

核技术利用建设项目

顺义院区新建核医学科诊疗项目 环境影响报告表

首都医科大学附属北京友谊医院

2019年10月

环境保护部监制

核技术利用项目

顺义院区新建核医学科诊疗项目 环境影响报告表

建设单位名称：首都医科大学附属北京友谊医院

建设单位法人代表：

通讯地址：北京市西城区永安路 95 号

邮政编码：100050

联系人：郭泽

电子邮箱：3081202649@qq.com 联系电话：13522599863

目 录

表 1	项目概况	1
表 2	放射源	17
表 3	非密封放射性物质	18
表 4	射线装置	21
表 5	废弃物（重点是放射性废弃物）	22
表 7	保护目标与评价标准	25
表 8	环境质量和辐射现状	34
表 9	项目工程分析与源项	36
表 10	辐射安全与防护	52
表 11	环境影响分析	84
表 12	辐射安全管理	123
表 12-1	核医学科辐射剂量率监测情况表	125
表 13	结论与建议	127
表 14	审 批	131
附图 1	北京友谊医院顺义院区地理位置示意图	132
附图 2	北京友谊医院平面布局图	133
附图 3	医疗综合体地下二层核医学科门诊和病房周边关系图	134
附图 4	顺义院区医疗综合体地下三层回旋加速器室周围关系图	135
附图 5	医疗综合体地下二层核医学科门诊和病房平面布局图	136
附图 6	医疗综合体地下二层核医学科门诊平面布局图	137
附图 7	医疗综合体地下二层核医学科病房平面布局图	138
附图 8	医疗综合体地下三层回旋加速器室平面布局图	139
附图 9	医疗综合体地下三层回旋加速器室分区图	140
附图 10	医疗综合体地下二层核医学科门诊分区图	141
附图 11	医疗综合体地下二层核医学科病房分区图	142
附图 12	北京友谊医院核医学科人流物流图	143
附图 13	北京友谊医院核医学科地下一层人流物流图	144
附图 14	北京友谊医院回旋加速器室人流物流图	145

附图 15	北京友谊医院顺义院区两个衰变池平剖面图	146
附件 1	辐射安全许可证	147
附件 2	个人剂量监测报告	157
附件 3	放射性废物处置管理台账	164
附件 4	专家咨询会会议纪要	166

表 1 项目概况

建设项目名称		顺义院区新建核医学科			
建设单位		首都医科大学附属北京友谊医院			
法人代表	辛有清	联系人	郭泽	联系电话	13522599863
注册地址		北京市西城区永安路 95 号			
项目建设地点		北京市顺义区后沙峪镇			
立项审批部门		无	批准文号	无	
建设项目总投资(万元)	15000	项目环保投资(万)	2000	投资比例(环保投资/总投资)	13.3%
项目性质		<input type="checkbox"/> 新建 <input checked="" type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它		占地面积(m ²)	3500
应用类型	放射源	<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类		
		<input type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I类(医疗使用) <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类		
	非密封放射性物质	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物		
		<input type="checkbox"/> 销售	/		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> 乙 <input checked="" type="checkbox"/> 丙		
	射线装置	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
	其他				
	<p>1.1 单位概况</p> <p>首都医科大学附属北京友谊医院（简称“北京友谊医院”）位于北京市永安路 95 号，始建于 1952 年，医院占地面积 9.4 万余平方米，建筑面积 19.4 万平方米。北京友谊医院是一所学科齐全、技术力量雄厚、集临床诊疗、科研、教学和保健为一体的大型三级甲等医院。全院现有职工 2800 余人，其中高级技术人员近 400 人。医院现设有临床及医技科室 43 个，开放床位 1200 余张，日门诊量 8000 人次左右，年出院 5 万人次左右。医院是首批北京市基本医疗保险 A 类定点医疗机构，并能够为外宾和来自全国各地的患者提供服务。</p> <p>1.2 核技术利用及辐射安全管理现状</p> <p>1.2.1 核技术利用现状</p> <p>北京友谊医院已于 2019 年 9 月申领了辐射安全许可证(京环辐证[D0019])，</p>				

见附件 1)，其种类和范围为：使用 V 类放射源，乙级、丙级非密封放射性工作场所，使用 II 类、III 类射线装置。具体明细见表 1-1、表 1-2、表 1-3。

北京友谊医院已许可的射线装置情况见表 1-1。

表 1-1 北京友谊医院已许可的射线装置情况

装置名称	类别	数量	工作场所
乳腺 X 射线机	III	3	本院医技楼、门诊楼、内科楼、国际医学部、口腔楼、妇泌楼、干保楼同位素治疗中心、通州院区等
PET-CT	III	1	
牙科 X 射线机	III	10	
数字减影血管造影装置	II	6	
医用加速器	II	1	
SPECT-CT	III	2	
骨密度机	III	6	
放射治疗 CT 模拟定位机	III	1	
牙科 CT 机	III	1	
移动 X 射线机	III	27	
普通 X 射线机	III	26	
CT 机	III	10	
乳腺 X 射线机	III	3	
PET-CT	III	1	
合计		94	

北京友谊医院已许可的非密封放射性同位素使用情况见表 1-2。

表 1-2 北京友谊医院已许可的非密封放射性同位素使用情况

序号	工作场所名称	场所等级	核素	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	活动种类
1	16 核医学科 1 部	丙	I-125 粒子源	1.78E+7	3.33E+11	使用
2	17 核医学科 2 部	乙	Ga-68	3.7E+6	4.62E+10	使用
3	17 核医学科 2 部	乙	Ga-67	1.85E+7	1.85E+10	使用
4	17 核医学科 2 部	乙	Cu-64	3.7E+6	4.62E+10	使用
5	17 核医学科 2 部	乙	I-131	7.42E+8	1.48E+12	使用

6	17 核医学科 2 部	乙	Tl-201	1.85E+6	1.85E+10	使用
7	17 核医学科 2 部	乙	Tc-99m	3.0E+8	3.55E+13	使用
8	16 核医学科 1 部	乙	I-123	5.55E+7	9.25E+10	使用
9	13 粒子源手术室	丙	I-125 粒子源	1.78E+7	3.33E+11	使用
10	1 放免室	丙	I-125	7.4E+5	2.3E+8	使用
11	16 核医学科 1 部	乙	Ra-223	7.4E+7	2.25E+8	使用
12	16 核医学科 1 部	乙	Tl-201	1.85E+6	1.85E+10	使用
13	16 核医学科 1 部	乙	Ga-67	1.85E+7	1.85E+10	使用
14	17 核医学科 2 部	乙	Sr-89	7.4E+7	1.48E+11	使用
15	16 核医学科 1 部	乙	I-131	1.85E+6	3.7E+8	使用
16	17 核医学科 2 部	乙	F-18	2.96E+8	5.92E+12	使用
17	16 核医学科 1 部	乙	Tc-99m	1.18E+9	3.55E+13	使用

表 1-3 北京友谊医院已许可的放射源情况

序号	核素名称	类别	总活度×枚数	活动种类
1	Ge-68	V	7.4E+7Bq×2	使用
2	Ge-68	V	9.25E+7Bq×1	使用
3	Co-57	V	1.48E+6Bq×1	使用
4	Co-57	V	1.17E+8Bq×1	使用

1.2.2 近几年履行环保审批情况

北京友谊医院近年来申请的辐射项目及履行环保验收情况见表 1-4。

表 1-4 医院近年来履行环保审批情况

序号	项目名称	环评批复文号	验收批复文号
1	新建核医学科工作场所项目	京环审[2012]295 号	京环验[2016]395 号
2	新增使用 DSA 射线装置项目	京环审[2013]88 号	京环验[2014]88 号
3	使用 III 类射线装置项目	京环审[2013]193 号	京环验[2014]71 号
4	使用 II 类射线装置项目	京环审[2013]229 号	京环验[2014]87 号
5	临床试用 Ra-223 放射性药物项目	京环审[2014]45 号	京环验[2016]337 号
6	使用 III 类射线装置项目	京环审[2014]58 号	京环验[2015]392 号
7	新增电子直线加速器等射线	京环审[2014]76 号	京环验[2015]393 号

	装置项目		
8	使用 III 类射线装置项目	京环审[2014]104 号	京环验[2016]324 号
9	使用 III 类射线装置项目	京环审[2015]144 号	京环验[2016]107 号
10	核医学科工作场所旧址退役	京环审[2017]148 号	已完成自主验收

1.2.3 辐射安全管理现状

1.2.3.1 辐射管理机构

为了加强辐射安全和防护管理工作，促进放射性同位素和射线装置的安全使用，北京友谊医院专门成立了辐射防护领导小组，由院长担任主任委员，副院长担任副主任委员，院办、感控处、医学工程处、人力资源处、规划建设处、核医学科、放射科、口腔科、神经外科、心脏中心等部门的相关人员担任组员，并指定感控处杨艳艳专职负责辐射安全管理工作，辐射防护领导小组成员名单见表 1-5。

表 1-5 北京友谊医院辐射防护领导小组成员名单

职位	姓名	职务或职称	专业	工作部门	专/兼职
主任委员	辛有清	理事长	医院管理	院办	兼职
副主任委员	张澍田	执行院长	内科学	院办	兼职
副主任委员	张忠涛	主管副院长	外科学	院办	兼职
委员	王振常	副院长	医院管理	院办	兼职
	谢苗荣	副院长	医院管理	院办	兼职
	陈惠清	行政处室负责人	医院管理	感控处	兼职
	尤红	院长助理	内科学	院办	兼职
	吴咏冬	临床科室负责人	内科学	消化科	兼职
	王菲	临床科室负责人	护理学	手术部	兼职
	杨正汉	临床科室负责人	医学影像与放射治疗	放射科	兼职
	冯捷	行政处室负责人	医院管理	医学工程处	兼职
	李舒平	行政处室负责人	医院管理	人力资源处	兼职
	龚民	临床科室负责人	外科学	胸外科	兼职
	任军	放射组组长	医学工程	医学工程处	兼职
	贾继东	临床研究所负责人	内科学	临床研究中心	兼职

	黄晓峰	临床科室负责人	口腔科	口腔科	兼职
	王炳强	临床科室负责人	外科学	骨科	兼职
	周翠云	副研究员	医院管理	感控处(通州院区、门诊部)	专职
	王宾	行政处室负责人	医院管理	医务处	兼职
	郑京晶	行政处室正职	医院管理	人力资源处	兼职
	骆金凯	行政处室负责人	护理学	护理部	兼职
	杨艳艳	医师	劳动卫生与环境卫生学	感控处	专职
	田野	临床科室负责人	外科学	泌尿外科	兼职
	郑伟	行政处室正职	医院管理	规划建设处	兼职
	李丽	临床科室负责人	医院管理	国际医疗部	兼职
	刘藏	临床科室负责人	外科学	神经外科	兼职
	李虹伟	临床科室负责人	内科学	心脏中心	兼职

1.2.3.2 规章制度建设及落实

北京友谊医院制定了多项辐射安全管理制度，包括辐射安全防护管理机构及岗位职责、操作规程、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、台账管理制度、放射工作人员管理制度、辐射工作岗位职责、辐射监测制度、废物处置方案、辐射应急预案等，医院辐射安全管理严格遵循国家的各项相关规定，结合医院的具体情况，认真贯彻辐射安全和防护的相关制度，能够满足实际工作需要。

1.2.3.3 工作人员培训

北京友谊医院制定了辐射工作人员培训计划。目前，医院从事辐射相关工作人员共 281 人参加了辐射安全和防护培训，并通过了考核，取得了培训合格证书。

1.2.3.4 个人剂量监测

北京友谊医院现有的个人剂量监测工作已委托北京市疾病预防控制中心承担，监测频度为每 3 个月检测一次。医院 2018 年度个人剂量检测结果表明，大部分辐射工作人员年剂量都为 0.136mSv，最大值为 1.21mSv，年度个人受照剂量超出 1mSv 只有从事骨科工作的 1 人(1.21mSv)，其余人员均低于 0.597mSv（核医学科工作人员最大受照剂量为 0.597mSv），均未超过医院年剂量管理目

标值 5.0mSv，说明北京友谊医院的辐射安全防护措施是可行的。2018 年度个人剂量监测报告见附件 2。

开展个人剂量检测的人员，包含新引进辐射工作人员、放射诊疗场所的进修人员、核医学科就医引导人员等，所以开展个人检测的人数（369 名）多于辐射工作人员数量(281 名)。部分进修人员、新增辐射工作人员的工作时间较短，所以出现了不到四个季度的个人剂量检测结果的情况。

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

1.2.3.5 工作场所及辐射环境监测

北京友谊医院现有辐射工作场所已制定监测方案，监测方案内容含有工作场所辐射水平监测和环境辐射水平监测，监测方案中包括实施部门、监测项目、点位及频次、监测部门等。

医院已建立辐射环境自行监测记录档案，并妥善保存，接受生态环境行政主管部门的监督检查。监测记录记载监测数据、测量条件、测量方法和仪器、测量时间和测量人员等信息，辐射工作单位的辐射环境自行监测记录，随本单位辐射安全和防护年度评估报告一并提交生态环境管理部门。医院每年委托有 CMA 资质的单位对医院已有的放射性同位素工作场所和所有射线装置机房防护和机器性能检测一次，且北京市卫生健康委员会每年都要对医院的《放射诊疗许可证》校验一次，校验时医院必须提供当年的检测合格报告。医院现有的监测方案能够满足相关标准要求，医院已配备必要的辐射监测仪器，详细清单见表 1-6。

表 1-6 现有辐射监测仪器、报警仪器和辐射防护用品明细

序号	仪器名称	型号	数量	仪器状态	备注
1	个人剂量仪	WF-99	3	良好	放疗科
2	射线辐射仪	INSPFCTOR11608	1	良好	核医学科
3	个人剂量仪	SDC-61	1	良好	放疗科
4	表面沾染仪	TBM-3S	1	良好	放免科

5	个人剂量仪	FJ3500	17	良好	
6	数字区域 X 线	375	2	良好	心脏导管 1 台， 放射科导管 1
7	表面沾染仪	TBM-3S	1	良好	核医学科
8	数字式表面沾污仪	Inspector	1	良好	核医学科
9	表面沾染仪	Alter	2	良好	核医学科
10	放射性活度计	CRC-25R	3	良好	核医学科

1.2.3.6 辐射事故应急管理

北京友谊医院许可的活度种类范围为使用放射性同位素与II、III类射线装置，已制定了《辐射应急预案》，预案中明确了应急指挥机构、人员组成及分工、应急部门及人员职责、应急器材，发生辐射事故时的报告、通讯联络方式、应急处置方式等，以保证本单位一旦发生辐射意外事件时，即能迅速采取必要和有效的应急响应行动，妥善处理放射事故，保护工作人员和公众的健康与安全，发生辐射事故时，应当立即启动本单位的辐射事故应急方案，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。

1.2.3.7 放射性废物的管理情况

北京友谊医院按照《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》对放射性废物进行管理。放射性固体废物分类收集于专用的废物库内，暂存时间分别超过 30 天、10 倍最长半衰期，对表面污染和辐射剂量率水平自行监测无异常后做为医疗废物处置；对于槽式衰变池（罐）暂存方式，A 类放射性废水注满后，暂存时间超过 30 天后可直接解控排放。医院按照要求对固体废物和液体废物进行了清洁解控，并进行了详细解控记录（解控记录详见附件 3），详见如下：

从 2017 年 4 月 30 日至 2019 年 9 月 6 日，共计自行清洁解控 A 类放射性废物（Tc-99m, F-18）共 18 个批次，约合 38kg。

医院显像核素目前只用 F-18、Tc-99m 两种核素，放射性废水从 2017 年 7 月 20 日至 2019 年 9 月 23 日，共计自行清洁解控 A 类放射性废水（Tc-99m, F-18）共 18 个批次，约合 270m³。

1.2.3.8 其他情况

2018 年度，北京友谊医院较圆满地完成了各项辐射安全防护工作，依据法律法规对本单位放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行了年度评估，编写并上报了年度评估报告。

1.3 本项目概况

1.3.1 友谊医院顺义院区建设项目背景

北京友谊医院是北京市属的大型综合三级甲等医院，医院经过 60 多年的发展，已形成了以胃肠疾病诊治、泌尿疾病诊治、肾内血液净化、普外肝移植、热带病诊治、中西医结合为专业特色的大型综合医院，综合实力达到国内先进水平，多项指标（如年门诊量、住院量、手术量及总收入）连续多年全市排名三甲。近年来医院诊疗人数逐年增加，给医院的基础设施带来了巨大压力，但因地处二环以内，医院发展受用地条件制约，矛盾凸显，急需寻求新的发展空间。与此同时，顺义区医疗卫生事业发展水平与人民群众日益增长的健康要求存在较大差距，已成为影响民生事业的短板。为缓解顺义区看病难的问题，提升新城承载力，加快中心城区功能疏解，北京市卫健委等主管部门提出了在顺义区建立友谊医院顺义院区。

顺义院区主要服务于首都空港，面向空港组团中的中高端就业人群及国际人士，并辐射北京城市中心区内部分需求人群。友谊医院顺义院区将采用“专科优势明显的大型综合型医院”发展路线，完成本部医疗、科研和教学等非首都核心功能的疏解任务，打造首都东北部区域医疗中心和区域国际医疗中心，填补顺义地区优质医疗资源缺乏的空白，同时承担首都国际机场应急医疗任务。学科建设方面，在各专科综合均衡发展的前提下，顺义院区将集中综合优势，重新进行整合，建立消化系统外科（肿瘤）诊治中心、泌尿系统疾病诊治中心、淋巴瘤疾病诊治中心、头颈外科疾病诊治中心、神经疾病中心、血液净化中心、急危重症诊疗中心、医学影像中心（放射、超声、核医学）及医学检验中心，进一步扩展医院优势学科的发展空间，形成对整个系统疾病的全过程、全流程覆盖，避免患者因诊断、手术、术后诊治等医疗需求跑多家医院就诊的困难，切实解决顺义地区看病难的问题。

首都医科大学附属北京友谊医院顺义院区项目选址于 2016 年 3 月 14 日经北京市规划委员会批准《北京市规划委员会建设项目选址意见书》（2016 规选字 0007 号）。2016 年 9 月 2 日取得北京市发改委核准立项《北京市发展和改革

革委员会关于首都医科大学附属北京友谊医院顺义院区项目核准的函》(京发改(核)[2016]238号)。2016年8月,北京市政府印发《北京市公共服务类建设项目投资审批改革试点实施方案》(京政发〔2016〕35号),即“一会三函”,适用范围包括城市副中心的道路、停车设施、垃圾和污水处理设施以及教育、医疗、养老等公共服务类建设项目,中央国家机关在京重点建设项目参照执行,试点期限为三年。2016年11月8日,根据市政府关于扩大“一会三函”改革试点的要求,经市政府批准,本项目纳入“一会三函”改革试点范围。

1.3.2 项目建设正当性

北京友谊医院创建于1958年,是中国临床核医学创始单位之一,年诊治病人1万人次左右。核医学科为医院的优势学科,其临床、教学和科研工作均获得了业界认可,不仅承担了多项科研的研究,多次获得科技成果奖,还承担首都医科大学以及部分北京大学医学部系统的核医学教学任务,是北京市住院医师核医学培训基地,是北京市卫生系统重点扶持科室。为了进一步发展优势学科,满足患者日益增长的就诊需求,同时也考虑核医学未来的发展趋势,友谊医院拟在顺义院区建设比较完善的核医学科诊疗项目,包括常规核素显像和核素治疗区域,以及生产正电子核素的回旋加速器相关区域、动物PET室等。

本项目通过回旋加速器制备正电子放射性同位素,经自动标记、合成等核素药物制备程序后,用于临床和科研。由于正电子核素半衰期较短且射线能量较高,自行制备可提高核素的使用率,且符合新型核医学药物科研的需求,从经济和防护等角度考虑具有正当性。回旋加速器生产的核素用于PET检查所必需的示踪剂,实现肿瘤的早期发现和疾病的诊断;随着核医学在临床方面应用越来越多,本项目的建设将使友谊医院顺义院区的核医学科有能力接诊更多人次患者,帮助更多患者及时发现疾病、摆脱疾病困扰。此外,本项目建成后,也为医院核医学技术的深入研究和提高提供了支持,有利于核医学科在临床应用方面积累更丰富的经验,促进核医学技术的发展,从而进一步提高顺义及周边地区的医疗水平,可以产生一定的社会效益和经济效益。

该项目使用的Tc-99m、I-123、Tl-201、Ga-67和I-131等标记放射性药物,开展核医学影像诊断和治疗,是核医学科成熟的、常用的医疗手段,其使用过程中获得的利益远大于辐射可能造成的损害,符合实践正当性原则的要求。

I-131治疗甲状腺疾病在国际上已有60多年历史,我国开展此项治疗也有

50 余年。外科手术切除、I-131 治疗与甲状腺激素抑制治疗的联合应用是国际上公认治疗甲状腺癌的理想方案。I-131 对甲状腺癌晚期不能手术的病人也有一定疗效，改善其生存质量。I-131 治疗是适应症广、疗效好、复发率低、副作用少、简便无创、临床应用十分成熟的甲状腺癌治疗方法。另外，Sr-89、Ra-223 对于恶性肿瘤骨转移患者治疗也是成熟的技术手段。因此，开展核素治疗符合辐射实践正当性的要求。

综上所述，本项目的建设所带来的利益远高于代价，对受电离辐射照射的个人和社会所带来的利益远大于其对环境的辐射影响及可能引起的辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的原则与要求。

1.3.3 项目基本情况

本项目所涉及的核技术利用项目位于拟建的顺义院区医疗综合体地下二层、三层西南角，其中地下二层为核素显像和核素治疗区域；地下三层为生产正电子核素的回旋加速器相关区域、动物 PET 室和两个衰变池。本项目内容包括：

（1）地下二层新建一处乙级非密封放射性物质工作场所（核医学科门诊），拟新增使用 1 台 PET/CT 机、1 台 PET/MR 和 3 台 SPECT/CT 机，其中正电子核素由地下三层回旋加速器生产，如 F-18、Ga-68、N-13、Cu-64、O-15、C-11、Zr-89、I-124 核素，外购新增使用 Tc-99m、Tl-201、Ga-67、I-123、I-131 等种显像诊断核素主要用于肿瘤或脓肿显像、甲状腺显像，脑和心肌灌注显像、神经内分泌肿瘤显像。

（2）地下二层新建一处乙级非密封放射性物质工作场所（核医学科病房），新增使用 I-131 核素用于甲亢患者的门诊治疗和甲癌治疗，新增 Sr-89、Ra-223 核素用于骨转移、前列腺癌骨转移患者的门诊治疗。

（3）地下三层新建一处乙级非密封放射性物质工作场所，用于回旋加速器、热室及相关 GMP 实验室，拟配置 IBA 公司 Cyclone KIUBE 型 18MeV 的回旋加速器，合成热室使用 F-18、Ga-68、N-13、Cu-64、O-15、C-11、Zr-89、I-124 核素的乙级非密封放射性物质工作场所；新建一处丙级非密封放射性物质工作场所（动物 PET 室）。

本项目配套使用的 1 台 PET/CT、3 台 SPECT/CT 和 1 台 MicroPET/CT 型

号待定，涉及的III类射线装置及配套的校准源另外单独办理备案，方案设计时已考虑储源室和III类射线装置的防护和机房面积等要求。

核医学科启用后将开展一系列核医学检查和治疗项目，PET 检查使用 F-18 药物的用量约 370MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 45 人次，每周工作 5 天；Ga-68 药物的用量约 555MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 5 人次，每周工作 1 天；N-13、O-15、C-11 药物的用量约 370MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 2 人次，每周工作 1 天；Cu-64、Zr-89、I-124 药物的用量约 37~144MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 2 人次，每月工作 1 天。SPECT 显像检查 Tc-99m 药物的用量约 925MBq/人，每个检查日最多实施 SPECT 检查 120 人次，每周工作 5 天；Tl-201、Ga-67、I-123 药物的用量分别约 185MBq/人、185MBq/人、370MBq/人，每个检查日每种核素最多实施 SPECT 检查 5 人次，每周工作 2 天；用于甲状腺显像检查的 I-131 使用量 5 名病人/天，用量按 185MBq/人，每周工作 2 天。Sr-89 使用量最多为 5 名病人/天，每周 2 天，148MBq/人；用于治疗甲亢的 I-131 使用量最多为 4 名病人/天，每周 2 天，370MBq/人；甲癌病房最多收治 8 人，平均 3.7GBq/病人，一周 2 批次，全年甲癌病人数量约 800 例；用于治疗前列腺癌骨转移的 Ra-223 使用量最多为 4 名病人/天，每周 2 天，7.4MBq/人，回旋加速器的生产量安装实际使用量及衰变量合理生产同位素。拟建新核医学科各种核素计划使用情况如表 1-8~表 1-10 所示。

表 1-8 回旋加速器合成热室各种核素计划使用情况

核素名称	日最大使用量 (Bq)	年最大使用天数 (天)	年最大使用量 (Bq)	操作方式
F-18	1.11E+11	250	2.78E+13	简单操作
Ga-68	4.50E+9	50	2.25E+11	简单操作
N-13	3.70E+10	50	1.85E+12	简单操作
Cu-64	5.0E+8	12	6.00E+9	简单操作
O-15	3.0E+09	50	1.50E+11	简单操作
C-11	1.40E+10	50	7.00E+11	简单操作
Zr-89	2.00E+8	12	2.40E+9	简单操作
I-124	7.40E+8	12	8.88E+9	简单操作

表 1-9 动物 PET 室拟使用的核素情况

使用场所	核素种类	患者最大用量 (Bq)	预计每日最多实验数量	年最大使用天数 (天)	日最大操作量 (Bq)	年用量 (Bq)	操作方式
动物 PET 室	F-18	1.85E+7	10	100	1.85E+8	1.85E+10	很简单操作
	Ga-68	1.85E+7	5	50	9.25E+07	4.63E+09	很简单操作
	N-13	1.85E+7	2	50	3.70E+07	1.85E+09	很简单操作
	Cu-64	1.85E+7	2	12	3.70E+07	4.44E+08	很简单操作
	O-15	1.85E+7	2	50	3.70E+07	1.85E+09	很简单操作
	C-11	1.85E+7	2	50	3.70E+07	1.85E+09	很简单操作
	Zr-89	1.85E+7	2	12	3.70E+07	4.44E+08	很简单操作
	I-124	1.85E+7	2	12	3.70E+07	4.44E+08	很简单操作

表 1-10 核医学科门诊和治疗拟使用的核素情况

使用场所	核素种类	患者最大用量 (Bq)	预计每日最多检查人数	年最大使用天数 (天)	日最大操作量 (Bq)	年用量 (Bq)	操作方式
核医学科门诊	F-18	3.7E+8	45	250	1.67E+10	4.16E+12	很简单操作
	Ga-68	5.55E+8	5	50	2.78E+09	1.39E+11	很简单操作
	N-13	3.7E+8	2	50	7.40E+08	3.70E+10	很简单操作
	Cu-64	1.44E+8	2	12	2.88E+08	3.46E+09	很简单操作
	O-15	3.7E+8	2	50	7.40E+08	3.70E+10	很简单操作
	C-11	3.7E+8	2	50	7.40E+08	3.70E+10	很简单操作
	Zr-89	7.4E+7	2	12	1.48E+08	1.78E+09	很简单操作
	I-124	7.4E+7	2	12	1.48E+08	1.78E+09	很简单操作
	Tc-99m	9.25E+8	120	250	1.11E+11	2.78E+13	很简单操作
	Tl-201	1.85E+8	10	100	1.85E+09	1.85E+11	很简单操作
	Ga-67	1.85E+8	5	100	9.25E+08	9.25E+10	很简单操作

	I-123	3.7E+8	10	100	3.70E+09	3.70E+11	简单操作
	I-131	1.85E+8	5	100	9.25E+08	9.25E+10	简单操作
核医 学科 病房	I-131	3.7E+9	8	800 人/年	2.96E+10	2.96E+12	简单操作
		3.7E+8	4	100	1.48E+09	1.48E+11	简单操作
	Sr-89	1.48E+8	5	100	7.40E+08	7.40E+10	很简单操作
	Ra-223	7.4E+6	4	100	2.96E+07	2.96E+09	很简单操作

根据 GB18871-2002 以及《关于明确核技术辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函[2016]430 号）规定，对于环办辐射函[2016]430 号文件中没列出的核素，操作方式类似的核素参考该文件取值，核算后的各种核素的日等效最大操作量如表 1-11 所示，都小于非密封放射性物质工作场所的上限（乙级上限 $4 \times 10^9 \text{Bq}$ 、丙级上限 $2 \times 10^7 \text{Bq}$ ）。

表 1-11 核素日等效最大操作量

使用场所	核素种类	日最大操作量 (Bq)	毒性组别修正因子	操作方式修正因子	日等效最大操作量 (Bq)	场所等级
回旋加速器合成热室	F-18	1.11E+11	0.01	1	1.11E+09	乙级 (日等效最大操作量为 $1.79 \times 10^9 \text{Bq}$)
	Ga-68	4.50E+9	0.01	1	4.50E+07	
	N-13	3.70E+10	0.01	1	3.70E+08	
	Cu-64	5.0E+8	0.01	1	5.00E+06	
	O-15	3.0E+09	0.01	1	3.00E+07	
	C-11	1.40E+10	0.01	1	1.40E+08	
	Zr-89	2.00E+8	0.1	1	2.00E+07	
	I-124	7.40E+8	0.1	1	7.40E+07	
动物 PET 室	F-18	1.85E+08	0.01	10	1.85E+05	丙级 (日等效最大操作量为 $1.17 \times 10^6 \text{Bq}$)
	Ga-68	9.25E+07	0.01	10	9.25E+04	
	N-13	3.70E+07	0.01	10	3.70E+04	
	Cu-64	3.70E+07	0.01	10	3.70E+04	

	O-15	3.70E+07	0.01	10	3.70E+04	
	C-11	3.70E+07	0.01	10	3.70E+04	
	Zr-89	3.70E+07	0.1	10	3.70E+05	
	I-124	3.70E+07	0.1	10	3.70E+05	
核医学科门诊	F-18	1.67E+10	0.01	10	1.67E+07	乙级 (日等效最大操作量为 2.77E+8Bq)
	Ga-68	2.78E+09	0.01	10	2.78E+06	
	N-13	7.40E+08	0.01	10	7.40E+05	
	Cu-64	2.88E+08	0.01	10	2.88E+05	
	O-15	7.40E+08	0.01	10	7.40E+05	
	C-11	7.40E+08	0.01	10	7.40E+05	
	Zr-89	1.48E+08	0.1	10	1.48E+06	
	I-124	1.48E+08	0.1	10	1.48E+06	
	Tc-99m	1.11E+11	0.01	10	1.11E+08	
	Tl-201	1.85E+09	0.01	10	1.85E+06	
	Ga-67	9.25E+08	0.1	10	9.25E+06	
核医学科病房	I-123	3.70E+09	0.01	1	3.70E+07	乙级 (日等效最大操作量为 3.15E+9Bq)
	I-131	9.25E+08	0.1	1	9.25E+07	
	I-131	3.11E+10	0.1	1	3.11E+09	
	Sr-89	7.40E+08	0.1	10	7.40E+06	
	Ra-223	2.96E+07	10	10	2.96E+07	

1.3.4 开展本项目的技术能力

(1) 辐射工作人员配备

医院本部核医学科现有 15 名辐射工作人员能够满足要求，本项目启用后顺义院区核医学科拟新配核医学科相关核医学专业技术人员 20 人，计划配备

情况为：医师 9 人、化学师/物理师各 1 人、技师 6 人、护士 4 人。辐射工作人员分工如下：

1) 医师：主要在核医学科办公室对 PET 与 SPECT 诊断结果进行诊断和核素治疗计划制定等。

2) 化学师/物理师：主要从事相关新型放射性药物研制工作和从事回旋加速器核素的生产、分装、核素的运输及 PET/SPECT 的质控相关工作。

4) 技师：负责从事 PET//SPECT 扫描采集和问诊等工作。

5) 护士：从事患者注射工作。

(2) 检测仪器配备情况

本项目实施后核医学科拟新配3台辐射剂量巡测仪、3台表面污染监测仪、1台中子剂量当量率仪、5台个人剂量报警仪、2套固定式剂量报警仪（多个探头）、回旋热室人员出口配备1台污染监测仪，能够满足核医学科常规的检测要求。

1.3.5 项目选址与周围环境

本项目位于顺义区后沙峪镇，机场北线南侧，具体为顺义新城第 18 街区北部（后沙峪组团）18-01-001 地块，“四至”范围：东至天北路，西至裕泰路，南至规划友谊新街，北至机场北线南侧规划安平街，东西方向约 520 米，南北方向约 284 米。友谊医院顺义院区一期在院区东部新建医疗综合体，院区西部预留未来发展用地。隔天北路东侧为中国航信高科技产业园区。用地南侧规划为居住用地，现状为空地。用地西侧现状为中国残奥委员会体育训练中心。用地北侧现状为机场北线，该条道路为城市快速路，两幅路型式，双向 4 条机动车道，隔机场北线北侧为董各庄村，地理位置图见附图 1，顺义院区周边关系图见附图 2。

1.3.6 本项目辐射场所的布局

本项目顺义院区核医学科相关场所位于医疗综合体（地下 3 层，地上 9 层）西南侧的地下二层和三层内，周围 50m 区域都是医院内部，回旋加速器热室区域位于地下三层，东侧为机械停车库，南侧为 1 号衰变池、2 号衰变池两个衰变池和机械停车位，西侧为地下土层，北侧为实验室，楼上为核医学科诊疗区域；地下二层核医学科诊疗区域东侧为机械停车库，南侧为室外庭院（平常无人），西侧为地下土层，北侧隔公共走廊外为放疗中心，楼上为配电室、血透

辅助区，楼下为回旋加速器室、GMP 相关场所和停车库，核医学科门诊和病房、回旋加速器室周围关系图见附图 3 和附图 4。

地下二层核医学科的布局（核素的显像和治疗区域）：地下二层核医学科分为北侧核医学科门诊、南侧核医学科病房和东侧的办公区，地下二层核医学科平面布局图见附图 5。其中核医学科门诊设注射前等候室、注射室、负荷实验室、高活室、储源库、PET/CT 室、PET/MRI 室、3 间 SPECT 室、控制室、3 间高能候诊室、3 间低能候诊室、废物间、功能测定室、患者通道、抢救室、留观室等，详见附图 6；南侧核医学科病房设有高活室、给药窗口、10 间病房、放射性废物库、抢救室、门诊治疗留观室、取餐室、送餐室、更衣室、被服库和监控室等，详见附图 7。

地下三层核医学科（回旋加速器相关场所）的布局：地下三层核医学科分为北侧动物 PET 室、中部的回旋加速器室及相关 GMP 场所和南侧的两个衰变池，地下三层核医学科平面布局图见附图 8。其中回旋加速器室及相关 GMP 场所设回旋加速器室、设备间、控制室、合成分装热室、固体靶热室、药物专用 71#电梯、GMP 相关场所等，拟建 57.78m³ 和 442 m³ 两个核医学科废水衰变池。

