

核技术利用建设项目

北京大学第一医院城南院区工程放射类设备
环境影响报告表

建设单位：北京大学第一医院 (公章)

2020 年 3 月

核技术利用建设项目

北京大学第一医院城南院区工程放射类设备

环境影响报告表

建设单位名称：北京大学第一医院

建设单位法人代表（签名或签章）：刘新民

通讯地址：北京西城区西什库大街 8 号

邮政编码：100034

联系人：王程伟

电子邮箱：421975363@qq.com

联系电话：010-66551011

目 录

表 1 项目基本情况	1
表 2 放射源	12
表 3 非密封放射性物质	12
表 4 射线装置	9
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）	18
表 6 评价依据	19
表 7 保护目标与评价标准	22
表 8 环境质量和辐射现状	17
表 9 项目工程分析与源项	34
表 10 辐射安全与防护	70
表 11 环境影响分析	34
表 12 辐射安全管理	156
表 13 结论与建议	65

附图 1 北大第一医院第二住院部地理位置示意图

附图 2 第二住院部平面布局及环境辐射水平监测点位示意图

附图 3 城南院区核技术利用项目评价范围示意图

附图 4 城南院区地下一层放射性工作场所平面布局示意图

附图 5 城南院区地下二层放射性工作场所平面布局示意图

附图 6 城南院区 4 台 DSA 工作场所位置示意图

附图 7 核医学科内放射性工作场所分布示意图

附图 8 核医学科场所的排风管路布置示意图

附图 9 2 台 6MV 加速器工作场所布局示意图

附图 10 2 台 10MV 加速器及后装机工作场所布局示意图

附图 11 医技楼一层介入治疗中心 2 台 DSA 工作场所布局示意图

附图 12 住院楼四层心内科 2 台 DSA 工作场所布局示意图

附图 13 核医学科诊疗场所的布局示意图

附图 14 放射性废水排放路径示意图

附图 15 核医学科药物制备场所布局示意图

附图 16 核医学科药物实验室的布局示意图

附件 1:《辐射安全许可证》正副本复印件

附件 2: 医院放射防护管理机构、分工及实施细则

附件 3: 已通过环保培训辐射工作人员名单

附件 4: 2018 年度辐射工作个人剂量检测结果

附件 5: 环境本底检测报告

附件 6: 城南院区项目环评批复

附件 7: “一会三函”重点项目确认函

附件 8: 项目建设用地批复

附件 9: 委托书

表 1 项目基本情况

建设项目名称		城南院区工程放射类设备			
建设单位		北京大学第一医院			
法人代表	刘新民	联系人	王程伟	联系电话	010-66551011
注册地址		北京西城区西什库大街 8 号			
项目建设地点		北京市大兴区大兴新城 0206 街区 1901-1907 地块			
立项审批部门		/		批准文号	/
建设项目总投资(万元)	28000	项目环保投资(万元)	2500	投资比例(环保投资/总投资)	8.9%
项目性质		☒ 新建 ☐ 改建 ☐ 扩建 ☐ 其它		占地面积(m ²)	700
应用类型	放射源	☐ 销售	☐ I 类 ☐ II 类 ☐ III 类 ☐ IV 类 ☐ V 类		
		☒ 使用	☐ I 类(医疗使用) ☐ II 类 ☒ III 类 ☐ IV 类 ☐ V 类		
	非密封放射性物质	☐ 生产	☐ 制备 PET 用放射性药物		
		☐ 销售	/		
		☒ 使用	☒ 乙 ☒ 丙		
	射线装置	☐ 生产	☐ II 类 ☐ III 类		
		☐ 销售	☐ II 类 ☐ III 类		
		☒ 使用	☒ II 类 ☐ III 类		
	其他				
	1. 项目概述 1.1 医院概况 北京大学第一医院(以下简称“北大第一医院”)是一所融医疗、教学、科研、预防为一体的大型综合性医院,创建于 1915 年,为国内首批建立的临床医学院。1991 年设立妇儿医院,为卫生部、世界卫生组织(WHO)审定的三级甲等医院和爱婴医院。全院共有 51 个病房 1500 余张病床,设有 29 个临床科室和 12 个医疗技术科室,拥有代表当代医学水平的高、精、尖设备 6678 台(件)。日均门急诊量 7000 人次,年收治病人 45000 余人,手术近 2 万例。医院承担 50 万人的职工基本医疗保险任务,62105 人的公费医疗合同;承担医疗照顾合同 8620 人,及占北京八分之一的干部保健任务。				

医院还有多专业、多层次、高质量的 100 多个特需门诊和 400 多个专家门诊及 103 个专业门诊。医院学科齐全，综合诊疗水平高，尤其对肾脏内科、心血管内科、泌尿外科及男科、外科、神经内科、妇产科、小儿科、皮肤性病科等各类常见病、多发病、疑难重症的救治均具有丰富的经验。

医学科学研究设有 6 个研究所，10 个研究中心，1 个部级重点实验室、14 个研究室、5 个实验室、6 个科研辅助科室，1 个国家药品临床研究基地 12 个专业。医学教育实行本科生、研究生、进修生三条教育轨道。研究生教育设有 4 个国家级重点学科，18 个博士点，24 个硕士点，1 个临床博士后流动站。医院还设有专门的预防保健机构，负责传染病防治、计划免疫、妇幼保健、定期体检、卫生宣教等工作。

1.2 核技术应用情况

北京大学第一医院开展放射性工作的院址有 5 处：

1. 北京大学第一医院门诊部，位于北京西城区西什库大街 8 号。
2. 北京大学第一医院妇儿门诊部，简称“一部”，位于西城区西安门大街 1 号。
3. 北京大学第一医院第二住院部，简称“二部”，位于西城区大红罗厂街 1 号（西什库大街 7 号）。
4. 北京大学第一医院肿瘤诊疗中心，简称“三部”，位于东城区安定门内大街车辇店 15 号。
5. 北京大学第一医院男科中心，简称“男科中心”，位于地安门西大街 57 号院。

北大第一医院现持有《辐射安全许可证》（京环辐证[B0044]，发证日期为 2018 年 2 月 13 日，有效期至 2022 年 8 月 6 日，见附件 1 所示），许可使用 IV 类、V 类放射源，使用 II 类、III 类射线装置，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。

表 1-1 已许可使用的非密封放射性物质

使用场所	场所等级	同位素名称	批准的日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)
二部中心手术室	丙	Pd-103 粒子源	1.85E+07	7.40E+10
	丙	I-125 粒子源	1.85E+07	7.40E+10
急诊楼核医学科 (诊疗)	乙	Pd-103 粒子源	1.85E+07	7.40E+10
	乙	I-125 粒子源	1.85E+07	7.40E+10
	乙	Tc-99m	1.85E+08	4.44E+12
	乙	I-131	4.44E+08	2.37E+11
	乙	Ga-67	3.70E+07	1.85E+10
	乙	Sr-89	2.96E+07	3.70E+10
	乙	Sm-153	1.85E+08	9.25E+10

急诊楼核医学科 (放免)	乙	P-32	3.70E+07	3.70E+09
	乙	Re-186	2.22E+08	3.33E+10
	乙	Re-188	2.22E+08	3.33E+10
	乙	Ra-223	1.11E+08	5.55E+08
	乙	I-123	7.40E+06	1.85E+10
	乙	Lu-177	7.40E+07	1.85E+10
	乙	Y-90	3.70E+08	3.70E+10
	乙	In-111	2.22E+07	5.55E+09
	乙	Tl-201	2.22E+06	5.55E+09
	乙	F-18	1.78E+08	4.44E+12
	丙	I-125	3.70E+05	9.25E+08
	丙	H-3	3.70E+04	1.85E+08
	丙	S-35	3.70E+05	1.85E+08
	丙	Cr-51	3.70E+04	1.85E+08
	丙	C-14	3.70E+05	1.85E+08
	丙	Tc-99m	3.70E+06	1.85E+10
	丙	I-131	1.85E+07	9.25E+09
	丙	F-18	3.70E+06	1.85E+10
	丙	Cu-64	1.85E+06	5.55E+09
	丙	Ga-68	1.85E+06	5.55E+09

表 1-2 已许可使用的密封源（共 18 枚）

序号	放射源种类	类别	活度(Bq)×数量	活动种类
1	Am-241	V	3.70E+7 × 1	使用；
2	Cs-137	V	9.99E+6 × 1	使用；
3	Cs-137	V	3.70E+5 × 1	使用；
4	Cs-137	V	1.11E+6 × 1	使用；
5	Ge-68	V	1.11E+8 × 1	使用；
6	Gd-153	V	9.25E+9 × 2	使用；
7	Cs-137	IV	1.11E+9 × 2	使用；
8	Na-22	V	3.70E+6 × 2	使用；
9	Na-22	V	3.70E+5 × 6	使用；
10	Cs-137	V	3.70E+8 × 1	使用；

表 1-3 已许可使用的射线装置（共 48 台，Ⅱ类 7 台，Ⅲ类 41 台）

序号	装置名称	类别	装置数量	活动种类
1	牙科 X 线机	Ⅲ	2	使用；
2	CT 机	Ⅲ	5	使用；
3	医用电子直线加速器	Ⅱ	2	使用；
4	血管造影机	Ⅱ	5	使用；
5	膀胱镜机	Ⅲ	1	使用；
6	骨密度仪	Ⅲ	3	使用；
7	小动物 SPECT/CT	Ⅲ	1	使用；

8	CT 模拟定位机	III	1	使用;
9	PET/CT	III	1	使用;
10	SPECT/CT	III	1	使用;
11	碎石机	III	1	使用;
12	医用 X 射线机 (DR)	III	1	使用;
13	胆道造影机	III	1	使用;
14	模拟定位机	III	2	使用;
15	移动 X 线机	III	6	使用;
16	普通 X 线机	III	10	使用;
17	乳腺 X 射线机	III	1	使用;
18	胃肠机	III	4	使用;

1.3 医院近几年履行环保审批手续情况

医院自 2009 年以来,共开展了 12 个核技术利用项目,均履行了环保审批手续。其中,满足条件的 10 个项目已完成了竣工环保验收,见表 1-4 所示。1 个项目正在建设。

表 1-4 近几年履行环保审批手续情况一览表

编号	项目名称	环保审批	竣工环保验收
1	核医学科技术改造项目	京环审[2009]379 号	京环验[2012]252 号
2	放射性同位素使用场所的退役	京环审[2009]1237 号	京环验[2012]252 号
3	使用数字减影血管造影机项目	京环审[2009]1296 号	京环验[2012]279 号
4	新增医用 X 射线装置项目	京环审[2010]599 号	京环验[2014]190 号
5	新增医用射线装置项目	京环审[2011]96 号	京环验[2014]122 号
6	新建 PET/CT 工作场所和新增医用 X 射线装置项目	京环审[2013]47 号	新建 PET/CT 工作场所未实施,其余建设内容已完成竣工环保验收(京环验[2014]190 号)。
7	更新医用电子直线加速器和新增 III 类射线装置	京环审[2015]066 号	京环验[2016]200 号
8	新建核医学科工作场所及使用医用 X 射线机	京环审[2015]0101 号	京环验[2017]66 号
9	二部核医学科工作场所退役	京环审[2015]0292 号	京环验[2015]0289 号
10	新增使用一台 DSA 装置	京环审[2016]0038 号	2018 年 12 月自行完成竣工环保验收
11	保健中心工程放射类设备	京环审[2018]195 号	建设中
12	保健中心使用 DSA 项目	京环审[2020]9 号	建设中

1.4 辐射安全管理情况

(一) **辐射安全管理机构:** 为了保证密封源、非密封性放射性同位素和射线装置的安全使用和有效管理,北大第一医院设立了放射防护管理委员会,由医疗行政管理人员及临床科室等部门的专家组成。设组长 2 名,由分别党委书记和院长担任,副组长 1 名,由医疗副院长担任。委员分为领导小组和日常工作小组。领导小组由党委书记、院

长、医疗副院长、后勤副院长、纪委书记、党委副书记、人力资源处处长担任组成；日常工作小组由医务处、保卫处、总务处、工程办公室、教育处、医学装备处、医学影像科、放射治疗科、核医学科、心血管科、介入血管外科、骨科、口腔科、泌尿外科等部门人员组成。

委员会为医院放射防护的最高管理组织，医院院长为第一责任人，常设机构为医务处，日常放射防护管理工作由医务处负责。医院领导小组职责、工作小组职责、委员会人员名单、放射防护管理工作分工及实施细则见附件 2 所示。

（二）辐射防护规章制度：制定有较为齐全、比较严格的辐射防护规章制度和放射性事故应急预案，制定有《操作规程》、《人员培训计划》、《设备检修维护制度》、《辐射防护和安全保卫制度》、《台帐管理制度》、《环境监测及个人剂量监测制度》、《放射性废物管理制度》等规章制度，以及《辐射事故应急预案》。各项规章制度已得到落实。

（三）密封源的安全管理：一些密封源保存在保险柜内，实行双人双锁管理；另一些密封源存储在含源设备内的贮源容器中。为了减少密封源丢失所致的潜在危险，已建立密封源台帐，对放射源的数量和活度等数据，有详细登记，建立专门档案，并定期盘查，严防丢失。

（四）非密封性放射性同位素的安全管理：医院核医学科等使用非密封性放射性同位素的科室，均制定有严格的放射性药品管理制度。放射性药品的订购由放药专业人员负责；放射性药品管理由专人负责；放射性药品的交接在摄像头监控下，施行“点对点”的交接手续；放射性药品使用由专业人员监督，由指定人员进行。对放射性药品的采购、登记、使用、核对、保管和注销，药品的配制、质控和记录，以及放射性废物的处理，都作了明文规定。各项规定已在工作中得到落实。

（五）放射性废物的安全管理：(1) 当密封源进行退役处理时，将 IV 类和 V 类报废密封源送至城市放射性废物库；(2) 放射性废物分类收集于专用铅制放射性固体废物箱内，待收集满后由废物桶内取出，标明日期转移至放射性废物暂存库内暂存。依照《北京市医疗机构核医学放射性废物清洁解控管理办法（试行）》，符合清洁解控水平的废物做为医疗废物处置。目前，北大第一医院产生放射性“三废”的场所主要是二部核医学科。

（六）放射工作人员培训：制定有放射性工作人员培训计划。医院已于 2019 年 11 月委托生态环境部门认可的培训机构，对所有放射工作人员(共计 253 人) 进行了辐射安全和防护培训，并通过了考核。通过辐射安全与防护考核的辐射工作人员具体情况见附件 3 所示。

（七）监测计划

（1）个人剂量监测：所有从事放射性工作的医护人员均佩戴 TLD 个人剂量计，按每季度 1 次的频度，按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2016）和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令 18 号）要求建立个人剂量档案。

医院有专人负责个人剂量监测管理工作。发现个人剂量监测结果异常的，将及时调查原因，并将有关情况及时报告医院辐射防护领导小组。

目前，北大第一医院的个人剂量检测委托北京贝特莱博瑞技术检测有限公司进行，个人剂量档案齐全。根据医院提供的 2018 年度辐射工作人员个人剂量监测结果(见附件 4)，共计 251 人（含参与观摩的实习人员 39 人）开展个人剂量检测，年受照剂量大于 1mSv 的 1 人（1.64mSv，核医学科），其余人员的年受照剂量均低于 0.5mSv，多数人为 0.144mSv，表明医院辐射防护和安全管理措施是可行的。

（2）工作场所辐射水平监测

根据原环保部 18 令的要求，每年委托有资质单位对射线装置和非密封放射性物质工作场所进行 1 次场所辐射水平监测。对于有射线装置工作场所，主要包括机房四周(四周墙体、防护门和观察窗等)和楼上楼下相应场所、以及控制室等；对于非密封放射性物质工作场所，主要包括 SPECT、SPECT/CT 和 PET/CT 等装置机房、注射室和病人候诊室等四周和其楼上楼下相应场所，以及控制室等场所。监测数据记录存档。

工作场所辐射水平监测工作由北大第一医院辐射安全管理委员会组织实施，目前委托北京贝特莱博瑞技术检测有限公司进行，每年 1 次，监测报告齐全。评价期间查阅了 2019 年 6 月的检测报告，检测结果均满足相关标准要求。

本项目运行后，4 台 DSA 机房周围场所的辐射水平监测工作，将纳入医院放射工作场所的监测范围，一并按照 1 次/a 的频度开展。

3）表面污染监测：每天工作结束后，对非密封放射性同位素工作场所的工作台台面、通风橱台面、注射车以及设备等进行表面污染监测，监测数据记录存档。工作人员离开可能受到放射性污染的工作场所时，监测其工作服、体表的表面污染水平。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，该项工作由核医学科工作人员自行完成。

（八）辐射应急措施

医院已获得许可使用 IV 类、V 类放射源，使用 II 类、III 类射线装置，乙级非密封放射性物质工作场所，丙级非密封放射性物质工作场所。医院已针对上述许可使用中可

能发生的事故/事件，制定了相应的《辐射事故应急预案》。

1.5 项目概况

1.5.1 城南院区建设背景

北京大学第一医院城南院区工程位于北京市大兴区大兴新城 0206 街区 1901-1907 地块，该项目建议书已于 2013 年取得了国家发改委和国家卫生和计划生育委员会批复(发改社会[2013] 2111 号)。项目项目总用地面积 106317.76 平方米，建设用地总面积 72312.05 平方米，总建筑面积 216100 平方米，总投资 186173 万元。

北京大学第一医院城南院区项目属于“一会三函”项目，北京市规划委员会于 2015 年 5 月对项目设计方案给予同意复函（2015 规（大）复函字 23 号），建设建设用地于 2017 年 8 月取得了北京市政府的批复（京政地字（2017）58 号）。北京大学第一医院城南院区初步设计方案和投资概算于 2019 年 3 月取得了国家卫生健康委员会的批复（国卫规划函(2019) 43 号）。

城南院区北临双高路，之外是郁花园三里；东临兴丰大街，之外是兴创屹墅；南侧是乐园路，之外为绿地中央广场；西侧是兴华大街和地铁 4 号线，之外是大兴区体育中心。其地理位置见图 1-1 和附图 1 所示。



图 1-1 北京大学第一医院城南院区地理位置示意图

北京大学第一医院城南院区工程项目环境影响报告书于 2015 年 12 月取得了原北京市环保局的批复（京环审〔2015〕467 号）。

城南院区工程完成后，医院的医疗工作将独立实现门诊、医技检查、住院治疗一体化医疗服务。

1.5.2 城南院区建筑布局

根据北京大学第一医院城南院区设计方案，该院区北侧建有 3 座住院楼，东侧设儿科门急诊楼、急诊部 C 区、医技部、门诊部。中间区域建设科研楼和门诊部 D 区，西侧建设行政楼、教学楼和交流中心。北京大学第一医院城南院区建筑布局见图 1-2 和附图 2 所示。



图 1-2 北京大学第一医院城南院区建筑布局以及效果图

1.5.3 城南院区工程进度

城南院区项目于 2019 年 8 月开始施工，计划于 2023 年底竣工，工期 52 个月。

1.5.4 城南院区核技术利用建设内容

城南院区核技术利用项目均为新建，建设内容包括：

1. 在门诊部 D 区地下二层西侧，新建核医学科药物制备场所，使用 1 台 10MeV 自屏蔽回旋加速器制备 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 等 PET 药物，使用核素发生器制备 ^{68}Ga 和 ^{188}Re 药物，该场所属于乙级非密封放射性物质工作场所。

2. 在门诊部 D 区地下二层西侧，新建核医学科诊疗工作场所，配套 2 台 SPECT/CT，1 台 PET/CT 和 1 台 PET/MR，使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{123}I 核素药物开展 SPECT 诊断，使用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 和 ^{68}Ga 核素药物开展 PET 诊断，使用 ^{89}Sr 、 ^{186}Re 、

^{188}Re 、 ^{223}Ra 、 ^{177}Lu 、 ^{90}Y 和 ^{169}Yb 核素药物开展核医学治疗，该场所也属于乙级非密封放射性物质工作场所。

3. 在门诊部 D 区地下二层西侧，新建核医学科药物实验室，配套使用 1 台多模态小动物显像装置，分别开展小动物 PET、SPECT 以及 CT 扫描，使用同位素包括 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 、 ^{124}I 、 ^{123}I 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，该场所也属于乙级非密封放射性物质工作场所。

4. 在门诊部 D 区地下一层西侧放疗科新增使用 2 台 6MV 医用电子直线加速器。在门诊部 D 区地下二层西侧放疗科新增使用 2 台 10MV 医用电子直线加速器和 1 台后装治疗机。

5. 在急诊部一层介入治疗中心，新建 2 间 DSA 机房并使用 2 台 DSA 设备。在住院楼 A 四层心内科，新建 2 间 DSA 机房并使用 2 台 DSA 设备。

综上所述，本项目的评价内容为：使用 3 处乙级非密封放射性物质工作场所，使用 1 台 II 类回旋加速器，使用 4 台 II 类医用电子直线加速器，使用 4 台 II 类血管造影机，使用 1 台含 III 类放射密封源的后装机。

本项目属于使用 III 类放射源，II 类射线装置和使用乙级非密封放射性工作场所项目，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》，应该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》最新要求，北京万澈环境科学与工程技术有限公司符合第九条第一款规定，无该条第三款所列情形，不属于该条第二款所列单位。公司有多名环评工程师，有能力开展环境影响评价工作。受北大第一医院委托，北京万澈环境科学与工程技术有限公司开展“城南院区工程放射类设备”项目的环境影响评价工作。评价单位在现场查看、调查、收集资料以及现场监测的基础上，编制了本建设项目的辐射环境影响报告表。

1.5.5 城南院区核医学科建设规划

整体部署：建成医教研一体的核医学科，为患者提供优良的诊疗服务，开展相关教学和药物临床试验工作，同时保障医、技、护、工程等人员有基本的工作、学习、科研场所。

设备配置：配备 1 台回旋加速器，1 台 SPECT，1 台 SPECT/CT，1 台 PET/CT 和 1 台 PET/MR，配备动物实验使用的 1 台多模态小动物显像装置。

实施计划：新增的大型诊断设备（PET/CT 和 PET/MR）须申请《中华人民共和国

医疗器械注册证》，医院在获得《大型医用设备配置许可证》后，再行购置。满足上述条件的新增设备，将直接在核医学科安装。预计先期配置回旋加速器、SPECT/CT、PET/CT 设备和动物实验多模态显像装置各 1 台，后续再配置 1 台 PET/MR 和 1 台 SPECT/CT。核医学科项目拟分为二期开展竣工环保验收。

工作制度：250d/a，8h/d。

人员配置：城南院区核医学科的配备的技师、护士、物理师相对固定，医师会在城南院区和本部之间定期轮转，具体计划：

1. 先期，核医学科配备 12 人，其中医师 4 名（诊疗），技师（兼护师）6 人（1 人操作回旋加速器，5 人轮流操作 SPECT/CT、PET/CT 和小动物显像装置和注射药物），化学师 1 名（药物制备），物理师 1 人（设备维护和质控）。2. 后期，增加 PET/MR 和第 2 台 SPECT/CT 后，新增 2 名医师和 4 名技师，总人数达到 18 人。医院将根据设备数量以及诊疗人数，逐步配置辐射工作人员。

1.5.6 城南院区放疗科建设规划

整体部署：建成医教研一体的先进放疗中心，为患者提供安全、高效的医疗服务，同时保障医、技、护、工程等人员有基本的工作、学习、科研场所。

设备数量：考虑到将来的发展，城南院区设计了 4 间加速器机房，拟安装使用 2 台 6MV 医用电子直线加速器，2 台 10MV 医用电子直线加速器。

工作制度：250d/a，8h/d。

人员配置：按照“每台加速器配置至少 3 名医师，2 名物理师和 4 名技师”的标准配置辐射工作人员。医院将根据设备数量，逐步配置辐射工作人员。

实施计划：新增的放射治疗设备须申请《中华人民共和国医疗器械注册证》，医院在获得《大型医用设备配置许可证》后，再行购置。满足上述条件的新增设备，将直接在城南院区安装。预计先期配备 2 台加速器，后期再配置 2 台。放疗科拟分为二期开展竣工环保验收。

1.5.7 城南院区介入治疗建设规划

整体部署：具备一流的介入治疗能力，可开展外周血管类、脑神经和心血管介入类介入手术。手术种类有心脏造影、心脏支架、起搏器手术、脑血管造影、脊髓血管造影、脑血管支架、脑动脉瘤栓塞、脑血管畸形栓塞等。

设备数量：在急诊部一层介入治疗中心配置 2 台 DSA，在住院楼 A 座四层心内科配置 2 台 DSA 设备。

工作制度：250d/a，8h/d。

人员配置：按照“每台 DSA 配置至少 2 名医师，1 名技师和 1 名技师”的标准配置辐射工作人员，每组工作人员年介入手术量不超 500 例。

实施计划：DSA 设备无需行政审批可直接购置。本项目 4 台 DSA 设备拟同期配置，一并开展竣工环保验收。

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	Ir-192	3.7E+11 Bq / 3.7E+11Bq×1 枚	III	使用	放射治疗	门诊部 D 区地 下二层后装机 机房	后装机设备内贮存	新增

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
一、药物制备场所										
	¹⁸ F	液态溶液； 半衰期 109.8min；低毒	使用	7.40E+10	7.4E+08	1.11E+13	制备	简单操作	回旋加速器 室、热室	放化室
	¹¹ C	液态溶液； 半衰期20.4min； 低毒	使用	3.70E+10	3.7E+08	7.40E+12	制备	简单操作	回旋加速器 室、热室	放化室
	¹³ N	液态溶液； 半衰期10.0 min； 低毒	使用	3.40E+10	3.40E+08	3.40E+12	制备	简单操作	回旋加速器 室、热室	放化室
	¹⁵ O	液态溶液； 半衰期2.02 min； 低毒	使用	3.40E+10	3.40E+08	3.40E+12	制备	简单操作	回旋加速器 室、热室	放化室
	⁶⁸ Ga	液态溶液； 半衰期68.3 min； 低毒	使用	8.88E+09	8.88E+07	1.78E+12	制备	简单操作	热室	放化室
	¹⁸⁸ Re	液态溶液； 半衰期16.9h；	使用	1.11E+09	1.11E+07	5.55E+10	制备	简单操作	热室	放化室

		中毒								
	^{68}Ge	半衰期271d; 中毒	贮存	1.85E+09	1.85E+06	3.70E+09	核素发生器	贮存	热室	放化室
	^{188}W	半衰期69.78d; 中毒	贮存	3.70E+10	3.70E+07	7.40E+10	核素发生器	贮存	热室	放化室
二、核医学科										
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	液态针剂; 半衰期110min; 低毒	使用	3.70E+10	3.70E+07	7.4E+12	SPECT 诊断	很简单操作	核医学科	放药室
	^{131}I	液态溶液; 半衰期8.03d; 中毒	使用	4.44E+09	4.44E+08	2.37E+11	SPECT诊断、 核素治疗	简单操作	核医学科	放药室
	^{123}I	液态溶液; 半衰期13.2h; 低毒	使用	1.78E+09	1.78E+07	1.78E+11	SPECT 诊断	简单操作	核医学科	放药室
	^{18}F	液态溶液; 半衰期 109.8min; 低毒	使用	1.18E+10	1.18E+07	2.96E+12	PET 诊断	很简单操作	核医学科	放药室
	^{11}C	液态溶液; 半衰期20.4min; 低毒	使用	1.48E+09	1.48E+06	2.96E+11	PET 诊断	很简单操作	核医学科	放药室
	^{13}N	液态溶液; 半衰期9.97 min; 低毒	使用	7.40E+08	7.40E+05	7.40E+10	PET 诊断	很简单操作	核医学科	放药室
	^{15}O	液态溶液; 半衰期2.02 min; 低毒	使用	7.40E+08	7.40E+05	7.40E+10	PET 诊断	很简单操作	核医学科	放药室
	^{124}I	液态溶液; 半衰期4.18d; 中毒	使用	7.40E+08	7.40E+07	3.70E+10	PET 诊断	简单操作	核医学科	放药室
	^{64}Cu	液态溶液;	使用	1.11E+09	1.11E+06	5.55E+10	PET 诊断	很简单操	核医学科	放药室

		半衰期12.7h; 低毒						作		
	⁶⁸ Ga	液态溶液; 半衰期68.3min; 低毒	使用	2.96E+09	2.96E+07	5.92E+11	PET 诊断	很简单操作	核医学科	放药室
	⁸⁹ Zr	液态溶液; 半衰期3.3d; 中毒	使用	7.40E+08	7.40E+06	3.70E+10	PET 诊断	很简单操作	核医学科	放药室
	⁸⁹ Sr	液态溶液; 半衰期50.5d; 中毒	使用	2.96E+08	2.96E+06	3.70E+10	核素治疗	很简单操作	核医学科	放药室
	¹⁸⁶ Re	液态溶液; 半衰期89.23h; 中毒	使用	1.11E+09	1.11E+07	5.55E+10	核素治疗	很简单操作	核医学科	放药室
	¹⁸⁸ Re	液态溶液; 半衰期17h; 中毒	使用	1.11E+09	1.11E+07	5.55E+10	核素治疗	很简单操作	核医学科	放药室
	²²³ Ra	液态溶液; 半衰期11.4d; 极毒	使用	1.11E+07	1.11E+07	5.55E+08	核素治疗	很简单操作	核医学科	放药室
	¹⁷⁷ Lu	液态溶液; 半衰期6.65d; 中毒	使用	7.40E+09	7.40E+07	1.85E+11	核素治疗	很简单操作	核医学科	放药室
	⁹⁰ Y	液态溶液; 半衰期2.67d; 中毒	使用	1.85E+09	1.85E+07	4.62E+10	核素治疗	很简单操作	核医学科	放药室
	¹⁶⁹ Yb	液态溶液; 半衰期32d; 中毒	使用	7.40E+08	7.40E+06	1.85E+10	核素治疗	很简单操作	核医学科	放药室
三、药物实验场所										
	^{99m} Tc	液态针剂; 半衰期110min;	使用	7.4E+8	7.4E+6	7.4E+10	科研	简单操作	核医学科	放药室

		低毒								
	^{123}I	液态溶液; 半衰期13h; 中毒	使用	7.4E+8	7.4E+6	3.7E+10	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{18}F	液态溶液; 半衰期 109.8min; 低毒	使用	3.7E+9	3.7E+7	3.7E+11	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{11}C	液态溶液; 半衰期20.4min; 低毒	使用	7.4E+9	7.4E+7	3.7E+11	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{13}N	液态溶液; 半衰期9.97 min; 低毒	使用	7.4E+9	7.4E+7	3.7E+11	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{15}O	液态溶液; 半衰期2.02 min; 低毒	使用	1.85E+10	1.85E+8	9.25E+11	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{124}I	液态溶液; 半衰期4.18d; 中毒	使用	7.4E+8	7.4E+7	3.7E+10	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{64}Cu	液态溶液; 半衰期12.7h; 低毒	使用	7.4E+8	7.4E+6	3.7E+10	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{89}Zr	液态溶液; 半衰期3.3d; 中毒	使用	7.4E+8	7.4E+7	3.7E+10	科研	简单操作	核医学科	放药室
	^{68}Ga	液态溶液; 半衰期68.3min; 低毒	使用	2.96E+9	2.96E+7	2.96E+11	科研	简单操作	核医学科	放药室

表 4 射线装置

(一) 加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速 粒子	最大 能量 (MeV)	额定电流 (mA) /剂量率 (Gy/h)	用途	工作场所	备注
1	电子直线 加速器1	II	1	待定	电子	10MV (X 线) 20MeV(电子束)	X 线: 600cGy/min(6MV,10MV) 2400cGy/min(FFF@10MV) 电子束: 1000cGy/min	放射 治疗	门诊部D区地下 二层 加速器机房 1	新增
2	电子直线 加速器2	II	1	待定	电子	10MV (X 线) 20MeV(电子束)	X 线: 600cGy/min(6MV,10MV) 2400cGy/min(FFF@10MV) 电子束: 1000cGy/min	放射 治疗	门诊部D区地下 二层 加速器机房 2	新增
3	电子直线 加速器3	II	1	待定	电子	6MV (X 线) 20MeV(电子束)	X 线: 600cGy/min 电子束: 1000cGy/min	放射 治疗	门诊部D区地下 一层 加速器机房 3	新增
4	电子直线 加速器4	II	1	待定	电子	6MV (X 线) 20MeV(电子束)	X 线: 600cGy/min 电子束: 1000cGy/min	放射 治疗	门诊部D区地下 一层 加速器机房 4	新增
5	自屏蔽回 旋加速器	II	1	Minitrace Qilin	质子	10MeV	70μA	PET 药物 制备	门诊部D区地下 二层 回旋加速器机房	新增

(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	血管造影机	II	1	型号待定	125	1000	介入诊疗	城南院区综合住院楼四层 心内科DSA 一室	新增
2	血管造影机	II	1	型号待定	125	1000	介入诊疗	城南院区综合住院楼四层 心内科DSA 二室	新增
3	血管造影机	II	1	型号待定	125	1000	介入诊疗	城南院区医技楼一层介入手术 室1室	新增
4	血管造影机	II	1	型号待定	125	1000	介入诊疗	城南院区医技楼一层介入手术 室2室	新增

(三)中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压 (kV)	最大靶电流 (μA)	中子强度(n/s)	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度 (Bq)	贮存方式	数量	
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
退役源	固体密封源	Ir-192					不暂存	返回货源单位
废靶	固体	活化成份					暂存	优先清洁解控处置，活化水平较高的废靶送北京市城市放射性废物库。
洗涤废水、受检人员排泄物	液体	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{131}I 等			约 180m^3	总 $\beta < 10\text{Bq/L}$	衰变池暂存	依照《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》，对于槽式衰变池（罐）暂存方式，放射性废水暂存至少80d后，排入医院污水处理站。严格记录废水排放台帐。
手套、棉签等其他固态物质、一次性注射器	固体	^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{131}I 等			1517.5 kg	$< 10^4\text{Bq/kg}$	暂存于医学科内放射性废物间	暂存至少 80d 后，经自行检测，符合《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》要求后，按医疗废物危交有资质单位处置。
核医学科放药室通风柜排气	气体	微量 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{131}I 等					直接排放	通风橱废气经通风橱自带的活性炭过滤器过滤后，在门诊部 D 区顶部排放。
通风橱活性炭过滤材料	固体	微量 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{131}I 等			100kg			暂存至少 80d，经自行检测，符合《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》要求后，按医疗废物危交有资质单位处置。
有害气体 O_3 等	气体				$< 10\text{g}$		直接排放	经通风系统直接排入环境大气

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	1. 《中华人民共和国环境保护法》，2015 年 1 月 1 日实施； 2. 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月 1 日实施； 3. 《中华人民共和国环境影响评价法》，2018 年 12 月 28 日修订； 4. 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院令第 709 号修改，2019 年 3 月； 5. 《建设项目环境保护管理条例》，国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日实施； 6. 《放射性物品运输安全管理条例》国务院令第 562 号，2009 年； 7. 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部令第 7 号令修订，2019 年 8 月； 8. 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，原环境保护部令第 18 号，2011 年； 9. 《建设项目环境影响评价分类管理名录》，原环保部令第 44 号，2017 年； 10. 《关于修改《建设项目环境影响评价分类管理名录》部分内容的决定》，生态环境部令第 1 号，2018.4.28 施行； 11. 《关于发布射线装置分类》的公告，原环境保护部 国家卫生和计划生育委员会，公告 2017 年第 66 号； 12. 《关于发布放射源分类办法》的公告，原国家环境保护总局公告，2005 年第 62 号； 13. 《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； 14. 《北京市禁止违法建设若干规定》，北京市政府第 228 号令，2011 年； 15. 《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》，原北京市环境保护局文件，京环发〔2011〕347 号； 16. 《辐射安全与防护监督检查技术程序》，原环境保护部，2012 年 3 月； 17. 原北京市环境保护局办公室《关于做好辐射类建设项目竣工环境保护验收工作的通知》，京环办〔2018〕24 号，2018 年）； 18. 《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； 19. 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》，原环保部，环办辐射
------	--

	函〔2016〕430号； 20. 《北京市生态环境局办公室关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》京环办〔2018〕13号； 21. 关于发布《建设项目竣工环保验收暂行办法》的公告，国环规环评〔2017〕4号，2017年11月。
技术标准	1. 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016)； 2. 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) ； 3. 《辐射环境监测技术规范》(HJ/T61-2001) ； 4. 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第1部分：一般原则》(GBZ/T201.1-2007)； 5. 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分：电子直线加速器放射治疗机房》(GBZ/T201.2-2011)； 6. 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第3部分：γ射线源放射治疗机房》 GBZ/T 201.3-2014； 7. 《电子加速器放射治疗放射防护要求》(GBZ126-2011)； 8. 《后装γ源近距离治疗放射防护要求》(GBZ 121-2017)； 9. 《密封放射源及密封γ放射源容器的卫生防护标准》(GBZ114-2006)； 10. 《医用常规X射线诊断设备质量控制检测规范》(WS76-2017)； 11. 《临床核医学放射卫生防护标准》(GBZ120-2006)； 12. 《放射性废物管理规定》(GB14500-2002)； 13. 《医用放射性废物的卫生防护管理》(GBZ133-2009) 14. 《医用X射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)； 15. 《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010)； 16. 《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素》(GBZ2.1-2019)； 17. 《核辐射环境质量评价一般规定》(GB11215-1989)； 18. 《环境空气质量标准》(GB3095-2012)； 19. 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2016)； 20. 《表面污染测定 第一部分 β发射体 ($E_{\beta\max} > 0.15\text{MeV}$) 和 α发射体》(GB/T14056.1-2008)。

	21. 《医用常规 X 射线诊断设备质量控制检测规范》(WS76-2017); 22. 《北京市水污染物排放标准》(DB11/307-2013); 23. 《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005); 24. 《 ^{188}W - ^{188}Re 色层发生器》(GB/T 25288-2010); 25. 《裂变钼 99-锝 99m 色层发生器》(GB 13172-2009); 26. 《放射性物品安全运输规程》(GB11806-2019); 27. 公安部《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》(GA 1002-2012); 28. 《环境影响评价技术导则》-大气环境 (HJ2.2-2018); 29. 《医用与生物学实验室使用非密封放射性物质的放射卫生防护基本要求》(WS 457-2014)。
其他	1. 北京大学第一医院环境影响评价咨询协议书; 2. 北京大学第一医院提供的放射诊疗操作规程、辐射安全管理制度、个人剂量检测报告、以及核医学科安装回旋加速器及使用放射性核素说明。 3. 北京大学第一医院城南院区结构、结构、暖通和水专业设计图纸。 4. NCRP REPORT NO.151“Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities”(2005 年); 5. NCRP REPORT No.147“Structural Shielding Design for medical X ray imaging Facilitie”(2005 年); 6. RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK , Radiation Protection Dosimetry.98(1), 2002; 7. 《医用外照射源的辐射防护》, ICRP 33 号出版物, 人民卫生出版社, 1984; 8. 《核素治疗病人的出院管理》, IAEA 的 63 号安全丛书, 2009; 9. 郑钧正, 卢正福, 李隆德译.医用外照射源的辐射防护, 国际放射委员会第 33 号出版物, 人民卫生出版社。1984。 10. GE 公司提供的关于 Qilin 回旋加速器相关技术资料。 11. AAPM Task Group 108:PET and PET/CT Shielding Requirements. Am. Assoc. Phys. Med. Phys. 33,1, January 2006。 12. 《原子核物理》(修订版), 卢希庭主编, 原子能出版社, 2000 年 10 月第二版。 13. 《辐射剂量学》, 张士骏主编, 原子能出版社, 1981 年 12 月第一版。

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

按照《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016)的规定,并结合本项目的特性,确定评价范围为:以医用电子直线加速器机房、后装机机房、DSA 机房以及核医学科控制区实体屏蔽外周界向外围扩展 50m 的区域作为评价范围。本项目评价范围示意图见图 7-1 和附图 3 所示。

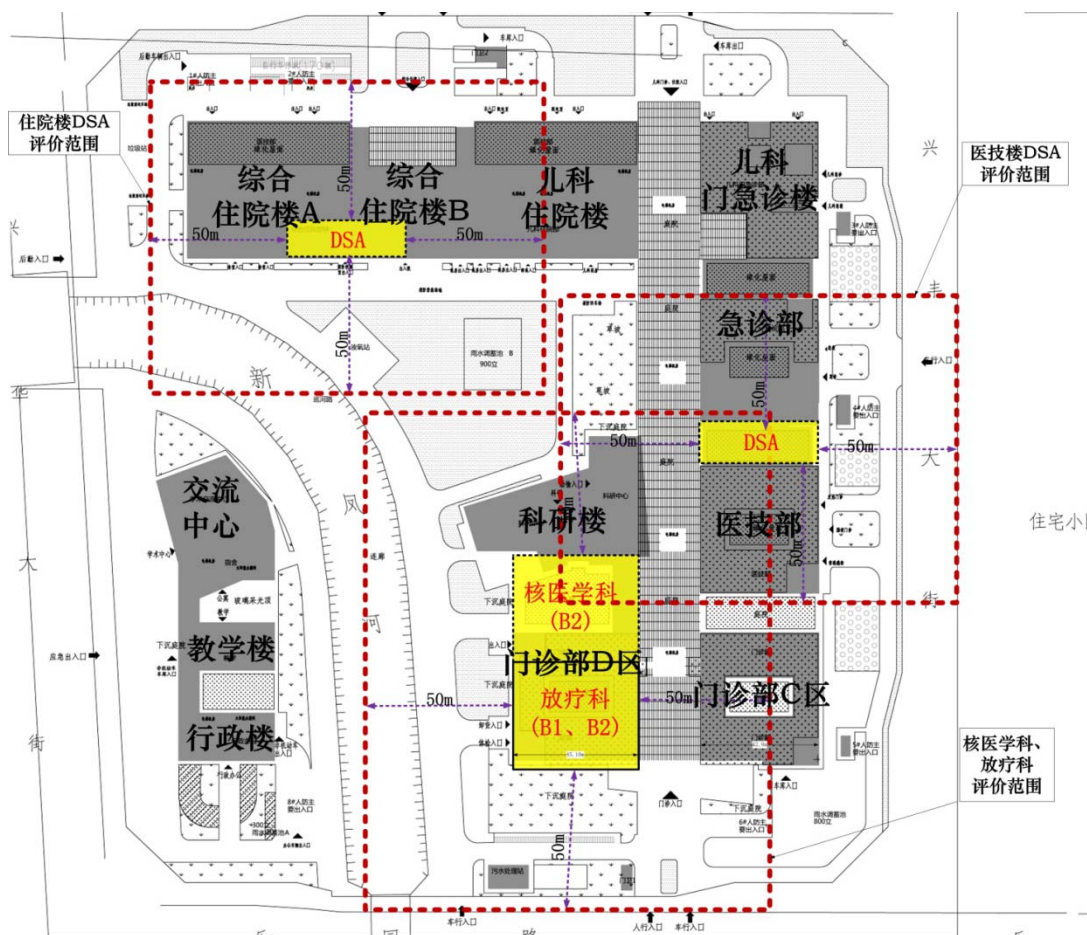


图 7-1 本项目评价范围示意图

7.2 评价因子

本项目主要评价因子为 X 射线、 γ 射线、中子、 β 射线、放射性“三废”和 O_3 等。

7.3 评价目的

- 1、对建设项目环境辐射现状进行调查及辐射环境现状监测;
- 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,为环境保护行政主管部门管理提供依据;
- 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、对不利辐射环境影响和存在的问题提出防治措施,把其减少到“可合理达到的尽

量低水平”；

6、为医院的辐射环境保护管理提供科学依据。

7.4 评价原则

- 1、以建设项目为基础，环保法律法规为依据，国家有关方针政策为指导的原则；
- 2、突出该项目的特点，抓住关键问题，坚持实事求是、客观公正的原则；
- 3、评价来源于项目、服务于项目、指导于项目的原则。

7.5 保护目标

本项目新建核医学科场所（包括药物制备场所、核医学诊疗场所和药物实验室）位于门诊部 D 区地下二层。本项目新建放疗科的 2 台 6MV 加速器机房，位于门诊部 D 区地下一层西侧；2 台 10MV 加速器机房和 1 台后装机房位于门诊部 D 区地下二层西侧。新建 2 间 DSA 机房位于急诊部一层介入治疗中心；还有 2 间 DSA 机房位于住院楼 A 四层。

