和图 12-3。

表 12-2 动物 PET 影像区和小动物实验区表面污染监测点位统计

动物 PET 影像区			
点位编号	场所名称	监测点位	β表面污染 (Bq/cm ²)
1~4	分装质控室	手套箱操作台面、房间地面、墙面	
5~6	人员注射位	房间地面、墙面	
7~9	动物注射室	注射台面、房间墙面、地面	
10~12	紧急处理室	地面、墙面、台面	
13~16	动物观察室 1	房间地面、墙面、台面和笼具	
17~20	动物观察室 2	房间地面、墙面、台面和笼具	
21~24	动物暂养室	房间地面、墙面、座椅、卫生间	

25~27	高清 PET/CT 间	扫描床、房间地面、墙面	
28~30	宽景 PET/CT 间	扫描床、房间地面、墙面	
31~33	PET/MRI 间	扫描床、房间地面、墙面	
34~35	动物实验走廊	地面、墙面	
36	其他重要点位	废物桶、转运容器、工作人员手部、防护服、拖鞋等	
小动物实验区			
点位编号	场所名称	监测点位	β表面污染 (Bq/cm²)
1~4	动物注射室	手套箱台面、房间地面、墙面	
5~7	动物手术室	通风橱台面、房间地面、墙面	
8~10	动物留观室	通风柜台面、房间墙面、地面	
11~12	质控室	房间地面、台面	
13~15	小动物五模态成像间	扫描台面、房间地面、墙面	
16~18	放射电子测试实验室	设备台面、房间地面、墙面	
19~21	动物实验走廊	地面、墙面	
22	其他重要点位	废物桶、动物转运容器、工作人员手部、防护服、铅衣、拖鞋等	

表 12-3 动物 PET 影像区和小动物实验区 X-γ剂量率监测点位统计

动物 PET 影像区			
点位编号	场所名称	监测点位	监测结果 (μSv/h)
1~7	高清 PET/CT 间	四周墙体、观察窗和各防护门外	
8~14	宽景 PET/CT 间	四周墙体、观察窗和各防护门外	
15~21	PET/MRI 间	四周墙体、观察窗、防护门、楼上	
22~23	废物间	防护门外、北墙外	
24~27	分装质控室和动物注射室	北墙外、西侧动物常规检查室、西侧门外卫生通过间、注射室门外缓冲间 2	
28~29	动物观察室 1	防护门外、北墙外	
30~31	动物观察室 2	防护门外、北墙外	
32~36	动物暂养室	防护门外、北墙外、东侧楼梯间、东侧报警阀室、楼上	
37	动物实验走廊	动物出口门外	
38	衰变池	1#、2#衰变池上方	
小动物实验区			
点位编号	场所名称	监测点位	监测结果 (μSv/h)
1~2	放射源库	防护门外、楼上	
3~5	废物库	防护门外、南墙外及楼上	
6~13	光声/CT 双模成像间	四周墙体、观察窗、各防护门及楼上	
14~22	小动物五模态成像间	四周墙体、观察窗、各防护门及楼上	
23~29	放射电子测试实验室	四周墙体、观察窗、各防护门及楼上	
30~31	动物注射室	防护门外和楼上	