核医学科布局方案专家论证：为了更好的满足生态环境、卫生相关标准要求，北京友谊医院于 2019 年 7 月 9 日召开了顺义院区新建核医学诊疗场所辐射安全设计方案专家咨询会，参会专家对布局设计、衰变池及通风等方面提出了建议（见附件 4），北京友谊医院会后根据专家咨询会意见对核医学科防护设计方案做了修改完善。

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

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

表3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	F-18	液态试剂	乙级	1.11E+11	1.11E+09	2.78E+13	诊断	简单操作	回旋加速器合成热室	合成分装热室
2	Ga-68	液态试剂	乙级	4.50E+9	4.50E+07	2.25E+11	诊断	简单操作		
3	N-13	液态试剂	乙级	3.70E+10	3.70E+08	1.85E+12	诊断	简单操作		
4	Cu-64	液态试剂	乙级	5.0E+8	5.00E+06	6.00E+9	诊断	简单操作		
5	O-15	液态试剂	乙级	3.0E+09	3.00E+07	1.50E+11	诊断	简单操作		
6	C-11	液态试剂	乙级	1.40E+10	1.40E+08	7.00E+11	诊断	简单操作		
7	Zr-89	液态试剂	乙级	2.00E+8	2.00E+07	2.40E+9	诊断	简单操作		固体靶热室
8	I-124	液态试剂	乙级	7.40E+8	7.40E+07	8.88E+9	诊断	简单操作		
9	F-18	液态试剂	丙级	1.85E+8	1.85E+05	1.85E+10	实验	很简单操作	动物PET室	合成分装热室
10	Ga-68	液态试剂	丙级	9.25E+07	9.25E+04	4.63E+09	实验	很简单操作		
11	N-13	液态试剂	丙级	3.70E+07	3.70E+04	1.85E+09	实验	很简单操作		
12	Cu-64	液态试剂	丙级	3.70E+07	3.70E+04	4.44E+08	实验	很简单操作		
13	O-15	液态试剂	丙级	3.70E+07	3.70E+04	1.85E+09	实验	很简单操作		
14	C-11	液态试剂	丙级	3.70E+07	3.70E+04	1.85E+09	实验	很简单操作		

15	Zr-89	液态试剂	丙级	3.70E+07	3.70E+05	4.44E+08	实验	很简单操作		固体靶热室
16	I-124	液态试剂	丙级	3.70E+07	3.70E+05	4.44E+08	实验	很简单操作		
17	F-18	液态试剂	乙级	1.67E+10	1.67E+07	4.16E+12	诊断	很简单操作	核医学科门诊	核医学科门诊 高活室
18	Ga-68	液态试剂	乙级	2.78E+09	2.78E+06	1.39E+11	诊断	很简单操作		
19	N-13	液态试剂	乙级	7.40E+08	7.40E+05	3.70E+10	诊断	很简单操作		
20	Cu-64	液态试剂	乙级	2.88E+08	2.88E+05	3.46E+09	诊断	很简单操作		
21	O-15	液态试剂	乙级	7.40E+08	7.40E+05	3.70E+10	诊断	很简单操作		
22	C-11	液态试剂	乙级	7.40E+08	7.40E+05	3.70E+10	诊断	很简单操作		
23	Zr-89	液态试剂	乙级	1.48E+08	1.48E+06	1.78E+09	诊断	很简单操作		
24	I-124	液态试剂	乙级	1.48E+08	1.48E+06	1.78E+09	诊断	很简单操作		
25	Tc-99m	液态试剂	乙级	1.11E+11	1.11E+08	2.78E+13	诊断	很简单操作		
26	Tl-201	液态试剂	乙级	1.85E+09	1.85E+06	1.85E+11	诊断	很简单操作		
27	Ga-67	液态试剂	乙级	9.25E+08	9.25E+06	9.25E+10	诊断	很简单操作		
28	I-123	液态试剂	乙级	3.70E+09	3.70E+07	3.70E+11	诊断	简单操作		
29	I-131	液态试剂	乙级	9.25E+08	9.25E+07	9.25E+10	诊断	简单操作		
30	I-131	液态试剂	乙级	1.48E+09	3.11E+09	1.48E+11	治疗	简单操作		
31	Sr-89	液态试剂	乙级	7.40E+08	7.40E+06	7.40E+10	治疗	很简单操作		

32	Ra-223	液态试剂	乙级	2.96E+07	2.96E+07	2.96E+09	治疗	很简单操作		
----	--------	------	----	----------	----------	----------	----	-------	--	--

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

表 4 射线装置

(一) 加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速 粒子	最大 能量 (MeV)	额定电流 (mA) /剂 量率 (Gy/h)	用途	工作场所	备注
1	回旋加速器	II	1	Cyclone KIUBE	质子	18	100μA×2 (双束流)	生产同 位素	回旋加速器 室	

(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

(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
核医学科门诊和回旋加速器室放射性废水	液态	Tc-99m、F-18、I-123等（B类）			224m ³	总β<10 Bq/L或者按表7-3值控制	57.78m ³ 衰变池暂存	放射性废水在衰变池暂存后，委托有资质的检测机构（CMA）对拟排放的废水进行检测，排放总量和排放方式按照报告表7.3.5章节的放射性废水排放有关规定执行。
核医学科病房废水	液态	I-131、Sr-89等（B类）			438m ³		442m ³ 衰变池暂存	同上
放射性固废（含I-131治疗病号服）	固态	Tc-99m F-18等（A类）			约2100kg	<10 ⁴ Bq/kg	放射性固体废物在放射性废物库内储存。	放射性固体废物暂存时间超过30天后，按照报告表7.3.7章节要求，对废物办理自行解控并作为医疗废物处理，并做好台账记录。
		I-131、Sr-89等（B类）						放射性固体废物暂存时间超过10倍最长半衰期且不少于30天（其中碘-131核素治疗病房产生废物至少暂存180天）后，按照报告表7.3.7章节要求，对废物办理自行解控并作为医疗废物处理，并做好台账记录。
放射性废气	气态	I-131等			<3.7×10 ⁸ Bq	/	净化过滤后稀释排放	经通风橱自带的活性炭过滤器过滤后，在建筑顶部排入大气环境。
气体过滤装置废滤材	固态				80kg（每年更换一次）	<10 ⁴ Bq/kg	放射性废物库内储存。	暂存至少一个月，经自行检测，符合清洁解控要求后作为危险废物处置
废树脂（冷却水）、碳剥离膜、废靶膜	固态	/			每年更换1-2次	不排放	固废间内	送北京市城市放射性废物库。
动物尸体					200只		动物 PET 室冰柜内	满足自行解控要求后按医疗废物处理

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为mg/L，固体为mg/kg，气态为mg/m³；年排放总量用kg。

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

表6 评价依据

法规文件	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》，2015年1月1日。</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，2018年12月29日。</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003年10月1日。</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》，2017年10月1日。</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，2019年3月2日。</p> <p>(6) 《建设项目环境影响评价分类管理名录》，2018年4月28日。</p> <p>(7) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，2017年12月20日。</p> <p>(8) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，2011年4月18日。</p> <p>(9) 《关于发布〈建设项目竣工环境保护验收暂行办法〉的公告》，国环规环评[2017]4号，2017年11月20日。</p> <p>(10) 《北京市生态环境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1月25日。</p> <p>(11) 《关于发布〈射线装置分类〉的公告》，环境保护部、国家卫生计生委公告第66号，2017年12月5日。</p> <p>(12) 《关于发布〈放射性废物分类〉的公告》，环境保护部、工业和信息化部、国防科工局公告第65号，2018年1月1日。</p> <p>(13) 《关于发布放射源分类办法的公告》，原国家环保总局公告第62号，2005年，2005年12月23日。</p> <p>(14) 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》，环保部，环办辐射函〔2016〕430号。</p> <p>(15) 《关于取消建设项目环境影响评价资质行政许可事项后续相关工作要求的公告(暂行)》，生态环境部公告2019年第2号，2019年1月21日。</p> <p>(16) 《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，2018年12月6日。</p>
------	--

<p style="text-align: center;">技术 标准</p>	<p>(1) 《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016), 环境保护部。</p> <p>(2) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)</p> <p>(3) 《操作非密封源的辐射防护规定》(GB11930-2010)</p> <p>(4) 《临床核医学放射卫生防护标准》(GBZ 120-2006)</p> <p>(5) 《放射性废物管理规定》(GB14500-2002)</p> <p>(6) 《医用放射性废物的卫生防护管理》(GBZ133-2009)</p> <p>(7) 《医疗机构水污染物排放标准》(GB18466-2005)</p> <p>(8) 《北京市水污染物综合排放标准》(DB11/307-2013)</p> <p>(9) 《核技术利用放射性废物、废放射源收贮准则》(DB11 / 639-2009)</p> <p>(10) 公安部《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》(GA 1002-2012)</p> <p>(11) 《医用 X 射线诊断放射防护要求》(GBZ130-2013)</p> <p>(12) 《医用 X 射线 CT 机房的辐射屏蔽规范》(GBZ/T180-2006)</p> <p>(13) 《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》(GB/T14583-93)</p> <p>(14) 《辐射环境监测技术规范》(HJ/T61-2001)</p> <p>(15) 《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)</p>
<p style="text-align: center;">其他</p>	<p>(1) NCRP Report No.151: Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities, 2005;</p> <p>(2) AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirements, Med.Phys. 33 (1), January 2006</p> <p>(3) Radiation Protection Dosimetry Vol.98 No 1, 2002</p> <p>(4) Bernard Shleien.1998. Handbook of Health Physics and Radiological Health.3rd</p> <p>(5) 北京友谊医院提供的与本项目相关的申请和技术资料, 2017.6。</p>

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

7.1.1 评价内容

本项目为顺义院区新建核医学科，包括 3 处乙级非密封放射性物质工作场所：地下三层回旋加速器热室工作区域，地下二层的核医学门诊，地下二层的核医学治疗病房，以及 1 处丙级非密封放射性物质工作场所（地下三层动物 PET 室）。新增 1 台回旋加速器、1 台动物 PET/CT、1 台 PET/CT、1 台 PET/MR、3 台 SPECT/CT 及 10 个核素治疗病房等。

7.1.2 关注问题

- (1) 新核医学科辐射屏蔽设计是否满足国家相关标准的要求。
- (2) 辐射安全管理情况及污染防治措施是否满足法规及相关标准的要求。

7.1.3 评价因子

本项目的环境影响评价因子为 X 射线、 γ 射线、 β 射线、 α 射线、放射性“三废”等。

7.1.4 评价范围

按照《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）的规定，并结合该项目辐射为能量流污染的特征，根据能量流的传播与距离相关的特性，确定本项目评价范围为辐射工作场所控制区外周围 50m 区域。

7.2 保护目标

友谊医院顺义院区位于顺义区后沙峪镇，机场北线南侧，具体为顺义新城第 18 街区北部（后沙峪组团）18-01-001 地块，“四至”范围：东至天北路，西至裕泰路，南至规划友谊新街，北至机场北线南侧规划安平街。东西方向约 520 米，南北方向约 284 米。友谊医院顺义院区一期在院区东部新建医疗综合体，院区西部预留未来发展用地。隔天北路东侧为中国航信高科技产业园区。用地南侧规划为居住用地，现状为空地。

本项目顺义院区核医学科相关场所位于医疗综合体（地下 3 层，地上 9 层）西南侧的地下二层和三层内，周围 50m 区域都是医院内部，加速器热室工作区

域位于地下三层，东侧为机械停车库，南侧为1号衰变池、2号衰变池两个衰变池和机械停车位，西侧为地下土层，北侧为实验室，楼上为核医学科诊疗区域；地下二层核医学科诊疗区域东侧为机械停车库，南侧为室外庭院（平常无人），西侧为地下土层，北侧隔公共走廊外为放疗中心，楼上为配电室、血透辅助区，楼下为回旋加速器室、GMP相关场所和停车库，故环境保护目标为该医院从事本项目操作的辐射工作人员、核医学科周围其他公众成员。本项目将采取有效的辐射防护与安全管理措施，确保核医学科运营所致工作人员和周围公众的年受照射剂量低于本报告提出的剂量约束值。本项目评价范围见图7-1所示，项目边界周围50m范围内的保护目标相关情况见表7-1所示。

表 7-1 本项目场所周围 50m 范围内主要保护目标

项目	保护目标	距离(m)	数量(人)	方位	周围50m范围内主要场所或建筑物
地下二层核医学科	核医学科工作人员	0~15	20	东侧	核医学科办公区
	公众	16~50	20	东侧	其他办公区和停车库
	患者或其他工作公众人员	0~50	30	南侧	室外庭院和停车位
	患者或其他工作人员	0~10	30	西侧	患者走廊
	居民	11~50	0		地下土层
	患者或其他工作人员	0~5	20	北侧	公共走廊
	患者或其他工作人员	6~50	50		放疗中心
	核医学科工作人员和公众	/	/	楼下	回旋加速器室和停车库
	其他工作人员	5	15	楼上（地下一层）	配电室、血透辅助区
	患者或其他工作人员	10	50	楼上（一层）	儿科诊室*
地下三层回旋加速器室	公众	0~50	50	东侧	停车库
	公众	0~50	10	南侧	衰变池和停车库
	/	/	/	西侧	地下土层
	其他科工作人员	0~50	5	北侧	实验室
	核医学科工作人员和患者	5	30	楼上（地下二层）	核医学科诊疗区
	其他工作人员	10	15	楼上（地下一层）	配电室、血透辅助区

备注：诊疗后的患者出口位于地下一层西侧室外庭院。

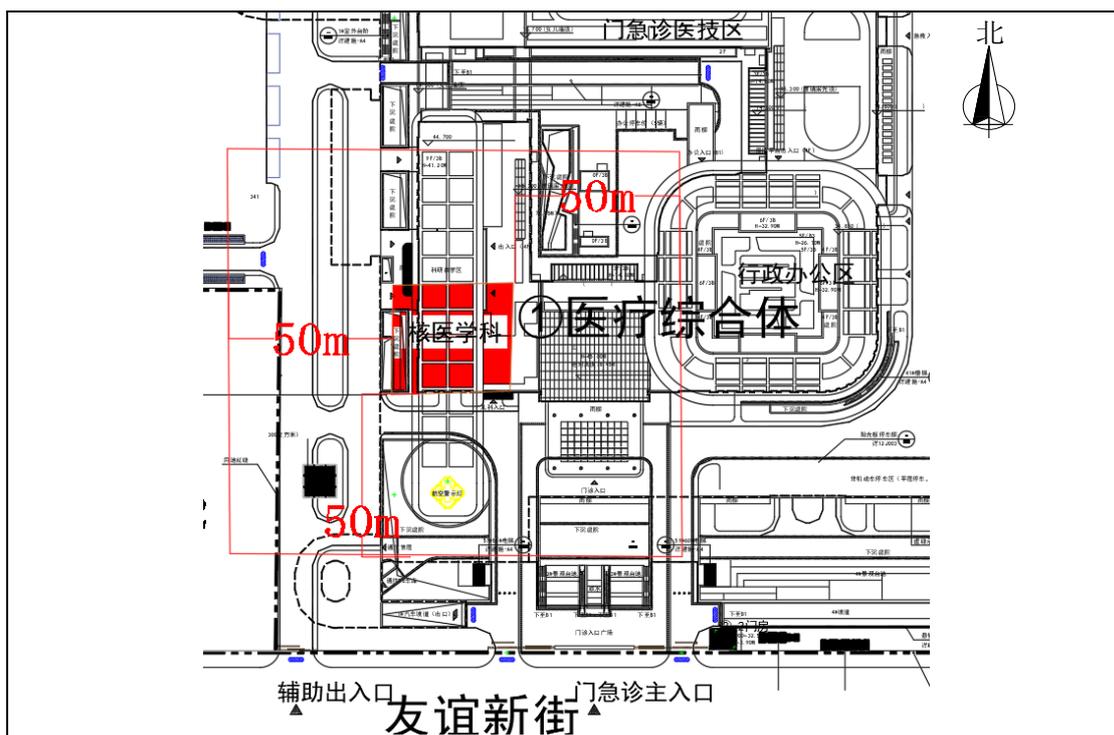


图 7-1 本项目评价范围示意图

7.3 评价标准

7.3.1 剂量限值

电离辐射防护与辐射源安全基本标准（GB18871-2002）规定的剂量限值列于表 7-2。

表 7-2 工作人员职业照射和公众照射剂量限值（GB18871-2002）

职业工作人员	公众
连续五年平均有效剂量 20mSv，且任何一年有效剂量 50mSv	年有效剂量 1mSv；但连续五年平均值不超过 1mSv 时，某一单一年可为 5mSv
眼晶体的当量剂量 150mSv/a 四肢或皮肤的当量剂量 500mSv/a	眼晶体的当量剂量 15mSv/a 皮肤的当量剂量 50mSv/a

GB18871-2002 规定了剂量约束值：对于职业照射，剂量约束是一种与源相关的个人剂量值，用于限制最优化过程所考虑的选择范围。对于公众照射，剂量约束是公众成员从一个受控源的计划运行中接受的年剂量的上界。剂量约束值通常应在公众照射剂量限值 10%~30%（即 0.1~0.3mSv/a）的范围之内。

7.3.2 剂量约束值

职业照射，本项目辐射工作人员取 5mSv/a 作为剂量约束值；对公众，本项目取 0.1mSv/a 作为剂量约束值。

本次评价所取年剂量约束值是单位统一剂量管理目标值。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况，医院应该进行调查并报生态环境部门备案。

7.3.3 接受I-131 治疗的患者出院体内放射性活度限值

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)第 7.4.4.3 条款规定：接受了 I-131 治疗的患者，其体内的放射性活度降至低于 400MBq 之前不得出院。

7.3.4 放射工作场所边界周围剂量率控制水平

(1) 回旋加速器室

本项目回旋加速器室控制区边界外 30cm 处的辐射剂量率应不大于 2.5 μ Sv/h，热室模块箱外辐射剂量率不大于 10 μ Sv/h。

(2) 核医学科门诊

核医学科门诊控制区边界外 30cm 处的辐射剂量率应不大于 2.5 μ Sv/h。

(3) 核医学科碘病房

核医学科碘病房控制区边界外、楼上和楼下的剂量率应不大于 2.5 μ Sv/h。控制区内（碘病房外）的剂量率水平不大于 10 μ Sv/h（属于人员很少停留的场所）。

7.3.5 放射性废水排放控制要求

(1) 水污染物排放标准

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

(2) 排放含放射性核素废水要求

根据《电离辐射与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的第 8.6.2 款规定，不得将放射性废液排入普通下水道，除非经审管部门确认是满足下列条件的低放废液，方可直接排入流量大于 10 倍排放流量的普通下水道，并应对每次排放作好记录：

每月排放的总活度不超过 10 ALI_{min} (ALI_{min} 是相应于职业照射的食入和吸入 ALI 值中的较小者，其具体数值可按 B1.3.4 和 B1.3.5 条的规定获得)。

表 7-3 废水中放射性核素排放导出限值

放射性核素	月排放限值 (Bq)
-------	------------

F-18	2.1×10^9
Ga-68	2.0×10^9
N-13*	2.1×10^9
Cu-64	1.3×10^9
O-15*	2.1×10^9
C-11	8.3×10^9
Zr-89	2.5×10^8
I-124	1.5×10^7
Tc-99m	6.9×10^9
Tl-201	2.1×10^9
Sr-89	2.7×10^7
Ga-67	7.1×10^8
Ga-68	2.0×10^9
I-123	9.5×10^8
I-131	9.1×10^6
Ra-223	2.9×10^4

备注： $ALI_{min}=DL/e_j$ ，其中 DL 取 20mSv， e_j 取食入和吸入值中的较大者，N-13 和 O-15 的值参考 F-18。

废水中放射性核素排放导出限值见表 7-3，含放射性物质的废液应采用槽式衰变池排放，且按标准的有关要求使排放的控制最优化。

如遇到多种核素混合排放时，可由公式（7-1）判断是否容许排放。

$$\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{C_{j,h}} \leq 1 \quad (7-1)$$

式中：

C_j —放射性核素 j 在该废液中的活度浓度或者活度；

$C_{j,h}$ —放射性核素 j 的清洁解控水平推荐值或者排放限值；

n —该废物中所含放射性核素的种类数。

放射性废水排放前，医院将委托有监测资质单位对放射性废水进行监测，

若满足本节（1）和（2）的要求，则向北京市生态环境局提交排放申请，审批同意后，将放射性废液直接排入医院污水处理池。

7.3.6 放射性废气排放管理

根据本项目操作非密封放射性物质的污染源项分析，项目运行后经废气排放的主要核素是 I-131，故对该核素提出排放控制建议值。

本项目建议的公众剂量约束值为 0.1mSv/a。保守假定全年操作并排放气态核素的累计时间为 2000h；“参考人”平均每分钟呼吸空气的体积取 0.02 m³。由《电离辐射与辐射源安全基本标准》表 B3、表 B6 和表 B7 给出的数据，导出本项目公众吸入 I-131 的 DAC 值 5.6 Bq/m³。

7.3.7 放射性固体废物管理

由于核医学科本项目的放射性核素包含有 B 类核素，因此可以将放射性废物分类收集暂存，待衰变至符合清洁解控水平时，再按医疗废物要求进行处理。

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》，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（其中碘-131 核素治疗病房产生废物至少暂存 180 天）后，使用监测仪器对满足衰变时间要求的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。科室详细记录“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。

7.4 放射性工作场所分级

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），非密封源工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分级见表 7-4。

表 7-4 非密封源工作场所的分级

级别	日等效最大操作量/Bq
甲	$>4 \times 10^9$
乙	$2 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$

丙	豁免活度值以上 $\sim 2 \times 10^7$
---	------------------------------

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 F-18、Tc-99m 等类似核素相关活动视为“很简单操作”。

7.5 工作场所放射性表面污染控制水平

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），非密封放射性物质工作场所的放射性表面污染控制水平见表 7-5。

表 7-5 工作场所的放射性表面污染控制水平（Bq/cm²）

类别		α 放射性物质		β 放射性物质
		极毒组	其他	
工作台、设备、墙壁、 地面	控制区	1	4 $\times 10$	4 $\times 10$
	监督区	1 $\times 10^{-1}$	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4 $\times 10^{-1}$	1 $\times 10^{-1}$	4
	监督区			
手、皮肤、内衣、工作袜		1 $\times 10^{-2}$	4 $\times 10^{-2}$	4 $\times 10^{-1}$

上表中值包括固定污染和松散污染的总数。对于皮肤、内衣、工作袜的污染应及时清理，尽可能达到本底水平。对设备、墙、地面的污染，应适当去污后，残存的污染可适当放宽，但需有审管部门的同意，并不超过表中值的 5 倍。表面污染可按一定的面积计算平均值：工作服、皮肤取 100cm²，地板取 1000cm²。

GB18871-2001 附录 B.2.2 条款规定：工作场所中的某些设备与用品，经去污使其污染水平降低到上述表 7-5 中所列设备类的控制水平的五分之一以下时，经审管部门或监管部门授权的部门确认同意后，可当作普通物品使用。

7.6 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，并酌情设有活性炭过滤或其它专用过滤装置，排出空气浓度不应超过有关法规标准规定限值。

本项目核医学科场所高活室内安装有通风橱，操作口风速 $> 1\text{m/s}$ （半开时）。通风橱配套有活性炭过滤器，并设置独立的排风系统，排风口设在本建

筑物顶部，高于本建筑物。

活性炭过滤器具体要求：过滤效率大于 99%，活性炭重量大于 3kg，更换周期为一年。

7.7 核医学相关工作场所的放射性物质污染的防护要求

《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 7-6。根据 GBZ120-2006 标准中表 2 和表 3 的相关参数估算出，本项目属于 I 类、II 类场所，需设置通风橱、专用排风，地板采用 PVC 等易去污材料敷设，地板与墙壁接缝无缝隙，管道特殊要求。

表 7-6 核医学相关工作场所的室内表面及装备结构要求（GBZ120-2006）

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	一般处理	需要
III	易清洗	易清洗	不必	一般自然通风	一般处理	只需清洗设备

7.8 射线装置机房屏蔽防护基本要求

7.8.1 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）给出的不同类型 X 射线机房的屏蔽防护要求。

表 7-7 不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向铅当量 (mm)	非有用线束方向铅当量 (mm)
CT 机房	2（一般工作量） 2.5（较大工作量）	

7.8.2 X 射线设备机房的面积要求

《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）第 5.2 条款指出：每台 X 射线机(不含移动式 and 便携式床旁摄影机与车载 X 射线机)应设有单独的机房，机房应满足使用设备的空间要求；对新建、改建和扩建的 X 射线机房，其

最小有效使用面积、最小单边长度应不小于表 7-8 的要求。

表 7-8 X 射线设备机房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)
CT 机房	30	4.5

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 项目地理和场所位置

8.1.1 地理位置

北京友谊医院本院区位于北京市西城区永安路 95 号，本项目位于顺义区后沙峪镇，机场北线南侧，具体为顺义新城第 18 街区北部（后沙峪组团）18-01-001 地块，顺义院区地理位置图见附图 1，“四至”范围：东至天北路，西至裕泰路，南至规划友谊新街，北至机场北线南侧规划安平街，东西方向约 520 米，南北方向约 284 米，周围关系图见附图 2 所示。

8.1.2 场所位置

本项目顺义院区核医学科相关场所位于医疗综合体（地下 3 层，地上 9 层）西南侧的地下二层和三层内，周围 50m 区域都是医院内部，回旋加速器热室工作区域位于地下三层，东侧为机械停车库，南侧为 1 号衰变池、2 号衰变池两个衰变池和机械停车位，西侧为地下土层，北侧为实验室，楼上为核医学科诊疗区域；地下二层核医学科诊疗区域东侧为机械停车库，南侧为室外庭院（平常无人），西侧为地下土层，北侧隔公共走廊外为放疗中心，楼上为配电室、血透辅助区，楼下为回旋加速器室、GMP 相关场所和停车库，核医学科门诊和治疗病房、回旋加速器热室工作区域周围关系图见附图 3 和附图 4，地下二层和地下三层相关平面布局图见附图 5~附图 8。

8.2 辐射环境现状监测

（1）监测目的

掌握该项目辐射工作场所的辐射环境质量现状水平，为评价提供基础数据。

（2）监测内容

根据污染因子分析，对该项目的辐射工作场所周围进行 X、 γ 辐射剂量率水平监测。

（3）监测点位

选取拟建顺义院区核医学科场所及周围进行监测。

（4）监测仪器与规范

监测仪器的参数与规范见表 8-1。

表 8-1 X-γ 射线剂量率监测仪器参数与监测规范

仪器名称	辐射检测仪
型号/编号	AT1121/44091
生产厂家	白俄罗斯 ATOMTEX
能量响应	15keV~10MeV 不超过对 ¹³⁷ Cs, γ 辐射响应的±30%
量程	X-γ: 50nSv/h~10Sv/h
检定证书	中国计量科学研究院 (检定证书编号: DYjl2018-7862) 有效期: 2018 年 11 月 12 日~2019 年 11 月 11 日
监测规范	《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》(GB/T14583-93) 《辐射环境监测技术规范》(HJ/T61-2001)

(5) 现状监测结果及评价

2019 年 10 月 6 日评价单位对项目地及周围环境辐射水平进行了检测, 评价区辐射水平调查结果见表 8-2。

表 8-2 拟建顺义院区核医学科场所辐射环境水平监测结果

场所名称	点位序号	测点描述	辐射剂量率 (nSv/h)
拟建顺义 院区核医 学科场所	1	拟建医疗综合体东侧	92
	2	拟建医疗综合体西侧	118
	3	拟建医疗综合体南侧	106
	4	拟建医疗综合体北侧	110
	5	机场北线南侧规划安平街	98
北京市范围 ^[1]			42.3~151.6nGy/h

注: 检测结果含宇宙射线响应值; ^[1]: 辐射安全手册, 2011.11。

由表 8-2 中检测结果可知, 拟建顺义院区核医学科场所及周围的 X-γ 辐射剂量率为 92~118nSv/h, 为北京市的天然本底范围之内, 未发现异常高值。

表 9 项目工程分析与源项

9.1 正电子核素药物的生产、合成及分装

9.1.1 回旋加速器的基本原理

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

回旋加速器可安装多个靶体，通过注入靶体内靶材料的不同以生产各种正电子核素。入射正离子通过轰击不同靶内物质发生核反应，发射出中子、质子或 α 粒子，同时生产出具有一定阈能的正电子放射性核素如 C-11、N-13 和 F-18 等，其产率取决于束流强度、被轰击靶体内物质的量、核反应截面及轰击时间，回旋加速器工作原理示意图见图 9-1。

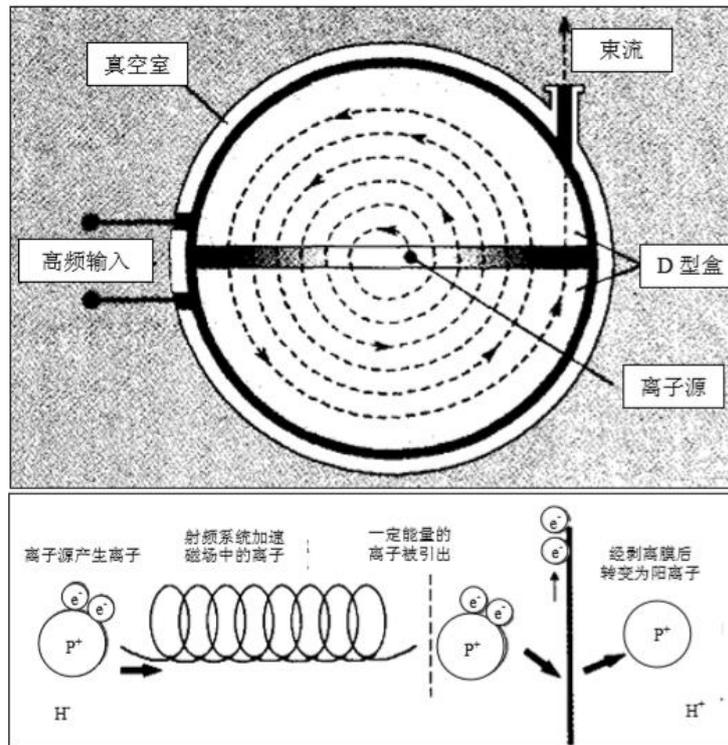


图 9-1 回旋加速器工作原理示意图

回旋加速器靶内产生的核素通过气动方式通过专用的管道运输至合成热室内的药物合成模块，经过化学反应将生成的核素标记到生理性代谢物质上(如葡萄糖、氨基酸、胆碱等)，形成所需要的正电子药物，正电子药物最终通过气动形式从合成热室运输至分装热室，分装成需要的活度送至核医学科。

本项目正电子药物生产工作流程见图 9-2。

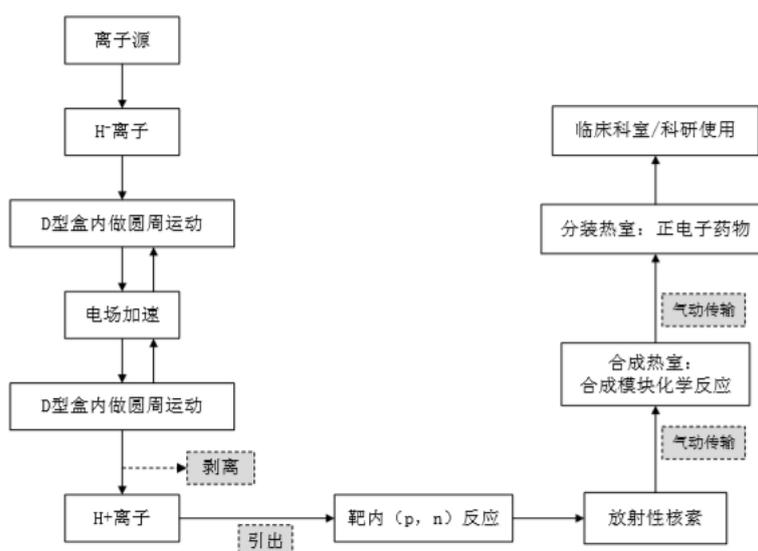


图 9-2 正电子药物生产流程示意图

9.1.2 系统组成

本项目配置的 IBA 公司 Cyclone KIUBE 回旋加速器主要由控制系统、磁场系统、真空系统、射频系统、离子源系统、束流引出系统、靶系统、冷却系统和自屏蔽系统等组成，回旋加速器尺寸为 2m 长×2m 宽×1.85m 高，加速器主体如下图 9-3 所示。



图 9-3 Cyclone@KIUBE 回旋加速器外观图

表 9-1 Cyclone@KIUBE 回旋加速器系统组成及功能

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，进行联锁管理和安全控制。
磁场系统	提供加速器带电粒子做圆周运动转向所需的磁场。

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	提供电场，从离子源抽离电子并进行加速的高频振动电压。
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。IBA提供质子源冗余，以支持两个独立的离子源产生氢离子(H ⁻)，可以通过系统自动迅速切换到第二个质子源来恢复生产。
束流引出系统	Cyclone@KIUBE拥有8个独立的引出端口，可以将8个靶同时安装在回旋加速器上，每一个引出端口都配备有独立的引出系统和真空阀，保证与回旋加速器的真空腔隔离。束流到达引出半径后，负离子穿过一层碳薄箔（剥离膜）失去两个电子，形成带正电的离子，正离子在磁场中改变偏转方向并到达引出端口。
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。液体靶 Nirta 采用 Conical 锥形靶嵌入。锥形靶允许富氧水在束流轰击区域内循环，确保其低消耗。
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。

9.1.3 回旋加速器参数与生产的核素

本项目拟配置的 IBA 公司 Cyclone KIUBE 型回旋加速器加速质子能量最大为 18MeV，最大束流 $2 \times 100 \mu\text{A}$ （双束流），可生产多种放射性核素，详见表 9-2 所示。

9-2 Cyclone KIUBE 型回旋加速器生产主要放射性同位素的参数

序号	靶材料	核反应	产物	轰击时间 min	辐照能量 (MeV)	单次产额 GBq	使用频次
1	H ₂ ¹⁸ O 液体	¹⁸ O(p, n) ¹⁸ F	F-18	60	18	111	1 次/天
2	Zn 盐溶液	⁶⁸ Zn(p, n) ⁶⁸ Ga	Ga-68	60	15	4.5	1 次/周
3	H ₂ O+5 毫摩尔乙醇	¹⁶ O(p, α) ¹³ N	N-13	20	16	37	1 次/周
4	⁶⁴ Ni 盐溶液	⁶⁴ Ni(p, n) ⁶⁴ Cu	Cu-64	60	14	0.5	1 次/月
5	¹⁵ N ₂ +1%O ₂ 气体	¹⁵ N(p, n) ¹⁵ O	O-15	在线	13	3/min	1 次/周
6	N ₂ +1%O ₂ 气体	¹⁴ N(p, α) ¹¹ C	C-11	30	18	14.8	1 次/周
7	⁸⁹ Y 固体	⁸⁹ Y(p, n) ⁸⁹ Zr	Zr-89	60	15	0.2	1 次/月
8	¹²⁴ Te 固体	¹²⁴ Te(p, n) ¹²⁴ I	I-124	60	15	0.74	1 次/月