上述场所的具体位置见图 7-2 至图 7-5，以及附图 4-附图 6 所示。场所周围 50m 范围内保护目标的相关情况见表 7-1 所示。

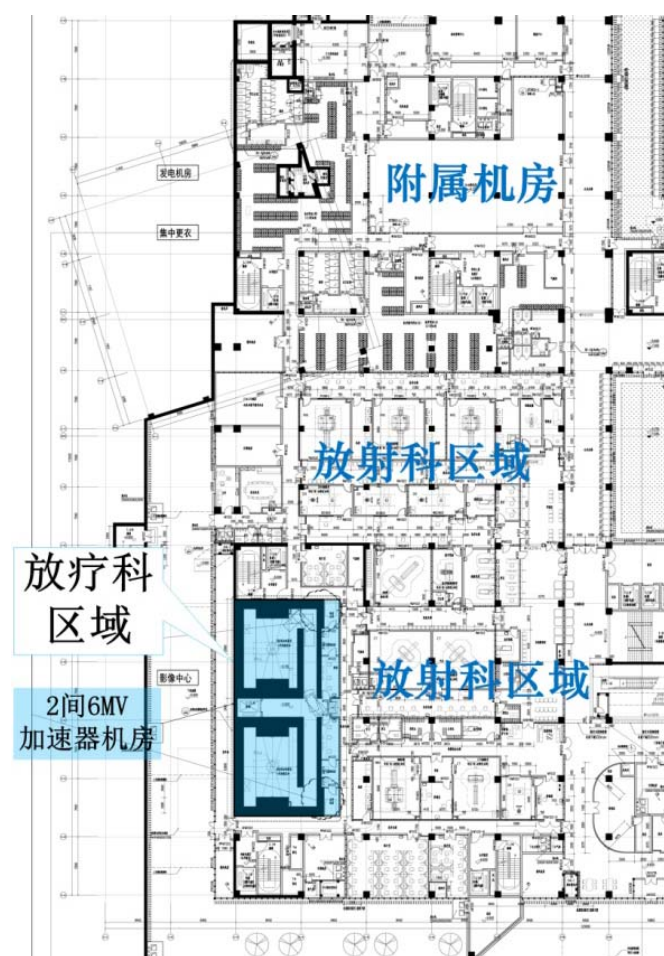


图 7-2 门诊部 D 区地下一层放疗科区域和周围相关场所位置示意图

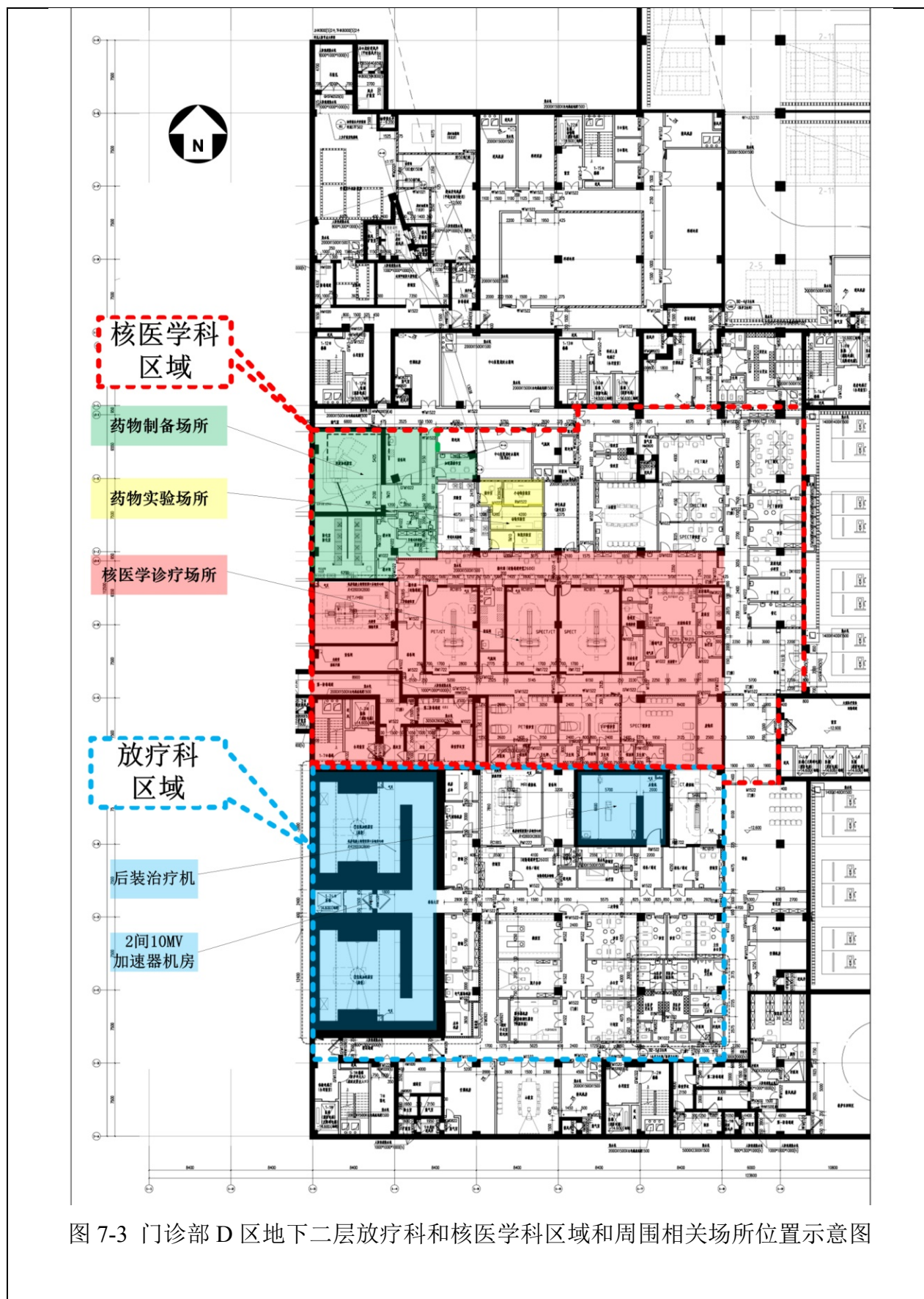


图 7-3 门诊部 D 区地下二层放疗科和核医学科区域和周围相关场所位置示意图

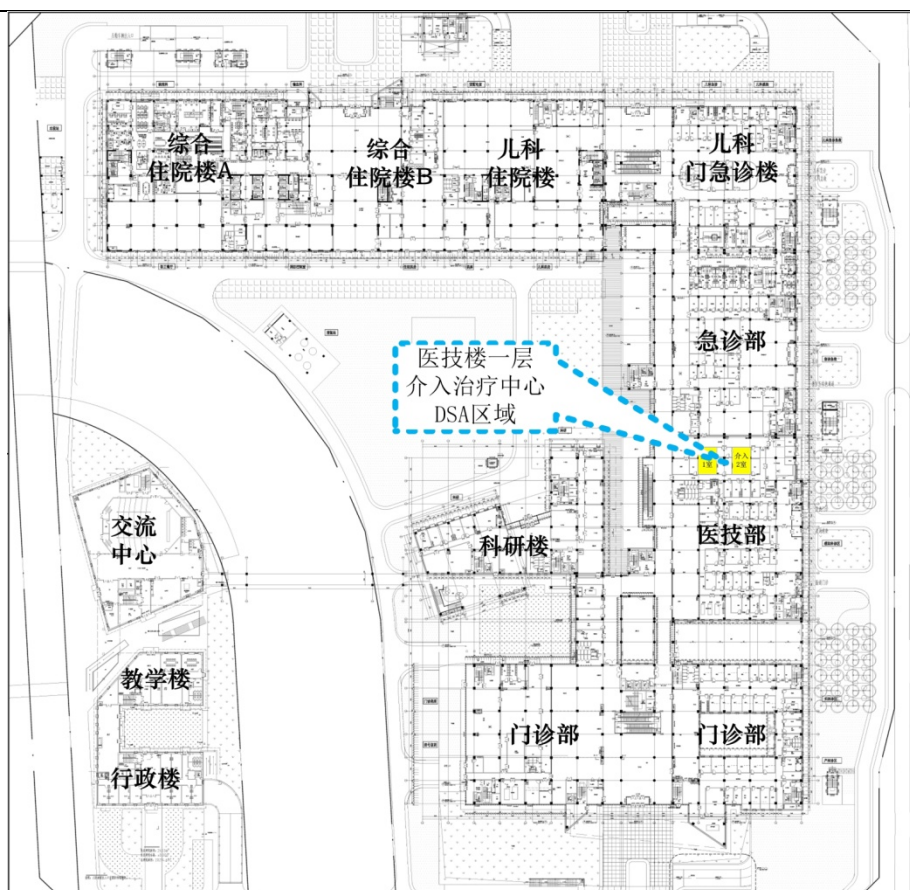


图 7-4 医技部一层介入治疗中心 DSA 机房位置示意图

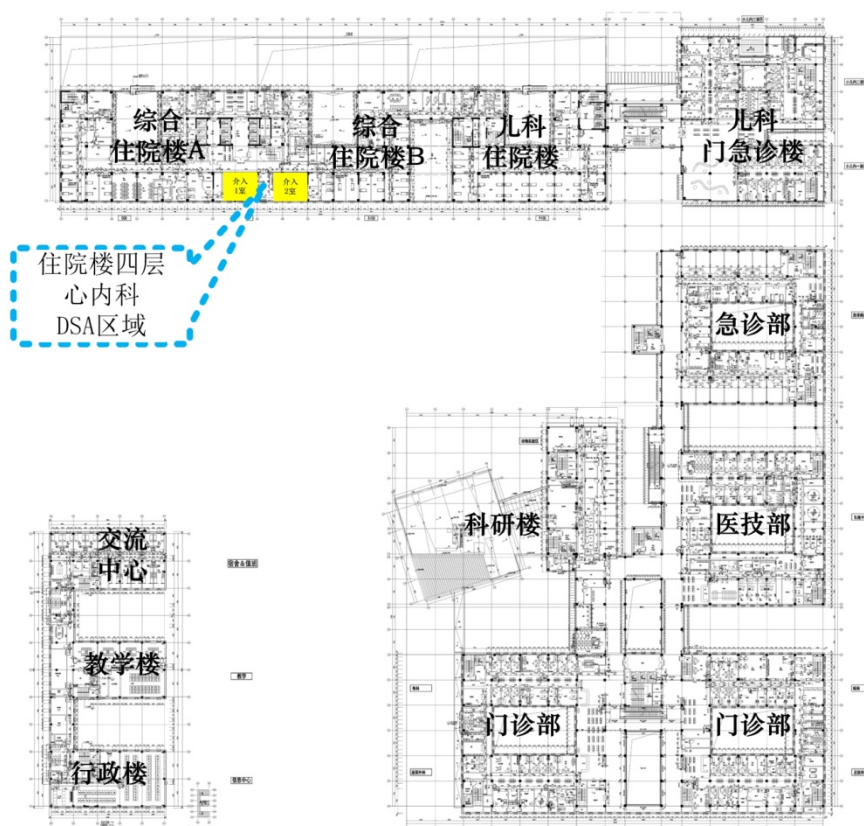


图 7-5 综合住院楼四层心内科新建 2 间 DSA 机房位置示意图

表 7-1 本项目拟建的相关场所周围 50m 范围内的保护目标

门诊部 D 区 地下一层放疗科 (2 间相邻 6MV 加速器机房)	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
	CT、MR 机房和放射科候诊区	东侧	3	10
	楼道、空调机房	南侧	3	2
	下沉庭院	西侧	3	5
	电梯间、放射科阅片室、放射科医生办公区、空调机房、DR、MRI 机房等	北侧	3	25
	门诊药库	楼上	4.9	5
	加速器机房控制室	楼下	6.7	3
门诊部 D 区 地下二层放疗科 (2 间相邻 10MV 加速器机房)	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
	MRI 模拟机房及控制室	东侧	3	4
	阅片会诊室、剂量检测室	东侧	3	5
	楼道、电梯间、空调机房、	南侧	3	2
	土层	西侧	/	/
	电梯间、检查换衣、淋浴间	北侧	紧邻	5
	6M 直加机房控制室	楼上	6.7	3
	土层	楼下	/	/
门诊部 D 区 地下二层放疗科 (1 间后装机机房)	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
	CT 模拟机房及控制室	东侧	紧邻	2
	治疗室	南侧	3	2
	设备间	西侧	紧邻	/
	MRI 模拟机房	西侧	3.2	2
	SPECT 候诊室、卫生间、保洁间	北侧	紧邻	10
	放射科候诊区、CT 机房	楼上	6.7	10
	土层	楼下	/	/
门诊部 D 区 地下二层核医学科 (药物制备场所)	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
	配电间、战时水箱间、实验室	东侧	紧邻	4
	动物实验场所	东侧	4	2
	PET/MR 机房及操作廊	南侧	紧邻	5
	土层	西侧	/	/
	电梯间、战时水箱间	北侧	3	5
	排风机房、PACS 机房	楼上	6.7	3
	土层	楼下	/	/
门诊部 D 区 地下二层核医学科 (药物实验室)	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
	净化机房、示教室	东侧	紧邻	4
	SPECT/CT 机房操作廊	南侧	紧邻	4
	普通实验室	西侧	紧邻	3
	药物制备场所质控室、更衣区	西侧	4	3
	战时水箱间、气瓶间	北侧	紧邻	/
	MRI 机房和控制室	楼上	6.7	2
	土层	楼下	/	/
门诊部 D 区	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数

	地下二层核医学科 (核医学诊疗场所)	候诊区、放免室、甲功室、登记室	东侧	2.5	10
		MRI、CT 模拟机房、后装机房、10MV 直加机房	南侧	紧邻	5
		回旋加速器场所、动物实验场所	西侧	10	/
		送、排风机房、土层	北侧	紧邻	5
		放射科用房	楼上	6.7	4
		土层	楼下	/	/
	住院楼 四层心内科 DSA 一室	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
		DSA 二室操作室及机房	东侧	2.5	3
		通道	南侧	紧邻	/
		设备间、设备库房、洁净品库、病人准备间	西侧	5	2
		家属等候区、电梯厅	北侧	3	10
		屋面	楼上	3	/
		设备层	楼下	3	/
	住院楼 四层心内科 DSA 二室	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
		设备间、污物间、苏醒间	东侧	3	2
		通道	南侧	紧邻	/
		DSA 一室操作室及机房	西侧	2.5	3
		走廊、医护休息室、配电间	北侧	3	2
		病房	楼上	3	10
		设备层	楼下	3	/
	医技楼 一层介入手术室 1 室	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
		介入手术室 2 室控制室	东侧	3	3
		医护走廊、值班室、医护更衣间	南侧	2.5	2
		设备间、库房、苏醒间、等候区	西侧	3	10
		患者等候廊、抢救室	北侧	3	3
		生化免疫分析区	楼上	3	2
		车库	楼下	3	/
	医技楼 一层介入手术室 2 室	保护目标	方位	最近距离(m)	长居留人数
		设备间、库房	东侧	紧邻	1
		办公室、值班室、医护走廊及更衣间	南侧	3	4
		介入手术室 1 室控制室	西侧	3	3
		患者等候廊、抢救室	北侧	3	3
		生化免疫分析区	楼上	3	2
		车库	楼下	3	/

本项目的评价范围内的保护目标主要是医护人员、就诊患者和公众。本项目相关场所周围 50m 范围内，无学校、居民楼等敏感目标。

7.6 评价标准

7.6.1 剂量限值和剂量约束值

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)的规定：

(1) 剂量限值

表 7-2 个人剂量限值

辐射工作人员	公众关键人群组成员
连续 5 年的年平均有效剂量不超出 20mSv，且任何一年中的有效剂量不超出 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到 5mSv。

《GB18871-2002》11.4.3.2 还规定了年剂量约束值，按辐射防护最优化原则设计的年剂量控制值应小于或等于该剂量约束值。剂量约束值是剂量限值的一个分数，公众剂量约束值通常应在 0.1~0.3mSv/a 范围内。

(2) 剂量约束值

本项目所有从事放射治疗的辐射工作人员（含直线加速器和后装机）年受照剂量约束值均取 2mSv。从事介入治疗和核医学诊疗的辐射工作人员年剂量约束值取 5mSv/a；公众均取 0.1mSv/a 作为年剂量约束值。

7.6.2 放射工作场所周围剂量率控制水平

本项目周围公众除满足上述剂量约束要求外，直线加速器机房、回旋加速器机房、后装治疗机机房和 DSA 机房（机房周围和楼上 30cm、楼下 150cm）处的周围剂量当量率均不大于 2.5μSv/h；核医学科控制区边界（周围和楼上 30cm、楼下 150cm）处剂量率水平不大于 2.5μSv/h。PET/CT、SPECT、PET/MR 机房周围的剂量率水平不大于 2.5μSv/h。

7.6.3 透视受检者 DSA 体表空气比释动能率

《医用常规 X 射线诊断设备质量控制检测规范》（WS76-2017）的“表 B.1 X 射线透视设备的检测项目与技术要求”规定，透视受检者入射体表空气比释动能率最大值 ≤100mGy/min。《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）4.7 规定，介入治疗最小焦皮距 20cm。由以上两个条件，可得出透视工况下，距离靶点 1 米处的主束辐射剂量率最大为 240mGy/h。

7.6.4 透视防护区测试平面上的空气比释动能率

依据《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ 130-2013）的相关规定，介入放射学 X 射线设备在确保铅屏风和床侧铅挂帘等防护设施正常使用情况下，在透视防护区测试平面上的空气比释动能率不大于 400μGy/h。

7.6.5 X 射线设备机房的屏蔽防护及空间要求

1. X 射线设备机房屏蔽防护要求：本项目 X 射线设备机房屏蔽执行《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）给出的相应屏蔽防护要求，见表 7-3。

表 7-3 医用 X 射线装置机房的屏蔽防护要求

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
介入X射线设备机房	2	2
CT机房	2.5（较大工作量）	

2. 射线装置机房空间要求：根据《医用X射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）相关要求，本项目的4间DSA机房最小有效使用面积、最小单边长度将满足表7-4的要求。

表 7-4 X 射线设备机房（照射室）使用面积及单边长度

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)
单管头X射线机	20	3.5
CT	30	4.5

7.6.6 放射性废水排放管理要求

(1) 水污染物排放标准

北京市地方标准《水污染物综合排放标准》（DB11/307-2013）给出了排入公共污水处理系统的水污染物排放限值：车间或生产设施排放口总 β 放射性为 10Bq/L。本项目放射性废水衰变池的排水口采用该数值进行控制。

(2) 放射性废水排放管理要求

依据《北京市生态环境局办公室关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》（京环办[2018] 13 号），本项目使用核素为 A 类和 B 类，放射性废水流入相同衰变池，故按照 B 类废水管理要求进行管理。具体为：放射性废水注满后，暂存时间超过 10 倍最长半衰期且不少于 30 天后，应委托有资质（CMA 或 CNAS）的检测机构对拟排放废水中 I-131 核素、最长半衰期核素的放射性活度浓度进行检测，活度浓度与单次排放总活度值均应满足 GB18871-2002 附录 A 表 A1 的规定。科室将在“放射性废水暂存、处置管理台帐”上详细记录解控排放废水所含核素、体积、废水暂存起始日期，处置人员和处置日期等信息。

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

7.6.7 放射性固体废物管理

由于核医学科使用的放射性核素半衰期均较短，因此可以将放射性废物收集暂存，待衰变至符合北京市核医学放射性废物管理要求时，解控为医疗废物处置。

依据《北京市生态环境局办公室关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》(京环办[2018] 13 号)，核医学放射性固体废物须设置独立的暂存室。药物操作场所、废物暂存室应分别设置有屏蔽能力并有电离辐射标志的废物桶、废物箱，并按照 A 类和 B 类放射性废物分别进行标识。药物操作场所废物桶内应使用不易破损的塑料袋对固体废物进行收集，密封袋口后转移至暂存室废物箱中，并在塑料袋外表面注明废物类别 (A 类和 B 类)、重量 (或体积)、所含核素名称、暂存起始日期等信息。

A 类固体废物暂存时间超过 30 天、B 类固体废物暂存时间超过 10 倍最长半衰期且不少于 30 天后，使用监测仪器对废物逐袋进行表面巡测，辐射剂量率低于 200nSv/h 且 α 、 β 表面污染水平分别小于 0.08 Bq/cm² 和 0.8Bq/cm²，可对废物解控作为医疗废物处置。并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量 (kg)、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

7.3 放射性工作场所分级

非密封放射性物质工作场所按日等效最大操作量的大小进行分级，见表 7-5。

表 7-5 非密封放射性物质工作场所分级

分 级	日等效最大操作量/Bq
甲级	$>4 \times 10^9$
乙级	$2 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$
丙级	豁免活度值以上 $\sim 2 \times 10^7$

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，医疗机构使用 ¹⁸F、^{99m}Tc 相关活动视为“很简单操作”。使用 ¹³¹I 相关活动视为“简单操作”。放射性药品生产中分装、标记等活动视为“简单操作”。

7.5 工作场所及工作人员的表面污染控制要求

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的有关规定，见表 7-6。

表 7-6 表面放射性物质污染控制水平 (Bq/cm²)

表 面 类 型		β 放射性物质
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	4×10
	监督区	4

工作服、手套、工作鞋	控制区	4
	监督区	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-1}

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

7.6 操作放射性同位素通风橱及排风口设置要求

《临床核医学放射卫生防护标准》（GBZ120-2006）第 4.5 款：合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（一般不小于 1m/s ），排气口应高于本建筑屋脊，排出空气浓度不应超过有关法规标准规定限值。

本项目核医学科的放药室内安装手套箱，操作口风速 $>1\text{m/s}$ 。手套箱设置独立的排风系统，排放口设在门诊部 D 区顶部，高度 23m。手套箱将配套活性炭过滤器，更换周期为一年。使用初期，过滤器的过滤效率 90%以上，使用一段时间后因滤材吸潮后会有所降低，在一年的更换周期内，过滤效率预计不低于 75%。过滤器中活性炭的重量约 10kg。

7.7 核医学科工作场所室内表面及装备结构要求

《临床核医学放射卫生防护标准》（GBZ120-2006）第 4.4 款给出了核医学科工作场所表面及装备结构要求，具体见表 7-7。本项目属于 II 类场所，需设置通风橱、专用排风，地板采用 PVC 等易清洗且不易渗透的材料敷设，地板与墙壁接缝无缝隙。

表 7-7 核医学科工作场所表面及装备结构要求

场所分类	地面	表面	通风橱	室内通风	管道	清洗及去污设备
I	地板与墙壁接缝无缝隙	易清洗	需要	应设抽风机	特殊要求	需要
II	易清洗且不易渗透	易清洗	需要	有较好通风	一般要求	需要
III	易清洗	易清洗	不必	一般自然通风	一般要求	只需清洗设备

7.8 放射性药物操作的一般放射防护要求

根据《临床核医学放射卫生防护标准》(GBZ 120-2006)的有关规定，操作放射性药物应有专门场所；在放射性工作场所不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物品；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那部分；购买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、活度和表面放射性污染擦拭实验结果等。

7.9 患者体内放射性残留量出院标准

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的规定,接受¹³¹I治疗的患者,其体内放射性活度降至低于 400MBq 之前不得出院。根据 IAEA 的 63 号安全丛书《核素治疗病人的出院管理》(2009),放射治疗患者出院时体内放射性活度要求见表 7-8。

表 7-8 放射治疗患者出院时体内放射性活度要求

放射性核素	患者出院时体内放射性活度要求/MBq
⁸⁹ Sr	≤200
¹³¹ I	≤400
⁹⁰ Y	≤2500
¹⁸⁶ Re	≤9000
¹⁸⁸ Re	≤9000

本项目使用的治疗核素,其给药量都低于表7-8中相应的“患者出院时体内放射性活度要求”,故无需住院。患者服药后,在核医学科留观15min左右即可离开。

7.10 贮源器和核素发生器表面周围剂量当量率控制水平

根据《后装 γ 源近距离治疗放射防护要求》(GBZ 121-2017)条款 4.2.2 的规定:工作贮源器内装载最大容许活度的放射源时,距离贮源器表面 5cm 处任何位置,因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 50 μ Sv/h;距离贮源器表面 100cm 处的球面上,任何一点因泄漏辐射致周围剂量当量率不大于 5 μ Sv/h。

核素发生器外表面剂量率水平满足《放射性物品安全运输规程》(GB11806-2019) III (黄)级要求,外表面任一点的辐射水平不大于 2mSv/h, 1m 处的辐射水平低于 0.1mSv/h。

7.11 大气污染物浓度控制

(1) 室内污染物浓度

室内臭氧和氮氧化物浓度限值执行 GBZ2.1-2019 《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分:化学有害因素》,臭氧的最大容许浓度 0.3mg/m³, NO₂ 的时间加权容许浓度为 5mg/m³,短时间接触容许浓度为 10mg/m³。

(2) 环境污染物浓度

臭氧和氮氧化物的环境空气质量浓度限值执行《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中的二级浓度限值,臭氧的小时平均浓度 0.2mg/m³, NO₂ 的小时平均浓度 0.2mg/m³。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 环境质量和辐射现状

评价单位在开展“北京大学第一医院城南院区工程放射类设备项目”环境影响评价工作期间，委托有监测能力的北京贝特莱博瑞技术检测有限公司于2019年10月29日（天气晴）开展了城南院区用地环境辐射本底监测（检测报告编号2019BJC-Q0132，见附件5，监测内容为 γ 剂量率。检测仪器为6150AD 5/H/127086剂量率仪。

表8-1监测结果表明：各测点 γ 辐射剂量率为0.08-0.09 $\mu\text{Sv/h}$ ，与北京市环境 γ 辐射剂量率结果比较，属于正常本底水平。监测点位见图8-1所示。

表 8-1 北大第一医院二部室外环境 γ 射线剂量率监测结果

点位*	地点	γ 辐射剂量 ($\mu\text{Sv/h}$)*
①	城南院区南侧空地	0.08
②	城南院区与内科病房楼之间空地	0.08
③	城南院区北侧花园空地	0.08
④	城南院区西侧空地	0.08
⑤	干部外科病房楼东侧	0.09
⑥	干部外科病房楼东北角	0.08
⑦	干部外科病房楼北侧	0.09
⑧	干部外科病房楼东南角	0.08

注：*含宇宙射线



图 8-1 本底辐射水平监测点位示意图

表 9 项目工程分析与源项

9.1 医用电子直线加速器（放射治疗）

9.1.1 工作原理

电子加速器核心部分的工作原理如图 9-1 所示。高压电源装置对交流电进行升压和整流滤波，向调制器提供直流电压；调制器的功能是向磁控管和电子枪提供具有特定宽度和幅度的高压脉冲。当加速器工作时，调制器主触发电路触发主闸流管按照所设定的脉冲重复频率(PRF)导通和关断，引起充、放电电路工作，在脉冲变压器次级产生磁控管和电子枪所要求的两路高压脉冲。其中一路高压脉冲加到磁控管阴极，引起磁控管震荡，产生微波脉冲；另一路脉冲高压脉冲加到电子枪的阴极，使电子射入加速管。与此同时，磁控管产生的微波脉冲经四端环流器馈入加速管，由于自动频率控制(AFC)使磁控管的工作频率与加速管的频率色散特性有最好的配合，在加速管内，前向微波和反射波代数相加形成驻波，这种波在空间上是恒定的，但在时间上是震荡的，即加速管的谐振腔内电场强度的大小和方向是变化的，但其位置不变，从而在加速管建立起电场梯度，使射入加速管的电子被逐级加速、聚焦，最后获得很高的能量；高速电子轰击位于加速管末端的钨靶而产生 X 射线。加速后的高速电子直接或经转换为 X 射线后供放射治疗使用。

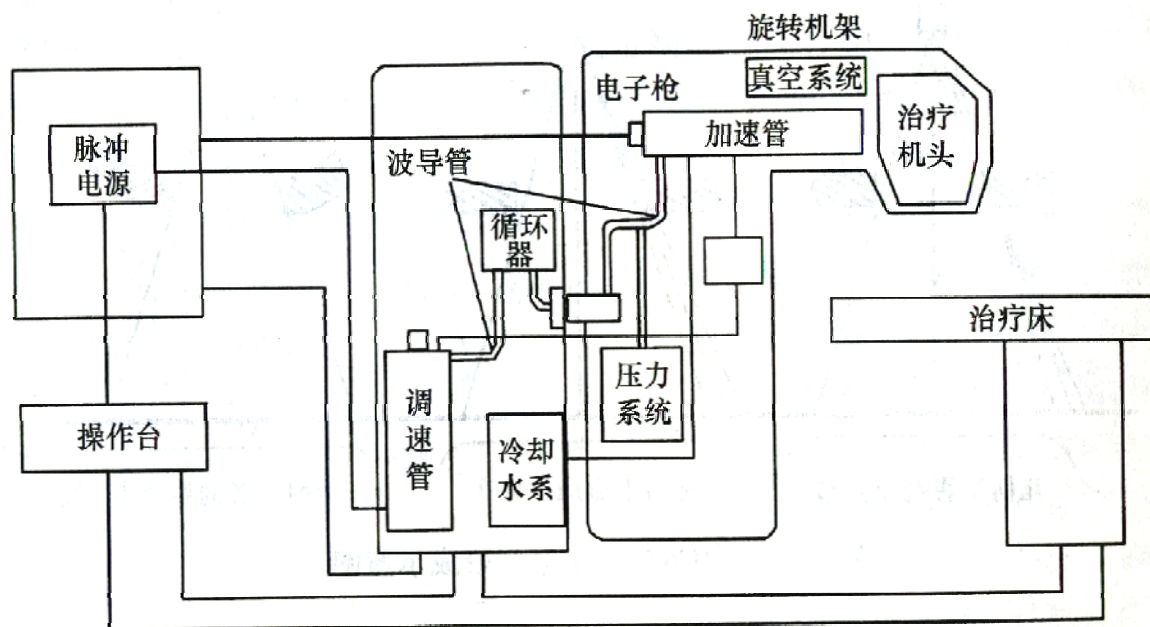


图 9-1 电子直线加速器结构示意图

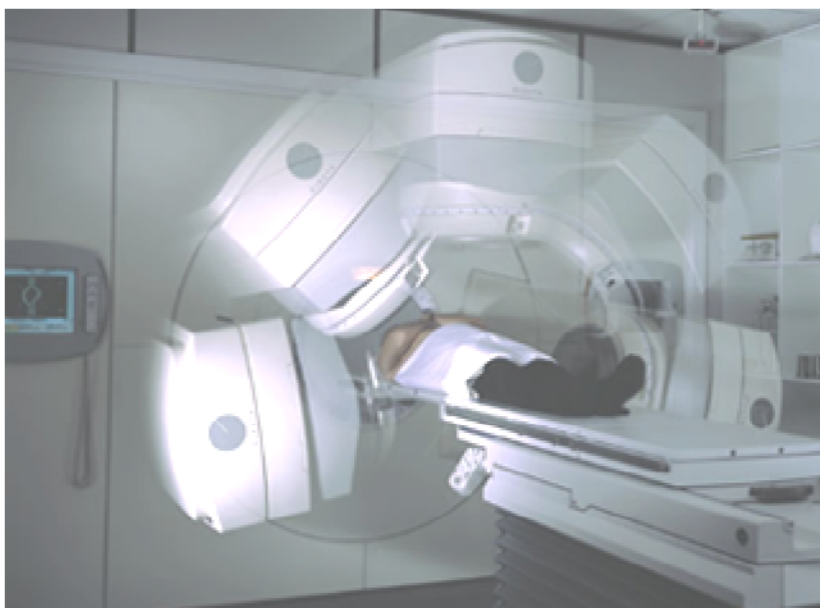
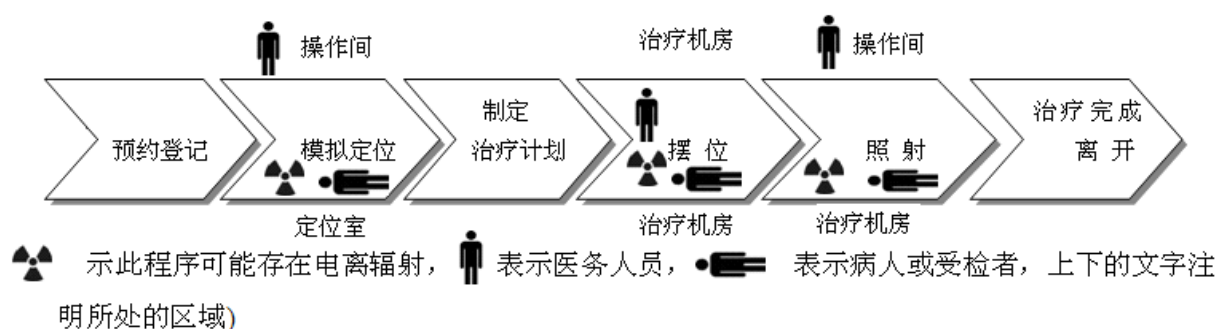


图 9-2 医用电子直线加速器外观图

9.1.2 治疗流程



1. 工作负荷：参考北大第一医院放疗科在本部的实际工作负荷，按每台加速器最大工作负荷 60 人次/天进行评价。每人“上床、摆位、照射、下床”平均时间约 6-8 分钟，全天完成 60 人次治疗，所需时间约 8h。

2. 出束时间：按照 2Gy/人次，平均 3 野次/人，在常规治疗照射条件下，每野最大出束时间为 40s (2min/人次)，加速器日治疗出束时间 120min，年工作 250d，总出束时间为 500h。

3. 利用因子：常规治疗中，机头 90°、270°和 180°出束时间各占年工作量的 15%；机头向下(0°)出束时间占年工作量的 55%。考虑到医院调强治疗使用占绝大多数，且为容积调强，故本项目将机头 90°、270°和 180°出束时间的占比均提高至 25%。

4. 不同能量使用因子：6MV 的 X 线治疗的患者占比 95%，10 治疗的患者占比 5%。常规放射治疗量约占 20%，调强放射治疗量约占 80%。

9.1.3 设备技术指标

表 9-1 电子直线加速器性能参数

项目	设备名称及型号
X 射线	a) X 线能量：6MV（地下一层的 2 台加速器），10MV（地下二层的 2 台加速器）； b) 6MV 加速器最大剂量率为 600cGy/min，10MV 加速器最大剂量率为 2400cGy/min； c) 最大射野尺寸 40×40cm（SSD=100cm）； d) X 线泄露率：≤0.1%。
电子线	1) 电子线能量 4~20MeV，6 档； 2) 最大照射野 40cm×40cm； 3) 最大输出剂量率 1000cGy/min。

(1) 加速器最大能量

地下一层的 2 台加速器能量为 6MV，地下二层的 2 台加速器能量为 10MV。10MV 射线针对体重较大或较胖的患者，6MV 射线用于普通体重的患者治疗。根据以往的工作经验，98%以上患者使用 6MV 能量治疗。

(2) 加速器最大剂量率

根据北京大学第一医院针对设备最大剂量率的反馈信息：6MV 加速器最大剂量率为 600cGy/min（无 FFF 模式），10MV 加速器最大剂量率为 2400cGy/min（FFF 模式）。

(3) 本项目加速器源项选择

门诊部 D 区地下一层和地下二层分别建造的 2 间加速器机房，分别按照使用 6MV（600cGy/min）和 10MV（2400cGy/min）的加速器进行屏蔽设计。目前，加速器设备的具体厂家和型号还没有确定，但是主要技术指标明确。

9.1.4 污染源项描述

电子直线加速器运行时电子轰击靶物质产生韧致辐射（X 射线）。本项目加速器最大输出 X 射线辐射剂量率为 2400cGy/min。有用线束外泄漏辐射剂量为有用线束的 0.1%，X 射线照射至墙壁和患者身体将产生散射辐射。加速器运行产生的 X 射线贯穿辐射、泄露辐射和散射辐射进入外环境，对环境有一定的影响。

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）和《电子加速器放射治疗放射防护要求》（GBZ126-2011），本项目使用的加速器 X 射线能量不大于 10MV，故无需考虑中子辐射及中子俘获 γ 射线。

X 射线辐射只有在加速器运行时产生，停机后就消失。加速器运行产生的 X 射线贯穿机房的屏蔽设施进入外环境。

9.1.5 正常工况的污染途径

1. 当电子轰击靶时，与靶物质发生作用产生韧致辐射。
2. 可能产生的固废还有更换下来的废靶、退役时拆卸下来的废靶。
3. 治疗室空气在 X 射线的强辐射下，吸收能量并发生电离作用产生 O_3 、 NO 、 NO_2 、 NO_3 、 N_2O 、 N_2O_2 、 N_2O_4 、 N_2O_5 等有害气体。

9.1.6 非正常情况的污染途径

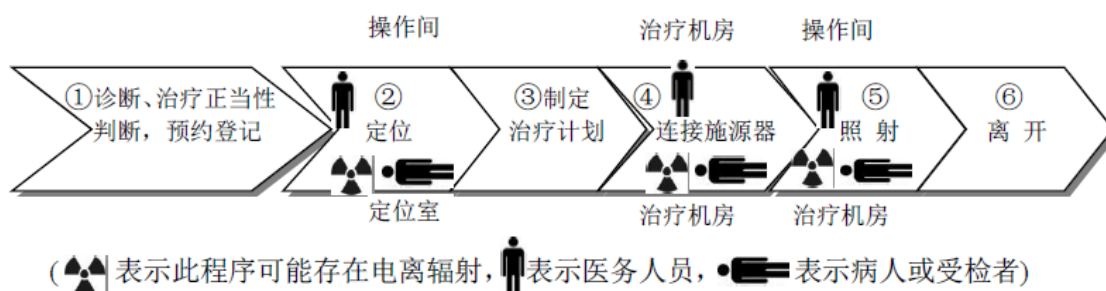
1. 加速器发生控制系统故障或工作人员操作失误，使得人员受到误照。
2. 加速器发生控制系统故障或放疗参数设置错误，使得受检者受到大剂量照射。
3. 机房门机联锁装置故障，人员误入机房受到照射。

9.2 后装机（放射治疗）

9.2.1 工作原理

后装机采用后装技术依照临床要求使 γ 放射源在人体自然腔管道或组织间驻留，从而达到预定的剂量及其分布的一种放射治疗手段。主要由控制系统、后装治疗机主机（包括：源容器、步进机、传输放射源的通道、放射源引导器、连接设备与施源器的传输管道）、施源器、安全保障系统等组成。施源器是个直径为毫米级的管状物，管内可装球形的真源和假源，并有气动通道。后装机治疗时则由传输管道连接贮源器，将源输送到预置于病员体内的施源器，按治疗计划由电脑自动控制进行照射治疗，照射完毕即自动将放射源收回到贮源器内。该项目拟配置的放射源是 ^{192}Ir 丝状源，最大装源活度为 $3.7 \times 10^{11} \text{Bq}$ (10Ci)。

9.2.2 治疗流程



① 病人经医生诊断、治疗正当性判断后，确定需要治疗的患者与放疗科预约登记，以确定模拟定位和治疗时间。

② 预约病人首先通过CT、超声等设备上进行肿瘤定位，确定肿瘤的具体位置和形状，确定治疗中心。定位操作过程类似于X射线影像诊断，工作人员隔室操作。

③ 确定肿瘤位置和形状后，物理人员根据医生给出的治疗剂量，通过治疗计划系统（TPS）制定治疗计划，该过程通常在电脑上完成。

④ 治疗计划制定后，肿瘤病人在技术人员协助下，依据计划在治疗床上进行连接施源器，该过程在治疗机房内完成。

⑤ 安装施源器后，技术人员进入操作室，确定所有安全措施到位后，启动治疗机进行照射。

⑥ 照射完毕后，技术人员协助病人离开机房。



图 9-3 某款后装机外观图

后装机预计最大工作量情况：治疗人数平均每周 30-50 人，全年为 2500 人次。新装源（活度 $3.7 \times 10^{11} \text{Bq}$ ）时，每人次照射治疗时间为 5-10min（平均约 6min）。Ir-192 放射源半衰期较短（74.0d），通常半年左右需更换一次放射源。更换放射源时经过约 2 个半衰期，剂量率降低 4 倍左右，故每人次的治疗时间会延长，大概需要 20-40 分钟。

为了便于估算，本评价以新装源活度计算屏蔽体周围的附加剂量率，出束治疗时间折合为新装源的治疗时间，即周治疗照射时间约为 5h，年累积治疗照射时间约 250h。

9.2.3 污染源项描述

1. 主要的放射性污染物

后装治疗是一种近距离治疗方式，该项目拟使用的放射源是 ^{192}Ir 。最大装源活度 $3.7 \times 10^{11} \text{Bq}$ 。 ^{192}Ir 的半衰期为 74.0d， γ 射线能量为 0.317 MeV（83%）、0.468 MeV（48%）和 0.604 MeV（8%），距离源 1m 处 γ 射线辐射剂量率为 $0.111 \mu\text{Sv}/\text{MBq} \cdot \text{h}$ 。

设备辐射剂量输出量：距源 1m 处的最大吸收剂量率 $0.069 \text{cGy}/\text{min}$ ；《后装 γ 源

近距离治疗放射防护要求》（GBZ121-2017）要求储源器最大装载活度时，距储源器表面 5cm 吸收剂量率不得大于 50 μ Sv/h，距离储源器 100cm 处的球面上，任何一点的泄漏辐射不得大于 5 μ Sv/h。

2. 正常工况的污染途径

正常运行时，后装机不产生放射性“三废”，主要环境影响是电离辐射和退役放射源。

在非治疗状态下， ^{192}Ir 源封装在后装机的储源器内，容器周围辐射水平较低，对周围环境影响很小。治疗状态下， ^{192}Ir 离开储源器，按裸源考虑，机房内空气比释动能率较高，漏射 γ 射线对治疗室周围环境将产生辐射影响。密封源退役时会产生废放射源。

3. 非正常情况的污染途径

1) 后装机操作系统发生故障，到达预置治疗时间，放射源无法自动收回，导致患者受超剂量照射；

2) 运行情况下意外断电，且设备不间断电源系统故障无法启动，致放射源不能复位。该事故工况发生时，依照应急预案，人工摇转应急回源手柄退源。

3) 运行过程中发生卡源或源脱落故障。该事故工况发生时，依照应急预案，立即停止辐照工作，人工摇转应急回源手柄退源，或进入辐射场所排除故障。之后及时通知厂家维修。

4) 因设备检修或更换放射源期间，将密封源贮源器拆卸下来，由于保管不善，可能会发生密封源丢失或被盗事故，可能产生较严重的辐射照射。

5) 治疗期间安全联锁系统出现故障时，人员意外进入治疗室并停留，将受到过量照射的情况。

6) 放射源意外破损时，导致治疗装置、机房甚至人员受到放射性污染。

9.3 血管造影机（介入治疗）

9.3.1 工作原理

X 射线是高速电子与靶物质相互作用产生的。医用 X 射线诊断设备是利用人体不同的组织或者组织与造影剂密度的差别，对 X 射线吸收能力不同的特点，透射人体的 X 射线使荧光屏、电子暗盒或感光胶片显影，来间接观察内脏形态的变化、器官活动情况等，辅助临床诊断。目前主要有两种诊断方法：即透视和摄影。

数字血管造影（DSA）是计算机与常规血管造影相结合的一种检查方法，是集电视技术、影像增强、数字电子学、计算机技术、图像处理技术多种科技手段于一体的系统。DSA 主要采用时间减影法，即将预检部位影象与造影剂注入后摄取的造影片在计算机

中进行数字相减处理，仅显示有造影剂充盈的结构，具有高精密度和灵敏度。



图 9-4 某款 DSA 设备外观图

DSA 适用于心脏大血管的检查。对心内解剖结构异常、主动脉夹层、主动脉瘤、主动脉缩窄和分支狭窄以及主动脉发育异常等显示清楚。对冠状动脉也是最好的显示方法。显示颈段和颅内动脉清楚，用于诊断颈段动脉狭窄或闭塞、颅内动脉瘤、动脉闭塞和血管发育异常，以及颅内肿瘤供血动脉的观察等。

9.3.2 治疗流程

DSA诊疗时患者仰卧并进行经皮静脉穿刺，送入引导钢丝及扩张管与外鞘，退出钢丝及扩张管将外鞘保留于静脉内，经鞘插入导管，推送导管，在X线透视下将导管送达检查治疗部位施行探查、治疗，并留X线片记录，探查结束，撤出导管，穿刺部位止血包扎。



- ① 医生根据患者预约安排手术；
- ② 病人由专职人员通过受检者防护门接入检查室，由护理人员进行摆位，并做局部消毒处理；
- ③ 医生根据手术性质在透视条件下进行手术，按照手术性质和医生手术水平不同，每台手术累计曝光时间多为十几分钟到几十分钟；
- ④ 手术完成后门诊病人通过受检者防护门自行离开，其余病人由专职人员负责送

回病房。

工作量预计：平均每台 DSA 每天约完成 8 例手术，平均每台设备每年完成 2000 例手术。本项目投入运行后，每台 DSA 配备至少 4 组医师开展介入治疗手术，预计每组医生的年手术量低于 500 例。

9.3.3 污染源项描述

1. 主要的放射性污染物

DSA 的放射性污染物主要是 X 射线。

2. 正常工况的污染途径

X 射线装置主要的放射污染是 X 射线。X 射线装置只有在开机并处于出束状态时才会发出 X 射线。在开机出束时，有用束和漏射、散射的 X 射线对周围环境造成辐射污染。在 X 线机使用过程中，X 射线贯穿机房的屏蔽设施进入外环境中，将对操作人员及机房周围人员造成辐射影响。

介入手术需借助 X 射线影像检查系统引导操作，治疗过程中工作人员将暴露于 X 射线机附近，人员受照剂量较高。

此外，X 射线与空气作用产生极少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，将在机房内累积。

3. 非正常情况的污染途径

1) X 射线装置发生控制系统或电器系统故障或人员疏忽，造成管电流、管电压设置错误，使得受检者或工作人员受到大剂量照射。

2) 人员误入机房受到辐射照射。

9.4 核医学科场所

核医学是采用核技术来诊断、治疗和研究疾病的一门新兴学科。它是核技术、电子技术、计算机技术、化学、物理和生物学等现代科学技术与医学相结合的产物。核医学可分为两类，即临床核医学和基础核医学。

城南院区核医学科拟新建核医学科场所，配置回旋加速器，自行制备 PET 药物，开展核医学诊断和治疗。此外，拟建立药物实验场所。所以，核医学科涉及三个场所，分别是临床核医学诊疗场所、药物制备场所和药物实验场所。

9.4.1 工作场所选址和布局评价

(一) 工作场所选址和布局评价

(1) 选址合理性分析

核医学科设在门诊部地下二层的西侧北端，其北侧为人防工程、医护楼梯电梯间等，东侧为停车场，南侧为放疗科用房，西侧为土层，楼上为放射科用房，楼下为土层。目前选址合理性有以下几个方面：1) 核医学科设最底层且靠近西侧土层，即充分利用了地下空间，又相对减轻了对地面周围环境的辐射影响。2) 核医学科有独立的使用空间，北侧和东侧紧邻楼道和电梯，且东侧为停车场，便于合理设置工作人员、受检者和配送放射性药物的路径，以减少对周围环境的辐射影响。3) 核医学科周围（包括楼上）相邻的科室均为与放射有关科室（放疗科和放射科），便于管理，也避免了其它科室担忧辐射影响的问题。4) 核医学科周围 50m 范围，均为医院用地范围，地面建筑物均为医疗、科研和办公用房，无居民住宅楼。

综上所述，核医学科的选址兼顾了辐射屏蔽、周围环境、布局设计、安全管理等因素，选址基本合理。

(2) 核医学科工作场所布局合理性分析

核医学科区域包含了辐射工作场所和办公区域，这样人员相对集中，便于诊疗和科研活动的开展。

核医学科布局设计时考虑了以下因素：1) 药物制备场所布置在西侧靠近土层，利用土层屏蔽减少回旋加速器和放化室对周围环境的辐射影响，节约辐射屏蔽成本。2) 药物实验场所紧邻 PET 药物制备场所，以减少放射性药物的转运距离，便于开展半衰期很短的药物实验。3) 核医学诊疗场所设置在南侧，患者候诊室与南侧的放疗机房相邻，借用放疗机房相对较厚的实体屏蔽，节约屏蔽成本。诊疗患者从东侧进入核医学，依次完成注射、候诊、检查（治疗）留观活动后，从西侧离开。

医护人员办公场所设在核医学科东北侧，其北侧为医护楼道和电梯，东侧为停车场，南侧为机房控制廊。办公区设置在该区域，避开了辐射场所的影响以及与患者人流的交叉。

核医学科内 3 个辐射工作场所和办公区域的布局情况见图 9-5 和附图 7 所示。



图 9-5 核医学科内放射性工作场所分布示意图

核医学科工作场所布局按照开展核医学诊断活动以及避免人员路径交叉的原则进行布局设计。从功能分区来看，患者候诊、工作人员办公、放射性操作等区域划分明确，且相对隔离，满足了核医学分区管理的要求，可以尽可能避免公众和医护人员受到不必要的辐射照射。

核医学科内部设置的三个放射性工作场所的位置相对独立，分区明确。在控制区与普通场所之间采用实体屏蔽或者缓冲区隔离，医护人员通道和患者通道相对独立且没有交叉，有效避免了医护人员受到不必要照射。为了减少药物制备场所转运至核医学科注射室环节的辐射影响，设计了药物传递跑兔装置，可有效降低辐射人员的受照剂量，最大限度减少对周围环境和人员的影响，符合辐射防护最优化的要求。

在放射性操作场所内部设计了辐射防护门、铅玻璃，排风净化设施和放射性废水收集及暂存设施。此外，还配备有热室、铅玻璃屏、防辐射实体屏蔽、铅罐、注射窗、废物桶等安全防护设施、器材，以及铅衣、铅帽、铅围脖、铅手套、铅眼镜等工作人员防护用品。

综上所述，核医学科工作场所布局考虑了相对独立、避免交叉，便于使用和分区管理等因素，设计布局基本合理。

9.4.2 核医学科工作场所划分和等级

(1) 工作场所划分

《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。

本项目核医学科涉及的3个场所:临床核医学诊疗场所、药物制备场所和药物实验场所,均满足上述条件,即场所相对独立,有明确的监督区和控制区划分,工艺流程连续完整,且有相对独立的辐射防护措施,故按照3个场所分别核定其等级。

(2) 工作场所等级

根据本项目使用放射性药物的化学状态和操作方式,以及所含放射性核素毒性和操作量,计算新建核医学科各辐射工作场所等级。

1. 同位素操作量

SPECT 装置主要使用 ^{99m}Tc ,每人用量 $1.85\times 10^8\text{Bq}(5\text{mCi})\sim 9.25\times 10^8\text{Bq}(25\text{mCi})$,其中心肌扫描和骨扫描用量较大,最大用量为 $9.25\times 10^8\text{Bq}(25\text{mCi})$;进行甲状腺、肝脾、肺灌注、下肢静脉及颌下腺等各种脏器扫描用量相对较小,最大用量为 $3.7\times 10^8\text{Bq}(10\text{mCi})$ 。本项目按每人平均用量 20mCi 估算使用量。

PET装置主要使用 ^{18}F ,每人每次用量 $2.22\times 10^8\text{Bq}(6\text{mCi})\sim 3.7\times 10^8\text{Bq}(10\text{mCi})$,本项目按每人平均用量 8mCi 估算使用量。

临床核医学科其它核素使用规划见“表9-3的“核医学科场所使用非密封放射性同位素规划”。

对于药物制备场所,依据各场所的实际使用量,并考虑核素衰减和合成效率,将 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 生产量提高3-5倍,确定其制备量,具体见“表9-2 回旋加速器场所使用非密封放射性同位素规划”。

药物实验场所的同位素使用量依据每天开展动物实验的数量,每只动物的同位素使用量核算同位素用量,使用规划见“表9-4 药物实验场所使用非密封放射性同位素规划”。

2. 操作方式

《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)明确了常见的放射性药品生产、使用场所日等效操作量核算中操作因子的选取:1)利用钼铈发生器淋洗 ^{99m}Tc 放射性药物时, ^{99}Mo 的操作视为“贮存”;2)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 ^{18}F 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 相关活动视为“很简单的操作”，使用 ^{131}I 核素相关活动视为“简单操作”。

本项目3个非密封放射性物质工作场所放射性同位素使用情况见表9-2，表9-3和表9-4所示。

表 9-2 药物制备场所使用非密封放射性同位素规划

序号	核素	用途	日最大操作量(Bq)	日等效最大操作量(Bq)	设计年用量	计算依据
1	^{18}F	制备	7.40E+10	7.40E+08	1.11E+13	上下午各生产1次，满足每天40人次诊断用量。
2	^{11}C	制备	3.70E+10	3.70E+08	7.40E+12	满足每天5人次诊断用量。
3	^{13}N	制备	3.40E+10	3.40E+08	3.40E+12	满足每天2人次诊断用量。
4	^{15}O	制备	3.40E+09	3.40E+08	3.40E+12	满足每天2人次诊断用量。
5	^{68}Ga	制备	8.88E+09	8.88E+07	1.78E+12	满足每天10人次诊断用量。
6	^{188}Re	制备	1.11E+09	1.11E+07	5.55E+10	满足每天2人次治疗用量。
5	^{68}Ge	核素发生器	1.85E+09	1.85E+06	3.70E+09	50mCi/个，2个/年
6	^{188}W	核素发生器	3.70E+10	3.70E+07	7.40E+10	1000mCi/个，2个/年
合计				1.11E+9	每天最多生产2种同位素。	

表 9-3 核医学科场所使用非密封放射性同位素规划

序号	核素	用途	日最大操作量(Bq)*	日等效最大操作量(Bq)	设计年用量*	计算依据
1	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	诊断	3.70E+10	3.70E+07	7.4E+12	20mCi/人，50人/天，200天/年，10000人/年；
2	^{131}I	诊断	1.48E+09	1.48E+08	8.88E+10	4mCi/人，10人/天，60天/年，600人/年；
3	^{123}I	诊断	1.78E+09	1.78E+07	1.78E+11	4mCi/人，12人/天，100天/年，1200人/年
4	^{131}I	治疗	2.96E+09	2.96E+08	1.48E+11	8mCi/人，10人/天，50天/年，500人/年
5	^{89}Sr	治疗	2.96E+08	2.96E+06	4.44E+10	4mCi/人，2人/天，150天/年，300人/年
6	^{186}Re	治疗	1.11E+09	1.11E+07	5.55E+10	15mCi/人，2人/天，50天/年，100人/年
7	^{188}Re	治疗	1.11E+09	1.11E+07	5.55E+10	15mCi/人，2人/天，50天/年，100人/年
8	^{223}Ra	治疗	1.11E+07	1.11E+07	5.55E+08	0.1mCi/人，3人/天，50天/年，150人/年
9	^{177}Lu	治疗	7.40E+09	7.40E+07	1.85E+11	100mCi/人，2人/天，25天/年，50人/年
10	^{90}Y	治疗	1.85E+09	1.85E+07	4.62E+10	25mCi/人，2人/天，25天/年，50人/年
11	^{169}Yb	治疗	7.40E+08	7.40E+06	1.85E+10	5mCi/人，4人/天，25天/年，100人/年
12	^{18}F	诊断	1.18E+10	1.18E+07	2.96E+12	8mCi/人，40人/天，250天/年，10000人/年
13	^{11}C	诊断	1.48E+09	1.48E+06	2.96E+11	8mCi/人，5人/天，200天/年，1000人/年
14	^{13}N	诊断	7.40E+08	7.40E+05	7.40E+10	10mCi/人，2人/天，100天/年，200人/年
15	^{15}O	诊断	7.40E+08	7.40E+05	7.40E+10	10mCi/人，2人/天，100天/年，200人/年

16	^{124}I	诊断	7.40E+08	7.40E+07	3.70E+10	4mCi/人, 5 人/天, 50 天/年, 250 人/年
17	^{64}Cu	诊断	1.11E+09	1.11E+06	5.55E+10	5mCi/人, 6 人/天, 50 天/年, 300 人/年
18	^{68}Ga	诊断	2.96E+09	2.96E+07	5.92E+11	8mCi/人, 10 人/天, 200 天/年, 2000 人/年
19	^{89}Zr	诊断	7.40E+08	7.40E+06	3.70E+10	4mCi/人, 5 人/天, 50 天/年, 250 人/年
合计			7.62E+8	保守假设全部同时使用		

注：*不包括衰减损失。

表 9-4 药物实验场所使用非密封放射性同位素规划

序号	核素	用途	日最大操作量 (Bq)*	日等效最大操作 量(Bq)	设计年用量*	计算依据
1	^{99m} Tc	科研	3.7E+8	3.7E+6	3.7E+10	小鼠给药活度 100μCi， 大鼠给药 0.5mCi。每天 最多实验 20 支。大小鼠 数量平均各半。
2	¹²³ I	科研	3.7E+8	3.7E+7	1.11E+10	
3	¹⁸ F	科研	3.7E+8	3.7E+6	3.7E+10	
4	¹¹ C	科研	3.7E+8	3.7E+6	3.7E+9	
5	¹³ N	科研	3.7E+8	3.7E+6	1.85E+9	
6	¹⁵ O	科研	3.7E+8	3.7E+6	1.85E+9	
7	¹²⁴ I	科研	3.7E+8	3.7E+7	7.4E+9	
8	⁶⁴ Cu	科研	3.7E+8	3.7E+6	7.4E+9	
9	⁸⁹ Zr	科研	3.7E+8	3.7E+7	7.4E+9	
10	⁶⁸ Ga	科研	3.7E+8	3.7E+6	1.85E+10	
合计				7.4E+8	保守假设每天最多使用 2 种同位素	

