

核技术利用建设项目

二期新建核医学科项目
环境影响报告表

北京清华长庚医院

2023年10月

环境保护部监制

核技术利用项目

二期新建核医学科项目 环境影响报告表

建设单位名称：北京清华长庚医院

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：北京市昌平区立汤路 168 号

邮政编码：102218

联系人：王成城

电子邮箱：wcca03723@btch.edu.cn

联系电话：13436705989

目 录

表 1	项目基本情况	1
表 2	放射源	25
表 3	非密封放射性物质	26
表 4	射线装置	28
表 5	废弃物（重点是放射性废弃物）	29
表 6	评价依据	30
表 7	保护目标与评价标准	33
表 8	环境质量和辐射现状	45
表 9	项目工程分析与源项	48
表 10	辐射安全与防护	82
表 11	环境影响分析.....	129
表 12	辐射安全管理	190
表 13	结论与建议	198
表 14	审 批	202

表 1 项目基本情况

建设项目名称		二期新建核医学科			
建设单位		北京清华长庚医院			
法人代表	姜胜耀	联系人	王成城	联系电话	13436705989
注册地址		北京市昌平区立汤路 168 号			
项目建设地点		北京市昌平区立汤路 168 号医院二期医疗楼地下一层和地下三层			
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（万元）	2000	投资比例（环保投资/总投资）	13.3%
项目性质		<input checked="" type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它		占地面积（m ² ）	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 checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> I类（医疗使用） <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input checked="" type="checkbox"/> V类		
	非密封放射性物质	<input checked="" type="checkbox"/> 生产	<input checked="" type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物		
		<input type="checkbox"/> 销售	/		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input checked="" type="checkbox"/> 乙 <input type="checkbox"/> 丙		
	射线装置	<input type="checkbox"/> 生产	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input type="checkbox"/> 销售	<input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类		
		<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类		
其他					
<p>1.1 单位概况</p> <p>北京清华长庚医院（简称“医院”）是由清华大学与北京市共建共管的大型综合性公立医院，建设和运营过程中得到了台塑企业和台湾长庚纪念医院的无私捐助和援建。医院座落于北京市昌平区天通苑地区，总规划床位 1500 床。于 2014 年 11 月 28 日开业，一期开设 1000 张床位。2015 年 11 月正式为医保患者服务；2017 年 6 月，实现异地医保直接结算；医院二期规划新增 500 张床位。</p> <p>北京清华长庚医院借鉴并在地化台湾长庚纪念医院管理模式，构建现代医院管理体制和运营模式，实行党委领导下的院长负责制，专业化医疗团队与职业化行政团队分工协同治理，提高医院管理的效率和效益。</p> <p>医院以优越的事业平台、舒心的工作环境和体面的薪酬待遇，从海内外引进</p>					

了一批优秀的专家，组成高水平医疗团队。首任院长董家鸿为国际著名肝胆胰外科和肝脏移植专家，于 2017 年当选中国工程院院士。医院实行 Attending 医师负责制、全责护理制和全人照护模式，并全面推行以疾病为导向的整合式医疗，持续优化医疗流程，为各类病患提供高效、优质、经济的诊疗服务，不断提升疾病治愈率和康复水准。

医院已经形成了涵盖内科部、外科部、妇儿部、专科部、急重症部、医技部、全科与健康医学部的 7 大医疗部和 50 余个临床医技专科，初步建成临床布局合理、专科设置完善、优秀人才汇聚、医院治理良善、医疗品质一流，在业界和社会享有美誉的综合性精品医院；形成了肝胆胰中心、神经中心、消化中心、急重症中心等优势突出的整合式医疗中心，涌现出心脏内科、妇产科、耳鼻咽喉头颈外科、泌尿外科、骨科、放射科、麻醉科等重点专科。医院开展国内外领先的医疗技术百余项，创下多项世界记录，以先进技术和优质服务成功救治了大批来自海内外的复杂危重病患，综合水平进入全国三级公立医院绩效考核前百位。2018 年 12 月，医院获批为首批国家临床教学培训示范中心。

北京清华长庚医院现有设备包括螺旋 CT、PET/CT、SPECT/CT、血管造影机、电子直线加速器、模拟定位系统等一批先进的放射诊断、治疗设备。

北京清华长庚医院为已取得《辐射安全许可证》单位。

1.2 核技术利用及辐射安全管理现状

1.2.1 核技术利用现状

北京清华长庚医院已取得了辐射安全许可证（京环辐证[O0116]，有效期至 2024 年 10 月 11 日，许可的种类和范围是：使用 V 类放射源，使用 II 类、III 类射线装置，乙级非密封放射性物质工作场所，北京清华长庚医院已许可射线装置使用情况见表 1-1。

表 1-1 北京清华长庚医院已许可的射线装置情况

序号	名称	类别（类）	数量（台）
1	计算机断层扫描仪（CT）	III	5
2	牙科 X 射线 CT	III	1
3	SPECT/CT	III	1
4	移动式 C 型臂 X 射线机	III	5

5	牙根尖 X 射线机	III	1
6	移动 X 射线机	III	5
7	数字乳房摄影 X 射线机	III	1
8	碎石机	III	1
9	医疗电子直线加速器	II	1
10	遥感摄影	III	1
11	血管造影机 (DSA)	II	3
12	骨密度检测仪	III	1
13	牙科全景 X 光机	III	1
14	数字常规检查射线 X 光机	III	4
15	数字胸部 X 射线机	III	1
16	移动式 G 型臂 X 射线机	III	1
17	PET/CT	III	1

北京清华长庚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 北京清华长庚医院已许可非密封放射性同位素使用情况

工作场所名称	等级 (类别)	核素名称	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	活动种类
核医学科	乙级	I-131	3.70E+08	3.70E+11	使用;
		Tc-99m	1.85E+07	3.70E+12	使用;
		I-131	3.330E+04	3.330E+08	使用;
		F-18	7.40E+06	1.48E+12	使用;
		Y-90	5.06E+08	7.20E+11	使用;
钇 90 介入治疗场所	乙级	Y-90	5.0E+08	6.00E+11	使用;
		Tc-99m	5.55E+05	8.66E+10	使用;

北京清华长庚医院已许可的放射源使用情况见表 1-3。

表 1-3 北京清华长庚医院已许可放射源使用情况

序号	核素	类别	活度 (Bq)	(枚数)
----	----	----	---------	------

1	Ge-68	V	5.5E+07	1
2	Ge-68	V	3.5E+06	1

1.2.2 近几年履行环保审批情况

北京清华长庚医院近五年以来一共有 3 个辐射环评报告表项目，具体落实情况见表 1-4。

表 1-4 建设项目竣工验收落实情况

序号	环评批复文号	项目名称	类别	竣工验收文号	备注
1	京环审 [2021]29 号	核医学科改造项目	报告表		于 2022 年 12 月办理竣工验收
2	京环审 [2022]89 号	Y-90 微球治疗项目	报告表		于 2023 年 2 月办理竣工验收

1.2.3 辐射安全管理情况

1.2.3.1 辐射管理机构基本情况

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，北京清华长庚医院专门成立了辐射安全管理委员会，由工会主席担任主席，医务管理部、核医学科、放射诊断科、总务处、心脏内科、血管外科、总务处、血管外科、心内科、神经外科等各部门的相关人员担任组员，并指定医务管理部李娜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 北京清华长庚医院辐射安全管理委员会成员名单

职位	姓名	职务或职称	专业	工作部门	专/兼职
主席	郑卓肇	工会主席（医技部部长）	影像医学与核医学	/	兼职
委员	林思勇	医务管理部部长	临床医学	医务管理部	兼职
委员	何作祥	核医学科科主任	临床医学	核医学科	兼职
委员	黎功	放射诊断科执行主任	肿瘤放射治疗学	放射诊断科	兼职
委员	余飞	心脏内科主任医师	心血管介入	心脏内科	兼职
委员	赵克强	血管外科副主任医师	胸心外科	血管外科	兼职

委员	苏伟	神经外科医师	外科学	神经外科	兼职
委员	张跃伟	肝胆胰介入科主任	影像医学与核医学	肝胆介入科	兼职
委员	张琳	肝胆胰介入科副主任医师	外科学	肝胆介入科	兼职
委员	张小峰	神经内科主治医师	神经病学	神经内科	兼职
委员	唐红卫	消化内科主任医师	内科学（消化疾病）	消化内科	兼职
委员	赵喆	骨科副主任医师	临床医学	骨科	兼职
委员	李冬蓉	护理部督导	护理学	护理部	兼职
委员	张杰	基础运行部部长	工商管理	基础运行部	兼职
委员	闫伟娜	总务处副处长	护理学	总务处	兼职
委员	李树勋	工务处副处长	项目管理	工务处	兼职
委员	段鹏	保卫科科长	建筑环境与设备工程	保卫科	兼职
专管员	刘国庆	放射诊断科技师	医学影像技术	放射诊断科	兼职
专管员	王兴	放射治疗科技师	医学影像技术	放射治疗科	兼职
专管员	翟彦龙	心脏内科技师	医学影像	心脏内科	兼职
专管员	梁斌	介入技师	生物医学工程	放射诊断科	兼职
秘书	李娜	助理主办	会计学	医务管理部	专职

1.2.3.2 制定规章制度及落实情况

北京清华长庚医院结合医院实际情况，已制定一套相对完善的管理制度和操作规程，包括辐射防护领导小组及岗位职责、放射性同位素与射线装置操作规程、辐射工作人员培训考核计划、辐射工作场所安全和防护管理制度、设备检修维护制度、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、台帐管理制度、放射性废物管理制度、辐射安全事故应急预案等，并严格按照规章制度执行。

1.2.3.3 工作人员考核情况

北京清华长庚医院制定了辐射工作人员培训考核计划。目前，医院从事辐射

相关工作人员共约 150 人分批参加了辐射安全和防护培训，并通过了考核。

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

1.2.3.4 个人剂量监测

北京清华长庚医院所有从事辐射工作的医护人员均佩戴 TLD 个人剂量计，每季度 1 次监测一次，按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（原环境保护部令 18 号）要求建立个人剂量档案，并于每年 5 月 31 日前将上一年度全体辐射工作人员的个人剂量监测数据上报至北京市辐射安全监管系统中。