9.1.4 药物生产、合成的工艺流程

(1) 核素离子的生产

负离子在回旋加速器真空腔内被加速达到最大引出半径并通过非常薄的碳膜剥离两个电子。正离子直接导出到 8 个出口中的一个。束流在靶材料中停止发生(p, n)或(p, α)核反应, 从而产生核素离子。

按照《IBA 回旋加速器操作规程》进行打靶操作, 生产得到的核素离子通过管道传输到热室的合成模块中, 进行化学合成工艺。

回旋加速器生产核素采用的靶位分为固体靶、液体靶和气体靶, 操作方式略有区别。生产 F-18、N-13、Ga-68、Cu-64 核素使用液体靶或气体靶, 换靶和补充原料均不用进入加速器机房, 可通过注射驱动柜控制液体靶材料的装载和冲刷, 注射驱动柜安装在电源室的 PLC 柜中, 靶体注射实际上是通过控制系统将准确质量的液体或气体注射到每一个靶系统内。

生产 Zr-89、I-124 核素采用固体靶片, 放置新靶片时需要技师进入机房操作; 由回旋加速器通过固体靶生产出来的富集 Zr-89、I-124 核素载体靶片通过气动传输装置的管道, 在氦气的推动下, 被传送至显像药物标记合成室内的密闭铅制热室中, 进入药物合成系统。

(2) 化学合成及分装

回旋加速器机房的核素离子生产完成后, 会通过地沟压力管道以液态或气

态形式传输到热室的模块控制箱中。核素传输地沟采用混凝土浇筑，地沟盖板采用 50mm 厚铅防护。热室的模块箱包括两个部分，分别为洁净合成箱和自动分装箱，模块箱的外观图如图 9-4 所示。



图 9-4 模块箱外观图

模块箱正面采用 70mm 的铅进行防护，其余侧面、顶面、地面采用 60mm 的铅进行防护，观察窗位于模块箱正面，其屏蔽防护等效于 70mm 的铅当量。

核素在模块箱中的合成过程中，无需人员干预，均采用计算机程序自动控制。在洁净合成模块中，计算机自动设置的步骤主要包括以下几种（以 F-18-FDG 为例）：

- ① 捕获淋洗：从加速器传过来的核素离子经过 QMA 柱，其中核素离子被附着在柱子上，废水及其中的杂质离子流到废水瓶中收集，单次产生量为 2.5ml/次。用溶液淋洗 QMA 柱，将上面的核素离子带入反应管。
- ② 除水：淋洗结束后加热反应管使乙腈与水共沸进行除水。
- ③ 亲核反应：待冷却完毕后向反应管中加入三氟甘露糖溶液进行亲核反应，F-18 取代三氟甘露糖上的一个羟基。

④ 水解：向反应管中加氢氧化钠溶液进行水解后，加入酸中和。

⑤ 精制：粗产品经过树脂柱中和过量的盐酸，分离提纯，经过无菌滤膜过滤获得最终产品。

同位素药品在洁净合成模块合成完成后，进入同一模块箱的药物分装模块，分装模块箱正面采用 70mm 的铅进行防护，其余侧面、顶面、地面采用 60mm 的铅进行防护，观察窗位于模块箱正面，其屏蔽防护等效于 70mm 的铅当量，药物分装模块的外观图如图 9-5 所示。



图 9-5 药物分装模块外观图

药物分装过程也采用计算机全自动控制，无需人工干预，药物在自动分装模块中将根据预先设计的程序，将试剂分装到各个试剂瓶中，分装程序结束后，模块箱提示工作人员，此时工作人员戴着专用的手套，使用机械手将分装完成的试剂瓶装载到专用的铅屏蔽容器中（整个过程中类似在手套箱中操作），铅屏蔽容器采用 40mm 的铅当量屏蔽，铅屏蔽容器的尺寸为半径 6cm，高 16cm，铅容器盖子为旋转式卡扣盖子，该过程持续 20min/次。

Zr-89、I-124 等通过固体靶生成的核素的合成略有不同。以 Zr-89 为例，Zr-89 核素的制备使用固体靶 Y-89 金属箔片（0.1mm 厚，100%纯度），采用 15MeV/20 μ A 的质子束流轰击靶 60 分钟，轰击结束半小时后，通过气动传输装置的管道，在氦气的推动下，被传送至固体靶热室的 ^{Zr-89} 合成系统，在合成热室内以聚四氟乙烯为容器，采用 6N HCl（高纯，1<1ppb 金属杂质），每次 0.5mL，分 4 次加入，其间加入 25 μ L 的双氧水（30%），用 5mL 的水稀释，使盐酸最终浓度为小于 2 N 后上柱纯化，用 1M 草酸淋洗该柱，淋洗液用于

标记。本项目制备 Zr-89 每月最多轰击 1 次，每次最多生产 0.2GBq，年最大生产量为 3.7E+9Bq。标记时采用 Na₂CO₃ 或 HEPES 缓冲液将草酸锆[Zr-89]溶液的 pH 调整至 7，加入含 DFO 的活性物质，室温下反应 30-60 分钟，采用固相萃取柱（C18 柱、凝胶柱等）或 HPLC 纯化标记物。

9.1.5 药物转移流程

加速器生产的放射性药物通过传输管道输送到合成热室内的工作箱进行分装合成操作，分装并屏蔽好的放射性药物通过热室东南角成品传递窗送到 71#核素专用梯送至地下一层核医学科，进行放化质控分析和病人 PET 诊断。

9.2 污染源描述

9.2.1 主要污染物和污染途径

（1）贯穿辐射

被加速的高能带电粒子与靶或结构材料相互作用，会产生中子和 γ 射线的混合场。中子主要来自于靶以及束流准直器、靶窗(铝、钛等)等回旋加速器部件的(p, n)核反应，其主要来源是质子束流打靶产生的中子。回旋加速器运行时 γ 射线的来源主要有 3 个方面：①质子与靶物质、中子与靶窗及周围部件作用产生的初级 γ 射线；②中子与靶物质、中子与靶窗及周围部件作用产生的次级 γ 射线；③加速器打靶产生的正电子核素，发生正电子湮灭产生的 511keV。

（2）感生放射性

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

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

对于 γ 射线引起的感生放射性，从核反应的阈能来看，能够直接产生感生核素的被加速带电粒子能量多数需要在 10MeV 以上，本项目产生的 γ 射线最高能量为 10MeV，因此，不需要考虑 γ 射线引起的活化。

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

①结构材料活化

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

②空气活化

加速器厅的空气活化后，产生的感生放射性核素主要是 ^{41}Ar 、 ^{11}C 、 ^{16}N 、 ^{15}O ，半衰期是 7.3s~1.83h，辐射类型是 β 、 γ ，主要产生方式是 $^{40}\text{Ar}(\text{n}, \gamma)^{41}\text{Ar}$ 、 $^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{11}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{16}\text{N}$ 和 $^{16}\text{O}(\gamma, \text{n})^{15}\text{O}$ 反应，引起空气活化的中子由级联中子、蒸发中子以及它们慢化后产生的热中子，由于产生的 γ 射线能量较低，所以不考虑由 γ 射线引起的空气活化。空气中氩占大气体积的 0.934%，所以，中子与空气中 ^{40}Ar 发生 $^{40}\text{Ar}(\text{n}, \gamma)^{41}\text{Ar}$ 核反应生成 ^{41}Ar 核素。其他核素被活化的产额远小于 ^{41}Ar 放射性气体，半衰期大于 1 天的有 H-3、Be-7、P-32 和 S-35，其中饱和浓度最高的 ^7Be 还不到 ^{41}Ar 的 1/10，且主要以气溶胶形式存在。因此，本项目其他活化气体和放射性气溶胶的危害几乎可以忽略，主要考虑 ^{41}Ar 。

③冷却水活化

水冷系统是为设备发热部件冷却而设计的封闭循环系统，是加速器整体部件中的一部分，且该系统在加速器机房内，冷却水不会外排亦不与外界接触。

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

④墙体表面活化

当加速器运行的时候，屏蔽室内部水泥墙层会被中子活化，活化产生的放射性核素很多，与混凝土的成分有关，加速器屏蔽室退役时需要考虑机房内层

的活化问题。

(3) 放射性废物

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

放射性药物制取过程中加入的反应介质乙腈溶液和乙醚洗涤液，在同位素交换反应和洗涤完成后，每天产生约 80ml 放射性废液。另外对靶、相关容器、器皿等的冲洗约产生 40ml 放射性废液。操作人员清洗去污可能产生少量的放射性清洗废水。以上废液均进入放射性废水衰变池。

应急状态下产生的废液包括清洗废液和加速器冷却水废液。加速器冷却水废液约 40L，事故状态下可通过加速器机房内地漏导入应急衰变池。

(4) 非放射性污染物

空气在射线强辐射作用下，吸收辐射能量并通过电离产生臭氧 (O_3) 和氮氧化物 (NO_x)。

9.2.2 事故工况

(1) 人员误入或误留回旋加速器大厅

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

(2) 加速器冷却水泄漏

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

(3) 靶破裂事故

在核素的生产过程中，加速器中会加入相应的靶材料。该靶在非常高的压力下（高于大气压 600psi）运行。由于靶比较坚固，在正常的操作下，靶窗很少破裂。但对靶体进行有害制冷或不进行靶窗氦气制冷时，靶窗有可能破裂。

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

(4) 同位素洒落

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

9.2 核医学科门诊

9.2.1 X 射线诊断装置

本项目配套使用 1 台 PET/CT 装置和 3 台 SPECT/CT，属于 III 类射线装置，拟单独备案，故本评价报告不再涉及。

9.2.2 密封校验源

本项目拟配套密封源开展 PET 装置的定期校验，一般属于 V 类放射源，待型号定型后再单独备案，故本评价报告不再涉及。

9.2.3 放射性同位素显像设备与诊断流程

9.2.3.1 核医学扫描诊断装置

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。本项目新建核医学科中涉及的内容为临床核医学中的放射性同位素显像检查，典型的 PET/CT 扫描装置如下图 9-6 所示，典型的 SPECT/CT 扫描装置如下图 9-7 所示：



图 9-6 PET/CT 机设备外观



图 9-7 SPECT/CT 机设备外观

9.2.3.2 工作流程

放射性同位素显像医学检查的工作流程：含示踪核素的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 PET/SPECT 探测成像仪器进行扫描和显像，检查工作流程如下：

工作流程按下列流程：患者预约登记→计划订药（有资质的单位提供，PET 用核素直接由地下三层回旋加速器室提供）→高活室接药→放射性药物准备（核对、测量）→患者给药→用药后候诊区候诊→摆位→图像采集→图像处理→读片、发报告。

订货：提前一天根据预约的检查人数及诊断项目，用核素向药品公司（原子高科股份有限公司）订购标记的放射性药物（试剂 Tc-99m、Tl-201、Ga-67、

I-123 和 I-131 厂家送来时已根据当天使用情况分装好); PET 用核素直接由地下三层回旋加速器室提供, 按照实际使用量直接从 71# 专用电梯送到高活室正电子试剂送上来时是整装, 使用时需要根据实际情况进行分装。

质检: 药物运输至核医学科的高活室门口, 质检人员核对放射性药物名称、规格和数量, 检查包装和外观质量, 在高活室门口的摄像头监控下, 由核医学科负责药物注射工作人员与送药人员办理“点对点”交接手续, 然后暂存于高活室内。

分装: 正电子放射性药物在通风橱内进行分装。

注射: 在注射室内, 打开铅屏蔽盒, 取出一次性注射器, 给患者注射标记放射性药物, 然后将废注射器装入铅屏蔽盒, 放回高活室, 当放射性固体废物处理, 其中外单位送的注射器第二天由放射性药品供货单位收回。

检查: 病人在给药后病人候诊区等候 (F-18 候诊时间约 40min~90 min), 待药物有一定程度的代谢后, 进行 PET 扫描检查 (检查一般不超过 20min); Tc-99m 骨扫描候诊时间 3~4h、心脏 1.5h, 甲状腺 20min~30min, 肾显像不用候诊。

受检者在扫描检查后, 经观察无不良反应即可离开, 如有不适则在医院短暂观察。

9.2.4 放射性核素使用量

PET 检查使用 F-18 药物的用量约 370MBq/人, 每个检查日最多实施 PET 检查 45 人次, 每周工作 5 天; Ga-68 药物的用量约 555MBq/人, 每个检查日最多实施 PET 检查 5 人次, 每周工作 1 天; N-13、O-15、C-11 药物的用量约 370MBq/人, 每个检查日最多实施 PET 检查 2 人次, 每周工作 1 天; Cu-64、Zr-89、I-124 药物的用量约 37~144MBq/人, 每个检查日最多实施 PET 检查 2 人次, 每月工作 1 天。SPECT 显像检查 Tc-99m 药物的用量最大约 925MBq/人, 每个检查日最多实施 SPECT 检查 120 人次, 每周工作 5 天; Tl-201、Ga-67、I-123 药物的用量分别约 185MBq/人、185MBq/人、370MBq/人, 每个检查日每种核素最多实施 SPECT 检查 5 人次, 每周工作 2 天; 用于甲状腺显像检查的 I-131 使用量 5 名病人/天, 用量按 185MBq/人, 每周工作 2 天。

9.2.5 放射性核素分析

(1) F-18、Ga-68、N-13、Cu-64、O-15、C-11、Zr-89、I-124 半衰期分

别为 109.6min、68min、9.97min、1.27h、2.02min、20.4min、3.3d、4.18h，衰变方式是 EC 和 β^+ ， β^+ 粒子在体内经湮灭辐射产生两个方向相反和能量均为 511keV 的 γ 光子。

(2) Tc-99m 半衰期为 6.02h，衰变方式是 IT，发出能量为 140keV 的 γ 射线；Tl-201 半衰期为 73.06h，衰变方式是 EC，发出主要能量为 167.4keV 的 γ 射线；Ga-67 半衰期为 78.26h，衰变方式是 EC，发出主要能量为 93.3keV 和 184.6keV 的 γ 射线；I-123 半衰期为 13.13h，衰变方式是 EC，发出主要能量为 159 keV 的 γ 射线；I-131 半衰期为 8.04d，发生 β 衰变时伴随发射 364.5keV 的 γ 射线。

9.2.6 使用放射性核素污染途径分析

9.2.6.1 正常工况的污染途径

(1) γ 射线。在进行药物交接、质检、注射、观察病人和摆位等操作时，操作人员及注射区、候诊区和扫描机房周围停留的公众可能受到核素释放出的 γ 射线的影响。

(2) 放射性的固体废物。包括剩余的药物、注射器、手套、口罩、棉签、一次性用品等。项目产生含放射性废物收集于高活室铅桶内暂存。

(3) 含放射性废水。主要是给药后的病人使用卫生间而产生的冲厕废水。另外，清洗器皿和洗手时，会产生少量的短寿命弱放废液。

9.2.6.2 非正常工况的污染途径

操作放射性药物时发生容器破碎，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。泼洒的药物挥发将产生少量放射性废气，污染清除将产生少量的放射性固体废物。

放射性表面污染：在使用放射性同位素的过程中，因容器破碎，药物泼洒等，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，发生遗失或被盗，可能造成环境放射性污染。核医学科场所在高活室暂存的放射性同位素，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盗和丢失事件的发生。放射性废物处置或管理不当，造成环境放射性污染。

9.3 核医学科病房（放射性药物治疗）

9.3.1 工作原理

核医学病房涉及的放射性核素治疗包括：I-131 甲亢治疗、I-131 甲状腺癌治疗、Sr-89 和 Ra-223 治疗核素。主要利用放射性核素参与人体代谢自动在特定组织内聚集，对其周围病变细胞造成杀伤。核素 Sr-89、I-131 和 Ra-223 治疗是利用机体内能高度选择地聚集在病变组织的化合物作为载体，将放射性核素运送到病变组织或细胞，使放射性核素与病变细胞紧密结合。

甲状腺具有高度选择性摄取 I-131 的功能，功能亢进的甲状腺组织摄取量将更多。I-131 在甲状腺内停留的时间较长，在甲亢病人甲状腺内的有效半衰期约 3~5 天。I-131 衰变时主要发射 β 粒子，且射程短，仅约 2~3mm，对周围正常组织一般无影响。因此，大剂量 I-131 进入功能亢进的甲状腺组织，这些组织在粒子集中且较长时间的作用下将遭受部分抑制或破坏取得类似部分切除甲状腺的效果。采用 I-131 治疗甲状腺癌患者，绝大多数已经施行甲状腺全切手术，残余甲状腺组织很少，摄 I-131 率很低。口服 I-131 后 3 天，患者体内残余 I-131 量绝大多数低于 400MBq，故住院周期约 3-4 天。预计全年甲状腺癌病人数量约 800 例（每批次最多收治 8 例，一周 2 批次）。

Sr-89 是一种亲骨性放射性核素，进入体内后同钙一样参加骨矿物质的代谢过程，静脉给药后，恶性肿瘤骨转移病灶内的摄取率大于正常骨组织的 2~25 倍，并滞留在癌灶中，发射平均能量为 1.463MeV 的 β 射线，半衰期为 50.5 天，其辐射效应杀伤癌细胞，缩小病灶，起到良好的镇痛作用。

Ra-223 (α 放射性核素) 在内照射时具有极强的细胞毒性，对肿瘤细胞具有较强的杀灭作用，而其短射程对正常组织影响较小 (α 粒子的射程仅 43 微米)，并能够模拟钙的作用，并与羟基磷灰石形成复合物以加快一些部位骨质更新，例如骨转移灶部位。这种强有力的药物的 α 粒子的穿透范围短，不会伤害附近的健康组织和关键的骨髓。对工作人员和患者周围公众外照射影响轻微。

9.3.2 放射性药物治疗流程

(1) 门诊治疗工作流程如下：

向有相应资质厂家订购 Sr-89、Ra-223 注射液或 I-131 口服液→患者（在注射区）施予药物→之后在留观室观察，确认用药正常后离开放射工作场所。

(2) 核素供货厂家运输工作人员将储存 I-131 的专用容器，运至地下二层，沿通道，经缓冲间运至病房高活室贮存。使用前，工作人员将将储源容器安装在自动分装仪内（约 2 分钟）；医生通过隔室操作将 I-131 转移至分装容器中，随后进行稀释和分药，分好的样品进行活度测试（整个测试时间不超过 10 分钟），测试合格的溶液，准备给病人服用。使用具有辐射防护功能的分装容器给病人服药。医生在分装仪一侧，通过铅观察窗，指导对面一侧的病人服药。

9.3.3 放射性核素使用量

本项目门诊治疗使用的核素为 Sr-89、I-131 和 Ra-223，在核医学科接受放射性药物治疗的病人，在用药正常后就离开。Sr-89 使用量最多为 5 名病人/天，每周 2 天，148MBq/病人；用于治疗甲亢的 I-131 使用量最多为 4 名病人/天，每周 2 天，370MBq/病人；Ra-223 使用量最多为 4 名病人/天，每周 2 天，7.4MBq/病人；甲癌每批次最多收治 8 人，一周 2 批次，平均 3.7GBq/病人，全年甲癌病人数量约 800 例。

9.3.4 主要放射性污染分析

Sr-89 为 β 核素，半衰期为 50.5d，衰变方式是 β^- ，发出主要能量为 1.49MeV 的 β 射线；Ra-223 为 α 核素，半衰期为 11.4d，主要发射 α 射线（能量主要为 5.54MeV~5.75MeV），同时还有不同能量和比例的 β 射线（能量主要为 3keV~56keV）和 γ 射线（能量主要为 11.7~269.5keV）；I-131 半衰期为 8.04d，发生 β 衰变时伴随主要发射 364.5keV 的 γ 射线。

治疗过程的主要污染因素是放射性药物释放 γ 射线和 β 射线对环境的辐射影响，以及产生含放射性的废水、废气和固体废物。患者在接受核素治疗后，放射性核素，特别是 I-131，主要通过尿排出（住院 3-4d 中，I-131 从尿中排出量约为给药量的 85%），唾液、汗液和粪便中的排出量较少，呼出量也较少（引自北京大学医学出版社《ICRP 第 94 号出版物：非密封放射性核素治疗后患者出院考虑》）。

(1) 正常工况的污染途径

① 贯穿辐射。在进行药物接收、活度检查、分装、服用、巡视病人和处理放射性废物等操作时，工作人员及病区周围停留的公众可能受到 I-131 释放出的 γ 射线的影响。口服 3.7GBq 的患者住院隔离治疗 3 天后，80%以上的

I-131 排出体外，体内滞留的 I-131 活度可降至 400MBq 以下。

② 放射性废水。清洗器皿，局部去污和洗手时，会产生放射性废液。患者体内的放射性碘主要通过尿液和粪便排出。患者使用卫生间而产生的冲厕废水含有大量的放射性物质。据文献资料，大约 55% 施予活度的 I-131 在最初 24h 排出体外，22% 在第 2 个 24h 排出，总量的 85% 在最初 5d 内排出体外（引自北京大学医学出版社《ICRP 第 94 号出版物：非密封放射性核素治疗后患者出院考虑》）。达标后排入医院污水处理站，再次处理后排入市政下水管网。

③ 放射性固体废物。包括：a. 放射性药物剩余残液；b. 盛装药物的药品、药杯、水杯；c. 操作过程使用的防护服、手套、吸水纸、和托盘等；d. 服药患者使用过的各类物品，如纸巾、被褥和病号服等。除治疗剩余药物外，一般属于低放废物。剩余放射性药物由供应商回收处置；病号服、床单、被罩等污染品，暂存一段时间后，清洗和消毒后重复使用。其他放射性废物暂存后，申请清洁解控，之后按普通医疗废物处置。

④ 放射性废气。I-131 药物为离子型溶液，I-131 易氧化析出。碘在常温下易挥发，在进行药物操作（检验和分装）过程中，将有少量 I-131 进入空气中。患者体内代谢的 I-131 也有极少量（文献报道约 0.008%~0.03% 份额）随呼出气进入空气中，故碘病房、服药室等房间需安装通风系统，并经活性炭吸附过滤后，高空排放。

（2）异常情况下的污染途径

① 放射性药物保管不善，发生遗失或被盗。放射性物品失控可能造成环境放射性污染。

② 由于操作不慎，溢漏、撒泼放射性物质，污染工作台面和地面；放射性物质从患者吐出导致放射性污染。放射性物质污染工作场所、衣物、手和皮肤，增加外照射危险程度，还有可能被食入或吸入体内形成内照射。

③ 错误给药。包括放射性活度不正确，导致 I-131 治疗剂量错误；弄错患者，导致不必要的照射；授乳期妇女受到不必要的照射。

④ 放射性废物处置或管理不当，造成环境放射性污染。

⑤ 服药患者体内核素活度未降至出院水平以下，即离开隔离病房，对公众造成不必要照射。

表 10 辐射安全与防护

10.1 回旋加速器项目安全设施

10.1.1 辐射屏蔽设计

(1) 回旋加速器机房辐射屏蔽设计

回旋加速器室六面墙体拟采用砼屏蔽。具体如下：

1) 东墙、北墙为 2400mm 砼屏蔽，西墙为 1200 砼，顶为 2200 砼；

2) 南侧设有三道迷路内墙和一个迷路外墙，其中北侧两个迷路内墙都是梯形状，厚度分别为 929mm~1427mm、667mm~1244mm，南侧两个迷路墙厚度分别为 500mm、540mm。回旋加速器机房采取的屏蔽措施如表 10-1 所示。回旋加速器室平剖面图见图 10-1、10-2。

表 10-1 回旋加速器机房屏蔽设计

机房名称	尺寸	屏蔽墙体方向	屏蔽设计	周围环境
回旋加速器机房	5×4×2.5m	东	2400mm 砼	合成分装热室和 配电室
		北	2400mm 砼	排风排烟机房
		西	1200mm 砼+土层	土层
		南（迷路方向）	2900mm 砼	设备间和门口大厅
		顶	2200mm 砼	
		防护门	10mm 铅板+20mm 含 硼聚乙烯	门口大厅

注：铅密度：11.34g/cm³；混凝土密度：2.35g/cm³

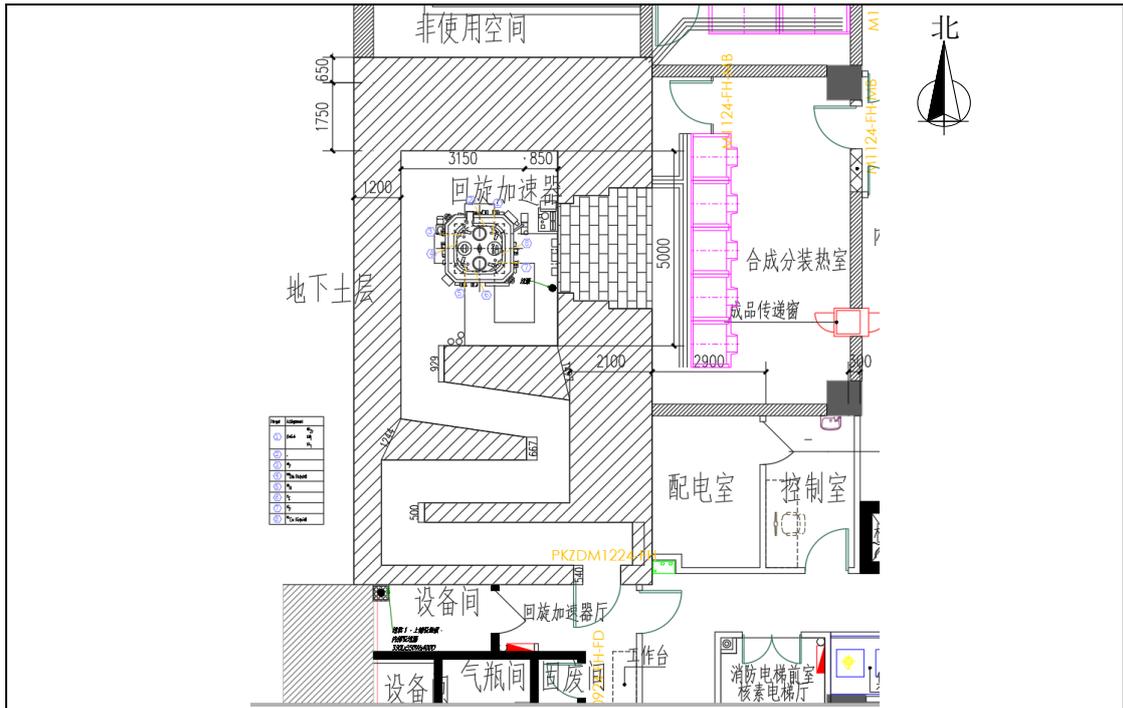


图 10-1 回旋加速器机房平面图

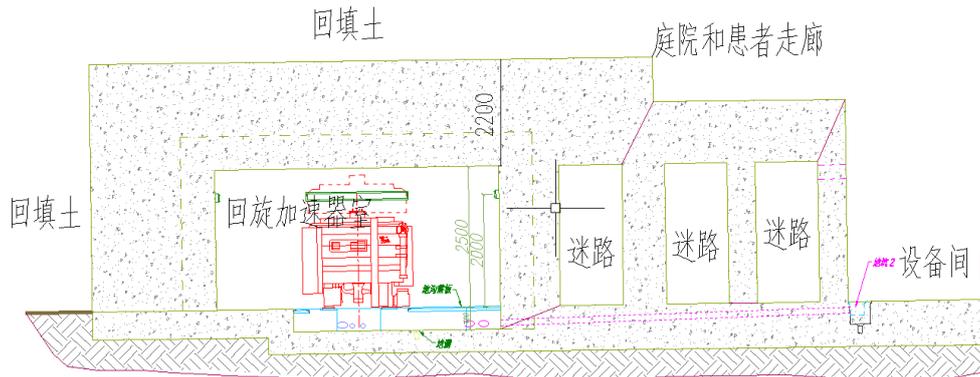


图 10-2 回旋加速器机房立面图

放射性核素的传输管道为聚醚酮树脂（PEEK 管），其孔径为 0.5mm，该管道安装在加速器室和热室地沟里，管道上面覆盖厚度为 5cm 的铅砖，铅砖上面覆盖 0.5cm 的铁板。

回旋加速器机房的电缆管沟、通风管道等穿过屏蔽体时，将采用地沟或 S 型、V 型、Z 型穿过墙壁，并进行屏蔽补偿，确保穿过处的屏蔽效果满足防护要求。防护门与墙体连接处设置有效搭接，以免出现防护薄弱环节。

（2）合成分装热室及固体靶热室

用于正电子药物的合成、分装热室模块箱正面采用 70mm 的铅进行防护，其余侧面、顶面、地面采用 60mm 的铅进行防护，观察窗位于热室模块箱正面，其屏蔽防护等效于 70mm 的铅当量。合成分装热室房间东、南、北及固体靶热

室房间四面墙体为 30cm 混凝土墙，门为 3mm 铅防护门。

(3) 动物 PET-CT 室

本项目拟配备 1 台带自屏蔽系统的动物 PET/CT，根据同类型自屏蔽动物 PET/CT 设计指标，自屏蔽厚度不低于 10mm 铅，使用时屏蔽系统表面剂量与本底相当。动物 PE 室四面墙体为 2mm，顶和地板都为 30cm 砼，门为 2mm 铅防护门。

(4) 固废间

固废间南墙 30cm 混凝土，其余墙体为 20cm 混凝土，门为 2mm 铅防护门。固废间配备铅屏蔽容器，用于存储放射性固体废物（如靶窗），容积 200×200×200mm；屏蔽材料为厚度 50mm 的铅。

(5) 水冷设备间

水冷设备间东、西、南墙 30cm 混凝土，北墙为加速器机房，门为 2mm 铅防护门。水冷设备间设有地漏，应急状态下可将加速器冷却水排入应急衰变池。

10.1.2 辐射安全与防护措施

10.1.2.1 回旋加速器场所的安全设施

(1) 安全连锁：

- ① 加速器机房防护门与加速器的高压连锁，当防护门未关闭到位时，加速器无法开启高压出束；当加速器工作过程中误操作打开防护门时，加速器立即停止出束。
- ② 控制台设有急停按钮。
- ③ 控制台操作系统设有账号密码，防止非工作人员误操作。

(2) 工作状态指示灯和警示标识：加速器机房防护门外设置工作指示灯，醒目位置设置电离辐射警告标志和中文警示说明。

(3) 紧急开门装置：加速器机房入口，靠近防护门处内外各设置 1 个紧急开门装置，当人员被关在机房内紧急情况下按下开关，可实现防护门从内部打开，同时加速器停止出束。

(4) 巡检急停按钮：加速器机房四面墙体、迷路设置巡检急停按钮（具有急停功能），加速器出束前，工作人员进去加速器机房检查按下巡检按钮，避免加速器启动束流，人员出来后，巡检按钮一个个复位确认无人后关闭防护门，在控制台确认按下清场开关后才能出束。

10.1.2.2 热室及其它 GMP 实验室安全设施

(1) 场所分区及其标识

该场所包括合成分装热室和固体靶热室及缓冲间、准备室、处理室、一更、二更等，分为控制区和监督区，其中合成分装热室和固体靶热室工作场所等为控制区，入口醒目位置设置电离辐射警告标志；

(2) 热室核素传输联锁：当加速器制备出 F-18 等核素后，放射性核素传输之前，热室设备将根据程序设定，自动检测合成热室的门是否已经关闭，热室里面的压力是否满足负压要求；只有这两项条件均满足的情况下，放射性核素才能通过管道进行传送，同时在控制室内操作台上有相应的核素传输工作状态指示灯；

(3) 辐射监测

合成分装热室及固体靶热室所在房间内安装固定式剂量监测探头，当探测到剂量率超过设置阈值时（如设置为 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ）可报警。配备 2 台个人剂量报警仪，便携式的表面污染仪和辐射监测仪 1 台，人员出入口配置 1 台手脚表面污染检测仪。

(4) 通风换气设施

热室模块箱设置单独的排风系统，自带独立排风管道，排放位置安装高效活性炭过滤器，阻止合成药物及分装时产生的放射性气体排出，活性炭部分放置于维修通道中，并使用铅屏蔽保护，更换时只需取下铅砖屏蔽即可更换；热室气体经自带活性炭过滤后再由风机引至屋顶排放，屋顶排风口设中高效过滤器净化装置。其它 GMP 区域设置独立的送风、排风系统，不与该楼层的中央空调混用，出风口设有活性炭过滤器。

(5) 门禁

GMP 区进口和出口均设置门禁装置，仅该区域人员可以授权，防止无关人员进入。在场所的入口及各功能用室粘贴电离辐射警告标志。

(6) 污染防治措施

实验室的地面、墙面均采用易清洗不易渗透的 PVC 材料；地板与墙壁接缝无缝隙设计。工作台表面采用易清洗的不锈钢材料。

回旋加速器和热室工作场所安全与防护设施设计要求分别见表 10-2、10-3。

表 10-2 回旋加速器辐射安全防护设施与运行核查结果表

序号	检查项目	是否拟设置	备注	
1*	A 场所设施	加速器厅为控制区	√	
2*		出入口电离辐射警示标志	√	防护门处设置
3*		出入口加速器运行状态显示	√	防护门处设置
4*		电视监控系统	√	机房内设有7个监控摄像头
5		语音广播系统	/	
6*		控制区内有工作警报装置和警示标志	√	剂量报警和电离辐射警示标识
7*	B 安全联锁	机柜或操作台防非工作人员操作的锁定开关	√	设有密码系统
8*		门与加速器高压触发联锁	√	门与出束高压联锁
9*		控制台有紧急停机按钮	√	1个
10*		火灾报警仪与加速器联锁	√	火灾报警时加速器不能出束
11		防护门与控制区内的辐射剂量仪联锁	/	
12*	C 监测设备	控制区内固定式辐射剂量监测仪器	√	防护门内外、控制台设置
13*		个人剂量报警仪	√	2台
14*		γ和中子个人剂量计	√	每人均配置
15		便携式γ剂量测量仪	√	1台
16		便携式中子剂量测量仪	√	1台
17*		便携式表面沾污仪	√	1台
18*	D 感生放射性	强活化部件表面标有电离辐射警告标志	√	设备表面
19*		更换下来活化部件有专设的存放地点	√	固废间铅罐内
20*	E 其他	控制区通风系统	√	
21		停机后，控制区通风	√	
22		灭火器	√	