注：*不包括衰减损失。

可见，本项目涉及3个非密封放射性物质工作场所，均为乙级。

(3) 药物来源

本项目使用的放射性药物来源有三个方面：

1. 从具有放射性药品销售资质的公司外购。本项目 SPECT 诊断所使用的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{123}I ，PET 诊断使用的 ^{124}I 、 ^{64}Cu 和 ^{89}Zr ，核医学治疗使用的 ^{89}Sr 、 ^{186}Re 、 ^{177}Lu 、 ^{169}Yb 、 ^{90}Y 和 ^{223}Ra 放射性药物，均直接外购。

2. 使用回旋加速器自行制备 PET 药物。医院在取得 III 类《放射性药品使用许可证》之后，本项目使用的 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 由核医学科自行制备和标记。在未取得 III 类放射性药品使用许可之前直接外购。

3. 使用核素发生器自行制备和标记放射性药物。本项目拟使用的 ^{68}Ga 和 ^{188}Re 拟分别使用 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器和 ^{188}W - ^{188}Re 发生器进行淋洗，然后自行标记为放射性药物。医院在未取得 III 类《放射性药品使用许可证》之前直接外购。

医院将根据预约的检查人数及检查内容，提前确定外购或者自行生产的放射性药物种类和数量。向药品公司外购的放射性药品，由供货商负责直接送至核医学科。核医

学科负责药物管理人员对放射性药物名称、规格和数量，以及包装和外观进行核对和检查，并在放药室门口的摄像头下与供药公司“点对点”办理交接手续，之后暂存于放药室待用。自行制备的 PET 药物，质检合格后，采用铅罐盛装，然后用跑兔装置转移至放药室待用。

9.4.3 临床核医学诊疗场所

（一）核医学显像诊断

城南院区核医学科使用 ^{99m}Tc 、 ^{131}I 、 ^{123}I 核素药物开展 SPECT 诊断，使用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 和 ^{68}Ga 核素药物开展 PET 诊断。

PET 正电子药物显像技术的应用实现了医学影像领域的功能显像和定量分析，而且具有灵敏度高，核素半衰期短，成像速度快等特点，为生物、基础研究、疾病的诊断、治疗预后的判断和保健提供了超前或提前的信息，对推动生命科学、现代医学和其他学科的发展具有重要的意义。



图 9-6 某型号 PET/CT 扫描装置示意图

SPECT 技术是把标记有发射单光子核素(如 ^{99m}Tc)的重要生命物质(如糖、蛋白质、脂肪等)注射到人体内，然后借助 SPECT 装置进行扫描成像，以观察这些单光子核素在人体全身脏器的分布情况，以研究它们在人体内的代谢过程，该技术已成为生命科学研究的一个有力工具。

SPECT 在癌症骨转移、冠心病、肺动脉栓塞、急性脑梗塞、甲状腺癌诊断和评价等方面，能够发挥不可替代的作用。



图 9-7 某型号 SPECT 扫描装置示意图

(二) 核医学科核素治疗

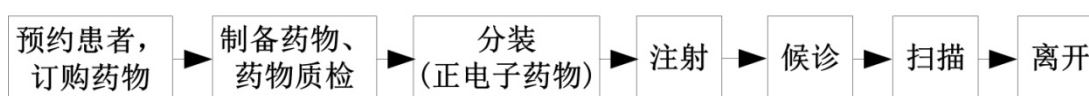
放射性核素治疗是利用放射性核素在衰变过程中发射出来的射线的辐射生物效应来抑制或破坏病变组织的一种治疗方法。治疗原理是通过放射性核素或其标记化合物高度选择性聚集在病变部位进行照射,受到大剂量照射的细胞因繁殖能力丧失、代谢紊乱、细胞衰老或死亡,从而抑制或破坏病变组织,达到治疗目的。

本项目使用 ^{131}I 治疗甲亢,使用 ^{89}Sr 、 ^{188}Re 、 ^{186}Re 治疗骨转移瘤骨痛,使用 ^{90}Y 常用于生长抑素受体阳性表达肿瘤(主要为神经内分泌肿瘤)治疗,使用 ^{177}Lu 和 ^{169}Yb 开展分子靶向放射性药物肿瘤治疗。 ^{223}Ra 。用于治疗晚期去势抵抗性且有骨转移的前列腺癌患者。

(三) 患者接受临床诊疗流程

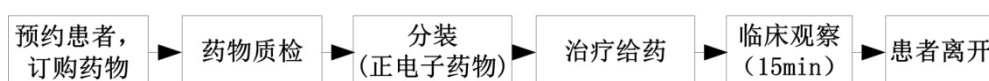
(1) 核医学显像工作流程

放射性药物经由静脉注射方式进入受检者体内,药物分布到特定器官并释放 γ 射线,利用 SPECT 或 PET 探测成像仪器进行扫描和显像。检查工作流程如下:



(2) 核医学治疗工作流程

放射性药物经由静脉注射方式进入受检者体内,药物分布到特定器官并释放 β 射线,从而抑制或破坏病变组织,达到治疗目的。治疗工作流程如下:



(3) 具体工作流程

1. 预约患者：提前制定核素诊断、治疗工作计划，通知患者。
2. 订购药物或者制定药物制备规划：根据预约的检查人数及检查项目，提前一天向药品公司订购 ^{99m}Tc 、 ^{131}I 等放射性药物，或制定自行制备放射性药物的计划。
3. 接收或自行制备放射性药物：外购药物由药品公司负责把药品送至核医学科放药室门口。
4. 质检：质检人员核对放射性药物名称和活度，检查药品包装和外观质量，在摄像头监控下，“点对点”办理交接手续，然后暂存于放药室内。自行制备的放射性药物，自行进行质检，合格后转移至核医学科放药室待用。
5. 分装：对需要分装的药物在通风柜内进行分装。 ^{18}F 等正电子药物，半衰期短，其标记的放射性药物需要在放药室内分装。 ^{99m}Tc 由供药公司根据每人份订药量直接分装在注射器内，无需再次分装。
6. 注射：在注射窗口防护下，给受检人员注射放射性药物，然后将废注射器等装入铅屏蔽盒内暂存，放射性废物分类收集。
7. 候诊：受检人员在“PET 候诊室”或“SPECT 候诊室”内等候（F-18 候诊时间约 40min~90min，Tc-99m 心脏扫描候诊时间 1.5h，甲状腺 20min~30min，肾显像不用候诊）。
8. 检查：待药物在身体内有一定程度的代谢后，进行 PET/CT 或 SPECT(SPECT/CT) 扫描检查（检查时间一般在 20min 左右）。检查前通常入厕排空膀胱内尿液，以减少放射性干扰。
9. 治疗：在注射室精密或者口服放射性药物。
10. 留观：显像检查患者在扫描后，留观片刻（10min 左右）。如显像结果符合诊断要求，即离开核医学科。治疗患者留观片刻，无异常即可离开。

（四）放射性核素辐射特性

显像用放射性核素物理半衰期较短，数小时至几天，主要发射 γ 射线、正电子 (β^+)。治疗用核素主要产生 β 射线。

本项目使用的放射性核素中，属于 A 类（半衰期小于 24h）的诊断核素有 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{68}Ga 、 ^{64}Cu 、 ^{99m}Tc 、 ^{123}I ，属于 B 类（半衰期大于 24h）的诊断核素有 ^{89}Zr 、 ^{124}I 、 ^{131}I ，最长半衰期为 8d。治疗核素除 ^{188}Re 外， ^{177}Lu 、 ^{89}Sr 、 ^{223}Ra 、 ^{90}Y 、 ^{169}Yb 、 ^{186}Re 均属于 B 类核素，半衰期最长的是 ^{89}Sr (50.5d)，其次是 ^{169}Yb (32d)。

（五）核医学科诊疗的污染途径分析

1. 正常工况的污染途径

1) 放射性药物经由静脉注射或口服进入患者体内，分布到特定器官并释放 β 射线、 γ 射线。因此，核素诊疗项目的污染因素主要是产生 γ 射线和 β 射线。

2) 使用放射性物质过程中，会产生一定量的放射性废水和放射性固体废物。放射性废水主要来自于卫生间冲厕废水，放药室洗手废水、冲洗拖布废水。放射性固体废物主要来源于患者使用的注射器、药杯、放射性药物包装物、棉棒、一次性个人防护用品和垫布等物品。

3) 本项目使用的 ^{131}I 属于挥发性核素，以碘[^{131}I]化钠的形式存在时，挥发性相对较低，但是氧化后易析出 ^{131}I （单质碘）。碘在常温下易挥发，产生放射性气溶胶，为本项目重点关注对象。其它核素挥发性小，如 ^{18}F （2-脱氧葡萄糖的氟代衍生物）为液体溶液，不易挥发，且分装时间较短，故使用过程中产生的放射性气体十分微量。

分装配制过程在密闭的手套操作箱内进行，操作箱维持一定负压（约-20Pa）。碘分装间及手套箱内净化空气全部经两级吸碘过滤器过滤后经楼顶烟囱口排放至大气。

2. 非正常工况的污染途径

操作放射性药物时发生放射性污染：如发生容器破碎，药物泼洒等意外事件，有可能污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至造成手和皮肤的污染。此外，给药患者呕吐或者排泄，也可能导致局部环境的放射性污染。

放射性药物保管不当，发生遗失或被盜：放射性物质或者放射源失控可能造成环境放射性污染。核医学科在放射源库保管放射性同位素，采用双人双锁进行管理，执行使用登记管理制度，可有效防止同位素被盜和丢失事件的发生。

放射性废物处置不当：放射性废物（废水或固体废物）处置或管理不当，造成环境放射性污染。

9.4.4 药物制备场所

药物制备场所包括使用回旋加速器制备 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 和 ^{15}O 药物，以及使用核素发生器制备 ^{68}Ga 和 ^{188}Re 药物。

使用回旋加速器制备 PET 的主要步骤包括回旋加速器打靶制备正电子放射性核素，以及后续纯化放射性核素，放射性药物合成、分装和质检等。回旋加速器生产 PET 药物的全部工艺流程见图 9-8 所示。

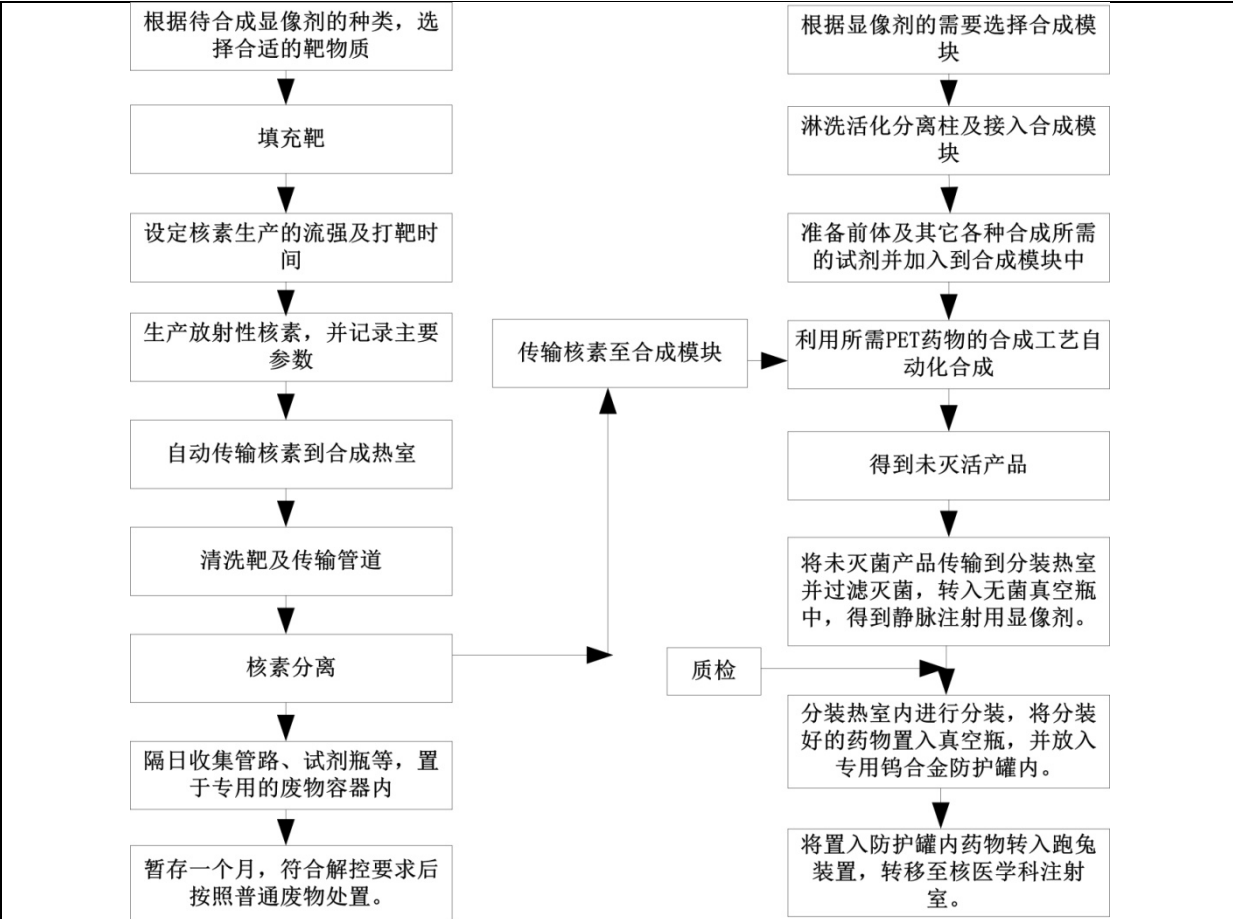


图 9-8 回旋加速器制备 PET 药物工艺流程

回旋加速器制备 PET 药物过程中，涉及放射性污染的环节以及污染因子见图 9-8 所示。回旋加速器打靶在回旋加速器机房内完成，属于使用 II 类射线装置的范畴，后续放射性药物合成、质检和分装属于使用非密封放射性物质工作场所范畴，故本报告表分别描述其污染源项。图 9-9 中后续的“临床应用”属于核医学科诊断，已在“9.4.3 临床核医学诊疗场所”中进行了描述。

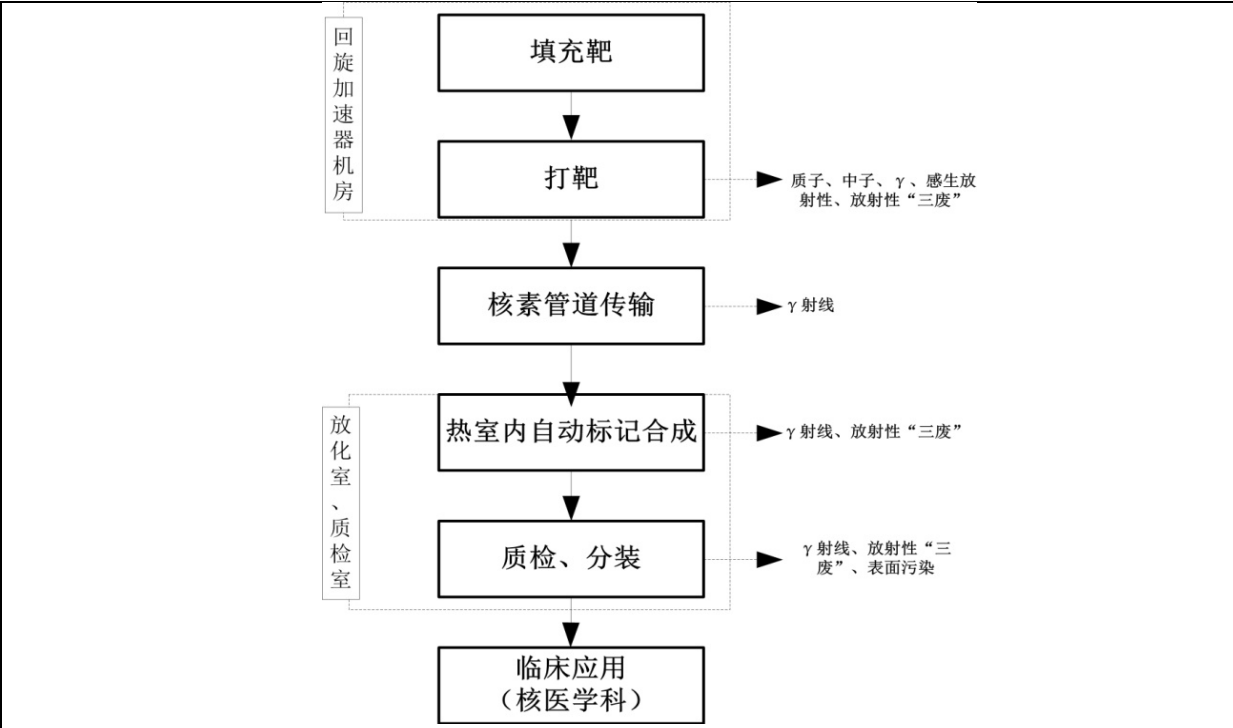


图 9-9 回旋加速器制备 PET 药物的放射性污染示意图

(一) 回旋加速器制备正电子核素 (使用 II 类射线装置)

(1) 设备组成及技术参数

本项目已确定配置使用 GE 公司 Qilin 型回旋加速器。该设备是专为生产 ^{18}F 等正电子发射型核素的小型一体化医用加速器 (设备外观见图 9-10)，主要由磁场系统、真空系统、射频系统、离子源系统、束流提取系统、靶系统、冷却系统、气体系统、控制系统等组成，具体见表 9-6。

Qilin 型回旋加速器具有自屏蔽设计，采用自动化、远程控制，可以快速、远距离换靶，能够持续生产居里级正电子同位素 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 和 ^{15}O 。该设备加速质子能量最大为 10MeV，最大束流 70 μA 。常用条件为 9.6MeV/25-50 μA 。在持续轰击富含 H_2^{18}O 靶 120min 情况下，靶的最大活性可达到 129.5GBq (3.5Ci)。



设备及自屏蔽体外观图



设备结构示意图

图 9-10 GE 公司 Qilin 型回旋加速器外观和设备结构示意图

表 9-6 GE 公司 Qilin 型医用回旋加速器系统组成及作用

系统名称	组成及作用
控制系统	进行回旋加速器的自动操作，进行连锁管理和安全控制。
磁场系统	提供被加速器的带电粒子做圆周运动所需的磁场。本设备采用立式磁体设计，侧向打开，降低维修难度。
真空系统	包括真空腔、真空泵、真空计和控制部分。真空系统要求每天 24h 运行，保持真空腔内的真空度，以降低束流的丢失，减少加速器内部的气体活化，同时对高频电场提供绝缘保护。
射频系统	超高频射频 101 MHz,提供提取离子并进行加速的高频振荡电压。
离子源系统	由离子源、离子源电源配给器和气体控制系统组成，主要功能是产生需要的加速器的带电粒子。
束流提取系统	将加速的具有最大能量的带电粒子从真空腔中引出，再通过引出装置将束流引入靶系统，靶上有效束流 70 μ A。
靶系统	主要由准直器、氦冷却室、靶室、水冷却室和双相三通阀组成。生产正电子核素的核反应在此装置内完成。该设备采用惰性铌靶，散热性好、靶压低、效能提高。
冷却系统	水冷却系统——分为一级水冷却系统和二级水冷却系统。一级水冷却系统为普通的冷水机组，常年制冷；二级水冷却系统中的去离子水带走回旋加速器产生的热量，通过热交换传递给一级水冷却系统。 氮气冷却系统——在束流轰击期间对靶室和靶窗的 havar 膜与钛膜之间腔隙进行冷却，主要由氦气、压缩机和流量计组成。氦气冷却系统的热量通过热交换传递给一级水冷却系统。
自屏蔽系统	带自屏蔽的设备尺寸 2.1 m $\times$ 3.6 m $\times$ 2.1 m（长 $\times$ 宽 $\times$ 高）。特种混凝土，混凝土中掺和铁矿石、碳化硼等特殊材料；靶位一侧的左门与左块中有铅板，铅板重量约 2 吨，右门与右块中无铅块，为素混凝土；左块中有聚丙烯塑料盘管，右块中无特殊物品。
废气处理系统	自屏蔽提内置废气衰变系统：长度 200m，总体积约 20L，废气以 125L/min 的流速排放，总滞留时间约 200min。

(2) 工作原理

回旋加速器是将离子源系统产生的氢负离子（离子源）在离子源偏压（通常14-15kV）作用下被推至离子源通道并进入加速区域。在加速区域，负离子束流在磁场（D型盒）的作用下不断发生偏转，在高频作用下不断获得能量而加速。束流以固定角速度运动，在速率增加后，其运动半径也随之增大，故而束流的运动轨迹就变成了一种螺旋形。当束流到达提取半径后也就获得足够的能量与速度。获得加速的负离子束流通过碳膜即提取膜时，其与氢结合松散的两个电子被剥离，导致束流从负电性变成正电性，成为质子束，它所受磁场的作用力的方向也发生改变，带正电荷的质子束转向出口飞行并轰击靶，引起p,n或者p, α 核反应，产生放射性核素。经过放化合成系统,通过化学反应，将新产生的放射性核素标记到生理性代谢物质上(如葡萄糖、氨基酸、胆碱等)，生成PET检查所需的示踪剂。

本项目规划运行天数为250d/a。每个工作日最多制备上述核素中的2种，总产量低于1.11GBq。 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{14}N 和 ^{15}O 同属低毒组核素，毒性修正因子为0.01。制备PET显像药物过程为湿法简单操作（自动合成）。操作方式修正因子取1。因此，该场所放射性核素日等效最大操作量为 $1.11 \times 10^8 \text{Bq}$ ，属于乙级非密封放射性物质操作场所。

（3）本项目所用回旋加速器固有安全性

1. 回旋加速器设有两个独立的靶体和束流引出系统，可一次性换靶多次使用，减少职业人员的进入回旋加速器机房的换靶次数，进而可以减少受照剂量。
2. 回旋加速器使用质子加速技术，水平加速和非聚集靶及其快速连接系统，可使操作和维护人员受到的辐射剂量降到最低。
3. 回旋加速器自带冷却水系统、磁铁系统、射频系统、离子源系统、真空系统、靶系统等安全联锁，其中任何一个联锁出现问题，机器将不能开机运行。
4. 回旋加速器的操作系统自带靶的密封性自动检测系统，能够及时发现靶体泄漏并停止设备运行。
5. 自屏蔽系统带有废气滞留排放系统，其运行期间产生的活化气体可滞留一定时间后排出。

（4）回旋加速器制备正电子核素的操作流程

本项目选用的回旋加速器，理论上可以生产 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{18}F 正电子核素，但是由于 ^{13}N 和 ^{15}O 半衰期很短，限值了其使用，开发的PET药物种类十分有限，应用最多的 ^{18}F ，其次是 ^{11}C 标记的PET药物。

回旋加速器工作前，先根据拟制备放射性药物种类和数量，完成回旋加速器的调试，

设置好相应参数。回旋加速器运行期间，工作人员在控制室内隔室操作。其它操作如下：

1. 填充靶

在回旋加速器正式制备放射性同位素之前，先清洗靶并用纯氦吹干，然后注入靶物质。生产 F-18、N-13 核素采用液体靶，生产 O-15 和 C-11 核素采用气体靶。

2. 打靶制备核素

靶材料准备完毕后，由工作人员在控制室操作加速器运行，加速器以一定的束流轰击靶物质，生产核素。使用束流轰击装入靶腔内的液体靶或气体靶一段时间后，通过专用防护管道系统，通过高压氦气将靶腔内的靶物质输送至热室中，并进行靶腔清洗，再用高纯氦气将放射性核素输送管道吹干。

(5) 回旋加速器正常运行工况下污染分析

本项目的回旋加速器在使用过程中存在的辐射主要有初级辐射（被加速的带电粒子）、被加速后的带电粒子与物质相互作用产生的次级辐射（中子、 γ 射线、 β 等）以及初级、次级辐射与周围物质相互作用产生的缓发辐射（ γ 射线、 β 等，即感生放射性物质）和放射性“三废”等。

1. 质子

回旋加速器将 H 离子加速，H 离子被加速经过碳箔脱离电子后成为质子（p 初级辐射因子），质子轰击靶材料的能量约为 10MeV，考虑到靶膜上质子能量会有损失，因此实际反应能量应低于 10MeV。相对电子而言，质子在物质中的射程较短，其射程仅为同等能量的电子射程的几十分之一到百分之一，质子的穿透性很弱，很容易被物质阻挡，其外照射防护在本项目中不作考虑。

2. 中子

中子是回旋加速器的主要污染因子之一。质子束轰击靶材料时发生 $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ 等核反应，核反应发生的位置主要位于靶部位，在生成所制备核素同时，也产生最大能量为 8.5MeV 的中子。

根据 GE 公司提供的参数，束流打靶 60min 可生产 74GBq 的 ^{18}F 药物，由上式可计算得到中子的发射率约为 $1.08 \times 10^{11} \text{ n/s}$ （积分中量，40 μA ）。

3. γ 射线

γ 射线由中子俘获，以及中子和周围材料相互作用产生，具体有：

① 在回旋加速器打靶时，质子与靶物质由核反应（p,n）产生中子，中子俘获产生高能瞬发 γ 射线，平均能量在 8MeV 左右。

② 中子与自屏蔽体、靶周围物质等部件发生作用产生次级 γ 射线。

③ 回旋加速器打靶产生的正电子核素，衰变产生正电子经湮灭产生的511keV γ 射线。

4. 感生放射性

从核反应的阈能来看，能够直接产生感生放射性核素的带电粒子能量多数需在5-10MeV 以上。本回旋加速器的加速质子最大能量为 10MeV，因此质子与加速器部件如准直器等相互作用可使部件活化。加速器打靶过程产生的次生中子与周围物质相互作用产生感生放射性。可见，感生放射性主要产生在回旋加速器的结构材料、冷却水、加速器机房空气中。

回旋加速器的质子束在加速器系统的内壁和引出窗可能损失束流 3%。回旋加速器结构部件、靶周围器件、准直器、自屏蔽体中钢、铜、铝等受中子和次级 γ 辐射作用产生活化产物，半衰期由几分钟至几年不等，但主要是短半衰期核素，主要有²⁷Mg($T_{1/2}$ =9.5min)、²⁴Na(14.9h)、²⁸Al(2.3min)、⁶²Cu(9.7min)、⁶⁴Cu(12.8h)、⁶⁶Cu(5.1min)、⁵⁶Mn(2.6 h) 和 ⁶⁵Ni (2.5h)，半衰期较长的放射性核素有 ⁶⁰Co(5.27a)、⁵⁷Co(271.8d)、⁵⁴Mn(312d)、⁶⁵Zn(243.9)、²²Na(2.6a) 等，感生放射性核素衰变会发出 β 射线和 γ 射线。随着回旋加速器运行时间的增加，短寿命活化成份很快达到平衡状态，长寿命活化成份会不断累积，且达到平衡状态所需时间较长。

5. 空气活化

本项目使用的回旋加速器尽管带有自屏蔽体，但是屏蔽体内的空气受中子照射后发生核反应可生成放射性活化气体，可能发生的核反应如表 9-8 所示。

表 9-8 回旋加速器机房内空气核反应种类

序号	核反应	阈能 (MeV)	反应产物	半衰期
1	$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	10.6	^{13}N	10min
2	$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	15.7	^{15}O	2min
3	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	18.7	^{11}C	20.5min
4	$^{40}\text{Ar}(n, \gamma)^{41}\text{Ar}$	10.1	^{41}Ar	1.82h

本项目所用回旋加速器最大能量为 10MeV，接近阈值，故机房内的空气受中子照射后会产生放射性活化气体。

6. 设备泄漏辐射水平

Qilin 回旋加速器具有自屏蔽设计。加速器供应商提供了设备运行时设备周围辐射水平实际测试数据。该型加速器使用液体靶制备 ¹⁸F，在最大功率（10MeV/70 μ A）工况运

行时，设备周围距离其表面 1m 处辐射剂量当量率最大值不超过 50 μ Gy/h，其中中子当量剂量率约 13 μ Sv/h， γ 射线约为 35 μ Sv/h。

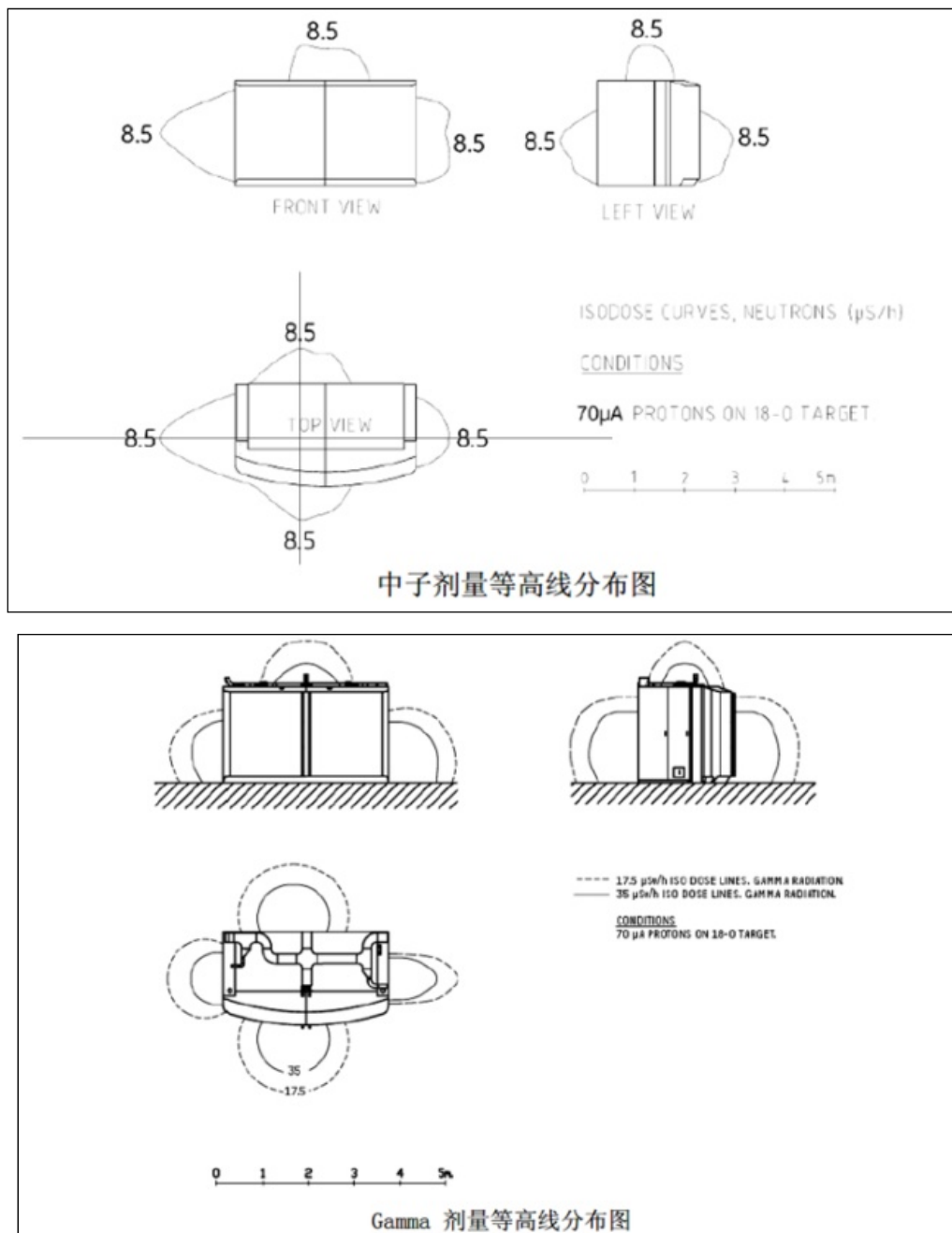


图 9-13 回旋加速器自屏蔽体外等剂量曲线

7. 放射性“三废”

a. 放射性废气（含活化气体）

回旋加速器运行时，产生的中子与自屏蔽体内空气以及加速器机房内的空气相互作用产生感生放射性气体。活化气体中寿命相对较长的感生放射性核素是 ^{41}Ar 。事实上，由于空气中氩气含量仅为 1.3%（体积比为空气的 0.934%），所以中子与空气中氩气发

生 $^{40}\text{Ar}(\text{n},\text{r})^{41}\text{Ar}$ 核反应产生 ^{41}Ar 的机会较低。此外，自屏蔽体内空气的体积也有限，故 ^{41}Ar 的产额更加有限。中子经自屏蔽后，能量和当量剂量率均大幅降低，中子导致机房内空气活化的份额可忽略不计。

b.放射性废液

回旋加速器在正常运行过程中不产生废水，只有在设备维护的过程中冲洗靶才会产生冲洗后的废水，一年最多维护两次，每次的水量大约 2L。

靶室冷却水为去离子水，受中子活化而生成的短半衰期核素主要是： $^{13}\text{N}(\text{T}_{1/2}=9.96\text{min})$ 和 $^{11}\text{C}(\text{T}_{1/2}=20.4\text{min})$ 。靶冷却水（二级水冷却系统）采用闭合回路循环，正常运行情况下不外排，不会产生放射性废液。

如果更换设备靶部件，需排放冷却水时，将冷却水排入回旋加速器机房内专用地漏，汇入放射性废水衰变罐中。设备检修期间冲洗液体输送管路时会产生少量含放射性废液，冲洗靶腔也会产生少量的冲洗废水，每次产生量低于 20ml，拟收集后排入回旋加速器机房内“特殊废水”地漏中。

c.放射性固体废物

加速器运行期间产生的放射性固废主要是靶箔片和真空箔片，由厂家技术人员更换下来后，暂存于回旋加速器机房的铅制屏蔽罐内。窗膜由核医学科人员自行更换。放射性废物年产生量约 200g，暂存于废物库，定期送交城市放射性废物库。

尽管回旋加速器在设计上就选择适宜的离子路径材料(如：用钽或石墨作准直器)，但是长时间运行，会导致长寿命活化产物的累积。所以，在设备退役时，其活化组件要按照放射性固体废物进行安全处置。加速器循环水系统中使用的离子交换树脂，其中的长寿命感生放射性物质也会随时间累积，故也需按照放射性固体废物进行安全处置。

8. 其它污染物

加速器机房内空气在 γ 射线作用下，吸收能量并通过电离作用产生 O_3 和 NO_x 等有害气体。此外，设备运行时也产生噪声和电磁辐射污染。

机房采用厚度不低于 500mm 混凝土实体屏蔽，噪声和电磁辐射可以完全阻隔，对周围环境的影响可以忽略，故本项目不进行评价。

(6) 回旋加速器非正常工况下污染源项分析

1. 非正常工况的情景假设

1) 人员意外受照：加速器运行时人员滞留机房或者人员误入机房，造成较大剂量的外照射。

2) 设备维修时受到大剂量照射：设备发生故障后，未经足够时间的衰减，设备技术保障人员就进入机房维修设备或更换靶部件等，受到较大剂量的外照射。

3) 液态放射性物质泄漏导致局部放射性污染

4) 气态放射性物质泄漏导致回旋加速器机房空气发生放射性污染

5) 靶破裂事故：回旋加速器靶室比较坚固，在正常工况下靶窗很少破裂，但在靶体冷却水失效或靶窗氮气制冷失效时，靶片局部可能熔融，靶窗会被打穿。靶水进入加速器真空系统，靶物质冷凝于真空管壁上，造成放射性污染。

2. 拟采取的风险防范措施

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

2) 将制定设备维修管理办法，明确设备发生故障后，请设备公司专业人员维修。技师维护保养设备，在设备停机隔夜后进行，防止未经足够时间衰变导致人员受到大剂量照射。

3) 当发生液体和体态放射性物质泄漏污染事故时，采取封闭加速器机房 24h 的措施，利用生产的核素半衰期较短的特点，经 24h 的自然衰变后，工作人员再进入机房进行处置，以减小对人员的辐射危害。

以一次生产 $37\text{GBq }^{18}\text{F}$ 考虑，经24h(13个半衰期)衰变后，残留量为 9.0MBq ，此时，30cm远处的 γ 剂量率降为 $16.2\mu\text{Sv/h}$ ，人员可以接近进行应急处理。

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

(二) 热室内合成、分装 PET 药物（使用非密封放射性物质工作场所）

(1) 回旋加速器制备 PET 药物（含合成和分装）

需要通过回旋加速器制备的放射性核素，通过管道输送至合成热室内 PET 药物合成器收集瓶内。放射性物料输送管线铺设于地下管沟内，地下管道从回旋加速器基座底部延伸到放化室的合成柜底部。管沟采用混凝土浇注，其尺寸为：宽 210mm~350mm，深 330mm~600mm，表面刷环氧树脂。管沟盖板分上、下两层。上盖 50mm 厚铅砖，表层盖不锈钢板。

本项目将配置 3 个制备 PET 药物的合成模块（一个 ^{18}F FDG 合成模块，一个多功能液体合成模块，一个 C-11 气体合成模块）。上述化学合成模块可以先对放射性核素进行纯化分离，分离纯化后的放射性核素，传输至合成模块。系统采用精确取液注射泵、气

动液路转换装置以及放射性、压力、温度和流量监测单元，每次合成前只需补充试剂及更换耗材，放射性药物的合成全部由计算机控制自动完成。合成后的放射性药物经高效除菌过滤膜过滤被收集在无菌真空瓶中。

放化室拟设置 6 个合成热室，药物合成器放置在单独的热室内。合成热室内屏蔽层采用铅砖（正面≥70mmPb 铅当量，其余五面屏蔽≥60mmpb），采用耐腐蚀不锈钢内胆，设有同箱体防护能力相当的铅玻璃观察窗。药物合成热室安装专用通风系统进行空气的净化换风，通风量 500 m³/ h，排风经二级高效过滤器（粒径≥0.5μm 的微粒的过滤效率不低于 99.99%）净化后，引至地面建筑物顶部排放（高度 23m）。合成热室示意图见图 9-16。



图 9-16 回旋加速器合成热室外观示意图

合成热室内放置药物化学合成模块，可以自动进行分离、纯化、标记等操作，任何一个环节不符合要求，计算机将自动停止合成工作。化学合成模块示意图见图 9-17。

		
多功能 FDG 化学合成仪	多功能自动 F-18 放射性示踪剂 标记系统	多功能自动 C-11 放射性示踪 剂标记系统

图 9-17 回旋加速器热室中化学合成模块示意图

合成后的 ¹⁸F-FDG 等放射性药物，经由屏蔽的专用管路自动传送到分装热室内的收

集瓶内，收集瓶被预先放置在药品分装防护装置内，分装人员根据需要利用无菌器皿抽取一定活度的 ^{18}F -FDG 等装入到 10ml 或 30ml 的无菌西林瓶内，经压盖密封后放入铅制容器内。分装热室的内部是负压洁净百级的环境，并且具有良好的辐射屏蔽能力，分装人员通过打开分装热室的正面手孔门伸入戴有防护性手套的双手，透过铅玻璃防护视窗来进行操作。

放化室拟设置 2 个分装热室，药物分装在分装热室内进行。分装热室安置在合成热室旁，内屏蔽层采用铅砖（正面 $\geq 60\text{mmPb}$ 铅当量，其余五面屏蔽 $\geq 50\text{mmPb}$ ），采用耐腐蚀不锈钢内胆，设有同箱体防护能力相当的铅玻璃观察窗。分装热室安装放射性气体活性炭过滤器和高效过滤器（滤除粒径 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 的微粒的过滤效率不低于 99.99%），引至所在建筑物顶部排放（高度 23m）。分装热室示意图见图 9-18。



图 9-18 分装热室示意图

每天分装过程大约需要 30min。分装人员将装好放射性药品 ^{18}F -FDG 等放射性药物，放入铅防护罐，然后从热室的物料口取出，手提至成品传递窗口。

（2）核素发生器制备 PET 药物（含淋洗、标记和分装）

1. ^{68}Ga 淋洗、标记、分装流程

1) 核素发生器原理

^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器属于色谱柱型发生器，基本部件是活化氧化钛柱（基于硅基吸附剂）、淋洗系统和用于保护工作人员的辐射屏蔽套，该类发生器简单易用，具有母体半衰期长可长期使用，子体核是正电子发射可用于 PET 扫描，以及子体核半衰期短，患者

所受的辐射剂量较低等优点。

^{68}Ge 吸附在发生器内装有氧化钛的玻璃（基于硅基吸附剂）柱内，不断衰变产生 ^{68}Ga ，当加入适当的淋洗液（无菌超纯0.05M高纯盐酸）时， ^{68}Ga 便以 $^{68}\text{Ga}^{3+}\text{Cl}_3$ 的形式被淋洗出来。按规定量的淋洗剂，连接在发生器的进口，以规定速度匀速淋洗，在出口处用有防护的安剖瓶接收洗脱液，然后转入合成模块，再对合成完毕的药物进行分装。

^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器为成熟商业化产品，拟从具备核素发生器销售资质的专业公司（中国同辐股份有限公司）购买。

2) 核素发生器技术指标

外购的 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器外包装为内衬泡沫的铁皮罐，外包装贴有“当心电离辐射”的警示标示。核素发生器本身外部为铅屏蔽防护体，屏蔽防护体厚度为27mm贫铀+15mm铅，核素发生器表面辐射水平满足《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）要求。

拟购 ^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器单枚规格为 $1.85\text{E}+09\text{Bq}$ ，计划每半年订购一个。



图 9-19 某型号锗镓发生器的外观图

3) 操作频次和操作时间

每天淋洗一次。每次淋洗过程约需2min，洗脱液转入合成模块中，自动合成放射性药物标记。放射性药物分装操作时间约20min。

淋洗、标记和分装均在通风橱内进行，通风橱采用机械通风，风速大于1m/s，经高

效活性炭过滤装置处理后，从楼顶排气口外排。

2. ^{188}W - ^{188}Re 发生器

1) 钨铼发生器原理

^{188}W - ^{188}Re 发生器属于色层柱型发生器， ^{188}W 吸附在发生器内装有氧化铝色层柱上，不断衰变产生 ^{188}Re ，用一定体积的0.9%氯化钠注射液淋洗色层柱，可获得无载体、高比活度的 ^{188}Re ($\text{Na}^{188}\text{ReO}_4$)。按规定量的淋洗剂，连接在发生器的进口，以规定速度匀速淋洗，在出口处用有防护的安剖瓶接收洗脱液，然后进行药物合成，再对合成完毕的药物进行分装。母体半衰期长可长期使用，子体核是 ^{188}Re ，作为治疗用核素有着十分理想的核性质，半衰期为16.9h，衰变产物为稳定的 ^{188}Os 。主要发射 β 射线，分支比为79%。 β 射线的最大能量为2.12 MeV。

^{188}W - ^{188}Re 发生器为成熟商业化产品，拟从具备核素发生器销售资质的中国同辐股份有限公司购买。

2) 钨铼发生器技术指标

外购的 ^{188}W - ^{188}Re 发生器外包装为内衬泡沫的铁皮罐，外包装贴有“当心电离辐射”的警示标示。核素发生器本身外部为铅屏蔽防护体，核素发生器表面辐射水平满足《放射性物品安全运输规程》(GB11806-2019)要求。

拟购 ^{188}W - ^{188}Re 发生器单枚规格为 $3.7\text{E}+10\text{Bq}$ ，计划每半年订购一个。



图 9-20 钨铼发生器外观

(3) 放射性药物的检验

回旋加速器每制备一批次 ^{18}F 、 ^{11}C 等，均会取少量(0.1mCi)合成的放射性药物到质控室检验其放化指标。每更换1个发生器，会取更换后第一批次的 ^{68}Ga 或 ^{188}Re 洗脱液0.1mCi，拿到质控室检验其放化指标。

正电子放射性药物使用40mm厚的铅罐防护， ^{188}Re 使用5mm厚的铅罐防护。手提

从放化室转移至质控室。

在质控室的通风橱内，打开铅罐，蘸取少量药品点板，点样板经层析后放入设备中自动检测。点板最多不超过1min，测试板上涂有的放射性药物极少，对工作人员的辐射影响基本可以忽略。点板完成后铅罐会盖上，放在通风橱中自然衰变，待药物衰变一天后，做为放射性废物收集。

(4) PET 显像药物在核医学科内转运

合成并分装好的 PET 药物，从成品传递窗传出，在核医学科内转运。本项目中采用药物转运防护罐，分为罐体、罐盖两部分（见图 9-21），适用于 10ml-30ml 产品的转运，其屏蔽厚度为 40mmPb 当量。经屏蔽后，防护罐表面剂量率低于 100 μ Sv/h，1m 处剂量率低于 5 μ Sv/h。



图 9-21 PET 药物转运防护罐示意图

转运内容包括：

1) 放射性药物在放化室的分装热室内分装到转运防护罐内，经质控室互锁式传递窗传递至药物实验场所。动物试验较少时，上午运送一次。动物实验较多时，上午和下午前各运送一次。

2) 用跑兔装置将放射性药物转运至核医学科注射室。本项目拟在回旋加速器放化室至核医学科注射室之间设置放射性药物传输“跑兔”装置。临床使用的正电子药物，由跑兔装置传输到注射室。传送过程需要 2min 左右。

(5) 正常工况下的放射性污染分析

1. 正电子放射性核素的制备量

根据表 9-3 和表 9-4 使用非密封放射性同位素情况，核医学科临床诊断和动物使用的 ^{18}F 的日使用量预计约 $1.55 \times 10^{10} \text{Bq}$ (420mCi)。回旋加速器生产计划见表 9-11。

表 9-11 回旋加速器生产放射性药物计划

核素	每天生产次数	每次生产量 (mCi)	日等效最大操作量 (GBq)	每年生产次数	年最大生产量 (Bq)
F-18	2	1000	0.74	500	$1.11\text{E}+13$
C-11	1	1000	0.37	200	$7.40\text{E}+12$
N-13	1	920	0.34	100	$3.40\text{E}+12$

O-15	1	920	0.34	100	3.40E+12
			1.11*		

注：每天生产 F-18 核素 2 次，生产其它同位素 1 次

^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 同属低毒组核素，毒性修正因子为 0.01。制备 PET 药物过程为简单操作(自动合成)。操作方式修正因子取 1。假设回旋加速器每天生产 F-18 核素 2 次，生产其它同位素 1 次，因此，回旋加速器生产场所放射性核素日等效最大操作量为 $1.11 \times 10^9 \text{Bq}$ ，属于乙级非密封放射性物质工作场所。

2. 放射性核素制备正电子核素的物料平衡分析

以制备 F-18 的 PET 药物为例，物料平衡如图 9-22 所示。回旋加速器制备的 F-18，约 60% 经标记转移到药物中，约 40% 经放射性“三废”和衰减损失，其中经气态损失不超过 1%，其余残留在制备装置中，部分经衰变损失。

3. 污染物分析

PET 药物制备过程中的放射性污染包括 γ 射线贯穿辐射，以及放射性“三废”对环境的影响。

1) γ 射线贯穿辐射

本项目拟生产的几种放射性药物，均衰变释放 γ 射线，会对周围环境有一定的辐射影响。几种放射性药物的辐射特性见表 9-12。

表 9-12 几种放射性药物的辐射特性

序号	核素称	理化性质	衰变类型	主要 γ 射线能量 (MeV)	主要 β^+ 射线能量 (MeV)	1MBq点源 1cm处剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
1	^{18}F	液态针剂；低毒， 半衰期 110min。	β^+	0.511 (194%)	0.634 (100%)	0.143
2	^{11}C	液态针剂；低毒， 半衰期 20min。	β^+	0.511 (200%)	0.96 (100%)	0.148
3	^{13}N	液态针剂；低毒， 半衰期 10min。	β^+	0.511 (200%)	1.19 (100%)	0.148
4	^{15}O	液态针剂；低毒， 半衰期 2.02min。	β^+	0.511 (200%)	1.72 (100%)	0.148
5	^{68}Ga	液态针剂；中毒， 半衰期 68min。	β^+	0.511 (178%)	1.90 (89%)	0.134

2) 放射性“三废”

在同位素交换反应和洗涤完成后，乙腈和乙醚溶液作为放射性废液处理，每批次大约产生 4ml。另外，质检室还有少量剩余药液及冲洗废液，每批次产生量不足 20ml，预

计每天的放射性废液产生量约 25ml，每月（按 23 个工作日计）产生的废液量总量约 0.58L。这些废液在热室内暂存，每周通过热室内特殊下水管道排入衰变罐暂存衰变。

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

用毕废弃的核素发生器退回供应厂商。

放射性药物合成和分装过程中，放射性物质挥发量通常低于总量的1%。当传输系统发生气路、液路泄漏时，短期释放量会增加，有可能会扩散到加速器机房和放化室（安置热室的房间）内。为防止放射性气体对周围环境的污染，本项目除回旋加速器室专用废气处置系统外，还设置有2套通风系统：

1）合成及分装热室独立排风处置系统（排风系统 2）：放射性废气，经过二级高效过滤器净化过滤（滤除粒径 $\geq 0.3\mu\text{m}$ 微粒的过滤效率不低于 99.97%）后，由单独管道引至所在建筑物顶部 23m 高处排放。

2）放化室、缓冲间、质控间、加速器操作室（排风系统 3）：经一级高效过滤器净化（过滤效率同上）过滤后由专门管道，引至所在建筑物顶部排放。

（6）非正常工况下的放射性污染

① 药物传递管道泄漏，导致场所空气发生放射性污染：放射性药物传输管道泄漏，导致放射性核素，特别是C-11气体外泄，并对工作区域空气造成放射性污染。

回旋加速器生产 ^{11}C 时，需密切关注固定剂量率的辐射水平，一旦辐射水平显著高于以往情况，有可能是 ^{11}C 泄漏，需立即关闭回旋加速器系统和场所的通风，工作人员迅速撤离，并启动应急措施。

② 进行药物操作时发生放射性污染：药物合成过程中意外发生管道泄漏，或分装过程中不慎将放射性药物洒落，导致工作台、地面、墙壁、设备等的放射性污染，甚至造成手和皮肤的污染。

③ 放射性药物保管不当，发生遗失或被盜：放射性药品失控可能造成环境放射性污染。回旋加速器合成的放射源药物，将马上转移至核医学科放药室暂存。核医学科放药室配套有保安措施，可有效防止同位素被盜和丢失事件的发生。