目前，个人剂量监测工作已委托中国医学科学院放射医学研究所承担，监测频度为每 3 个月检测一次。

开展个人剂量检测的人员，部分进修人员、新增辐射工作人员的工作时间较短，出现了不到四个季度的个人剂量检测结果的情况。

医院有专人负责个人剂量监测管理工作。发现个人剂量监测结果异常的，将及时调查原因，并将有关情况及时报告医院辐射防护领导小组。今后将继续加强个人受照剂量监测工作，如果某位辐射工作人员的单季度个人剂量监测结果高于年剂量约束值的 1/4，将对其受照原因进行调查，结果由本人签字后存档；必要时将采取调离工作岗位或控制从事辐射工作时间等措施，保障辐射工作人员的健康。

1.2.3.5 工作场所及辐射环境监测

已制定辐射工作场所监测制度和自行监测记录档案，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、点位及频次等，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，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辐射安全监管系统。

工作场所辐射水平监测：医院每年委托有 CMA 资质的单位对医院已有的辐射场所防护和机器性能检测一次（包含现有核医学科工作场所），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，检测报告齐全，检测结果均满足相关标准要求。

表面污染监测：每天工作结束后，对非密封放射性同位素工作场所的工作台面、手套箱台面、注射台以及设备等进行表面污染监测，监测数据记录存档。工作人员离开可能受到放射性污染的工作场所时，监测其工作服、体表的表面污染水平。根据《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》要求，该项工作由使用科室工作人员自行完成。

医院现有的监测方案基本能够满足现有场所使用要求，医院已配备的辐射监测仪器，详细清单见表 1-6。

表 1-6 医院现有辐射防护监测仪器清单

序号	仪器名称	型号	购置日期	仪器状态	数量	备注
1	个人剂量仪	贝谷/BS2010	2014-07-11	正常	5	放射治疗科
2	多通道辐射剂量监测系统	大建华克/HK-2108	2014-12-20	正常	1	核医科
3	表面沾污仪	Mirion/RDS-80	2014-12-20	正常	1	核医科
4	电离室巡测仪	Fluck/451p	2015-04-15	正常	1	放射科
5	巡测仪	上海贝谷/BS9511	2014-07-11	正常	1	放射治疗科
6	个人剂量仪	RADOS/RAD-60	2014-12-20	正常	3	核医科
7	x/γ 射线报警仪	中康联/SB-I（智能）型	2015-10-09	正常	1	放射治疗科
8	表面污染仪	IA-V2	2022-03-01	正常	1	核医科
9	辐射巡测仪	R-EGD	2022-04-01	正常	3	核医科
10	个人剂量报警仪	RG1000	2022-04-01	正常	3	核医科
11	辐射巡测仪	BG9521	2022-07-10	正常	1	钇 90 介入治疗室
12	表面污染仪	BG9611	2022-07-10	正常	1	钇 90 介入治疗室

本项目运行后，周围场所的辐射水平监测工作，将继续纳入医院辐射工作场所的监测范围，一并按照现有制度规定的频度开展。

1.2.3.6 辐射事故应急管理

北京清华长庚医院依据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，制定了关于本单位辐射项目的辐射事故（件）应急预案，以保证本单位一旦发生辐射意外事件时，能迅速采

取必要和有效的应急响应行动，妥善处理放射事故，保护工作人员和公众的健康与安全，同时在预案中进一步明确规定本单位有关意外放射事件处理的组织机构及其职责、事故报告、信息发布和应急处理程序等内容。发生放射事故时，事故单位应当立即启动本单位的放射事故应急预案，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《放射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康部门报告。

医院已获得许可使用II类、III类射线装置，乙级非密封放射性物质工作场所。医院已针对上述许可使用中可能发生的放射性污染以及大剂量照射等事故/事件，制定了每年一次的演练计划。为规划和加强放射突发事件应急处理能力，同时最大程度地降低放射事件可能造成的后果，保障辐射工作人员及患者的生命安全，其中 2023 年度于 2023 年 5 月 25 日下午 14 时 30 分，医院保卫处联合医务管理部、核医学科等相关科室人员在门诊楼 B1F 核医学科走廊进行辐射安全事故应急演练。本次演练由医务管理部、保卫处、核医学科、警务工作室联合策划，以核医学科技师运送钷-90 药物途中遭不明身份人员抢夺事件为背景开展。演练采取“实景设置、实兵展开、实际操作”的方法进行。参与演练人员较好地履行各自的职责，并根据事前商定的核医学放射安全事故应急处置流程有序的完成了既定任务，达到了演练的预期效果。

1.2.3.7 放射性废物的管理情况

目前，北京清华长庚医院核医学科和钷 90 介入治疗场所只使用 F-18、Tc-99m 和 Y-90 三种核素。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》要求，对放射性废物进行管理：将放射性固体废物分类收集于专用的废物桶内，在废物衰变间内暂存。含 F-18、Tc-99m 和 Y-90 的放射性废物暂存 30 天，剩余 Y-90 放射性同位素储存 60 天后，使用经检定合格的检测仪器对废物表面污染和辐射剂量率水平进行监测，辐射剂量率低于 200nSv/h 且 β 表面污染水平小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，将废物解控作为医疗废物处置，并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”。

北京清华长庚医院核医学科现有衰变池为槽式衰变池，总体积为 200m^3 ，设有 2 级池，每级 100m^3 。衰变池废水按照 HJ1188-2021 和《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》要求至少衰变 180 天后排放，衰变池的废水在排放前委托有资质单位进行检测，符合要求后排入医院污水

处理站，并详细记录“放射性液体废物暂存、处置管理台账。

1.2.3.8 其他情况

北京清华长庚医院较圆满地完成了各项辐射安全防护工作，依据法律法规每年对本单位同位素和射线装置的安全和防护状况进行了年度评估，目前已编写上报了 2022 年度评估报告。

1.3 本项目概况

1.3.1 二期医疗楼建设项目背景

国务院批复的《北京城市总体规划（2016 年-2035 年）》（以下简称“《北京城市总规》”）提出昌平区功能定位为首都西北部重点生态保育及区域生态治理协作区；具有全球影响力的全国科技创新中心重要组成部分和国际一流的科教新区；特色历史文化旅游和生态休闲区；城乡综合治理和协调发展的先行示范区。北京清华长庚医院位于昌平区天通苑地区，已逐步成为京北地区急重症救治中心，医院未来将重点提升卒中、胸痛、创伤与孕产妇救治能力，打造“京北区域医疗中心”。医院未来将进一步提升医院整体医疗服务效能，重点打造具有学术与医疗技术持续创新引领力的肝胆胰中心、器官移植中心、神经中心、消化中心、肿瘤中心等优势学科，辐射全国患者。天通苑地区人口稠密，优质医疗资源匮乏，区域健康医疗体系还不完善，与《北京城市总规》相关要求还有一定的差距，亟需进一步提升区域医疗卫生服务水平，使人民群众获得更高水平的医疗卫生服务。

在医院成立运行九年的时间里，已经初步建成了京北肝胆胰中心，建立了肝胆专科治疗联盟，在器官移植方面，医院也计划在董家鸿院士的领导下稳步推进，建立国内领先的移植中心。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，但医院发展受一期条件制约，矛盾凸显，急需寻求新的诊疗空间。本项目拟在昌平区原址扩建北京清华长庚医院，新增编制床位 500 张，完善医院学科建设和用房功能，扩大昌平区优质医疗资源，促进现有资源发展升级，使全区医疗资源总量有较高质量的增加，有效填补昌平区目前医疗资源缺口，提高全区整体医疗服务能力和技术水平；不仅可以健全昌平区的基本医疗服务体系，同时作为优质医疗资源，又可通过医疗联合体、技术支持、业务指导等模式发挥带动和辐射作用，全面提升京北地区的医疗服务能力和技术水平，为京北地区提供可靠的医疗保障。

本项目位于北京清华长庚医院院区内，已取得原北京市规划委员会《建设用地规划许可证》（2010 规地字 0065 号）和原北京市规划委员会《建设工程规划许可证》（2010 规（昌）建字 0064 号）。医院于 2021 年 1 月取得了昌平区生态环境局《关于北京清华长庚医院二期建设项目环境影响报告书的批复》（昌环审字[2021]0011 号）等审批文件。

二期于 2020 年 5 月 12 日正式开工，2022 年初已实现结构封顶，计划 2023 年年底实现外立面装修封闭，2024 年年底计划实现工程整体竣工验收。

北京清华长庚医院现有 1 号楼地下一层的核医学科和放射治疗科场所布局和面积限制，场所无法满足拟增设备安装要求，考虑到医院诊疗发展需要，二期建设中专门预留设计核医学科，放射治疗科加速器场所和放射科等辐射场所。待本项目核医学科启用同时停用现有核医学科场所，然后现 1 号楼地下一层的核医学科等相关场所办理退役相关手续。

1.3.2 项目建设正当性

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，本项目的建设将使医院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，从而进一步提高医疗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。

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，二期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等。

该项目使用的 Tc-99m、I-123 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 对于恶性肿瘤骨转移患者治疗也是成熟的技术手段；Ra-223 用于治疗去势抵抗性前列腺癌，并伴有骨转移症状和未知原因内脏转移性疾病的病人，且取得药品注册证书。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 本项目产业政策符合性

本项目药物制备场所属于《产业结构调整指导目录（2019 年本，2021 年修订）》中鼓励类第六项“核能”中第 6 条“同位素、加速器及辐照应用技术开发”类项目。本项目 PET/CT、PET/MR 和 SPECT 等属于鼓励类第十三项第 5 条中“数字化医学影像设备”项目。

本项目不属于《北京市新增产业的禁止和限制目录（2022 年版）》中禁止和限制项目。因此，本项目的建设符合国家及地方产业政策要求。

1.3.4 项目基本情况

二期医疗楼东南侧地下一层规划有为核素显像、核素治疗区域，加速器放射治疗区域，核医学科东侧拟规划了放射性同位素实验区域和 Y-90 项目 DSA 相关场所；地下三层为生产正电子核素的回旋加速器相关区域；及二期还涉及放射科 CT、DR 等Ⅲ类射线装置，这些内容另外单独报批和办理备案。

为了使环评报告的内容清晰明了，避免交叉凌乱，本项目对核医学科、医用直线加速器、放射性同位素实验区域和 Y-90 项目分别编制环境影响报告表进行报批。由于上述建设内容均为编制“环境影响报告表”类别的建设项目，所以不存在建设项目拆分问题。放射科使用的Ⅲ类射线装置拟在确定设备具体厂家和型号后单独进行备案。

本项目只涉及的核医学科临床部分内容，位于二期医疗楼地下一层、三层东南角。

(1) 地下三层东南侧新建核医学科药物制备和质控场所，拟使用 1 台 IBA 生产的 Cyclone KIUBE 型 18MeV 回旋加速器(属II类射线装置)制备 PET 用 F-18、C-11、N-13 核素药物和放射质控场所。