注：加*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

表 10-3 放药生产安全防护设施与运行核查结果表

序号	检查项目	是否拟设置	备注
----	------	-------	----

1*	A 场所 设施	场所分区及其标识	√	分为控制区和监督区
2*		入口处电离辐射警示标志	√	入口及热室粘贴
3*		卫生通过间	√	设一更、二更
4*		人员出口配备污染监测仪	√	配手脚沾污仪
5*		单独的放射性通风设施	√	热室和其它 GMP 实验区独立通风
6*		工作箱或通风柜（半开口处风速 1-2m/s）	√	配置符合要求的热室
7*		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	√	
8*		放射性液体容器不易破裂或有不易破裂的套	√	
9*		放射性下水系统或暂存设施	√	
10		放射性下水系统标识	√	
11*		放射性同位素暂存库或设施	√	
12*		放射性固体废物暂存设施	√	
13		安保设施	√	
14	B 监测 设备	便携式监测仪器仪表（污染、辐射水平等）	√	便携式辐射检测仪和表面污染监测仪各 1 台
15*		个人剂量计	√	工作人员均佩戴
16		个人剂量报警仪	√	2 台
17	C 防护 用品	防护手套、口罩等个人防护用品	√	
18		工作服	√	
19	D 应急 物资	去污用品和试剂	√	
20		合适的灭火器材	√	

注：加*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

10.2 核医学科门诊辐射安全防护设施

10.2.1 辐射屏蔽设计

核医学科门诊位于顺义院区医疗综合体（地下 3 层，地上 9 层）地下二层的西南角，控制区外墙都是混凝土结构。场所根据辐射防护要求，设计了含砷、铅防护门、铅玻璃，专用手套箱，放射性废水衰变池和固体废物间。此外，还配备有防辐射注射窗、铅制废物桶，药品盛装铅盒等防护器具等，以及工作服、拖鞋等工作人员防护用品，实体屏蔽方案见表 10-4 所示。核医学科辐射屏蔽设计见表 10-5。

表 10-4 核医学科场所主要场所的屏蔽设计

序号	场所名称	屏蔽墙体方向	屏蔽厚度
1	PET/CT 室	东、南、西、北墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	6mmpb
		观察窗	6mmpb 当量铅玻璃
2	PET/MRI 室	东、南、西、北墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	6mmpb
		观察窗	6mmpb 当量铅玻璃
3	3 间 SPECT 室	东、南、西、北墙	20cm 砼
		顶棚、地面	20cm 砼
		防护门	3mmpb
		观察窗	3mmpb 当量铅玻璃
4	注射后候诊室 4~6	东、南、西、北墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	6mmpb
5	注射后候诊室 1~3	东、南、西、北墙	20cm 砼
		顶棚、地面	20cm 砼
		防护门	3mmpb
6	高活室	东、南、西、北墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		注射窗	40mmpb、20mmpb 当量铅玻璃
		通风橱	40mmpb 当量铅玻璃
7	源库	东、北墙	20cm 砼
		西、南墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
9	废物间	东、南、北墙	20cm 砼

		西墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	2mmpb
		东墙	30cm 砼
9	负荷试验室	西、南、北墙	20cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	3mmpb
		东、北墙	30cm 砼
10	肺通气室	西、南墙	20cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	3mmpb
		东、北墙	30cm 砼

备注：各功能室墙面、地面均为光滑饰面。

表 10-5 核医学科门诊辐射安全防护设施与运行核查结果表

序号	项目	内容	是否拟设置	备注
1*	A 场所 设施	场所分区布局是否合理及有无相应措施/标识	√	地面标注控制区和监督区
2*		场所门外电离辐射警示标识	√	出入口、机房防护门、高活室门上粘贴电离辐射警示标志
3		独立的通风设施（流向）	√	高活室设带屏蔽设计的通风橱
4		有负压和过滤的工作箱/通风橱（乙级以上）	√	拟配有有负压通风橱
5		治疗病房病人之间防护（屏蔽、通风）	/	该场所无治疗病房为单人间
6*		注射或口服取药用屏蔽	√	配备两个注射窗口
7		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	√	墙面、地面均为光滑饰面
8		移动放射性液体时容器不易破裂或有不易破裂的套	√	放射性药物密封于专用屏蔽容器

9*		病人专用卫生间	√	专用卫生间及排水管线
10*		放射性同位素暂存库或设施	√	同位素在高活室暂存
11*		放射性固体废物收集容器和放射性标识	√	10 个暂存用废物桶，1 处废水衰变池。
12		安全保卫设施（贮存场所必须）	√	受检者检查区入口和出口均设有门禁系统。储源室出入口设防盗门、入侵报警、视频监控等。
13	B 监测设备	便携式监测仪器仪表（污染、辐射水平等）	√	1 台辐射剂量巡测仪和 1 台表面污染监测仪
14*		个人剂量计	√	所有工作人员配备 TLD 个人剂量计
15		个人剂量报警仪	--	--
16		放射性活度计	√	高活室配备活度计
17	C 放射性废物和废液	放射性下水系统及标识	√	57.78m ³ 废水衰变池
18*		放射性固体废物暂存间（设施）	√	设废物间，贮存放射性废物
19		废物暂存间屏蔽措施	√	墙体和铅桶屏蔽
20		暂存间通风系统	√	废物间设一个排风口
21*	D 防护器材	个人防护用品	√	铅玻璃，配备一次性医用口罩和手套
22*		放射性表面去污用品和试剂	√	洗涤灵、酒精和棉球
23		灭火器材	√	干粉灭火器

注：加*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

10.2.2 辐射防护措施

(1) 实行控制区和监督区分区管理。

(2) 通风橱台面和注射操作台面光滑易清洗易去污，操作处设置承接盘、衬垫等，注射后的用品置于专用收集罐，患者检查床面铺薄塑料布。

(3) 工作人员进入辐射工作区，穿工作服，涉及放射性药物的操作佩戴乳胶手套。核医学科拟配备表面污染仪，工作人员相关操作后应使用仪器及时监测个人防护用品外表面、操作用品和操作场所的表面污染。

(4) 外照射防护：注射窗为具有防护功能的铅玻璃窗，可有效减少注射过程中工作人员受照剂量，候诊室、显像室均为实体屏蔽，配备 10 个铅废物桶和 5 套铅衣（SPECT 使用）。严格根据需要扫描量和药量制备，在保证诊断效果的条件下，尽可能减少放射性同位素的使用量，以降低 γ 辐射水平，保证人员的受照剂量和周围环境的辐射水平处于可合理达到的尽量低水平。

(5) 内照射的防护：高活室配备具有防护功能 40mmPb 当量的通风橱，并带有大活性炭过滤器，设备正面配有铅玻璃、观察窗及操作工作孔。在通风橱内分装放射性药物。通风橱设置专用排风管道，排风口引至楼顶。通风橱的风量满足要求（半开情况下，风速大于 1m/s）。一旦发生放射性污染，应收集污染物，先采用吸水纸擦除方法处理，监测表面污染状况，采取措施确保表面污染水平低于控制限值，并将擦拭物做为放射性固废处置。

通风橱性能：同位素药物分装防护室（通风橱）为负压设备，并带有微负压百级净化的功能，当负压风机进行排风工作时，防护室内为负压状态，负压风速大于 1m/秒，当正压风机工作时，百级净化空气将从净化送风天花射流垂直向下，使得防护内部空间形成百级净化，并经过底部回风及夹层风道完成内循环，保证了设备负压和净化的要求。

(6) 妥善收集固体放射性废物。拟配 10 个 5mmpb 铅废物桶，其中废物库内和注射室内各放 2 个铅废物桶，每个候诊室拟各放 1 个。试剂废弃的放射性药物注射器、诊断试剂盒、包装物、棉棒、一次性用品等物品按类别、日期放入废物库内。放射性固废根据要求暂存一定时间后自行监测表面污染和辐射剂量水平，如满足清洁解控要求后作为医疗废物处理。

(7) 衰变池废水排放前委托有资质单位进行监测。

(8) 储源库将采取安保措施，安装防盗门、闭路监视系统、红外防闯入报警系统等。安装火灾报警器，配备灭火器材，设有应急通道，有放射性同位素应急包装容器，以及必要的警示标志和警戒线。

(9) 按需要量制备或订购同位素，到货同位素，核医学科专门人员负责点对点接收同位素，清点数量，登记放射性药品台账。在核医学科内登记交接后贮存在高活室通风橱内，注射后的注射器立即放回屏蔽包装内，防止被盗和污染，由放射性药品供货公司取回（PET 使用试剂产生的注射器除外）。

10.3核医学科病房辐射安全与防护措施

10.3.1 辐射屏蔽措施

核医学科病房设置在地下二层核医学科南侧，其中病房、放射性废物贮存间、服碘室墙壁均采用混凝土防护（具体见表 10-6），安装不低于 6mm 铅当量的防护门。拟配备有铅罐、防辐射放射性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，配套建造放射性废水收集排放设施。病房工作区辐射安全防护设施设计核查结果建见表 10-7。

表 10-6 核医学科病房主要场所的屏蔽设计

序号	场所名称	屏蔽墙体方向	屏蔽厚度
1	10 间病房	东、南、西、北墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	6mmpb
2	放射性废物库	东、南、西、北墙	30cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	3mmpb
3	留观室	东、北墙	30cm 砼
		南、西墙	20cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼
		防护门	3mmpb
4	病房高活室	东、南、西、北墙	20cm 砼
		顶棚、地面	30cm 砼

	门诊治疗窗口	20mmpb 当量
	甲癌服药窗口	40mmpb 当量
	防护门	3mmpb

备注：各功能室墙面、地面均为光滑饰面。

表 10-7 核医学科病房辐射安全防护设施与运行核查结果表

序号	项目	内容	是否拟设置	备注
1*	A 场所 设施	场所分区布局是否合理及有无相应措施/标识	√	地面标注控制区和监督区
2*		场所门外电离辐射警示标识	√	出入口、高活室门上粘贴电离辐射警示标志
3		独立的通风设施（流向）	√	高活室、每间病房、服药室等设独立通风
4		有负压和过滤的工作箱/通风橱（乙级以上）	√	拟配有有负压通风橱
5		治疗病房病人之间防护（屏蔽、通风）	/	该场所病房为单人间
6*		注射或口服取药用屏蔽	√	配备服药和注射窗口
7		易去污的工作台面和防污染覆盖材料	√	墙面、地面均为光滑饰面
8		移动放射性液体时容器不易破裂或有不易破裂的套	√	放射性药物密封于专用屏蔽容器
9*		病人专用卫生间	√	专用卫生间及排水管线
10*		放射性同位素暂存库或设施	√	同位素在高活室暂存
11*		放射性固体废物收集容器和放射性标识	√	12 个暂存用废物桶，1 处废水衰变池。
12		安全保卫设施（贮存场所必须）	√	治疗区入口和出口均设有门禁系统。储源室出入口设防

				盗门、入侵报警、视频监控等。
13	B 监测设备	便携式监测仪器仪表（污染、辐射水平等）	√	1 台辐射剂量巡测仪和 1 台表面污染监测仪
14*		个人剂量计	√	所有工作人员配备 TLD 个人剂量计
15		个人剂量报警仪	--	--
16		放射性活度计	√	高活室配备活度计
17	C 放射性废物和废液	放射性下水系统及标识	√	442m ³ 废水衰变池
18*		放射性固体废物暂存间（设施）	√	设废物间，贮存放射性废物
19		废物暂存间屏蔽措施	√	墙体和铅桶屏蔽
20		暂存间通风系统	√	废物间设一个排风口
21*	D 防护器材	个人防护用品	√	铅玻璃，配备一次性医用口罩和手套
22*		放射性表面去污用品和试剂	√	洗涤灵、酒精和棉球
23		灭火器材	√	干粉灭火器

注：加*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

10.3.2 辐射防护措施

(1) 设置 I-131 治疗专用病区。病区设有值班室、卫生通过间、放射性废物库、I-131 服碘室、单人隔离病房等。将放射性废物库、I-131 服碘室、单人隔离病房、以及病区走廊作为控制区管理。将卫生通过间（含缓冲区）作为监督区进行管理。高活性服碘室和病房地面用无缝隙、防渗，且容易清洗和去污的材料覆盖（如地胶等），墙面 1.5m 高度张贴防渗的 PVC 墙纸。

(2) 外照射防护措施。病房墙壁、防护门采用具有屏蔽 γ 射线的材料建造。含 I-131 治疗药物置于专用屏蔽盒内贮存。采用自动分装仪进行放射性物质质控和分装，局部使用铅玻璃和铅砖屏蔽以遮挡 γ 射线，穿铅衣、铅围裙，戴铅手套、铅眼镜等个人防护用品，采用派药柜给病人服药。服药患者应视为移动放射源，医护人员与患者之间的距离应尽可能远，并尽量缩短接触时间。要

求服药患者多饮水、多排便，安静在病房休息，少走动。一般情况下，在患者服药 48h 内，医生和护理人员通过病房对讲系统查房，不进行病房保洁工作。治疗期间禁止非治疗人员同室陪护。

(3) 内照射的防护：在缓冲间、服碘室、碘病房和放射性废物库均设排风口，以减少污染物的聚积。所有核素病房的空气经风管集中在一起，经过一个竖管在顶部排放，排放口设置碘过滤装置。一旦发生放射性污染，应及时去污，并收集污染物，视情况采取封闭房间的措施，减少污染物的扩散。工作人员穿戴防护服、防护围裙和手套及防护面罩等，限制暴露在污染环境中的时间。

(4) 放射性废水集中收贮衰变。服碘室产生的少量放射性废液和病房卫生间排水通过专用管道（局部外面包裹 6mm 铅皮），排至楼下废水衰变池。病房设置冲厕提示，建议患者入厕后，马上冲马桶，以减少楼下屋顶回水弯出和水平管道内放射性废液的残留。衰变贮存池有效容积约为 442m³。

(5) 妥善收集固体放射性废物。剩余的 I-131 药物由供货商收回集中处置。设置废物贮存间。废弃的放射性药物服药杯、个人防护用品等按使用日期分别装入专用储存箱衰变。服药患者使用过的物品（特别是床上用品、病号服、遗留物品）需经过存放衰变，待达到清洁解控水平，方可作为非放射性废物处理。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》，本项目使用核素为 B 类，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（其中 I-131 核素治疗病房产生废物至少暂存 180 天）后，使用监测仪器对满足衰变时间要求的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 0.08Bq/cm² 和 0.8Bq/cm²，可对废物解控并作为医疗废物处理，并在放射性固体废物暂存、处置管理台账上详细记录解控废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、废物处置人员和处置日期等信息。

(6) 工作场所设置电离辐射警告标志和中文警示说明，在每个病房内和 1 号衰变池附近拟配备固定剂量报警仪。

(7) 放射性废水衰变池的池壁采取严格防渗措施，具有超位溢流和报警功能，放射性物质通过的管道应有文字标记和流动方向标记。任何维修前需进行辐射监测。

(8) 控制区入口处，设置缓冲区，可以存放、穿戴防护服，放置一台污染监

测仪和去污用品和镊子等。

10.4 场所布局及辐射防护措施

10.4.1 选址设计合理性

本项目顺义院区核医学科相关场所位于医疗综合体（地下3层，地上9层）西南侧的地下二层和三层内，周围50m区域都是医院内部，回旋加速器室位于地下三层，东侧为机械停车库，南侧为1号衰变池、2号衰变池两个衰变池和机械停车位，西侧为地下土层，北侧为实验室，楼上为核医学科诊疗区域；地下二层核医学科门诊和病房区域东侧为机械停车库，南侧为室外庭院（平常无人），西侧为地下土层，北侧隔公共走廊外为放疗中心，楼上为配电室、血透辅助区，楼下为回旋加速器热室工作区域和停车库。患者从北侧进入核医学科，外购核素入口、病患出口位于主体建筑地下一层的西南部，直通地下一层西侧室外庭院，2个出入口分别设置，回旋生产放射性药物由地下三层专用71号专用核素电梯送至地下二层高活室，使用放射性同位素过程中对周围环境和公众的影响很小，该项目核医学科选址合理。

10.4.2 建筑布局

（一）回旋加速器室平面布局与辐射分区

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）的要求，回旋加速器热室工作区域的辐射分区如下，分区图参见图10-4。

控制区：包括回旋加速器室、2个正电子药物合成分装热室及缓冲间、控制区走廊、运输药物电梯及缓冲间、固废间、动物PET室。其中，对于回旋加速器室，其运行过程中不允许任何人进入；对于其他生产场所，生产过程中仅允许辐射工作人员进入。

监督区：为便于管理，将入口更衣室、一更（二更）缓冲走道、加速器控制室、相关配套房间及走廊等区域划为监督区，在进行同位素药物生产、分装的过程中，仅允许辐射工作人员进入。

场所布局考虑了放射性工作场所与非放射性工作场所分开，不同放射性操作或污染水平的工作场所分开，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

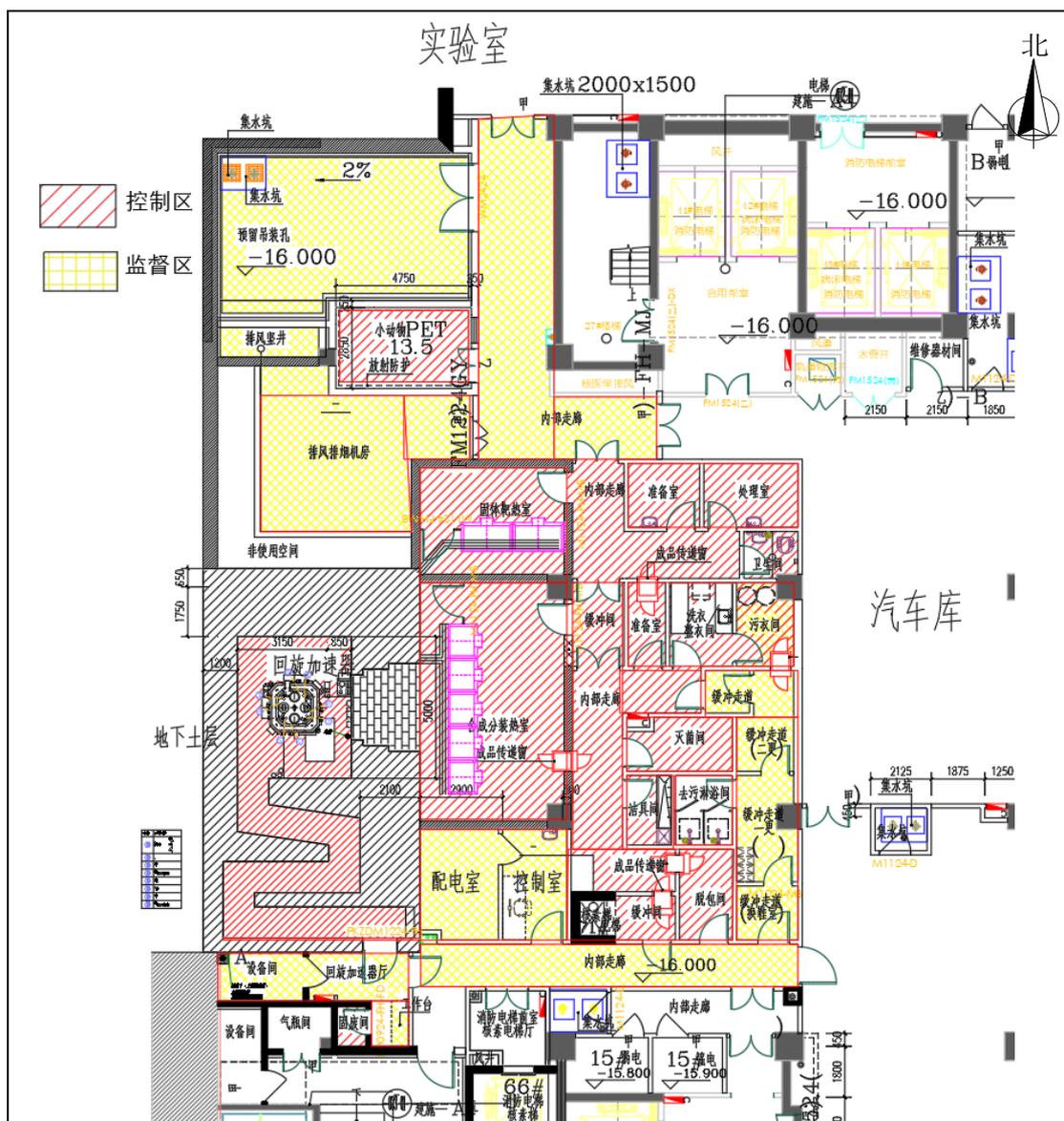


图 10-4 地下三层辐射工作场所分区示意图

(二) 核医学科门诊建筑布局

核医学科诊断区域使用核素 F-18、Tc-99m 等核素开展核素显像检查，建筑布局情况见图 10-5。按照使用功能区划设计为三个分区：

(1) 接诊区：包注射前括候诊区，患者及其陪护人员由北侧人员入口处进出该区域。

(2) 核素诊断检查工作区（控制区），包括注射室、负荷实验室、高活室、储源库、PET/CT 室、PET/MRI 室、3 间 SPECT 室、控制室、3 间高能候诊室、3 间低能候诊室、废物间、功能测定室、患者通道、抢救室、留观室等。该区出入通道安装门禁系统。

(3) 工作人员办公区（监督区），包括控制廊等。

场所布局考虑了放射性工作场所与非放射性工作场所分开，不同放射性操作或污染水平的工作场所分开，工作人员区域与病人区域分开，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

核素诊疗场所按照尽可能减少对周围辐射影响，以及满足临床工作便捷性的原则进行布局设计。从功能分区来看，清洁办公区、监督区和控制区划分明确，且相对隔离，满足了核医学门诊诊疗的辐射安全管理的要求。

监督区和控制区拟设有门禁隔离，且在注射后候诊区内还设有单向门禁，加强病人的管理，防止病人到处走动，可有效减少对周围公众和职业人员受到不必要的照射。

高活室配套有通风柜，废气有组织在楼顶排放。诊疗区域拟配有 2 号废水衰变池，门诊患者的排泄物进入衰变池暂存后排放，可有效减少放射性废液对环境的影响。控制区配套建设放射性废物间，所有放射性废物暂存后，申请清洁解控，可有效减少放射性固体废物对环境的影响。

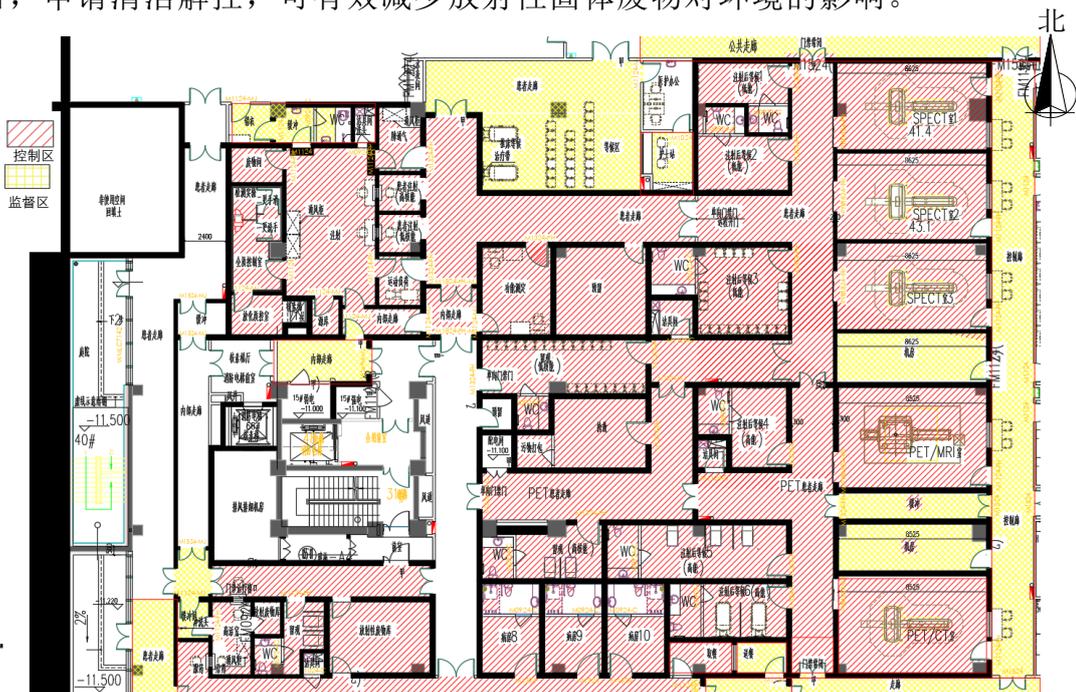


图 10-5 核医学科门诊平面布局图

(三) 核医学科病房建筑布局

(1) 平面布局

核医学科放射性核素治疗住院工作区规划使用核素为I-131，门诊治疗区规划使用 I-131、Sr-89和Ra-223三种核素，按照使用功能区划设计为清洁工作区、核素治疗操作区和住院病区，清洁工作区和控制区通过缓冲区和门禁隔离。具

体使用如下：

a) 清洁工作区，包括被服库、监控室、办公室。

b) 核素治疗操作区，包括工作人员缓冲间、高活室、I-131服药室、留观室、放射性废物库。

c) 住院病区，设10间甲癌病房，共10张治疗床位，房间带独立卫生间。

该区出入通道安装门禁系统。

核素治疗操作区和住院病区作为辐射安全管理控制区，严格限制无关人员进入。场所布局考虑了放射性工作场所与非放射性工作场所分开，不同放射性操作或污染水平的工作场所分开，工作人员区域与病人区域分开，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

(2) 放射工作场所布局合理性分析

碘病房按照尽可能减少对周围辐射影响，以及满足临床工作便捷性的原则进行布局设计。从功能分区来看，普通办公区、监督区和控制区（核素治疗和住院病区）划分明确，且相对隔离，满足了核医学治疗的辐射安全管理的要求。此外，医护人员办公场所位于辐射工作场所的东侧，以尽量减少普通医护人员受到不必要的照射。碘病房为单人病房（配套卫生间），安装有门禁系统、对讲系统、视频监控系统、辐射剂量率检测系统等技术手段，加强病人的管理，防止病人到处走动，可有效减少对周围公众和职业人员受到不必要的照射。

碘病房均配套有病房排风系统，可有效地将病人呼出气中所含I-131过滤后排放至室外，可减少对工作场所停留人员的内照射，并有效减少放射性气体对环境的影响。碘病房设有废水衰变池，住院病人的排泄物暂存后排放，可有效减少放射性废液对环境的影响。碘病房配套建设放射性废物贮存室，病房产生的所有放射性废物暂存后，申请清洁解控，可有效减少放射性固体废物对环境的影响。



图 10-6 核医学科病房平面布局图

10.4.3 人流、物流等设计合理性分析

(一) 回旋加速器室建筑人流、物流

为便于管理、减少交叉污染，本项目在进行布局时进行了优化，已尽可能合理安排人流、物流的流向。由图 10-7 可见，人流通道主要位于环形走廊内，辐射工作人员由东南侧走廊进入加速器控制室、合成分装热室和固体靶热室。物流东侧与楼上通过专梯相连，缩短了运输路线，降低了运输过程中对地面沾污的可能性。本项目涉及同位素操作的房间布局相对集中，便于统一管理。建设单位设置有专门的固废间，同位素药物的生产与放射性废物存放分开，不存在交叉污染，涉及同位素操作的相关房间周围也无长期停留的公众点，物料的进出途径也比较合理。整体上来看，本项目同位素房间的布局是合理可行的。回旋加速器室人流物流示意图见图 10-7。

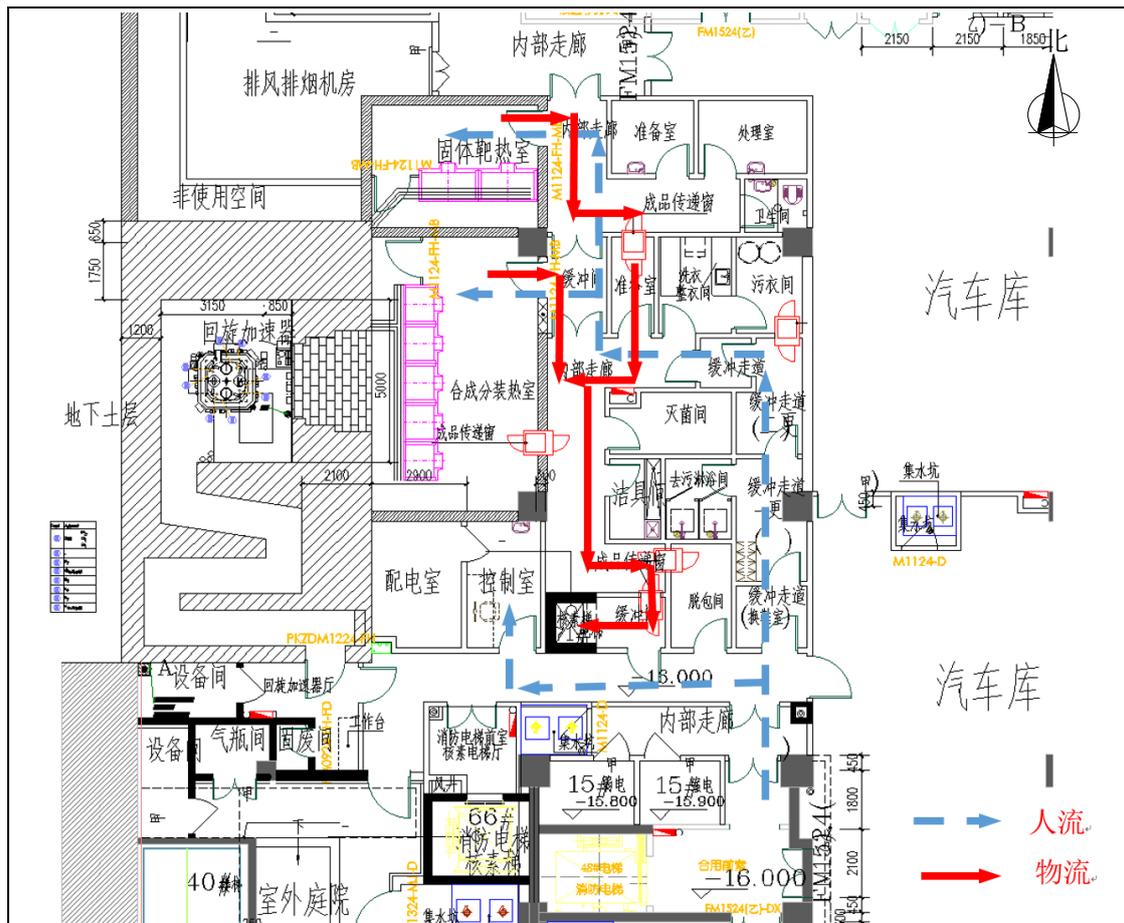


图 10-7 人流物流示意图

(二) 核医学科门诊人流、物流等设计合理性分析

核医学科门诊区域设置受检者检查区入口和出口，均设有门禁系统。只有本科室工作人员有授权，人流、物流示意图见附图 12。

(1) 功能分区

核医学科门诊辐射工作场所实行分区管理。其中注射室、负荷实验室、高活室、储源库、PET/CT 室、PET/MRI 室、3 间 SPECT 室、3 间高能候诊室、3 间低能候诊室、废物间、功能测定室、患者通道、抢救室、留观室等等作为控制区进行管理，严格限制非工作人员进入。控制廊、机房、走廊、缓冲间等作为监督区进行管理，限制无关人员进入，控制区、监督区划分明确、独立，设置合理，满足辐射防护管理和职业照射控制要求。具体分区情况如图 10-5 所示。

(2) 患者显像检查流程

患者在候诊区进行登记——→在候诊区候诊——→由患者走廊从北侧入口进

入检查区——→在注射室接受药物注射 ——→在候诊区休息——→按检查要求排尽小便——→进行扫描检查——→检查完毕，由核医学科门诊西侧坐电梯或楼梯出口地下一层的西南部，直通地下一层西侧室外庭院。

（3）工作人员工作流程

➤ 高活室工作人员：

工作人员从北侧缓冲间进入更衣间——→更换鞋和工作服 ——→引导受检者接受药物注射，在指定区域候诊，交待注意事项，或进行药物接收、质检、分装和注射操作 ——→工作结束后在缓冲间更换工作服、工作鞋，由医生办公区离开。

➤ 控制廊操作人员：

工作人员由北侧的门进入，完成工作后从北侧离开。

（4）放射性物品流转过程

外购放射性药物由供货公司通过地下一层西侧室外庭院进入 66 号电梯——→由高活室南侧走廊进入并送至高活室——→在核医学科高活室（分装室）内药品管理员与送货人员办理验收交接手续——→记录药品规格、批次、数量以及收货时间——→药品暂存于放射性药物和放射源暂存库——→在高活室通风橱内进行药物分装和注射操作——→废弃的放射性污染材料暂存在废物间专用废物桶内——→待满足清洁解控环境管理要求后，转移至医院医疗废物间集中进行处理。剩余的放射性药物连同包装容器由供货方在下次送药时收回。

回旋生产放射性药物由由地下三层专用 71 号电梯送至高活室——→在核医学科高活室（分装室）内药品管理员与送货人员办理验收交接手续——→记录药品规格、批次、数量以及收货时间——→药品暂存于放射性药物和放射源暂存库——→在高活室通风橱内进行药物分装和注射操作——→废弃的放射性污染材料暂存在废物间专用废物桶内——→待满足清洁解控环境管理要求后，转移至医院医疗废物间集中进行处理。

（5）放射性废物转移路线

注射窗旁设置一个含 5mm 铅的废物桶，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 5mm 铅的废物桶，废物桶交替使用，一个废物桶储存满后更换另一个，待放射性固废放置一个月后，清洁解控处置，作为医疗废物处理，从控制区出

口运出，并详细记录“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。

（三）核医学科病房人流、物流等设计合理性分析

核医学科病房设置受检者检查区入口和出口，均设有门禁系统。只有本科室工作人员有授权，人流、物流示意图见附图12。

（1）医护人员人流设计

一般情况下，医护人员通过对讲和视频系统进行查房和询问，医护人员不进入控制区。医生在给病人服药或者急救时，进入控制区。护理人员在楼层保洁和废物收集时，进入控制区。① 医生在缓冲区更换衣服和工作服，进入碘病房，将I-131 铅罐送至服碘室 → 医生在控制室操作自动分装仪，完成药物活度检验和分装 → 医生在高活室，通过观察窗，指导对面服碘室的病人服药 → 工作结束后在缓冲区更换工作服、工作鞋 → 洗澡后，离开核素治疗操作区。② 护理人员在东侧缓冲区更换工作服、工作鞋进入碘病房 → 开展楼层保洁和废物收集等工作（患者从取餐室取餐） → 工作结束后返回缓冲区更换工作服、工作鞋 → 洗澡后，离开控制区。

（2）住院治疗患者人流设计：

患者办理住院手续后到护士站 → 接诊护士安排患者到指定病房，并进行入院辐射防护知识教育 → 分批服用NaI-131 药物，在病房休养（尽可能在床上休息） → 治疗周期（3d-4d），且体内I-131 残留活度低于400MBq 时 → 通过病房中部北侧单向门禁离开病房。