9.4.5 药物实验场所

（1）项目建设规划

在地下二层回旋加速器场所东侧设置一处动物 PET 显像动物实验场所，建设药物实验场所。配置 1 台小型多模态动物成像装置，使用 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{68}Ga 、 ^{89}Zr 、 ^{64}Cu 、 ^{124}I 等正电子核素以及 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{131}I 、 ^{82}Rb 等核素进行放射性药物临床前实验研究。实验室全年运行时间约 100d。

(2) 新型正电子核素显像药物研发

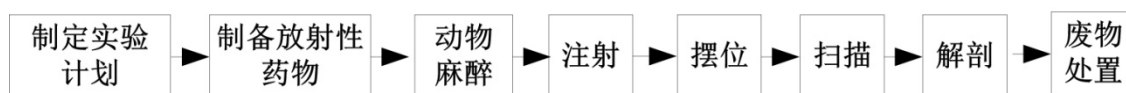
北大第一医院与国内研究机构合作，开发研究具有我国自主知识产权的新型正电子核素显像药物，需要进行化学合成、核素标记和实验动物 PET 显像等实验研究。

(3) 分子影像技术应用于药物评价

分子影像技术应用于新药的制发，应用内容包括：利用 PET 显像技术进行模式动物活体实时成像，分析药物在体内主要器官的代谢规律；采用定位标记技术标记目的药物，进行活体内药物代谢产物分析；利用标记药物探索药物的体内饱和剂量，为后续研究选择最佳给药剂量。

实验动物在麻醉状态下，被给予经核素标记的研究对象药物，利用 PET 动态采集方法，实时观察心、肝、脾、肺、肾等主要器官的放射性计数变化，获得各器官的时间-放射性曲线，从而分析药物在模式动物体内主要器官的分布和代谢规律。

(4) 动物实验流程



具体流程如下：

- 1) 制定实验计划：根据实验内容确定使用的放射性同位素种类和数量；
- 2) 定制正电子核素：提前向回旋加速器中心或者放射性药物销售公司订购放射性药物，并要求将同位素产品封装在青霉素安瓶中。
- 3) 接收放射性核素：放射性核素送到后，工作人员核对放射性核素的种类和数量是否与订货清单相符，签交接单，并妥善转移至实验室通风橱内。
- 4) 动物麻醉：将实验动物(大鼠或小鼠)进行麻醉。
- 5) 注射：在通风操作柜内，给已经麻醉的实验动物(大鼠或小鼠)注射，小鼠给药活度一般为 $100\mu\text{Ci}$ ，大鼠给药一般为 0.5mCi ，然后将废注射器置入铅废物桶内暂存。每天实验动物最大 20 支。
- 6) 扫描：将实验动物置入仪器配套的测量桶内，将测量桶送入小型多模态动物成像装置内进行扫描，记录实验数据。

7) 将动物处死，对需要解剖的实验动物进行解剖。解剖一只大鼠约需 2min，通常取其有用器官和组织置于管内，称重，之后测量放射性计数。工作人员距动物约 30cm，解剖时用 20mmPb 铅当量铅玻璃进行个人防护。

8) 废物处置：扫描过程中，动物偶尔会产生少量的排泄物，将保留在测量桶内。扫描结束后将吸附排泄物垫料收集至放废桶内暂存。处死实验动物，置入冰柜中暂存。清理实验台面，分类收集放射性废物，对台面、地面进行表面污染监测，记录监测数据。行实验人员体表污染监测，重点是手部和脚部，确认没有污染后离开控制区。

(5) 工作场所等级

PET显像实验区为相对独立的区域，实验研究使用量最多的同位素是 ^{18}F （占总操作量60%），其次是 ^{68}Ga 、 ^{124}I 和 ^{64}Cu ， ^{11}C 、 ^{89}Zr 、 ^{13}N 和 ^{15}O 的使用频次相对较少。

根据“表9-4药物实验场所使用非密封放射性同位素情况”，药物实验场所日等效最大操作量为 $1.48 \text{ E}+8\text{Bq}$ ，属于乙级非密封放射性物质工作场所。

(6) 动物实验场所的放射性污染分析

核素衰变时产生 γ 射线，动物 PET-CT 扫描时产生 X 射线。实验过程还可能产生放射性表面污染和放射性废水及放射性固体废物。本项目运行过程中主要放射性污染以及产生途径分析汇总列于表 9-13 中。

表 9-13 PET 显像实验研究工作场所放射性污染分析表

实验操作内容	污染因子					
	γ 射线	X 射线	表面污染	放射性废水	放射性废气	放射性固废
动物麻醉	-	-	-	-	-	-
药物注射	√	-	√	√	√	√
动物摆位	√	-	√	-	-	-
扫描	√	√	√	√	-	√
动物解剖	√	-	√	√	-	√

1. 正常工况下的污染途径

a. 放射性废物包括：

① 高活性放射性废物：如实验器皿（一次性吸头、塑料试管等）、放射性药物包装瓶、注射器、吸水纸、实验动物测量桶垫料等；

② 低活性放射性污染物：如手套、棉签等，分类收集于放射性污物桶中，暂存衰变；

③ 实验动物尸体：实验结束后，动物均被处死，尸体或解剖组织装入密封袋，暂

存于实验室内的-20℃冰柜中暂存，衰变一定时间（至少 1 个月）后，申请清洁解控，符合清洁解控水平的动物尸体作为医疗废物处置。

b. 放射性废水

清洗实验器皿、器械和实验台面清洁产生少量含放射性核素的废水。预计每个实验日产生量为 12.5L，全年排放量约 2.5m³。

c. 放射性废气

本项目核素标记物合成过程为湿法、常温下操作，一般不会放射性核素随气态物质挥发的情况。

d. γ 射线和 X 射线

PET 和 SPECT 扫描用放射性药物衰变产生 γ 射线。扫描设备配套的放射源衰变产生 γ 射线。PET-CT 扫描时产生 X 射线。

本项目使用的小型动物 PET/CT 采用超低功率 X 线发生器，管电压<90kV，管电流 $\leq 2\text{mA}$ ，设备运行时 X 射线有用线束和泄漏辐射水平远低于临床用 CT。

2. 非正常情况的污染途径

a. 放射性表面污染：因容器破碎，放射性同位素泼洒等，有可能污染工作台、地面、墙壁、设备等，甚至控制区外的环境污染。

b. 放射性核素管理失控：因管理不善，发生实验用放射性核素被最为一般废液倾倒，或发生被盗和丢失事件，导致潜在照射的发生。设备校验用放射源被盗和丢失。

c. 放射性废物处置不当，造成放射性废物流失至普通环境中。

表 10 辐射安全与防护

10.1 项目安全设施

10.1.1 项目竣工环保验收

项目竣工后，应对辐射防护设施进行竣工环保验收，其中包括辐射屏蔽、安全联锁和警示系统、通风系统等，这些项目依照设计标准验收合格后，射线装置和放射性工作场所方可正式投入运行。如机房或工作场所位置发生变化，需重新履行环保审批手续。

10.1.2 加速器机房（6MV 和 10MV 加速器）拟采取的辐射安全与防护措施

1) 加速器机房(包括防护门)采用实体屏蔽措施，能够保证机房周围墙体、屋顶外和防护门外 30cm 处辐射剂量率不大于本项目建议的剂量率控制水平，辐射工作人员和公众的受照剂量满足环评文件提出的剂量约束要求。

2) 加速器放射工作场所实行分区管理：加速器机房为控制区，控制室和配套设备间为监督区。

3) 在加速器防护门外明显位置设立电离辐射警告标志和中文警示说明。安装工作状态指示灯，并和设备出束关联。

4) 安装电视监控、对讲系统，在治疗过程中能够观察病人状况，此外，也可以观察治疗室是否有人员滞留。

5) 辐射工作人员进入加速器机房将佩戴个人剂量计。每个机房新增配备 2 台个人剂量报警仪。

6) 电动防护门具有防夹人功能。停电时能够手动开启，使病人安全转移。

7) 治疗系统采用数字密码或者专用钥匙启动，由专人操作设备。

8) 设置门机安全联锁：只有当防护门关闭，设备才能启动出束；反之，如果照射过程中防护门被打开，系统将自动停止出束。

9) 紧急停机按钮：紧急停机按钮安装在控制室的操作台上（1 个）、加速器设备上（2 个）、加速器治疗室的墙壁上（3 个）和迷道内 1 个，并有明显的标志，当遇到意外情况，可随时按动急停开关，切断设备高压，停止出束。紧急停止开关必须采用手动方式才能复位。

10) 门控按钮设置：在防护门外旁侧安装关门按钮（无开门功能），在防护门内侧迷道墙壁上安装开门按钮（无关门功能），在控制室内设开、关门按钮。

11) 每个加速器机房内均安装固定式辐射剂量监测报警仪器，用于监测机房内的辐射水平并帮助辐射工作人员判断设备的工作状态。放疗科新增配置 1 台便携式剂量率

12) 治疗室内安装通风换气系统。换气次数不低于 4 次/h。送风口设置在机房顶部, 排风口设置在机房墙体下侧 30cm 处, 呈对角线布置。

14) 排风管道由迷道并在防护门上方采用“Z”方式穿出机房，排风管尺寸300mm×300mm。排风口设在门诊部 D 区上方，高度 23m。线缆采用“U”型方式穿过屏蔽墙。

1-7#楼梯

1-24# 医务

14.600 (每两)

机房1 (10MV)

控制室

剂量率仪主机

视频对讲系统

开门按钮

关门按钮

门控开关

急停按钮

三色状态灯

门机联锁装置

电离辐射标志

中文警示灯箱

摄像头

声音提示装置

排风口

送风口

固定式剂量探头

剂量率仪主机

视频对讲系统

根据原环保部辐射安全与防护监督检查技术程序，表 10-1 列出了本项目加速器机

房拟采取的安全与防护设施设计方案。

表 10-1 加速器机房安全与防护设施设计要求

序号	项目	检查内容	本项目	备注
1*	A 控制台及安全联锁	防止非工作人员操作的锁定开关	√	钥匙或密码
2*		控制台有紧急停机按钮	√	1 个
3*		电视监控与对讲系统	√	1 套
4*		治疗室门与束流联锁	√	门机联锁
5		治疗室内准备出束音响提示	√	蜂鸣音
6*	B 警示装置	入口电离辐射警告标志	√	标准电离辐射警告标志
7*		入口有加速器工作状态显示	√	工作状态指示灯
8	C 照射室 紧急设施	紧急开门按钮	√	迷道门内侧
9		紧急照明或独立通道照明系统	√	应急照明
10*		治疗室内有紧急停机按钮	√	墙壁至少设 2 个
11*		治疗床有紧急停机按钮	√	治疗床 2 个，机架上 1 个
12	D 监测设备	治疗室内有固定式剂量率仪	√	机房配置 1 台
13*		便携式辐射监测仪器仪表	√	放疗科配备 1 台
14*		个人剂量报警仪	√	机房配置 2 台
15*		个人剂量计	√	每人 1 个
16	E 其它	治疗室门防夹人装置	√	具有防夹功能和停电手动开启功能
17		通风系统	√	屋顶设风机 1 台
18		火灾报警仪	√	屋顶火灾报警器
19		灭火器材	√	干粉灭火器

10.1.3 后装机机房拟采取的辐射安全与防护措施

1) 使用专用机房，机房建筑采取可靠的实体屏蔽，安装辐射屏蔽门，采用隔室遥控操作方式。确保机房周围墙体外、屋顶和防护门外 30cm 处辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，工作人员和公众的受照剂量满足剂量约束要求。

2) 后装机加速器放射工作场所实行分区管理：将后装机机房划分为控制区，控制室为监督区。

3) 在后装机防护门外粘贴电离辐射标志和中文警示说明。安装工作状态指示灯，并和设备出源关联。

4) 安装电视监控、对讲系统，在治疗过程中能够观察病人状况，此外，也可以观察治疗室是否有人滞留。

5) 工作人员进入加速器机房将佩戴个人剂量计。后装机机房新增配备 2 台个人剂量报警仪。

6) 电动防护门具有防夹人功能，停电时能够手动开启，使病人安全转移。

7) 治疗系统由控制台钥匙或者密码控制，由专人操作设备。

8) 设置门源安全联锁联锁：只有当防护门关闭，设备才能出源；反之，如果照射过程中防护门被打开，系统将自动回源。

9) 紧急停机按钮：紧急停机按钮安装在控制室的操作台上（1 个）、后装机设备上（1 个）、后装机机房的墙壁上（2 个）和迷道内 1 个，并有明显的标志。当按动急停开关，设备自动回源。紧急停止开关必须采用手动方式才能复位。

10) 门控按钮设置：在防护门外旁侧安装关门按钮（无开门功能），在防护门内侧迷道墙壁上安装开门按钮（无关门功能），在控制室内设开、关门按钮。

11) 治疗室内安装通风换气系统。换气次数不低于 4 次/h。送风口设置在机房顶部，排风口设置在机房墙体下侧，呈对角线布置。

12) 机房内安装固定式辐射剂量监测报警仪器，用于监测机房内的辐射水平并帮助工作人员判断设备的工作状态。

13 设备具有模拟源（假源），采用假源探路、真源治疗的双重驱动系统，假源可自动穿过施源器检查所有联接点并对可能产生打结或过度弯曲的部位报警，防止因输源通路不畅造成卡源事故；

14) 配备 UPS 不间断电源。当在治疗过程中发生停电情况，UPS 自动供电能使放射源退回到安全位置,并留存病人的治疗记录。

15)设备具有安全联锁和自动回源系统等故障检查和保护系统。施源器未插入机头的卡盘内，不能出源；施源器未锁紧，不能出源；

16) 设备机头内有应急回源手柄，当退源用的电机失灵时，可采用应急回源手柄退源；

17) 治疗室内配备合适的贮源容器、长柄镊子等应急设备。

18) 按照《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》（GA 1002-2012）要求，在治疗室安装视频监控和入侵报警装置等防范设施，满足放射源安保要求后投入使用。

19) 放射源的更换过程由专门的程序控制，工作人员隔室操作，确保整个过程放射源对操作人员绝无暴露。

20) 退役的放射源由放射源供方收回。

后装机机房的安全联锁和警示系统的逻辑设计见图 10-3 所示。后装机机房安全联锁和安全措施布置图见图 10-4 所示。

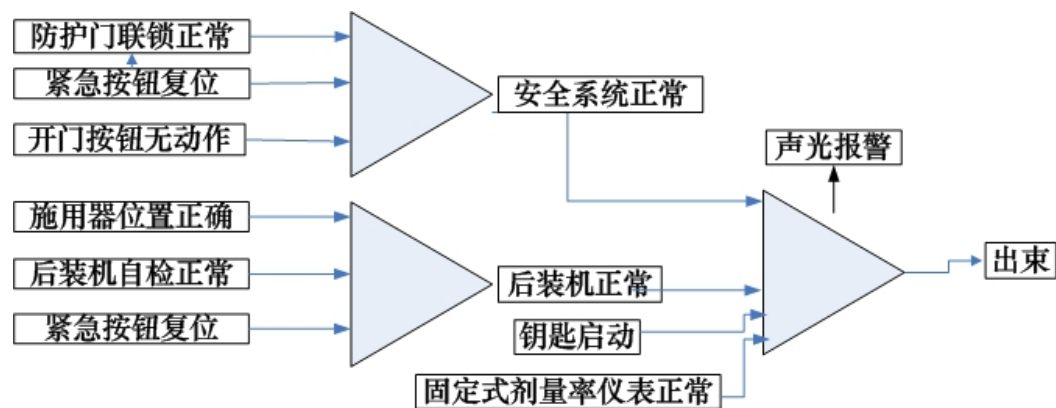


图 10-3 后装机安全联锁和警示系统逻辑图

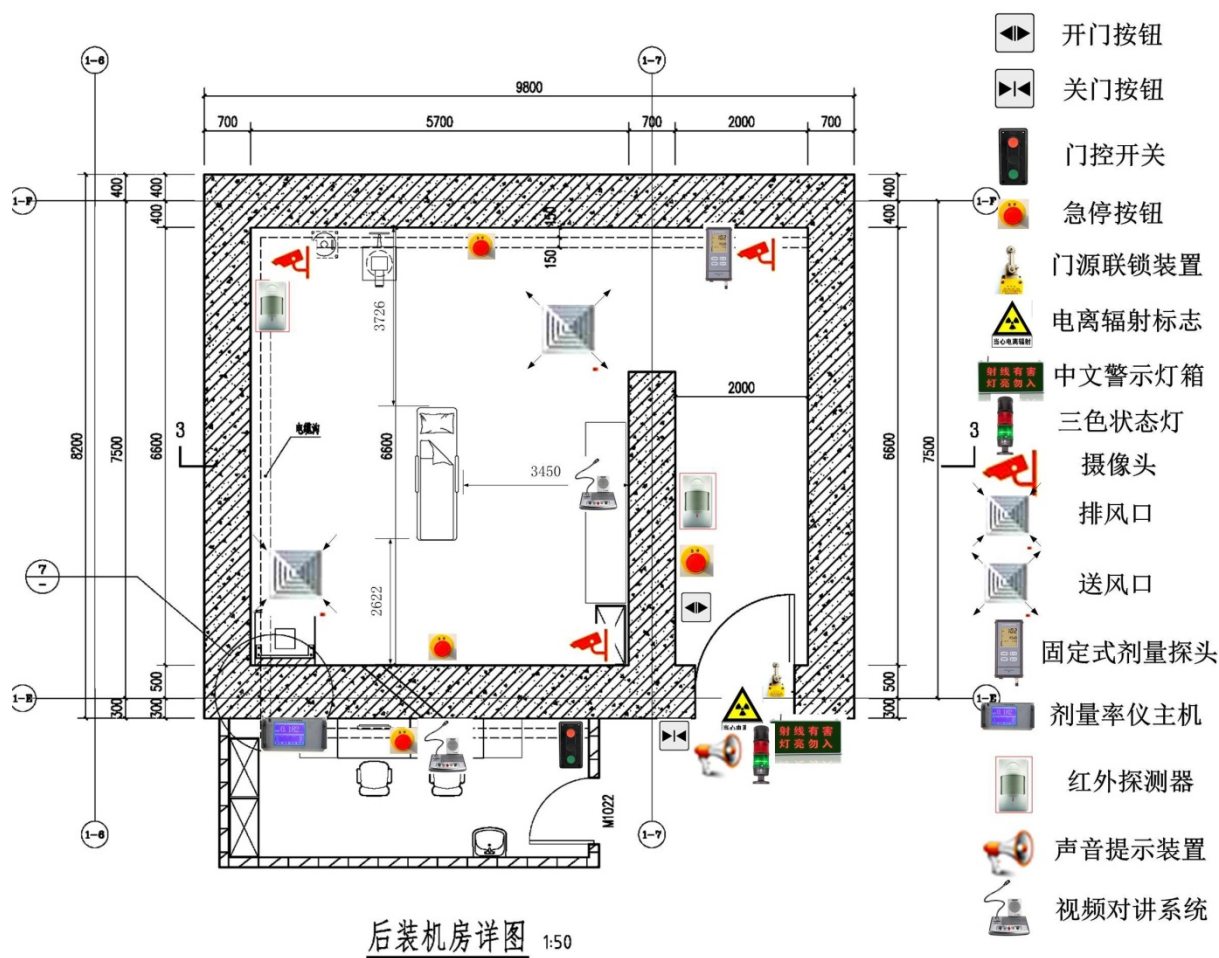


图 10-4 后装机机房安全联锁和措施布置图

表 10-2 后装机机房安全与防护设施设计要求

序号	项目	检查内容	设计 建造	备注
1*	A	防止非工作人员操作的锁定开关	√	钥匙或密码

2*	装置安全 设施	施源器与源联锁	√	设备配备
3*		管道遇堵自动回源	√	设备配备
4*		仿真源模拟运行	√	设备配备
5*		主机外表面电离辐射标志	√	标准电离辐射警告标志
6*		控制台显示放射源位置	√	指示灯显示
7*		控制台紧急停止照射按钮	√	1 个
8*		停电或意外中断照射时自动回源装置	√	设备配备
9*		手动回源措施	√	设备配备
10*	B 场所安全 设施	治疗室固定辐射水平监测仪	√	标准电离辐射警告标志
11		治疗室有迷道	√	L 型迷道
12*		治疗室门与出源联锁	√	门源联锁
13*		放射源返回储源器的应急开关	√	设备配备
14*		治疗室电视监控对讲装置		1 套
15*		入口处电离辐射标志	√	标准电离辐射警告标志
16*		入口处源工作状态显示	√	指示灯
17*		停电或意外中断照射时声光报警	√	指示灯
18		通风设施	√	空调系统
19		火灾报警仪	√	屋顶火灾报警器
20*		个人剂量计	√	每名工作人员 1 枚
21*		个人剂量报警仪	√	2 台
22	C	后装源专用贮存室/保险柜	√	专用机房
23	放射源贮存	双人双锁	√	门禁锁、设备专用工具
24		防盗门窗	√	防护门

10.1.4 倒装放射源及退役放射源安全管理措施

1) 委托后装机设备供应商认可的、且具有使用Ⅲ类放射源资质的技术服务机构承担放射源倒装和设备的涉源维护、检修工作。购置后装机设备协议中,明确由受委托的机构承担操作放射源过程的辐射安全责任,医院负责场地准备、外围警戒以及联系生态环境部门到场监督等。

2) 对承担放射源倒装和设备涉源维护、检修工作的机构进行资质审查,要求其具有使用Ⅲ类Ir-192放射源的辐射安全许可证,操作人员具有相应的资格。

3) 供源单位负责放射源运输工作,承担运输过程的安全责任。放射源运输按照《放射性物品运输安全条例》和《放射性物品安全运输规程》(GB11806-2019)要求,组织放射源运输工作。

4) 实施放射源倒装、放射源(罐)搬运和设备调试工作时,安排行政管理人员、放疗科技术人员和场地警卫人员进行现场管控和保障工作。医院配合做好放射源运输进场工作,安排适当的场地和运输通道。操作场所作为控制区进行管理,禁止无关人员进入。

5) 委托有能力的检测机构开展工作场所辐射监测和工作人员个人剂量监测。操作人员佩戴个人剂量报警仪,发现现场辐射剂量率异常升高时,及时停止操作,查找原因,改进防护措施。

6) 倒装放射源之前,办理《放射性同位素转让审批表》。待放射源倒装完毕,双方办理放射源安全责任转移手续。退役放射源由原供源单位收回。

10.1.5 DSA 项目辐射安全防护设施

1) 机房采取实体屏蔽措施,保证机房周围(含观察窗、楼上和楼下)及防护门外 30cm 处辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

2) 机房内的所有区域为控制区,控制室、缓冲间和污物间为监督区。在机房门口设置明显的放射性警告标识和中文警示说明,以及设备工作状态指示灯。

3) 控制台电源钥匙妥善保管。

4) 机房和控制室之间设有观察窗,并配置有对讲系统。

5) 血管造影室机房门(本项目患者和医护人员共用)拟为电动防护门,设有脚触感应式开门、自动延迟关门和防挤压功能。机房门外拟设置电离辐射警告标志和中文警示说明,防护门上方设置工作状态指示灯(手术中)和警示灯箱(射线有害灯亮勿入)。机房门外工作状态指示灯的供电线路拟与 X 射线机低压供电线路连接,在 DSA 设备通电时,防护门打开,DSA 警示灯熄灭,防护门关闭,警示灯自动亮起。警示灯不与设备出束/不出束关联,但在设备上设有出束指示灯,以便于工作人员了解出束状态。

6) 机房配备火灾报警系统,配有灭火用品。

7) 采用空调系统送新风的方法对 X 线机房进行机械通风换气,防止机房空气中臭氧和氮氧化物等有害气体累积。

8) 每间 DSA 机房均配置工作人员防护用品,包括前 0.5mm、后 0.25mm 铅当量的工作人员防护铅衣 16 件;0.5mm 铅当量的大领铅围脖和铅帽子各 16 件;0.5mm 铅当量的铅眼镜 16 副;每间 DSA 机房拟配置 0.5mm 铅当量的受检者防护用品,包括铅围裙、铅围脖、铅帽子各 4 件。

9) 介入工作人员均佩带个人剂量计,进行个人剂量监测。个人剂量计应佩带在铅衣里面的胸部位置。

10) 每个使用 DSA 的场所均配备 1 台便携式剂量率监测仪, 本项目共计 2 台。

11) 拟新增配备 1 台便携式剂量率监测仪。介入治疗时, 使用便携式 X- γ 剂量率仪帮助医护人员选择治疗站位、铅屏风的摆放位置等, 提高辐射防护水平。

12) 采取附加屏蔽 X 线措施: 每台 DSA 手术床沿悬挂 2 块含 0.5mmPb 的铅围帘, 阻挡散射 X 线对医生的照射。在床上悬挂 0.5mm 铅当量的铅玻璃吊屏 1 个, 用于阻挡散、漏射线对辐射工作人员的照射。

13) 除存在临床不可接受的情况外, 摄影工况图像采集时工作人员应尽量不在机房内停留。

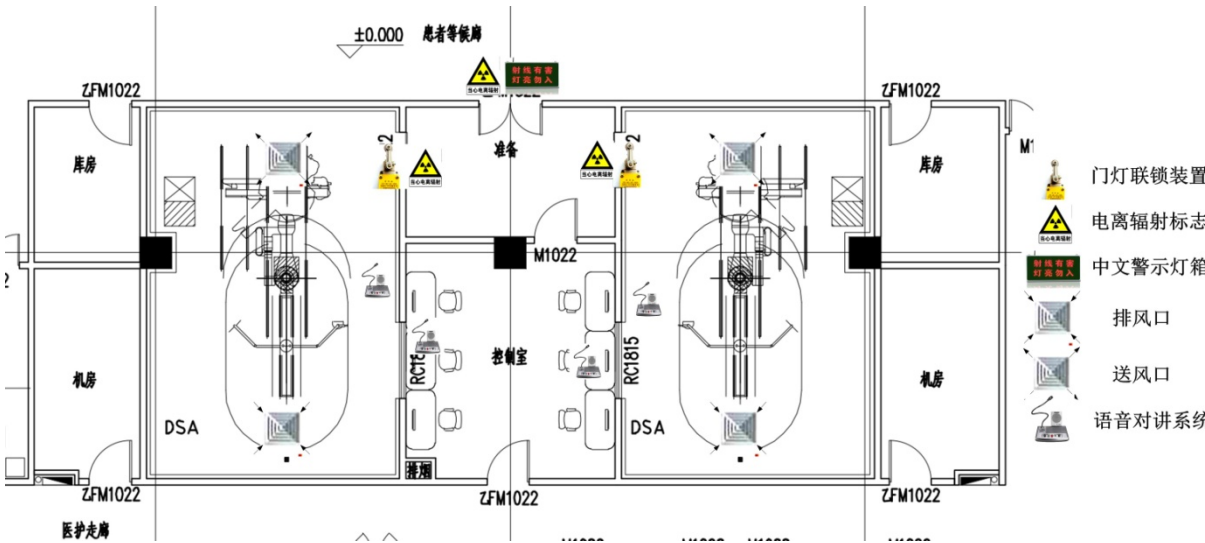


图 10-5 DSA 机房安全联锁和防护措施布置图

表 10-3 血管造影机机房安全与防护设施设计要求

序号	项目	检查内容	设计	备注
1*	A 场所设施	检查位局部屏蔽防护设施	√	铅围裙
2*		医护人员个人防护用品	√	4 套×4
3		患者防护	√	1 套×4
4*		观察窗屏蔽	√	铅玻璃观察窗
5		机房防护门窗	√	每间 DSA 机房设一个防护门（患者和医护人员共用）。每间机房设一个铅玻璃观察窗。
6		通风设施	√	空调系统
7*		入口处电离辐射警告标志	√	标准电离辐射警告标志
8		入口处机器工作状态显示	√	“手术中”和“射线有害灯亮勿入”
9*	B 监测设备	辐射水平监测仪表	√	便携式辐射监测仪 1 台。
10*		个人剂量计	√	每人 1 个
11		腕部剂量计	/	/

10.1.6 临床核医学科场所辐射防护与安全管理措施

1. 核医学科工作场所实行分区管理，划为辐射安全管理控制区和监督区，将放药室、注射室、运动负荷室、肺通气室、给药后等候室、诊后观察区，扫描检查室以及患者通道作为控制区，控制室、设备间、缓冲区作为监督区。

在控制区出、入口分别安装单向门禁系统，防止无关人员进入控制区。控制区出入口上张贴电离辐射警告标志，警示无关人员不要进入或者在出入口长久停留。设有缓冲区、医、患人流双通道和物流通道，工作人员通过缓冲间进入操作区，防止交叉污染。

在注射室门外、扫描机房门外设置电离辐射标志及中文警示说明。机房防护门上方设置工作状态指示灯，安装门灯连锁装置，控制室防护门关闭，警示灯自动亮起。

2. 外照射防护：核医学科控制区边界、核素操作、受检人员候诊和扫描场所外围墙体采用实体屏蔽措施，顶棚和底板为混凝土浇筑，患者进、出通道门安装铅制防护门。扫描机房安装铅制防护门（具有防夹功能），观察窗安装铅玻璃。保证核医学科控制区边界外、扫描室墙体及防护门外 30cm 处辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

3. 在放药室配备 1 个贮存放射性药物的铅屏蔽盒，在注射室配备 2 个铅屏蔽药物注射窗和 1 个可移动铅屏蔽注射台、2 个钨合金注射防护套和 2 个铅制废物桶（>1L），放药室配备 1 个给药窗口，在废物库配置 4 个铅制废物桶（20L），在 3 个病人候诊室各配备 1 个 5L 废物桶。

4. 内照射的防护：放化室配备手套箱，手套箱操作口风速不低于 1m/s ，废气经活性炭过滤装置过滤后，由专用排风管道经管道井引至所在建筑物顶部排放，高度 23m。此外，在给药候诊室、留观室、PET/CT 机房、SPECT 机房、SPECT/CT、PET/MRI 机房、贮源室、废物库均设置排风口，排风口安装止回阀，排风同样由专用排风管道经管道井引至本建筑物顶部排放。顶部排风出口全部朝向西侧空地。

5. 放射性表面污染控制措施：注射室、放药室、扫描室、运动负荷、肺通气室、废物库、候诊室及卫生间和控制区走廊地面铺装硬质无缝 PVC 地板革，墙面装铝塑面板或防水易清洁涂层，便于去污。

放药室和注射室放射性同位素操作台面采用易去污材料（如不锈钢板），配置托盘、吸水纸等物品。手套箱工作台面选用表面光洁、耐腐蚀、防渗漏、易去污的材料。

6. 放射性废水收集处置设施：核医学科放药室内洗手池（含拖布池）废水，以及给药后患者专用卫生间的冲厕废水，通过专用管道一并进入放射性废水衰变池。专用管道外表面采用 6mm 厚度的铅皮进行包裹防护。衰变池采用槽式设计，衰变池总容积不

低于 81m^3 ($27\text{m}^3 \times 3$)，能够满足满足《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》要求的至少暂存 30 天的清洁解控要求（废水罐达到高液位并自动切换后计时）。核医学科清洁解控排放的废水，排入医院污水处理站，之后排入市政污水管网，并详细记录“放射性废水暂存、处置管理台账”，清晰记录放射性废水的暂存、检测、解控、排放等信息。

7. 妥善收集固体放射性废物：注射窗旁设一个含 20mm 铅的废物桶，废弃的放射性药物、注射器、包装物、棉棒、一次性用品等物品放入该铅制废物桶，次日早上转移至核医学科放射性废物间。核医学科废物间设置 4 个 10mm 铅的废物桶（容积 20L），2 个用来轮流贮存 A 类废物，2 个用量轮流贮存 B 类废物。放射性固废依照《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》固体废物相关要求清洁解控处置，并详细记录放射性固体废物暂存、处置管理台账，清晰记录放射性废物的暂存、检测、解控、排放等信息。

8. 核医学科放药室安装安装防盗门、电视监控和防盗警戒系统，落实放射源和放射性药品的安保地标要求，严防放射性药品丢失。

在核医学患者通道入口处、留观区、给药后候诊区等处均拟设置视频监控系统，便于观察和管理给药患者的活动。在控制室和机房、留观室、待检患者候诊区等处安装对讲装置。

9. 核医学科场所配置 1 台表面污染监测仪和 1 台 X- γ 剂量率仪，用于表面污染和剂量率水平的检测。配备 2 套铅眼镜、铅手套、铅衣、铅帽等个人防护用品

10. 全部辐射工作人员通过辐射安全与防护培训后持证上岗。所有人员开展个人剂量监测。

11. 部分患者因身体不便等原因需要家属陪护检查的，将告知家属近距离接触可能受到少量辐射照射，请陪护人员减少近距离接触的时间或者适当增加陪护距离。

表 10-4 核医学科诊疗场所辐射安全防护设施设计核查表

序号	检查项目		设计	本项目具体情况
1*	A 场所设施	场所分区标识	√	地面标注控制区和监督区。
2		场所电离辐射标志	√	扫描机房防护门、候诊场所、放药室、源库等门上粘贴电离辐射标志。
3		出入口有相应的标识和说明	√	受检人员出、入口有明显标志和中文警示说明。

4		场所内文字说明、灯光/声响等警示	√	房间门口粘贴文字说明。地面设置引导文字和标线。
5		安全保卫设施（贮存场所必须）	√	放药室安装防盗门，闭路监视等安保设施。
6*		通风设施（通风橱/手套箱、记录的流速）	√	放药室配备手套箱，屏蔽厚度 20mmPb。
7*		注射或口服取药用屏蔽	√	配备防辐射注射窗
8*		专用卫生、淋浴设施及下水（乙级场所）	√	设专用卫生间及排水管线
9		放射性下水系统标识	√	放药室设置洗手池或拖布池，废水收集至衰变池，粘贴明显文字标识。
10*		放射性同位素暂存库或设施	√	同位素在放药室暂存
11*		放射性下水系统或暂存设施	√	设槽式放射性废水衰变池
12*	B 监测设备	便携式监测仪器仪表（污染、辐射水平等）	√	配置 1 台表面污染监测仪和 1 台 X-γ 剂量率检测仪
13*		个人剂量计	√	所有工作人员配备 TLD 个人剂量计
14		个人剂量报警仪	--	-
15*		放射性活度计	√	放药室配备至少 2 台活度计。
16	C 个人防护	防护手套、口罩等	√	配备一次性医用口罩和手套
17		放射性表面去污用品和试剂	√	配备洗涤灵、酒精和棉球等。
18	D 放射性废物和废液	放射性固体废物和废液贮存设施	√	废物间配套 4 个 20 废物桶，病人候诊室各配备 1 个 5L 废物桶。注射室配备 2 个 1L 的废物桶。设 3 个槽式衰变池。
9*		放射性固体废物间	√	设废物间，贮存放射性废物
20		废物桶屏蔽措施	√	铅屏蔽废物桶
21*		通风系统	√	废物间设一个排风口
22	E 应急物资	辐射监测仪器	√	配置 1 台表面污染监测仪和 1 台 X-γ 剂量率检测仪
23		去污用品和试剂	√	洗涤灵、酒精和棉球
24		必备的警示标志和标识线	√	警戒绳 50m
25		合适的灭火器材	√	1 个干粉灭火器

10.1.7 回旋加速器药物制备工作区辐射防护与安全管理措施

1) 回旋加速器机房、药物合成场所（放化室）采用实体屏蔽措施，保证回旋加速器药物制备工作区控制区边界外、机房周围（含防护门）30cm 处辐射剂量率不大于 2.5μSv/h

2) 在回旋加速器机房、药物合成热室等工作场所出入口处设置电离辐射警告标志和中文警示说明；在加速器机房出入口门外安装回旋加速器工作状态指示灯（红、黄、绿），当回旋加速器停机时，绿灯亮；设备准备就绪可出束时，黄灯亮起；回旋加速器出束时，红灯亮起。

3) 工作场所按照控制区和监督区实行分区管理。本项目回旋加速器机房、放化室、

划为控制区，缓冲间、设备间、控制室、质控室为监督区。回旋加速器场所有明确的人流和物流通道。设置有缓冲间，用来更换工作服，污染监测和去污。

4) 在缓冲间内将放置表面污染监测仪器，供工作人员离开回旋加速器工作场所前进行放射性表面污染监测。在缓冲间配备去污用品和洗消试剂，一旦发现放射性污染及时去污。

5) 在回旋加速器机房门外安装关门按钮，在门内侧附近墙上安装紧急开门按键。在加速器机房内每面墙及控制台上均设置 1 个紧急停止按钮；急停按钮一经按下，系统将无条件关闭加速器束流，停止出束。急停按钮旁有中文说明。

6) 机房内设置闭路监视系统（无盲区），用于监视设备运行情况，并观察加速器机房内是否有人滞留。

机房内设置“清场按钮”，并和设备出束系统联锁。回旋加速器开机前，工作人员须进入机房进行巡视，确认没有人员滞留时，按下巡检按钮，关闭防护门，设备才能启动。

7) 回旋加速器的启动只能由获得授权人员从用户界面上完成（登录名和密码保护），而且需要在各项联锁系统就绪，且钥匙开关拨至闭合位置，加速器才能出束。

8) 回旋加速器机房设计有多道安全联锁系统，包括：①回旋加速器与其自屏蔽装置联锁。两个可移动的屏蔽块闭合到位，才能出束打靶。②固定式剂量率仪和防护门联锁。剂量率高出设定的阈值时，防护门无法打开。③防护门和设备出束系统联锁。防护门关闭，出束照射系统才能启动；照射过程中防护门打开，系统将自动停止出束。

9) 回旋加速器工作场所包括 3 个功能区：回旋加速器机房，药物制备和分装热室，放化室、质控室和控制室。拟在上述 3 个区域设置独立排风系统，废气通过专用排风管道引地面建筑物顶部排放。

① 回旋加速器机房→高效过滤净化→专用排风管道→建筑物顶部排放。

② 药物合成和分装热室→ 二级高效过滤器→专用排风管道 →建筑物顶部排放。

③ 放化室、质控和控制室→专用排风管道→建筑物顶部排放。

10) 回旋加速器工作场所地面铺装硬质无缝 PVC 地板革，墙面装铝塑面板或防水易清洁涂层。放射性同位素操作台面为不锈钢材质或其它易去污材料。

11) 回旋加速器机房配备 1 台固定式 γ 剂量率仪。工作场所新增 2 台个人剂量报警仪，1 台便携式表面污染监测仪和 1 台便携式 γ 剂量率仪。

12) 回旋加速器机房设置铅废物桶，用来收集更换下来活化部件或靶材料。配备 1 台 L 型屏蔽工作台和铅眼镜，用于靶箔片维护和更换。

13) 合成热室正面采用 70mm 铅当量的铅板和铅玻璃进行屏蔽防护。拟配备 4 个药物运转防护罐 (>40mmPb)，转用放射性药物时将放射性药物放入药物运转防护罐内，然后将药物运转防护罐置于跑兔装置上，转移至注射室。或者放置在不锈钢防护转运车上，工作人员推动不锈钢防护转运车转运药物至药物实验场所。拟配备 1 台不锈钢防护转运车，用于转运放射性药物。

14) 从事回旋加速器操作人员通过辐射安全与防护考核，持证上岗。

15) 回旋加速器委托设备生产厂家进行定期维护和故障维修。在维护和维修时可擅自解除安全连锁系统。

16) 管沟屏蔽：加速器机房与热室之间放射性核素输送管沟的上方加盖 50mm 厚铅砖，采用 U 形穿墙管沟，避免漏束情况的发生。

17) 本项目回旋加速器机房内进风口和排风口按照“对角布置、上进下排”的原则设置；进风管和排风管采用“Z”型方式沿迷道从防护门上方穿出机房。

18) 安装有火灾报警器，配备有灭火器材，设有应急通道。

表 10-5 回旋加速器辐射安全防护设施设计核查表

序号	检查项目		设计	本项目情况
1*	A 场所设施	加速器厅为控制区	√	分区管理，加速器厅和放化室为控制区。
2*		入口电离辐射标志	√	加速器机房和放化室门口设置。
3*		入口加速器运行状态显示	√	设置 3 色工作状态指示灯。
4*		电视监控系统	√	加速器机房和放化室均设置闭路监视系统。
5		语音广播系统	√	设置对角系统
6*		控制区内有工作警报装置和警示标志	√	回旋机房内设置警铃。
7*	B 安全连锁	机柜或操作台有防止非工作人员操作的锁定开关	√	专用钥匙
8*		门与加速器高压触发连锁	√	门机连锁系统
9*		控制台有紧急停机按钮	√	急停按钮
10		火灾报警仪与加速器连锁	—	场所设置火灾报警器。
11*	C 监测设备	控制区内固定式辐射剂量监测仪	√	设置固定式剂量率，并与防护门连锁
12*		个人剂量报警仪	√	新增购置 2 台个人剂量报警仪
13*		γ 和中子个人剂量计	√	配备个人剂量计
14		便携式 γ 剂量测量仪	√	核医学科配备 1 台便携式 γ 剂量测量仪共用
15		便携式中子剂量测量仪	—	不配置。每年委托第三方对机房周围中子水平监测。
16*		便携式表面污染仪	√	配置 1 台便携式表面污染仪。
17	D 感生放射性	强活化部件表面标有电离辐射警告标志	√	自屏蔽体、靶部件上粘贴电离辐射警告标志。
18*		更换下来活化部件有专设的存放地点	√	配置废物桶，贮存更换下来活

				化部件等。
19	E 其它	控制区通风系统	√	设置通风系统
20		停机后，控制区通风	√	停机后机房通风 30min。
21		灭火器材	√	配置干粉灭火器。

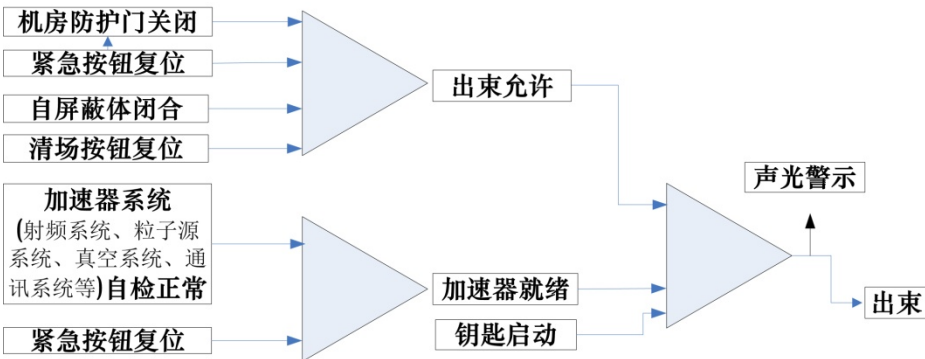


图 10-6 回旋加速器运行安全系统逻辑图

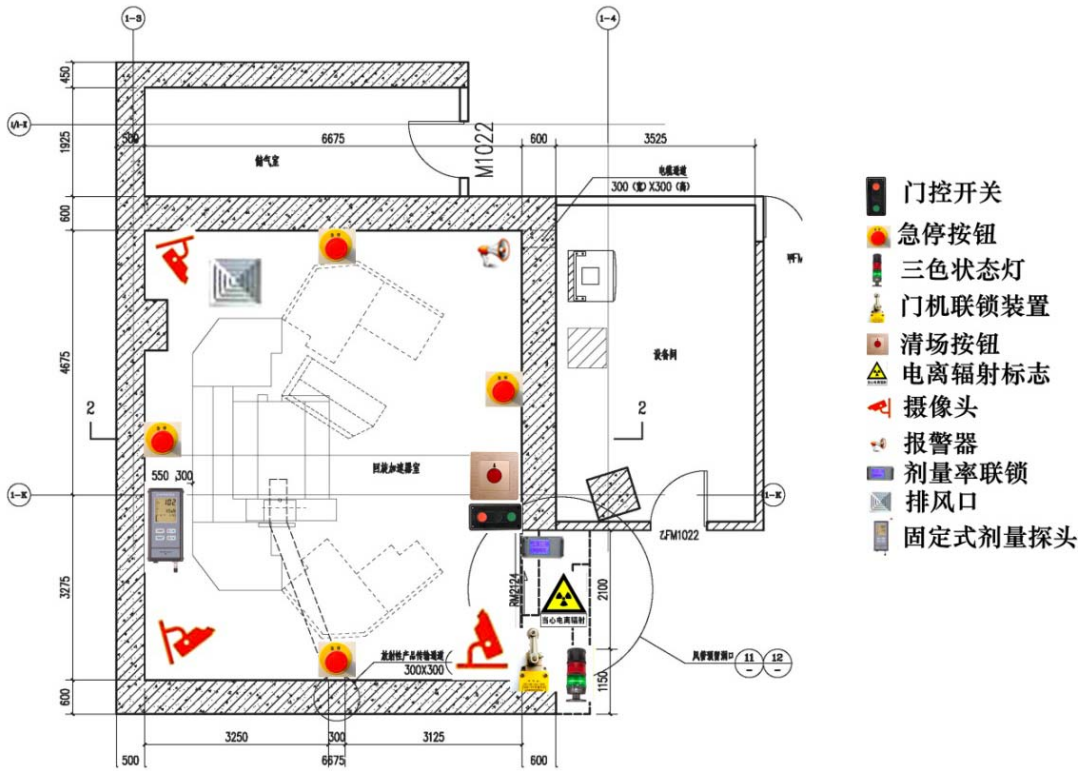


图 10-7 回旋加速器机房安全装置示意图

10.1.8 药物实验场所辐射安全防护措施

- (1) 外照射防护：药物实验场所和显像室建筑墙体和顶板采用现浇混凝土建造，安装铅防护门。科学编制实验计划和实验方案，尽可能减少放射性同位素的使用量。实验场所配备不低于 6mmPb 当量的铅玻璃或铅板防护屏。
- (2) 内照射的防护：药物实验场所内安装专用通风通风橱，风速满足通风柜半开情况下大于 1m/s 的要求。排风管道引至门诊部 D 区顶部高处排放。为工作人员配备铅眼镜、铅衣、铅围裙等个人防护用品。

(3) 表面污染防治措施：为防止污染工作台面，解剖实验尽可能在陶瓷盘内进行。一旦发生意外放射性污染，依照《放射性突发事件应急预案》，立即收集污染物，采用擦拭方法处理。污染处置过程中产生的污染物将妥善收集，按固体废物处置。最终的表面污染水平应低于污染水平控制限值。

(4) 实验室分区管理，药物实验场所和显像室作为控制区管理，操作室作为监督区管理。药物实验场所入口粘贴电离辐射警告标志和中文警示说明。

(5) 放射性废物分类收集。动物尸体整体装入密封袋，暂存于实验室内的-20℃冰柜中。其它放射性废物同样收集暂存，暂存于废物桶内。放射性废物衰变一定时间（至少1个月）后，解控作为医疗废物处置。实验过程产生的放射性废水排入核医学废水衰变池，由核医学科统一暂存和解控处置。

表 10-6 回旋加速器药物合成场所辐射安全防护设施设计核查表

序号	检查项目		设计 建造	本项目具体情况
1*	A 场所设施	场所分区布局是否合理及有无相应措施/设施	√	分为控制区和监督区，地面设文字进行标注。
2*		入口处电离辐射警示标志	√	药物制备场所入口、回旋加速器机房、放化室门口粘贴电离辐射警示标志。
3*		卫生通过间	√	设缓冲间（一更和二更）
4*		人员出口处配备污染监测仪	√	缓冲间设置表面污染监测仪
5*		单独的放射性通风设施	√	回旋加速器机房、热室等均设置有独立通风系统。
6*		有负压和过滤的工作箱	√	放化室内设置8个热室，均为负压式，设有过滤装置。
7*		易去污的工作台面和放污染覆盖材料	√	台面采用不锈钢。
8*		放射性液体容易不易破损或有不易破损的套	√	采用塑料瓶收集废液。
9*		放射性下水系统或暂存设施	√	设置放射性废水暂存池。药物制备场所设置专用下水管线和地漏。
10		放射性下水系统标识	√	特殊下水和地漏粘贴警示文字。
11*		放射性同位素暂存库或者设施		放化室和回旋加速器机房设置废物桶，收集放射性废物和活化部件。
12*		放射性固体废物暂存设施		核医学科设废物库。药物制备场所设废物桶。
13		安保设施	√	放化室和回旋加速器机房设置闭路监视系统。
14*	B 监测设备	便携式监测仪器仪表（污染、辐射水平等）	√	配置1台表面污染监测仪和1台X-γ剂量率检测仪
15*		个人剂量计	√	所有工作人员配备TLD个人剂量计
16		个人剂量报警仪	--	-
17	C 防护用品	防护手套、口罩等个人防护用品	√	配备一次性医用口罩和手套

18		工作服	√	配备洁净工作服。
19	D 放射性废物和废液	去污用品和试剂	√	配备洗涤灵等去污用品。
20		灭火器材	√	干粉灭火器

10.1.9 核素发生器使用场所辐射安全与防护措施

（一）放射性核素发生器使用场所位于回旋加速器放化室。核素发生器放置于专用的合成热室（正面 $\geq 70\text{mmPb}$ 铅当量，其余五面屏蔽 $\geq 60\text{mmPb}$ ）内，确保热室周围 30cm 处辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

（二）电离辐射与中文警示说明：在放置核素发生器的合成热室正面显著位置设置电离辐射警告标志和中文警示说明；

（三）场所分区管理纳入回旋加速器场所一并管理。人流和物流通道设置与回旋加速器场所一致。工作人员通过缓冲间进入放化室，在缓冲间更换工作服。

（四）在缓冲间内安装或摆放表面污染监测仪器，供工作人员离开工作场所前进行表面污染监测。在卫生通过间准备去污用品和洗消试剂，一旦发现放射性污染，及时去污。

（五）专用的合成热室与其它 5 个合成热室一并使用 1 套独立的排风系统，通风风量应该满足要求（半开情况下，风速大于 1m/s ）。

（六）发生器专业热室操作台面为不锈钢材质，便于去污。

（七）与核医学科共用一套放射性废水衰变罐，放射性废水由核医学科统一处置。

（八）在放化室设置放射性固体废物暂存箱，暂存废旧发生器和其它放射性废物。废物桶材料铅板，屏蔽厚度大于 20mm 铅。

（九）放化室配备固定式剂量仪或者监测探头。表面污染和剂量率监测仪器和回旋加速器场所共用。

表 10-7 核素发生器使用场所辐射安全防护设施设计核查表

序号	检 查 项 目		设计	本项目情况
1*	A 场所 设施(生产、贮存与包装)	场所分区布局是否合理及有无相应标识	√	核素发生器在回旋加速器放化室内使用。回旋加速器场所分区管理，并设置相应标识。
2*		入口处有电离辐射标志	√	缓冲区入口处设置。
3*		卫生通过间（乙级以上）	√	放化室入口设置一更、二更和缓冲间。
4*		人员出口配备污染监测仪	√	缓冲间设置便携式表面污染仪。
5*		通风设施（流速、流向、过滤、	√	核素发生器放置在专用热室内，有专用通