(2) 地下一层东南侧，新建核医学科诊疗场所（包括诊断和治疗区域），其中东部为诊断区域，配套使用 1 台 PET/MR、1 台 PET/CT 和 2 台 SPECT/CT 机，使用 Tc-99m、I-123、I-131 核素药物开展 SPECT 诊断，使用 F-18、C-11、N-13 核素药物开展 PET 诊断，使用 I-131 开展甲状腺功能检查；西部为治疗区域，使用 I-131 核素药物开展核医学住院治疗和使用 I-131、Ra-223 和 Sr-89 核素药物开展核医学门诊治疗。待该场所启用后，现已许可的 1 号楼地下一层核医学科及相关场所将办理退役相关手续。

本项目涉及的III类射线装置（2 台 SPECT/CT 和 1 台 PET/CT）及配套的校准源，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，根据相关环保法律法规要求，III类射线装置和 V 类放射源对环境的影响很小，本项目也进行简要的分析。

根据《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函〔2016〕430 号）相关规定：对于放射性药品生产、使用场所，如果有相对独立、明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，且有相对独立的辐射防护措施，应当作为一个单独场所进行日等效操作量核算。本项目核医学科涉及的三个场所：核医学科显像场所、治疗场所、药物制备场所（含质控），均满足上述条件，即场所相对独立，有明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，且有相对独立的辐射防护措施，故按照三个工作场所分别核定等级。

1.3.5 本项目核素使用量

核医学科启用后将开展一系列核医学检查和治疗项目，其中核医学显像区域核素使用情况预计如下：

(1) F-18 不大于 370MBq/人，每个检查日 PET 检查 30 人次，每周工作 5 天，年最大用量每人按平均量 296MBq/人进行核算；

(2) N-13、C-11 约 370MBq/人，每个检查日 PET 检查 2 人次，每周工作 1 天；

(3) Tc-99m 不大于 925MBq/人，每个检查日最多检查 40 人次（不含每周 2 例肺通气患者），每周工作 5 天，年最大用量每人按平均用量 740MBq/人进行

核算；核医学科肺通气检查每周约 2 例病人，每个病人操作量不大于 740MBq；

(4) I-123 约 370MBq/人，每日最多 SPECT 检查 5 人次，每年最多工作 50 天；

(5) I-131 显像检查口服用量约 185MBq/人（胶囊），每个检查日最多实施检查 5 人次，每年工作 100 天；还有甲癌治疗后 SPECT 显像（该环节不需要再注射 I-131）；

(6) I-131 甲状腺摄碘功能测定，每人每粒胶囊约 0.333MBq（9 μ Ci），每人每次一粒，每粒胶囊约 0.333MBq（9 μ Ci），每日最多实施 5 人次，每年最多工作 100 天。

核医学治疗区域使用治疗核素如下：

(1) 用于甲亢的 I-131 使用量最多为 5 名病人/天，每年工作 100 天，每周集中 2 天给药，每人口服活度不大于 370MBq（胶囊）；

(2) Sr-89 使用量最多为 2 名病人/天，每周 1 天，148MBq/人；

(3) 用于治疗前列腺癌骨转移的 Ra-223 使用量最多为 2 名病人/天，每周 1 天，其中每例每次最大注射量为 6.6MBq（0.178mCi）；

(4) 甲癌病房共设 8 间病房，本项目计划每 5 天统一安排一批甲癌患者入院治疗，全年最多安排 70 批次，按照全年治疗 560 人，用量按每人平均用量 4.44GBq/病人进行核算。

回旋加速器的生产量按照实际使用量及考虑衰变量后合理生产同位素。对于药物制备场所，依据核医学科各场所（诊断场所和质控）的实际使用量，其中 F-18 质控每天最多两次，其它两种核素每天一次，并考虑核素衰减和合成效率，将 F-18、C-11、N-13 生产量提高倍数（每种核素的倍数见表 1-11），确定其制备量。

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 回旋加速器热室设备间各种核素计划使用情况

使用场所	核素名称	日最大操作量 (Bq)	年最大使用天数 (天)	年最大用量 (Bq)	用途
正电子核素制备区	F-18	5.55E+10	250	1.39E+13	制备
	C-11	1.4E+10	50	7.00E+11	制备
	N-13	3.7E+10	50	1.85E+12	制备

放射药 物质控 室	F-18	1.48E+7	250	3.70E+9	质控
	C-11	7.4E+6	50	3.70E+8	质控
	N-13	7.4E+6	50	3.70E+8	质控
备注：每天最多生产制备两种核素					

表 1-9 核医学科诊断区和治疗拟使用的核技术情况

一 拟使用的射线装置情况							
序号	设备名称	台数	厂家及型号	技术参数	射线装置类别	使用场所	
1	PET/CT	1	Discovery MI	140kV/600mA	III	PET/CT室	
2	SPECT/CT	2	待定	140kV/440mA	III	SPECT室1~2	
二 拟使用的刻度源情况							
序号	刻度源使用情况					备注	
1	拟计划配 2 枚 Ge-68V 类源：1 枚 5.5E+7Bq（桶源），1 枚 3.5E+6Bq（模体源）					PET/CT	
2	拟计划配 1 枚 Ge-68V 类源（活度不大于 9.25E+7Bq）					PET/MR	
三 拟使用的核素情况							
使用场所	核素种类	患者最大使用量 (Bq)	预计每日最多诊疗人数	年最大使用天数 (天)	日最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	用途
核医 学科 诊断 区	F-18	3.7E+8	30	250	1.11E+10	2.22E+12	PET 诊断
	C-11	3.7E+8	2	50	7.40E+08	3.70E+10	
	N-13	3.7E+8	2	50	7.40E+08	3.70E+10	
	Tc-99m	9.25E+8	40	250	3.70E+10	7.40E+12	SPECT 诊断
	Tc-99m 锝气	7.40E+8	2	50	1.48E+09	7.40E+10	
	I-123	3.7E+8	5	100	1.85E+09	9.25E+10	
	I-131	1.85E+8	5	100	9.25E+08	9.25E+10	
	I-131	/	5	100	/	/	
I-131	3.33E+5	10	100	1.67E+06	1.67E+08	甲功检查	

核医学科 治疗区	I-131 (甲癌)	4.44E+9	8	560 人/年	3.55E+10	2.49E+12	治疗
	I-131 (甲亢)	3.7E+8	5	100	1.85E+09	1.85E+11	
	Sr-89	1.48E+8	2	50	2.96E+08	1.48E+10	
	Ra-223	6.60E+6	2	50	1.32E+07	6.66E+08	

备注：核医学科诊断区 F-18、Tc-99m 年最大用量分别是按平均用量 296MBq/人、740MBq/人进行核算；核医学科治疗区 I-131 年最大用量是按平均用量 4.44GBq/病人进行核算。

1.3.6 核素使用量及场所分级

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

依照上述通知精神，对本项目涉及核素的操作方式确定如下：

1) 本项目使用 F-18 为“很简单操作”，使用 N-13、C-11 正电子核素为“简单操作”。

2) 本项目使用液体 Tc-99m 为“很简单操作”，操作修正因子为 10。肺通气检查使用 Tc-99m 气溶胶，操作修正因子取 0.1。

3) 参照〔2016〕430 号中 I-131 的操作方式，将 I-123 的相关活动也视为“简单操作”。

4) 本项目治疗除使用 I-131 外，还使用 Ra-223、Sr-89 放射性药物。参照 I-131，将其它核素的治疗也视为“简单操作”。

5) N-13 衰变的 γ 射线能量与 F-18 相同，且半衰期较 F-18 短，类比确定 N-13 的毒性分组为低毒核素。

6) 毒性组别修正因子和状态与操作方式修正因子根据 GB18871-2002 相关规定给出。

核算后的各种核素的日等效最大操作量如表 1-10 所示，都小于非密封放射性物质工作场所的上限（乙级上限 4×10^9 Bq、丙级上限 2×10^7 Bq）。

表 1-10 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
回旋加速器热室设备间	F-18	5.55E+10	0.01	简单操作 (液体, 1)	5.55E+08	乙级 (日等效最大操作量为 1.48E+9Bq, 每天最多生产制备两种核素)
	C-11	1.4E+10	0.01	简单操作 (液体, 1)	1.40E+08	
	N-13	3.7E+10	0.01	简单操作 (液体, 1)	3.70E+08	
核医学科诊断区	F-18	1.11E+10	0.01	很简单操作 (液体, 10)	1.11E+07	乙级 (日等效最大操作量为 2.41E+8Bq, 保守假设全部在一天内使用)
		2.22E+10	0.01	贮存 (液体, 100)	2.22E+06	
	C-11	7.40E+08	0.01	简单操作 (液体, 1)	7.40E+06	
	N-13	7.40E+08	0.01	简单操作 (液体, 1)	7.40E+06	
	Tc-99m	3.70E+10	0.01	很简单操作 (液体, 10)	3.70E+07	
	Tc-99m	1.48E+09	0.01	很简单操作 (气体, 0.1)	1.48E+08	
	I-123	1.85E+09	0.01	简单操作 (液体, 1)	1.85E+07	
	I-131	9.25E+08	0.1	简单操作 (胶囊, 10)	9.25E+06	
	I-131	1.67E+06	0.1	简单操作 (胶囊, 10)	1.67E+04	
核医学科治疗区	I-131 (甲癌)	3.55E+10	0.1	简单操作 (液体, 1)	3.55E+09	乙级 (日等效最大操作量为 3.73E+9Bq, 保守假设全部在一天内使用)
	I-131 (甲亢)	1.85E+09	0.1	简单操作 (胶囊, 10)	1.85E+07	
	Sr-89	2.96E+08	0.1	简单操作 (液体, 1)	2.96E+07	
	Ra-223	1.32E+07	10	简单操作 (液体, 1)	1.32E+08	

备注：核医学科诊断区使用F-18按最大使用量的2倍考虑衰减；C-11、N-13等短半期核素由于每个患者单独转运，日等效最大操作量不考虑衰减量的影响。

1.3.7回旋加速器核素生产合理性说明

对于药物制备场所，依据核医学科场所的实际使用量，并考虑核素衰减、合成效率及将来 PET 检查量得增加，回旋加速器生产量按照大于目前申请量申请，将 F-18、C-11、N-13 生产量提高 6-50 倍，确定其制备量，计算依据见表 1-11。