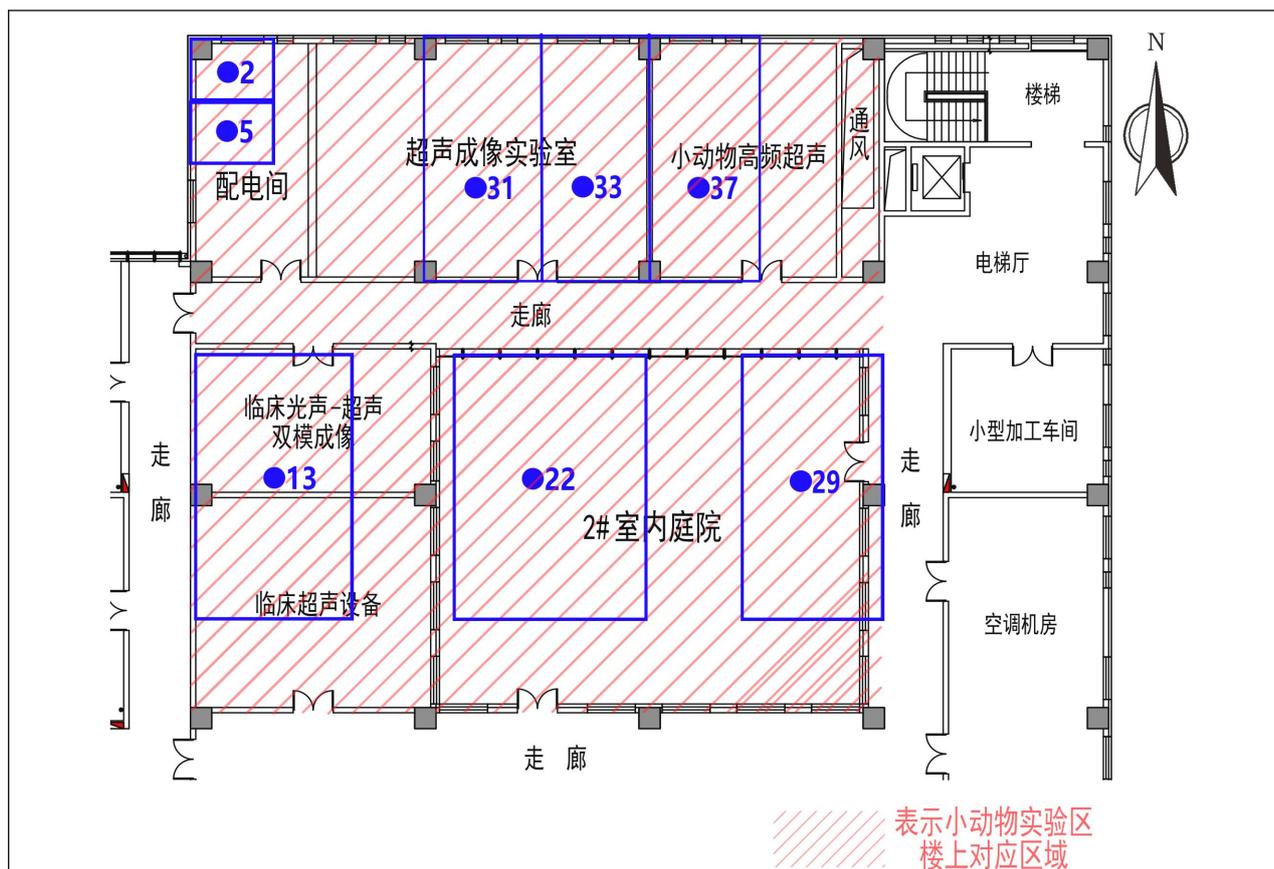


图 12-3 本项目小动物实验区楼上区域自行监测点位图

12.5 辐射监测设备和防护用品

本项目拟新增配备 3 台固定式辐射监测报警仪、2 台便携式 X-γ 剂量率仪和 4 台表面污染监测仪，拟配备必要的铅防护设施设备和个人防护用品等，具体情况见表 12-4。

表 12-4 本项目拟配备防护设施和监测仪器统计

名称	数量	规格	使用场所
手套箱	1 个	50mmPb	一层分装质控室
药物贮存铅罐	1 个	30mmPb	一层分装质控室
药物运输铅盒	1 个	20mmPb	一层分装质控室、动物注射室
注射防护窗	1 个	50mmPb	一层动物注射室
注射防护套	1 个	10mmPb 钨合金	一层动物注射室
动物转运铅箱	2 个	20mmPb	动物注射室、动物观察室、各 PET 显像间
铅废物桶	1 个	20mmPb (容积 5L)	一层分装质控室
	1 个	20mmPb (容积 5L)	一层注射操作位
	3 个	5mmPb (容积 10L)	动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室各 1 个
	2 个	5mmPb (容积 50L)	一层废物间
移动铅屏风	3 个	5mmPb	动物观察室 1、动物观察室 2、动物暂养室各 1 个
校准源铅罐	3 个	2 个 20mmPb (^{68}Ge 源罐) 1 个 50mmPb (^{22}Na 源罐)	二层放射源库