		负压)		风系统, 设置高效过滤器, 负压和流量满足相关要求。
6*		防盗装置 (贮存场所)	√	放化室落实安保要求。
7*		发生器有辐射屏蔽	√	核素发生器在专用热室内使用, 正面 $\geq 70\text{mmPb}$ 铅当量, 其余 $\geq 60\text{mmPb}$ 屏蔽。
8*		操作位屏蔽防护设施	√	核素发生器在专用热室内使用, 正面 $\geq 70\text{mmPb}$ 铅当量, 其余 $\geq 60\text{mmPb}$ 屏蔽。
9*		放射性废液暂存设施	√	使用核医学科废水暂存罐。
10*		放射性固体废物暂存设施	√	放化室设置废物暂存罐, 贮存废旧发生器。
11*	B 检测设备	便携式辐射监测仪 (污染、辐射水平等)	√	剂量率仪和表面污染仪和回旋加速器场所共用。
12*		个人剂量计	√	全部操作人员配备。
13		个人剂量报警仪	√	放化室配置固定是剂量率仪, 不再配备个人剂量报警仪。
14*		活度计	√	配备专用活度计。
15	C 防护器材	个人防护用品	√	配备口罩、防护服等用品。
16		灭火器材	√	配备干粉灭火器。

10.2 “三废”的治理

医用电子直线加速器正常运行时, 无废靶产生。如果冷却水循环系统出现故障, 可能造成靶体散热不畅导致靶被打穿的情况, 产生废靶。此外, 加速器报废时, 会有废靶产生。对于更换下来的废靶和退役时拆卸下来的废靶, 将委托有能力单位检测, 如满足清洁解控要求, 按普通物品处理, 反之, 按放射性废物送往北京市城市放射性废物库暂存。

后装机使用过程中, 每年更换 2-3 次 Ir-192 放射源, 故本项目会产生废旧放射源。废旧放射源在倒装新源时从设备内导出, 直接装入放射源容器内, 直接返回供源厂家, 不在医院暂存。核医学科废旧 V 类密封源校验源, 送交北京市城市放射性废物库。

DSA 使用过程中, 不产生放射性“三废”。

回旋加速器使用过程中, 产生放射性“三废”。放射性废气为活化气体, 经通风系统的高效过滤器过滤后门诊部 D 区顶部高空排放。少量放射性废液排入放射性废水衰变池, 统一暂存和处置。放射性固体废物暂存在回旋加速器机房和放化室的废物桶内, 定期进行解控处置。

临床核医学场所、PET 药物合成场所以及药物实验场所同样产生放射性“三废”。放射性废气经通风系统和活性炭过滤后, 在门诊部 D 区楼顶排放。放射性废水排入放射性废水衰变池, 统一暂存和处置。放射性固体废物分类贮存于废物库内, 定期进行解控处置。

10.3 对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的满足情况

表 10-8 汇总列出了本项目对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中对生产、销售、使用放射性同位素和射线装置单位要求的对照评估情况。

表 10-8 与《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》符合情况

序号	《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》	项目单位情况	检查结果
1	应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	医院成立有辐射安全管理领导小组，全面负责医院的辐射防护监督和管理工作的，小组下设专职人员具体处理各项事务，具体情况见附件 2。	符合
2	从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。	医院制定了辐射工作人员培训计划。医院现有 253 名辐射工作人员通过了辐射安全与防护考核，持有合格证书。 本项目辐射工作人员配备计划见表 12-1，辐射工作人员将在通过辐射安全与防护考核后持证上岗。	能够符合
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	核医学科高活室内将设置药库，暂存 PET 设备的校验源。将依照公安部门地标要求落实安保措施。	能够符合
4	放射性同位素与射线装置使用场所所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	所有机房出入口显著位置处均设置放射性警告标识和中文警示说明，以及在防护门上方设置工作状态指示灯。设置急停按钮、门机联锁、清场按钮、剂量率报警或联锁、钥匙控制等，可防止误操作、防止工作人员和公众受意外照射。	能够符合
5	配备必要的防护用品和监测仪器。	将配备有相应的防护用品和辐射监测仪器。	能够符合
6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台帐管理制度、培训计划和监测方案。	已制定有较为齐全、比较严格的辐射防护规章制度，有人员辐射安全培训制度、各项操作规程、设备检修维护制度、辐射防护和安全保卫制度、台帐管理制度、环境监测及个人剂量监测制度、放射性废物管理制度、放射性事故应急预案。新场所投入使用前，将进一步完善人员岗位职责、	能够符合

		设备操作规程、设备维修和维护、辐射监测方案等制定。	
7	有辐射事故应急措施。	已制定有辐射事故应急处理预案。新场所投入使用前将进一步进行完善。	能够符合
8	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	废靶经检测后分类处置。后装机废旧放射源直接返回供源厂家。核医学科废旧校验源，送交北京市城市放射性废物库。 放射性废气经通风系统的过滤器过滤后门诊部D区顶部高空排放。放射性废水汇入衰变池暂存和处置。放射性固体废物暂存后定期进行解控处置。	能够符合

10.4 对比原环保部第 18 号令要求的满足情况

2011 年原环保部令第 18 号《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》对拟使用射线装置和放射性同位素的单位提出了具体条件，本项目具备的条件与“18 号令”要求的对照评估如表 10-9 所示。

表 10-9 安全和防护能力对照评估情况

安全和防护管理办法要求	单位情况	符合情况
第五条 射线装置的生产调试和使用场所，应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	所有机房出入口显著位置处均设置放射性警告标识和中文警示说明，以及在防护门上方设置工作状态指示灯。设置急停按钮、门机联锁、清场按钮、剂量率报警或联锁、钥匙控制等，可防止误操作、防止工作人员和公众受照意外照射。	能够符合
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。	医院已委托具有辐射水平监测能力单位每年对环境和场所周围的辐射水平进行一次监测。	符合
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	承诺每年 1 月 31 日前向北京市生态环境局提交年度评估报告。	符合

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。		
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。	医院 253 名辐射工作人员均经过了辐射安全与防护培训考核，并取得合格证书。 本项目辐射工作人员配备计划见表 12-1，辐射工作人员将在通过辐射安全与防护考核后持证上岗。	符合
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。	已为所有辐射工作人员配备了个人剂量计，并委托有资质单位进行个人剂量监测（每季度 1 次）。	符合

表 11 环境影响分析

11.1 建设阶段对环境的影响

对于本项目而言，将会在现有的大楼内进行室内施工活动，对室外环境和周围人群的影响较小，故不再进行详细评价。

11.2 四台医用电子直线加速器的环境影响**（一）加速器机房布局和所在位置**

本项目包含的 4 台医用电子加速器：2 台 6MV 加速器位于门诊部 D 区地下一层西侧，2 台 10MV 加速器位于门诊部 D 区地下二层西侧。4 台加速器机房上下垂直布置。

机房设计时，对 4 间机房的布置曾考虑了二种方案，优缺点比较如表 11-1 所示。

表 11-1 两种设计方案优缺点比较一览表

编号	方案名称	优点	缺点
方案（1）	4 个机房全部布置在地下二层	可共用屏蔽墙，节省屏蔽材料。	加速器机房顶部主束屏蔽层较厚，机房会越层布置，地上一层会突出 700mm，无法使用。
方案（2）	2 个机房布置在地下二层，2 个机房布置在地下一层	机房垂直布置，正好占用地下一层和地下二层的空间，节约空间，占地面积小。	地下一层主束朝向地下二层，顶部的屏蔽厚度相对较厚。

综合比较，医院选择第二种方案，这种方案节约用地面积，增加了地下一层和地下二层的使用面积。为了弥补“上层加速器照射下侧加速器室”的缺点，拟采取“地下一层布置低能（6MV）加速器，并适当增加上层加速器地板屏蔽厚度”的措施，将上层加速器对下层机房的附加剂量率水平降低至 $0.1\mu\text{Sv/h}$ 左右。

机房具体位置：（1）门诊部 D 区地下一层 2 间 6MV 加速器机房位于西侧，其东侧为放射科候诊区以及 CT、MRI 机房，南侧为空调机房，西侧是下沉庭院，北侧是放射科阅片室、放射科医生办公区、空调机房、DR、MRI 机房等，楼上为门诊药库，下面是 10MV 加速器机房。（2）门诊部 D 区地下二层 2 间 10MV 加速器机房也位于西侧，其东侧为 MRI 模拟机房及控制室、阅片会诊室等，南侧为空调机房，西侧为土层，北侧为检查更衣、淋浴间，楼上为 6MV 加速器机房，楼下为土层。加速器机房周围环境布局见附图 9 和附图 10 所示。

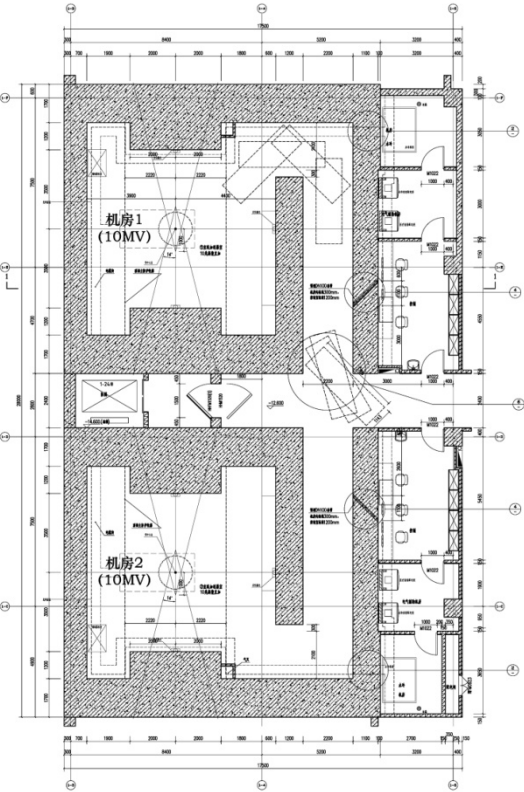
（二）机房屏蔽设计

加速器机房的主体结构采用容重不低于 2.35t/m^3 混凝土浇筑建造。其屏蔽设计方案见示意图 11-2、图 11-3，以及表 11-2 所示。

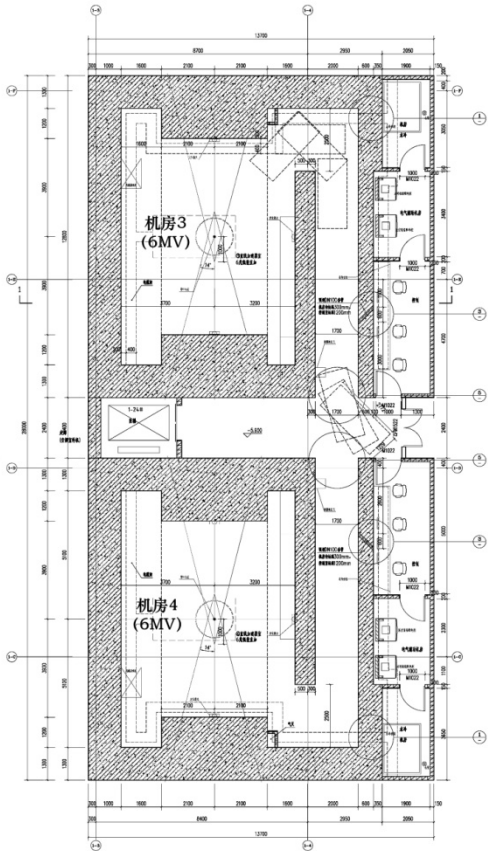
表 11-2 加速器机房屏蔽设计方案一览表

机房名称	位置	机房屏蔽
加速器机房 1 (地下二层北侧) 7.0m×8.3m×3.8 (不含迷道)	南侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.9m 砼, 内凸结构, 宽度 4.0m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.7m
	北侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.9m 砼, 内凸结构, 宽度 4.0m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.7m。
	东侧	1) 迷道内墙厚度: 1.2m 砼; 2) 迷道外墙厚度: 1.1m 砼 (水冷机房局部 1.2m 砼)。
	西侧	1.0m 普通混凝土。
	顶部	1) 主屏蔽墙厚度 2.86m 砼, 内凸结构, 宽度 4.44m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.66m 砼。
	底板	0.5m 普通混凝土。
	防护门	不低于 12cm 含硼 5%的聚乙烯以及 16mmPb 和 6mm 铁的复合防护门。
加速器机房 2 (地下二层南侧) 7.0m×8.3m×3.8 (不含迷道)	南侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.9m 砼, 内凸结构, 宽度 4.0m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.7m
	北侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.9m 砼, 内凸结构, 宽度 4.0m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.7m。
	东侧	1) 迷道内墙厚度: 1.2m 砼; 2) 迷道外墙厚度: 1.1m 砼 (水冷机房局部 1.2m 砼)。
	西侧	1.0m 普通混凝土。
	顶部	1) 主屏蔽墙厚度 2.86m 砼, 内凸结构, 宽度 4.44m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.66m 砼。
	底板	0.5m 普通混凝土。
	防护门	采用不低于 12cm 含硼 5%的聚乙烯以及 16mmPb 和 6mm 铁的复合防护门。
加速器机房 3 (地下一层北侧) 7.8m×6.9m×3.7 (不含迷道)	南侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.5m 砼, 内凸结构, 宽度 4.2m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.3m
	北侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.5m 砼, 内凸结构, 宽度 4.2m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.3m。
	东侧	1) 迷道内墙厚度: 0.8m 砼; 2) 迷道外墙厚度: 0.6m 砼 (水冷机房局部 0.95m 砼)。
	西侧	1.3m 普通混凝土。
	顶部	1) 主屏蔽墙厚度 2.5m 砼, 内凸结构, 宽度 4.2m; 2) 次屏蔽墙厚度 1.3m 砼。

加速器机房 4 (地下一层南侧) 7.8m×6.9m×3.7 (不含迷道)	底板	1) 主屏蔽墙厚度 2.86m 砼，外凸结构，宽度 4.44m； 2) 次屏蔽墙厚度 1.66m 砼。
	防护门	采用不低于 16mmPb 和 6mm 铁的复合防护门。
	南侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.5m 砼，内凸结构，宽度 4.2m； 2) 次屏蔽墙厚度 1.3m
	北侧	1) 主屏蔽墙厚度 2.5m 砼，内凸结构，宽度 4.2m； 2) 次屏蔽墙厚度 1.3m。
	东侧	1) 迷道内墙厚度：0.8m 砼； 2) 迷道外墙厚度：0.6m 砼（水冷机房局部 0.95m 砼）。
	西侧	1.3m 普通混凝土。
	顶部	1) 主屏蔽墙厚度 2.5m 砼，内凸结构，宽度 4.2m； 2) 次屏蔽墙厚度 1.3m 砼。
	底板	1) 主屏蔽墙厚度 2.86m 砼，外凸结构，宽度 4.44m； 2) 次屏蔽墙厚度 1.66m 砼。
	防护门	采用不低于 16mmPb 和 6mm 铁的复合防护门。



(1)地下二层



(1)地下一层

图 11-1 4 间加速器平面布局示意图

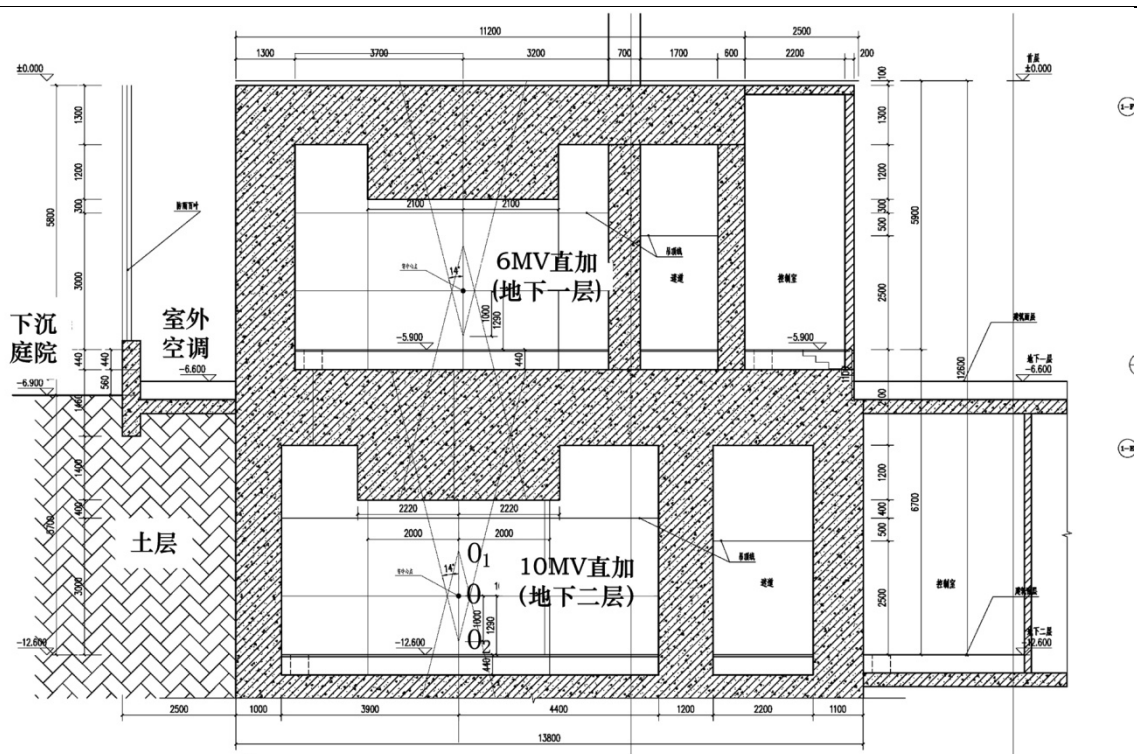


图 11-2 加速器机房剖面布局示意图

(三) 设备参数和使用规划

(1) 设备技术参数

拟使用的 4 台电子直线加速器技术指标如表 11-3 所示。

表 11-3 拟使用的 4 台直线加速器技术指标一览表

编号	厂家和型号	电子线能量 (MeV)	X 线能量和最大输出剂量率	SSD	照射野	机架旋转范围	泄漏率
1	型号待定	最大能量: 20MeV; 1000cGy/min	6MV: 600cGy/min; 10MV: 2400 cGy/min	100cm	最大照射野 40cm×40cm; 等中心点高度 1.3m	360°, 顺时针和逆时针方向	X 线: ≤0.1%
2	型号待定	最大能量: 20MeV; 1000cGy/min	6MV: 600cGy/min; 10MV: 2400 cGy/min	100cm	最大照射野 40cm×40cm; 等中心点高度 1.3m	360°, 顺时针和逆时针方向	X 线: ≤0.1%
3	型号待定	最大能量: 20MeV; 1000cGy/min	6MV: 600cGy/min	100cm	最大照射野 40cm×40cm; 等中心点高度 1.3m	360°, 顺时针和逆时针方向	X 线: ≤0.1%
4	型号待定	最大能量: 20MeV; 1000cGy/min	6MV: 600cGy/min	100cm	最大照射野 40cm×40cm; 等中心点高度 1.3m	360°, 顺时针和逆时针方向	X 线: ≤0.1%

(2) 使用规划

1) 出束时间：考虑到北大第一医院就医患者较多，故按最大工作负荷 120 人次/台/天进行评价。2Gy/人次，加速器日治疗出束时间 240min，年工作 250d，总出束时间约 1000h。

2) 利用因子：机头 90°、270°和 180°出束时间各占年工作量的 15%，保守按 25% 计算；机头向下(0°)出束时间占年工作量的 55%。

3) 不同能量使用因子：加速器 1 和加速器 2，6MV 的 X 线治疗的患者占比 95%，10MV 治疗的患者占比 5%。10MV 治疗中 60%患者为调强治疗，40%患者为常规治疗。

(四) 辐射环境影响评价

4 台高能直线加速器的能量均不大于 10MV，无需考虑中子、感生放射性以及中子活化的辐射影响问题。

地下一层的 2 台加速器技术指标相同，机房屏蔽设计相同。同样，地下二层的 2 台加速器技术指标和屏蔽设计也相同，故分别以加速器 1 和加速器 3 为例进行评价。

(1) 加速器机房周围辐射水平的估算

加速器周围的辐射水平采用 NCRP 151 号报告“MV 水平 X 射线和 γ 射线治疗设备的屏蔽设计和评价”推荐的估算模式进行计算。具体做法：依据屏蔽参数估算模式，以等中心点的剂量率替代周工作负荷，转化为辐射剂量率水平估算模式，最终导出机房周围附加辐射水平。然后根据加速器出束时间、机头利用因子、人员居留因子，估算出职业人员和公众的受照剂量。

1. X 射线

1) 主束贯穿辐射对机房周围环境的剂量率贡献

主屏蔽墙的衰减系数 B_{pri} ，由公式 (11-1) 求出：

$$B_{pri} = (10^{-1})^{10 \left[\frac{(H-TVL_1)}{TVL_e} \right]} = 10^{-\left\{ 1 + \left[\frac{(H-TVL_1)}{TVL_e} \right] \right\}} \quad (11-1)$$

主束对相应关注点位的剂量率贡献 H_{pri} ，依据公式 (11-2) 进行估算：

$$H_{pri} = B_{pri} \cdot D_0 \cdot (1+d)^{-2} \quad (11-2)$$

式中， H 为主屏蔽墙的厚度，cm； TVL_1 为主束对混凝土的第一个十分之一值层， TVL_e 为主束对混凝土的平均十分之一值层，cm，具体数据见表 11-4； d 为等中心点至关注点的距离，m。 D_0 为等中心处 X 射线的吸收剂量率，本报告所评价加速器等中心处 X 射线的治疗剂量率取 $2400 \text{ cGy} \cdot \text{min}^{-1}$ (10MV) 和 $600 \text{ cGy} \cdot \text{min}^{-1}$ (6MV)。

表 11-4 普通混凝土对 6MV/10MV X 射线束的 TVL

TVL 类型	TVL 值 (cm)			
	主束		泄漏辐射	
	6MV	10MV	6MV	10MV
TVL_1	37	41	34	35
TVL_e	33	37	29	31

2) 泄漏射线对机房周围环境的剂量率贡献

泄漏射线的衰减系数 B_L ，由公式 (11-3) 求出：

$$B_L = 10^{-\{1 + [\frac{(h/\cos\theta - TVL_1^L)}{TVL_e^L}]\}} \quad (11-3)$$

泄漏射线对相应关注点位的剂量率贡献 H_L ，依据公式 (11-4) 进行估算：

$$H_L = B_L \cdot L_f \cdot D_0 \cdot (d)^{-2} \quad (11-4)$$

式中， h 为屏蔽墙的厚度，cm； θ 为射线对屏蔽墙的入射角； TVL_1^L 为泄漏射线对混凝土的第一个十分之一值层， TVL_e^L 为泄漏射线对混凝土的平均十分之一值层，cm，具体数据见表 11-4； L_f 为主束的泄漏率，保守取 0.1%。符号 D_0 和 d 代表的意义同前文。

3) 病人散射线对机房周围环境的剂量率贡献

病人散射线的衰减系数 B_{ps} ，由公式 (11-5) 求出：

$$B_{ps} = 10^{-\left(\frac{h/\cos\theta}{TVL_{sca}}\right)} \quad (11-5)$$

病人散射线对相应关注点位的剂量率贡献 H_{sca} ，依据公式(11-6)进行估算：

$$H_{sca} = B_{ps} \cdot \alpha \cdot F \cdot D_0 \cdot (d)^{-2} \cdot (d_{sca})^{-2} \cdot (400)^{-1} \quad (11-6)$$

式中， TVL_{sca} 为病人散射线对混凝土的十分之一值层，cm，具体数据见表 11-5； α 为以不同角度散射时的散射系数； F 为病人治疗位置的射野面积， cm^2 ，保守取 40×40 ； d_{sca} 为靶点至病人的距离，m，取值为 1；400 是以射野面积 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 为标准进行标准化的散射系数。 h 、 θ 、 D_0 和 d 代表的意义同前文。

表 11-5 普通混凝土对病人散射线以不同角度散射所致的 TVLsca

工况	TVLsca (cm)					
	散射角度					
	15°	30°	45°	60°	90°	135°
6MV	34	26	23	21	17	15
10 MV	39	28	25	22	18	15

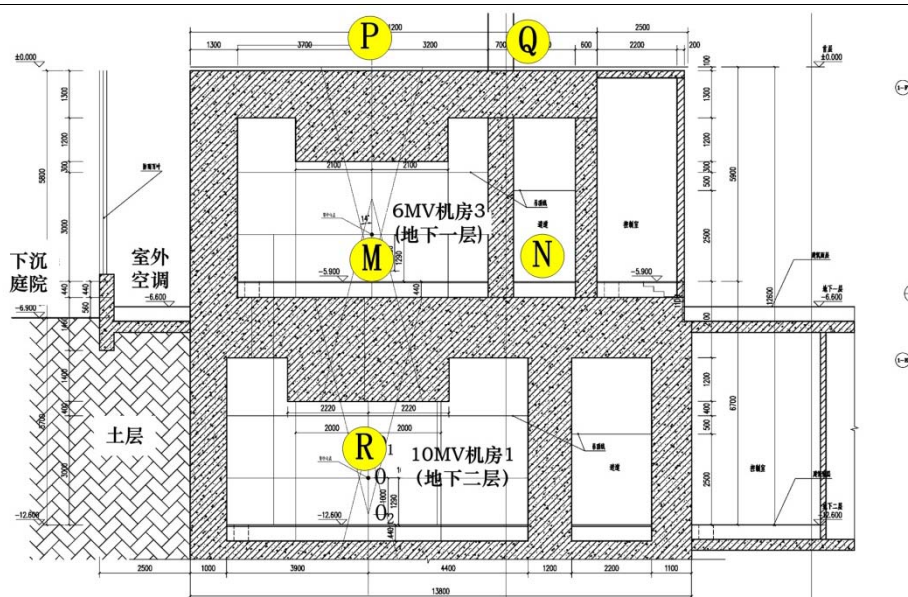


图 11-4 加速器 3 机房顶部辐射剂量估算点示意图

表 11-6 地下一层 6MV 加速器 3 所致机房周围环境附加剂量率水平

位置描述 (点位见图 11-3 和 11-4)	距离 (m)	混凝土厚度 (m)	主要 射线束	衰减系数	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
A 医护通道	6.4	2.5m 砼	主束	3.51E-08	2.38E-01
B 医梯	7.3	1.3	泄漏 (30°斜射)	9.91E-06	6.70E-02
C 水冷机房	8.4	0.95	泄漏 (30°斜射)	2.45E-04	1.25E+00
D 辅助机房、控 制室	6.3	1.4	泄漏	2.21E-05	2.01E-01
E 南侧通道	7.3	1.3	泄漏 (30°斜射)	9.91E-06	6.70E-02
F 防护门外	7.9	0.8	泄漏 (45°斜射)	1.87E-04	1.08E-00
G 电梯厅	6.4	2.5m 砼	主束	3.51E-08	2.38E-01
H 电梯厅	7.3	1.3	泄漏 (30°斜射)	9.91E-06	6.70E-02
I 浴室	7.3	1.3	泄漏 (30°斜射)	9.91E-06	6.70E-02
P 门诊药库	4.5	2.5m 砼	主束	3.51E-08	4.31E-01
Q 楼上地面 30cm 处	6.5	1.3 砼	泄漏 (45°斜射)	6.81E-07	5.80E-03
R 地下二层加速 器机房 1 地上 150cm 处	6.4	2.9m 砼	主束	2.15E-09	1.42E-02

根据表 11-6 的估算结果可知，地下一层加速器 3 以 6MV (600cGy/min) 工况开展放疗工作时，其机房墙外 30cm 处最大附加剂量率为 1.25 $\mu\text{Sv/h}$ (水冷机房)，顶部 (门

诊药库) 最大附加剂量率为 $0.43\mu\text{Sv/h}$, 加速器控制室内的附加剂量率为 $0.201\mu\text{Sv/h}$, 室外地面 30cm 处的最大附加剂量率为 $5.80\text{E-}03\mu\text{Sv/h}$, 均满足本报告设定的剂量率控制水平 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

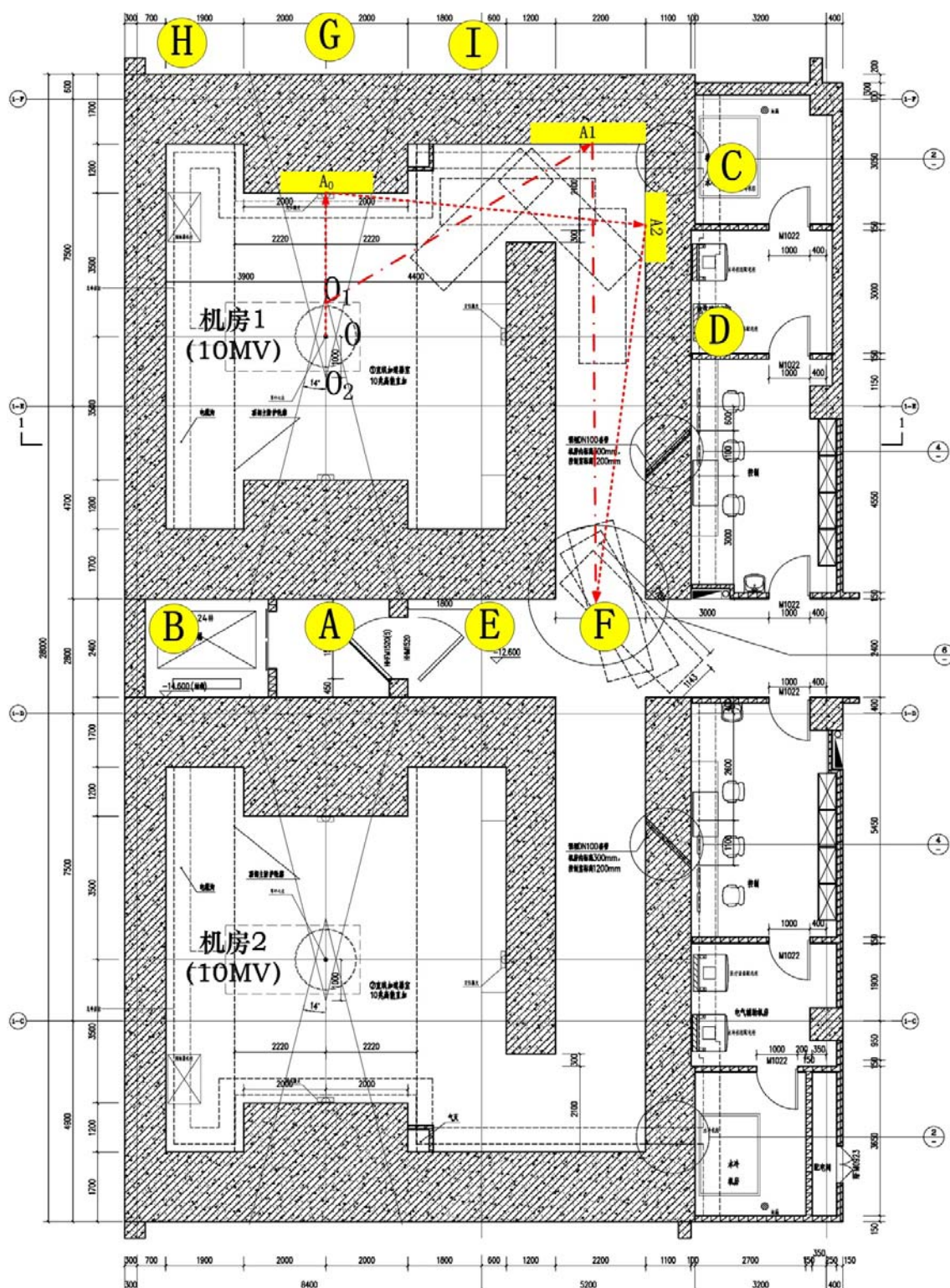


图 11-5 地下二层 10MV 加速器机房四周辐射剂量估算点示意图

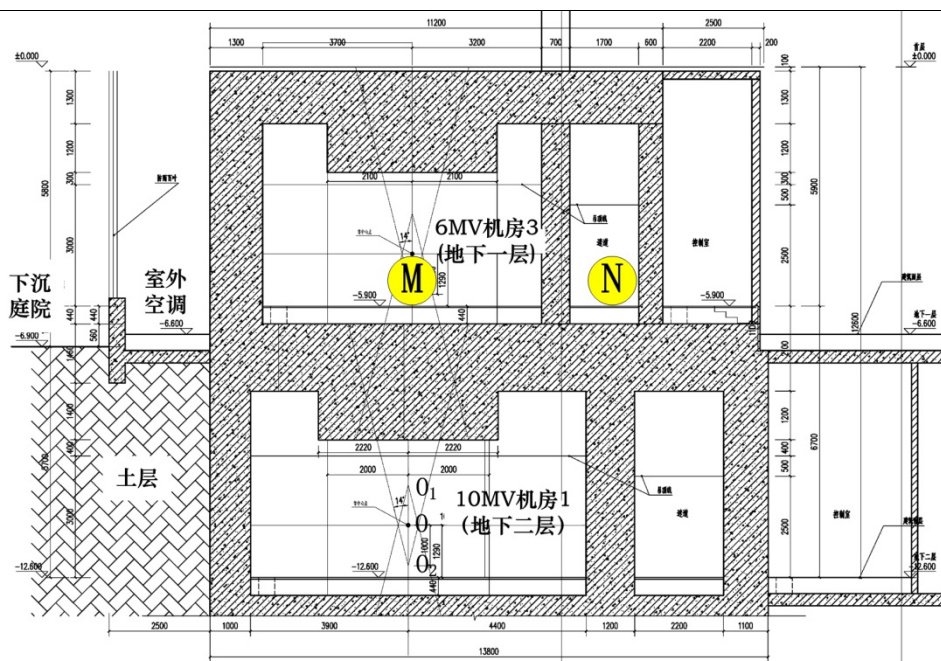


图 11-6 加速器 1 机房顶部辐射剂量估算点示意图

表 11-7 地下二层 10MV 加速器所致机房周围环境附加剂量率水平

位置描述 (点位见图 11-5 和 11-6)	距离 (m)	混凝土厚度 (m)	主要 射线束	衰减系数	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
A 医护通道	6.4	2.9m 砼	主束	6MV: $2.15\text{E-}09$ 10MV: $1.86\text{E-}08$	6MV: $1.46\text{E-}02$ 10MV: $5.05\text{E-}01$
B 医梯	7.3	1.7	泄漏 (30° 斜射)	6MV: $2.53\text{E-}07$ 10MV: $6.26\text{E-}07$	6MV: $1.71\text{E-}03$ 10MV: $1.69\text{E-}02$
C 水冷机房	9.5	1.2	泄漏 (30° 斜射)	6MV: $2.48\text{E-}05$ 10MV: $4.56\text{E-}05$	6MV: $9.89\text{E-}02$ 10MV: $7.28\text{E-}01$
D 辅助机房、控 制室	8.9	2.3	泄漏	6MV: $1.74\text{E-}08$ 10MV: $5.12\text{E-}08$	6MV: $7.92\text{E-}05$ 10MV: $9.32\text{E-}04$
E 南侧通道	7.3	1.7	泄漏 (30° 斜射)	6MV: $2.53\text{E-}07$ 10MV: $6.26\text{E-}07$	6MV: $1.71\text{E-}03$ 10MV: $1.69\text{E-}02$
F 防护门外	9.3	1.2	泄漏 (45° 斜射)	6MV: $2.09\text{E-}06$ 10MV: $4.51\text{E-}06$	6MV: $8.71\text{E-}03$ 10MV: $7.52\text{E-}02$
G 电梯厅	6.4	2.9m 砼	主束	6MV: $2.15\text{E-}09$ 10MV: $1.86\text{E-}08$	6MV: $1.46\text{E-}02$ 10MV: $5.05\text{E-}01$
H 电梯厅	7.3	1.7	泄漏 (30° 斜射)	6MV: $2.53\text{E-}07$ 10MV: $6.26\text{E-}07$	6MV: $1.71\text{E-}03$ 10MV: $1.69\text{E-}02$
I 浴室	7.3	1.7	泄漏 (30° 斜射)	6MV: $2.53\text{E-}07$ 10MV: $6.26\text{E-}07$	6MV: $1.71\text{E-}03$ 10MV: $1.69\text{E-}02$
M 地下一层加速 器 3 地面 30cm 处	5.8	2.86m 砼	主束	6MV: $2.85\text{E-}09$ 10MV: $2.39\text{E-}08$	6MV: $8.87\text{E-}02$ 10MV: $7.44\text{E-}01$
N 地下一层加速 器 3 地面 30cm 处	8.0	1.66 砼	泄漏 (45° 斜射)	6MV: $1.19\text{E-}08$ 10MV: $3.60\text{E-}08$	6MV: $8.96\text{E-}05$ 10MV: $8.10\text{E-}04$

根据表 11-7 的估算结果可知，地下二层加速器 1 以 6MV（600cGy/min）或 10MV（2400cGy/min）工况开展放疗工作，其机房墙外 30cm 处最大附加剂量率在顶部为 0.744μSv/h（加速器 3 室机房地面），北侧电梯厅、南侧医用通道等处的最大附加剂量率为 0.505μSv/h，均满足本报告设定的剂量率控制水平 2.5μSv/h。加速器控制室内的附加剂量率为 9.32E-04μSv/h，维持在正常本底水平。

4) 迷道口辐射水平的估算

加速器以 6MV 或 10MV 运行时，迷道口的辐射水平主要考虑：①主束经屏蔽墙 2 次散射所致的剂量率贡献， H_s ；②机头泄漏射线经屏蔽墙 1 次散射所致的剂量率贡献， H_{LS} ；③主束经病人 1 次和屏蔽墙 1 次散射所致的剂量率贡献， H_{PS} ；④泄漏射线贯穿迷道内墙所致的剂量率贡献， H_{LT} 。

①主束经屏蔽墙 2 次散射所致的剂量率贡献

对迷道口有剂量率贡献的上述四种主要成分的散射路径示意图见图 11-5。

$$H_s = \frac{D_0 \alpha_0 A_0 \alpha_2 A_2}{(d_{0W} d_{WX} d_{XZ})^2} \quad (11-7)$$

式中， D_0 代表的意义同前文； α_0 为屏蔽墙对主束第一次散射系数； α_2 为屏蔽墙对主束第二次散射系数； A_0 为第一次散射区面积， m^2 ； A_2 为第二次散射区面积，其值为从第一散射区域观察“迷道内口”投影到迷道外墙的截面积， m^2 ； d_{0W} 为靶点至第一散射面中心点 W 的距离，m； d_{WX} 为第一散射面中心点 W 与经迷道内墙边缘到迷道中心线交点 X 的距离，m； d_{XZ} 为点 X 至迷道外口中心点 Z 的距离，m。

加速器 1：

$$H_s(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(2.7 \times 10^{-3})(7.7)(18 \times 10^{-3})(5.8)}{(3.5)^2 (7.84)^2 (9.3)^2} = 12.0 \mu\text{Sv/h}$$

$$H_s(10MV) = \frac{(1440 \times 10^6)(2.1 \times 10^{-3})(7.7)(18.0 \times 10^{-3})(5.8)}{(3.5)^2 (7.84)^2 (9.3)^2} = 37.33 \mu\text{Sv/h}$$

加速器 3：

$$H_s(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(2.7 \times 10^{-3})(8.4)(18 \times 10^{-3})(6.4)}{(3.9)^2 (5.8)^2 (9.6)^2} = 19.95 \mu\text{Sv/h}$$

② 机头泄漏射线经屏蔽墙 1 次散射对迷道口的剂量率贡献

如图 11-5 所示，泄漏射线经屏蔽墙 1 次散射后可以到达迷道口，其散射路径为机头 $O \rightarrow P \rightarrow Z$ 。泄漏辐射经屏蔽墙 1 次散射对迷道口的剂量率贡献估算模式（11-8）：

$$H_{LS} = \frac{D_0 L_f \alpha_1 A_1}{(d_{op} d_{pz})^2} \quad (11-8)$$

式中, α_1 为屏蔽墙对泄漏射线的散射系数; A_1 为泄漏辐射 1 次散射区面积, 其值为从迷道口处向机房内可观察到的对面屏蔽墙的截面积, m^2 ; d_{op} 为等中心点经迷道内墙边缘与迷道中心线的交点 P 的距离, m; d_{pz} 为点 P 至迷道口 Z 的距离, m。

加速器 1:

$$H_{LS}(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(10^{-3})(9.0)(6.4 \times 10^{-3})}{(7.6)^2(11.2)^2} = 2.86 \mu Sv/h$$

$$H_{LS}(10MV) = \frac{(1440 \times 10^6)(10^{-3})(9.0)(5.1 \times 10^{-3})}{(7.6)^2(11.2)^2} = 9.12 \mu Sv/h$$

加速器 3:

$$H_{LS}(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(10^{-3})(7.1)(6.4 \times 10^{-3})}{(6.25)^2(11.4)^2} = 3.22 \mu Sv/h$$

③ 主束经病人和屏蔽墙各 1 次散射对迷道口的剂量率贡献

如图 11-5 所示, 主束经病人后再经墙壁 1 次散射后可以到达迷道口, 其散射路径为 $O_1 \rightarrow O \rightarrow P \rightarrow Z$ 。主束经病人后再经墙壁 1 次散射对迷道口的剂量率估算模式(11-9):

$$H_{PS} = \frac{D_0 \alpha(\theta) \left(\frac{F}{400} \right) \alpha_1 A_1}{(d_{sca} d_{op} d_{pz})^2} \quad (11-9)$$

式中, D_0 、 F 、 A_1 和 d_{op} 、 d_{pz} 代表的意义同前文 d_{sca} 为靶点至病人的距离, m, 取值为 1; $\alpha(\theta)$ 为病人散射线以散射角 θ 进行散射时的散射因子; α_1 为墙壁对病人散射线的散射系数, 与 α_0 和 α_2 代表的意义完全相同。

加速器 1:

$$H_{ps}(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(8.24 \times 10^{-4}) \left(\frac{40 \times 40}{400} \right) (22 \times 10^{-3})(9.0)}{(1)^2 (7.6)^2 (11.2)^2} = 32.43 \mu Sv/h$$

$$H_{ps}(10MV) = \frac{(1440 \times 10^6)(7.46 \times 10^{-4}) \left(\frac{40 \times 40}{400} \right) (22 \times 10^{-3})(9.0)}{(1)^2 (7.6)^2 (11.2)^2} = 117.43 \mu Sv/h$$

加速器 3:

$$H_{ps}(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(8.24 \times 10^{-4}) \left(\frac{40 \times 40}{400} \right) (22 \times 10^{-3})(7.1)}{(1)^2 (6.25)^2 (11.4)^2} = 36.51 \mu\text{Sv/h}$$

④ 泄漏射线贯穿迷道内墙对迷道口的剂量率贡献

机头泄漏射线直接贯穿迷道内墙后可以到达迷道口，其辐射路径为等中心点 $O \rightarrow Z$ 。机头泄漏射线直接贯穿迷道内墙后对迷道口的剂量率估算模式（11-10）：

$$H_{LT} = \frac{D_0 L_f B_L}{d_L^2} \quad (11-10)$$

由公式（13）求出泄漏射线的衰减系数 B_L 。式中符号 d_L 为等中心点 O 到迷道口 Z 的距离(d_{OZ})，m； D_0 和 L_f ，代表的意义同前文。

加速器 1：

$$B_L(6MV) = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{120/\cos 45^\circ - 34}{29} \right] \right\}} = 2.09 \times 10^{-6}$$

$$B_L(10MV) = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{120/\cos 45^\circ - 35}{31} \right] \right\}} = 4.51 \times 10^{-6}$$

加速器 3：

$$B_L(6MV) = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{80/\cos 45^\circ - 34}{29} \right] \right\}} = 1.87 \times 10^{-5}$$

加速器 1：

$$H_{LT}(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(10^{-3})(2.09 \times 10^{-6})}{(9.1)^2} = 9.09 \text{E-}03 \mu\text{Sv/h}$$

$$H_{LT}(10MV) = \frac{(1440 \times 10^6)(10^{-3})(4.51 \times 10^{-6})}{(9.1)^2} = 7.85 \text{E-}02 \mu\text{Sv/h}$$

加速器 3：

$$H_{LT}(6MV) = \frac{(360 \times 10^6)(10^{-3})(1.87 \times 10^{-5})}{(7.95)^2} = 1.06 \text{E+}0 \mu\text{Sv/h}$$

⑤ 迷道防护门内 Z 点的剂量率水平

地下一层 6MV 加速器和地下二层 10MV 加速器机房迷道口的剂量率水平如表 11-8 所示。

表 11-8 迷道口剂量率水平 ($\mu\text{Sv/h}$)

编号	剂量来源	加速器 1		加速器 3
		6MV 运行	10MV 运行	6MV 运行
1	主束经 2 次散射	12	37.33	19.95

2	泄漏辐射 1 次散射	2.86	9.12	3.22
3	主束经病人和墙壁散射	32.43	117.43	36.51
4	泄漏辐射直接透射	9.09E-03	7.85E-02	1.06E-00
	合计	47.3	163.96	60.74

⑥ 迷道防护门外 F 点的剂量率水平

泄漏散射和病人散射后的 X 射线较低，约为 0.5MeV，在 Pb 中的 TVL 为 3-6mm，本项目保守取 6mm。

加速器机房防护门采用 16mmPb 和 6mm 铁的复合防护门。

加速器 1 的 X-γ 射线附加剂量率为：

$$6\text{MV}: (12+2.86+32.43+9.09\text{E}-03) \times 10^{-(16/6)} = 1.02\text{E}-01 \mu\text{Sv/h}.$$

$$10\text{MV}: (37.33+9.12+117.43+7.85\text{E}-02) \times 10^{-(16/6)} = 3.53\text{E}-01 \mu\text{Sv/h}$$

加速器 3 的 X-γ 射线附加剂量率为：

$$6\text{MV}: (19.95+3.22+36.51+1.06\text{E}-0) \times 10^{-(16/6)} = 1.31\text{E}-01 \mu\text{Sv/h}.$$

可见，加速器 1 和加速器 3 机房防护门外的辐射附加剂量率均低于 2.5μSv/h 的剂量率控制水平。

(2) 主束屏蔽墙宽度分析

《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》(GBZ/T201.1-2007)第 4.3.3 条款给出了主束屏蔽层宽度的计算方法，有用束在机房屏蔽墙的投影区宽度的计算见公式 (11-11)。

$$Y_p = 2[(a + SAD) \tan \theta + 0.3] \quad (11-11)$$

式中：Y_p—机房有用束主屏蔽区的宽度，m；SSD—等中心距靶点距离，1m；θ—治疗束的最大半张角（相对束中的轴线），本项目为 14°；a—等中心点至与主屏蔽墙相连接的次屏蔽墙内表面或到外凸式主屏蔽墙外表面顶部的距离，m。见图 11-7 所示。

地下二层加速器 1 机房以北墙主屏蔽墙为例估算主束屏蔽层的最小宽度。根据设计资料，加速器 1 的等中心点到北侧与主屏蔽墙相连接的次屏蔽墙的垂直最大距离分别为 4.7m，等中心到机房顶部与主屏蔽墙相连接的次屏蔽墙的垂直距离为分别为 3.3m。有用射线束张角为 28°，据此计算主屏蔽墙的半宽度要求不少于 [(5.74+1.0)tan14°+0.3]=1.98m。本项目加速器 1 机房主屏蔽墙半宽度为 2.22m，满足屏蔽主束的要求。

地下一层加速器 3 机房也以北墙主屏蔽墙为例估算主束屏蔽层的最小宽度。根据设计资料，加速器 3 的等中心点到北侧与主屏蔽墙相连接的次屏蔽墙的垂直最大距离为

5.1m，等中心到机房顶部与主屏蔽墙相连接的次屏蔽墙的垂直距离为分别为 3.2m。有用射线束张角为 28°，据此计算主屏蔽墙的半宽度要求不少于 $[(6.02+1.0)\tan14^{\circ}+0.3]=2.05\text{m}$ 。本项目加速器 3 机房主屏蔽墙半宽度为 2.1m，满足屏蔽主束的要求。

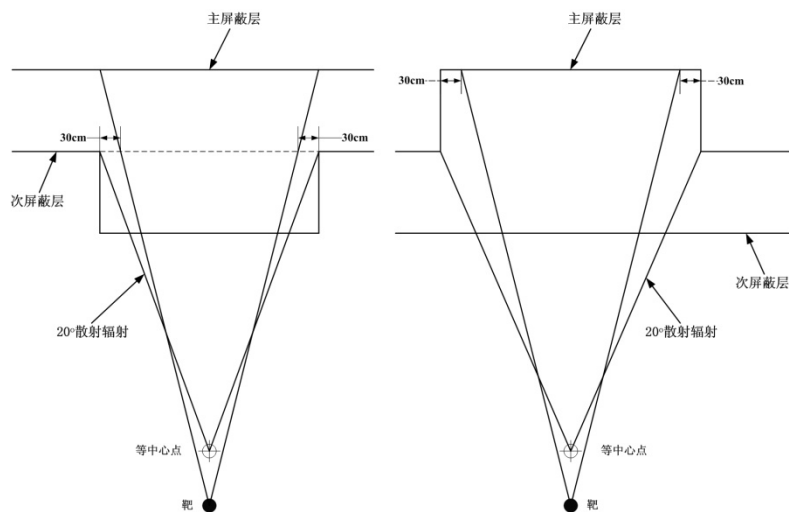


图 11-7 主束屏蔽宽度要求示意图

(3) 工作人员和公众附加受照剂量估算

根据放射治疗工作流程和设备运行产生电离辐射的情况分析，工作人员受到的辐射照射来自控制室内及防护门外受到贯穿屏蔽墙的 X 射线外照射。

1. 辐射工作人员

保守假设加速器控制室内操作由一组工作人员承担。加速器 1 和加速器 3 治疗室工作人员受照情况估算结果见表 11-9。

表 11-9 加速器运行时机房外围工作人员年受照剂量估算

位 置		6MV 运行		10MV 运行		居留因子	利用因子	年受照剂量 (μSv)	合 计
		剂量率 (μSv/h)	出束时间 (h/a)	剂量率 (μSv/h)	出束时间 (h/a)				
加速器 1 (10MV)	控制室	7.92E-05	950	9.32E-04	50	1	1	0.1	2.71μSv
	防护门旁	7.1E-03	950	6.13E-02	50	1/16	1	0.6	
	机房内摆位	1.46E-02	1000	/	/	1/4	55%	2.01	
加速器 3 (6MV)	控制室	2.01E-01	1000	/	/	1		201	0.27mSv
	防护门旁	9.76E-01	1000	/	/	1/16		61	
	机房内摆位	2.22E-02	950	7.68E-01	50	1/4	25%	3.72	