表 1-11 回旋加速器药物制备场所使用规划

序号	核素名称	回旋年最大用量 (Bq)	诊断区年最大用量 (Bq)	用途	计算依据和说明
----	------	--------------	---------------	----	---------

1	F-18	1.39E+13	2.22E+12	临床/ 科研 制备	当检查患者较多时，每天上、下午各开机一次更为经济。临床使用的药物为 FDG，属于常规药物，合成率较高（约 60%）；F-18 新药合成率一般较低（约 20%），F-18 的制备量按实际使用量的 6.5 倍左右考虑。
2	C-11	7.00E+11	3.70E+10	临床/ 科研 制备	每天最多生产 1 次，满足每天 2 人使用量（含质控），综合考虑核素衰变和药物合成率（约 50%），制备量按实际使用量的 20 倍左右考虑。
3	N-13	1.85E+12	3.70E+10	临床/ 科研 制备	每天最多生产 1 次，满足每天 2 人使用量（含科研），综合考虑核素衰变和药物合成率（约 50%），制备量按实际使用量的 50 倍左右考虑。

1.3.8核医学科建设规划

（1）整体部署

新建医教研一体的核医学科，包括诊疗、制药、科研场所（科研场所另外单独申报），为患者提供常规、特色、优质的核医学诊疗服务。药物制备主要为回旋加速器生产的正电子核素标记药物（在加速器运行前或故障时则购买市售正电子药品），开展相关的药物基础与临床转化应用试验工作，同时保障医、技、护、工程等人员有基本的工作、学习场所。

核医学科诊断区利用 SPECT 和 PET（含 PET/CT 和 PET/MR）开展相关核医学诊断，并开展门诊核医学治疗工作。治疗区病房专门开展甲癌患者 I-131 住院治疗工作。

（2）设备配置：配备 1 台回旋加速器（药物制备）；2 台 SPECT/CT、1 台 PET/CT 和 1 台 PET/MR,其中 1 台 SPECT/CT 和 1 台 PET/CT 计划搬迁现有核医学科设备。

（3）实施计划：拟安装 IBA 生产的 Cyclone KIUBE 型 18MeV 的回旋加速器；PET/MR 须申请《大型医用设备配置许可证》，医院在获得配置许可后再行购置。

上述设备计划拟在二期开业 5 年内全部落实到位，故本项目按照核医学科的最大运行负荷一次性进行环境影响评价，后续的竣工环保验收工作拟分二次开展。第二批拟配置的 PET/MR 和 SPECT/CT 机房先空置，待购置后直接安装并办理相关手续后投入使用。

（4）辐射工作人员配备

参照《放射诊疗管理规定》、2019年《北京市卫生健康委员会关于印发乙类大型医用设备配置准入标准的通知》和《甲类大型医用设备配置准入标准》的要求，北京清华长庚医院制定了本项目核医学科的辐射工作人员配置计划，详见表1-12所示。

表 1-12 核医学工作人员要求及配置计划

序号	源项	相关要求	本项目人员配置计划
1	1台PET/CT（搬迁）	单台PET/CT或PET设备至少具有医师2名、技师2名、物理师1名、护士1名。	医师2名、技师2名、物理师1名、护士1名（现有人员）
2	1台PET/MR	单台PET/MR设备至少技师不少于3名，化学师、物理人员不少于2名，其中高级职称的物理人员不少于1名，医师不少于5名（可以与PET医师共用）。	医师3名、技师3名、化学师1名、物理师1名
3	医用回旋加速器	配置医用回旋加速器生产正电子核素，还应配备化学师至少1名	技师2名、化学师1名
4	2台SPECT/CT（其中1台搬迁）	/	医师4名、技师2名、护士1名（现有人员）
5	核医学科治疗区	/	医师2名、护士2名
本项目全部场所投入运行后			最终配置医师12名、技师9名、物理师2名、化学师2名、护士4名，共计29名。

待本项目核医学科启用时，现有核医学科办理退役相关手续，不存在同时使用情况。核医学科现有辐射工作人员14人（医师7人，技师4人，物理师1人，护士2人），本项目都启用后，核医学科需要新增15人（拟增医师5人，技师5人，物理师1人，护士2人，化学师2名），能满足核医学科人员的要求，核医学科工作人员和分工情况如下表1-13所示。

表 1-13 新建核医学科辐射工作人员分工情况

类别	数量	拟从事具体工作
医师	12	PET/CT检查对象的筛选和确认，PET/CT和SPECT/CT诊断报告编写，核素治疗计划制定、和运动负荷试验和住院患者查房等。
技师	9	回旋加速器、热室设备间操作，动物PET/CT实验操作，门诊PET/CT和SPECT/CT设备操作、受检者摆位。
护士	4	放射性药物交接、药物分装，门诊和住院患者药物施用，放射性废物管理、表面污染监测等，护士在门诊和病房轮转。
物理师	2	设备的质量保证和质量控制、以及辐射安全与防护管理。
化学师	2	负责PET和SPECT药物的分析、质控与药理分析等。

核医学科的辐射工作人员拟随着设备配置以及诊疗工作的展开逐步配置。具体计划下：

1.核医学科诊断区最先配置1台SPECT/CT时，将配置医师2名、技师1名和护士1名。2名医师负责诊断报告和运动负荷试验等，1名技师负责操作1台SPECT设备，1名护士负责药物注射、药物管理和放射性废物管理、预约登记等，根据以往核医学科的工作经验，上述人员数量能够满足实际工作需要。

2. 诊断区新增配置另外1台SPECT/CT时，将增配医师2名，技师1名。届时4名医生负责诊断报告和运动负荷试验等，2名技师负责操作2台SPECT/CT设备，1名护士负责药物注射，医师、技师和护士的数量也可以满足工作需要。

3.治疗区投入运行时，将增配医师2名、护士2名。医生负责碘病房患者给药和查房等，护士（含核医学科其它不值班的护士）负责病房值班，可以满足病房运行基本要求。

4.诊断区配置1台PET/CT时，增配医师2名、技师2名和物理师1名、护士1名，人员数量满足北京市卫生健康委员会发布的《乙类大型医用设备配置准入标准》。2名技师负责操作设备进行PET扫描，1名物理师负责设备的质量保证和质量控制，护士负责药物注射，人员数量也可以满足工作基本需要。

5.诊断区配置1台PET/MR时，再增配医师3名、技师2名和化学师1名，人员数量满足国家卫生健康委员会发布的《甲类大型医用设备配置准入标准》。同样，医护人员数量能满足工作基本需要。

6.药物制备场所配置回旋加速器时，增配技师2名，1名化学师，3人负责药物制备工作，能够满足工作要求。

（5）辐射监测仪器配备情况

本项目实施后核医学科拟配备3台辐射剂量巡测仪（新增1台）、3台表面污染监测仪（新增2台）、2台个人剂量报警仪（新增2台）、2套固定式剂量报警仪（新增2套），具体如表1-14所示，能够满足核医学科常规的监测需求。

表1-14 各工作场所拟配备的监测仪器一览表

序号	场所	监测设备
1	核医学门诊	1 台便携式辐射剂量巡测仪 1 台表面污染监测仪
2	核医学病房	1 台便携式辐射剂量巡测仪

		1 台表面污染监测仪 1 套多探头固定式剂量报警仪
3	正电子核素制备区	1 台便携式辐射剂量巡测仪 1 台表面污染监测仪 2 台个人剂量报警仪 1 套多探头固定式剂量报警仪

1.3.9 放射源购置和退役

PET/CT 和 PET/MR 使用的 Ge-68 放射源，将委托具有放射源销售资质的专业公司代为购买，医院不直接向厂家购买放射源。

放射源运输由放射源销售公司直接委托具有放射源运输资质的公司承担。放射源运输至医院并书面交接后，医院开始承担放射源安全责任。

医院将及时办理放射源转让备案手续，并承担辐射安全和防护责任。退役的 V 类放射源不在医院暂存，将及时送交北京市城市放射性废物库。

1.3.10 目的和任务的由来

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

根据生态环境部《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》（2019 年生态环境部令第 9 号）最新要求，北京辐环科技有限公司符合第九条第一款规定，无该条第三款所列情形，不属于该条第二款所列单位。公司有专职环评工程师，有能力开展环境影响评价工作。受北京清华长庚医院的委托，评价机构环评人员在现场踏勘、收集资料的基础上，对该项目建设和运行对环境的辐射影响进行了分析评价，并编制了环境影响报告表。评价重点是核医学场所运行过程中产生的 X、 γ 射线、中子，放射性“三废”对操作人员、周围公众和环境的影响。

1.3.11 项目选址与周围环境

二期建设工程位于北京清华长庚医院院区南侧预留区域内，根据原北京市规划委员会《建设用地规划许可证》（2010 规地字 0065 号），医院总用地面积 94854.504 平方米，其中建设用地面积 82637.214 平方米。四至范围：东至立水桥北路，南至太平庄中一街，西至立汤路，北至太平庄中二街。本项目位于北京清华长庚医院东南侧。医院周边关系图见图 1-1。