（3）放射性物品流转设计：

住院甲癌治疗：为便于放射性药物的订购、施药与辐射防护管理，通常一批患者（8人左右）同时入院、同时给药。送药公司将放射性药品送至地下一层西侧室外庭院进入66号电梯 → 到地下二层后由北侧走廊运至服碘室。碘病房住院患者病房产生的放射性污染物，待病人出院后，收集暂存于该层的放射性废物库暂存。病人床上用品和病号服，暂存一段时间后，从患者通道离开控制区，送洗衣公司清洗。

门诊治疗：放射性药物由供货公司通过地下一层西侧室外庭院进入 66 号电梯 → 由高活室北侧走廊进入并送至病房高活室 → 在核医学科病房高

活室内药品管理员与送货人员办理验收交接手续——→记录药品规格、批次、数量以及收货时间——→药品暂存于高活室通风橱内——→注射操作（药物厂家送来时已按要求分装好）——→废弃的放射性污染材料暂存在废物间专用废物桶内——→待满足清洁解控环境管理要求后，转移至放射性废物库集中进行处理。剩余的放射性药物连同包装容器由供货方在下次送药时收回。

（4）放射性废物转移路线

注射窗旁设置一个含5mm铅的废物桶，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放射性废物库。放射性废物库设置2个含5mm铅的废物桶，废物桶交替使用，一个废物桶储存满后更换另一个，待放射性固废放置一个月后，清洁解控处置，作为医疗废物处理，从控制区出口运出，并详细记录“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。

10.4.4 放射性废水暂存和排放

本项目医院拟设有两个放射性废水池，位于地下三层回旋加速器室南侧衰变处理泵房内，见图 10-8，2 号衰变处理泵房内的 2 号衰变池（槽式，总容积约为 57.78m^3 ， $14.44\text{m}^3/\text{池}\times 4$ 池）位于北侧，1 号衰变处理泵房内的 1 号衰变池（槽式，总容积约为 442m^3 ， $110.5\text{m}^3/\text{池}\times 4$ 池）位于南侧，两个衰变池的平剖面图见附图 15。本项目核医学科产生的放射性废水排放情况如下：

地下二层核医学科门诊控制区产生的废水包括给药受检人员专用卫生间产生的冲厕废水、高活室产生的洗涤废水和地下三层回旋加速器室场所产生的废水。这些放射性废水经独立的排水管道排入位于地下三层 2 号衰变处理泵房内的 2 号衰变池，衰变池排出的废水，经检测合格后将经医院污水管网，排至市政污水处理厂。

地下二层核医学病房控制区产生的放射性废水包括为给药受检人员专用卫生间产生的冲厕废水、高活室产生的洗涤废水。这些放射性废水经独立的排水管道从地面下排入位于地下三层 1 号衰变处理泵房内的 1 号衰变池，衰变池排出的废水，经检测合格后将经医院污水管网，排至市政污水处理厂。

核医学科放射性废水收集排放系统示意图见图 10-9，地下二层和地下三层核医学科控制区的废水排放图见图 10-10 和图 10-11。

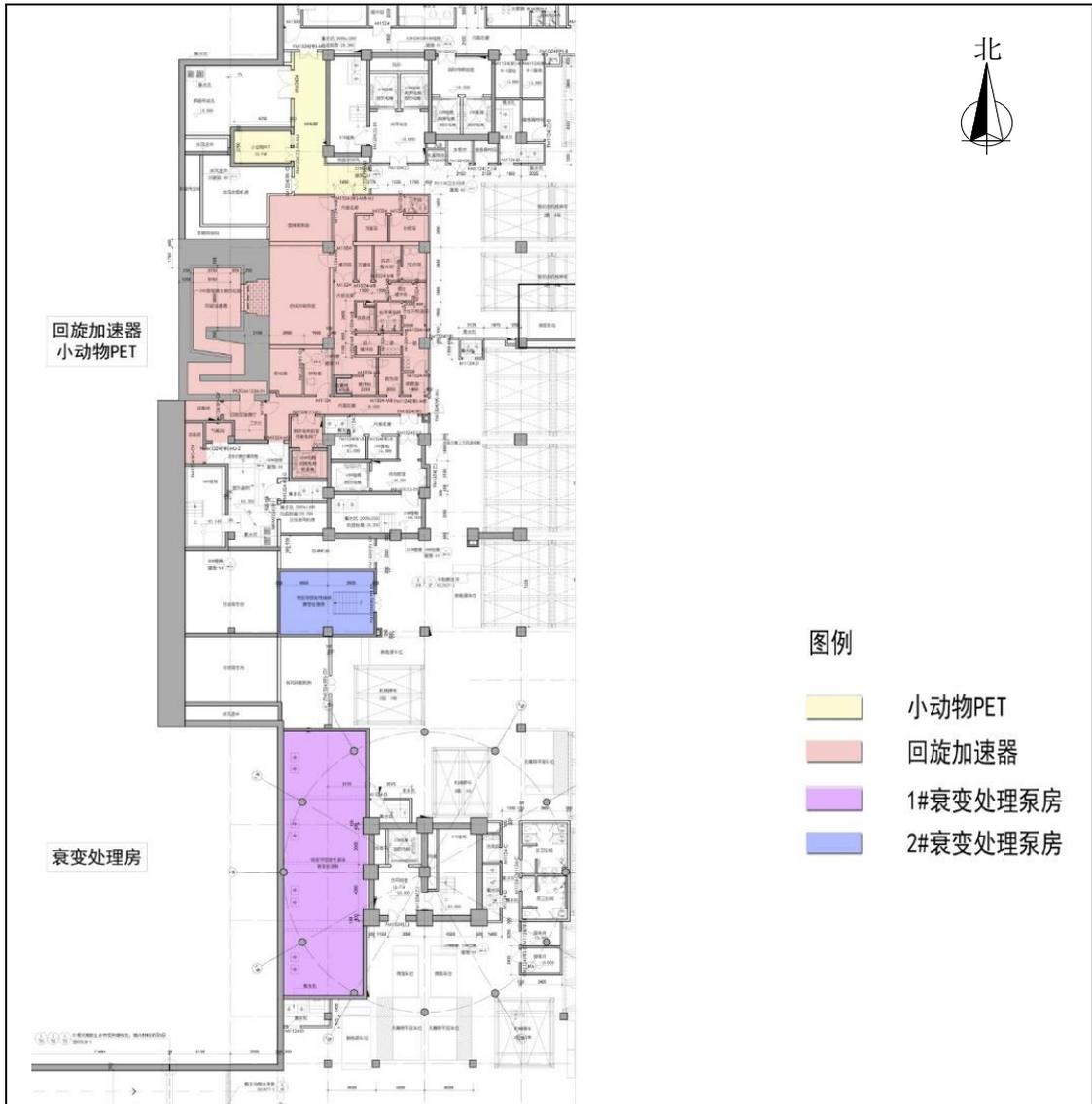


图 10-8 衰变池位置图

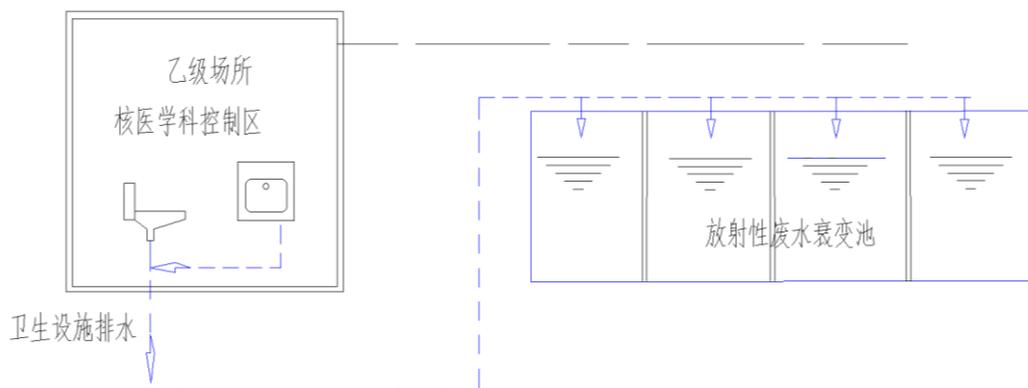


图 10-9 核医学科放射性废水收集排放系统示意图

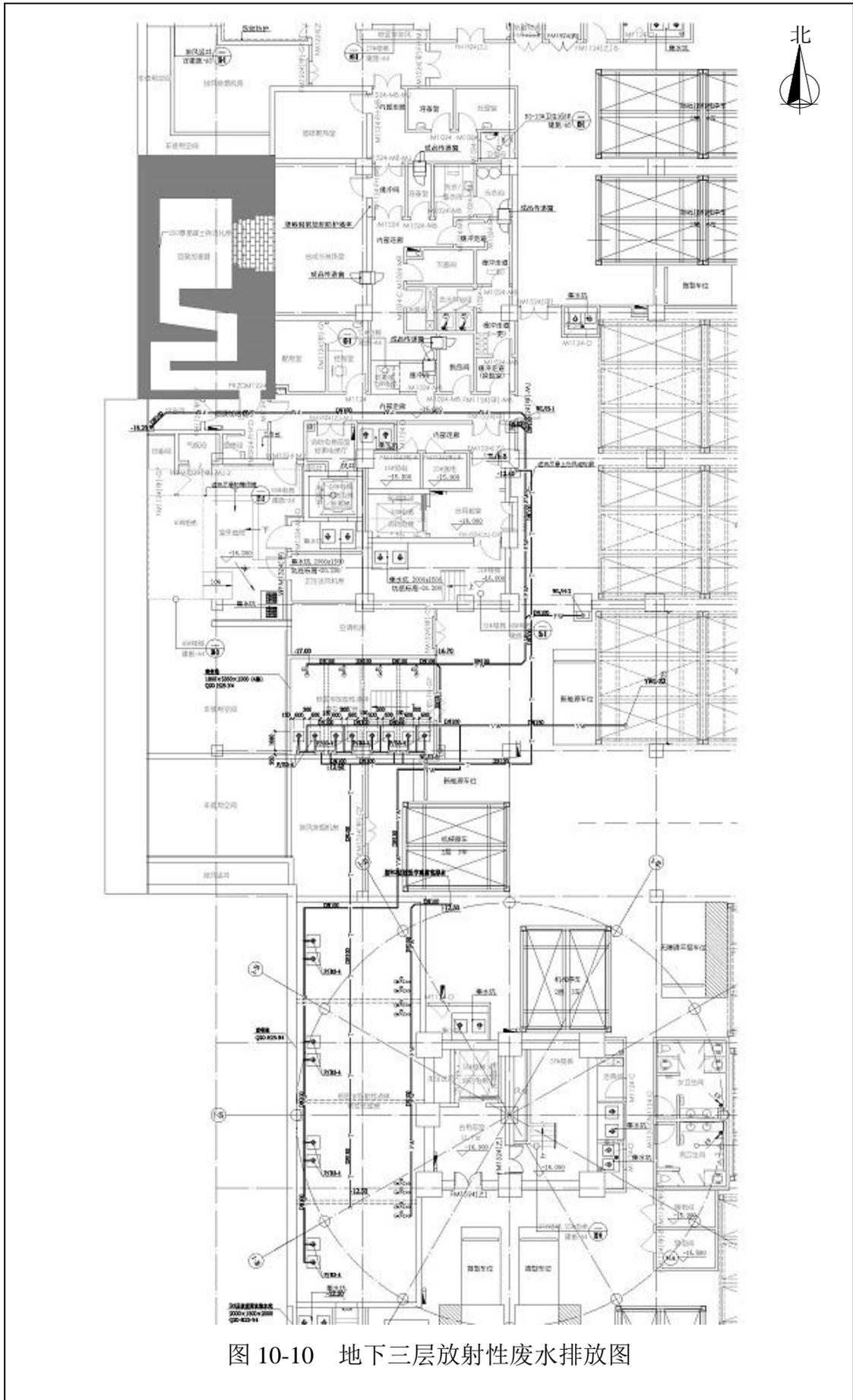


图 10-10 地下三层放射性废水排放图

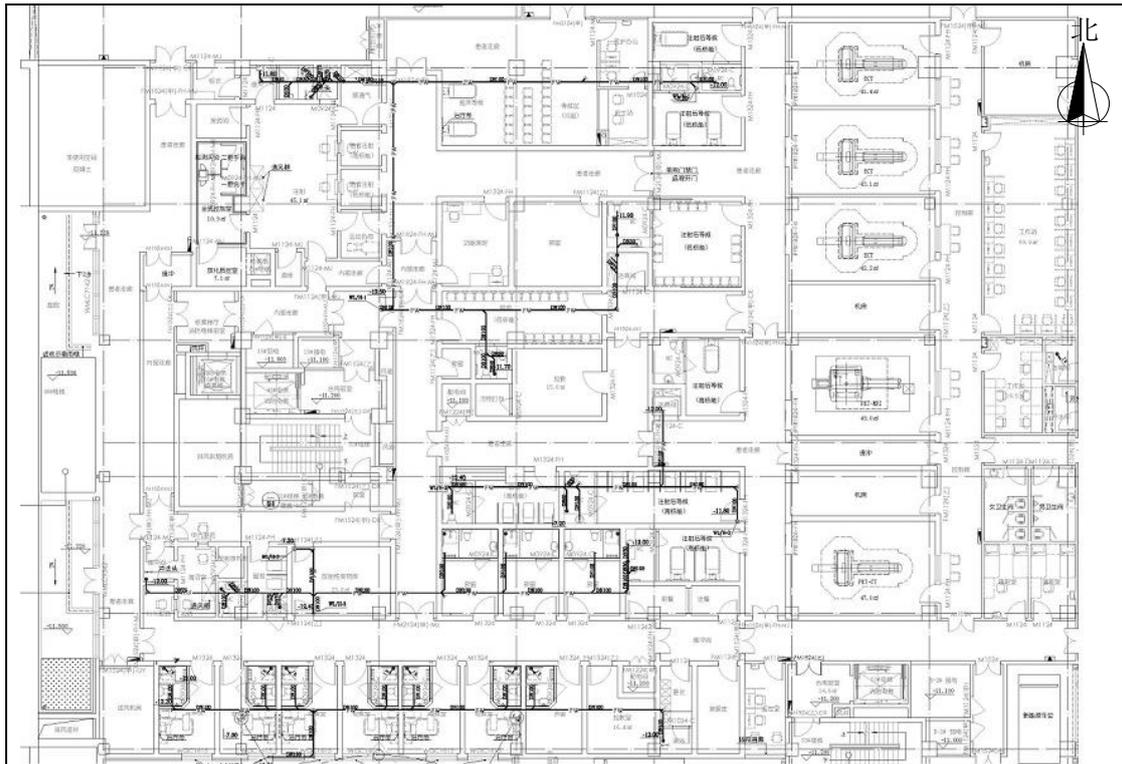


图 10-11 地下二层放射性废水排放图

10.4.5 顺义院区核医学排风系统

核医学排风共分为 7 个排风系统，其中地下三层为 3 个独立排风系统，地下二层为 3 个独立排风系统，地下三层与地下二层辅助区共用一套排风系统。各排风机出口处设置活性炭过滤装置。具体如下：

1. B3 回旋加速器区域排风单独经竖风道接至屋顶风机，风量为 2000m³/h；
2. B3 衰变池设备间排风单独经竖风道接至屋顶风机，风量为 4800m³/h；
3. B3 合成热室排风单独经竖风道接至屋顶风机，风量为 2000m³/h；
4. B2 核医学病房高活室（I-131）排风单独经竖风道接至屋顶风机，风量为 6000m³/h；
5. B2 核医学诊疗场所高活室排风单独经竖风道接至屋顶风机，风量为 10000m³/h；
6. B2 核医学病房排风单独经竖风道接至屋顶风机，风量为 4000m³/h；
7. B3 核医学其他控制区辅助用房（独立设置区域风机）与 B2 核医学诊疗场所其他控制区辅助用房（独立设置区域风机）经共用竖风道接至屋顶，并在屋顶设有辅助用房总排风风机。B3 辅助用房排风量为 2500m³/h，B2 辅助用房排风量为 8500m³/h，系统总风量为 11000 m³/h。

核医学科排风简化图见图 10-12，核医学科控制区的排风图见图 10-13 和图 10-14。

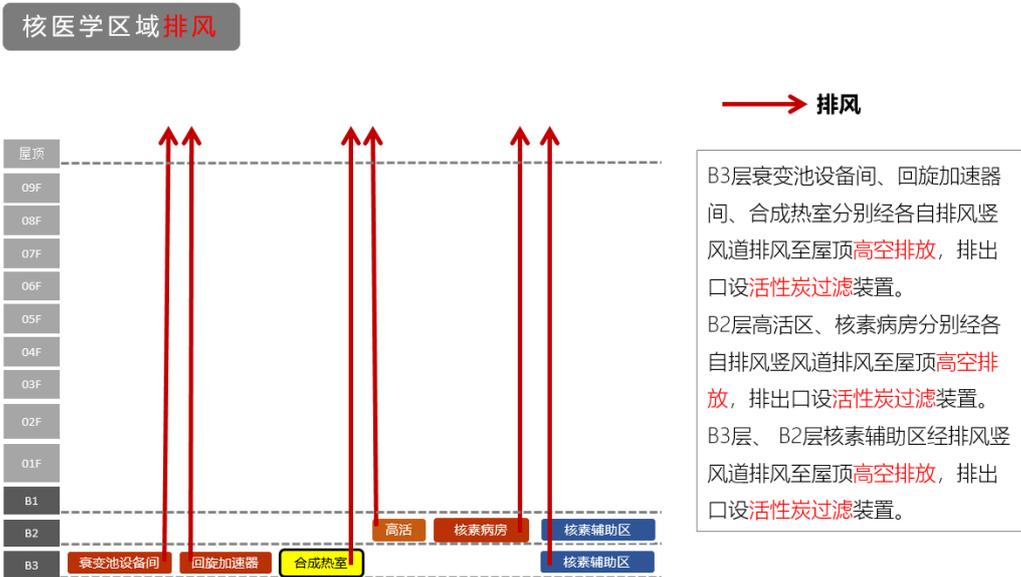


图 10-12 核医学科排风简化图

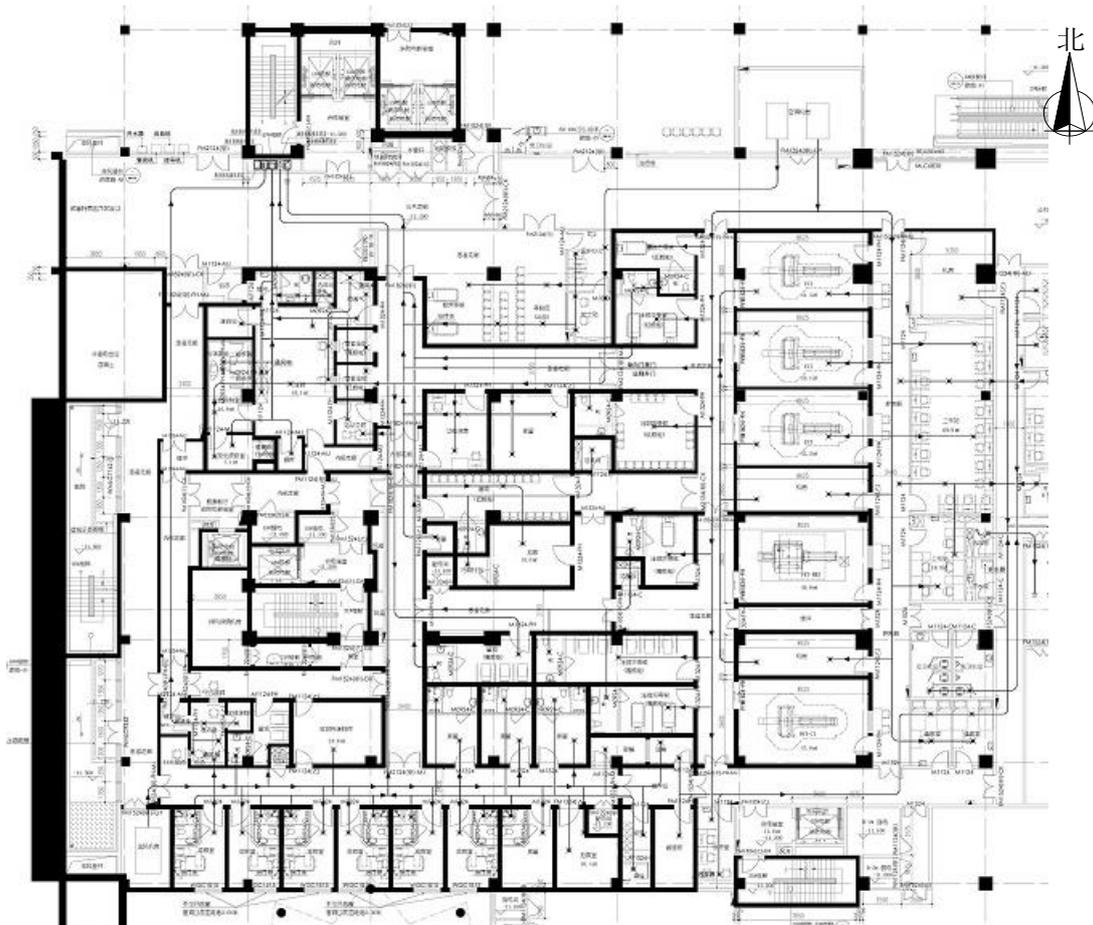
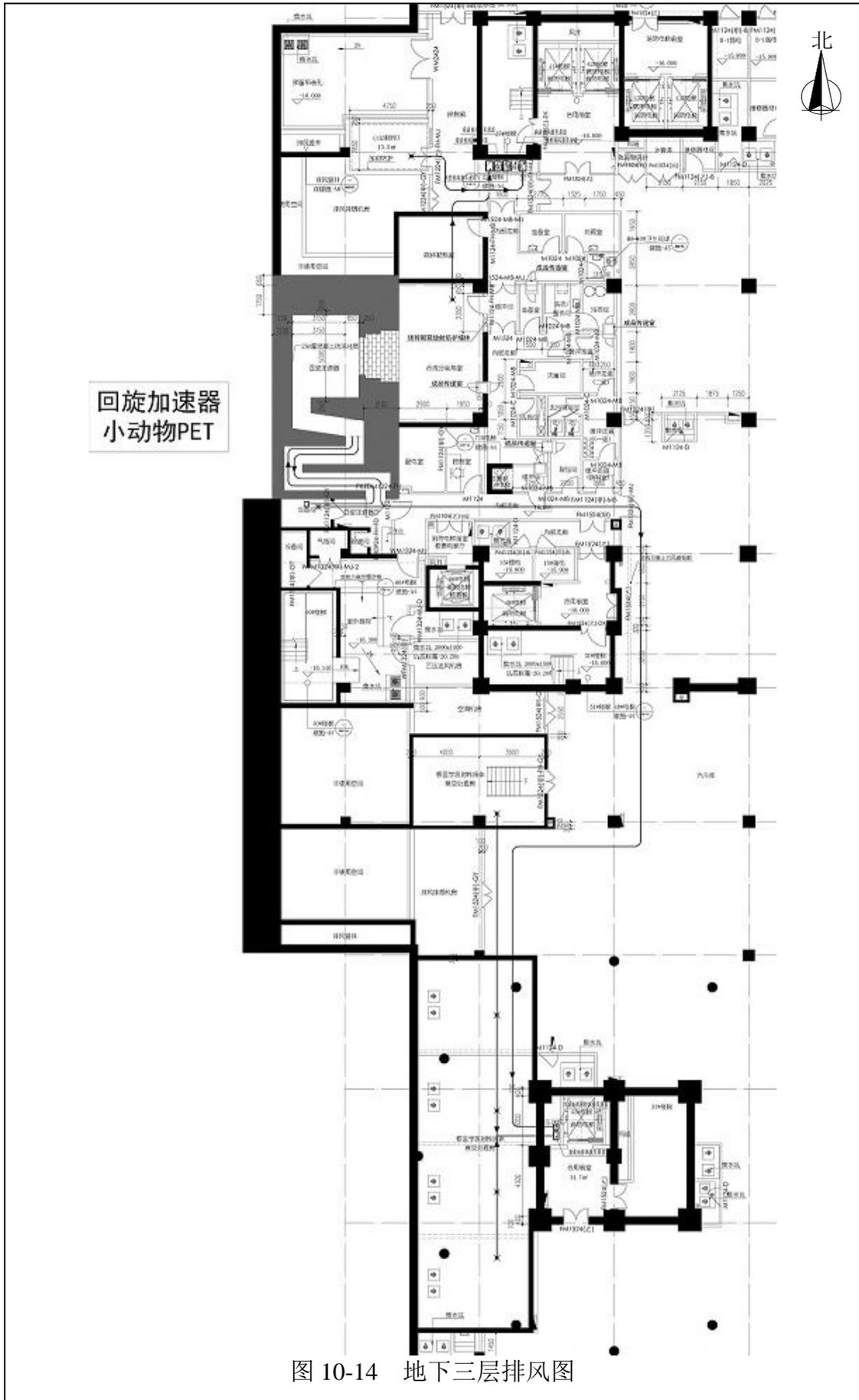


图 10-13 地下二层排风图



10.5 法规符合情况

依据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》规定，现对北京友谊医院从事本项目辐射活动能力评价列于表 10-8 和表 10-9。

10.5.1 对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求的满足情况

表 10-8 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》对使用放射性同位素和射线装置单位承诺的对应检查情况。

表 10-8 执行《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求对照表

序号	应具备条件	落实情况	符合情况
1	使用放射性同位素、射线装置的单位，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作。	成立了由院长为组长的辐射防护和安全管理小组，全面负责医院的辐射防护监督和管理工作的，下设专职人员具体处理各项事务，各相关部门内部职责明确，待本项目启用后增加相关部门负责人。	近期符合
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。	医院规定所有辐射工作人员，在上岗前将接受生态环境认可培训机构组织的辐射安全与防护培训。 北京友谊医院拟为本项目配置至少 20 名辐射工作人员，在通过辐射安全与防护培训后持证上岗。	近期符合
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贮存库或设备。	储源室拟安装视频监控和红外报警系统和公共安全管理部门要求的防盗门，落实放射性同位素安全保卫措施。	近期符合
4	放射性同位素与射线装置，应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	在核医学科场所控制区入口处，机房门口、患者候诊区门口等位置拟设置放射性警告标识和中文警示说明。机房拟安装有门-灯联锁安全装置及工作警示灯。受检者检查区入口和出口均设有门禁系统。	近期符合
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。	医院拟为本项目配备 3 台辐射剂量巡测仪 3 台表面污染监测仪、1 台中子剂量当量率仪、4 台个人剂量报警仪、2 套固定式剂量报警仪（多个探头）、回旋热室人员出口配备 1 台污染监测仪，能够满足现在工作的需要。	近期符合

6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、射线装置使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	拟完善规章制度、操作规程、岗位职责及辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案等。	近期符合
7	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	高活室内配备手套箱，设置专用排风管道，排风引至本建筑物顶部排放。核医学科场所高活室内产生的废水，以及给药后患者专用卫生间产生的废水，通过专用管道一并进入放射性废水衰变池，排放前委托有资质的检测机构。妥善收集固体放射性废物。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专用铅制储存箱，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》作为医疗废物处理。	近期符合
8	有完善的辐射事故应急措施。	在现有事故应急措施上，根据新建项目的需要，拟制定更为完善辐射事故应急处理预案。	近期符合

10.3.2 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求的满足情况

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》对拟使用射线装置和放射性同位素的单位提出了具体条件，本项目具备的条件与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求的对照检查如表 10-9 所示。

表 10-9 执行《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求对照表

序号	安全和防护管理办法要求	落实情况	是否符合要求
1	第五条 生产、销售、使用、贮存放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定设置明显的放射性标志，其入口处应当按照国家有关安全和防护标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全连锁、报警装置或者工作信号。	机房拟设置醒目的电离辐射警告标志及配有“当心电离辐射”的中文警示说明。机房安装有门-灯连锁安全装置及工作警示灯。储源室出入口拟设工作人员专用门禁、防盗门、入侵报警、视频监控等安全防范设施、技术防范系统等。受检者检查区入口和出口均设有门禁系统。	近期符合
2	第九条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不	医院将委托有辐射水平监测资质单位每年对放射工作场所周围的辐射水平进行一次监测。医院将每半年使用辐射剂量仪，对工作场所内和控制区周边环境进	近期符合

	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。	行自行监测,做好监测记录并妥善保存监测报告。每天对高活室、注射区、候诊区的表面污染进行自行监测,并做好记录。	
3	第十二条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位,应当对本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估,并于每年1月31日前向发证机关提交上一年度的评估报告。	医院在每年1月31日前向生态环境部门提交年度评估报告。	近期符合
4	第十七条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位,应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲,对直接从事生产、销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训,并进行考核;考核不合格的,不得上岗。	医院规定所有辐射工作人员,在上岗前将接受生态环境认可培训机构组织的辐射安全与防护培训,并经考试合格后上岗。每4年参加复训,并制定了辐射工作人员培训计划。 北京友谊医院拟为本项目配置20名辐射工作人员,在通过辐射安全与防护培训后持证上岗。	近期符合
5	第二十三条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位,应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准,对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测;发现个人剂量监测结果异常的,应当立即核实和调查,并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。	将为所有从事放射性工作的人员配备个人剂量计,并委托有资质单位进行个人剂量监测(每季度1次)。	近期符合
6	第二十四条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位,不具备个人剂量监测能力的,应当委托具备条件的机构进行个人剂量监测。	拟委托有资质单位对辐射工作人员进行个人剂量监测。	近期符合

以上分析可知,该单位从事本项目辐射活动的技术能力基本符合相应法律法规的要求。

表 11 环境影响分析

11.1 建设或安装过程的环境影响

对于本项目而言，将会在楼内进行简单的室内施工活动，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 回旋加速器和相关 GMP 实验室运行（使用）后对环境的影响

11.2.1 回旋加速器辐射剂量估算

11.2.1.1 机房屏蔽设计与厂家推荐值比较

IBA 公司建议 Cyclone®KIUBE 回旋加速器机房采用如下屏蔽设计时，可以满足机房外关注点周围剂量当量率低于 $0.5\mu\text{Sv/h}$ ：

- (1) 面对 F-18 靶墙壁的厚度 230cm，其它墙体 220cm；
- (2) 其它靶（C-11 或固体靶）前面墙体的厚度 220cm。

本项目加速器机房屏蔽厚度均大于厂家推荐值，可预计加速器机房外周围剂量当量率均低于 $0.5\mu\text{Sv/h}$ ，满足低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

11.2.1.2 厂家类似标准机房的剂量率蒙卡计算结果

中子辐射剂量估算方法可采用分出截面法等传统方法，但由于屏蔽体产生的散射中子会改变中子能谱且影响中子辐射场的注量率分布，传统方法具有较大的误差。蒙特卡罗方法善于处理复杂几何和材料结构的系统，并可同时计算多个未知量，具有很好的适用性。IBA 公司采用 MCNPX 2.7.0 蒙特卡罗计算软件对该公司推荐标准 Cyclone®KIUBE 回旋加速器机房外辐射剂量率进行了模拟计算，机房模型平面和剖面如图 11-1 所示，机房为混凝土（密度为 2.35g/cm^3 ）屏蔽，机房门屏蔽材料为 10mm 铅+20mm 含硼聚乙烯。计算采用 ICRP74 号报告给出的中子和 γ 射线剂量转换系数。模拟生产工况为双束流（ $2\times 100\mu\text{A}$ ）生产 F-18，靶位分别考虑#1+#5 靶和#3+#7 靶。