综合考虑，加速器 1 治疗室工作人员年受照剂量为 $2.71\mu\text{Sv/a}$ ，加速器 3 治疗室工作人员受照剂量将不超过 0.27mSv/a ，均低于 2mSv/a 的剂量约束值。

2. 周围公众

在加速器机房门口处、南侧楼道内以及楼上地面停留的公众可能受到来自加速器的辐射照射。周围公众外照射受照情况估算结果见表 11-10a 和表 11-10b。

表 11-10a 地下二层加速器 1 周围公众外照射受照情况估算结果

位 置	6MV 运行		10MV 运行		居留因子	利用因子	年受照剂量 (μSv)
	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	出束时间 (h/a)	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	出束时间 (h/a)			
A 医护通道 (主束区)	$1.46\text{E-}02$	50	$5.05\text{E-}01$	950	1/16	25%	7.5
B 医梯 (非主束区)	$1.71\text{E-}03$	50	$1.69\text{E-}02$	950	1/16	1	1.01
C 水冷机房 (非主束区)	$9.89\text{E-}02$	50	$7.28\text{E-}01$	950	1/16	1	43.5
E 南侧通道 (非主束区)	$1.71\text{E-}03$	50	$1.69\text{E-}02$	950	1/16	1	1.01
G 电梯厅 (主束区)	$1.46\text{E-}02$	50	$5.05\text{E-}01$	950	1/16	25%	7.51
H 电梯厅 (非主束区)	$1.71\text{E-}03$	50	$1.69\text{E-}02$	950	1/16	1	1.01
I 浴室 (非主束区)	$1.71\text{E-}03$	50	$1.69\text{E-}02$	950	1/16	1	1.01
N 地下一层地 面 30cm 处 (非主束区)	$8.96\text{E-}05$	50	$8.10\text{E-}04$	950	1/16	1	0.048

由表 11-10a 可见，地下二层加速器 1 所致机房周围停留公众的年附加最大受照剂量 $43.5\mu\text{Sv}$ (水冷机房内停留)，顶部（地下一层）停留其他医护人员年附加受照剂量低于 $0.037\mu\text{Sv}$ ，周围任何位置停留人员的受照剂量均低于设定的 $100\mu\text{Sv/a}$ 剂量约束值。

表 11-10b 地下一层加速器 3 周围公众外照射受照情况估算结果

位 置	6MV 运行		居留因子	利用因子	年受照剂量 (μSv)
	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	出束时间 (h/a)			
A 医护通道(主束区)	$2.38\text{E-}01$	1000	1/4	25%	3.72
B 医梯（非主束区）	$6.70\text{E-}02$	1000	1/16	1	4.19
C 水冷机房(非主束区)	$1.57\text{E-}00$	1000	1/16	25%	24.5
E 南侧通道（非主束区）	$6.70\text{E-}02$	1000	1/16	1	4.19
G 电梯厅（主束区）	$2.38\text{E-}01$	1000	1/16	25%	3.72
H 电梯厅（非主束区）	$6.70\text{E-}02$	1000	1/16	1	4.19
I 浴室（非主束区）	$6.70\text{E-}02$	1000	1/16	1	4.19
P 门诊药库（主束区）	$4.31\text{E-}01$	1000	1/4	25%	26.9
Q 楼上地面 30cm 处 (非主束区)	$5.80\text{E-}03$	1000	1/16	1	0.36

由表 11-10b 可见，地下一层加速器 3 所致机房周围停留公众的年附加最大受照剂

量 24.5 μ Sv(水冷机房内停留)，加速器顶部地面停留公众年附加受照剂量低于 0.91 μ Sv，周围任何位置停留人员的受照剂量均低于设定的 100 μ Sv/a 剂量约束值。加速器周围 50m 评价范围内其它公众的受照剂量低于 7.7 μ Sv，满足剂量约束要求。

考虑 4 台加速器的叠加效应，北大第一医院南院区门诊部 D 区周围地面停留的公众因加速器所致的年受照剂量不会超出 2 μ Sv，低于设定的 100 μ Sv/a 剂量约束值。。

(4) 辐射照射所致有害气体的环境影响

加速器运行过程中，射线与空气发生电离作用，产生臭氧和氮氧化物等有害气体，其中臭氧的危害较氮氧化物大，且产额高。因此主要考虑臭氧的影响。

1. 臭氧

依据王时进等人发表的“辐射所致臭氧的估算与分析”(中华放射医学与防护杂志，1994 年 4 月第 14 卷第 2 期)给出的公式，估算加速器 X 射线所致臭氧的产额和浓度。

① 有用线束的 O₃ 产额

采用公式 (11-12) 计算有用射线束所致 O₃ 产额的公式：

$$P = 2.43 \dot{D}_0 (1 - \cos \theta) R G \quad (11-12)$$

式中：P 为 O₃ 的产额，mg/h； $\dot{D}_0$ 为有用线束在距 1m 处的输出量，Gy/min；R 为射线束等中心点到屏蔽物（墙）的距离，m；G 为空气吸收 100eV 辐射能量产生的 O₃ 分子数，文献估算时取值为 10； θ 为有用束的半张角。

② 泄漏辐射的 O₃ 产额

将泄漏辐射看成为 4 π 方向均匀分布的点源（包括有用束区限定的空间区），并考虑治疗室墙壁的散射线使室内的 O₃ 产额增加 10%，O₃ 的产额 P(mg/h)为：

$$P = 3.32 \times 10^{-3} \dot{D}_0 G V^{1/3} \quad (11-13)$$

本评价选取加速器有关参数如下： $\dot{D}_0 = 24$ Gy/min(最大值)；R=4.15m(最大值)； $\theta = +14^\circ/-14^\circ$ ；G=10；治疗室容积(不含迷道)V ≈ 220 m³。

根据公式 (15) 得出有用线束 P=72mg/h。根据公式 (16) 得出泄漏辐射的 P=4.8mg/h。二项合计，P_总=77mg/h。保守估计加速器年出束时间 1000h，则臭氧的年产量约为 77g。

③ 臭氧浓度

治疗室内的产生臭氧一部分由通风系统排到室外，另一部分自然分解。空气中臭氧

的平均浓度可用式（11-14）计算。

$$Q(t) = \frac{Q_o T}{V} (1 - e^{-t/T}) \quad (11-14)$$

式中:Q(t)为治疗室内 t 时刻臭氧的平均浓度, mg/m³; Q_o为臭氧的辐射化学产额, mg/h; V 为治疗室的体积, m³; T 为有效清除时间, h。如果照射时间很长(t>>T), 则:

$$Q(t) = \frac{Q_o T}{V} \quad (11-15)$$

若以 t_v 表示换气一次所需时间 h; t_d 表示臭氧的有效分解时间 (取 0.83h), 则有效清除时间为:

$$T = \frac{t_v \cdot t_d}{t_v + t_d} \quad (11-16)$$

正常通风时治疗室的换气次数至少 4 次/h, 即 t_v=0.25h/次。由式 (11-16) 计算得 T 为 0.19h。当 t>>T 时, 臭氧达饱和浓度, 由式 (11-15) 得到在正常排风时治疗室内的臭氧浓度为 0.066mg/m³, 低于工作场所中 O₃ 浓度限值《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分: 化学有害因素》(GBZ2.1-2019), 浓度限值为 0.3mg/m³。

治疗室内产生的臭氧通过排风系统高空排放, 经过大气的稀释和扩散作用其浓度进一步降低, 远低于大气环境质量标准中 O₃ 浓度限值【《环境空气质量标准》(GB 3095-2012), 1h 平均浓度为 0.2mg/m³】, 对周围大气环境的影响十分轻微。

2. 氮氧化物

在多种氮氧化物 (NO_x) 中, 以 NO₂ 为主, 其产额约为 O₃ 的一半。工作场所中 NO₂ 的浓度限值(GBZ2.1-2019, 浓度限值为 5mg/m³)超出 O₃ 的 10 多倍, 环境空气中其浓度限值(《环境空气质量标准》GB 3095-2012), 1h 平均浓度为 0.2mg/m³)与 O₃ 的浓度限值相同。因而, NO_x 的产生和排放对周围大气环境的影响很小。

3. 加速器机房排风系统设置要求

该项目直线加速器机房拟采用“上送下排”方式通风, 送风管道与排风管道拟由迷道经防护门上方采用“Z”字形进出机房, 风管尺寸 400mm×300mm。机房内顶部设置 300mm×300mm 的送风口, 在加速器机房北侧设置尺寸为 400mm×300mm 的排风口, 风管底部 (排风口) 离地 30cm。机房的排风管道与大楼排风管道相连后在门诊部 D 区的楼顶 (高度 23m) 排放。

11.3 后装治疗机

(一) 后装治疗机机房所在位置

后装机房位于门诊部 D 区地下二层层中间位置, 机房东侧为 CT 模拟机房及控制室,

南侧为后装机控制室，之外为治疗室，西侧为设备间，之外为 MRI 模拟机房，北侧为核医学科的 SPECT 候诊室、卫生间、保洁间等，机房顶部为放射科候诊区、CT 机房，地下为土层。后装机周围环境见图 11-8 或附图 10 所示。

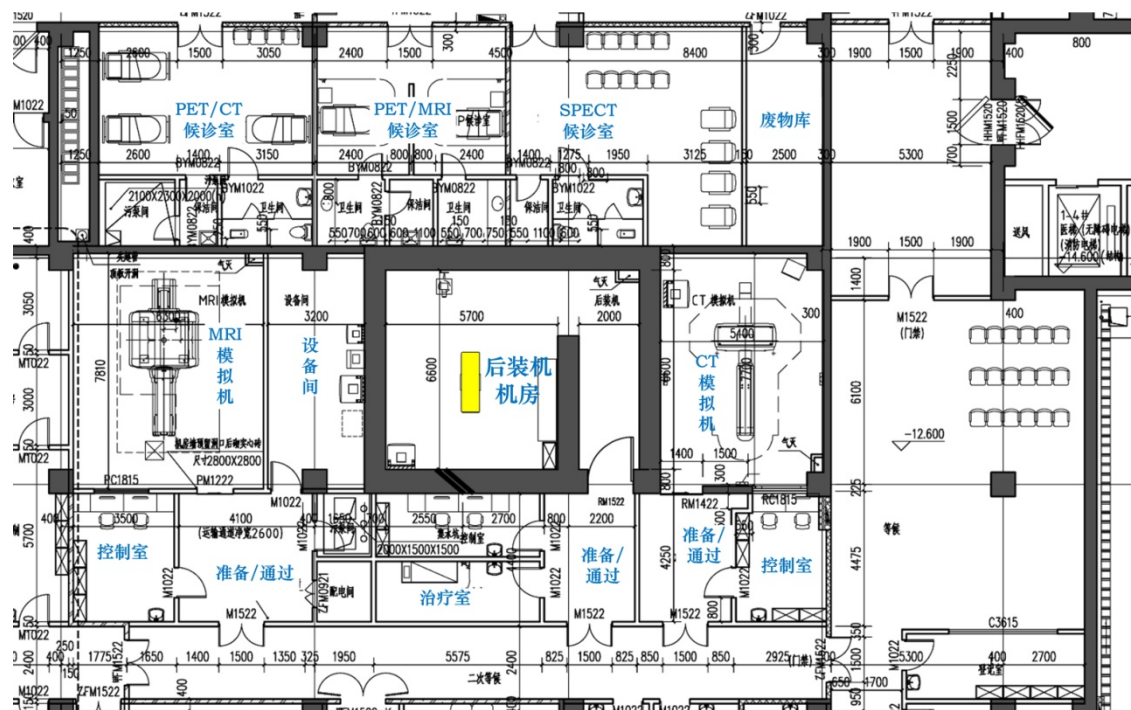


图 11-8 后装机周围环境示意图

（二）机房屏蔽设计

机房设置了“L”型迷路，四周墙体和顶部均为普通混凝土，密度不小于 2.35g/cm³。防护门采用含铅板铁质防护门。后装治疗机房平面和剖面图如图 11-9 和图 11-10 所示。

（1）后装机机房规格

① 后装机机房尺寸：5.7m×6.6m×4.8m（不含迷路），面积为37.6m²，满足《后装γ源近距离治疗放射防护要求》（GBZ121-2017）规定的有效使用面积不小于20m²的要求。

② 后装机房迷路宽度2000mm。

（2）屏蔽材料和厚度

表 11-11 后装机机房屏蔽材料和厚度

机房名称	屏蔽	设计厚度（mm）
后装机机房 （5.7m×6.6m×4.8m）	东侧迷道内、外墙	700 混凝土
	北墙、南墙	800 混凝土
	西墙	700 混凝土
	地板	700 混凝土
	顶板	800 混凝土+400 回填土
	防护门	8mmPb

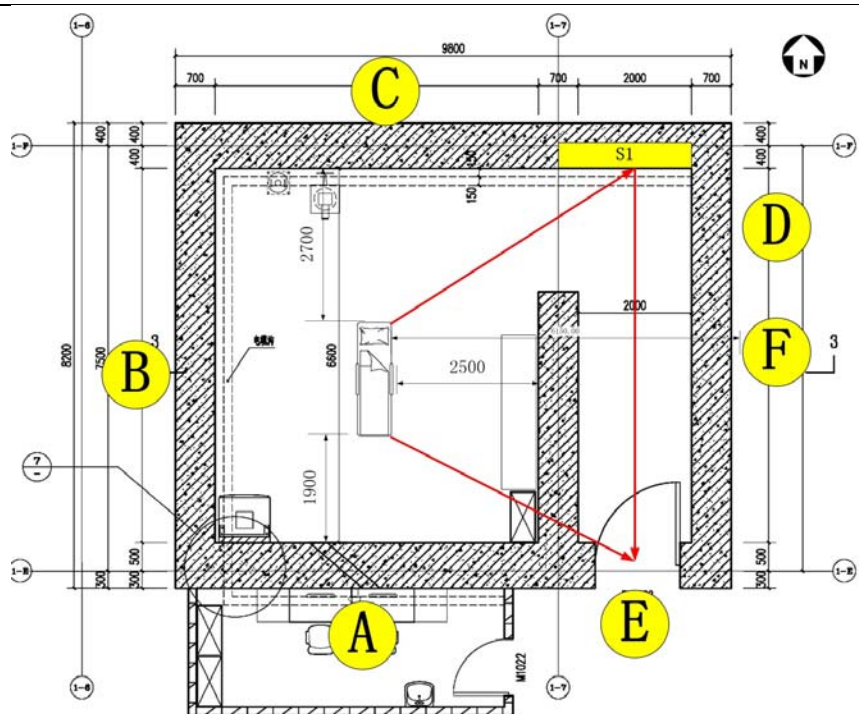


图 11-9 后装机机房平面布局示意图

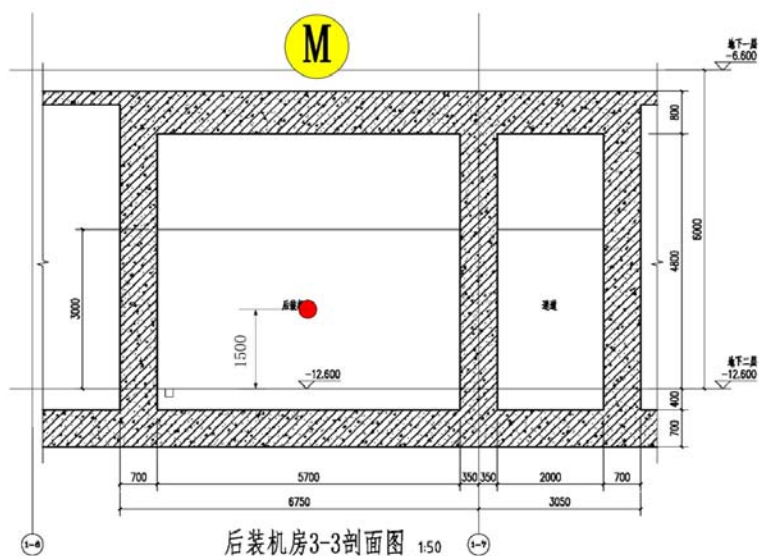


图 11-10 后装机机房剖面图

(三) 设备参数和使用规划

(1) 设备技术参数

后装机设备技术参数见表 11-12。

表 11-12 后装机设备的技术参数

生产厂家和型号	放射源种类和活度	半衰期和射线能量	储源器泄漏辐射水平
待定	Ir-192, 3.7E+11Bq	半衰期 74.0d; γ 射线能量 0.317MeV (83%) ,	储源器最大装载活度时, 距 储源器表面 5cm 吸收剂量率

	(10Ci)	0.468MeV (48%) , 0.604MeV (8%) , 平均能量 0.35 MeV。 γ 剂量率转化系数: $0.111\mu\text{Sv/h.MBq.m}^{-2}$	不得大于 $50\mu\text{Sv/h}$, 距离储源 器 100cm 处的球面上, 任何 一点的泄漏辐射不得大于 $5\mu\text{Sv/h}$ 。
--	--------	--	---

(2) 使用规划

治疗人数平均每周 30-50 人, 全年为 2500 人, 装源活度 $3.7\times 10^{11}\text{Bq}$ 时每人治疗照射 6min, 随着活度衰减治疗时间延长。本评价设定的总出束治疗时间为折算为新装源的治疗时间, 即周治疗照射时间约为 5h, 年累积治疗照射时间约 250h。

(四) 辐射环境影响评价

(1) 后装机机房周围辐射水平的估算

从偏安全的角度出发, 将放射源视为点状裸源进行防护计算。裸源为 4π 方向出束, 根据屏蔽墙的厚度和距离关注点的距离计算机房周围的辐射水平。

后装机房参考估算点位如图 11-8 和图 11-9 所示。图 11-8 中病床区域为辐射源可能的使用区域 (距离墙壁最近 1.9m 远)。

该设备距源 1m 处的最大剂量率约 41mSv/h 。根据公式(11-17) 计算机房周围的泄漏辐射剂量率水平, 估算结果见表 11-29。

$$H_0 = \frac{A \cdot K_{\gamma}}{R^2} \cdot 10^{-\frac{d}{\text{TVL}}} \quad (11-17)$$

式中: H_0 为估算点的剂量当量率, $\mu\text{Sv/h}$; K_{γ} 空气比释动能常数, 对 Ir-192 为 $0.111\mu\text{Sv/h.MBq}$; A 为放射源活度, MBq; R 为估算点到放射源的距离, m; d 为混凝土或铅等屏蔽材料的厚度, mm; TVL 为 γ 射线在混凝土或铅中的十分之一值层厚度, Ir-192 治疗束在混凝土中为 152mm, 在铅中 16mm (取自 GBZ/T 201.3-2014)。

表 11-13 后装机机房周围附加剂量率水平

点位 编号	位置描述 (见图 11-9 和图 11-10)	距离 (m)	屏蔽材料及厚度	衰减系数	剂量率贡献 ($\mu\text{Sv/h}$)
A	南侧 控制室操作位	2.8	80cm 普通混凝土	$5.46\text{E-}06$	$2.86\text{E-}02$
B	西侧设备间	3.5	70cm 普通混凝土	$2.48\text{E-}05$	$8.30\text{E-}02$
C	北侧核医学科候诊室 卫生间	3.8	80cm 普通混凝土	$5.46\text{E-}06$	$1.55\text{E-}02$
D	东侧 CT 模拟机机房	6.5	70cm 普通混凝土	$2.48\text{E-}05$	$2.41\text{E-}02$
E	防护门内	4.3	70cm 普通混凝土	$2.48\text{E-}05$	$5.50\text{E-}02^*$
F	东侧 CT 模拟机机房	6.3	70cm 普通混凝土	$2.48\text{E-}05$	$2.56\text{E-}02$
M	楼上地下一层 CT 机 房、候诊区地面	4.7	80cm 普通混凝土+ 40cm 回填土	$8.81\text{E-}08$	$1.64\text{E-}04$

注：*防护门外还有散射辐射的贡献。

由表 11-13 所示，后装机机房墙外和屋顶 30cm 处的剂量率水平最高为 0.083μSv/h（西侧设备间），均低于本评价设定的 2.5μSv/h 剂量率控制水平。上述评价是依据裸源进行的，未考虑人体组织对射线的吸收，实际运行时，机房周围的剂量率水平可能比估算结果低 1 倍左右。

（2）防护门外辐射水平估算

防护门外剂量率水平除了泄漏辐射贡献外，还受到治疗束经迷道的散射贡献。治疗束经过迷道散射对防护门所致的附加剂量率依据公式(11-18) 进行估算。

$$H_s = \frac{A \cdot K_\gamma \cdot S_1 \cdot \alpha_1}{R_1^2 \cdot R_2^2} \quad (11-18)$$

式中：A 为放射源活度，本项目为 3.7E+5MBq； K_γ 为 1m 处放射源的空气比释动能常数，对 Ir-192 为 0.111μSv/h.MBq； S_1 为 γ 射线在迷道内口墙的散射面积； α_1 为治疗束一次散射的散射系数，保守取 3.05E-2（0.25MeV，45°入射，45°散射）； R_1 为放射源到散射面中心点的距离； R_2 为迷道内口散射点到防护门处的距离。

本项目散射面积 A_1 为 8.9m²， R_1 为 5.1m， R_2 为 7.0m，计算得出迷道防护门内的散射剂量率贡献为 8.73μSv/h。Ir-192 治疗束的散射辐射能量约为 0.2MeV，其在铅中的 TVL 为 5mm，经 8mm 铅门屏蔽后，防护门外辐射剂量率降低至 0.22μSv/h。可见，防护门外的剂量率也低于 2.5μSv/h 的剂量率控制水平。

（3）工作人员和公众附加受照剂量估算

1. 工作人员

假设工作人员每次治疗前、后在床旁（距离储源罐 100cm）各操作 1min，则全年治疗 2500 人次，在后装机储源罐（>100cm 处）附近的停留时间约 83.3h。

《后装 γ 源近距离治疗放射防护要求》(GBZ121-2017)要求，工作贮源器内装载最大容许活度的放射源时，距离贮源器表面 5cm 处的任何位置，因泄漏辐射所致周围剂量率当量率不大于 50μSv/h，距离贮源器表面 100cm 处的球面上，任何一点因泄漏辐射所致周围剂量率当量率不大于 5μSv/h。本评价保守依照该数值剂量估算，工作人员年最大受照剂量为：5μSv/h*83.3h + 0.13μSv/h*250h=0.45mSv，低于本报告提出的剂量约束值 2mSv/a。

2. 周围公众

治疗室周围停留的公众主要有院内非放射工作人员、患者陪护人员、来访者等。公

众可能最大受照剂量为： $0.015\mu\text{Sv/h}\times 250\text{h/a}\times 1$ （居留因子） $\approx 3.7\mu\text{Sv/a}$ 。因此，该设备运行所致公众附加受照剂量低于本报告提出的剂量约束值 0.1mSv/a 。后装机机房周围 50m 范围内其它公众的受照剂量一定低于 $3.7\mu\text{Sv/a}$ ，满足剂量约束要求。

（4）倒装源辐射环境影响

倒装放射源工作由设备厂家的维修工程师完成，北大第一医院的医护人员仅做一些辅助工作，不直接从事倒装放射源工作，故该环节的环境影响不做具体评价。

11.4 血管造影机环境影响分析

（一）机房所在位置及周边环境

本项目 4 间 DSA 机房中 2 间位于医技楼一层介入治疗中心北侧，2 间位于住院楼四层心内科南侧，DSA 机房位置见图 7-4 和图 7-5。

医技楼一层介入治疗中心 2 间 DSA 机房东西分布，2 台 DSA 均南北向布置。2 间机房中间为控制室，机房北侧为患者等候廊，之外与急诊楼紧邻；机房东侧为库房、设备间，之外为 DSA 净化机房；南侧隔医护走廊为办公室、值班室、更衣室和卫生间；西侧为库房、设备间，之外为苏醒间和等候区；顶部为生化免疫分析区的实验室、冷藏库和试剂库等，楼下车库。医技楼的 2 间 DSA 周围环境及布局示意图见图 11。

住院楼四层心内科 2 间 DSA 机房东西分布，2 台 DSA 均东西向布置。2 间机房中间为控制室，机房北侧为走廊，之外有手术电梯厅、家属等候区、楼梯、医护休息室、配电间等；东侧紧邻设备机房、污洗间，之外苏醒间；南侧隔走廊为室外；西侧紧邻设备机房，之外为设备库房和洁净品库；DSA 机房 1 顶部为屋面，DSA 机房 2 顶部为病房，楼下为设备层。住院楼的 2 间 DSA 周围环境及布局示意图见图 12。

（二）DSA 机房屏蔽设计

（1）DSA 机房规格

使用 DSA 设备的机房为医技楼一层介入 DSA 机房 1 和机房 2、住院楼四层心内科 DSA 机房 1 和机房 2，四间机房规格如表 11-14 所示。

表 11-14 城南院区四间 DSA 机房规格

机房	房间面积 (m^2)	房间尺寸 (m)	《医用 X 射线诊断放射 防护要求》 (GBZ130-2013) 要求
医技楼一层介入治疗中心 DSA 机房 1	51	长 8.8×宽 5.85×高 4.5	最小有效使用面积 20m^2 ，最小单边长度 3.5m。
医技楼一层介入治疗中心 DSA 机房 2	51	长 8.8×宽 5.85×高 4.5	
住院楼四层心内科 DSA	65	长 10.25×宽 6.4×高 3.8	

机房 1			
住院楼四层心内科 DSA 机房 2	65	长 10.25×宽 6.4×高 3.8	

对照《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）对 DSA 设备机房的面积和单边长度的要求，本项目 4 间 DSA 机房均满足要求。

（2）机房布局和屏蔽防护

4 间 DSA 机房屏蔽材料和厚度如表 11-2 所示。对照《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）对 DSA 设备机房的防护要求，有用线束墙壁应有 2mm 铅当量，非有用线束墙壁也应有 2mm 铅当量的防护，本项目 DSA 机房的辐射屏蔽满足要求。

表 11-15 4 间 DSA 机房的屏蔽设计

机房类型	屏蔽体	屏蔽设计	折合铅当量
医技楼一层介入治疗中心 DSA 机房 1 和机房 2	四周墙体	轻钢龙骨+3mm 铅当量铅钡复合板	3mmPb
	防护门	不锈钢门内夹 3mmPb	3mmPb
	观察窗	3mm 铅当量铅玻璃	3mmPb
	顶板	20cm 混凝土	>3mmPb
	地板	25cm 混凝土	>3mmPb
住院楼四层心内科 DSA 机房 1 和机房 2	四周墙体	轻钢龙骨+3mm 铅当量铅钡复合板	3mmPb
	防护门	不锈钢门内夹 3mmPb	3mmPb
	观察窗	3mm 铅当量铅玻璃	3mmPb
	顶板	20cm 混凝土	>3mmPb
	地板	20cm 混凝土	>3mmPb

（三）设备参数和使用规划

（1）设备技术参数

本项目拟使用的 4 台 DSA 设备，最大管电压均为 125kV，最大管电流均为 1000mA。

（2）使用规划

DSA 可用于心脏造影、心脏支架、起搏器手术、脑血管造影、脊髓血管造影、脑血管支架、脑动脉瘤栓塞、脑血管畸形栓塞等。本项目 DSA 开展的介入手术类型主要为外周血管类、脑神经和心血管介入类。全年工作 250d，每组工作人员年手术量最多 500 例。

根据经验数据，DSA 手术类型、工作量、曝光时间见表 11-16 所示。

表 11-16 DSA 手术类型、工作量、曝光时间预计

手术类型	每台手术透视累计曝光时间（min）	每台手术摄影累计曝光时间（min）
冠状动脉造影+PCI	12	1
心脏射频消融	5	0.5
心内起搏器植入	5	0.5

先心病介入治疗	5	1
外周介入治疗	10	2

本项目以 DSA 保守以开展外周介入为例进行评价，其透视和摄影工作状态的累积出束时间见表 11-74 所示。

表 11-17 血管造影机年出束时间

工作状态	平均出束时间/例	年治疗例数	累计出束时间
透视	10min	1000	166.7h
摄影	2min	1000	33.3h

（四）辐射环境影响评价

（1）DSA 机房周围的贯穿辐射水平

手术中设备运行分透视和摄影（采集）两种模式。设备具有自动调强功能，能根据患者条件等差异，自动调节曝光参数和 X 射线辐射剂量。即如果受检者体型偏瘦，管电流（功率）自动降低。反之管电流（功率）自动增强。

为了防止球管烧毁并延长其使用寿命，DSA 实际使用时，管电压和管电流通常留有较大裕量，即管电压通常控制在 100kV 以下，管电流通常控制 600mA 以下。

ICRP33 报告给出了 DSA 设备运行典型工况和相关参数，见表 11-18。

表 11-18 设备运行典型工况及相关参数

运行工况	X 线工作状态参数	混凝土中 TVL (cm)	Pb 中 TVL (cm)
摄影	90kV/500mA	5.0	0.704
透视	90kV/10mA	5.0	0.704
备注：数据参考 ICRP REPORT NO.33			

《医用常规 X 射线诊断设备质量控制检测规范》（WS76-2017）的“表 B.1 X 射线透视设备的检测项目与技术要求”规定，透视受检者入射体表空气比释动能率最大值 $\leq 100\text{mGy/min}$ 。《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）4.7 规定，介入治疗最小焦皮距 20cm。由以上两个条件，可得出透视工况下，距离靶点 1 米处的主束辐射剂量率最大为 240mGy/h 。

本项目保守以 240mGy/h 为最大输出量率进行评价；摄影工况下，管电流约为透视工况的 50 倍，最大输出量率为 12Gy/h 。

X 射线靶点视为点源，输出量率保守按实际使用的最大功率（透视 90kV/10mA、摄影 90kV/500mA），混凝土和铅的透射系数依据 GBZ130-2013 附录 D 计算，再结合距离衰减，来估计算机房周围各关注点的剂量率水平。

$$D=D_0 \times B/R^2 \quad (11-18)$$

式中：D-估算点附加剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

D_0 -距源 1m 处的剂量率， $\mu\text{Gy/h}$ ；

B-衰减因子， $B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha r} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}}$ ，依据 GBZ130-2013 附录 D 计算；

R——X 射线靶到计算点的距离，m。

DSA 图像增强器对 X 射线主束有屏蔽作用，NCRP147 号报告“Structural Shielding Design For Medical X-Ray Imaging Facilities”4.1.6 节（P62）指出，DSA 屏蔽估算时不需要考虑主束照射，故本项目重点考虑泄漏辐射和散射辐射对周围环境的辐射影响。散射辐射的剂量率水平与泄漏辐射水平相当（ $\sim 10^{-3}$ ），但其穿透能力较弱，故计算周围剂量率水平时，保守以泄漏辐射水平的 2 倍作为周围的附加剂量率水平。

本项目的 4 间 DSA 机房单边尺寸最小值 5.85m，高度最小值 3.8m，在屏蔽计算时，保守取设备靶点距离四周墙壁外、楼上地面 30cm 处的距离为 2.5m，楼下以住院楼设备层高 1.8m 估算，故设备靶点距离楼下地面 150cm 处的距离以 1.5m 进行附加剂量率估算。

11-19 介入治疗条件下，DSA 机房周围的附加剂量率估算结果

介入治疗种类	使用工况	计算点位置	屏蔽材料与厚度	衰减因子 (B)	设备 1m 处剂量率 (Gy/h)	射线束类型	距离 (m)	剂量率估算值* ($\mu\text{Sv/h}$)
X 线透视	最大管电压 125kV	楼上地面 30cm 处	20cm 混凝土 (3mmPb)	1.56E-04	0.24	泄漏+散射	2.5	1.2E-02
		楼下地面 150cm 处	20cm 混凝土 (3mmPb)	1.56E-04		泄漏+散射	1.5	3.34E-02
		四周墙壁外 30cm 处	3mm 铅当量	1.56E-04		泄漏+散射	2.5	1.2E-02
		防护门外 30cm 处	3mm 铅当量	1.56E-04		泄漏+散射	2.5	1.2E-02
		观察窗外 30cm 处	3mm 铅当量	1.56E-04		泄漏+散射	2.5	1.2E-02
X 线摄影	最大管电压 125kV	楼上地面 30cm 处	20cm 混凝土 (3mmPb)	1.56E-04	12	泄漏+散射	2.5	6.0E-01
		楼下地面 150cm 处	20cm 混凝土 (3mmPb)	1.56E-04		泄漏+散射	1.5	1.67E+00
		四周墙壁外 30cm 处	3mm 铅当量	1.56E-04		泄漏+散射	2.5	6.0E-01
		防护门外 30cm 处	3mm 铅当量	1.56E-04		泄漏+散射	2.5	6.0E-01
		观察窗外 30cm 处	3mm 铅当量	1.56E-04		泄漏+散射	2.5	6.0E-01

注：*射线泄漏率按 0.1% 计，散射辐射贡献保守按照泄漏辐射计。

从上述估算结果可知，在“透视”和“摄影”过程中，DSA 机房周围附加剂量率最大值为 $1.67\mu\text{Gy/h}$ （住院楼心内科楼下设备层），满足本项目所设定的机房屏蔽体外 30cm

处 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制水平。上述评价是基于保守假设进行的。事实上，患者身体对 X 射线会有部分的吸收，约衰减 1-2 个量级（NCRP147 号报告），实际运行时，机房周围的剂量率水平可以维持在正常本底水平。

（2）DSA 正常工况下所致医护人员的年受照剂量

保守假设，在介入治疗的透视工况时，医生手术位置的附加剂量率水平为 GBZ130-2013 规定的限值（400 μ Gy/h），且医生全居留；在介入治疗的摄影工况时，管电流增加 50 倍，医生所在位置的附加剂量率水平也增加 50 倍，最高为 20mGy/h。GBZ130-2013 要求，图像采集时工作人员应尽量不在机房内停留，故保守取居留因子为 1/4。

根据 GBZ130-2013，工作人员采取铅衣(0.5mm 铅当量)屏蔽措施，在 90kV 进行透视和摄影时，衰减系数为 0.025，即医生在透视和摄影工况下，经铅衣屏蔽后的最大受照剂量率水平分别为 10 μ Gy/h 和 500 μ Gy/h。

附加年有效剂量计算公式： $E=D \times t \times T \times K$

式中：E--年有效剂量， μ Sv/a；D-计算点附加剂量率， μ Gy/h；t-DSA 年出束时间，h/a；k-有效剂量与吸收剂量换算系数，Sv/Gy，本项目取 1.0；T-居留因子。参考《辐射防护手册第三分册 辐射安全》（李德平编）P80，居留因子 T 按三种情况取值：(1)全居留因子 T=1，(2)部分居留 T=1/4，(3)偶然居留 T=1/16。

本评价按每组医生全年开展介入治疗 500 例估算，每名医生在透视工况下的暴露时间为 83.3h，摄影工况下的暴露时间为 16.7h。职业人员附加年有效剂量估算结果见表 11-20，可见，介入工作人员的年受照剂量低于本项目设定的 5mSv 的年有效剂量约束值。

表 11-20 职业人员附加年有效剂量估算结果

估算对象		最大附加剂量率 (μ Gy/h)	年工作时间 (h/a)	居留因子	年附加有效剂量(mSv)
术者	透视	10	83.3	1	2.9
	摄影	500	16.7	1/4	
控制室 技师	透视	1.2E-02	166.7	1	0.022
	摄影	6.0E-01	33.3	1	

上述剂量估算是基于 1 名医生全年完成 500 例 DSA 手术的最大工作负荷进行的，介入治疗医护人员只在 DSA 设备上开展介入手术，且不从事其它放射性工作，故不考虑个人剂量叠加问题，预计每名辐射工作人员的年受照剂量不会超过 2.9mSv。

上述估算是依照“在透视防护区测试平面上的空气比释动能率为 400 μ Gy/h 的限值”进行估算的，实际上，操作位的剂量率水平通常低于 150 μ Gy/h（多数低于 100 μ Gy/h），预计介入人员的实际年受照剂量低于 2mSv。

（3）DSA 正常工况下所致周围公众的年受照剂量

机房四周墙壁外的非辐射工作人员年受照剂量较大，具体估算结果见表 11-21，可见，公众的年受照剂量低于设定的 100 μ Sv 的剂量约束值。

表 11-21 公众年附加受照剂量估计

估算对象		最大附加剂量率 (μ Gy/h)	年工作时间 (h/a)	居留 因子	年附加剂量 (μ Sv)
机房四周墙壁 和防护门外、 楼上	透视	1.2E-02	166.7	1/4	5.5
	摄影	6.0E-01	33.3	1/4	
住院楼心内科 DSA 机房楼下 (设备层)	透视	3.34E-02	166.7	1/4	22
	摄影	1.67E+00	33.3	1/4	

（4）有害气体的环境影响

根据以往的估算结果，在介入治疗过程中，臭氧的小时平均产额低于 1 mg/h，对环境的影响十分轻微，本报告对其环境影响不做评价。

1.5 核医学科环境影响评价

本项目核医学科包括三个辐射工作场所，分别为核医学诊疗场所、回旋加速器制备 PET 用放射性药物场所和药物实验场所。以下分别对其环境影响进行预测。

11.5.1 核医学诊疗场所环境影响分析

（一）诊疗场所的布局和分区

核医学诊疗场所设在门诊部地下二层的西侧（位置见附图 5），其东侧为候诊区、放免室和甲功室，北侧为核医学科办公区，南侧为放疗科用房，西侧为药物制备场所，楼上（地下一层）为放射科用房，地下为土层。地面门诊部 D 区周围 50m 范围内，北侧是科研楼，东侧是门诊部 C 区，南侧是下沉广场，西侧隔新风河为教学行政楼。核医学科诊疗场所布局见图 11-11 和附图 13。

诊疗场所辐射工作场所实行分区管理。其中，SPECT/CT1、SPECT/CT2、PET/CT 和 PET/MRI 机房，3 间患者候诊室（含卫生间）、高活室、注射室、废物间、留观区作为控制区进行管理，严格限制非工作人员进入。操作廊、缓冲间、设备间作为监督区进行管理，限制无关人员进入。具体分区情况如图 11-11 所示。



图 11-11 核医学诊疗场所的布局、分区和人员路径示意图

(二) 诊疗场所的诊疗流程

1. 核素显像诊断流程

患者乘电梯到达地下二层——→登记室进行登记——→在接诊前厅候诊——→由患者走廊入口（设单向门禁）进入检查区——→在注射室接受药物注射（或者肺通气室接受雾化吸入）——→做运动负荷后或者直接在候诊室（PET 或者 SPECT）休息——→按医嘱要求排尽小便——→进行扫描（SPECT、PET/CT 或者 PET/MR）检查——→检查完毕，根据引导由西侧出口到达留观室——→留观一刻钟由患者专用电梯离开核医学科。

2. 核素治疗流程

患者乘电梯到达地下二层——→登记室进行登记——→在接诊前厅候诊——→由患者走廊入口（设单向门禁）进入检查区——→根据引导由西侧出口到达留观室——→留观一刻钟由患者专用电梯离开核医学科。

3. 核医学科人员工作流程

工作人员乘北侧医护专用电梯到达地下二层——→在更衣室更换鞋和工作服后进入办公区域——→医师进入阅片室和诊室、技师进入控制廊、护师由缓冲间进入注射室、实验人员进入药物实验场所、PET 制药人员进入回旋加速器场所——→医师出诊、阅片或出具诊断报告，技师进行摆位和扫描，护师开展药物接收、质检、分装和注射操作、实验人员开展动物实验、PET 药物制备人员操作回旋加速器制备放射性药物——→工作结束后在更衣室更换工作服、工作鞋，离开核医学科。

4. 放射性药品转移流转

外购的放射性药物：放射性药物由供药公司运至地下二层停车场——→由核医学科东侧入口门进入核医学科——→高活室门口，核医学科药品管理员与送货人员办理“点对点”交接验收手续，并记录药品规格、批次、数量以及收货时间——→由“肺通气室”进入高活室，暂存。

自制的 PET 药物：

放化室分装热室将放射性药物分装到转运防护罐——→用“跑兔”装置将放射性药物转运至核医学科注射室——→开展显像和治疗工作。

5. 放射性废物转移路线

放射性废物：注射室窗旁设置一个含 20mm 铅的废物桶（1L），存放废弃的放射性药物、注射器、包装物、棉棒、一次性用品等——→按日期于次日早晨转移至废物间——→废物间设置 2 个含 10mm 铅的废物桶（20L），轮流暂存放射性废物——→放置一个月后，A 类放射性废物解控为医疗废物处置——→放置 80d 后，B 类放射性废物解控为医疗废物处置——→详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括废物分类、所含核素名称，重量，暂存起止时间，表面污染和辐射剂量自测结果，废物处置日期，处置操作人员，废物去向，部门审核人员等内容。

6. 放射性废水暂存和排放流程

PET/CT 候诊室、SPECT/CT 候诊室、PET/MRI 候诊室内卫生间冲厕废水、清洗池洗手废水和保洁废水，放药室缓冲间洗手废水、保洁废水——→地下二层专用积水坑——→污泵房——→放射性废水衰变池暂存——→定期排至医院污水处理站处理——→市政污水官网。

放射性废水排放路径示意图见附图 14。

7. 放射性废气收集与排放流程

核医学科诊疗区域设置共计 5 套通风系统，废气经管道组织，由管道井延伸至楼顶排放。楼顶设风机和过滤装置。具体如下：

1) “注射给药室”内通风柜、“运动负荷实验室”分别设 2 套通风系统——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放；

2) 4 间扫描机房（2 间 SPECT/CT、1 间 PET/CT、1 间 PET/MRI）、设备间及操作廊——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放；

3) 3 间给药病人候诊室（含卫生间）以及废物间——→活性炭过滤器过滤——→门诊

部楼顶排放。

4) 核医学科办公区域——→门诊部楼顶排放。

放射性废气排放路径示意图见附图 8 所示。

(三)核医学诊疗场所放射性“三废”产生量预测

(1) 核医学科诊疗场所的使用规划

北大第一医院根据本部核医学科目前诊疗使用的核素现状，结合核医学科的新药物发展，给出了城南院区核医学科使用规划，表 11-22 给出了拟使用的放射性核素种类、用途以及最大工作负荷等信息。

表 11-22 城南核医学科的使用规划

序号	核素	用途	类别	最大工作负荷		
				人次/天	天数/年	人次/年
1	^{99m}Tc	诊断	A	50	200	10000
2	^{131}I	诊断	B(8d)	10	60	600
3	^{123}I	诊断	A	12	100	1200
合计				72		11800
4	^{18}F	诊断	A	40	250	10000
5	^{11}C	诊断	A	5	200	1000
6	^{13}N	诊断	A	2	100	200
7	^{15}O	诊断	A	2	100	200
8	^{124}I	诊断	B(4.1d)	5	50	250
9	^{64}Cu	诊断	A	6	50	300
10	^{68}Ga	诊断	A	10	200	2000
11	^{89}Zr	诊断	B(3.3d)	5	50	250
合计				75		14200
12	^{131}I	治疗	B	10	50	500
13	^{89}Sr	治疗	B	2	150	300
14	^{186}Re	治疗	B	2	50	100
15	^{188}Re	治疗	A	2	50	100
16	^{223}Ra	治疗	B	3	50	150
17	^{177}Lu	治疗	B	2	25	50
18	^{90}Y	治疗	B	2	25	50
19	^{169}Yb	治疗	B	4	25	100
合计				27		1350

根据使用规划，城南院区核医学科每天使用 SPECT（或者 SPECT/CT）开展影像诊断最多 72 人次，每天使用 PET/CT 和 PET/MRI 开展影像诊断最多 75 人次，每天开展核素治疗最大 27 人次。诊断使用的放射性核素中，多数半衰期小于 1d(A 类)，半衰期大于 1d(B 类)核素有 I-131、I-124 和 Zr-89，半衰期最长的是 I-131，为 8d。

(2) 放射性固废产生和处置

核医学诊疗场所设有放射性固体废物暂存间，配置专用废物桶。患者使用的服药杯子、废弃的注射器、包装物、棉棒、垫布等被污染的一次性用品等固体放射性废物，按

产生日期用不易破损的塑料袋分类收集，暂存于废物桶内。废物袋满后转移至废物间内贮存，并在塑料袋外表面注明废物类别（A 类或 B 类）、重量（或体积）、所含核素名称、暂存起始日期等信息。

高活室内配置 1 个铅质废物桶（容积 1L），废物间配置 4 个轮流贮存 A 类和 B 类放射性废物的废物桶。

根据表 11-22 使用预计，核医学科全年开展核素显像检查和治疗共计 27350 人次，平均每人次产生含放射性固体废物 0.05kg，则项目满负荷运行时放射性废物年产生量约 1367.5kg。此外，核医学科每年更换通风橱和热室高效过滤器/活性炭过滤器，预计额外产生 100kg 左右固体废物，总计约 1467.5kg。

依照《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》，本项目使用核素有 A 类和 B 类，A 类固体废物暂存时间超过 30 天、B 类固体废物暂存时间超过 10 倍最长半衰期且不少于 30 天后，使用监测仪器对废物逐袋进行表面巡测，辐射剂量率低于 200nSv/h 且 α 、 β 表面污染水平分别小于 0.08 Bq/cm² 和 0.8Bq/cm²，可对废物解控作为医疗废物处置。并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向等，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

另外，每年更换下来通风橱和热室高效过滤器/活性炭过滤器，将妥善收集，密封包装暂存于废物间，放置 30d 后对表面进行巡测，辐射剂量率低于 200nSv/h 且 α 、 β 表面污染水平分别小于 0.08 Bq/cm² 和 0.8Bq/cm²，解控为医疗废物处置。

(3) 放射性废水产生和处置

1. 放射性废水的产生量预计

根据核素显像检查规程要求，全身扫描和腹部扫描检查前须排尽小便。核医学诊断场所的患者给药后候诊室卫生间（3 个）、放药室清洗池排水和缓冲间洗手废水进入集水坑。集水坑废水被提升排放至废水衰变池，经过贮存衰变后排入医院医疗污水收集系统，最终排入院外市政污水管网。

依据表11-22，城南院区每天接受核医学科诊断和治疗患者最多174人次，其中SPECT和PET显像诊断147人次，核素治疗27人次。假设：1) 每个工作日，接受显像检查的患者在候诊期间全部排尿，预计产生含放射性核素的冲厕废水量最大为 0.735m³/d（按5L/人次计，含洗手用水），全年冲厕废水排放量约133m³。2) 门诊使用

I-131、Sr-89、Lu-177、Re-188等核素开展治疗的患者，在接受治疗后通常随即离开，不产生冲厕废水。3) 核医学科高活室每天产生洗手废水30L，保洁废水50L，全年按250d计，保洁和洗手废水总产生量为20m³。综上所述，核医学诊疗场所每天放射性废水产生量为0.815 m³（最多）、0.612 m³(平均)，每年运行250d，年排放废水总量153 m³。

放射性废水中多为A类核素，也可能包括少量的B类I-131、I-124和Zr-89。这三种B类核素的年诊断人数占比仅为4.1%，可以预见，废水中上述3种B核素的活度浓度也较少，主要为A类^{99m}Tc和¹⁸F。核医学科使用的放射性核素半衰期最长为8的，所以可以采用收集并暂存的方式处置放射性废水，待其中放射性核素衰减殆尽后再排放。

2. 放射性废水衰变池

1) 衰变池位置和容积

城南院区拟在门诊部 D 区西南侧空地建设一个地下的放射性废水衰变池。采用钢筋混凝土结构，混凝土标号不小于 C30，抗渗等级 S8，四周池壁和地板厚度 300mm，采用 30mm 硫酸钡水泥抹面外加防水卷材进行抗渗和屏蔽处理，确保放射性废水在暂存期间不发生渗漏，防止对地下水造成污染。

衰变池顶板厚度不低于 200mm，检修盖板采用 6mm 铅板屏蔽。衰变池区域设围栏，避免人员在衰变池上方长时间停留。

衰变池总容积约为81m³ (27m³/槽×3槽)。放射性废水收集示意图见图11-12所示。

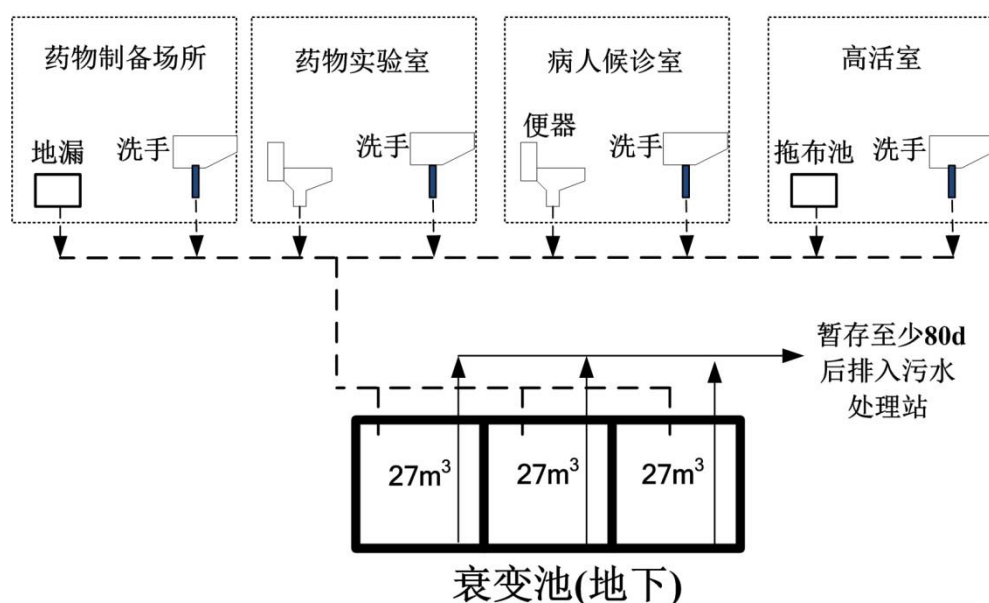


图 11-12 放射性废水收集示意图

2) 积水坑和排水管道

在地下二层的地下设置二个专用的放射性废水积水坑（汇水路径见附图14），周围

30cm混凝土防护。核医学科产生的A类和B类放射性废水全部排入积水坑，然后通过潜污泵排至衰变池。集水坑采用硫酸钡水泥砂浆20-30mm抹面进行辐射屏蔽，集水坑盖采用三防铸铁井盖，三防井盖的外井盖为铸铁材质，内部的盖板为玻璃钢或PE材质，包裹2mm铅板进行屏蔽。