手套箱	1 个	40mmPb	二层动物注射室
药物贮存铅罐	1 个	20mmPb	二层动物注射室
动物转运容器	3 个	10mmPb	动物注射室、动物手术室、动物留观室、各成像间和实验室
通风橱	1 个	30mmPb	二层动物手术室
负压通风柜	1 个	20mmPb	二层动物留观室
铅废物桶	4 个	10mmPb (容积 5L)	动物注射室、手术室、留观室、放射晶体实验室各 1 个
	2 个	10mmPb (容积 50L)	二层废物库
铅废物箱	2 个	30mmPb (容积 300L)	二层废物库冰柜内
个人防护用品	4 套	每套含铅衣、铅围裙、铅围脖，药物操作人员配备铅防护眼镜	二层小动物实验区
冰柜	1 个	容积 600L	二层废物库
固定式辐射监测报警仪	3 台	型号待定	一层配 1 台、二层配 1 台、放射源库/废物库配 1 台
便携式 X-γ剂量率仪	2 台	型号待定	一层配 1 台、二层配 1 台
表面污染监测仪	4 台	型号待定	一层配 2 台，二层配 2 台

12.7 辐射事故应急

北京大学制定了《北京大学辐射安全事故应急预案》，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，能够满足学校实际辐射工作的需要。北京大学每年均定期开展辐射事故应急演练和应急培训工作。

若发生辐射事故，应立即启动本单位辐射安全事故应急预案，采取必要的应急措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境主管部门报告；射线装置或放射源被盗、丢失的，还须向当地公安部门报告；造成或可能造成人员超剂量照射的，还应向当地卫生部门报告。同时，须进行工作人员的意外事故剂量监测和工作场所及周围环境的应急监测，并作好详细的监测记录。

12.8 项目环境保护验收内容建议

本环评建议自主验收内容及要求见表 12-5。

表 12-5 本项目竣工环境保护验收主要内容

验收内容	验收要求
剂量限值和剂量约束值	根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)和环评预测结果，公众和职业人员的剂量约束值分别执行 0.1mSv/a 和 2mSv/a；放射性表面污染控制水平满足 GB18871-2002 的要求。
剂量率控制水平	各工作场所控制区边界外 30cm 处(楼上距地 30cm、楼下距地 1.7m)周围剂量当量率不大于 2.5μSv/h；控制区内各房间周围 30cm 处周围剂量当量率不大于 2.5μSv/h；手套箱/通风橱外表面 30cm 处和人员操作