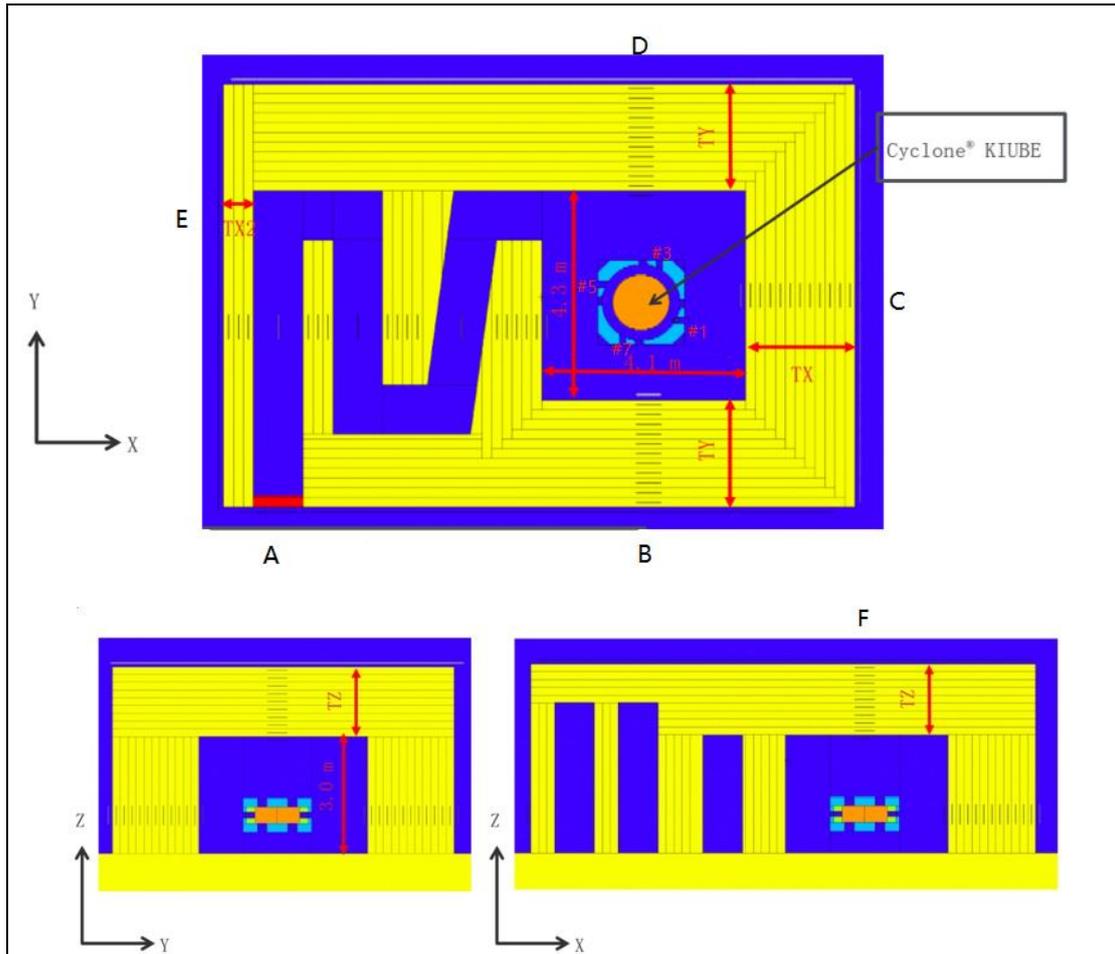
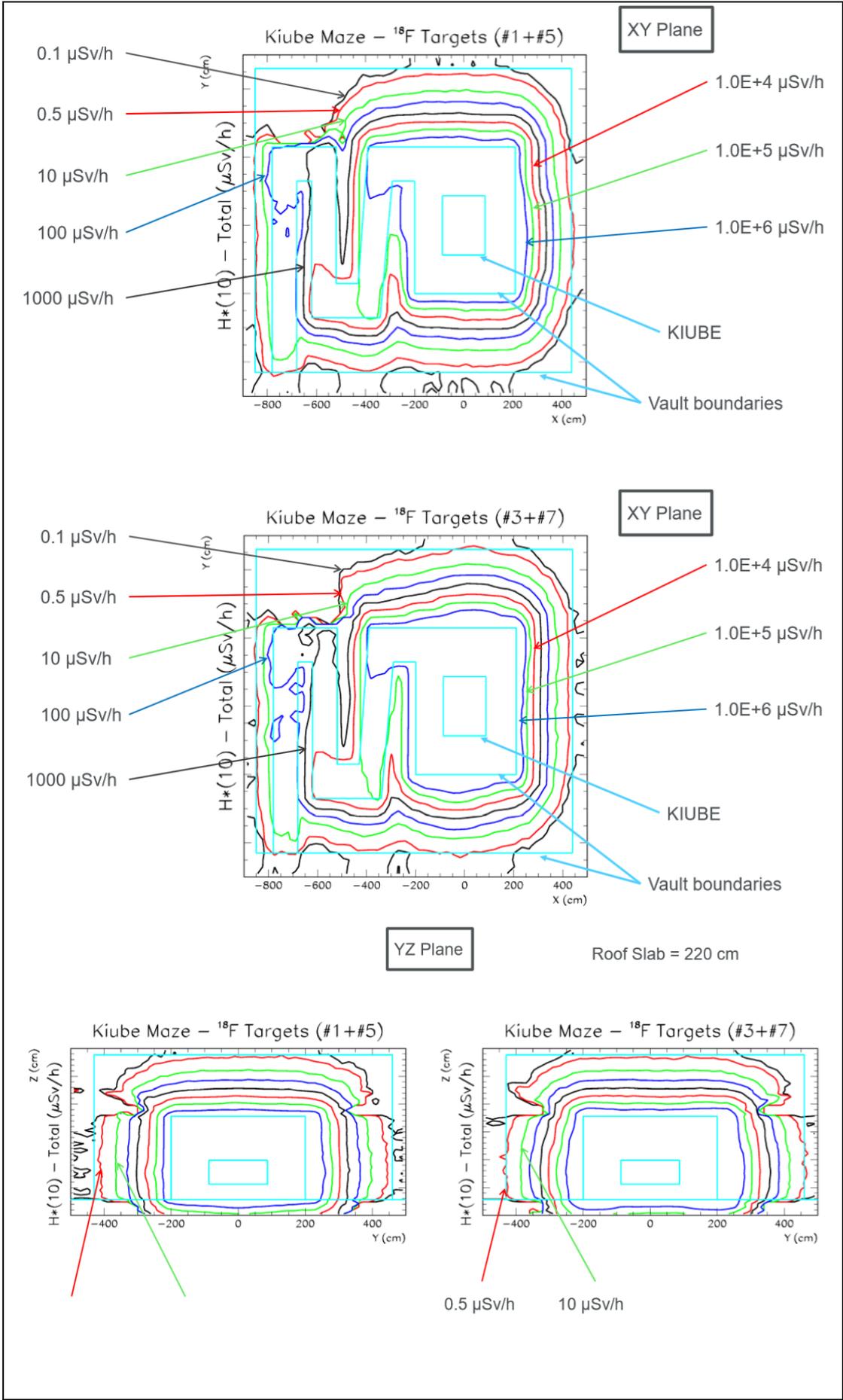


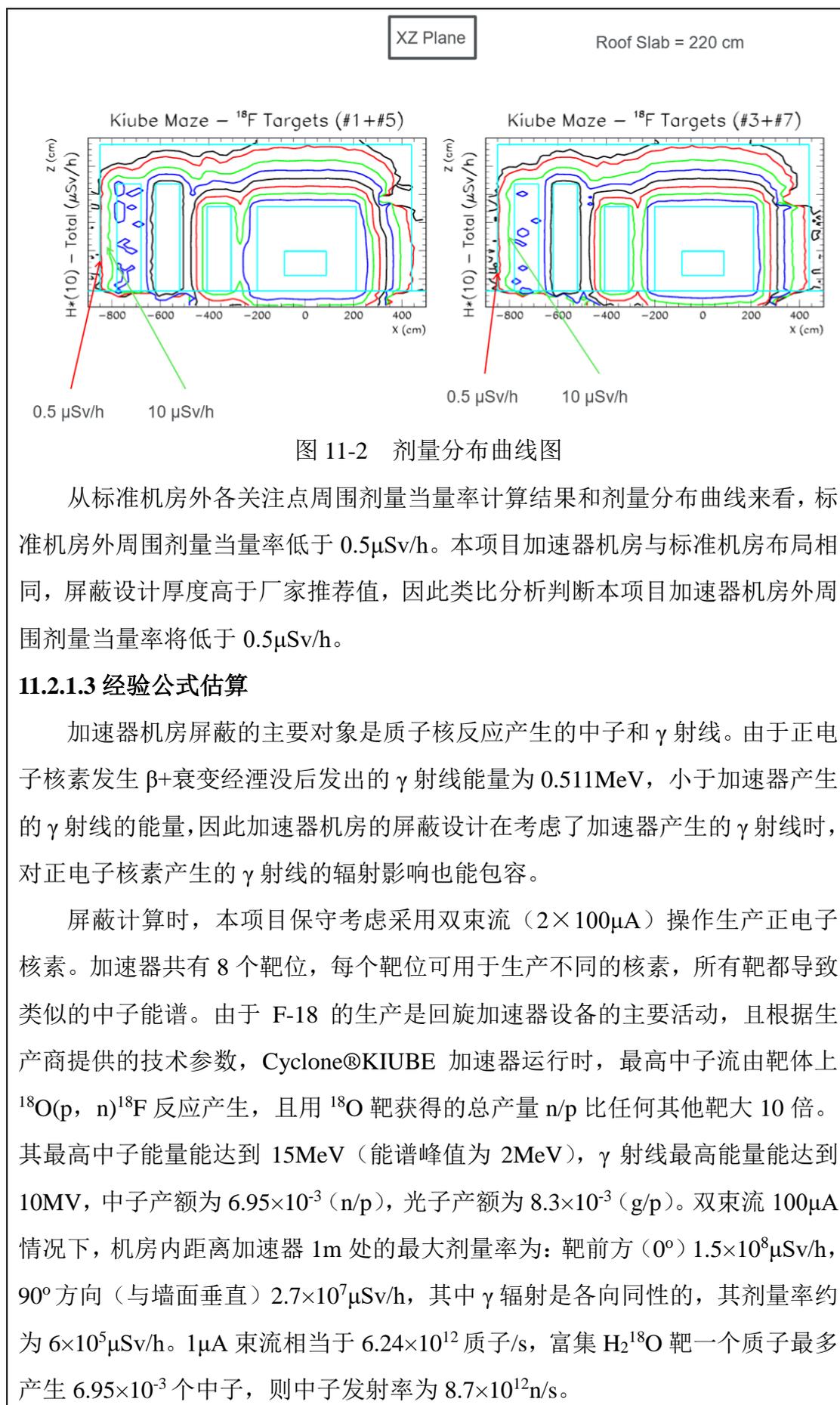
图 11-1 Cyclone®KIUBE 回旋加速器标准机房示意图

各关注点周围剂量当量率计算结果如表 11-1 所示，机房平面和剖面的 2D 剂量分布曲线见图 11-2 所示。

表 11-1 标准机房外模拟计算结果

关注点	屏蔽厚度	H*(10), $\mu\text{Sv/h}$	
		#1+#5 靶	#3+#7 靶
A	10mm 铅+20mm 含硼聚乙烯	0.430	0.300
B	2.3m 混凝土	0.149	0.454
C	2.3m 混凝土	0.342	0.165
D	2.3m 混凝土	0.161	0.490
E	0.7m 混凝土	0.380	0.381
F	2.2 m 混凝土	0.270	0.312





(1) 加速器机房外中子剂量率估算

$$D_n = \frac{\varphi B_1 f_H t}{4\pi r^2} e^{-\Sigma d} \text{----- (公式 11-1)}$$

式中：

D_n —机房屏蔽外关注点的中子剂量当量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

φ —中子发射率， $8.7\text{E}+12\text{n/s}$ ；

f_H —中子的剂量换算系数，查 ICRP74 号报告， 15MeV 为 $4.94\text{E}-4\mu\text{Sv}\cdot\text{cm}^2$ ；

r —关注点距源中心的距离， cm ；

Σ —中子宏观分出截面，混凝土 0.0942cm^{-1} ，由《辐射防护基础》查出；

B —初始积累因子，混凝土取 5；

t — 3600s ；

d —机房的屏蔽厚度， cm 。

计算时机房外各关注点位置见图 11-3 所示，周围剂量当量率计算结果如表 11-2 所示。

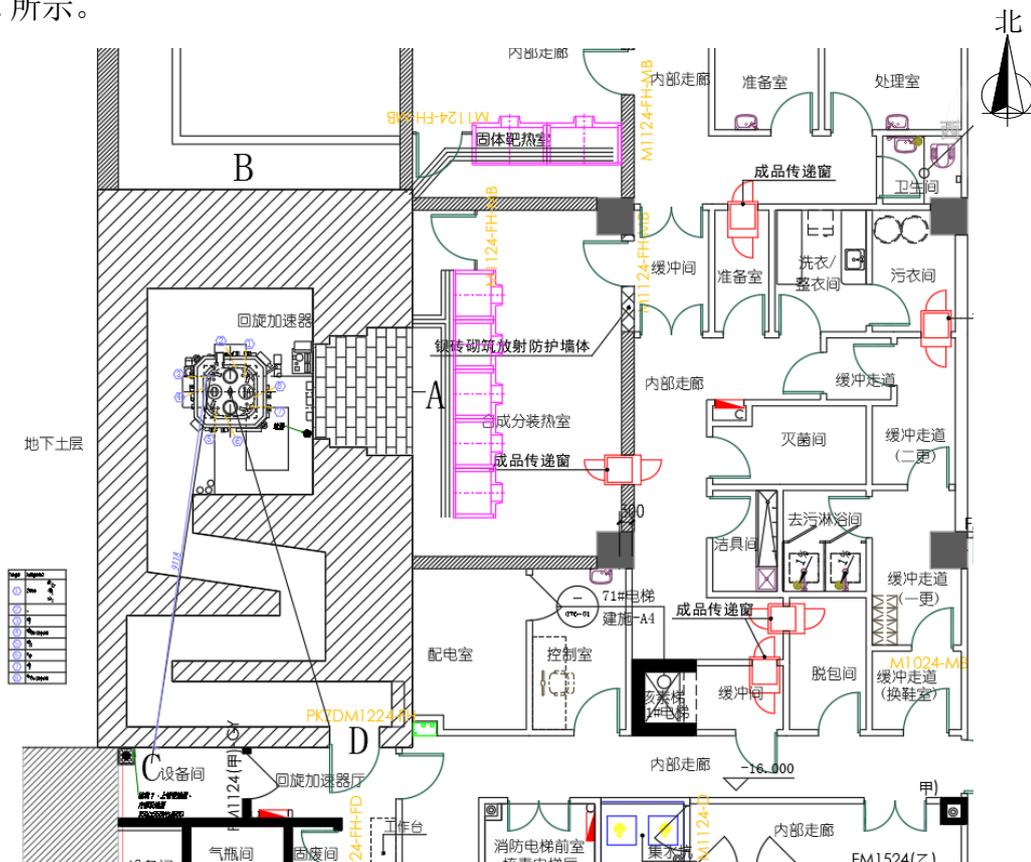


图 11-3 回旋加速器机房关注点位置图

(2) 加速器机房外 γ 剂量率估算

$$D_{\gamma} = D_0 \times r^{-2} \times 10^{-d/TVL} \text{----- (公式 11-2)}$$

式中:

D_{γ} —关注点的 γ 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$;

D_0 —距靶 1m 处的 γ 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$;

r —关注点距源中心的距离, m;

d —机房的屏蔽厚度, cm;

TVL — γ 射线 1/10 值层厚度, cm, γ 射线能量 (连续谱) 最高为 10MeV, 混凝土取 41cm, 铅取 5.7cm (参照 NCRP151)。

根据上述 (1)、(2) 方法计算的加速器机房关注点周围剂量当量率结果见表 11-2 所示。其中 D 点为未经防护门屏蔽的机房门口处的透射剂量。

表 11-2 关注点周围剂量当量率计算结果

位置	距离 (cm)	屏蔽材料及厚度	中子剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	γ 剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	总剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	位置描述
A	470	2.4m 砼	4.2E-03	0.038	0.04	合成分装热室
B	520	2.4m 砼	3.5E-03	0.031	0.03	排风排烟机房
C	932	1.58m 砼	1.20	0.95	2.15	水冷设备间
D	847	1.8m 砼	0.371	0.34	0.71	防护门里
E	570	2.2m 砼	0.019	0.08	0.10	机房顶

(3) 防护门处剂量率估算

防护门处的辐射剂量主要由透射过迷路屏蔽墙的中子和迷路口反散射辐射引起, γ 射线散射因子较小 (约 10^{-3}), 经最少三次散射后其剂量可忽略。透射过迷路屏蔽墙的中子和 γ 辐射可按公式 11-1、11-2 计算, 迷路口中子反散射辐射按下列公式计算。

$$H_s = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_1 \cdots \alpha_n \cdot A_1 \cdot A_2 \cdots A_n}{d_1^2 \cdot d_2^2 \cdots d_{n+1}^2} \cdot H_0 \text{----- (公式 11-3)}$$

$$\alpha_n(E_0, \theta_0, \theta) = \frac{F(E_0) \cos \theta_0 \cos \theta}{\cos \theta_0 + \cos \theta} \text{----- (公式 11-4)}$$

$$F(E_0) = E_0 \cdot \exp(0.9719 - 2.895\sqrt{E_0} + 0.3417E_0) \text{----- (公式 11-5)}$$

$$E_{sc} = 0.24\overline{E_0} \text{----- (公式 11-6)}$$

式中:

n —散射次数;

α —反散射系数，与入射平均能量 E_0 、入射角 θ_0 、散射角 θ 有关；

E_{sc} —散射能量，MeV；

H_0 —距靶 1m 处的初始剂量率，取 $1.5 \times 10^8 \mu\text{Sv/h}$ ；

d_l —入射距离，m；

d_{2-n} —散射距离，m；

A_{1-n} —对应的散射面积， m^2 。

根据上述公式，中子反散射计算参数与结果见表 11-3，散射路径见图 11-5。根据计算结果，防护门迷道口处中子反散射剂量为 $0.61 \mu\text{Sv/h}$ ，叠加透射剂量 $0.37 \mu\text{Sv/h}$ 后为 $0.98 \mu\text{Sv/h}$ ，根据 GBZT201.4-2015 图 C.1，聚乙烯的 TVL 约 5cm，经过外防护门 10mmPb+20mm 含硼 5% 的聚乙烯屏蔽后的剂量率约为 $0.98 \times 10^{-0.2/5} = 0.89 \mu\text{Sv/h}$ ；透射 γ 射线经 10mm 铅屏蔽后的剂量率约为 $0.34 \times 10^{-1/5.7} = 0.23 \mu\text{Sv/h}$ ，总的剂量率为 $1.1 \mu\text{Sv/h}$ 。

表 11-3 迷路口中子散射剂量当量率计算结果

散射次数	入射能量 $E_0(\text{MeV})$	入射角 $\theta_0(^{\circ})$	散射角 $\theta(^{\circ})$	散射距离 $d_n(\text{m})$	散射面积 $A_n(\text{m}^2)$	反散射系数 α_n	剂量 H_s ($\mu\text{Sv/h}$)
1	2	60	30	4.5	4.2	0.055	9.76E+04
2	0.48	30	30	5.1	1.6	0.087	5.23E+02
3	0.12	30	30	5.6	0.7	0.052	6.12E-01

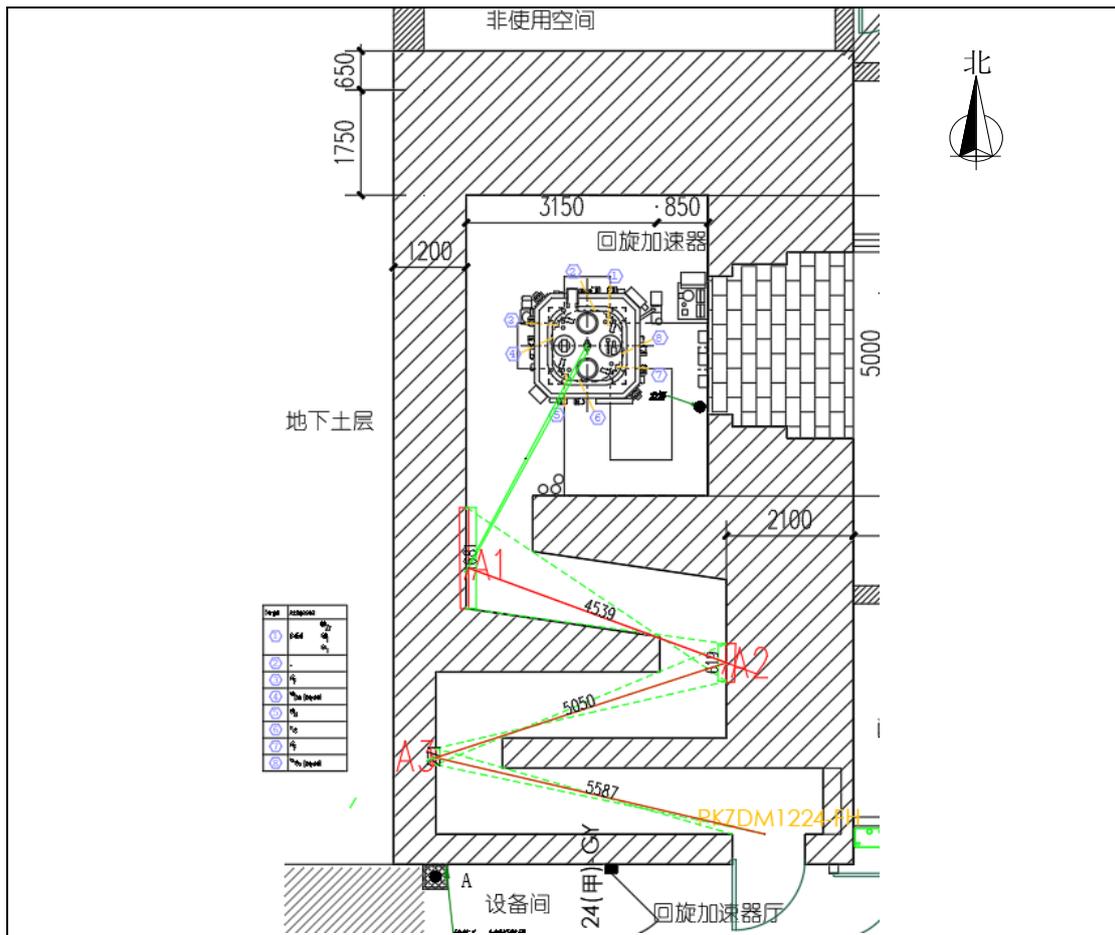


图 11-5 中子反散射路径示意图

11.2.1.4 人员受照剂量分析

根据院方提供的资料，回旋加速器主要用于生产 F-18 核素，每次出束打靶时间为 1h，年工作 250 天，其它核素的生产频次较少且出束时间要短，因此保守考虑回旋加速器年打靶次数为 500 次，每次 1h，年出束时间为 500h。估算各个关注点人员的年有效剂量见表 11-4。

表 11-4 回旋加速器致周围人员年有效剂量

估算对象	位置编号	场所位置	T	年受照时间, t	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年有效剂量, μSv
工作人员	A	合成分装热室	1/4	500h	0.07	8.8
	C	南墙外设备间	1/16	500h	2.15	67.2
	D	防护门	1/8	500h	1.1	68.8
	/	控制室	1	500h	0.07	35

	B	北墙外排风机房	1/16	500h	0.06	1.9
公众	F	地下一层公众	1/16	500h	0.15	4.7

由表 11-4 中可知，本项目加速器室工作人员所受剂量为 68.8 μ Sv/a，公众人员所受剂量最大为 4.7 μ Sv/a。

11.2.2 合成分装热室辐射剂量估算

合成分装热室设置 5 个模块箱，固体靶热室设置 2 个模块箱，模块箱正面采用 70mm 的铅进行防护，其余侧面、顶面、地面采用 60mm 的铅进行防护，观察窗位于热室模块箱正面，其屏蔽防护等效于 70mm 的铅当量。每个模块箱的最大操作量按 222GBq (6Ci) F-18 设计。药物合成、活度测量和分装等操作为全自动化，工作人员在控制台观察合成、分装进程，过程持续 20min/次，固体靶约 40min/次。分装程序结束后，模块箱提示工作人员，此时工作人员使用机械手将分装完成的试剂瓶装载到专用的铅屏蔽容器中，铅屏蔽容器采用 40mm 的铅当量屏蔽，铅屏蔽容器的尺寸为半径 6cm，高 16cm，铅容器盖子为旋转式卡扣盖子。对于 511keV γ 射线，铅屏蔽的十值层 TVL=16.6mm，混凝土屏蔽的 TVL=176mm ($\rho=2.35t/m^3$)。

采用下列公式计算热室模块箱外表面的剂量率：

$$D = K \times A \times r^{-2} \times 10^{-d/TVL} \text{-----} \quad (\text{公式 11-8})$$

式中：

D—热室模块箱外的 γ 剂量率 μ Sv/h；

K—剂量率常数，0.147 μ Sv·m²·h⁻¹/MBq；

A—为点源活度，MBq

r—关注点距源中心的距离，0.8m；

d—屏蔽厚度，cm；

TVL— γ 射线 1/10 值层厚度，cm

模块箱外表面的剂量率计算结果如下表所示：

表 11-5 模块箱外表面的剂量率计算结果

核素名称	初始活度 (MBq)	铅当量厚度 (cm)	模块箱正面表面剂量率(μ Sv/h)	模块箱侧面表面剂量率(μ Sv/h)
------	------------	------------	-------------------------	-------------------------

F-18	1.11E+5	正面: 7cm; 侧面: 6cm	1.54	6.2
------	---------	---------------------	------	-----

计算得到, 模块箱表面正面的最大剂量率为 $1.54\mu\text{Sv/h}$, 侧面的最大剂量率为 $6.2\mu\text{Sv/h}$ 。合成分装热室和固体靶热室房间墙体为 30cm 混凝土, 混凝土屏蔽对 511keV γ 射线的 $TVL=176\text{mm}$, 衰减因子为 0.02, 不考虑距离衰减情况下, 合成分装热室和固体靶热室房间外的最大剂量率为 $0.12\mu\text{Sv/h}$ 。

对应于回旋加速器打靶次数, 合成分装年操作次数为 500 次, 每次合成分装工作人员在热室模块箱周围停留 10min, 年受照时间为 83.3h, 人员年受照剂量为 $1.54\mu\text{Sv/h}\times 83.3\text{h}=128\mu\text{Sv}$, 即使叠加回旋加速器出束导致的工作人员最大受照剂量 $81.3\mu\text{Sv}$, 也能满足年剂量约束值的要求。合成分装热室和固体靶热室房间外的最大剂量率为 $0.12\mu\text{Sv/h}$, 预计对周围公众的年受照剂量不超过 $0.12\mu\text{Sv/h}\times 83.3\text{h}=10\mu\text{Sv}$, 满足年剂量约束值的要求。

11.2.3 动物 PET-CT 辐射影响

给试验动物注射标记好的放射性药物, 注射的最大活度为 18.5MBq (0.5mCi), 距离 0.3m, 操作时间 1 分钟, 注射过程全身所受剂量为 $0.67\mu\text{Sv}$, 手部剂量约 $6\mu\text{Sv}$ 。本项目配置的动物 PET/CT 将带有自屏蔽系统, 类比同类型自屏蔽的动物 PET/CT, 使用时自屏蔽系统表面剂量率与本底相当, 且四周墙体不低于 25cm 砼屏蔽, 因此扫描过程对操作人员和周围公众的辐射剂量可忽略。

11.2.4 回旋加速器感生放射性

(1) 结构部件的活化

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

根据 IAEA283 号报告给出的部件饱和活化产额, 本项目保守考虑回旋加速器最大束流损失约为 $3.8\text{E}-02\text{kW}$, 从而计算得到结构部件活化产生的感生放

射性的饱和浓度为 $2.4E+11Bq$ 。由于这些活化产物主要为靠近质子束的内层部件，活化活度非均匀分布，又有部件自身的自屏蔽作用，难于计算其周围的 γ 射线外照射剂量场。

本项目装载液体靶和气体靶采用注射驱动控制系统，换靶和补充原料均不用进入加速器机房，人员在控制室操作，不用考虑受照剂量；生产 Zr-89、I-124 核素采用固体靶片，放置新靶片时需要技师进入机房操作。根据侯长松等《某回旋加速器调试机房辐射水平测量结果与分析》（《中华放射医学与防护杂志》2008，28(3)），在 18MeV 能量、20 μ A 束流持续照射 15min，靶体表面 5cm 处的感生放射性为：停机 20min 后的感生放射性水平约为 5.7mSv/h，0.5h 后约为测量时的一半，3h 后约为测量时的 5%（285 μ Sv/h），之后感生放射性水平衰变趋于平缓。放置新靶片一般在上次打靶后 24h 进入机房，操作时间不超过 1min，每个月约 3 次，年受照时间 0.6h，保守以 285 μ Sv/h 估算出受照剂量为 170 μ Sv。

加速器的定期维护需要更换 HAVA 膜，每年约 2 次，每次需 1min，类比其他类型 HM-20 回旋加速器更换 HAVA 膜时，打开真空腔后，距离机器外表面 20cm 处 γ 的周围剂量当量率为 512 μ Sv/h，则更换 HAVA 膜的受照剂量约 17 μ Sv。

工作人员更换固体靶片和换 HAVA 膜时，必须佩带个人剂量报警仪和巡测仪器跟踪测量，操作时应戴防污染手套、穿工作服，并于操作后检测表面污染。在加速器停机后，应经过 24h 才能进入机房。

(2) 空气活化

本项目其他活化气体和放射性气溶胶的危害几乎可以忽略，主要考虑 ^{41}Ar ，采用下式计算其浓度：

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

式中：

A—核素的浓度，Bq/cm³

R₀—机房等体积等效球的半径，267cm

λ —核素的衰变常数，1.05E-4s⁻¹

σ —母核的核反应截面，0.61E-24cm²

Y—束流损失点中子产额， $4.34 \times 10^{12} \text{n/s}$

ρ —空气的密度， 0.0012g/cm^3

A_0 —阿伏伽德罗常数， $6.022 \text{E}+23/\text{mol}$

f_n —母核的天然丰度，1

f_m —母核在空气的重量百分比，0.013

G—母核的摩尔质量， 39.95g/mol

t—加速器的运行时间，7200s

F—通风速率， $5.5 \times 10^5 \text{cm}^3/\text{s}$

V—机房的体积， $8 \times 10^7 \text{cm}^3$

按照上式的计算公式，本项目回旋加速器机房内 ^{41}Ar 饱和浓度为 0.062Bq/cm^3 。根据《RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK 2002》， ^{41}Ar 浓度为 1Bq/m^3 的空气浸没照射剂量率为 $2.2 \text{E}-4 \mu\text{Sv/h}$ ，不考虑大气稀释作用以排风口的浓度进行公众剂量估算，公众受照时间按 8760h 考虑，估算结果为 $0.12 \mu\text{Sv}$ ，远小于公众受照剂量约束值。

11.2.5 非放射性气体影响分析

本项目回旋加速器机房配有独立的通风系统，通风量为 $2000 \text{m}^3/\text{h}$ 。臭氧和二氧化氮的产额比例为 10:4.8，为简化起见，只计算臭氧的产生浓度，然后按照比例关系推出二氧化氮的浓度，采用下式计算回旋加速器机房臭氧的浓度 C_p (ppm)。

$$C_p = \frac{Y_\gamma E_\gamma f S G}{2.463 \times 10^7 L V \left(\alpha + \frac{RP}{V} + \frac{KF}{V} \right)} \left[1 - e^{-\left(\alpha + \frac{RP}{V} + \frac{KF}{V} \right) t} \right] \text{----- (公式 11-8)}$$

式中：

Y_γ —束流损失时产生的 γ -光子的产额， 5.18×10^{10} 光子/s

E_γ — γ -光子的平均能量，10MeV

f—空气吸收 γ -光子能量的份额，取 0.5

S— γ -光子在空气中行经的平均路程，等于辐照体积等效球半径，267cm

L— γ -光子在空气中的减弱长度，122cm

V—辐照区域的体积， $8 \times 10^7 \text{cm}^3$

K—混合不均匀系数，取 1/3

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

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

F —辐照区域的通风率, $5.5 \times 10^5 \text{cm}^3/\text{s}$

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

G —臭氧的产额, 0.1 分子/eV

t —辐照时间, 7200s

计算结果为 0.01ppm, 1ppm 臭氧约等于 $2.14 \text{mg}/\text{m}^3$, 故臭氧浓度约为 $2.14 \text{E}-02 \text{mg}/\text{m}^3$, 二氧化氮浓度约为臭氧的一半。该浓度能够满足《工业场所有害因素职业接触限值第 1 部分: 化学有害因素》(GBZ2.1-2007) 规定的工作场所的臭氧和二氧化氮允许浓度 (O_3 : $0.3 \text{mg}/\text{m}^3$, NO_2 : $5 \text{mg}/\text{m}^3$); 也远小于《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 中臭氧和二氧化氮二级标准限值 (O_3 : $160 \text{mg}/\text{m}^3$, NO_2 : $40 \text{mg}/\text{m}^3$), 排放后经大气扩散稀释, 浓度将进一步降低, 不会对周围大气环境产生不良影响。

11.2.6 回旋加速器场所受照剂量合计

根据以上估算结果工作人员的受照剂量分别为回旋加速器室 $68.8 \mu\text{Sv}/\text{a}$, 热室 $128 \mu\text{Sv}/\text{a}$, 置新靶片和更换 HAVA 膜 $187 \mu\text{Sv}/\text{a}$, 即使各环节都累加后约为 $384 \mu\text{Sv}/\text{a}$, 公众附加剂量不大于 $14.7 \mu\text{Sv}/\text{a}$, 满足本项目工作人员、公众年剂量约束值 $5 \text{mSv}/\text{a}$ 和 $0.1 \text{mSv}/\text{a}$ 的要求。

11.3 核医学科门诊运行 (使用) 后对环境的影响

核医学科门诊主要使用 F-18、Ga-68、N-13、O-15、C-11、Cu-64、Zr-89、I-124 等正电子放射性药物进行 PET/CT 或 PET/MR 检查, 使用 Tc-99m、Tl-201、Ga-67、I-123、I-131 等核素进行 SPECT 显像检查, 根据表 9 污染源与污染途径分析, 在进行药物交接、注射、观察病人和摆位等操作时, 操作人员及注射区、候诊区和扫描机房周围停留的公众可能受到核素药物释放出的 γ 射线的影响。在此主要分析上述药物对人员的贯穿辐射影响。

剂量估算中, 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, 依照剂量率和距离成平方反比衰减的关系, 同时考虑墙壁和防护门、窗的衰减作用, 估算高活室、扫描室、候诊区等有代表性场所周围的辐射剂量率和对职业人员、公众的附加照射剂量, 以及职业人员在患者摆位

和药物注射等环节所受到的辐射照射剂量。

11.3.1 PET 检查辐射影响分析

(1) 放射性同位素的工作负荷

PET 检查使用 F-18 药物的用量约 370MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 45 人次，每周工作 5 天；Ga-68 药物的用量约 555MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 5 人次，每周工作 1 天；N-13、O-15、C-11 药物的用量约 370MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 2 人次，每周工作 1 天；Cu-64、Zr-89、I-124 药物的用量约 37~144MBq/人，每个检查日最多实施 PET 检查 2 人次，每月工作 1 天。PET 检查所用核素 F-18 的最大用量为 370MBq/人，PET 检查所用这些核素，按每年最多实施 PET 检查 12500 人次计算（每天按 50 人，工作 250 天）。根据 AAPM Task Group 108 报告，Ga-68 源的 K_{γ} 常数为 $0.134\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ，小于 F-18 源的 K_{γ} 常数为 $0.143\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ，且 Ga-68 核素半衰期短，其他核素用量小或者候诊时间短，对环境的影响小于 F-18，因此本场所以 F-18 进行评价。

每个工作日开展 PET 检查 50 例，全年开机 250 天，共检查 12500 人次，候诊时间每人 60min，PET/CT 扫描时间 20min/人次，PET/MRI 扫描时间 60min/人次，则全年累计总扫描时间 5833h/a（其中 PET/MR 检查 2500 人/a，扫描时间 2500h，PET/CT 扫描时间 3333h）；3 间注射后等候室有给药病人停留的累计时间约 2075h/a。

(2) 辐射源项

根据 AAPM Task Group 108 报告，核素 F-18 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 370MBq F-18 后，距离患者 1m 处的剂量率为 $34\mu\text{Gy}/\text{h}$ （考虑患者自吸收因子 0.36），铅屏蔽的十值层 $TVL=16.6\text{mm}$ ，混凝土屏蔽的 $TVL=176\text{mm}$ （ $\rho=2.35\text{t}/\text{m}^3$ ），砖混屏蔽的 $TVL=258\text{mm}$ （ $\rho=1.6\text{t}/\text{m}^3$ ）。

(3) 机房周围不同位置的附加剂量水平

根据 AAPM Task Group 108 报告，注射 F-18 核素后经过 60min 后的活度衰减因子为 0.68，每人候诊或检查期间（60min、20min）平均活度相对检查初始的活度因子分别为 0.83、0.94。