放射性污水排水竖管用实心砖或混凝土包管屏蔽，排水横管铅皮用包裹并加固的方式屏蔽。

3) 衰变池控制和管理

- 设计液位指示装置，自动进、排水阀门和溢流管线。智能控制系统、人性化操作管理、通过 PLC 和触摸屏设定工作参数和状态提醒机制。
- 所有运行状态自行监控，可在无人值守状态下实现全自动稳定运行。
- 废水衰变系统整体采用“储存式衰变”方式，各衰变池循环使用。
- 内置设备泵体采用切割式潜水泵，可将固体杂质粉碎成颗粒排除，阀门采用电/手动双控制球阀，为后续设备维护检修提供保障。
- 核医学科废水流入衰变池，此时 A1 电动阀打开，废水流入 1#衰变池，其内置液位计检测经检测达到预设定高液位时，经 PLC 系统控制自动关闭 A1 电动阀并开始记录贮存时间，同时开启 A2 电动阀使放射性废水流入 2#衰变池。当 2#衰变池达到高液位时关闭 A2 电动阀并计时，同时开启 A3 电动阀使放射性废水流入 3#衰变池。当 3#衰变池达到高液位时，关闭 A3 电动阀开始计时并再次开启 A1 电动阀，将废水再次排入 1#衰变池（此时已暂存超 80d 而排空），完成贮存废水一个循环。
- 当 1#衰变池达到高液位后且计时达到其衰变周期（至少 80d）后，1#潜水泵开启，将符合解控要求的废水排入医院污水处理站，2#衰变池排水过程同理。

3. 放射性废水达标排放可行性分析

衰变池采用槽式贮存方式，核医学科产生的A类和B类放射性废水全部通过专用管道汇入衰变池。三个场所平均每天产生的放射性废水约650L（包括药物制备场所10L/d，药物实验室25L/d场所在内，具体分析见后），3个容积均为27m³的不锈钢罐轮流使用，废水可以暂存约108d，满足《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》规定的放射性废水暂存80d（10倍I-131半衰期）要求，可以达标排放

(4) 放射性废气产生和处置

核素诊疗场所的放药室设计有通风操作柜，肺通气室也按照有排风系统，废气由专用

管道引至楼顶排放（高度 23m）。放射性药物活度测定、分装和质检操作均在通风操作柜内进行，使用量较大、较频的含 ^{99m}Tc 、 ^{18}F 显像药物，物理性质稳定，均为液体，口服或注射环节，挥发到空气中的份额可以忽略不计。I-131、I-123 和 I-124 具有一定的挥发性，在正常操作过程中，可能会有少量挥发进入大气形成气溶胶。但是这 3 种核素的使用频次较低（年次数占比 7.7%），且通风系统设置有活性炭过滤器，会进一步过滤净化，对周围环境的影响十分轻微，故本项目不予详细评价。

若操作放射性物质发生意外泼洒情况时，短时间进入空气的份额较多，经过滤器吸附处理后，仍有可能有微量的放射性物质从排风系统排放至周围环境空气中。放药室排风中的极少量放射性物质经大气扩散后浓度会更低，且偶发排放对周围公众的辐射剂量贡献很小。

（四）辐射环境影响

考虑到 SPECT（SPECT-CT）扫描以使用 ^{99m}Tc 为主，PET-CT 扫描主要使用 ^{18}F ，故以这两种核素为例，分析预测核素显像检查过程工作区周围贯穿辐射水平，以及工作人员和周围公众的受照剂量。

（1）诊疗场所的实体屏蔽设计方案

根据设计单位（中国中元国际工程有限公司）提供图纸整理，核医学诊疗场所的辐射实体屏蔽方案如表 11-23 所示。

表 11-23 核医学诊疗场所的辐射实体屏蔽方案*

场所名称	使用功能	实体屏蔽改造方案	
		屏蔽体	改建方案
出入口	患者入口和出口	防护门	8mmPb
		墙体	30mm 混凝土
治疗室	口服或注射治疗药物	东墙	300mm 混凝土
		北墙、南墙和西墙	150mm 加气混凝土砌块
		室顶	300mm 混凝土
		地面	土层
		防护门	防盗门
废物间	存放放射性固体废物	北墙、西墙	150mm 加气混凝土砌块
		东墙、南墙	300mm 混凝土
		室顶	300mm 混凝土
		地面	300mm 混凝土
		防护门	6mmPb
高活室	暂存放射性药物； 分装显像药物	北墙、东墙	300mm 混凝土
		南墙和西墙	150mm 加气混凝土砌块
		室顶	300mm 混凝土
		地面	土层
		防护门	防盗门
注射室	注射显像药物	北墙、西墙	300mm 混凝土
		东墙、南墙	150mm 加气混凝土砌块
		室顶	300mm 混凝土
		地面	土层
		防护门	6mmPb
SPECT 候诊室	注射 ^{99m}Tc 药物的	北墙、东墙、西墙	150mm 加气混凝土砌块

		患者在扫描前等候、休息	南墙	300mm 混凝土
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	6mmPb
	PET/MR 候诊室	注射 ^{18}F 等 PET 药物的患者在扫描前等候、休息	北墙、东墙、西墙	150mm 加气混凝土砌块
			南墙	300mm 混凝土
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	4mmPb
	PET/CT 候诊室	注射 ^{18}F 等 PET 药物的患者在扫描前等候、休息	北墙、东墙	150mm 加气混凝土砌块
			南墙、西墙	300mm 混凝土
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	6mmPb
	留观区	扫描后需要留观的受检人员在此休息	四周墙体	300mm 混凝土
			室顶	150mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	6mmPb
	运动负荷室	注射 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物的患者在此做运动负荷实验	西墙	300mm 混凝土
			北墙、东墙、南墙	150mm 加气混凝土砌块
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	4mmPb
	SPECT/CT1 机房	SPECT 扫描	四周墙体	300mm 混凝土
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	4mmPb
			观察窗	4mmPb
	SPECT/CT2 机房	SPECT 扫描	四周墙体	300mm 混凝土
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	4mmPb
			观察窗	4mmPb
	PET/CT 机房	PET/CT 扫描	四周墙体	300mm 混凝土
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	6mmPb
			观察窗	6mmPb
	PET/MRI 机房	PET/MRI 扫描	四周墙体	300mm 混凝土
			室顶	300mm 混凝土
			地面	土层
			防护门	6mmPb
			观察窗	6mmPb

注：加气混凝土砌块密度 0.52t/m^3 ，混凝土密度 2.35t/m^3 。室顶厚度考虑了地面做法。

(2) 贯穿辐射环境影响预测

1. 剂量估算源强

1) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 每人每次用量 $1.85 \times 10^8 \text{Bq}(5\text{mCi}) \sim 9.25 \times 10^8 \text{Bq}(25\text{mCi})$ ，其中心肌扫描和骨扫描最大用量为 $9.25 \times 10^8 \text{Bq}(25\text{mCi})$ ，甲状腺、肝脾、肺灌注、下肢静脉及颌下腺等各种脏器扫描用量相对较小，最大用量为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq}(10\text{mCi})$ 。

2) ^{18}F 使用量为 $0.185 \text{GBq}(5\text{mCi})/\text{人次} \sim 0.296 \text{GBq}(8\text{mCi})/\text{人次}$ 。根据 AAPM Task

Group 108 报告,核素 ^{18}F 的 K_{γ} 常数为 $0.143\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$,给患者注射 8mCi 的 ^{18}F 后,距离患者 1m 处的剂量率为 $27\mu\text{Sv/h}$ (考虑患者自吸收因子 0.36) ; 注射时裸源 1m 处剂量率 $42.3\mu\text{Sv/h}$ 。

2.估算方法

将接受药物注射后的患者身体、装有放射性药物的注射器近似作为点源,依照剂量率和距离平方成反比衰减的关系,同时考虑墙壁和防护门、窗的衰减作用,估算高活室、扫描室、休息室和留观室等有代表性场所周围的附加辐射剂量率,然后结合可能的照射时间,估算职业人员和公众的受照剂量。

剂量估算公式:

辐射剂量率可由式 (11-1) 和式 (11-2) 计算得到,

$$D=D_0\times B/R^2 \quad (11-1)$$

$$B=10^{-d/\text{TVL}} \quad (11-2)$$

式中: D : 估算点的附加剂量率, mSv/h ; D_0 : 距源 1m 处的剂量率, mSv/h ; B : 衰减因子; R : 源到计算点的距离, m ; d : 屏蔽层厚度, mm ; TVL : 十分之一层 (TVL) 厚度, mm 。对 F-18 来讲, 铅中 TVL 为 16.6mm , 混凝土中 TVL 为 176mm 。对于 Tc-99m 来讲, 铅中 TVL 为 1mm , 混凝土中 TVL 为 66mm 。对于 ^{131}I 来说, 混凝土中 TVL 为 180mm , 铅中 TVL 为 11mm 。

注射 $25\text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物的病人, 其 1m 处的剂量率低于注射 $4\text{mCi Na } ^{131}\text{I}$ 的病人, 且 I-131 衰变 γ 射线能量较 Tc-99m 高, 故本评价以 I-131 为目标核素对 SPECT 场所周围的附加剂量率水平进行估算。 PET 显像药物均产生 $0.511\text{MeV}\gamma$ 射线, 其中 F-18 使用量最大, 故以 F-18 为目标核素对 PET 场所周围的附加剂量率水平进行估算。

人员附加年受照剂量可由式 (11-19) 计算得到。

$$E=D\times t\times T \quad (11-19)$$

式中: E : 年有效剂量, mSv/a ; D : 计算点的附加剂量率, mSv/h ; t : 受照时间, h/a ; T : 居留因子。

3. 诊疗场所周围不同位置的附加剂量率水平

基于上述源项, 依照公式 (11-1) 和公示 (11-2), 估算高活室、 PET/CT 机房、 PET/MRI 机房、 SPECT 机房、候诊室、留观室周围 (含楼上) 不同位置的最大附加剂量率。不同位置的附加剂量率估算结果见表 11-24 所示。估算点位示意图见图 11-13 所示。



图 11-13 核医学诊疗场所周围附加剂量率估算点位示意图

表 11-24 核医学诊疗场所控制区边界外的附加剂量率估算

场所名称	编号	估算点 (具体位置见图 11-13)	源项	实体屏蔽	距离 (m)	透射系 数	附加剂量 率($\mu\text{Sv/h}$)	备注
治疗室	0	东墙外候诊区	1 名 ^{131}I 治疗 患者(10mCi)	300mm 混凝 土	1.7	$2.15\text{E-}2$	$1.27\text{E-}1$	普通区
	1	顶部 (放射科)			5.3	$2.15\text{E-}2$	$1.30\text{E-}2$	普通区
高活室	2	东墙外候诊区	分装 200mCi ^{18}F 药物	300mm 混凝 土+50mmPb	0.9	$2.25\text{E-}5$	$3.25\text{E-}2$	普通区
	3	北墙外操作廊	分装 200mCi ^{18}F 药物	300mm 混凝 土+50mmPb	2.9	$2.25\text{E-}5$	$3.13\text{E-}3$	监督区
			1 名 ^{131}I 治疗 患者	300mm 混凝 土	4.7	$2.15\text{E-}2$	$1.65\text{E-}2$	
			1 名 ^{18}F 注射 药物患者	300mm 混凝 土	5.8	$1.97\text{E-}2$	$1.58\text{E-}02$	
	4	顶部 (放射科)	分装 200mCi ^{18}F 药物	300mm 混凝 土+50mmPb	3.3	$2.25\text{E-}5$	$2.42\text{E-}3$	普通区
			200mCi 同位 素转运罐	300mm 混凝 土	5.3	$1.97\text{E-}2$	$7.00\text{E-}3$	
注射室	5	顶部 (放射科)	PET 药物注射	300mm 混凝 土	5.3	$1.97\text{E-}2$	$1.89\text{E-}02$	普通区
			$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物注 射			$2.84\text{E-}5$	$3.79\text{E-}6$	
			^{131}I 药物给药			$2.15\text{E-}2$	$1.30\text{E-}2$	
	6	入口防护门外	PET 药物注射	15cm 砌块+ 15cm 砌块 8mmPb	5.5	$1.42\text{E-}1$	$1.27\text{E-}01$	普通区
			$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 药物注 射			$2.10\text{E-}9$	$2.6\text{E-}10$	
			^{131}I 药物给药			$7.87\text{E-}2$	$1.77\text{E-}2$	普通区
SPECT/ CT1 机 房	7	北墙外(控制廊)	1 名 SPECT 检 查给药患者	300mm 混凝 土	4.0	$2.15\text{E-}2$	$3.63\text{E-}02$	监督区
	8	北侧观察窗外	(口服 4mCi 的 I-^{131} 药物)	4mmPb	4.0	$4.30\text{E-}1$	$7.26\text{E-}01$	监督区
	9	北侧防护门外		4mmPb	4.9	$4.30\text{E-}1$	$4.84\text{E-}01$	监督区
	10	南墙外		300mm 混凝 土	5.1	$2.15\text{E-}2$	$2.23\text{E-}02$	控制区

		11	南侧防护门外		4mmPb	5.4	4.30E-1	3.98E-01	控制区
		12	顶部 (放射科)		300mm 混凝土	5.3	2.15E-2	2.07E-02	普通区
		7	北墙外(控制廊)		300mm 混凝土	4.0	2.84E-5	6.66E-06	监督区
		8	北侧观察窗外		4mmPb	4.0	1.00E-4	2.34E-05	监督区
		9	北侧防护门外		4mmPb	4.9	1.00E-4	1.56E-05	监督区
		10	南墙外		300mm 混凝土	5.1	2.84E-5	4.09E-06	控制区
		11	南侧防护门外		4mmPb	5.4	1.00E-4	1.29E-05	控制区
		12	顶部 (放射科)		300mm 混凝土	5.3	2.84E-5	3.79E-06	普通区
	SPECT/ CT2 机房	13	北侧防护门外	1 名 SPECT 检查给药患者 (口服 4mCi 的 I-131 药物)	4mmPb	4.5	4.30E-1	5.73E-01	监督区
		14	北墙外		300mm 混凝土	4.2	2.15E-2	3.29E-02	监督区
		15	北侧观察窗外		4mmPb	4.0	4.30E-1	7.26E-01	监督区
		16	西侧设备间		300mm 混凝土	2.7	2.15E-2	7.96E-02	监督区
		17	南墙外		300mm 混凝土	5.2	2.15E-2	2.15E-02	控制区
		18	南侧防护门外		4mmPb	5.4	4.30E-1	3.98E-01	控制区
		19	顶部 (放射科)		300mm 混凝土	5.3	2.15E-2	2.07E-02	普通区
		13	北侧防护门外	1 名 SPECT 检查给药患者 (注射 25mCi 的 Tc-99m 显像药物)	4mmPb	4.5	1.00E-4	1.85E-05	监督区
		14	北墙外		300mm 混凝土	4.2	2.84E-5	6.04E-06	监督区
		15	北侧观察窗外		4mmPb	4.0	1.00E-4	2.34E-05	监督区
		16	西侧设备间		300mm 混凝土	2.7	2.84E-5	1.46E-05	监督区
		17	南墙外		300mm 混凝土	5.2	2.84E-5	3.94E-06	控制区
		18	南侧防护门外		4mmPb	5.4	1.00E-4	1.29E-05	控制区
		19	顶部 (放射科)		300mm 混凝土	5.3	2.84E-5	3.79E-06	普通区
	PET/CT 机房	20	东墙外 (设备间)	1 名 PET/CT 检查给药患者 (8mCi F-18)	300mm 混凝土	2.8	1.97E-2	6.78E-02	监督区
		21	北侧观察窗外		6mmPb	4.0	5.00E-1	8.44E-01	监督区
		22	北墙外(控制廊)		300mm 混凝土	4.2	1.97E-2	3.02E-02	监督区
		23	北侧防护门外		6mmPb	4.4	5.00E-1	6.97E-01	监督区
		24	西墙外		300mm 混凝土	3.1	1.97E-2	5.53E-02	监督区
		25	南侧防护门外		6mmPb	5.3	5.00E-1	4.81E-01	控制区
		26	南墙外		300mm 混凝土	5.2	1.97E-2	1.97E-02	控制区
		27	顶部 (放射科 DR 机房和患者走廊)		300mm 混凝土	5.3	1.97E-2	1.89E-02	普通区
	PET/ MRI 机房	28	东侧观察窗外	1 名 PET/MRI 检查给药患者 (8mCi F-18)	6mmPb	4.4	5.00E-1	6.97E-01	监督区
		29	东墙外(控制廊)		300mm 混凝土	4.1	1.97E-2	3.16E-02	监督区

	30	东侧防护门外		6mmPb	4.6	5.00E-1	6.38E-01	监督区
	31	南墙外		300mm 混凝土	3.4	1.97E-2	4.60E-02	监督区
	32	顶部放射科医护办公区		300mm 混凝土	5.3	1.97E-2	1.89E-02	普通区
留观室	33	南墙外(人防区域)	2 名 PET 患者和 2 名 SPECT 人员(重点考虑 PET 人员)。	300mm 混凝土	2.5	1.97E-2	1.85E-01	普通区
	34	出口防护门外		8mmPb+6mm 铅屏风	2.3	1.50E-1	7.66E-1	普通区
PET/CT 候诊室	35	南墙外(模拟机房)	3 名 PET/CT 检查患者候诊(8mCi F-18)	300mm 混凝土	3.4	1.97E-2	1.38E-01	控制区
	36	顶部(CT 机房)		300mm 混凝土	5.3	1.97E-2	5.68E-02	普通区
PET/MRI 候诊室	37	南墙外(设备间)	2 名 PET/MRI 检查患者候诊(8mCi F-18)	300mm 混凝土	3.4	1.97E-2	9.20E-02	监督区
	38	南墙外(后装机机房)		800mm 混凝土	3.4	2.8E-5	1.31E-04	控制区
	39	顶部(胃肠机机房和病人苏醒间)		300mm 混凝土	5.3	1.97E-2	3.79E-02	普通区
SPECT/CT 候诊室	40	南墙外(CT 模拟机)	8 名 SPECT/CT 检查患者候诊(4mCi 的 I-131 显像)	300mm 混凝土	1.5	2.15E-2	5.20E-1	控制区
	41	顶部(放射科候诊区)		300mm 混凝土	5.3	2.15E-2	4.16E-2	普通区
	40	南墙外(CT 模拟机)	8 名 SPECT/CT 检查患者候诊(25mCi 的 Tc-99m 显像)	300mm 混凝土	1.5	2.84E-5	3.79E-04	控制区
	41	顶部(放射科)		300mm 混凝土	5.3	2.84E-5	3.03E-05	普通区
废物间	42	南墙外(CT 模拟机)	4 桶放射性废物	300mm 混凝土	1.0	2.15E-2	4.83E-3	控制区
	43	东墙外(候诊大厅)		300mm 混凝土	1.0	2.15E-2	4.83E-3	普通区
	44	顶部(放射科)		300mm 混凝土	5.3	2.15E-2	1.72E-4	普通区

可见, 本项目运行后, 核医学诊疗场所的控制区边界外(四周)的附加剂量率水平低于 0.86 μ Sv/h(废物间东墙), 楼上放射科用房的附加剂量率低于 0.056 μ Sv/h。PET/CT 机房周围的附加剂量率低于 0.84 μ Sv/h(观察窗处), PET/MRI 机房周围的附加剂量率低于 0.70 μ Sv/h(观察窗处), SPECT/CT 机房周围的附加剂量率低于 0.73 μ Sv/h(观察窗处), 均满足 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制要求。

本项目 SPECT/CT、PET/CT 机房墙体、顶棚、地板、观察窗和防护门采取的辐射屏蔽措施均大于 4mm 铅当量, 满足《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)给出的 2.5mm 铅当量防护要求, 机房面积和单边长度也分别满足 20m² 和 3.5m 的要求, 可以预计, SPECT/CT 和 PET/CT 设备的 CT 装置运行时, 机房周围剂量率水平将保持在正常本底水平, 对环境几乎没有辐射影响。

4. 诊疗场所周围公众受照剂量估算

核医学科实行每日一班制，全年工作 250d。根据表 11-22 所列最大工作负荷进行剂量估算。假设：

1) 每年 SPECT 检查最大人数为 11800 人次，扫描时间平均为 20min/人次，按照 2 台 SPECT 均担工作量的模式，每间机房内受检者的停留时间约为 1967h（碘 131 扫描患者停留时间 150h），SPECT 候诊室内人员的停留时间为 1967h（碘 131 扫描患者停留时间 150h）。扫描后每人留观 10min，则留观室内受检人员留观时间约 983h（碘 131 扫描患者留观时间 100h）。

2) 每年 PET/CT 检查最大人数为 10650 人次（PET 诊断总人数的 75%）。PET/CT 的扫描时间平均为 15min/人次，则 PET/CT 机房内患者停留时间约为 2662h，每人留观 10min，留观室内的年留观时间为 1775h。

3) 每年 PET/MRI 检查最大人数为 3550 人次（PET 诊断总人数的 25%）。PET/MRI 的扫描时间（PET 和 MRI）平均为 40min/人次，则 PET/MRI 机房内患者停留时间约为 2367h，每人留观 10min，留观室内的年留观时间为 592h。

4) 每人次的药物注射/口服时间为 30s/人。注射室全年注射 SPECT 药物总时间为 98.3h（其中注射低能 ^{99m}Tc 和 ^{123}I 药物时间为 93.3h，口服 ^{131}I 时间为 5h）。注射 PET 药物总时间为 118.3h。治疗室内给药总时间为 11.25h（其中 ^{131}I 口服给药时间为 4.2h）。

5) 高活室通风橱内每天进行 PET 药物分装操作时间为 1h，全年累计分装时间为 250h。

表 11-25 给出了核医学诊疗场所周围停留公众可能的受照剂量估算结果，可见，控制区边界外公众的外照射受照剂量最多为 $85\ \mu\text{Sv/a}$ （出口防护门外），其次为 $44.7\ \mu\text{Sv/a}$ （楼上放射科医护人员办公室），均低于本项目设定的 0.1mSv/a 的公众剂量约束值。

表 11-25 核医学诊疗场所所致公众外照射剂量估算

场所名称	编号	估算点 (见图 11-13)	源项	附加剂量 率($\mu\text{Sv/h}$)	总时间 (h/a)	居留 因子	受照剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)
治疗室	0	东墙外候诊区	1 名 ^{131}I 治疗患者 (10mCi)	1.27E-1	11.25	1/4	3.57E-01
	1	顶部(放射科)		1.30E-2	11.25	1	1.46E-01
高活室	2	东墙外候诊区	分装 200mCi ^{18}F 药物	3.25E-2	250	1/4	2.03E+00
	4	顶部(放射科)	分装 200mCi ^{18}F 药物	9.42E-3	250	1	2.36E+00
			200mCi 同位素 转运罐				
注射室	5	顶部(放射科)	PET 药物注射	1.89E-02	118.3	1	2.29E+00
			^{99m}Tc 药物注射	3.79E-6	93.3	1	
			^{131}I 药物口服	1.30E-2	4.2	1	

	6	入口防护门外	PET 药物注射	1.27E-01	118.3	1/16	9.44E-01
			^{99m} Tc 药物注射	2.6E-10	93.3	1/16	
			¹³¹ I 药物口服	1.77E-2	4.2	1/16	
SPECT/CT1 机房	12	顶部(放射科)	I-131 显像	2.07E-02	150	1	3.11E+00
		顶部(放射科)	Tc-99m 显像	3.79E-06	1817	1	6.89E-03
SPECT/CT2 机房	19	顶部(放射科)	I-131 显像	2.07E-02	150	1	3.11E+00
		顶部(放射科)	Tc-99m 显像	3.79E-06	1817	1	6.89E-03
PET/CT 机房	27	顶部(放射科 DR 机房和患者走廊)	PET/CT 扫描	1.89E-02	2662	1/4	1.25E+01
PET/MRI 机房	32	顶部放射科医护办公区	PET/MRI 扫描	1.89E-02	2367	1	4.47E+01
留观室	33	南墙外 (人防区域)	2 名 PET 和 2 名 SPECT 患者	1.85E-01	1775	1/16	2.05E+01
	34	出口防护门外		7.66E-1	1775	1/16	8.50E+01
PET/CT 候诊室	36	顶部 (放射科 CT 机房)	3 名患者候诊	5.68E-02	2662	1/4	3.77E+01
PET/MRI 候诊室	39	顶部(胃肠科机和患者苏醒室)	2 名患者候诊	3.79E-02	2367	1/4	2.24E+01
SPECT/CT 候诊室	41	顶部(放射科)	8 名患者候诊 (I-131 显像)	4.16E-2	150	1	6.24E+00
		顶部(放射科)	8 名患者候诊 (Tc-99m 显像)	3.03E-05	1817	1	5.51E-02
废物间	43	东墙外 (候诊大厅)	4 桶放射性废物	4.83E-3	2000	1/4	2.42E+00
	44	顶部(放射科)		1.72E-4	2000	1	3.44E-01

5. 核医学诊疗场所辐射工作人员受照剂量估算

医院核医学科的注射人员相对固定，轮流开展 SPECT、PET 药物和治疗药物注射/给药工作。技师轮流操作 SPECT、PET/CT 和 PET/MR 扫描设备。假设：

1) 按照最大工作负荷，核医学科将至少配备药物注射/给药人员 2 名，操作 SPECT、PET/CT 和 PET/MR 扫描设备的技师 8 名，每周轮换。

2) SPECT、PET 药物和治疗药物给药时间均为 30s/人次。

3) SPECT/CT 和 PET/CT 摆位时间 30s/人次，摆位距离 1m。^{99m}Tc 患者摆位时间 93.3h，¹³¹I 患者摆位时间 5h。PET/CT 患者摆位时间 118.3h。

工作人员受照剂量按照淋洗、标记、分装、注射、摆位和扫描等环节进行估算。按照最大工作负荷估算，核医学诊疗场所辐射工作人员的年受照剂量估算结果见表 11-26。

表 11-26 核医学科诊疗场所工作人员受照剂量估算

辐射工作人员岗位	源项情况	剂量当量率 (μSv/h)	累计总工作时间(h)	轮流人数 (人)	受照剂量 (mSv/a)
药物分装	¹⁸ F 等 PET 药物，以及治疗药物	2.5	250	2	0.82
药物注射/给药	^{99m} Tc 等	2.4	93.3	2	
	¹³¹ I	2.4	5	2	

	^{18}F 等	6	118.3	2	1.64
	治疗药物 (^{131}I 计)	6	11.25	2	
SPECT 摆位	^{131}I	6.8	5	8	
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等	3.75	93.3	8	
SPECT 扫描	^{131}I	7.26E-01	150	8	
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等	2.34E-05	1817	8	
PET/CT 摆位	^{18}F 等, 1m 处	27	118.3	8	
PET/CT 扫描	^{18}F 等, 控制室	8.44E-01	2662	8	
PET/MR 摆位	^{18}F 等, 0.5m 处	108	29.58	8	
	^{18}F 等, 1m 处	27	88.75	8	
PET/MR 操作	^{18}F 等, 控制室	6.97E-01	2367	8	

可见, 核医学科在最大工作负荷情况下, 2 名专职注射人员的年受照剂量为 0.82mSv, 8 名从事核医学科显像工作的技师年受照剂量为 1.64mSv, 均低于本项目为辐射工作人员设定的 5mSv/a 的剂量约束值。

11.5.2 制备放射性药物环境影响分析

(一) 药物制备场所的布局和分区

药物制备场所布置于门诊部 D 区地下二层西侧。机房西侧是土层, 北侧楼梯/电梯间, 东侧是设备间、通道和控制室, 南侧紧邻放化室 (合成分装时)。机房上方是 PACS 机房和排风机房, 下方是土层。回旋加速器机房周围环境位置见附图 15 所示, 机房建筑设计布局情况见图 11-1。

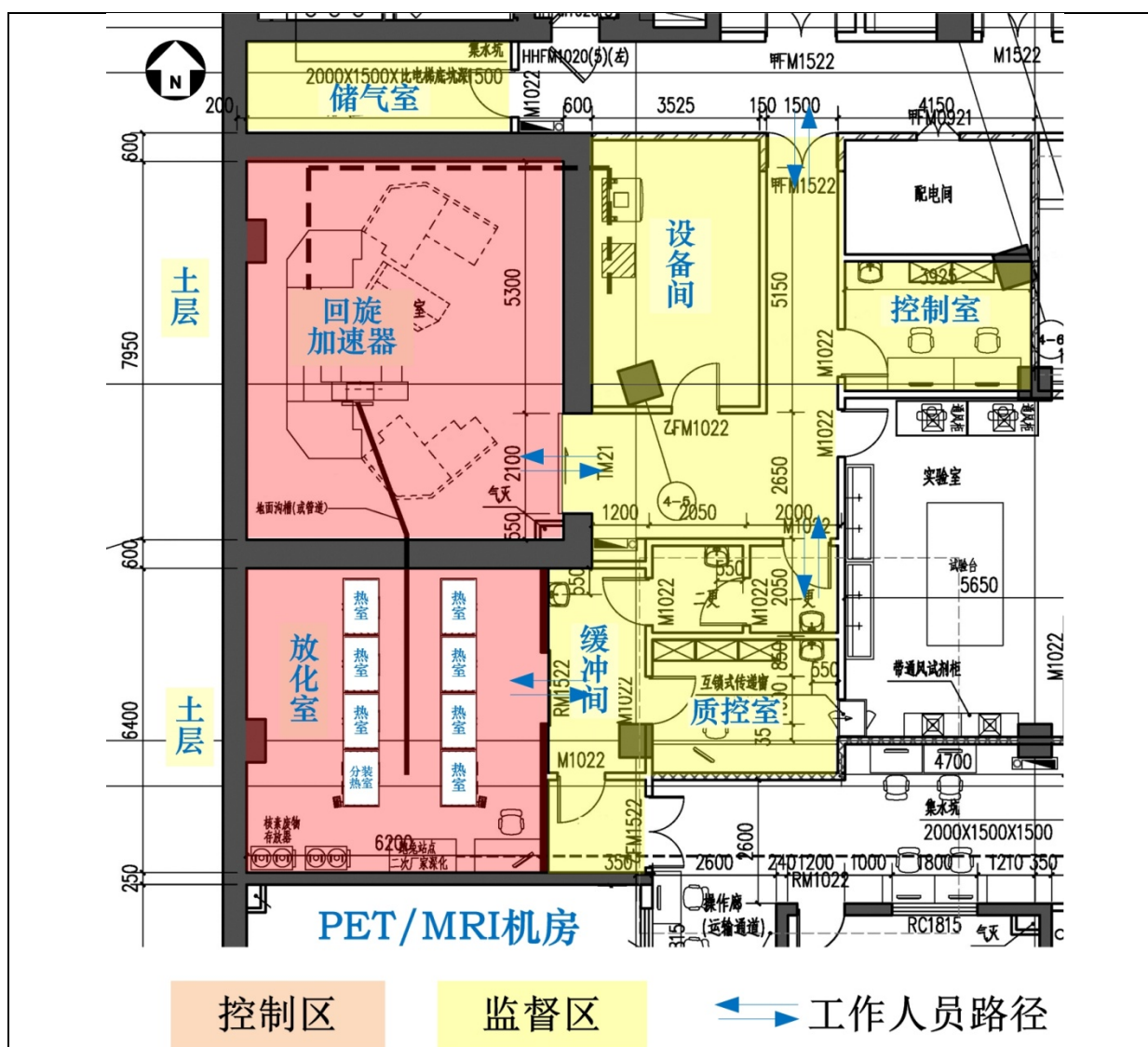


图 11-14 药物制备场所的布局、分区和人员路径示意图

药物制备场所实行分区管理，其中，回旋加速器机房、放化室作为控制区进行管理，严格限制非工作人员进入。控制室、缓冲间、设备间、储气室和质控室作为监督区进行管理，限制无关人员进入。具体分区情况如图 11-11 所示。

(二)放射性药物制备场所工作流程及路径

1. 回旋加速器制备放射性药物工作流程

根据诊疗场所和药物实验场所需要，确定利用回旋加速器制备 PET 药物的种类和数量——→调试回旋加速器至工作状态——→填充靶——→打靶——→传输正电子核素至放化室合成热室——→标记合成 PET 药物 ——→质检合格——→分装 PET 药物——→诊疗场所和药物实验场所使用。

2. 核素发生器制备药物流程

根据诊疗场所和药物实验场所需要，确定利用核素发生器制备药物的种类和数量

——→淋洗核素——→标记合成放射性药物 ——→质检合格——→分装——→诊疗场所或药物实验场所使用。

3. 药物制备人员工作流程

药物制备人员乘北侧医护专用电梯到达地下二层——→在更衣室更换鞋和工作服后进入药物制备区域——→开展放射性药物制备（回旋加速器制备、核素发生器制备）、分装工作——→放射性药物转移至使用场所（诊疗场所和药物实验场所）——→工作结束，在更衣室更换工作服、工作鞋，离开核医学科。

4. 放射性药品转移

回旋加速器制备的 ^{18}F 、 ^{11}C 等正电子核素——→由地下管沟敷设的毛细管气动传输至放化室合成热室内贮瓶——→在合成热室中自动完成标记和合成——→传输至分装热室——→分装热室内分装——→防护罐内——→经质控室互锁式传递窗转移至药物实验场所，或经“跑兔”装置转移至诊疗场所的高活室。

核素发生器制备的放射性核素——→人工转移至标记和合成装置——→分装转移至防护罐——→经质控室传递窗转移至药物实验场所，或经“跑兔”装置转移至诊疗场所的高活室。

5. 放射性废物转移路线

放射性废物：

1) 合成热室和分装热室内均设置一个含 20mm 铅的废物桶（1L）——→存放放射性废物——→按日期于次日早晨转移至废物桶——→放化室设置 2 个含 20mm 铅的废物桶（20L），轮流暂存放射性废物——→放置 30d 后按照 A 类放射性废物解控为医疗废物处置——→详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括废物分类、所含核素名称，重量，暂存起止时间，表面污染和辐射剂量自测结果，废物处置日期，处置操作人员，废物去向，部门审核人员等内容。

2) 回旋加速器机房内设置一个含 20mm 铅的废物桶（10L）——→存放废弃的靶箔片和真空箔片等——→放置一年，送交城市放射性废物库。

废旧核素发生器：新发生器到货时——→将旧发生器从热室内取出——→由供货方直接回收。

6. 放射性废水暂存和排放流程

放化室合成放射性药品时产生的少量放射性废水，缓冲间清洁废水（洗手和拖地）以及回旋加速器事故情况排放的冷却水——→地下二层专用积水坑——→污泵房——→

放射性废水衰变池暂存——→定期排至医院污水处理站处理——→市政污水官网。

7. 放射性废气收集与排放流程

药物制备区域共计有 7 套通风系统，废气经管道组织，由管道井延伸至楼顶排放。具体如下：

1) 回旋加速器机房——→独立通风系统——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放；

2) 放化室——→独立净化空调通风系统——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放；

3) 放化室 6 个合成热室——→3 套独立通风系统——→2 级高效过滤器——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放；

4) 放化室 2 个分装热室——→1 套独立通风系统——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放；

5) 控制室、走廊、质控室——→与小动物实验室共用 1 套通风系统——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放。

通风系统要求：1) 独立排风系统的通风量不低于 2500m³/h，热室和回旋加速器机房内保持负压；2) 热室安装高效过滤器，过滤效率大于 99.97%（对粒径大于 0.3μm 的气溶胶）；排风系统中放置活性炭过滤器，过滤效率不小于 90%；3) 与药物实验室合用排风系统的房间内拟设置止回阀，防止气流的逆向流通；4) 排气口设在门诊部 D 区顶部，达到国家标准要求。

（三）药物制备场所“三废”产生量预测

（1）放射性制药场所使用规划

本项目使用 1 台 GE 公司 Qilin 型回旋加速器，主要生产放射性核素 ¹⁸F，同时也生产 ¹³N、¹¹C 和 ¹⁵O，制备 PET 放射性药物。该回旋加速器质子能量最大为 10MeV，束流最大 70μA，¹⁸F 产率为 74GBq/h。预计本项目投入使用后，每个开机打靶不超过 2h（药物制备场所使用规划见表 9-2），全年开机日为 250d，累计出束时间 500h/a。

（2）放射性固废产生和处置

回旋加速器运行期间产生的放射性固废，主要是厂家定期维持设备时更换下来的靶箔片和真空箔片，其次是科室自行更换下来的窗膜等，年产生量约 200g。

回旋加速器设备发生严重故障时，有可能需要更换靶窗、支撑部件、靶体准直器等部件，会产生活化水平较高的放射性固体废物。此外，加速器冷却水系统定期更换离子

交换树脂时，也会产生少量放射性废物。总量不足 10kg。

上述被活化的放射性废物，暂存于铅制废物罐内暂存。暂存至少一年后，请有资质单位进行监测，如满足解控管理要求，作为普通废物处置。反之，送交北京市城市放射性废物库暂存。

放化室在合成放射性药物时会产生一定量的放射性固体废物，主要是一次性合成装置的各种部件，如产品收集瓶、三通阀、单向阀、连接管材、穿刺针、同位素交换反应柱、无菌滤膜等。根据对解放军总医院核医学科的实际调查，放射性废物每周的产生量约 1kg，年产生量约 50kg。上述废物将收集于放化室设置的废物桶内，暂存 30d 后，依照《北京市生态环境局办公室关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》（京环办〔2018〕13 号）管理要求解控为普通废物进行处置，同时做好台帐记录。

(3) 放射性废水产生和处置

回旋加速器正常运行时，不产生放射性废液。回旋加速器的冷却水，特别是靶周围的冷却水受中子照射可以活化，但冷却水循环使用不排放。在设备故障更换靶部件时，需排放冷却水，产生量低于 50L。

综合考虑，正常情况下，放射性药物制备场所，每天废水产生量约 10L。通过药物制备场所缓冲间洗手池排水、回旋加速器机房地漏排水，均汇入核医学科放射性废水衰变池，与核医学科其它废水一并处置。

(4) 放射性废气产生和处置

1. 回旋加速器运行产生的放射性活化气体

回旋加速器运行时，产生的中子与自屏蔽体内空气以及加速器机房内的空气相互作用产生感生放射性气体，主要为 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{11}C 和 ^{41}Ar 。自屏蔽体外，中子当量剂量率大幅降低，中子导致机房内空气活化的份额可忽略不计。

本项目使用的回旋加速器，配备有 1 套废气滞留系统：自屏蔽体内放射性废气的滞留时间约 200min，其中 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 几乎衰减完毕，故有少量的 ^{41}Ar 排放。本项目为回旋加速器机房单独设置了排风系统，含有少量活化气体的空气经排风系统组织在门诊部 D 区顶部排放（高度 23m）。

2. 放射性药物合成过程释放的放射性气溶胶

制备含 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{68}Ga 和 ^{188}Re 药物，均在合成热室内完成。合成过程中可能有少量含放射性气溶胶逸出。放化室全部的热室均设置了独立排风系统，废气经管道组织由竖井升至门诊部 D 区屋顶。热室少量气溶胶经热室设置的高效过滤器净化

后，再经屋顶过滤器净化后排放。

（四）辐射环境影响

回旋加速器可制备 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{13}N 和 ^{15}O ，但以 ^{18}F 为主。核素发生器可制备 ^{68}Ga 和 ^{188}Re ，以 ^{68}Ga 为主，且 ^{68}Ga 释放 γ 射线能量高。故以 ^{18}F 和 ^{68}Ga 为例，分析预测药物制备场所周围环境的贯穿辐射水平，以及工作人员和周围公众的受照剂量。

（1）制备场所的实体屏蔽设计方案

根据设计单位（中国中元国际工程有限公司）提供图纸整理，药物制备场所的辐射实体屏蔽方案如表 11-28 所示

表 11-28 回旋加速器机房屏蔽材料和厚度

机房名称	屏蔽	设计厚度（mm）
回旋加速器机房 (7.95m×6.67m×5.1m)	西墙	500 混凝土
	北墙、东墙和南墙	600 混凝土
		700 混凝土
	地板	700 混凝土
	顶板	500 混凝土+400mm 回填土
	防护门	12cm 聚乙烯（含硼 5%）以及 30mmPb 和 6mm 铁复合防护门
放化室 (6.4×6.17m×5.1m)	西墙	500 混凝土
	北墙	600 混凝土
	东墙	200 混凝土
	南墙	250 混凝土
	地板	700 混凝土
	顶板	500 混凝土+400mm 回填土
	防护门	10mmPb 和 6mm 铁复合防护门

（2）辐射环境影响预测

1. 剂量估算源强

1) 回旋加速器自屏蔽体外的辐射水平：根据“图9-11回旋加速器自屏蔽体外等剂量曲线：设备在最大功率（10MeV/70 μA ）运行时，设备周围距离其表面1m处辐射剂量当量率最大值不超过50 $\mu\text{Gy/h}$ ，其中中子当量剂量率约13 $\mu\text{Sv/h}$ ， γ 射线约为35 $\mu\text{Sv/h}$ 。

2) 根据设备厂家资料，Qilin型回旋加速器外型尺寸为3.6 m × 2.1 m × 2.1 m（长×宽×高）。设4个靶位，呈垂直分布。设备摆放后与机房内表面距离分别为2.2m(南墙)和0.8m(西墙)。等效中心距离设备自屏蔽体外表面分别为1.4m（南侧）和1.1m（西侧）。

2. 估算方法

采用 NCRP51 报告推荐的方法和参数，依据设备厂家给出的自屏蔽体外等剂量曲线

数据，计算回旋加速器机房周围附加剂量率水平。计算公式见下式。

$$H_R = \left(\frac{\gamma_0}{R}\right)^2 \times (H_n \times 10^{-\frac{X}{T_n}} + H_r \times 10^{-\frac{X}{T_r}}) \quad (11-27)$$

式中： H_R —估算点的剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)； γ_0 —从等效中心到自屏蔽体外关注点的距离(m)； R —从等效中心到估算点的距离(m)； X —屏蔽墙厚度(cm)； H_n —自屏蔽体外关注点的中子剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)； H_r —自屏蔽体外关注点的 γ 剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)； T_n —中子 1/10 层厚度(cm)， T_r — γ 射线 1/10 层厚度(cm)，数值见表 11-1 所示。

屏蔽计算中采用的参数如表 11-29 所示。

表 11-29 屏蔽计算中采用的参数*

材料名称	密度 (g/cm^3)	TVL_γ (8MeV) (cm)	TVL_n (5MeV) (cm)
混凝土	2.35	38 40**	43 27**
铅	11.3	5	47.8
聚乙烯	0.97	80	24
铁	7.85	10	37

注：*数据来自 NCRP 51 号出版物，1977。**为厂家设备说明材料中数据

采用 γ 射线剂量率点源公式，计算放化室周围的附加剂量率水平，公式如下：

$$H = \frac{A}{R^2 k} \times \Gamma \quad (11-28)$$

式中： H —周围剂量当量率常数，($\mu\text{Sv/h}$)； A —源活度(MBq)； Γ —照射量率常数，对 ^{18}F ， $\Gamma=0.163 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / \text{h} \cdot \text{MBq}$ ； R —计算点距源距离(m)； k —屏蔽减弱倍数。计算衰减系数时， ^{18}F 在混凝土中的 TVL 取 176mm，在 Pb 中的 TVL 取 16.6mm。

3. 回旋加速器机房周围不同位置的附加剂量率水平

回旋加速器运行时机房周围辐射剂量率附加值和人员所接受的年有效剂量估算结果，列于表 11-30，剂量估算点见图 11-15 所示。

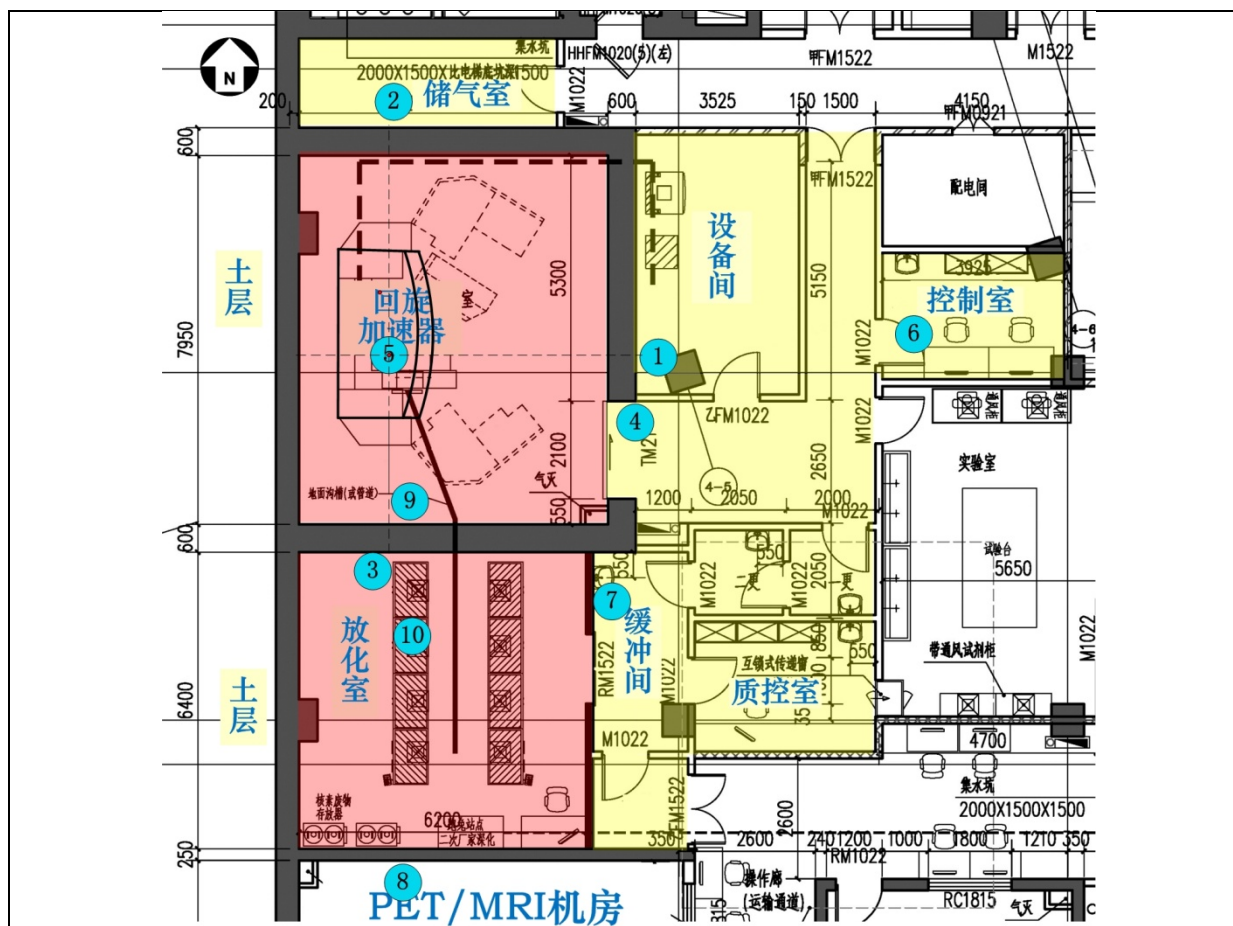


图 11-15 药物制备场所剂量估算点位示意图

表 11-30 回旋加速器机房周围辐射剂量率及人员受照剂量估算表

点位编号 (见图 11-15)	预测位置描述	γ_0 (μ Sv/h)	R, 距离 (m)	X, 屏蔽层材料和 厚度	剂量当量率 (μ Sv/h)
1	回旋机房东侧 30cm 处 (设备间)	2.15	5.4	60cm 砼	0.22
2	回旋机房北侧墙外 30cm 处 (储气室)	3.2	5.0	60cm 砼	0.59
3	回旋机房南侧墙外 30cm 处 (放化室)	2.2	4.3	60cm 砼	0.38
4	回旋机房防护门外 30cm (通道)	2.0	4.9	12cm 聚乙烯 (含 硼 5%) 以及 30mmPb 和 6mm 铁的复合防护门	0.69
5	回旋机房楼上 30cm 处 (PACS 机房)	1.9	5.6	60cm 砼 + 40cm 回填土	0.031
6	控制室内	2.15	11.6	60 砼	0.050

由表 11-29 预测结果可知，回旋加速器运行时机房周围的剂量当量率最高为 0.69 μ Sv/h，低于设定的 2.5 μ Sv/h 剂量率控制水平，满足要求。

4. 放化室周围不同位置的附加剂量率水平

加速器照射后的靶材料利用毛细管通过地下管沟（上盖 50mm 厚铅砖）输送至热室内，由化学自动处理模块进行分离、纯化、标记等工艺制成 PET 显像药物，然后在分装工作箱内进行药品分装，再供临床和实验使用。在正常情况下，照射 1h 可生产 74GBq 的 ^{18}F ，经化学合成衰减后制取 $\sim$ 37GBq（50%）的 ^{18}F -FDG。

药物制备在合成热室内自动完成。拟配置的合成热室正面铅防护（ $\geq 70\text{mmPb}$ 铅当量），其余五面屏蔽 $\geq 60\text{mmPb}$ ，铅玻璃观察窗相当于 70mmPb 铅当量。

分装工作在分装热室内人工完成。拟配置的分装热室屏蔽层采用铅正面铅防护 $\geq 60\text{mmPb}$ 铅当量，其余五面屏蔽 $\geq 50\text{mmPb}$ ，铅玻璃观察窗相当于 60mmPb 铅当量。

表 11-31 放化室周围辐射剂量率水平*

点位编号 (见图 11-15)	预测位置描述	源项	R, 距 离 (cm)	X, 屏蔽层材料 和厚度	屏蔽系数	附加剂量率 (μ Sv/h)
7	放化室东侧墙外 30cm 处（缓冲间）	合成 ^{22}Na 的 PET 药物。 裸源 1m 处剂量 率为 10.5mSv/h	2.0	70mmPb+ 20cm 砼	4.43E-6	1.15E-02
8	放化室南侧墙外 30cm 处(PET/MRI)		2.2	60mmPb+ 25cm 砼	9.23E-6	1.98E-02
9	放化室北侧墙外 30cm 处（回旋机 房）		1.4	60mmPb+ 60cm 砼	9.47E-8	5.02E-04
10	楼上 30cm 处(排风 机房)		5.3	60mmPb+ 60cm 砼+ 40cm 回填土	2.15E-9	7.96E-07
11	合成热室正面 30cm 处	合成热室内合成 ^{22}Na 的 PET 药物。 药液周围 10mmPb 局部屏 蔽。裸源 1m 处 剂量率为 10.5mSv/h	0.5	70mmPb10mm Pb 局部	1.52E-5	6.38E-01
12	合成热室侧面 30cm 处		0.8	60mmPb+ 10mmPb 局部	6.07E-5	9.96E-01
13	合成热室顶部 30cm 处		1.5	60mmPb	2.43E-4	1.13E-00
14	分装热室正面 30cm 处	分装 ^{22}Na 的 PET 药物。转运罐 40mmPb, 顶部屏 蔽盖打开。裸源 1m 处剂量率 0.52mSv/h。	0.5	60mmPb+ 40mmPb	9.46E-7	1.99E-02
15	分装热室侧面 30cm 处		0.8	50mmPb+ 40mmPb	3.79E-6	3.11E-02
16	分装热室顶部 30cm 处		1.5	50mmPb	9.72E-4	2.27E-00
17	药物转运	40mmPb 转运 罐，盛装 200mCi 的 PET 药物。	0.3	40mmPb	3.89E-3	4.5E+01