	位处周围剂量当量率小于 2.5 μ Sv/h；废物桶外表面 30cm 处周围剂量当量率应小于 2.5 μ Sv/h；
电离辐射标志和中文警示	动物 PET 影像区工作场所主要出入口门外、控制区内各房间防护门外均设置电离辐射警告标识和中文警示说明；手套箱、铅盒、转运铅箱、铅废物桶等设备外表面均张贴电离辐射标识和中文警示说明；各 PET 扫描间防护门外设置工作状态指示灯和门灯连锁装置； 小动物实验区工作场所主要出入口门外、控制区内各房间防护门外均设置电离辐射警告标识和中文警示说明；手套箱、通风橱、运输容器、铅废物桶、冰柜等设备外表面均张贴电离辐射标识和中文警示说明；在各小动物成像间防护门外设置工作状态指示灯和门灯连锁装置；
场所布局和屏蔽设计	辐射工作场所的布局和屏蔽防护措施与环评报告表描述一致，工作场所控制区屏蔽墙、防护门、观察窗、屋顶和地板屏蔽射线的能力满足辐射防护的要求；各手套箱通风橱、各工作场所区域的通风换气设施运转正常，通风换气量满足设计要求。
辐射安全与防护措施	本项目动物 PET 影像区实行分区管理，所有出入口处均设置门禁系统，禁止无关人员进入；工作场所设置视频监控系统；放射性药物操作区域、废物间、清洁间、各动物观察室（含洗污间）、动物暂养室（含洗污间）、动物实验走廊和各 PET 成像间等区域采取表面污染控制措施；配备防护能力符合要求的手套箱、注射窗、药物和动物转运容器、铅废物桶等防护设施；放射源库安装防盗门、视频监控和防闯入报警； 本项目小动物实验区实行分区管理，所有出入口处均设置门禁系统，禁止无关人员进入；动物注射室、动物手术室、动物留观室、质控室、废物库、动物实验走廊、各小动物成像间和实验室等场所采取表面污染控制措施，工作场所内安装视频监控；配备防护能力符合要求的手套箱、通风橱、动物转运容器、铅废物桶、铅衣等防护设施和个人防护用品，废物库内配备冰柜冷冻暂存动物尸体。
监测仪器	新增配备 3 台固定式辐射监测报警仪、2 台便携式 X- γ 剂量率、4 台表面污染监测仪，为所有辐射工作人员配备个人剂量计，开展个人剂量监测。
放射性“三废”防治措施	各工作场所设置满足要求的放射性固废暂存场所，工作场所区域和废物暂存间内配备数量足够铅废物桶、冰柜，所有放射性固体废物、动物尸体废物达到暂存时间后，经监测达标方可实施清洁解控； 建设 2 套满足环境管理要求的放射性废水衰变池，衰变池具有远程监控、报警提示灯功能，可现实液位高度、暂存时间等信息。放射性废水达到暂存时间后，经有资质单位检测达标后方可解控排放； 各工作场所设有独立的放射性排风系统，各手套箱设有独立通风管道，排风口均设置在所在建筑顶部上方，各排风管道出风口处设有高效过滤器和活性炭过滤装置等，所有滤芯每年均更换 1 次； 放射性“三废”防治措施按照本报告表 10 的要求执行。
规章制度	进一步完善现有的辐射安全管理制度。新增本项目实验室的辐射安全与防护管理制度、岗位职责、设施设备检修维护管理规定、安全保卫制度、台账管理制度、放射性药品使用管理规定、放射源管理规定、放射性废物管理规定、实验动物管理规定、个人剂量监测管理制度、

	辐射监测方案；建立放射性药品管理台账、放射性固废管理台账、放射性废水管理台账、实验动物出入和使用管理台账等；制定动物实验操作规程、射线装置操作规程、放射性药品操作规程；
人员培训	本项目新增的 17 名辐射工作人员须报名参加辐射安全与防护考核，通过考核后方能上岗从事辐射工作。
应急预案	在现有的辐射安全事故应急预案的基础上，根据本项目内容进一步完善应急预案，针对本项目使用放射性同位素开展动物实验的辐射事故风险，制定有针对性的应急响应和应急处置措施，配备必要的应急用品，开展过辐射事故应急演练和应急培训。