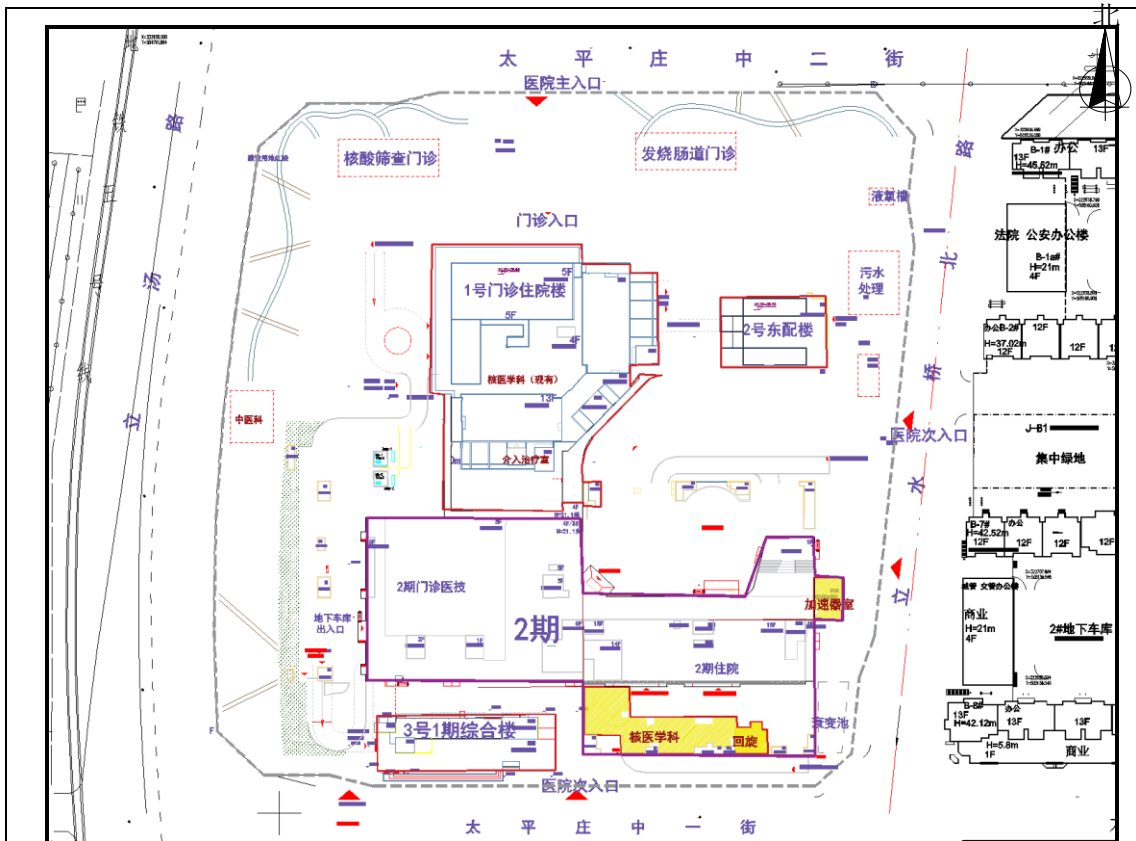


图1-1 本项目位置及周围环境

1.3.12 本项目辐射场所的布局

本项目核医学科相关场所位于 2 期医疗楼东南侧的地下一层和地下三层内（该区域只有地下 3 层建筑物，无地面诊疗建筑物），正电子核素制备区和放化质控室位于地下三层，其东侧为送风、排风井等，南侧为土层，西侧为送风、排风机房，北侧为停车位，楼上为停车位和汽车通道；地下一层核医学科诊疗区域设置 SPECT/CT2 台、PET/CT 和 PET/MR 各 1 台及 8 床核医学治疗病房和门诊治疗，该区域东侧为预留的放射性同位素实验区域，南侧为汽车坡道，西侧为地下土层，北侧为核医学科办公场所，隔公共走廊外为放射科和放射治疗科，楼上为院内路面，楼下为停车库。

地下一层核医学科的布局（核医学科诊断区和治疗区）：地下一层核医学科分为东侧核医学科诊断区、西侧核医学科治疗区和北侧的办公区。其中核医学科诊断区设注射前等候室、注射室、抢救兼运动室、肺通气兼甲功室、高活室、储源库、PET/CT 室、PET/MR 室、2 间 SPECT/CT 室、控制室、4 间高能候诊室、1 间低能候诊室、废物间、患者通道、抢救室、留观室等；西侧核医学科治疗区设有高活室、给药窗口、8 间病房、放射性废物库、抢救室、门诊治疗留观室、

清洁间、取餐室、缓冲间、2间过渡病房被服库和护士值班室等。

正电子核素药物制备区和质控区的布局:正电子核素药物制备区位于地下三层,设回旋加速器室、设备间、控制室、热室设备间、废物间、药物专用电梯、放化质控室等。

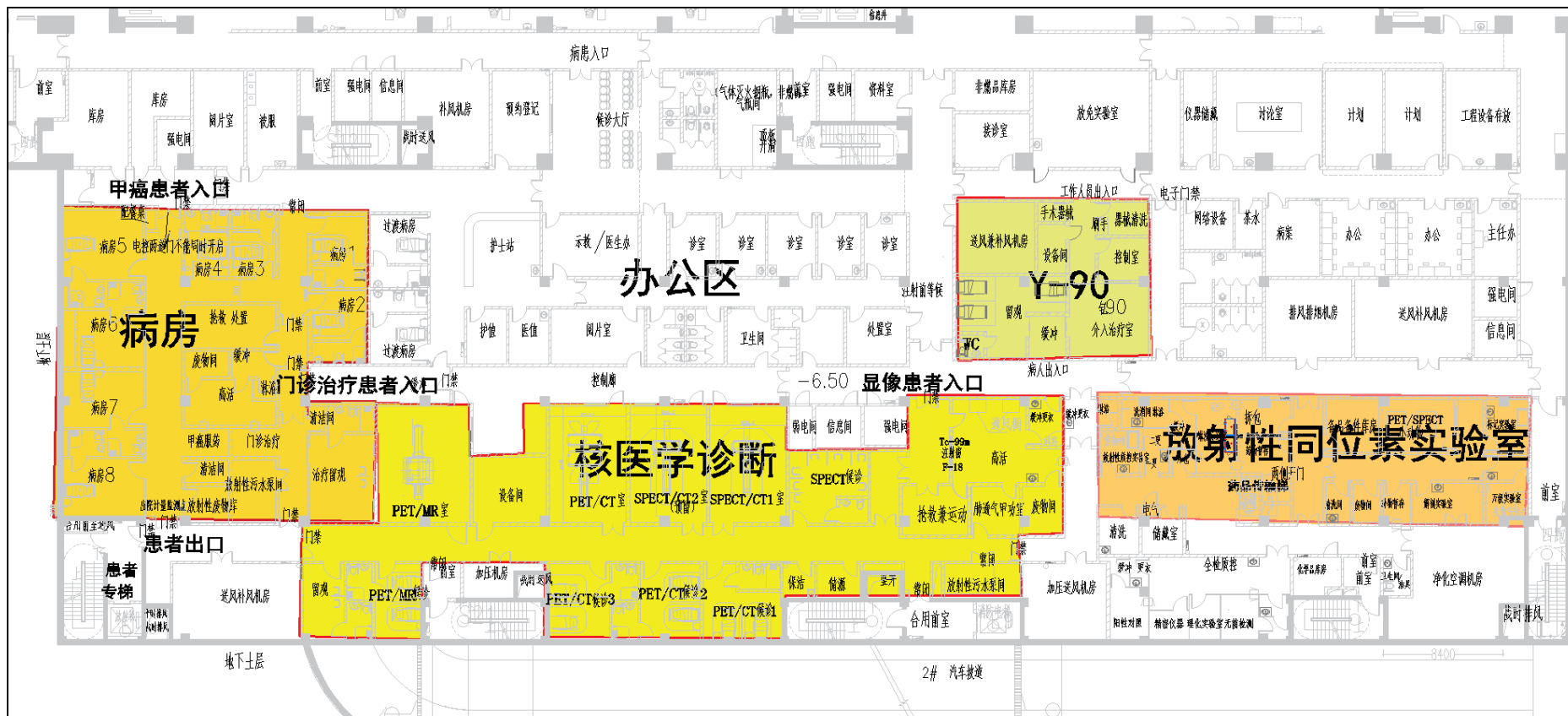


图 1-2 本项目地下一层核医学科平面布局图

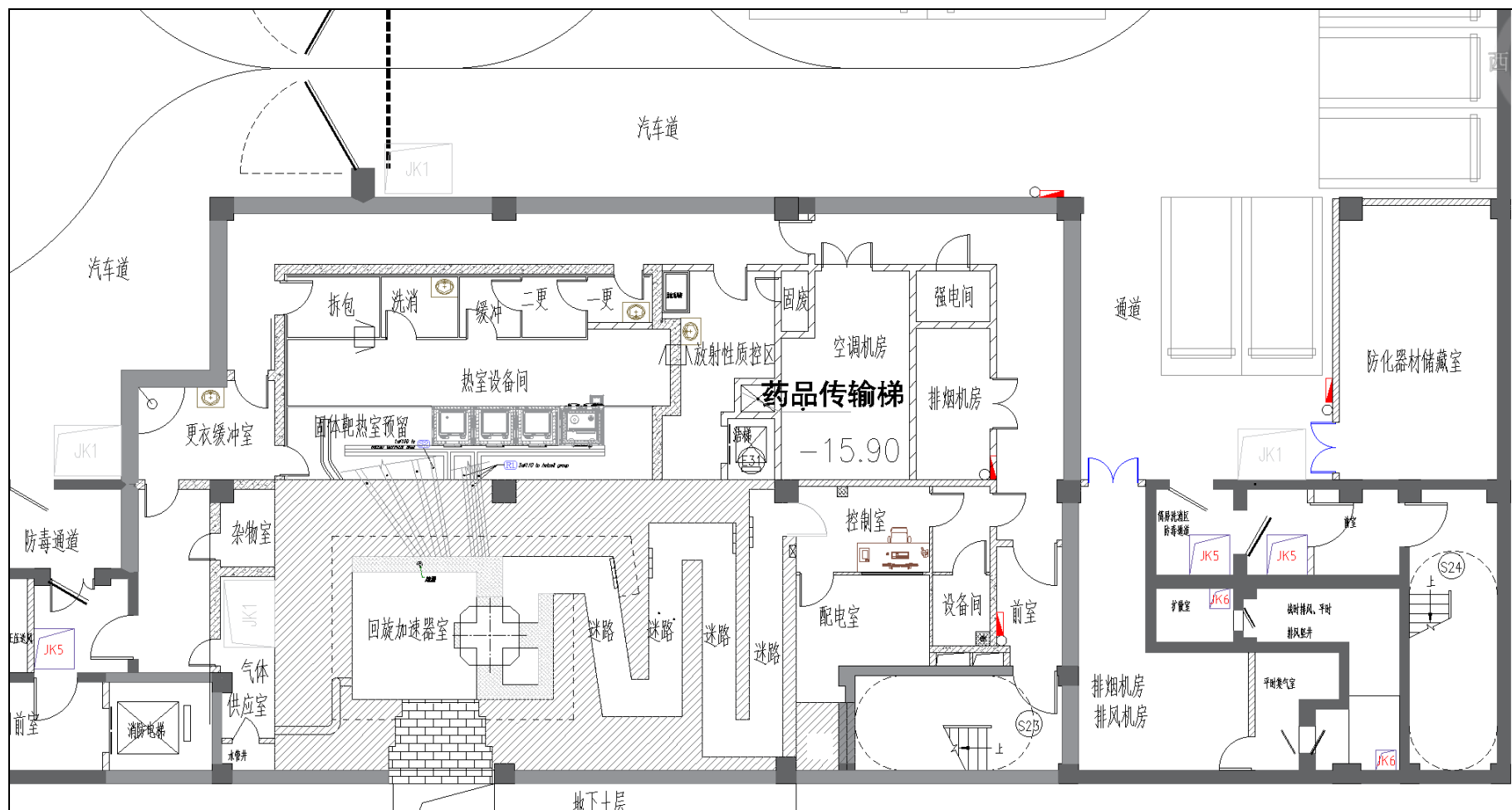


图 1-3 本项目地下三层正电子核素药物制备区平面布局图

表 2 放射源

序号	核素名称	总活度 (Bq) / 活度 (Bq) ×枚数	类别	活动种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
1	Ge-68	5.5E+7Bq×1	V	使用	桶源, 质控校准	PET/CT室	核医学科储源室	
2	Ge-68	3.5E+6Bq×1	V	使用	模体源、PET和CT的对准定位	PET/CT室	核医学科储源室	
3	Ge-68	9.25E+7Bq×1	V	使用	质控校准	PET/MR室	核医学科储源室	