由表 11-30 预测结果可知：1) 放化室内合成和分装 PET 放射性药物时，其对周围环境的辐射影响很小，附加剂量率贡献低于 0.02 μ Sv/h。2) 热室内合成 PET 药物时，四周附加剂量率最高 1 μ Sv/h（手套孔关闭情况），顶部为 1.13 μ Sv/h。3) 分装热室内分装 PET 药物时，四周附加剂量率最高 0.03 μ Sv/h（操作口关闭情况），顶部为 2.27 μ Sv/h（转运罐顶部屏蔽盖打开情况）。上述估算结果均满足本项目设定的 2.5 μ Sv/h 的剂量率控制水平。

放化室内还使用核素发生器制备 Ga-68 和 Re-188 放射性药物。Ga-68 每次淋洗量不足 100mCi，Re-188 每次淋洗量不足 50mCi，远低于回旋加速器的制备量。此外，Ga-68 γ 能量与 F-18 相同，都为 511keV，Re-188 γ 能量仅为 227keV。比较而言，放化室和热室能够满足回旋加速器制备药物的屏蔽要求，一定能够满足核素发生器淋洗放射性药物的屏蔽要求。

5. 药物制备场所周围公众受照剂量估算

药物制备场所全年运行 250d，周围停留的公众可能受到回旋加速器和放化室泄漏辐射的照射。依照表 11-22 所列最大工作负荷，假设回旋加速器每天打靶总计 2h（包括 F-18 和其它核素），放化室内合成、分装时间不超过 2h/d（含核素发生器制药），公众年受照剂量估算结果如表 11-32 所示，可见制药场所周围公众受照剂量最大为 18 μ Sv/a，楼上为 PACS 机和排风机房，没有人员常居留，人员受照剂量为 3.9 μ Sv，均满足本项目设定的 100 μ Sv/a 的剂量约束要求。

表 11-32 药物制备场所运行所致公众外剂量估算

点位编号 (见图 11-15)	估算点位置	源项	附加剂量 当量率 (μ Sv/h)	运行总时间	居留因子	年受照剂量 (μ Sv/a)
1	回旋机房东侧 30cm 处 (设备间)	10MV, 70 μ A 运行。	0.22	500	1/16	6.9E+00
2	回旋机房北侧墙外 30cm 处 (储气室)		0.59	500	1/16	1.8E+01
5	回旋机房楼上 30cm 处 (PACS 机房)		0.031	500	1/4	3.9E+00
7	放化室南侧墙外 30cm 处 (PET/MRI)	合成 ^{21}C i 的 PET 药物。	1.98E-02	500	1/16	6.2E-01
10	楼上 30cm 处 (排风机 房)		7.96E-07	500	1/4	1.0E-04

综合放射性气体对公众的影响，公众最大受照剂量如表 11-33 所示。

表11-33 药物制备场所公众受照剂量 ($\mu\text{Sv/a}$) 汇总

加速器机房 泄漏辐射	浸没外照射	吸入内照射	合计
18	1	0.06	19

6. 药物制备场所职业人员受照剂量估算

药物辐射工作人员从事的工作包括：操作回旋加速器打靶制备正电子核素，利用热室和自动合成装置进行 PET 药物的合成与分装，然后将放射性药物转运至使用场所。除此而外，辐射工作人员还要负责回旋加速器的日常维护等工作。

假设回旋加速器每天打靶总计 2h（包括 F-18 和其它核素），放化室内合成、分装时间不超过 2h/d（含核素发生器制药），使用回旋加速器以及合成、分装放射性药物的辐射工作人员受照剂量见表 11-34 所示。

分装好的放射性药物，盛装在转运铅罐内，搬至传递窗传递到药物实验室，或置入“跑兔”装置内传递到核医学科诊疗场所。假设每天搬运转运罐 4 次，每次 0.5min，全年受照剂量约 $370 \mu\text{Sv}$ 。

窗膜的更换和靶材料填装由核医学科工作人员自行完成，该环节也是工作人员受照剂量的重点来源。为了有效降低活化的辐射影响，核医学科计划在打靶后的次日早上开展上述工作，且采用剂量率仪表监测辐射水平，确保操作位的剂量率水平低于 $15\mu\text{Sv/h}$ 。窗膜每年更换约 25 次，每次所需时间约 1min，机房内总停留时间约 10min。每年装载（注射）靶水约 50 次，每次所需时间保守按 5min 计。该环节每年受照剂量约 $125 \mu\text{Sv}$ 。

回旋加速器的定期维护需要更换氦冷窗膜片(HAVA 膜)，每年最多4次。该处活化水平较高，10cm 处的剂量率可达 0.75mSv/h （离子源末端最大值）。预计每次更换时间 30s，则换HAVA膜人员的年受照剂量为 $25 \mu\text{Sv/a}$ 。

表 11-34 药物制备场所运行所致辐射工作人员剂量估算

点位编号 (见图 11-15)	估算点位置	源项	附加剂量 当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	运行总时 间 (h/a)	居留因子	年受照剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)
1	回旋机房东侧 30cm 处(设 备间)	10MV, 70 μA 运行。	0.22	500	1/16	6.9E+00
2	回旋机房北侧墙外 30cm 处(储气室)		0.59	500	1/16	1.8E+01
3	回旋机房南侧墙外 30cm 处(放化室)		0.38	500	1/4	4.8E+01
4	回旋机房防护门外 30cm(通道)		0.69	500	1/16	2.2E+01
6	控制室内		0.050	500	1	2.5E+01

7	放化室东侧墙外 30cm 处 (缓冲间)	合成 2Ci 的 PET 药物。	1.15E-02	500	1/16	3.6E-01
9	放化室北侧墙外 30cm 处 (回旋机房)		5.02E-04	500	1/16	1.6E-02
11	合成热室正面 30cm 处	合成热室内 合成 2Ci 的 PET 药物。	6.38E-01	500	1	3.2E+02
14	分装热室正面 30cm 处	分装 1Ci 的 PET 药物。	1.99E-02	500	1	1.0E+01
15	药物转运	转运罐搬至 传递窗或者 跑兔装置。 每次 0.5min, 每 日 3 次。	4.5E+01	8.33	1	3.7E+02
16	更换靶膜和装靶	靶水更换 1 次/周, 靶膜 更换	15	8.33	1	125
		更换 HAVA 膜	750	0.033	1	25
17	药物质检	每天质检 2 次。	1	41.6	1	41.6
合计						1010

综上所述,回旋加速器辐射工作人员的年受照剂量约 1mSv/a,满足本项目设定的 5mSv/a 的剂量约束要求。

由于放射性药物制备是全自动的,工作人员在热室旁停留时间远小于 500h,此外,上述剂量估算中没有考虑同位素衰减,所以计算结果是偏保守的,预计辐射工作人员的年受照剂量能够控制在 1mSv/a 内。

综合分析,在制备放射性药物过程中,加速器运行控制人员和药物合成、质检人员受照剂量低于 1 mSv/a,均低于本环评建议的剂量约束值 5mSv/a 要求;周围公众受照射剂量为 0.019mSv/a 满足相应评价剂量约束限值 0.1mSv/a 要求。可见,本项目辐射屏蔽和控制放射性气载性流出物排放措施基本可行,项目运行产生的放射性污染,对周围环境影响较小。

11.5.3 药物实验场所环境影响分析

(一) 诊疗场所的布局和分区

核医学药物实验室设在门诊部地下二层的西侧(位置见附图 7),其东侧为净化机房和普通办公区,南侧为设备控制廊,西侧为普通实验室,之外是质检室和放化室更衣区,北侧是战士水箱间。楼上为核磁机房,地下为土层。药物实验室布局见图 11-16 和附图 16。

诊疗场所辐射工作场所实行分区管理。其中,动物实验室、小动物显像室和控制室

均作为控制区进行管理，严格限制非工作人员进入。实验室和细胞室作为监督区进行管理，限制无关人员进入。具体分区情况如图 11-16 所示。

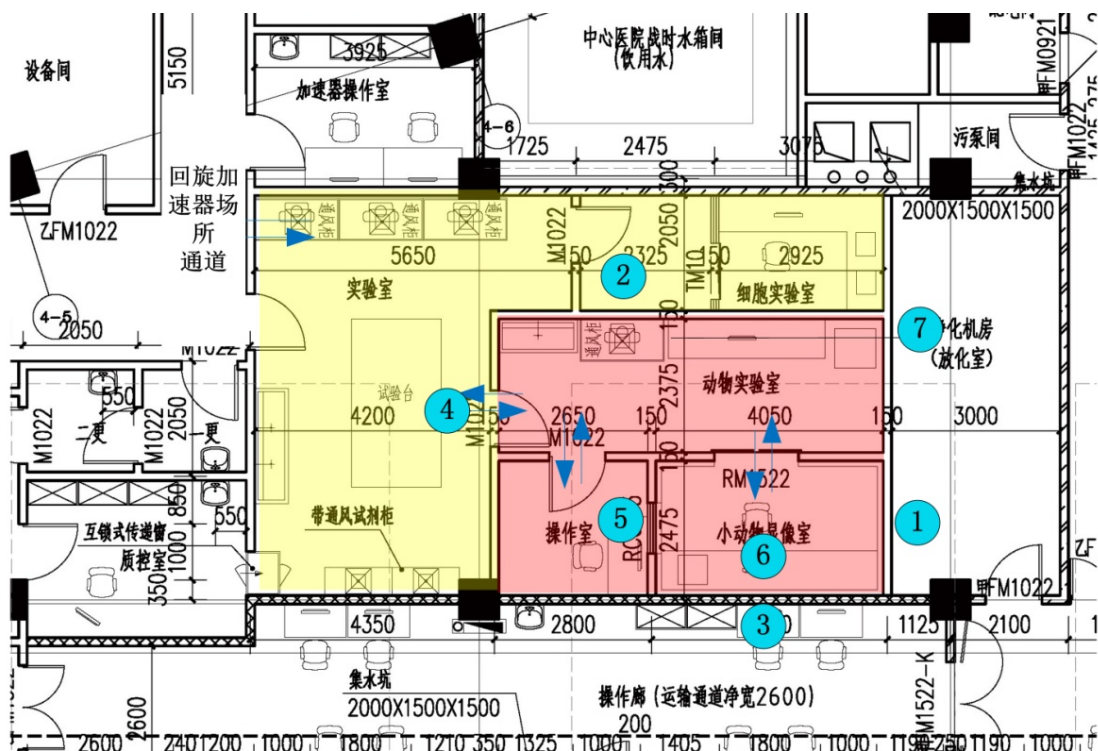


图 11-16 核医学科药物实验室的布局、分区和人员路径示意图

(二) 实验室的实验流程

1. 核素显像诊断流程

动物笼运入动物实验室——→麻醉动物——→给动物注射药物——→放置一段时间——→进行扫描（SPECT、PET/CT）检查——→动物处死、部分解剖——→放射性废物收集处置。

2. 放射性药品转移流转

外购的放射性药物：供药公司送至高活室——→用“跑兔”装置将放射性药物转运至放化室——→由质控室传递窗——→药物实验室暂存。

自制的 PET 药物：放化室分装好的放射性药物——→由质控室传递窗——→药物实验室暂存。

3. 放射性废物转移路线

放射性废物：剩余的放射性药物、注射器、包装物、棉棒、一次性用品、动物垫布、吸水纸等——→转移至动物实验室废物桶内——→放置 50d（所用的核素半衰期最长为 4.18d），解控为医疗废物处置——→详细记录台账。

动物尸体：动物尸体——→装入牢固塑料袋中——→植入动物实验室的冰柜内——→放置 50d（使用核素半衰期最长为 4.18d），解控为医疗废物处置——→详细记录台账。

4. 放射性废水暂存和排放流程

少量清洗废水、洗手废水——→地下二层专用积水坑——→污水泵房——→放射性废水衰变池暂存——→定期排至医院污水处理站处理——→市政污水官网。

5. 放射性废气收集与排放流程

药物实验室区域设置共计有 3 套通风系统，废气经管道组织，由管道井延伸至楼顶排放。具体如下：

1) 动物实验室 2 个通风橱——→专用通风系统——→活性炭过滤器过滤——→门诊部楼顶排放；

2) 药物实验室其它房间和质检室、控制室等共用一个独立排风——→门诊部楼顶排放。

(三)核医学药物实验室放射性“三废”产生量预测

(1) 核医学科药物实验室的使用规划

北大第一医院根据核医学科科研和药物实验的需求，给出了城南院区核医学科药物实验室的使用规划，表 11-35 给出了拟使用的放射性核素种类、用途以及最大工作负荷等信息。

表 11-35 城南核医学科的使用规划

序号	核素	用途	类别	最大工作负荷		
				只/次	次/年	只/年
1	^{99m} Tc	科研	A	20	100	2000
2	¹²³ I	科研	A	20	30	600
3	¹⁸ F	科研	A	20	100	2000
4	¹¹ C	科研	A	20	10	200
5	¹³ N	科研	A	20	5	100
6	¹⁵ O	科研	A	20	5	100
7	¹²⁴ I	科研	B(4.1d)	20	20	400
8	⁶⁴ Cu	科研	A	20	20	400
9	⁸⁹ Zr	科研	B(3.3d)	20	20	400
10	⁶⁸ Ga	科研	A	20	50	1000
总计						7200

根据使用规划，城南院区核医学科每天使用 SPECT/CT 和 PET/CT 开展影像诊断最多 20 只大小鼠，其中，SPECT 扫描占比约 35%，PET 扫描占比 65%。使用的全部放射性核素中，B 类核素有 I-124 和 Zr-89，半衰期分别为 4.1d 和 3.3d。

(2) 放射性固废产生和处置

动物实验室和显像实验室分别配置放射性废物桶，收集废药瓶、注射器、棉棒、垫

布、纸巾以及被污染的一次性用品等放射性废物。A 类废物放置 30h 后解控为医疗废物处置，B 类废物放置 50d（10 倍 ^{124}I 半衰期）后处置解控为医疗废物处置。

动物尸体和组织样品盛装在结实塑料袋中，标明核素种类和时间，置于动物实验室内专用冰柜暂存。定期按照 A 和 B 类放射性废物管理要求解控处置。

动物实验室产生的放射性废物主要是动物垫料和动物尸体。大鼠体重按 250g/只、小鼠体重按 50 g/只计，实验用大、小鼠各半，每年动物尸体产生量约 1080kg。其它放射性废物重量约 2kg/d，每年产生放射性废物 500kg。

(3) 放射性废水产生和处置

药物实验用器皿多数为一次性用品用品，只有实验器械、托盘、动物扫描舱、动物饲养笼托盘等会重复使用，故会产生少量的清洗器械废水。此外，实验台面、地面清洁也会产生少量抹布和拖布清洁废水。预计每日实验室产生的清洗废水实验日产生量为 25L，全年 250d，废水排放量约 7.25m^3 。

药物实验室设计了排放放射性废水的专业管道，输送至核医学科废水衰变池暂存。放射性废水排放达标分析见“11.5.1 (三)核医学诊疗场所放射性“三废”产生量预测”。

(4) 放射性废气产生和处置

药物实验室不开展放射性药物标记、合成工作，直接使用外购或由放化室制备的药物。药物实验室的动物实验均为简单湿法操作，在正常工作情况下均不会产生气溶胶和蒸汽，不会造成工作环境的空气污染。

一旦出现放射性物质泼洒等意外情况，也只可能有极其微量的挥发性放射性气载物通过操作柜排风系统，在所在建筑物顶部排气筒集中排放。药物实验室使用的同位素较少，相比回旋加速器场所和诊疗场所，废气产生量很少，不进行详细评价。

(四) 辐射环境影响

(1) 药物实验室的实体屏蔽设计方案

根据设计单位（中国中元国际工程有限公司）提供图纸整理，核医学药物实验室的辐射实体屏蔽方案如表 11-36 所示。

表 11-36 核医学药物实验室辐射实体屏蔽方案*

场所名称	使用功能	实体屏蔽改造方案	
		屏蔽体	改建方案
小动物显像室	大小鼠扫描	四周墙体	150mm 普通混凝土
		室顶	300mm 混凝土

动物实验室		地面	土层
		观察窗	6mmPb 铅玻璃
		防护门	2mmPb
	动物实验准备、注射、废物暂存等	四周墙体	150mm 加气混凝土砌块
		室顶	300mm 混凝土
		地面	土层
		防护门	4mmPb
		地面	土层

注：普通混凝土密度 2.35t/m³，加气混凝土砌块密度 0.52t/m³。

(2) 贯穿辐射环境影响预测

以药物实验室使用频率最大的核素为 ^{99m}Tc、¹⁸F 和 ⁶⁸Ga，其中 ^{99m}Tc 进行 SPECT 扫描，¹⁸F 和 ⁶⁸Ga 用于 PET 扫描。PET 核素能量最高为 0.511MeV，故以 F-18 为例，估算工作场所周围的剂量率水平是否满控制要求。在进行受照剂量估算时，以 ^{99m}Tc 代表 SPECT 核素，以 ¹⁸F 代表 PET 核素，估算药物实验辐射工作人员以及周围公众的辐射影响。

1. 剂量估算源强

小鼠给药活度一般为 100μCi，大鼠给药活度一般为 0.5mCi。大小鼠注射药物后不同时间后 1m 的剂量率水平见表 11-37 所示。

表 11-37 大小鼠注射药物后 1m 处的剂量率水平*

核素	F-18		Tc-99m	
种类	大鼠	小鼠	大鼠	小鼠
大鼠	2.92	0.58	0.41	0.08

注：* 依照 RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK 2002

2. 估算方法

将接受药物注射后的动物、装有放射性药物的注射器近似作为点源，依照剂量率和距离平方成反比衰减的关系，同时考虑墙壁和防护门、窗的衰减作用，估算动物实验室和扫描室周围的附加辐射剂量率，结合可能照射时间，估算职业人员和公众的受照剂量。

3. 药物实验室周围不同位置的附加剂量率水平

普通混凝土和铅对核素 ¹⁸F 发射 γ 射线的 1/10 值层厚度分别取 17.6cm 和 16.6mm；对核素 ^{99m}Tc 发射 γ 射线的 1/10 值层厚度分别取 66cm 和 1mm；加气混凝土密度 0.52t/m³ 折合为 2.35t/m³ 普通混凝土计算屏蔽系数。估算点及参数选取和估算结果见表 11-38 所示。

表 11-38 药物实验室周围环境附加剂量率估算结果

源项	编号	估算点位置 (具体位置见图 11-16)	屏蔽材料	距离 (m)	透射系 数	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	
						大鼠	小鼠
^{18}F 等 PET 核 素	1	显像室东墙外净化 机房	150mm 混 凝土	2.1	0.14	9.1E-02	1.8E-02
	2	实验室北墙外细胞 实验室缓冲间	150mm 加 气混凝土 +10mmPb	0.8	0.16	7.3E-01	1.5E-01
	3	显像室南墙外操作 廊办公位	150mm 混 凝土	2.4	0.14	7.00E-02	1.38E-02
	4	实验室防护门外	4mmPb	1.9	0.57	4.6E-01	9.2E-02
	5	显像室操作室	150mm 加 气混凝土 +6mmPb	1.7	0.28	2.8E-01	5.6E-02
	6	实验室房顶上方	300mm 混 凝土	5.3	0.02	2.1E-03	4.1E-04
	7	实验室东墙外净化 机房	150mm 加气 混凝土	4.0	0.65	1.2E-01	2.4E-02
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等 SPECT 核素	1	东墙外净化机房	150mm 混 凝土	2.1	5.3E-3	4.9E-04	9.6E-05
	2	北墙外细胞实验室	150mm 加 气混凝土 +10mmPb	0.8	3.2E-11	2.1E-11	4.0E-12
	3	南墙外操作廊	150mm 混 凝土	1.8	5.3E-3	1.5E-03	3.0E-04
	4	防护门外	4mmPb	1.9	1E-4	1.1E-05	2.2E-06
	5	操作室	150mm 加 气混凝土 +6mmPb	1.7	3.2E-7	4.6E-08	8.9E-09
	6	房顶上方	300mm 混 凝土	5.3	2.8E-5	4.1E-07	8.0E-08
	7	实验室东墙外净化 机房	150mm 加气 混凝土	4.0	0.32	8.2E-03	1.6E-03

由表 11-38 可见，药物实验室运行过程中，实验室周围的附加剂量率最高为 $0.99\mu\text{Sv/h}$ ，低于本项目设定的 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的剂量率控制水平。

4. 药物实验室周围公众受照剂量估算

药物实验室全年运行 250d，实验室周围（细胞实验室、普通实验室等）停留人员可能受到一定剂量的辐射照射。

假设：老鼠注射药物耗时 0.5min/只，全年注射时间为 60h，注射时距离为 30cm。

50%的老鼠解剖，解剖时间为 2min/只，全年总解剖时间为 120h。摆位时间 1min/只，摆位距离 30cm，全年摆位时间为 120h。扫描时候为 20min/只，扫描时间为 2400h，隔室操作。SPECT 扫描占 35%，PET 扫描站 65%，大鼠和小鼠实验各占一半。公众受照剂量估算结果见表 11-39 所示。

表 11-39 药物实验室周围公众受照剂量估算结果

编号	估算点位置 (具体位置见图 11-16)	PET 扫描 附加剂量率($\mu\text{Sv/h}$)		SPECT 扫描 附加剂量率($\mu\text{Sv/h}$)		总时间 (h)	居留 因子	受照剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)
		大鼠	小鼠	大鼠	小鼠			
1	显像室东墙外 净化机房	9.1E-02	1.8E-02	4.9E-04	9.6E-05	2400	1/16	5.3E+00
2	实验室北墙外 细胞实验室缓冲间	7.3E-01	1.5E-01	2.1E-11	4.0E-12	180	1/16	3.22E+00
3	显像室南墙外 操作廊	7.00E-02	1.38E-02	1.5E-03	3.0E-04	2400	1	6.6E+01
4	实验室防护门外	4.6E-01	9.2E-02	1.1E-05	2.2E-06	180	1/16	2.02E+00
6	实验室房顶上方	2.1E-03	4.1E-04	4.1E-07	8.0E-08	180	1	1.47E-01
7	实验室东墙外 净化机房	1.2E-01	2.4E-02	8.2E-03	1.6E-03	180	1/16	5.46E-01

由表 11-39 可见，药物实验室运行过程中，对周围停留公众的年受照剂量贡献最大为 $66\mu\text{Sv/a}$ （南侧控制廊技师），满足本项目设定的 0.1mSv/a 的剂量约束要求。上述估算未考虑显像装置样品舱的屏蔽效果，也未考虑 PET 药物衰减，预计周围公众的实际受照剂量一定满足上述估算结果。

5. 动物实验室辐射工作人员受照剂量估算

药物实验室至少配备 2 名医师开展动物实验，轮流开展药物注射、摆位、扫描和解剖工作。受照剂量估算见表 11-40 所示。

表 11-40 药物实验室所致职业人员受照剂量估算结果

工作岗位	PET 扫描 附加剂量率($\mu\text{Sv/h}$)		SPECT 扫描 附加剂量率($\mu\text{Sv/h}$)		总时间 (h)	受照剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)
	大鼠	小鼠	大鼠	小鼠		
显像室操作	2.8E-01	5.6E-02	4.6E-08	8.9E-09	2400	2.62E+02
动物摆位*	32.4	6.4	4.6	0.9	120	1.63E+03
动物注射*	3.2	0.6	0.5	0.1	60	8.04E+01
动物解剖	3.2	0.6	0.5	0.1	120	1.61E+02
合计						2133.4

注：*注射和解剖采用防护屏，剂量降低一个量级。摆位和注射距离 30cm。

由表 11-40 可见, 2 名辐射工作人员完成全部药物放射性实验所受剂量为 2.13mSv, 2 人轮流操作, 年受照剂量约为 1.07mSv/a。上述估算未考虑放射性核素衰减, 预计辐射工作人员的实际年受照剂量低于 1mSv/a, 低于本项目设定的 5mSv/a 的剂量约束值。

11.6 事故影响分析

11.6.1 加速器事故影响分析

(1) 人员误入加速器室并发生误照事故

加速器可能发生的最严重的放射性事故是门机联锁失效, 人员误入加速器室而受到意外照射。事故情景: 保守假设加速器在以 10MV 治疗患者过程中, 人员误入机房后到达迷道内口处, 发现有病人正在治疗, 急速返回。保守假设在迷道内口处停留时间 10s, 据此估算误入人员的最大受照剂量。

根据表 11-8 数值, 可推算出迷道内口处的剂量率, 见表 11-41 所示。

表 11-41 加速器 10MV 运行时迷道内口处剂量率水平 (mSv/h)

编号	剂量来源	迷道内口处	备注
1	主束经墙壁 1 次散射	3.2	距离、散射折算
2	泄漏辐射	1.1	距离、散射折算
3	主束经病人 1 次散射	14.7	距离、散射折算
合计		19	

保守假设在迷道内口停留 30s, 最大受照剂量约为 0.16mSv, 对误入人员健康不会造成影响。

该装置设有门机安全联锁系统, 以及在治疗室和迷道内设置有闭路监视系统, 可有效防止该事故发生。此外, 加速器放疗工作人员须佩戴个人剂量报警仪进入治疗室。一旦出现误入情况, 报警仪会提醒工作人员, 立即撤出。

(2) 其它异常运行事件和防范措施

1) 出束不能停止时: 按下专用键盘“停束”键, 如果加速器继续出束, 则将专用键盘“出束钥匙开关”扳至“禁止”位。如继续出束, 则按下控制台“急停”开关。在维修人员确保机器能够正常运行之前, 操作人员不得试图再次开机。

2) 停电故障: 工作人员采用手动方式打开防护门, 迅速将病人从治疗床上移出, UPS系统给电脑自动供电, 记录正在治疗病人已经接受的累积治疗剂量。

3) 事故性出束: 工作人员在治疗室内为患者摆位或开展其它准备工作, 控制台处操作人员误开机出束。医护人员进入加速器室, 要保持防护门开启, 由于有门机联锁系统, 加速器无法启动。为防止陪护人员或其他人员误留在加速器机房内受到误照射, 要

求加速器在每次出束前，工作人员必须进机房进行检查，确认无误后，方可出束。

4) 维修期间的事故：加速器维修工程师在检修期间误开机出束。在维修加速器时，按下急停开关，或保持防护门开启，这种情况下，加速器无法启动。此外，维修人员携带有个人剂量报警仪，一旦有紧急情况，马上按下墙上的急停按钮，并迅速撤离现场。

5) 工作人员误入：加速器放疗工作人员须佩戴个人剂量报警仪进入治疗室。一旦出现误入情况，报警仪会提醒工作人员，立即撤出。

11.6.2 后装机事故影响分析

后装治疗机机房和控制室具有良好的屏蔽设计、监控和安全联锁系统，以保证正常的运行安全，但仍不能排除可能发生的紧急情况，《放射性事故应急预案》将包括放射源卡源、人员误入以及人员受到超剂量照射应急等内容。

(1) 卡源事故

后装机最严重的事故是卡源事故。

发生卡源时，首先使用后装机提供的紧急回源程序或按钮进行紧急回源处理。后装治疗机的源开关控制系统均配有手动机械复位应急装置。当控制系统出现故障导致自动关源系统失效时，通过手动机械复位机构将使放射源回到储源状态。

如果源卡的过死，紧急回源装置无法回源时，只能采取人工回源处理。此外，如果后装机放射源脱落掉地上，也需人工处置。处理该类事故，需严格按照事故应急处理措施进行操作，工作人员在进入机房前，应穿上铅衣、铅帽、铅围脖，戴上铅眼镜，并佩戴个人剂量计及携带辐射巡测仪，进入机房后，应在尽可能短的时间内，将放射源旋回后装机的贮源系统内或者转移至铅罐内。

人员穿戴防护用品进入机房，在 30cm 距离处理事故，预计外照射剂量率可以降低一个量级，故完成手动复位或者捡拾放射源应急操作的受照剂量约为 $4.1\text{mSv/h} \times (100\text{cm}/30\text{cm})^2 \times 0.5\text{min} \div 60 = 0.38\text{mSv}$ 。可见，当后装治疗机发生卡源或者脱落事故时，人工操作时受照剂量较小，对操作人员健康影响很小，是安全的。

(2) 放射源失控

后装治疗机使用 1 枚 ^{192}Ir 源，属于Ⅲ类放射源，源失控对环境安全的潜在危险较大。医院制定有设备安全使用管理制度和操作规程，来全面加强机房安全保卫措施，严防放射源失控。设备定期更换放射源的工作由具有使用Ⅲ类 Ir-192 放射源资质的单位承担，废源由供方在倒装新源时一并回收。

根据原国家环保总局《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），发生放射源丢失、被盗时，医院将立即向上级主管部门报告，启动事故应急预案。发生该类事故后，将在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。

（3）人员误照

发生人员误照后，有关科室应当立即向医院主管部门报告。由医院领导统一指挥，启动应急预案程序，迅速安排受照人员接受医学检查，或者在指定的医疗机构救治，并以书面形式上报环保主管部门。

11.6.3 DSA 事故/事件影响分析

（1）人员误入机房受到不必要的照射。

人员误入 DSA 机房后，受照剂量有限，不会对身体造成影响。DSA 机房为手术区域，人员进入控制严格，发生误入的可能性很小。针对该类事件的防范措施是：机房防护门上设置辐射警告标识和中文警示说明。防护门上方设置工作状态指示灯，并且和防护门关联。

（2）DSA 出束时，没有关闭防护门，对附近经过或停留人员产生误照射。

发生该类事件时，误照人员的剂量很小，不会对健康有影响。防范措施是：规范工作秩序，严格执行《仪器操作规程》和《放射性检查安全管理制度》。此外，辐射防护管理小组定期检查安全规章和制度落实情况，发现问题及时纠正。

11.6.4 核医学科放射性同位素使用场所事故分析与应急措施

（1）事故分析

核医学科放射性同位素使用场所（诊疗场所、药物实验室和放化室）工作场所在正常营运情况下，对于公众和周围环境基本是安全的，但如果管理不善发生某些事故，可能对公众和环境造成危害，主要有如下原因：

1）放射性药品撒漏、放射源或放射性药品丢失

由于工作人员操作不熟练或其他原因造成工作时放射性药物撒漏，以及放射源或药物保管不善致使放射性药剂在给患者用药之前丢失，可能对公众和周围环境造成辐射污染。

2）放射性废物管理不善

放射性废水未经足够时间的暂存而超标排放，可能对环境或人体造成一定危害。

放射性固体废物未经足够时间的暂存衰变，擅自处置，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

3) 屏蔽措施不当

如果对操作放射性核素的场所屏蔽措施不利,可能对环境造成污染和对人员造成不必要的照射。

(2) 风险防范与事故应急处理措施

针对在核医学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,尽可能减小或控制事故的危害和影响:

1) 安保措施:核医学科放药室安装防盗门,室内设置闭路监视系统,以满足环保和公安部门关于放射源和放射性物品存放的要求。

2) 屏蔽防护:药物使用场所(放药室)、受检人员停留场所(扫描机房和休息室等),墙体采用实心砖或混凝土屏蔽,防护门采用铅屏蔽,注射窗口采取 20mm 铅防护。观察窗采用铅玻璃防护,减少电离辐射对周围环境的辐射影响。

3) 表面污染控制措施:在通风橱内分装放射性药物,注射窗口处注射药物。一旦发生撒漏导致台面和地面污染的情况,及时采取擦拭方法去污,并用表面污染监测仪检测,直至表面污染水平满足 GB18871-2002 要求。工作人员离开放药室,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。

4) 放射性废物管理:设立专用的放射性废物间,配置 2 个铅制废物桶。收集放药室和注射间等场所产生的放射性废物,标注日期,定期进行清洁解控处置。设置放射性废水衰变池,将放射性废水暂存处置,符合清洁解控要求排放。活性炭过滤器一年更换一次,暂存后清洁解控处置。

11.6.5 回旋加速器事故分析

(1) 主要事故/事件分析

- 1) 人员误留或误入回旋加速器机房内,且回旋加速器出束;
- 2) 回旋加速器停机后,人员进入有较高残余放射性的区域;
- 3) 回旋加速器靶窗破裂,靶产物进入真空室,污染真空油;
- 4) 液体或气体靶泄漏:液体或气体靶在照射和传输过程中,靶密封膜片破裂、传输管线堵塞和破裂,或者传输压力不足,靶产物附着于传送管道内壁,造成非密封放射性物质泄漏,使加速器机房内部发生放射性污染;

5) 二次冷却水系统破裂,冷却水泄漏到机房内(50L 废液)。

(2) 误照射剂量估算

- 1) 人员滞留或者误入回旋加速器机房内,在距加速器自屏蔽体 1m 处,受照时间

5min 的受照剂量:

本项目所使用回旋加速器自屏蔽体外 1m 处的剂量当量率低于 $50 \mu\text{Sv/h}$ 。假设人员误入或者误留后在 1m 处停留 5min, 受照剂量仅为 $5 \mu\text{Sv}$, 不会对人员健康有影响。

2) 医用回旋加速器停机后, 人员进入有较高残余放射性的区域, 人员在加速器靶口位置, 停留时间 15min, 受照剂量为:

根据厂家提供的数据, 设备打靶 2h 后, 距加速器靶部件外表面 0.3-0.5m 处, 剂量率可达 $400\text{-}800 \mu\text{Sv/h}$ 。保守按照 2mSv/h 估算, 人员停留 15min, 所受剂量为 0.5mSv , 未超出剂量限值, 不会构成辐射事故。

(3) 风险防范与事故预防措施

1. 误留和误入回旋加速器机房预防措施

① 为防止加速器工作状态下误入加速器机房, 在加速器机房的防护门上安装门机联锁装置。防护门在回旋加速器运行时被打开, 设备会自动停止终止打靶。

② 安全联锁装置定期检查、维护, 确保功能有效。

③ 在加速器运行之前, 工作人员必须进入机房巡视, 确认没有人员滞留后关闭防护门。

④ 加速器机房外设工作状态指示灯及电离辐射警示标志。在加速器启动前, 声光报警装置发出警告信号, 提醒工作人员撤离。

⑤ 加速器墙壁和控制台装有醒目的急停按钮, 一旦发现异常情况, 按下急停按钮可立即切断束。

2. 核素正离子泄漏预防及处理措施

① 回旋加速器运行前检查靶密封膜片和传输时管线的气密性。

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

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

3. 冷却水泄漏预防及处理措施

早期发现冷却水泄漏, 立即停止回旋加速器运行, 将冷却水排入回旋加速器机房内放射性废水收集地漏内, 冷却水进入衰变池统一解控处置。如果冷却水溢流在机房地面, 先将其扫入地漏, 之后进行擦拭, 并妥善收集擦拭物。

根据《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》（环发[2006]145 号）要求，当发生或发现辐射事故后，应立即向单位的辐射安全领导小组组长和法定代表人报告，立即启动辐射事故应急预案，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成较大辐射事故或人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全管理机构的设置

为了保证放射性同位素和射线装置的安全使用和有效管理，医院设立了辐射安全防护管理委员会，主任委员由院长担任，副主任委员由医疗院长、纪委书记和党委副书记担任，全面负责医院的放射防护监督和管理工作的，成员为各职能部门人员组成。该机构内部职责明确，且设有专职管理人员。放射防护管理委员会成员名单以及各部门的职责和分工见附件2所示。

12.2 辐射安全管理规章制度

北大第一医院为了保障放射诊疗工作安全、有效的开展，医院已制定了相应的放射防护管理制度，如《放射防护管理委员会人员组成及工作职责的通知》、《放射诊疗及辐射安全管理制度》、《血管造影机（DSA）操作规程》、《医用直线加速器安全防护操作规程》、《辐射防护和安全保卫制度》、《放射诊疗设备检修维护制度》、《台账管理制度(含放射源、非密封放射性物质、射线装置)》、《辐射安全培训制度》、《辐射监测方案》、《放射工作人员职业健康及放射防护知识培训》和《辐射事故（件）应急预案》等，能够满足工作需要。

城南院区建成后，北大第一医院核技术利用种类和范围将新增使用 II 类回旋加速器和 III 类放射源。医院将组织科室人员完善相关制度，如操作规程、监测方案、应急预案等，确保全部辐射工作有章可循。同时，组织城南院区科室人员学习已经建立的规格制度，确保大家依照规定安全使用放射性同位素和射线装置。

根据北京其它大型医院的建设经验，新建医院投入运行后，所有设备不可能在短时间内全部就位，需要 1 年-2 年的安装、调试和试运行时间。同样，北大第一医院城南院区于 2023 年投入使用后，将逐步安装、调试设备，特别是核医学科和放疗科的大型设备。有些设备如（PET/CT、PET/MRI）只能根据大型医疗器械审批情况，逐步配置。鉴于此，医院将分阶段重新申领辐射安全许可证，不断完善辐射安全管理规章制度和辐射事故应急预案。

12.3 辐射工作人员配置

目前，医院的 5 处医疗院址内全部辐射工作人员（共计 253 人）于 2019 年 11 月通过了辐射安全和防护考核，持有合格证书。医院也利用集会、内网、宣传展板等形式对全员进行辐射安全知识教育，提高人员的辐射安全文化素养，定期组织放射工作人员和辐射安全管理人员参加辐射安全法规知识和防护新知识培训。医院现有的辐射

工作人员能够满足使用放射性同位素和射线装置工作的需要。

北大第一医院城南院区为新建院区，放疗科、核医学科和介入治疗场所均为新建，预计在 2023 年底投入使用。目前，医院还没有启动辐射工作人员招聘工作，但医院承诺将根据诊疗设备投入数量和相应的人员配置要求，配备必要的辐射工作人员。所以，本评价报告依据设备配置要求和使用需要，列出人员配置计划，具体见表 12-1。

医院将根据工作需要，逐步招聘和培养辐射工作人员，在通过辐射安全与防护考核后持证上岗。

表 12-1 本项目辐射工作人员配备计划

编号	建设内容	人员配置计划
1	放疗科：每台医用电子直线加速器	3 名医师，2 名物理师和 4 名技师
2	介入治疗场所：每台 DSA	2 名医师，1 名技师和 1 名技师。如果辐射工作人员和本部轮流，年手术量不超过 500 例。
3	核医学科：	医师 4 名，物理师 1 名
	药物制备场所	化学师 1 名，技师 1 名。
	核医学科诊疗场所	先期：PET/CT 配备 2 名技师，SPECT/CT 配备 1 名技师，1 名护士。
		后期：PET/MR 和第 2 台 SPECT/CT 配置后，新增 2 名医师和 4 名技师
	药物实验室	小动物显像装配备 1 名技师

12.4 辐射监测

(1) 个人剂量监测

从事放射工作的人员佩戴使用 TLD 个人剂量计。按每个季度一次的频度委托有资质的机构进行个人剂量检测。根据《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2016）和《放射工作人员职业健康管理辦法》（卫生部令第 55 号）要求建立放射工作人员个人剂量档案。

放射工作人员进行个人剂量监测发现监测结果异常的（每季度超出 1.25mSv/a，或者显著高于同科室其它人员），应当立即核实和调查，并将有关情况进行文字记录。

(2) 工作场所监测

根据原环保部 18 令的要求，北大第一医院每年委托有资质单位对本项目放射工作场所（放疗科、核医学科和介入治疗场所）进行 1 次辐射水平监测。监测项目、监测频次和监测布点等见表 12-2 所示。

表 12-2 本项目工作场所监测内容

辐射工作场所	项目	频次	布点	测量条件
加速器场所	X- γ 剂量率	1 次/年	如图 11-3、图 11-4	1) 最大能量; 2) 最大剂量率; 3) 机头朝向测量点一侧; 4) 使用最大照射野 (40cm×40cm)
后装机场所	γ 剂量率	1 次/年	如图 11-9、图 11-10	1) 额定最大装源量 2) 放射源位置在使用范围内最靠近测量点一侧。
DSA 场所	X- γ 剂量率	1 次/年	1) 机房四周墙外 30cm、楼上 30cm、楼下 1.5m、所有防护门、观察窗外 30cm 处。 2) 术者位剂量率。	1) 标准水模下测量, 设备自动调强; 透射和摄影工况分别测量周围关注点。 2) 标准水模下测量, 透射工况下测量术者操作位剂量率。
核医学科场所诊疗场所和药物实验室	X- γ 剂量率 表面污染水平	1 次/年	如图 11-13 和图 11-16。	核医学科正常运行, 机房内有患者显像, 候诊室有人员候诊。SPECT 机房监测时, 扫描患者为 I-131 患者。
核医学科药物制备场所	X- γ 剂量率 中子剂量当量率	1 次/年	如图 11-15。	回旋加速器最大流强运行。高活室内合成 1Ci 的 PET 药物。

(3) 环境监测

根据原环保部 18 令的要求, 每年委托有资质单位对辐射工作场所的周围环境, 进行 1 次辐射水平监测, 监测数据记录存档。监测点位如图 8-1。

12.5 辐射监测设备和防护用品

12.5.1 医院现有的辐射监测仪器和个人防护用品

医院本部等场所已购置了必要的辐射监测设备, 如表 12-3。同时为保障辐射工作人员的安全, 医院也为辐射工作人员和受检患者配备了铅屏风、铅衣、铅围脖、铅眼镜等个人防护用品。

表 12-3 医院现有的辐射监测仪器和防护用品

序号	仪器名称	型 号	购置日期	仪器状态	数量	备 注
1	手持辐射剂量仪	Ser.No.903	2009-06-17	在用	1	放疗科使用
2	辐射剂量仪	Framra NE-2570	2012-05-24	在用	1	放疗科使用
3	多功能辐射检测仪	Inspector-alert	2009-06-19	在用	1	核医学科使用
4	表面污染仪	14C	2008-06-11	在用	1	核医学科使用

5	多功能辐射检测仪	Inspector-aler	2013-06-12	在用	1	核医学科使用
辐射防护用品						
名 称		数 量		名 称		数 量
铅衣		86		铅帽		23
铅手套		15		铅眼镜		24
铅围裙		50		铅围脖		26
铅屏风		15		个人剂量计		253
其它		无				

12.5.2 本项目将配备的辐射监测仪器

本项目投入使用前，医院将新购一批辐射监测设备，具体见表 12-4 所示。此外，将一些个人防护用品，具体见表 12-5。

表 12-4 医院拟为本项目购置的辐射监测仪器和个人防护用品

科室	仪器名称	型号	数量	备 注
放疗科	固定式剂量率仪	待定	5	每间加速器机房和后装机机房。
	便携式剂量率仪	待定	1	放疗科公用
	个人剂量报警仪	待定	10	加速器机房和后装机机房各 2 台。
核医学科	多探头固定式剂量率	待定	1	药物制备场所 (回旋加速器场所)
	表面污染监测仪	待定	1	
	个人剂量报警仪	待定	2	
	表面污染监测仪	待定	2	核医学诊疗场所
	表面污染监测仪	待定	1	药物实验场所
	便携式剂量率仪	待定	2	核医学科公用
DSA 场所	便携式剂量率仪	待定	1	DSA 机房公用

表 12-5 本项目 DSA 工作场所拟配置的个人防护用品

类别	个人防护用品	规格	数量
工作人员	铅橡胶围裙	0.5 mmPb	16
	铅橡胶颈套	0.5 mmPb	16
	铅橡胶帽子	0.5 mmPb	16
	铅眼镜	0.5 mmPb	16
患者和受检者	铅橡胶性腺防护围裙	0.5 mmPb	4
	铅橡胶颈套	0.5mmPb	4
	铅橡胶帽子	0.5 mmPb	4
设备辅助防护用品	铅悬挂防护屏	0.5 mmPb	4
	床侧防护屏	0.5 mmPb	4

12.6 项目环境保护验收内容建议

建议本项目的环保验收内容列于表 12-7 中。

表 12-7 项目环境保护竣工验收内容

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)规定和环评预测结果,本项目所有从事放射治疗的辐射工作人员(含直线加速器和后装机)年受照剂量约束值均取 2mSv。从事介入治疗和核医学诊疗的辐射工作人员年剂量约束值取 5mSv/a;公众均取 0.1mSv/a 作为年剂量约束值。
剂量率控制水平	直线加速器机房、回旋加速器机房、后装治疗机机房和 DSA 机房(机房周围和楼上 30cm、楼下 150cm)处的周围剂量当量率均不大于 2.5 μ Sv/h;核医学科控制区边界(周围和楼上 30cm、楼下 150cm)处剂量率水平不大于 2.5 μ Sv/h。PET/CT、SPECT、PET/MR 机房周围的剂量率水平不大于 2.5 μ Sv/h。
电离辐射标志和中文警示	机房防护门门口设置放射性警告标志和中文警示说明,设置工作状态指示灯。
场所布局和屏蔽设计	加速器机房、后装机机房、DSA 机房和核医学科控制区墙体、顶棚、地板和防护门屏蔽 γ 射线的能力满足辐射防护的要求。
辐射安全与防护措施	设备由密码或者钥匙启动;全部放射性工作场所实行分区管理、实体屏蔽、放射性警告标识和中文警示说明、工作状态指示灯、急停按钮、门机安全联锁系统、辐射剂量监测和报警系统等,可有效防止职业和公众受到意外照射。后装机机房还具有安全防护联锁系统和自动回源检测指示等故障检查和保护系统;设备配套有模拟源与真源双重驱动系统,还配备有不间断自动供电系统,具体参照报告表的表 10 内容。
规章制度	针对新增的设备,医院制定《辐射工作人员岗位职责》、《操作规程》、《台账管理制度》等规章制度。
辐射检测仪器和个人防护用品	本项目放疗科、介入场所和核医学科共计配备固定式剂量率仪 6 台,便携式剂量率仪 4 台,表面污染监测仪 4 台,个人剂量率报警仪 12 台,具体见表 12-4。个人和场所防护用品见表 12-5 和表 12-6。
人员培训	北大第一医院现有的 253 名辐射工作人员均经过了生态环境部门认可的培训单位组织的辐射安全与防护培训,并取得合格证书。本项目辐射工作人员配备计划见表 12-1,辐射工作人员将在通过辐射安全与防护考核后持证上岗。
应急预案	本项目使用的医用直线加速器、DSA 和核医学科场所,已在许可使用的种类和范围内,后装机和回旋加速器属于新增种类和类别,因此,医院将对《辐射事故应急预案》进行补充和完善,将 III 类放射源以及回旋加速器的应急内容纳入应急预案中。

表 13 结论与建议

13.1 结论

1) 核技术应用现状：北大第一医院现持有《辐射安全许可证》（京环辐证[B0044]），有效期至 2022 年 8 月 6 日，许可使用 IV 类、V 类放射源，使用 II 类、III 类射线装置，乙级非密封放射性物质工作场所，丙级非密封放射性物质工作场所。

2) 实践正当性：经国家发改委批准，医院在大兴区大兴新城 0206 街区 1901-1907 地块建设城南院区工程，该项目已获得了原北京市环保局同意建设的批复（京环审（2015）467 号）。因诊疗工作需要，医院拟在城南院区新建核医学科（包含药物制备场所、诊疗场所和药物实验室）、放疗科（包含加速器和后装机）以及介入治疗场所（使用血管造影机）。本项目属于医疗常规核技术利用项目，具有良好的社会效益，其获得的利益远大于辐射效应可能造成的损害，符合实践正当性原则，同时医院具备了技术、人员和经费等条件。

3) 本项目周围辐射环境现状：评价区环境 γ 辐射剂量水平与北京市的环境 γ 辐射剂量率水平基本一致，属于正常本底水平。

4) 辐射屏蔽能力分析：新建核医学科（包含药物制备场所、诊疗场所和药物实验室）、放疗科（包含加速器和后装机）以及介入治疗场所（使用血管造影机）屏蔽设计符合辐射防护要求，预计场所周围的剂量率水平低于本项目设定的 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的控制要求，工作人员和公众受照剂量均满足剂量约束要求。

5) 本项目采取了必要的辐射安全与防护措施，如实行分区管理，在各装置机房门口等主要位置设置明显的放射性标志、中文警示说明和工作信号指示。设置门机（源）连锁系统、门控制开关、停机按钮，固定式剂量率系统、闭路监视系统、个人剂量报警仪、铅防护屏（帘）等，可以防止设备误操作、避免工作人员和公众受到意外照射。

6) 辐射安全管理：医院设有辐射安全防护管理委员会，负责全院的辐射安全管理和监督工作。有较健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、人员培训计划、健康体检制度、设备检修维护制度和辐射事故应急预案。随着本项目的建设，将不断完善操作规程、辐射监测计划和事故应急预案。

7) 现有的辐射工作人员均通过了辐射安全与防护培训。报告表给出了本项目辐射工作人员配置计划，医院将根据诊疗设备投入数量和相应的人员配置要求，配备必要的辐射工作人员，并在通过辐射安全与防护考核后持证上岗。报告表提出了放射工作场所配备辐射监测设备计划，如固定剂量率、便携式剂量率、表面污染监测仪和个人剂量报警仪等，也

将配备热室、铅桶、注射窗、铅衣、铅屏风等个人场所防护用品，能够满足工作需要。

9) 与生态环境部 2019 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 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》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，北大第一医院使用以及非密封放射性物质工作场所、使用 II 类射线装置，开展核医学科诊疗、放射治疗和介入诊疗工作，相应的辐射安全制度和辐射防护措施基本可行，在落实项目实施方案和本报告表提出的污染防治措施前提下，其运行对周围环境产生的辐射影响，符合环境保护的要求。故从辐射环境保护角度论证，该建设项目是可行的。

13.2 承诺

为了保护环境，保障人员健康，北大第一医院承诺：

- 1) 在项目运行过程中，严格依照操作规程操作设备，不弄虚作假、违规操作。
- 2) 不断加强全院的辐射安全管理工作，进一步完善辐射安全管理规章制度，落实辐射安全管理责任。
- 3) 严格按照辐射监测方案定期对辐射工作场所进行监测，并将监测记录保存留档。
- 4) 加强辐射工作人员管理，对培训期将满需再培训的辐射工作人员进行辐射防护培训，培训合格后，持证上岗。
- 5) 及时办理辐射安全许可证变更手续。在项目建设投入运行后，及时自行组织竣工环境保护验收，运行过程中，并接受生态环境管理部门的监督检查。