表 13 结论与建议

13.1 结论

(1) 项目概况

本项目建设地点位于怀柔区雁栖东六路多模态跨尺度生物医学成像设施的 1#医学成像楼内，建设内容为：拟在 1#医学成像楼一层东部新建 1 处动物 PET 影像区科研场所，拟使用 ^{18}F 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{82}Rb 和 ^{44}Sc 共 5 种放射性核素开展 PET 医学影像技术和新型核素药物的动物试验研究，拟配备 1 台宽景 PET/CT、1 台高清 PET/CT 和 1 台 PET/MRI 设备，拟配套使用 6 枚 ^{68}Ge 密封源和 6 枚 ^{22}Na 密封源用于上述 3 台 PET 设备的质控校准；拟在 1#医学成像楼二层东部新建 1 处小动物实验区科研场所，拟使用 ^{124}I 、 ^{89}Zr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{111}In 、 ^{131}I 和 ^{177}Lu 共 6 种放射性核素开展小动物多模态成像研究，拟配备 1 台小动物五模态分子成像设备、1 台小动物光声/CT 双模成像设备。本项目 2 处科研场所均属于乙级非密封放射性物质工作场所。

(2) 实践正当性分析

本项目的建设将进一步完善多模态医学成像装置 1#医学影像楼的科研配套，随着技术积累和进步，本项目研究成果未来将转化到核医学临床应用中，提升各类重大疾病的诊断精准度和治疗效果，促进核医学技术的发展。北京大学具备开展本项目的技术、科研人员和经费等条件，本项目建设 and 运行为国家、社会所带来的利益远高于代价，对社会和公众所带来的利益远大于其辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的原则与要求。

(3) 选址与布局的合理性：

本项目辐射工作场所的选址周围 50m 范围内无居民楼、学校等人员密集场所和环境敏感目标，评价区域内的辐射本底未见异常，场所选址相对独立，与周边非放射性工作场所有明确的分界隔离，设有相对独立的人流、物流通道，总体认为项目选址合理。

本项目各工作场所的控制区和监督区划分明确，设有独立的工作人员出入口和动物出入口，工作场所内部各功能区布局明确，尽可能做到了相对集中、独立设置，工作场所内部科研人员、实验动物、放射性药物和放射性废物路径的设计均较为合理。各辐射工作场所布局已充分考虑了本项目科研工作的特点和周围场所的辐射安全与防护，可有效防止交叉污染，避免工作人员和公众受到不必要的照射。总体认为场所布局合理。

(4) 辐射安全与防护措施：

本项目各辐射工作场所拟实行分区管理，工作场所区域出入口均拟设置门禁装置，禁

止无关人员进入，工作场所内部拟设置监控系统；在工作场所出入口门外、工作场所内各房间、各 PET 扫描间和小动物成像间防护门外等处均设置电离辐射警告标识和中文警示说明。各 PET 扫描间、小动物成像间防护门外拟设置工作状态指示灯和门灯联锁装置；工作场所内部各功能间拟采取表面污染控制措施拟使用易清洗去污材料；放射源库采取防盗门、视频监控系统和防闯入报警装置等安防措施；拟配备防护能力符合要求的手套箱、通风橱、注射窗、运输容器、铅废物桶等防护设施和个人防护用品；本项目拟新增配备 3 台固定式辐射监测报警仪、2 台便携式 X- γ 剂量率仪和 4 台表面污染监测仪；上述各项辐射安全与防护措施落实后，可有效控制放射性污染，避免工作人员和公众受到意外照射。

(5) 辐射屏蔽防护分析：

本项目辐射工作场所屏蔽设计符合辐射工作场所使用和辐射防护安全的要求。预计各辐射工作场所运行后，工作场所控制区边界外 30cm 处以及楼上、楼下等场所的周围剂量当量率均满足不大于 2.5 μ Sv/h 的控制要求，职业人员和公众的年有效剂量均低于本评价提出的职业人员 2mSv/a 和公众 0.1mSv/a 的剂量约束值要求。

(6) 放射性“三废”防治措施：

预计本项目运行后，动物 PET 影像区产生放射性固体废物总量不超过 814kg（含动物暂养废物、废旧滤材等）；小动物实验区年产生放射性固体废物约 137kg（含动物废物、废旧滤材等），实验动物尸体废物不超过 640kg；放射性固体废物均在放射性固废暂存间的铅废物桶内暂存，动物尸体废物在放射性固废暂存间的冰柜内冷冻暂存，所有放射性固体废物、实验动物尸体达到暂存时间后，经监测达标后按要求实施解控；本项目产生的废旧 ^{82}Sr - ^{82}Rb 发生器由供货厂家负责回收，退役校准源送北京市城市放射性废物库贮存；