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

表3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	年最大用量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	F-18	液体	生产	5.55E+10	1.11E+9	1.39E+13	制备PET药物	简单操作	回旋加速器热室设备间	合成分装热室
2	C-11	液体	生产	1.4E+10	1.40E+8	7.00E+11	制备PET药物	简单操作		
3	N-13	液体	生产	3.7E+10	3.70E+8	1.85E+12	制备PET药物	简单操作		
4	F-18	液体	使用	1.11E+10	1.11E+07	2.22E+12	PET诊断	很简单操作	核医学科诊断区	核医学科诊断区高活室
5	C-11	液体	使用	7.40E+08	7.40E+06	3.70E+10	PET诊断	简单操作		
6	N-13	液体	使用	7.40E+08	7.40E+06	3.70E+10	PET诊断	简单操作		
7	Tc-99m	液体	使用	3.70E+10	3.70E+07	7.40E+12	SPECT诊断	很简单操作		
	Tc-99m	气体	使用	1.48E+09	1.48E+08	7.40E+10	SPECT肺通气诊断	很简单操作		
8	I-123	液体	使用	1.85E+09	1.85E+07	9.25E+10	SPECT诊断	简单操作		
9	I-131	固体(胶囊)	使用	/	/	/	甲状腺诊断	/		
	I-131	固体(胶囊)	使用	9.25E+08	9.25E+06	9.25E+10	SPECT诊断	简单操作		
	I-131	固体(胶囊)	使用	1.67E+06	1.67E+04	1.67E+08	甲功检查	简单操作		
10	I-131	液体/胶囊	使用	2.22E+10	2.22E+09	1.78E+12	甲癌治疗	简单操作		

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
11	I-131	固体 (胶囊)	使用	1.85E+09	1.85E+07	1.85E+11	甲亢治疗	简单操作	区	疗区高活室
12	Sr-89	液体	使用	2.96E+08	2.96E+07	1.48E+10	治疗	简单操作		
13	Ra-223	液体	使用	1.32E+07	1.32E+08	6.66E+08	治疗	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》(GB18871-2002)。

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	75 μ A \times 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
1	SPECT/CT	III类	1	DiscoveryNM/ CT670	140	440	医疗诊断	SPECT 室 1	搬迁现有核医学 科 SPECT/CT 机
2	SPECT/CT	III类	1	待定	140	500	医疗诊断	SPECT 室 2	新增
3	PET/CT	III类	1	Discovery MI	140	600	医疗诊断	PET/CT 室	搬迁现有核医学 科 PET/CT 机

(三) 中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电 压 (kV)	最大靶电 流 (μ A)	中子强 度 (n/s)	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度 (Bq)	贮存方式	数量	
无													

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
退役源	固体	Ge-68	/	/	/	/	不长期暂存	送交北京市城市放射性废物库
核医学科诊断区和回旋加速器制备场所放射性废水	液态	Tc-99m F-18、 I-123	/	/	105m ³	总 β<10 Bq/L 或者按 表7-3 值控制	114.7m ³ 衰变池 暂存	依照HJ1188-2021和《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》，设槽式衰变池(罐)，放射性废水暂存至少180d后，排入医院污水处理站。严格记录废水排放台帐。
核医学科治疗区放射性废水	液态	I-131、 Sr-89等 (B类)	/	/	413m ³	/	488.5m ³ 衰变池 暂存	放射性废水暂存至少180d后，经检测达标后排入医院污水处理站。严格记录废水排放台帐。
放射性固废（含I-131治疗病号服）	固态	Tc-99m F-18等 (A类)			约510kg	<10 ⁴ Bq/kg	放射性 固体废物在放射 性废物库内 储存。	分类收集，A类暂存30d，B类暂存10倍核素半衰期且不少于30天（其中碘-131核素治疗病房产生废物至少暂存180天，Sr-89至少暂存505天）后，经自行检测，符合《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》要求后，对废物办理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)						
放射性废气	气态	I-131等			<3.7×10 ⁸ Bq	/	净化过滤后稀释排放	经手套箱自带的高效过滤器和管道活性炭过滤器过滤后，在建筑顶部排放。
气体过滤装置废滤材	固态				57kg（每年更换一次）	<10 ⁴ Bq/kg	放射性废物库内储存。	暂存至少180d，符合HJ1188-2021和《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》要求后解控为普通废物。
回旋加速器废旧靶膜、真空膜、碳膜、离子源等高活性固废	固态	Cu-64、 Mg-27、 Na-24 等			0.1kg/年	不排放	固废间内	委托有放射性固废处理资质的单位处理。
碘病房受污染被服	固体	I-131			1120kg			暂存解控后清洗再用。

表6 评价依据

法规文件	<p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》，主席令第九号，2015年1月1日起实施。</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，主席令第二十四号，2018年12月29日日修订并实施。</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，主席令第六号，2003年10月1日起实施。</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》，国务院令第682号修订，2017年6月21日公布，2017年10月1日起实施。</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院令第709号第二次修订，2019年3月2日第二次修订版公布并实施。</p> <p>(6) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021年版）》，生态环境部部令第16号，2020年11月30日公布，2021年1月1日起实施。</p> <p>(7) 《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部令第九号，2019年9月20日公布，2019年11月1日起施行。</p> <p>(8) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部部令第20号修订，2021年1月4日公布并实施。</p> <p>(9) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，原环境保护部第18号令，2011年4月18日公布，2011年5月1日起实施。</p> <p>(10) 《关于发布<射线装置分类>的公告》，原环境保护部、国家卫生计生委公告第66号，2017年12月5日。</p> <p>(11) 《关于发布放射源分类办法》的公告，原国家环境保护总局公告，2005年第62号，2005年12月23日。</p> <p>(12) 《关于发布<建设项目竣工环境保护验收暂行办法>的公告》，国环规环评[2017]4号，2017年11月20日。</p> <p>(13) 《原北京市环境保护局办公室关于做好辐射类建设项目竣工环境保护验收工作的通知》，京环办[2018]24号，2018年1月25</p>
------	--

	<p>日。</p> <p>(14) 《北京市城乡规划条例》，京人常[2021]61号，2021年9月24日。</p> <p>(15) 《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》，原环保部，环办辐射函〔2016〕430号。</p> <p>(16) 《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》，原北京市环境保护局文件，京环发〔2011〕347号。</p> <p>(17) 《辐射安全与防护监督检查技术程序》，生态环境部，2020年2月；</p> <p>(18) 《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>(19) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》生态环境部公告2019年第57号，2019年12月24日。</p> <p>(20) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》生态环境部公告2021年第9号，2021年3月11日。</p> <p>(21) 北京市卫生健康委员会《关于印发乙类大型医用设备配置准入标准的通知》，北京市卫健委，2019年8月。</p> <p>(22) 《产业结构调整指导目录(2019年本)》，国家发展和改革委员会令 第29号，2021年修订，2021年12月30日起施行。</p>
<p>技术标准</p>	<p>(1) 《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016)，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) 《核医学辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021)</p> <p>(5) 《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020)</p> <p>(6) 《放射性废物管理规定》(GB14500-2002)</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) 公安部《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》</p>

	<p>(GA1002-2012)</p> <p>(10) 《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020)</p> <p>(11) 《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分: 化学有害因素》(GBZ2.1-2019)</p> <p>(12) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)</p> <p>(13) 《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)</p> <p>(14) 《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>(15) 《环境空气质量标准》(GB3095-2012)</p> <p>(16) 《伽玛照相机、单光子发射断层成像设备 (SPECT) 质量控制检测规范》(WS523-2019)</p> <p>(17) 《北京市核医学大型设备稳定性检测指南》(试行版)</p>
其他	<p>(1) AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirements, Med.Phys. 33 (1), January 2006</p> <p>(2) Radionuclide and Radiation Protection Data handbook 2002, Vol.98 No 1, 2002</p> <p>(3) Bernard Shleien.1998. Handbook of Health Physics and Radiological Health.3rd</p> <p>(4) 原国家环境保护局监督管理司,《中国环境天然放射性水平》, 1995 年 8 月。</p> <p>(5) 国际放射防护委员会第 94 号出版物:非密封放射性核素治疗后的患者出院考虑, 北京大学医学出版社, 2007 年 7 月。</p> <p>(6) 辐射安全手册, 科学出版社, 2011 年。</p> <p>(7) IBA 公司提供的关于 Cyclone KIUBE 回旋加速器相关技术资料。</p> <p>(8) 北京清华长庚医院提供的与本项目相关的申请和技术资料。</p>

表 7 保护目标与评价标准

7.1 评价范围

7.1.1 评价内容

本项目为二期新增放射性同位素和射线装置，包括地下三层正电子核素药物制备区、地下一层的核医学科诊断区、治疗区 3 处乙级非密封放射性物质工作场所。使用 1 台回旋加速器、1 台 PET/CT、1 台 PET/MR、2 台 SPECT/CT 及 8 间核素治疗病房等。

7.1.2 评价范围

按照《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）的规定，确定本项目辐射环境影响评价范围为：核医学科和加速器室控制区实体屏蔽边界向外围扩展 50m 的区域作为评价范围。本项目评价范围示意图见图 7-1 所示，本项目相关场所控制区周围 50m 范围内，无学校、居民楼等敏感目标，周围 50m 区域除了东侧和南侧部分为院外马路区域外，其它都是医院内部。主要为医院医疗楼内相关诊疗场所和院内区域等。