注射核素后患者周围不同场所的最大附加剂量率见表 11-7，同时存在两名注射后患者情况下的最大附加剂量率见表 11-8，核医学科 PET 相关场所估算

点位置见图 11-6 和 11-7。

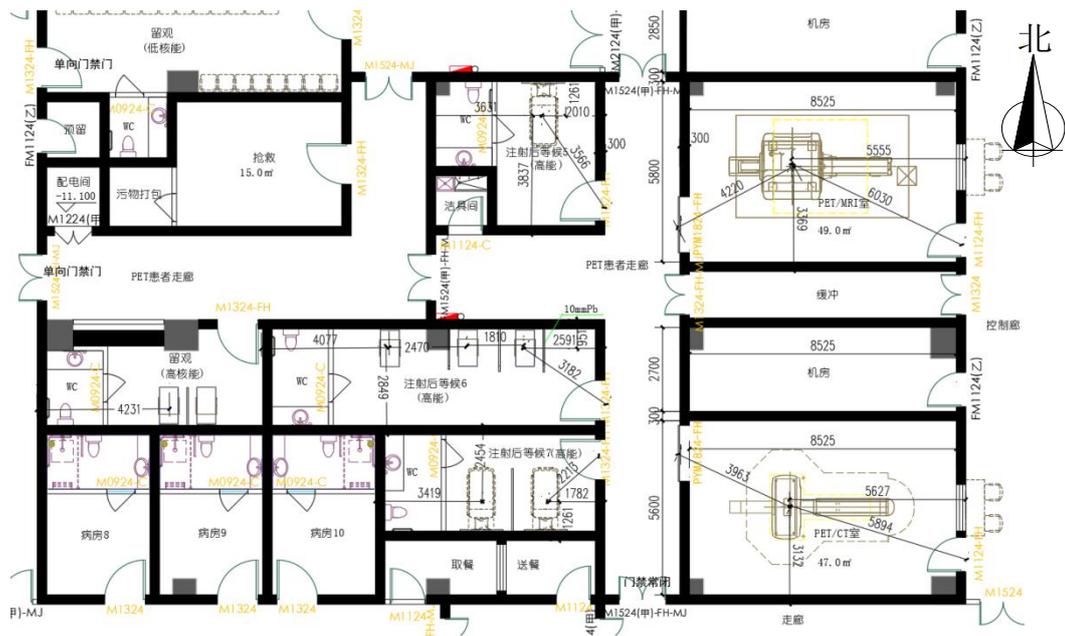


图 11-6 核医学科 PET 相关场所估算点位置图

表 11-7 注射核素后患者（1 名患者）周围不同位置的剂量率

位置		距扫描患者距离 (m)	屏蔽材料与厚度	衰减因子	屏蔽后附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	备注
注射后等候室 4	东墙外 PET 患者走廊	2.3	30cm 砼	$1.97\text{E}-2$	0.13	控制区
	南墙外 PET 患者走廊	4.1			0.04	控制区
	西墙外控制区走廊	3.9			0.04	控制区
	北墙外 SPECT 患者走廊	1.6			0.26	控制区
	楼顶配液室	4.7			0.03	公众
	楼下地下车库	4.8			0.03	公众
	防护门外 PET 患者走廊	2.2			6mm 铅	$4.35\text{E}-1$
注射后等候室 5	东墙外 PET 患者走廊	2.9	30cm 砼	$1.97\text{E}-2$	0.08	控制区
	北墙外 PET 患者走廊	1.3			0.40	控制区
	西墙外 PET 留观室	4.4			0.03	控制区
	南墙外等候室 6 和碘病房	3.1			0.07	控制区

	楼顶更淋间	5.2			0.02	公众
	楼下地下车库	4.8			0.03	公众
	防护门外 PET 患者走廊	3.5			6mm 铅	4.35E-1
注射后 等候室 6	东墙外 PET 患者走廊	2.1	30cm 砼	1.97E-2	0.15	控制区
	南墙外碘病房送餐和取餐室	1.6			0.26	其他工作人员
	西墙外碘病房	3.7			0.05	控制区
	北墙外等候室 5	2.8			0.09	控制区
	楼顶更淋间	5.2			0.02	公众
	楼下地下车库	4.8			0.03	公众
	防护门外 PET 患者走廊	2.5	6mm 铅	4.35E-1	2.37	控制区
PET/ MRI 室	东墙外控制室	5.9	30cm 砼	1.97E-2	0.01	工作人员
	南墙外缓冲间	3.7			0.03	工作人员
	西墙外 PET 患者走廊	3.8			0.03	控制区
	北墙外设备机房	3.3			0.04	工作人员
	楼顶被服库	5.2			0.02	公众
	楼下地下车库	4.8			0.02	公众
	控制室门外控制室	6.3	6mm 铅	4.35E-1	0.25	工作人员
	机房门外 PET 患者走廊	4.5			0.50	控制区
	东墙外操作位	5.9			6mm 铅当量	4.35E-1
PET/CT 室	东墙外控制室	5.9	30cm 砼	1.97E-2	0.01	工作人员
	南墙外工作人员走廊	3.7			0.03	其他工作人员
	西墙外 PET 患者走廊	3.4			0.04	控制区
	北墙外设备机房	3.4			0.04	工作人员
	楼顶库房和接诊区	4.7			0.02	公众
	楼下地下车库	4.8			0.02	公众

控制室外控制室	6.2	6mm 铅	4.35E-1	0.26	工作人员
机房门外 PET 患者走廊	4.3	6mm 铅		0.54	控制区
东墙外操作位	5.9	6mm 铅当量	4.35E-1	0.29	工作人员

注：屏蔽后剂量率由公式 $DI = 0.64 \times K_{\gamma} \times A_0 \times B \times R_U / d^2$ ， $B = 10^{-\frac{\chi}{\text{Pb}}}$ 算出，其中 A_0 为患者注射活度， χ 为墙体厚度， R_U 为注射后患者候诊期间和检查期间的衰减因子。上表估算的剂量率为初始的活度的剂量，PET/CT 室和 PET/MRI 室的剂量率考虑候诊期间的衰减因子。

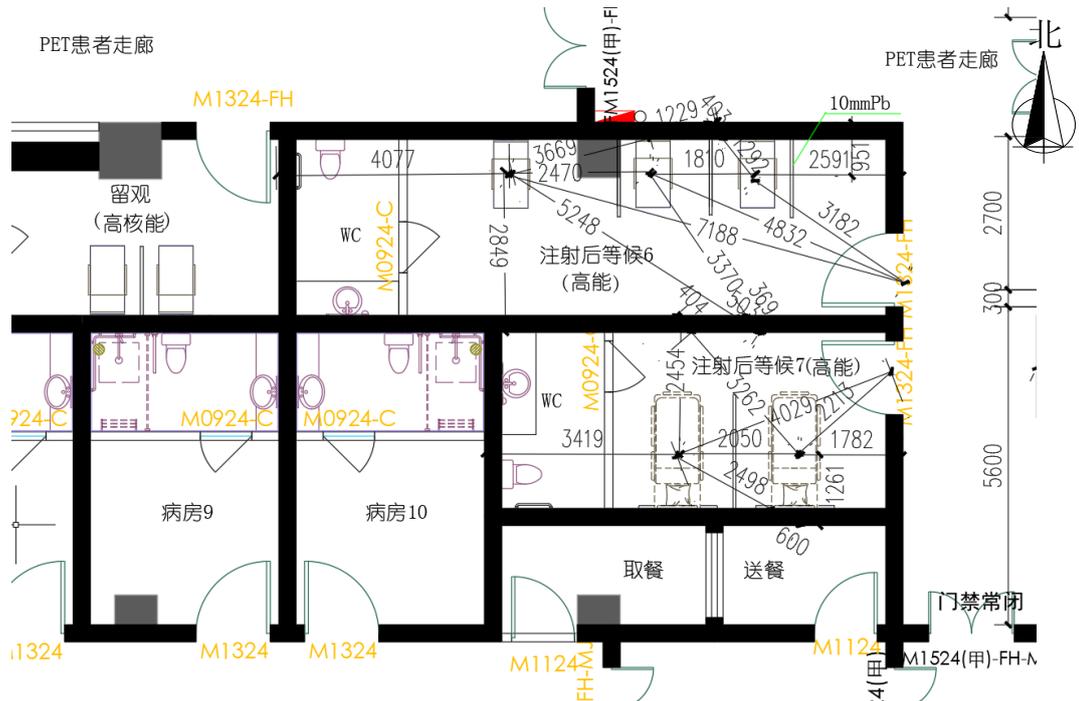


图 11-7 两间候诊室累加剂量率估算点位置图

表 11-8 注射核素后患者在候诊室周围不同位置的累加剂量率

位置		距扫描患者距离 (m)	有效屏蔽材料与厚度	衰减因子	屏蔽后附加剂量率 (μSv/h)	累加剂量率 (μSv/h)
注射后等候室 5 (3名患者)	东墙外 PET 患者走廊	2.9	30cm 砼	1.97E-2	7.98E-2	0.09 (0.08)
		4.7	30cm 砼+1cm 铅	4.93E-3	7.59E-3	
		7.2	30cm 砼+2cm 铅	1.23E-3	8.08E-4	
	北墙外 PET 患者走廊	1.6	40cm 砼	5.34E-3	7.09E-2	0.14 (0.40) *
		1.6	40cm 砼	5.34E-3	7.09E-2	

			4.0	123cm 砼	1.03E-7	2.18E-7	
	南墙外等候室 6		3.1	30cm 砼	1.97E-2	6.99E-2	0.09 (0.07)
			3.7	37cm 砼	7.90E-3	1.96E-2	
			5.5	50cm 砼	1.44E-3	1.62E-3	
	防护门外患者走廊		3.5	0.6cm 铅	4.35E-1	1.21	1.42 (1.21)
			5.1	1.6cm 铅	1.09E-1	1.42E-1	
			7.5	1.6cm 铅	1.09E-1	6.57E-2	
注射后等候室 6 (2名患者)	东墙外控制区走廊内		2.1	30cm 砼	1.97E-2	1.52E-1	0.16 (0.15)
			4.1	30cm 砼+1cm 铅	4.93E-3	9.98E-3	
	西墙外 I-131 病房		3.7	30cm 砼	1.97E-2	4.90E-2	0.05 (0.05)
			5.8	30cm 砼+1cm 铅	4.93E-3	4.99E-3	
	南墙外送餐间		1.5	30cm 砼	1.97E-2	2.98E-1	0.30 (0.26)
			2.8	60cm 砼+1cm 铅	9.75E-5	4.22E-4	
	防护门外患者走廊		2.5	0.6cm 铅	4.35E-1	2.37	2.57 (2.37)
			4.3	1.6cm 铅	1.09E-1	0.20	

备注：与两个或三个患者垂直方向候诊室外剂量按有效厚度保守估算；北墙外 PET 患者走廊累加值小于单个患者的情况，主要是由于估算点位位于两个患者间，有效厚度变大的原因。

由表 11-7 和表 11-8 可见：控制区边界外的普通区域和监督区，如控制室、南侧通道、楼上楼下等位置，最大附加剂量率为 $0.29\mu\text{Sv/h}$ ，满足本项目辐射场所控制区边界辐射剂量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。根据剂量率与距离平方成反比以及评价范围内固有建筑物的屏蔽（如东侧医生办公区和一楼的儿科经过墙体衰减至少减少 100 倍），则在核医学科 PET 周围 50m 评价范围内的相关场所的剂量率远小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，大约为本底水平。

与两个或是三个患者候诊室外剂量不大于一个患者估算值的两或三倍，详见表 11-2，其中开好内的剂量值是一个患者时估算值，从结果看累加后的值略

大于一个患者的估算值，如果有 2 名患者及以上的相关场所主要位置的年附加剂量估算保守以一位患者的 1.5 倍估算，结果见表 11-9。

表 11-9 相关场所主要位置的年附加剂量估算

位置	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	居留因子	年附加剂量 (μSv)
注射后等候室 4 楼上配药室 (公众)	0.03	1	62.2
注射后等候室 4 楼下地下车库 (公众)	0.03	1/16	3.9
注射后等候室 5 楼上更淋间 (血透辅助区, 公众)	0.02*	1/16	3.9
注射后等候室 5 楼下地下车库 (公众)	0.02*	1/16	3.9
注射后等候室 6 楼上更淋间 (血透辅助区, 公众)	0.02*	1/16	3.9
注射后等候室 6 楼下地下车库 (公众)	0.2*	1/16	3.9
注射后等候室 6 南侧送餐间 (其他工作人员, 按公众考虑)	0.26*	1/16	50.6
PET/CT 室南墙外监督区通道 (公众)	0.03	1/16	6.2
PET/CT 室操作位 (工作人员)	0.29	1	967
PET/MRI 室操作位 (工作人员)	0.29	1	725

备注：年附加剂量由公式 $D(t) = DI \times T \times t \times R_{II}$ 算出，考虑用药后检查和候诊期间药物活度的衰减，其中 t 为时间， R_{II} 为每人检查期间平均活度相对检查初始的活度因子（60min 和 20min 平均活度相对检查初始的活度因子分别为 0.83 和 0.94）。全年累计总扫描时间 5833h/a (其中 PET/MR 检查 2500 人/a, 扫描时间 2500h, PET/CT 扫描时间 3333h)；3 间注射后等候室有给药病人停留的累计时间约 2075h/a，其中有 2 名或 3 名患者候诊的房间剂量估算保守以一位患者的 1.5 倍估算（表 11-3 标*为有 2 名或 3 名患者候诊情况）。

(4) 公众年附加有效剂量

核医学科场所分区管理，病人给药、候诊和检查区域属于控制区，通常只有受检病人停留，不按公众区域考虑，因此公众年附加剂量位只考虑控制区毗邻的相关场所，则该场所公众年附加有效剂量不大于 $62.2\mu\text{Sv}$ ，低于设定的剂量约束值 ($100\mu\text{Sv}$)。患者及其陪同人员，仅在本院机房外围有一定的驻留，他们不是机房的主要防护对象（年居留因子 T 很小， $T < 1/40$ ）。

(5) 工作人员年受照剂量

①工作人员进行分装同位素环节时受照剂量

该场所注射 F-18 等核素，由回旋加速器热室标记好的核素通过专用 71 号电梯直接送到核医学科场所高活室（分装室），放置通风橱内，进行分装后提供给病人注射，工作量饱和时一天两次供药，F-18 等核素在储存状态情况下对工作人员的附加剂量影响很小，在分装过程中也只有分装口辐射较大（不是 4π 角辐射），经过通风橱上表面散射（一般散射系数不大于 0.01）、距离和铅玻璃衰减后至工作人员附加剂量率降低很多，保守假设分装时辐射工作人员平均以 5 个患者注射量估算。据《放射性核素和辐射防护数据手册》[Radionuclide And Radiation Protection Data Handbook 2002]给出：距活度为 1MBq 的 F-18 药液时，对距 30cm 处人的深部当量剂量率为 $1.81 \times 10^{-3} \text{mSv/h}$ ，注射 370MBq 的 F-18 距 30cm 处人的深部当量剂量率为 $670 \mu\text{Sv/h}$ 。分装时采用了具有 40mm 铅防护功能的铅玻璃进行防护，衰减因子为 3.89×10^{-3} ，衰减后为 $13.05 \mu\text{Sv/h}$ ($2.61 \mu\text{Sv/h} \times 5$)。分装操作时间短，假设每支的分装时间为 60s，年总操作时间约 208.3h，则工作人员所受的年附加剂量为 $2718 \mu\text{Sv}$ ，分装时注射活度是逐渐增加，分装过程不是始终暴露屏蔽之外，因此工作人员共所受到的实际年附加有效剂量小于 $2718 \mu\text{Sv}$ 。

②工作人员为患者进行药物注射环节的受照剂量

据《放射性核素和辐射防护数据手册》[Radionuclide And Radiation Protection Data Handbook 2002]给出：距活度为 1MBq 的 F-18 药液时，对距 30cm 处人的深部当量剂量率为 $1.81 \times 10^{-3} \text{mSv/h}$ ，注射 370MBq 的 F-18 距 30cm 处人的深部当量剂量率为 $670 \mu\text{Sv/h}$ 。分装时采用了具有 40mm 铅防护功能的铅玻璃进行防护，衰减因子为 3.89×10^{-3} ，衰减后为 $2.61 \mu\text{Sv/h}$ 。注射操作时间短，假设每人次的注射时间为 60s，年总操作时间约 208.3h，则工作人员所受的年附加剂量为 $543.7 \mu\text{Sv}$ ；距注射器手指处的剂量率为 $18 \text{mSv} \cdot \text{min}^{-1} / (370 \text{MBq})$ ，尽量减少手部直接接触，注射可采用“三通”装置或使用带有屏蔽套的注射器等措施。

③指导病人摆位环节的年受照剂量

考虑用药后候诊期间药物活度的衰减和患者的自吸收，注射 370MBq 的 F-18 患者到 PET 检查时（至少经过了 60min 衰变），距患者 100cm 处摆位环节时人的深部当量剂量率为 $23.1 \mu\text{Sv/h}$ ($34 \mu\text{Gy/h} \times 0.68$)，全年进行检查人数 12500

人次，假设每个病人摆位 60s，年总摆位时间约 208.3h，则工作人员共所受到的年附加剂量 4812 μ Sv，医院制度规定患者大部分都是广播指导摆位，因此实际摆位环节的年附加剂量远低于 4812 μ Sv。

④控制室内操作受照剂量

由表 11-7 可知，PET/CT 室和 PET/MRI 室操作室内的工作人员的年附加剂量分别为 967 μ Sv 和 725 μ Sv。

根据以上结果工作人员各环节附加有效剂量见表 11-10。

表 11-10 核医学科 PET 工作人员各环节附加有效剂量 (μ Sv)

环节	分装	注射	摆位	操作室
F-18 等核素	2718	543.7	4812	967
合计	3261.7		5779	
备注	由两名护士轮流完成		由两名技师轮流完成	

医院一般分装和注射环节由两名护士轮流工作，摆位和操作室环节由两名技师轮流工作，可见，本项目每名护士和技师年受照总剂量分别为 1.63mSv、2.89mSv（每名辐射工作人员附加剂量为合计的一半），低于本项目设定的年剂量约束值 5mSv/a 要求。

(6) PET/CT 中 CT 运行的环境影响

PET/CT 中 CT 机为 III 类射线装置，工作条件低于诊断用 CT 机，机房东、南、西、北墙、顶棚和地面屏蔽厚度均为 30cm 砼（相对于 CT 机，大于 3.0mm 铅），机房防护门均采用 6mm 铅，机房的观察窗为 6mm 铅当量的铅玻璃。根据《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）：较大工作量（140kVp，W \geq 2500 层/周）下的机房屏蔽达到 2.5mm 铅当量。PET/CT 机房的屏蔽设计满足标准（GBZ130-2013）的防护要求。

11.3.2 SPECT/CT 检查环境影响分析

(1) 显像核素的使用

顺义院区核医学科 SPECT 使用 Tc-99m、Tl-201、Ga-67、I-123 和 I-131 等核素，其中 Tc-99m 使用量大，使用频率高，故以 Tc-99m 为例对 SPECT 场所的使用进行评价。

(2) 放射性核素 Tc-99m 的贯穿辐射

Tc-99m 源的 K_{γ} 常数为 $0.023\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{MBq})$ ，给患者注射 925MBq (25mCi) Tc-99m 后，距离患者 1m 处的剂量率为 $21.3\mu\text{Gy/h}$ (未考虑患者自吸收)，Tc-99m γ 辐射能量为 0.14MeV，铅屏蔽的 TVL=1mm，砼屏蔽的 TVL=69.9mm ($\rho=2.35\text{ t/m}^3$)，注射 925MBq (25mCi) 的 Tc-99m 药物的病人，1m 处的剂量率约为 $3.7\mu\text{Sv/h}$ (国际放射防护委员会，第 52 号出版物，p14，1987)。

与 Tc-99m 试剂相关机房可采用具有屏蔽效果的一般建筑材料，150mm 砼或 2mm 铅外辐射水平已接近天然本底辐射水平，因此本项目核医学科内 SPECT 相关场所 200mm 砼、3mm 铅防护门更满足相关辐射源的屏蔽要求。

① 公众受照剂量

Tc-99m 试剂相关机房外的辐射水平已接近天然本底辐射水平，对公众外照射的年附加剂量贡献很低。

② 工作人员年受照剂量

a) 工作人员为患者进行 Tc-99m 药物注射环节的受照剂量

据《放射性核素和辐射防护数据手册》[Radionuclide And Radiation Protection Data Handbook 2002]给出：手持注射器注射活度为 1MBq、容量为 5mlTc-99m 药液时，对距 30cm 处人的深部当量剂量率为 $2.6\times 10^{-4}\text{mSv/h}$ 。所以，注射 925MBq (25mCi)的 Tc-99m，距 30cm 处人的深部当量剂量率为 $240\mu\text{Sv/h}$ 。注射时采用具有防护功能的铅玻璃窗屏蔽 (20mm 铅当量的铅玻璃)，操作时注射窗口可能不能完全屏蔽人体的所有部位，若注射车完全屏蔽时衰减因子小于 $7.4\text{E}-17$ ，则注射窗口完全屏蔽时工作人员所受到的年剂量很低。

b) 工作人员在 Tc-99m 扫描室内指导病人摆位环节的受照剂量

注射 925MBq(25mCi)的 Tc-99m 药物的病人，1m 处的剂量率约为 $3.7\mu\text{Sv/h}$ (国际放射防护委员会，第 52 号出版物，p14，1987)。假设摆位人员距离病人距离 100cm，保守按全年进行 SPECT 检查的最大人数 (37500 人次) 进行剂量估算。假设每个病人的平均摆位时间 60s，则年总操作时间为 625h，摆位时工作人员穿 0.5mmPb 当量的铅衣 (衰减因子为 3.16×10^{-1})，则总剂量为： $3.7\mu\text{Sv/h}\times 625\text{h}\times 0.316=731\mu\text{Sv}$ 。

(3) SPECT/CT 环节工作人员与公众预计年附加有效剂量

根据以上估算结果，工作人员年附加有效剂量主要来自于摆位过程，其年

附加有效剂量约 731 μ Sv，公众所受的年附加有效剂量很低可忽略。

(4) SPECT/CT 中 CT 运行的环境影响

SPECT/CT 中 CT 机为 III 类射线装置，工作条件低于诊断用 CT 机，机房东、南、西、北墙为 20cm 砼（不低于 2.0 mm 铅），顶棚和地面屏蔽厚度为 20cm 砼（不低于 2.5mm 铅），机房防护门均采用 3mm 铅，机房的观察窗为 3mm 铅当量的铅玻璃。根据《医用 X 射线诊断放射防护要求》（GBZ130-2013）：较大工作量（140kVp，W \geq 2500 层/周）下的机房屏蔽达到 2.5mm 铅当量。两间 SPECT/CT 机房的屏蔽设计满足标准（GBZ130-2013）的防护要求。

(5) 锝气发生器致工作人员年受照剂量

①加样

制备 Tc-99m 气体前，工作人员需向锝气发生器舟型坩埚中注入 15mCi 高锝酸钠注射液，操作时间约 1 分钟，据《放射性核素和辐射防护数据手册》[Radionuclide And Radiation Protection Data Handbook 2002]给出：手持注射器注射活度为 1MBq、容量为 5ml Tc-99m 药液时，对距 30cm 处人的深部当量剂量率为 2.6×10^{-4} mSv/h。所以，注射 550MBq（15mCi）的 Tc-99m，距 100cm 处人的深部当量剂量率为 12.9 μ Sv/h。按照一天 2 例病人，一年 500 例病人，年操作时间为 8.3h，则工作人员加样环节所受年附加剂量为 107 μ Sv。

②患者施用过程

Tc-99m 气体制备好后，由工作人员指导患者吸入 Tc-99m 气体。病人吸气后约 20MBq 的 Tc-99m 气体被吸收（主要在肺部），另有约 20MBq 的 Tc-99m 气体吸附在 PAS 过滤装置。病人和过滤装置会对工作人员产生外照射。施用过程中工作人员距患者和过滤装置约 100cm，吸入气体及观察过程用时约 5 分钟，则患者施用过程对工作人员的外照射剂量为 $0.26 \times 0.3^2 \times 20 \times 2 \times 5 / 60 \times 500 = 39 \mu$ Sv/h，计算中未考虑患者身体的衰减作用。

本次理论估算出一次 Technegas 制备和给药过程操作者受到的外照射累积剂量是 3.24 μ Sv。根据李蓓蕾等“Technegas 肺通气显像中医务人员的辐射剂量水平监测与评价”，在整个 Technegas 制备和给药过程中，操作者受到的外照射累积剂量是 0.38~1.0 μ Sv，实测值要低于理论估算值。操作者在实际工作中应规范操作，熟练操作，尽量缩短照射时间。

③内照射剂量

Technegas 制备和给药过程中会有少量的 Tc-99m 气体逸散到空气中，JJ.LLOYD 等对场所的 Tc-99m 气溶胶浓度做了检测评价分析，根据“Contamination levels and doses to staff arising from the use of Technegas”检测数据，不考虑通风情况下制备和给药场所中 Tc-99m 气溶胶的浓度为 17~195kBq/m³，低于本次评价的工作人员空气浓度控制值（290kBq/m³）。一次 Technegas 制备和给药过程按 10min 考虑，一年 500 位受检患者，工作人员在高活室内照射的时间为 5000min，根据《辐射安全手册》单位活度 Tc-99m 致人有效剂量约 10μSv/MBq，则工作人员内照射剂量为 195×10⁻³ MBq/m³×0.02m³/min×5000min×10μSv/MBq=195μSv。制备施给过程均在核医学科高活室通风橱边进行，通风橱工作中有足够风速（一般不小于 1m/s），工作人员实际内照射剂量要远小于理论估算值。

综上所述，使用锝气发生器制备和施用药物对工作人员的年附加剂量为 107+39+195=374μSv。

可见，本项目 SPECT 工作人员年受照总剂量为 1.11mSv（374μSv+731μSv），低于本项目设定的年剂量约束值 5mSv/a 要求。

11.3.3 放射性废物产生及排放情况

（1）放射性废气

核医学科高活室安装独立的排风净化系统，核素操作区排风在经过带有活性炭过滤器净化后，由高于楼顶排放。核医学科诊断区域主要所涉及的同位素操作主要都是一些很简单的湿法操作，除I-131以外的标记药物物理性质稳定，该场所只做I-131甲状腺功能检查和少量的显像，在正常工作情况下产生气溶胶和蒸汽很少，不会造成工作环境的空气污染，即使出现放射性物质泼洒情况时，废气经过排风系统排放至楼顶处，经大气扩散后浓度会更低，且偶发排放对周围公众的剂量贡献很小。

（2）放射性液体废物

核医学科诊断区高活室内产生的废水以及给药后患者专用卫生间产生的废水和地下三层回旋加速器场所产生的少量废水，将通过专用管道一并汇入位于地下三层南侧的放射性废水 2 号衰变池，废水通过衰变后排放至医院污水处理站进一步处理后，最终进入市政污水管网。

2 号衰变池收集的放射性废液中含 Tc-99m、F-18、I-131、Ga-67、Tl-201

等多种放射性核素，其中以 Tc-99m、F-18 两种核素使用量居多，期间产生的放射性废液包括：

①核素显像检查：核医学科候诊人员主要都是 PET 或 SPCET 检查患者，其中每位 PET 患者候诊室等候约 1h, Tc-99m 骨扫描候诊时间 3~4h、心脏 1.5h, 甲状腺 20min~30min, 肾显像不用候诊，当所有项目满负荷运行时，平均每天最多 200 名患者排便，假设 4L/每人（包括冲洗水），保守估计产生的放射性废水共约 17.6m³/月，年产生量约为 211m³；

②分装室、配药室内清洗废水：按 50L/天，则 1.1m³/月。

每充满 1 槽衰变池约需 0.77 个月（约 23 天），3.09 个月充满 3 个衰变池后排放第 1 个池的废水，每个衰变池贮存废水的时间周期超过 3 个月，PET 或 SPCET 检查患者排放放射性废水中半衰期长的主要为 Tc-99m（半衰期为 6.02h），4 个月储存至少经过 358 个半衰期衰变（用量较少的 Ga-67 也经过约 15 个半衰期衰变），预计其排泄物活度浓度和总活度衰变后远低于豁免水平，可见 2 号衰变池可满足使用要求。

综合分析，本项目放射性废水排放总量和排放方式满足报告表 7.3.5 章节的放射性废水排放有关规定要求。按照《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》相关要求，放射性废水在排放前，应委托有资质的检测机构（CMA）对拟排放的废水进行检测。

（3）放射性固体废物

核医学科门诊按需申请放射性药物，如有剩余的放射性药物，连同包装容器暂存于高活室自行衰变。高活室内拟配置 4 个铅质废物桶，将废弃的药瓶、注射器、包装物、棉棒、被污染的一次性用品等固体放射性废物，暂存于该废物桶内，标注日期于次日早晨转移至废物间内的废物桶内。放射性废物暂存至少一个月，经监测确认达到清洁解控水平要求后，作为医疗废物处置。

本场所保守按全年开展核素诊疗 50000 人次，平均每人次产生含放射性固体废物 0.01kg，则项目满负荷运行年产生量约 500kg。此外，每年更换通风橱活性炭过滤器，预计额外产生 40kg 固体废物，拆下的废弃滤材将妥善收集，密封包装暂存于污物间，按照放射性固体废物进行暂存，存放超过至少一个月后，经监测确认达到清洁解控水平要求后作为危险废物处置。

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》，本项目使用核素为 A 类和 B 类，放射性固体废物在废物间内暂存衰变时间超过 30 天且超过 10 倍最长半衰期后，使用经检定或校准合格的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，并在“放射性固体废物暂存、处置管理台账”上详细记录解控废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、废物处置人员和处置日期等信息。

11.4 核素治疗环境影响分析

核医学科核素治疗场所分为住院治疗 and 门诊治疗，使用 I-131 核素开展甲癌患者的住院治疗和甲亢患者的门诊治疗，使用 Sr-89、Ra-223 核素用于骨转移、前列腺癌骨转移患者的门诊治疗。

11.4.1 住院治疗辐射影响分析

(1) 病房周围辐射剂量率水平

I-131 治疗药物的剂型通常为 Na¹³¹I 水溶液，采用口服给药方式。Na¹³¹I 口服液事先由供药公司根据病人用量分装于药瓶内，之后存放在铅罐（40mm 厚 Pb）中，送抵医院。

I-131 放射性药物包装为 A 型，运输类别为 II 级（黄）。《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）要求：对于 II 级（黄）运输类别，外表面任何一点处的剂量率不得高于 0.5mSv/h。罐体直径按照 10cm 估算，预计 1m 处的剂量率低于 1.25 μ Sv/h。可见，放射性药物在包装容器内储存时，对周围环境的影响是很轻微的。放射性药品使用前，拟采用自动分装仪分装，之后由病人自取服用。服用时间很短，对周围环境影响也较小。

病人服用药物后，相当于一个移动放射源，在病房停留观察 3-5d，对环境有一定的影响。将 I-131 药物容器或服药病人似作点状源。考虑屏蔽层的衰减和距离衰减，可以估算出治疗室和病房周围（含楼上）的附加剂量率水平。根据《Bernard Shleien.1998. Handbook of Health Physics and Radiological Health.3rd》文件估，施用 3.7GBqI-131 药物后不同时间所致不同距离的剂量水平见表 11-11，24 小时后距患者 1m 处辐射剂量率为 109 μ Sv/h，则距患者 2m 处（工作人员查房停留距离）剂量率为 27.3 μ Sv/h。

表 11-11 施用 3.7GBqI-131 药物后不同时间所致不同距离的剂量水平($\mu\text{Sv/h}$)

与患者距离 (m)	用药经过时间 (h)							
	0	6	12	18	24	36	48	72
1.0	216	173	120	117	109	81.4	67.4	17.7

屏蔽设计：病房和放射性废物间四周墙体均为 30cm 砼，地板、顶板均为 30cm 砼，拟安装不低于 6mm 铅当量防护门。病房设计布局基本相同，故选择有代表性的病房 1、病房 8 和病房 10，保守按每个患者施药活度 5.55GBq（150mCi，即 1m 处初始剂量率为 $324\mu\text{Sv/h}$ ），估算其周围的附加剂量率和对环境的辐射影响，核素治疗项目运行对周围环境影响见表 11-12，点位见图 11-8。

表 11-12 注射核素后患者在病房周围不同位置的附加剂量率

位置		距扫描患者 距离 (m)	有效屏蔽材 料与厚度	衰减因子	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	备注
病房 1	东墙外病房 2	3.2	30cm 砼	$1.87\text{E-}3$	0.06	控制区
	西墙外送风机房	1.3			0.36	公众
	南墙外室外庭院(无人区)	2.3			0.11	无人区
	北墙外病房走廊	4.2			0.03	控制区
	楼上走廊和值班室	5.2			0.02	公众
	楼下排风排烟机房	4.8			0.03	公众
	防护门外患者走廊	4.7	0.8cm 铅	$1.44\text{E-}1$	2.41	控制区
病房 5	东墙外病房 6	3.2	30cm 砼	$1.87\text{E-}3$	0.06	控制区
	西墙外病房 4	1.3			0.36	控制区
	南墙外室外庭院(无人区)	2.3			0.11	无人区
	北墙外病房走廊	4.2			0.03	控制区
	楼上走廊和办公室	5.2			0.02	公众

	楼下汽车通道	4.8			0.03	公众
	防护门外患者走廊	4.7	0.8cm 铅	1.44E-1	2.41	控制区
病房 10	东墙外等候室 6 和取餐室	1.3	30cm 砼	1.87E-3	0.36	控制区
	东墙外送餐室	5.2			0.02	科里工作人员
	西墙外病房 9	3.2			0.06	控制区
	南墙外病房走廊	2.8			0.08	控制区
	北墙外等候室 5	3.6			0.05	控制区
	楼上示教室	5.2			0.02	公众
	楼下机械停车位	4.8			0.03	公众
	防护门外患者走廊	4.7	0.8cm 铅	1.44E-1	2.41	控制区
服药室	西墙外患者走廊	1.8	20cm 砼	1.52E-2	1.52	公众

备注：铅屏蔽的 TVT=9.5mm，混凝土的 TVT=110mm ($\rho=2.35t/m^3$)

由表 11-12 可见：在患者服用 5.55GBq I-131 药物后，控制区边界外的普通区域和监督区，如送餐室、西侧送风机房、楼上楼下等位置，最大附加剂量率为 1.52 μ Sv/h，满足本项目辐射场所控制区及边界辐射剂量率小于 2.5 μ Sv/h 和 10 μ Sv/h 的要求。根据剂量率与距离平方成反比以及评价范围内固有建筑物的屏蔽（如东侧医生办公区和一楼的儿科经过墙体衰减至少减少 100 倍），则在放射治疗病房周围 50m 评价范围内的相关场所的剂量率远小于 2.5 μ Sv/h，为本底水平。



图 11-8 核医学科碘病房周围剂量率估算点位示意图

(2) 工作人员受照剂量分析

工作人员包括医生、护士和辅助护理工作的护工。工作人员的辐射受照剂量将主要来自 γ 射线外照射和吸入内照射。

根据《Bernard Shleien.1998. Handbook of Health Physics and Radiological Health.3rd》文件，施用 3.7GBqI-131 药物 24h 后，距患者 1m 处辐射剂量率为 $109\mu\text{Sv/h}$ ，则距患者 2m 处（工作人员查房停留距离）剂量率为 $27.3\mu\text{Sv/h}$ 。假设使用 I-131 药物的平均服药量为 3.7 GBq/人，保守按每年治疗 800 人计，每周查房时间 1h，工作人员外照射剂量为 1.365mSv/a ($27.3\mu\text{Sv/h} \times 1\text{h/周} \times 50 \text{周/a}$)。