预计本项目运行后，动物 PET 影像区产生放射性废水总量不超过 68.6m³/a，小动物实验区产生放射性废水总量不超过 14.2m³/a，本项目拟建设 2 套放射性废水衰变池，动物 PET 影像区和小动物实验区放射性废水分开收集和暂存，放射性废水达到暂存时间后，委托有资质单位检测达标后实施解控排放；

本项目各辐射工作场所均设有独立的排风系统，各放射性药物操作箱体均设有独立排风管道，少量的放射性废气经高效过滤器和活性炭过滤后，引至 1#医学成像楼楼顶高空排放，排风系统的所有气体滤芯每年均更换 1 次，废旧滤材按放射性固体废物管理。

预计采取上述防治措施后，放射性“三废”对周围环境和人员产生的辐射影响很小。

(7) 辐射安全管理

北京大学设有环境保护办公室、辐射防护室，设有辐射防护管理专职工作人员。北京

大学已制定了较完善的辐射安全管理制度，各项规章制度均已得到严格落实；本项目的建设运行由北京大学国家生物医学成像科学中心负责，生物医学成像科学中心拟建立本项目实验室辐射安全与防护管理制度、岗位职责、安全保卫制度、个人剂量管理制度、辐射监测方案、放射性药品使用管理规定、放射源管理规定、台账管理制度、放射性废物管理规定、实验动物管理规定等各项制度，拟建立放射性药物、放射性固废、放射性废水、实验动物出入和使用等各项管理台账，拟制定本项目动物实验的各项操作规程，拟根据本项目动物实验辐射风险制定有针对性的应急响应和应急处置措施；本项目投入运行前，北京大学拟更新现有的辐射安全管理制度和辐射安全事故应急预案，将本项目纳入到校级辐射安全与防护管理体系内。

(8) 与生态环境部 2021 年修订的《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和原环保部第 18 号令《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》提出的具体要求进行对照评估，环评报告中描述的辐射安全和防护措施如果得到落实，能够满足运行的要求。

综上所述，北京大学新增非密封放射性物质科研场所项目，相应的辐射安全与防护措施、放射性“三废”防治措施、辐射安全管理制度可行，在落实本报告表提出的辐射安全措施和放射性“三废”防治措施的前提下，各工作场所的运行对周围环境产生的辐射影响符合环境保护的相关要求。故从辐射环境保护角度论证，该建设项目可行。

13.2 建议和承诺

为了保护环境，保障人员健康，北京大学承诺：

- (1) 在项目运行过程中，严格遵守动物实验操作规程，不弄虚作假，不违规操作；
- (2) 定期检查辐射工作场所的各项辐射安全与防护设施和放射性“三废”防治设施，发现问题及时整改，检查或整改记录妥善保存；
- (3) 持续加强辐射安全管理工作，建立和完善本项目相关辐射安全管理制度、动物实验操作规程、实验动物使用规定、辐射事故应急管理措施等，落实辐射安全管理责任；
- (4) 严格执行辐射监测方案，定期对辐射工作场所辐射剂量率水平和表面污染水平进行监测，监测记录保存留档；
- (5) 加强辐射工作人员管理，辐射工作人员须参加辐射安全与防护考核，考核通过后方能上岗从事辐射工作；
- (6) 及时办理辐射安全许可证重新申领手续，严格落实建设项目环境保护“三同时”制度。在项目建设完成投入试运行后组织竣工环境保护自行验收，在后续运行过程中接受生态环境主管部门的监督检查。

表 14 审 批

下一级生态环保部门预审意见：

经办人

公 章

年 月 日

审批意见：

经办人

公 章

年 月 日