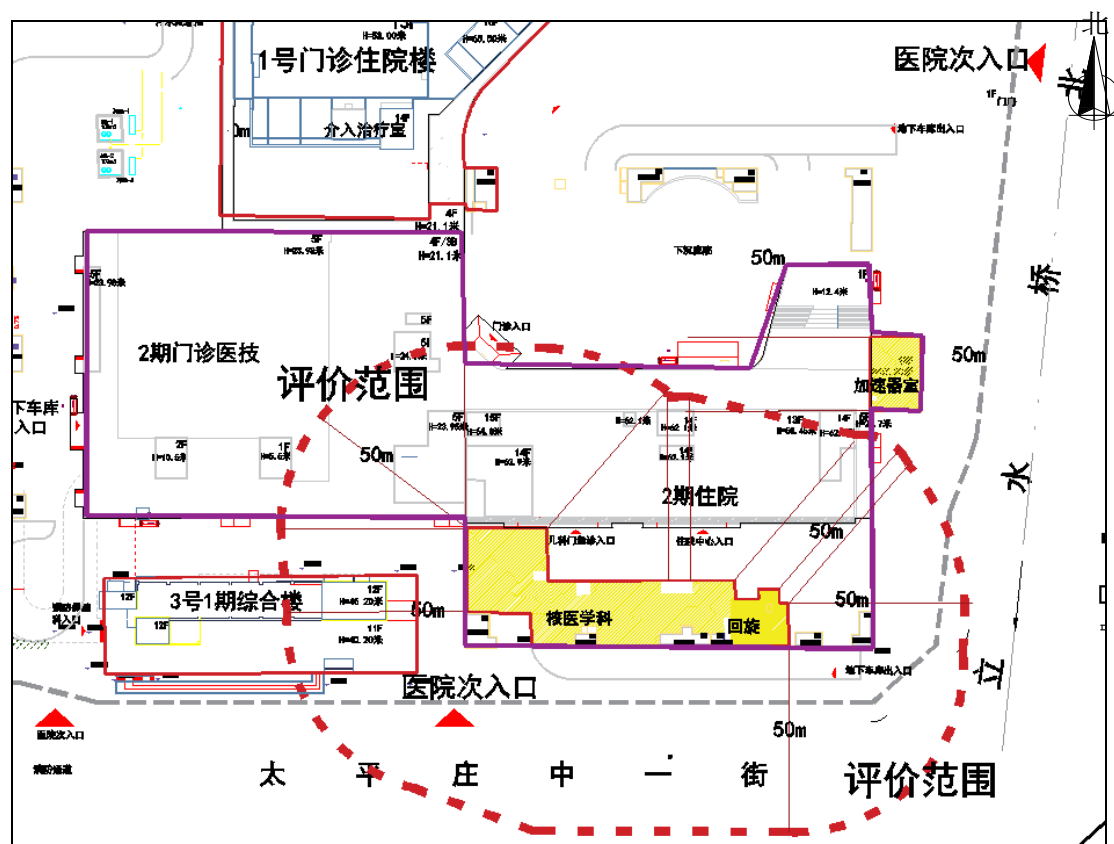


图 7-1 本项目评价范围示意图

7.1.3 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。

7.1.4 评价因子

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

7.2 保护目标

本项目拟建核医学科场所（包括药物制备场所、诊疗场所）位于二期医疗楼东南侧地下一层和地下三层。

上述场所的具体位置见图 7-2~图 7-5，都充分考虑周围场所的安全，核医学科不毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，满足 HJ1188-2021 的选址要求。场所周围 50m 范围内保护目标的相关情况见表 7-1 所示。

正电子核素制备区和放化质控室位于地下三层，其东侧为送风、排风井等，南侧为土层，西侧为送风、排风机房，北侧为停车位，楼上为停车位和汽车通道。地下一层核医学科诊疗区域东侧为同位素实验室区域，南侧为汽车坡道，西侧为地下土层，北侧为核医学科办公场所，隔公共走廊外为放射科和放射治疗科，楼上为院内路面，楼下为停车库。

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)	常居留数量 (人)	方位	周围 50m 范围内主要场所或建筑物
地下一层核医学科	核医学科工作人员	0~35	5	东侧	同位素实验室
	/	36~50	0		地下土层
	公众	0~50	2	东侧（地面）	院内道路和院外马路
	车库管理人员	0~8	1	南侧	汽车坡道
	/	9~50	/		地下土层
	/	0~50	/	西侧	地下土层
	核医学科工作人员	0~25	20	北侧	核医学科办公区
	患者或其他工作人员	26~50	30		放射科
	介入治疗室工作人员	0~10	6	东北侧	介入治疗室及相关场所
停车场管理员	5	2	楼下	停车库	

	其他工作人员	5	5	楼上	地面院内道路
地下三层正电子核素药物制备区	本项目工作人员	紧邻	3	东、北侧	热室设备间和控制室
	其他工作人员	10~25	1	东侧	送风、排风机房等
	/	0~50	/	南侧	地下土层
	其他工作人员	0~50	2	西侧	送风、排风机房等
	停车场管理员	0~50	2	北侧	停车库
	停车场管理员	5	2	楼上（地下二层）	停车库

备注：诊疗后的患者从地下一层西南侧患者专用电梯到达一层离开。

本项目的评价范围内的保护目标主要是医护人员、就诊患者和其它公众。本项目相关场所周围 50m 范围内，无商超等人员密集区域，也无居民楼、学校、图书馆等敏感目标。核医学工作场所没有毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并与非放射性工作场所有明确的分界隔离。

本项目核医学科给药患者长时间停留或者药物贮存的房间（如 PET 或 SPECT 机房、给药后候诊室、碘病房和高活室等）的上下相邻关系见图 7-2 和图 7-4 所示。相邻关系为：

1. PET 用药物 γ 射线能量高，对周围环境影响较大，故特别关注患者候诊和检查场所楼上和楼下房间的用途。图 7-2 和图 7-4 显示，PET/CT 机房、PET/MR 机房以及 PET 给药后候诊区楼上为楼外地面，不属于固定人员常居留的场所。楼下为停车位和车道，也无人员常居留房间。

2. 回旋加速器机房和热室设备间上方为停车位、车道和库房，无人员长时间居留，且药物制备时间多数是 7:00 和中午 13:00，楼下为为地下土层。

3. 碘病房常有患者住院，同样需要关注楼上和楼下房间的使用功能。图 7-2 和图 7-4 显示，碘病房上方为楼外地面。楼下为车库、车道和加压机房等，没有人员常居留。碘病房不接邻产科、儿科、食堂、诊室、收费室、普通病房、办公室等部门以及人员密集和长期驻留的场所，并与非放射性工作场所有明确的分界隔离。