假设病房空气中 I-131 平均浓度 200Bq/m^3 ，每周查房时间 1h，工作人员吸入 I-131 量最大值 $1.2 \times 10^4 \text{Bq/a}$ ($200\text{Bq/m}^3 \times 0.02\text{m}^3/\text{min} \times 60\text{min/h} \times 1\text{h/周} \times 50 \text{周/a}$)，吸入放射性碘剂量转换系数取 $7.4 \times 10^{-9} \text{Sv/Bq}$ ，预计内照射有效剂量为 0.09mSv/a 。可见，正常情况下工作人员年受照剂量在 1.5mSv 左右，低于设定的剂量约束值 5mSv/a 。

开展核素治疗工作期间，可采取预约治疗，患者集中入院和出院，减少工作人员查房及护理工作时间；对于必要的近距离护理，工作人员应穿戴防护服，熟练操作以减少与患者接触时间；另外询问患者或进行指导性护理时可距离患者距离稍远，或可采用视频查房系统进行查房，尽量减少工作人员接触患者时间，减少工作人员的受照剂量。

(3) 公众受照剂量分析

据ICRP第94号出版物给出的数据，患者体内大约55%施予活度的I-131在服药后24h内排出体外，22%的I-131在第2个24h排出，即最初2d内随尿排出总计77%；总量的80%在最初3d内排出体外。故患者服药后每天的剂量变化较大，以瞬时剂量率估算公众受照剂量不符合实际情况。附表11-6列出了服用I-131的甲癌患者周围辐射剂量率变化情况，从表11-6中可得72h内对周围公众1m平均剂量率的影响约为90.2 μ Sv/h，为刚施药患者1m处216 μ Sv/h的0.42倍（公众估算保守取0.5倍）。

①场所周围停留公众

公众受照主要来自 γ 射线外照射。按照全年治疗800人，全年病房周围相关场所总工作时间取2000h，表11-13给出了对病房周围的环境可能产生影响。可见，病区周围公众受到的年有效剂量最大值约为22.5 μ Sv，低于设定的剂量约束目标值100 μ Sv/a。

表 11-13 相关场所主要位置公众的年附加剂量估算

位置	附加剂量率 (μ Sv/h)	受照时间 (h)	居留因子	年附加剂量 (μ Sv)
病房 1 西墙外送风机房	0.36	2000	1/16	22.5
病房 1 南墙外室外庭院	0.11	2000	1/16	6.9
病房 1 楼上值班室	0.02	2000	1	20
病房 1 楼下排风排烟机房	0.03	2000	1/16	1.9
病房 5 楼上办公室	0.02	2000	1	20
病房 5 楼下汽车通道	0.03	2000	1/16	1.9
病房 10 东墙外送餐室	0.02	2000	1/16	20
病房 10 楼上示教室	0.02	2000	1	20
病房 10 楼下机械停车位	0.03	2000	1/16	1.9

备注：年有效剂量估算示例： $H_0 = D \times t \times U \times T = 0.36 \times 2000 \times 1/16 \times 0.5 = 28.1$ (μ Sv)，附加剂量率按取施药5.55GBq患者的值。

患者隔离治疗期结束出院后，体内残留I-131的放射性也可能对周围公众产生外照射辐射。本项目要求I-131治疗的患者住院3-4d以上，且体内放射性活度降至低于400MBq之下才能出院。出院前，进行甲状腺I-131含量检测，

确认患者体内放射性活度低于400MBq 才允许出院。

② 出院患者路途周围公众

假设符合出院条件的患者体表1m 处的剂量率低于20 μ Sv/h。若患者出院回家需乘坐公共交通工具（如：火车、飞机、长途汽车），且旅途时间超过4h，则对同行旅客的照射剂量将超过100 μ Sv。核素治疗规程规定主治医师发放 I-131 治疗患者告知书，要求服药患者离院后，限制与儿童或孕妇密切接触，避免与他人长时间接触。采取上述辐射防护措施，接受I-131 治疗的患者出院后路途对周围人员的辐射影响可以控制。

陪护人员及探视者根据病区管理规定，一般情况治疗期间禁止陪护。有些甲状腺癌及转移灶疾病患者身体虚弱，在接受I-131 治疗过程中可能需要有人陪护，但不允许在病室长期停留。

11.4.2 门诊治疗辐射影响分析

核医学科核素治疗场所还使用 I-131、Sr-89 和 Ra-223 开展门诊治疗，在接受放射性药物治疗的病人，在用药正常后就离开。除给药期间病人辐射对周围环境有短暂影响外，通常不会产生排泄物等废水和固体废物，病人呼出气可能含有的少量放射性物质，其中 Sr-89 为 β 核素，Ra-223 为 α 核素，且每天治疗病人较少，对工作人员和患者周围公众外照射影响轻微；使用 I-131 治疗甲亢的病人最多 20 名/周，不大于 370MBq/病人，I-131 的操作方式为口服，假设从病人口服到离开，工作人员接触病人的时间为 2min/病人，一年的接触时间为 41.7h[5min \times 20(人/周) \times 25(周/年)/60(min/h)]，I-131 γ 辐射能量为 0.36MeV， K_{γ} 值为 52 μ Sv \cdot m²/h \cdot GBq，距离患者（施用量 370MBq）1m 处的剂量率约为 19 μ Sv/h，则 I-131 核素对工作人员增加的附加剂量约为 792 μ Sv。

11.4.3 核素治疗场所放射性废物产生及排放情况

(1) 放射性废水

①放射性废水来源和产生量

住院治疗患者在住院期间，盥洗和冲厕废水是碘病房放射性废水的主要来源。此外，服碘室和住院病区卫生保洁也产生少量含放射性废水。

住院病区全年规划接收住院病人不超出800 人次(住院时间为3-4d, 每间80 批次)。假设每位患者住院期间人均用水量按140L/d 计，包括盥洗(40L)、冲厕(80L)、保洁等(20L)等，日排水量约1.12m³(140L/d \times 8人)，保守假设门诊治疗

患者每天16人排水量为 0.08m^3 ，年排水量约 438m^3 。

②放射性废水收集、处置与排放

病房高活室内产生的废水以及患者住院期间产生的废水，将通过专用管道一并汇入位于地下三层南侧的放射性废水1号衰变池，废水通过衰变后排放至医院污水处理站进一步处理后，最终进入市政污水管网。

③废水产生排放情况预测

衰变池采用现浇混凝土建造，共计4个衰变池，每个池子的有效容积 110.5 立方米，总有效容积为 442m^3 ，顶部距楼顶 1.9m ，衰变池初步设计见附图6-4。

碘病房的I-131的每周最大排放量为 $(16\text{人}\times 70\%)\times 3.70\text{GBq}$ ，门诊治疗I-131核素的每周最大排放量为 $20\text{人}\times 10\%\times 370\text{MBq}$ 。由于年排水量约 438m^3 ，则放射性废水的贮存衰变时间可达 365d 。I-131的半衰期为 8.04d ，废水中放射性核素I-131贮存衰变时间可达45个半衰期，满足《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》要求，考虑I-131自身的衰变，废水中核素I-131活度衰减变化分析可得，第一个 110.5 立方米池子满时，I-131的活度不大于 7.78GBq ，该池排放前至少经过270天的衰变，经过270天衰变后该池的I-131放射性核素总量为 0.6Bq ，满足由《电离辐射与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）导出的放射性核素月排放（ 9.1MBq ）控制要求。

本场所拟使用半衰期最长治疗用核素的为 Sr-89（半衰期 50.5d ），分析核素治疗过程放射性废水排放情况。据 ICRP 第 94 号出版物《非密封放射性核素治疗后的患者出院考虑》给出的数据，实施核素 Sr-89 治疗，大约占 $60\%\sim 70\%$ 的药物滞留于骨骼组织，其余部分在最初 6h 和最初 48h 随尿液分别排出可排泄部分大约 35% 和 $80\%\sim 90\%$ 。保守估算治疗结束排一次便时，占用药量（ $148\text{MBq}/\text{次}$ ）剩余 30% 的 17.5% （即 $7.8\times 10^6\text{Bq}$ ，排一次便的量占 6h 的一半）的核素 Sr-89 随尿液排出体外。假设在一个月内有 10 位接收 Sr-89 治疗的患者，在治疗期间使用工作区卫生间，则每月排放进入衰变池的 Sr-89 总活度约 $2.1\times 10^8\text{Bq}$ ，每格废水池充满约需 3 个月，第一个 110.5 立方米池子满时，Sr-89 的活度不大于 $1.64\times 10^8\text{Bq}$ ，该池排放前至少经过 270 天的衰变，经过 270 天衰变后该池的 Sr-89 放射性核素总活度不大于 $4.1\times 10^6\text{Bq}$ ，低于放射性核素 Sr-89 的每月排放限值（ $\leq 2.7\times 10^7\text{Bq}$ ）。

综合分析，本项目放射性废水排放总量和排放方式满足报告表 7.3.5 章节

的放射性废水排放有关规定要求。放射性废水在排放前，应委托有资质的检测机构（CMA）对拟排放的废水进行检测。

④衰变池辐射防护与安全管理

特别关注池壁和池底的防渗处理。施工单位要进行严格的渗漏检测，确保放射性废水在暂存期间不发生渗漏，防止污染地下水。

放射性废水排入衰变池之前的水平管道可能存有放射性液体，将采用不少低于6mmPb进行包裹。含放射性核素废水在污水收集、暂存设施存留时释放的 γ 射线可能对周围环境产生影响。在放射性废水衰变池附近拟放置辐射警告标识或设置围挡，提醒公众避免长时间停留受到辐射照射。进行排污管道维修施工和衰变池清淤施工时应采取辐射防护措施，以减少操作人员可能受到辐射照射。医院后勤管理处负责衰变池日常运行管理，每周派人巡视一次。医院将委托有资质单位对放射性废水进行检测，按照环境管理要求进行排放。根据国家放射性废物排放管理要求，排放衰变池废水须经生态环境部门许可，确保废水的放射性水平符合排放标准后，依照GB18871-2002中低放废水的排放要求排放。

(2)放射性废气

①服碘室

病房治疗甲癌服用的I-131同样是溶液剂型，口服，故正常工况下，对工作环境造成空气污染较小。本项目采用I-131药液全自动药物分装仪进行活度测定、质检、分装等操作，上述操作均在病房高活室内完成，该房间安装有通风系统，排风引至楼顶高空排放。排气系统末端装有活性炭过滤装置，预计对医院周围环境影响较小。

假设药物操作时有 $3.7 \times 10^5 \text{Bq}$ 的I-131（保守取操作量的0.01%）挥发进入排风系统，操作过程（约3min）中I-131均匀释放，通风速率 $4000 \text{m}^3/\text{h}$ ，排放系统碘过滤器过滤效率为99%，预计排风口处的排放浓度为 $5.6 \text{Bq}/\text{m}^3$ ，经过空气稀释后最大落地浓度为 $0.56 \text{Bq}/\text{m}^3$ ，远低于公众导出空气浓度 $5.6 \text{Bq}/\text{m}^3$ 限值要求。此外，废气排放过程短暂（1min/人次），频次少（全年800人次），总排放时间约为13h，而公众DAC限值是基于全年暴露2400h得出的，比较可知，废气对周围环境和公众的影响是十分轻微的。

②碘病房

病房放射性废气还来自患者体内代谢的 I-131 随呼出气进入空气,以及放射性表面污染物的挥发。ICRP 第94 号出版物给出,呼出气中放射性碘含量为服用活度的0.008~0.03%, 治疗后第1d 内每小时平均呼出活度为 $1.5 \times 10^{-6} \text{Bq}/(\text{h} \cdot \text{Bq} \text{ 服用活度})$; 服药后2d 内I-131 的呼出气浓度为20~190Bq/L。房间空气的平均浓度为80~440Bq/m³, 为了防止I-131 在病房内蓄积,影响周围的医护人员和其它公众。将在I-131 治疗病房设置独立的机械送、排风系统,最小换气次数5次/时。每间病房的卫生间和房间内各设1 个排风口,含碘废气有组织排放,排气系统末端装有活性炭过滤装置,排气口设在楼顶。过滤效率按99%计,排放浓度低于4Bq/m³,经环境空气稀释和扩散后,临近工作场所和人员可能停留区域空气中I-131 的平均浓度至少再降低10 倍,远低于本评价建议的公众DAC 限值5.6Bq/m³ 要求,故对环境的影响轻微。

根据同位素杂志2018年12月 第32卷第 6 期的文章《I-131治疗场所放射性废气排放源项调查与评价》结论, I-131治疗场所周围50m范围内空气中活度浓度约为 $10^{-1} \text{Bq}/\text{m}^3$,衰变池盖板上方空气中I-131活度浓度可达几个Bq/m³,评价 I-131治疗场所周围近距离区域的环境影响时应重点关注衰变池盖板缝隙泄漏、治疗病房窗户泄漏等无组织排放源的贡献。

医护人员通过视频监控和对讲系统询问病情,定期在走廊巡视病区,避免进入到病房。当患者出现病情变化,医护人员需进入病房检查处置时,要戴防护口罩,并尽可能减少停留时间。

(3) 放射性固废

核医学科按需购入放射性药物,通常不会有剩余的放射性药物。服碘室配置专用废物桶。患者使用的服药杯子、废弃的包装物、被污染的一次性用品等固体放射性废物,按产生日期分类暂存于废物桶,待衰变时间超过10 个半衰期后,申请清洁解控,满足清洁解控要求的废物按照医疗废物处置。按全年开展核素治疗800 人次,平均每人次产生放射性固体废物(药瓶、药杯、水杯、吸水纸等)0.1kg,则项目满负荷运行年产生量约80kg。此外,核医学科每年更换排风过滤器一次,预计额外产生50kg 固体废物,总计约130kg。

服药患者使用过的各类物品,如纸巾、被褥和病号服等,会有不同程度的放射性污染,属于低放废物。按产生日期分类收集于废物暂存间。待衰变时间超过10 个半衰期后,申请清洁解控,符合清洁解控要求的废物按照普通废物

处置。被褥和病号服返回洗衣公司清洗后再次使用。该类废物按照2kg/人次估计，则年产生量约1600kg。

11.5 受照剂量总结

根据以上估算，核医学科这三个场所的附加有效剂量如表11-14，这几个场所理论上不存在累加情况，即使核医学科门诊场所SPECT工作人员和PET工作人员剂量累加后也为4.0 mSv/a，核医学科门诊和核医学科治疗的公众附加有效剂量都是保守按居留因子为1估算的，因此可不考虑累加。

表11-14 本项目不同环节受照剂量情况表

对象	回旋加速器及相关场所	核医学科门诊		核医学科治疗	治疗场所排放I-131废气
		SPECT工作人员	PET工作人员		
辐射工作人员	384 μ Sv/a	1.11 mSv/a	2.89 mSv/a	1.5mSv/a	/
公众	14.7 μ Sv/a	62.2 μ Sv/a		22.5 μ Sv/a	<10 μ Sv/a

可见，本项目工作人员和公众年受照总剂量分别不大于4.0mSv和62.2 μ Sv，低于本项目设定的年剂量约束值5mSv/a和100 μ Sv要求。

11.6 本项目异常事件分析与防范措施

11.6.1 回旋加速器及相关GMP实验室异常事件分析与防范建议

(1) 人员误入或误留加速器机房

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

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

(2) 加速器冷却水泄漏

加速器冷却水系统故障或设备失修导致冷却水排出，造成机房内表面污染

和人员受照。

本项目加速器机房和水冷设备间均设置地漏，连接到2号衰变池，当冷却水泄漏时，可将其导入到2号衰变池贮存。

一旦加速器发生故障时，程序控制系统会使加速器自动停机，也可通过手动使其停机。对加速器进行维修时，则需要通过加速器机房内剂量监测报警仪监测数据判断机房内的辐射水平，当剂量率降低到 $10\mu\text{Sv/h}$ 以下时，相关人员才被允许进入到机房内进行维修活动。对于地面残留的少量冷却水用易吸水质吸收干净，并用棉布对沾污处之处反复清洁擦拭，并采用表面污染检测仪进行检测，确保表面污染符合标准要求后再进行维修活动。用于擦拭和清洁的材质（如棉布等）作为放射性固体废物处理。

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

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

事故发生时，任何溅出的靶材料都将留在屏蔽装置内侧，等到核素衰变后，清除屏蔽装置内侧溅出的材料。真空罐内部的辐射可被屏蔽，待材料衰变 10 个半衰期（第二天）后，再打开真空罐进行维修。该事故影响局限在加速器机房内部，不会对外环境和公众产生影响。

(4) 操作放射性同位素时发生容器破碎，同位素泼洒等意外事件。

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

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

40Bq/cm²。

11.6.2核医学科门诊异常事件分析与防范建议

核医学科门诊在运行过程中可能发生以下异常事件：

(1) 放射性药物保管不善，发生遗失或被盗。放射性物品失控可能造成环境放射性污染。

(2) 由于操作不慎，溢漏、撒泼放射性物质，污染工作台面和地面；放射性物质从患者吐出导致放射性污染。放射性物质污染工作场所、衣物、手和皮肤，增加外照射危险程度，还有可能被食入或吸入体内形成内照射。

(3) 错误给药。包括放射性活度不正确，导致I-131 治疗剂量错误；弄错患者，导致不必要的照射；授乳期妇女受到不必要的照射。

(4) 放射性废物处置或管理不当，造成环境放射性污染。

(5) 服药患者体内核素活度未降至出院水平以下，即离开隔离病房，对公众造成不必要照射。

为避免上述异常事件发生，应采取以下风险防范措施：

(1) 高活室设置闭路监视和防侵入系统，安装防盗门，依照《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》（GA 1002-2012）落实相关要求，贮源场所通过公安部门验收后投入使用。此外，放射性药品由专业公司送达医院后，核医学科技师与送药人员在摄像头下“点对点”交接。采取上述措施后，可有效防范放射性药物丢失恶化被盗。

(2) 制定相关的操作规程，并对操作放射性药物的人员进行严格培训，通过内部考核后，上岗工作。上述措施可以有效避免因操作失误，导致工作场所发生局部放射性污染的事件发生。

在控制区入口处设置有缓冲间，工作人员进出控制区需更换工作服和工作鞋，该措施可有效避免放射性污染的扩散。此外，将制定放射性局部污染的处置措施，一旦发生放射性药品遗撒、患者呕吐等意外情况，依照程序处置，规范操作，防止放射性污染扩散导致周围环境污染。

(3) 病人注射或者服碘前，要认真核对患者的姓名、性别、给药量，防止因错误给药导致他人受到不必要的照射，或者因给药活度不准确影响诊疗效果。

(4) 核医学科高活室和病房的服碘室，均配置放射性废物桶，收集放射

性废物，并在放射性废物贮存室暂存，暂存至少半年以上，申请清洁解控处置，该措施可有效避免放射性废物对环境造成污染和影响。诊断场所和碘病房配有专用厕所，病人的排泄物进入衰变池暂存，达标后排放，该措施可有效防止放射性废水对环境造成污染和影响。

放射性场所场设置有排风系统，废气有组织在楼顶排放。碘病房废气排口设置有碘过滤器，可有效减少I-131 的排放和对环境的影响。

(5) 甲亢治疗患者的用药量控制在400MBq 以下，个别用药量超出该水平的患者，在留观室留观，经检测，待体内活度低于400MBq 方可离开医院。甲癌患者服碘后，在碘病房留观3-4 天，经检测，待体内活度低于400MBq 方可出院。上述措施可以避免患者体内I-131 活度未降至出院标准而对公众造成不必要照射。

11.7 项目环保验收内容建议

根据项目建设和运行情况，评价单位建议本项目竣工环境保护验收的内容见表11-15。

表11-15 项目环保验收内容建议表

验收内容	验收要求
剂量限值	根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)和环评报告预测，公众、职业照射剂量约束值执行 0.1mSv/a 和 5mSv/a；放射性表面污染控制水平满足 GB18871-2002 要求。
剂量当量率	控制区外 30cm 处周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h。
电离辐射标志和中文警示	在核医学场所出入口、高活室、扫描机房、病人候诊室门外设置放射性警告标识和中文警示说明。
布局和屏蔽设计	辐射工作场所建设和布局与环评报告表描述内容一致。屏蔽墙和防护门的屏蔽能力满足辐射防护的要求。高活室通风换气设施运转正常，通风能力满足设计要求。
辐射安全设施	辐射工作场所工作区出入口安装电子门禁；高活室采用实体屏蔽措施，安装防盗门、电视监控系统和防盗窃报警装置，满足北京市公共安全标准要求。
监测仪器	配备检测仪器：配备 3 台辐射剂量巡测仪 3 台表面污染监测仪、1 台中子剂量当量率仪、4 台个人剂量报警仪、2 套固定式剂量报警仪(多个探头)、回旋热室人员出口配备 1 台污染监测仪。辐射工作人员进行个人剂量监测，建立健康档案。

“三废”处置设施	核医学科配置满足需要的放射性废物存贮设施，配备防辐射废物桶 20 个；建设有满足环境管理要求的放射性废水衰变池，且有运行管理记录；高活室安装通风橱，操作口风速大于 1m/s；通风柜配套建设独立排风系统，排放口设置在所在建筑顶部高处，排风速率满足辐射安全需要。
规章制度	已经制定有各项安全管理制度、操作规程、工作人员培训计划等。辐射安全管理制度和操作规程得到宣贯和落实。
人员培训	辐射工作人员参加生态环境部或市生态环境部门认可的培训机构的培训。
应急预案	辐射事故应急预案符合工作实际，应急预案明确了的应急处理组织机构及职责、处理原则、信息传递、处理程序和处理技术方案等。配备必要的应急器材、设备。针对使用放射性同位素过程可能存在的风险，建立应急预案，落实必要的应急装备。进行过辐射事故（件）应急演练。

表 12 辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

12.1.1 辐射安全管理小组

医院已经设置了辐射安全与环境保护管理领导小组作为专门管理机构，并指定了专人负责辐射安全与环境保护管理工作。人员构成具体情况见表 1-4 所示。本项目实施后，医院将新建顺义院区纳入辐射安全管理范围，相关负责人将担任辐射安全与环境保护管理领导小组成员，负责相关科室的日常管理。辐射安全管理小组的职责：

辐射安全管理小组的职责：

1. 在医院辐射安全防护组组长、副组长的领导下，负责本医院辐射安全防护的管理工作。
2. 贯彻执行国家、北京市政府部门有关法律、法规、规章、相关标准及有关规定。负责对本医院相关部门和人员进行法律、法规及相关标准的培训、教育、指导和监督检查等工作。
3. 制定、修订本医院辐射安全防护管理制度及仪器设备操作规程。
4. 制定、修订辐射事故应急预案，配备相应的事故处理物资仪器、工具，一旦发生辐射意外事故或情况，在辐射安全防护组组长的指挥下负责事故现场的应急处理工作。
5. 负责办理辐射安全许可证的申请、登记、换证及年审等工作。
6. 建立射线装置档案，组织医院有关部门和人员对使用的射线装置及剂量监测仪器进行检查和维护保养，保证正常使用。
7. 对医院从事辐射工作的人员进行条件和岗位能力的考核，组织参加专业体检、培训并取得相应资格证。
8. 组织实施对从事辐射工作人员的剂量监测，做好个人剂量计定期检测工作，对数据进行汇总、登记、分析等工作。做好医院年度评估报告工作，认真总结、持续改进并上报有关部门。

12.1.2 辐射工作人员

本项目实施后核医学科拟增加辐射工作人员 20 人，同样也将参加辐射防护与安全知识培训后方可上岗。单位将定期组织辐射工作人员每 4 年一次的复

训，复训合格后方可继续从事辐射工作，同时按照国家相关规定进行个人剂量监测和职业健康检查，建立个人剂量档案和职业健康监护档案，并为工作人员保存职业照射记录。

12.2 辐射安全管理规章制度

北京友谊医院制定了多项辐射安全管理制度，包括辐射防护和安全保卫制度、操作规程、设备检修维护制度、辐射工作人员培训制度、辐射工作人员个人剂量监测制度、工作场所和环境辐射水平监测方案、辐射工作岗位职责、台帐管理制度、放射性废物管理制度、辐射事故应急制度等，医院已制订的辐射防护管理制度进行补充修改完善后（如增加回旋操作规程、应急预案等）能够满足实际工作需要。

12.3 辐射监测

12.3.1 个人剂量监测

北京友谊医院根据制订了医院有关辐射工作人员个人剂量监测的管理要求，并将辐射工作人员个人剂量监测工作作为全院辐射监测计划体系的管理目标之一，要求全院辐射工作人员按要求接受个人剂量监测，并建立相应的个人剂量监测档案。

全院现有的辐射工作人员的个人剂量监测工作已委托北京市疾病预防控制中心承担，监测频度为每3个月检测一次。医院严格要求辐射工作人员按照规范佩戴个人剂量计，规定在个人剂量计佩戴时间届满一个监测周期时，由专人负责收集剂量计送检更换，确定好送检剂量计的时间为每年2、5、8、11月的前三个工作日，医院严格按照国家法规和相关标准进行个人剂量监测和相关的防护管理工作。

本项目投入使用后，所涉及辐射工作人员将继续进行个人剂量监测。

12.3.2 工作场所和辐射环境监测

北京友谊医院已制定工作场所监测方案，监测方案内容含有工作场所辐射水平监测和环境辐射水平监测，监测方案中包括实施部门、监测项目、点位及频次、监测部门等（自行检测频次和点位图见附件10-4）。

北京友谊医院已建立辐射环境自行监测记录档案，并妥善保存，接受生态环境行政主管部门的监督检查。监测记录记载监测数据、测量条件、测量方法

和仪器、测量时间和测量人员等信息，辐射工作单位的辐射环境自行监测记录，随本单位辐射安全和防护年度评估报告一并提交北京市生态环境局。医院现有的监测方案能够满足相关标准要求。

医院拟配置 3 台表面污染监测仪和 3 台剂量仪，能够满足医院辐射防护和环境保护的要求。对于已配备的和今后拟配置的防护监测设备，将定期送计量检定部门进行检定，保证仪器可靠的功能状态。辐射工作场所的检测点位及频次见表 12-1 和表 12-2。

表 12-1 核医学科辐射剂量率监测情况表

场 所	测点位置	检测频次
回旋加速器室 (测 γ 、 n)	工作人员通行门外 (关门)	1 次/年
	西、南、北墙外及楼上	1 次/年
热室	室中央	1 次/星期
	控制室	1 次/星期
	通风柜铅玻璃外	1 次/星期
高活室	门外 (关门)	1 次/年
用药后候诊室	门外 (关门)	1 次/年
病房	门外 (关门)	1 次/年
扫描室	门外 (关门)	1 次/年
源室	门外 (关门)	1 次/年
废物库	门外 (关门)	1 次/年
动物 PET 室	门外 (关门)	1 次/年
PET/CT 室	门外 (关门)	1 次/年
放化实验室	门外	1 次/年
放射性废物库	门外	1 次/年

表 12-2 核医学科表面污染检测情况表

场 所	测 点 位 置	监测频度
热室	通风柜铅玻璃外	1 次/星期
	桌面	1 次/星期
	地面	1 次/星期

动物 PET 室	实验床面	1 次/星期
	地面	1 次/星期
扫描室	扫描床面	1 次/星期
	地面	1 次/星期
	墙面	1 次/星期
用药后候诊室	地面	1 次/星期
	墙面	1 次/星期
	椅子	1 次/星期
高活室	通风柜铅玻璃外	1 次/星期
	桌面	1 次/星期
	地面	1 次/星期
注射室	台面	1 次/星期
	地面	1 次/星期
病房	床面	1 次/每个治疗疗程
	地面	1 次/每个治疗疗程
	卫生间	1 次/每个治疗疗程
放化实验室	桌面	1 次/每次实验
	地面	1 次/每次实验

12.4 辐射事故应急管理

北京友谊医院制定了《北京友谊医院辐射事故应急制度》，依据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，一旦发生辐射事故时，能迅速采取必要和有效的应急响应行动，妥善处理，保护工作人员和公众的健康与安全，同时在应急预案中进一步明确规定处理的组织机构及其职责分工、事故分级、应急措施、报告程序、联系方式等内容，能够满足医院实际辐射工作的需要。

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

表 13 结论与建议

13.1 结论

13.1.1 项目概况

北京友谊医院持有北京市生态环境局颁发的辐射安全许可证（京环辐证[D0019]），其种类和范围为：使用 V 类放射源，乙级、丙级非密封放射性工作场所，使用 II 类、III 类射线装置。

为缓解顺义区看病难的问题，提升新城承载力，加快中心城区功能疏解，北京友谊医院拟建立顺义院区。友谊医院核医学科为医院的优势学科，也是医学诊疗的重要组成部分，考虑到核医学科常规诊疗、科研和核医学未来的发展趋势，友谊医院拟在顺义院区建设核医学科诊疗项目，包括地下二层核医学科门诊和治疗场所，以及生产正电子核素的回旋加速器及相关 GMP 实验室、动物 PET 室等，均为乙级非密封放射性物质工作场所。

13.1.2 正当性分析

本项目通过回旋加速器制备正电子放射性同位素用于临床或科研，可提高核素的使用率，且满足了新型核医学药物科研的需求；使用 Tc-99m 和 I-131 等标记的放射性药物，开展核医学影像诊断和治疗，是核医学科成熟的、常用的医疗手段，其使用过程中获得的利益远大于辐射可能造成的损害；I-131 对甲状腺癌晚期不能手术的病人疗效显著，可改善其生存质量。本项目建成后，可以形成比较完善的核医学诊疗、科研基地，不仅可以满足顺义区患者日益增长的就诊需求，填补顺义地区优质医疗资源缺乏的空白，同时也为医院核医学技术的深入研究和提高提供了支持，有利于核医学科在临床应用方面积累更丰富的经验，促进核医学技术的发展，从而进一步提高顺义及周边地区的医疗水平，可以产生一定的社会效益和经济效益。故上述辐射工作场所的使用符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的要求。

13.1.3 选址与布局合理性分析

北京友谊医院顺义院区位于顺义区后沙峪镇，本项目核医学科相关场所位于医疗综合体（地下 3 层，地上 9 层）西南侧的地下二层和三层内，周围 50m 区域都是医院内部，项目场址环境辐射本底未见异常，选址充分考虑了周围

场所的防护与安全，以及患者就诊和临床应用的便利性，为相对独立的区域，对公众影响较小。因而从辐射环境保护方面论证，该项目选址是可行的。

本项目回旋加速器和 GMP 相关实验室位于地下三层，核医学科门诊和核素治疗病房位于地下二层，三个乙级非密封放射性物质工作场所均有明显的实体分隔，各场所工艺布局流畅，人流物流不交叉，设置了必要的卫生通过间，比较全面的考虑了放射性工作场所与非放射性工作场所分开，不同放射性操作或污染水平的工作场所分开，工作人员区域与病人区域分开，尽可能的避免了人员受辐射影响，平面布局合理。

13.1.4 辐射安全与防护能力分析

(1) 辐射工作场所功能分区合理性

本项目三个乙级非密封放射性物质工作场所分别划分控制区、监督区，划分明确，设置合理，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）要求。

(2) 辐射屏蔽措施

本项目回旋加速器机房混凝土屏蔽厚度高于厂家推荐值，合成分装热室和固体靶热室模块箱均采用正面 70mm、侧面 60mm 的铅屏蔽；核医学门诊 PET 检查室、SPECT 检查室、注射后候诊室、高活室、源库、废物间、负荷试验室、肺通气室，以及核素治疗病房、留观室、高活室等均采取了混凝土或铅的屏蔽措施，根据机房外各关注点剂量率估算结果均满足本次评价提出的剂量率控制水平，符合辐射防护安全的要求。

(3) 安全防护设施

本项目回旋加速器设置电离辐射警告标志、工作状态指示灯、急停开关、视频监控系统、门机联锁等安全设施，配备必要的辐射监测仪器、个人防护用品；核医学科门诊和病房场所门外设置电离辐射警示标识，墙面、地面均为光滑饰面，高活室配有负压和过滤的通风橱，通过设置废物间、病人专用卫生间等妥善收集放射性废物，工作人员配备必要的防护服等个人防护用品及监测设备，满足安全防护需求；核医学科回旋加速器机房、热室、病房及高活室等均设置了独立排风系统和活性炭过滤装置，设置了两个废水衰变池（容积 57.78m³、442m³）收集贮存核医学科门诊、回旋加速

器场所、核医学病房产生的放射性废水。通过与回旋加速器、放药生产、核医学科门诊和病房辐射安全防护设施与运行核查项目比较和分析，本项目配备的安全防护设施能够满足要求。与《关于修改〈放射性同位素与射线装置安全许可管理办法〉的决定》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的规定对照检查，满足要求。

13.1.5 辐射环境影响评价

(1) 根据场所周围关注点辐射剂量估算结果可知，本项目核医学科运行后，预计工作人员和公众的年受照剂量分别不大于4.0mSv和62.2 μ Sv，低于本项目设定的年剂量约束值5mSv/a和100 μ Sv要求，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中关于“剂量限值”的要求。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况，单位应该进行调查并报生态环境部门备案。

(2) 本项目涉及的III类射线装置，可以预计其运行后对医护人员以及周围公众的影响是十分轻微的。

(3) PET的刻度源属于V类放射源，可以预计其运行后对医护人员以及周围公众的影响是十分轻微的。

(4) 放射性“三废”排放。预计核医学科相关工作场所运行后，放射性废水经暂存衰变后能够符合排放限值要求；工作场所运行每年产生放射性固体废物约32kg(包含通风橱过滤器)。放射性沾染物品收集暂存衰变，符合清洁解控水平的废物按照医疗废物处置。将产生极少量的放射性废气从核医学科楼顶排出，排放大气环境中会进一步稀释，远低于到处空气浓度限值。

(5) 辐射安全防护管理：医院设有辐射安全与环境保护管理机构，负责全院的辐射安全管理和监督工作。医院将根据本次所申请项目种类制定健全的操作规程、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、辐射事故应急预案和设备检修维护制度等，以满足辐射安全管理的要求。

13.1.6 结论

综上所述，北京友谊医院顺义院区新建核医学科诊疗项目，相应的辐射安全防护措施基本可行，在落实项目实施方案和本报告表提出的污染防治措施及建议前提下，其运行对周围环境产生的辐射影响可控，符合环境保护的要求。故从辐射环境保护角度论证，本项目的运行是可行的。

13.2 承诺

(1) 项目批复许可后，启用前须办理相关辐射安全许可和回旋加速器、PET/CT、PET/MR 等大型设备须取得卫健委同意配置批复。

(2) 严格按照工程设计施工，保证工程建设质量。

(2) 项目批复许可后，随着工作量增加，医院相应增加工作人员。

(3) 项目竣工后按照生态环境主管部门规定的标准和程序，对配套建设的环境保护设施进行验收，编制验收报告，并接受生态环境主管部门的监督检查。

(4) 在辐射项目运行中决不容许违规操作和弄虚作假等现象发生，如若发现相关现象接受相关处理。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况，医院进行调查并报生态环境主管部门备案。

表 14 审 批

下一级环保部门预审意见:	
经办人	公 章 年 月 日
审批意见:	
经办人	公 章 年 月 日