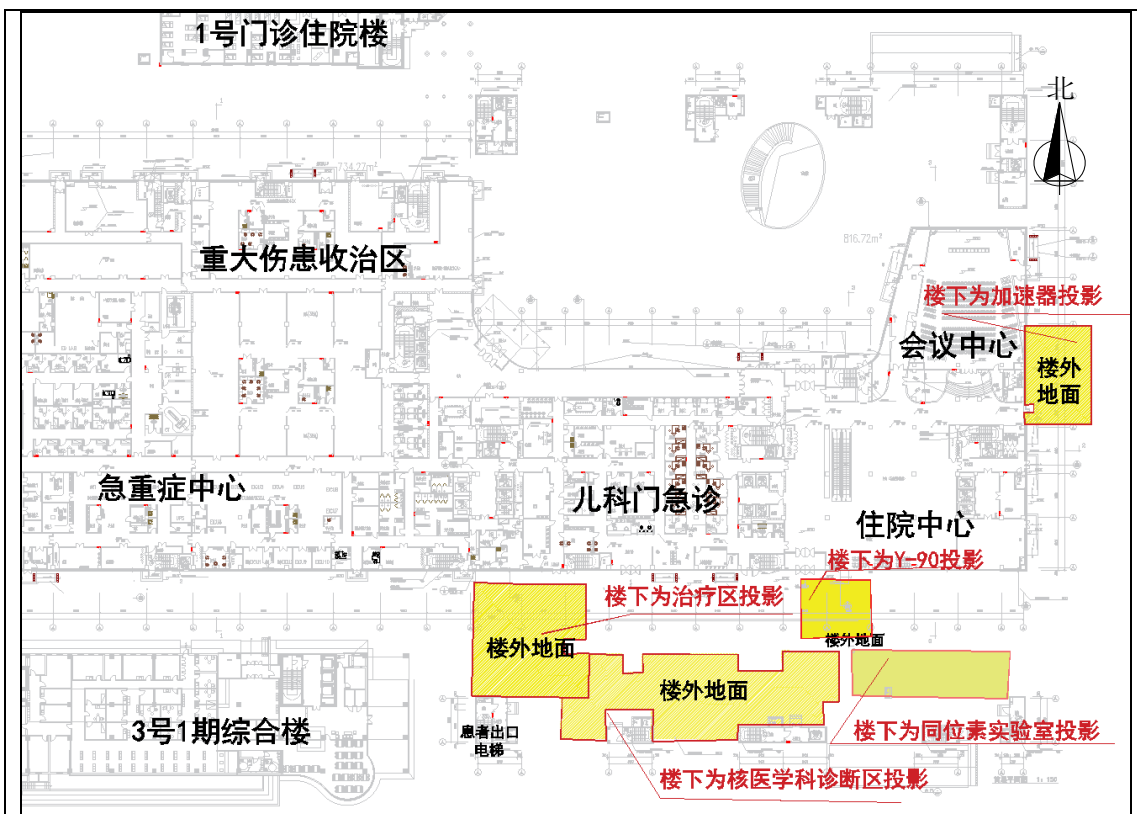


图 7-2 本项目地面一层（核医学科楼上）周围关系图

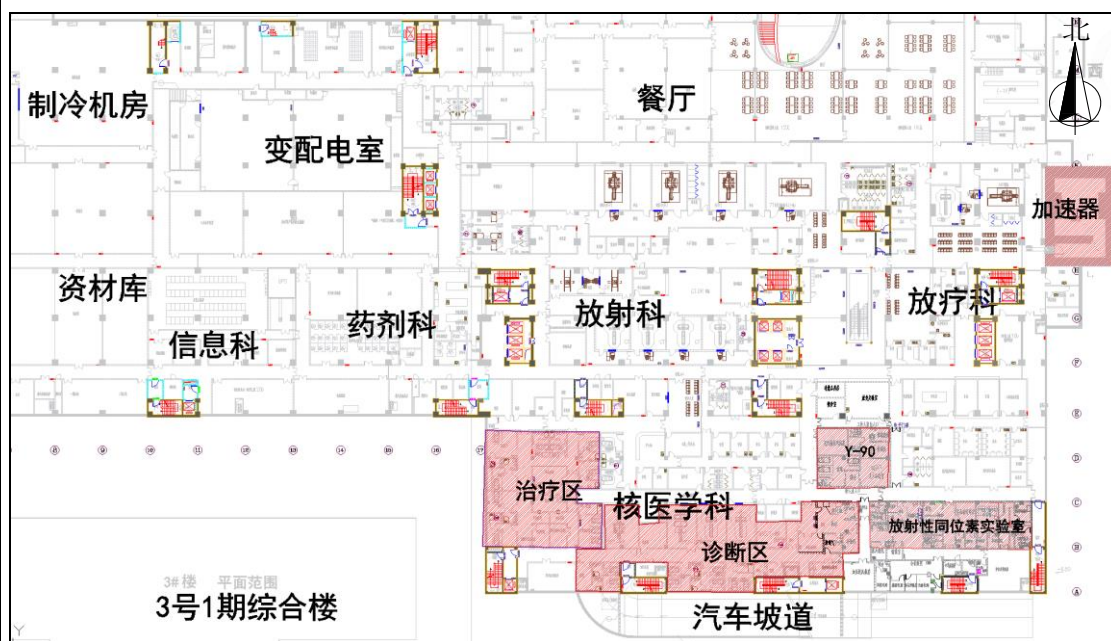


图 7-3 本项目地下一层（核医学科）周围关系图

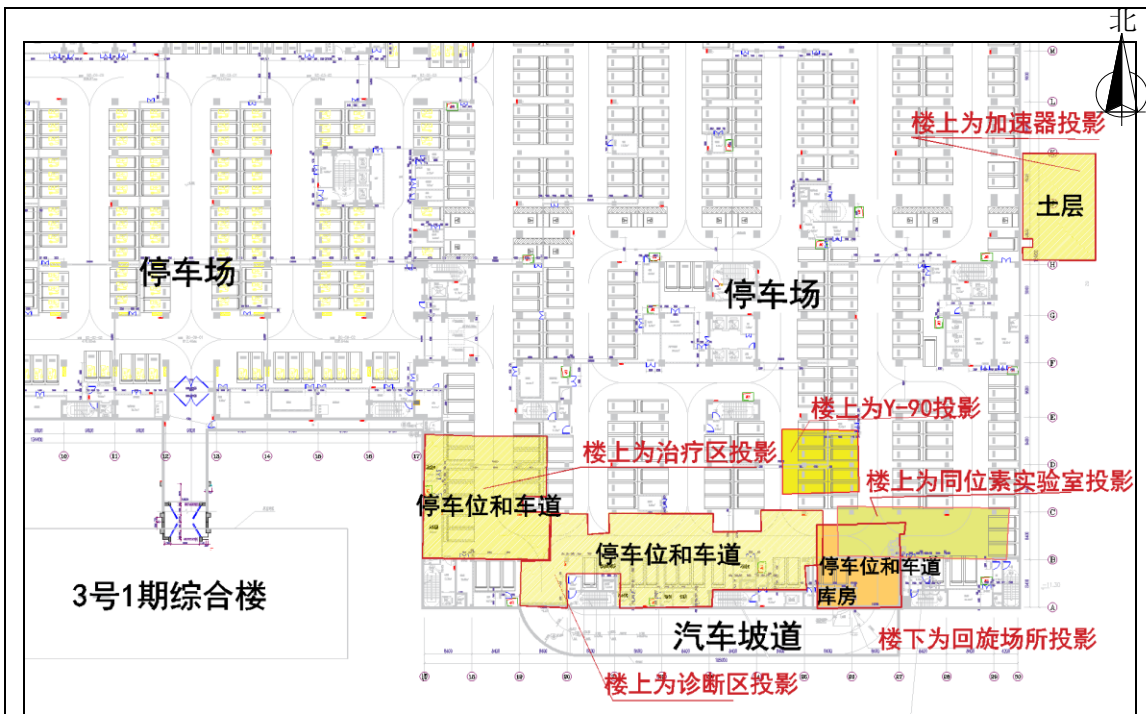


图 7-4 地下二层周围关系图

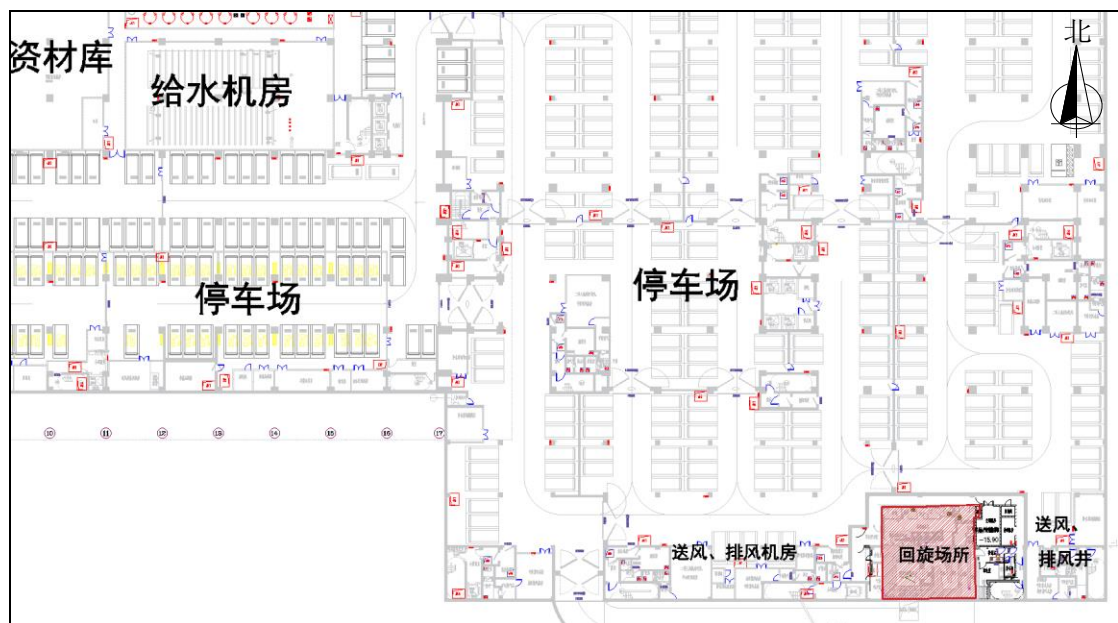


图 7-5 地下三层（回旋场所）周围关系图

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。

7.3.2 剂量约束值

职业照射，本项目核医学辐射工作人员取 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，其他门诊治疗核素都满足出院要求。

7.3.4 辐射工作场所边界周围剂量率控制水平

本项目周围公众除满足上述剂量约束要求外，周围剂量率还要满足以下要求，参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021），并结合本项目实际情况，回旋加速器室、核医学科场所及设施的剂量率控制水平拟从严控制：

（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 2.5μSv/h，热室模块箱外 30cm 处的辐射剂量率不大于 2.5μSv/h。

（2）核医学科诊断区

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

2) 在控制区内人员可达处，屏蔽体外表面 30cm 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 10μSv/h，宜不大于 2.5μSv/h。

3) PET/CT、SPECT/CT 在进行给药患者 CT 扫描时，机房外表面 30cm 处的

周围剂量当量率控制目标值不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

4) 手套箱外表面 30cm 处的周围剂量当量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

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

(3) 核医学科治疗区

1) 核医学科治疗区控制区边界外 30cm 处、楼上和楼下（人员可达位置）的剂量率应不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。控制区内（病房门外）的剂量率水平不大于 $10\mu\text{Sv/h}$ （属于人员很少停留的场所）。

2) 放射性废液衰变池顶部的周围剂量当量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

3) 手套箱外表面 30cm 处的周围剂量当量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

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

5) 患者使用过的被服应先进行存放衰变，暂存衰变时间不少于一个半衰期，经检测被服表面 γ 剂量率小于 $1\mu\text{Sv/h}$ 且 β 表面污染水平小于 0.8Bq/cm^2 时，方可进行清洗并再次使用。

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 α 排放限值为 1Bq/L ，总 β 排放限值为 10Bq/L 。

(2) 放射性废水排放管理要求

本项目放射性废水的排放管理依据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）和《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）中对于 A 类（半衰期小于 24h）和 B 类（半衰期大于 24h）放射性废水的要求执行。

本项目放射性废水按照诊断区和治疗区放射性废水分别收集、暂存和处置。根据 HJ1188-2021 和京环办[2018]13 号文要求，对于槽式衰变池（罐）暂存方式，A 类（半衰期小于 24h）放射性废水注满后，暂存时间超过 30 天后可直接解控排放；B 类（半衰期大于 24h）放射性废水注满后，暂存时间超过 10 倍最长半衰期且不少于 30 天（其中含 I-131 的放射性废水至少暂存 180 天）后，应委托有资质（CMA 或 CNAS）的检测机构对拟排放废水中 I-131 核素的放射性活度浓度进行检测，活度浓度与单次排放总活度值均应满足 GB18871-2002 附录 A 表 A1 的规

定。科室将在“放射性废水暂存、处置管理台帐”上详细记录解控排放废水所含核素、体积、废水暂存起始日期，处置人员和处置日期等信息。

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

医院规定含放射性废水必须经衰变池暂存，废水的总 α 、总 β 监测结果还需满足分别小于 1Bq/L、10Bq/L、I-131 的放射性活度浓度不大于 10Bq/L，监测结果经监管部门认可并办理相关手续后方可排入下水管道。

7.3.6 放射性废气排放管理

（1）《核医学科辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）通风要求：

1) 核医学工作场所应保持有良好的通风，工作场所的气流流向应遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，保持工作场所的负压和各区之间的压差，以防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

2) 使用回旋加速器制备放射性药物的工作场所应设有单独的通风系统。

3) I-131 治疗病房应设有单独的通风系统，病房的门窗应有封闭措施，保持病房区域内的负压，病房区域内的空气应经单独的排气管道有组织排放。

4) 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行，防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱等密闭设备应设计单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。

5) 通风橱应有足够的通风能力。制备放射性药物的回旋加速器工作区域、I-131 治疗病房以及设有通风橱、手套箱等场所的通风系统，排气口应高于本建筑物屋顶，尽可能远离邻近的高层建筑。

（2）《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）关于通风的要求

核医学工作场所通风系统独立设置，应保持核医学工作场所良好的通风条件，合理设置工作场所的气流组织，遵循自非放射区向监督区再向控制区的流向设计，保持含放射性核素场所负压以防止放射性气体交叉污染，保证工作场所的空气质量。合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置，风速应不小于 0.5m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置，排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。

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 A 类（半衰期小于 24h）和 B 类（半衰期大于 24h）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。

参照（HJ1188-2021）和京环办[2018]13 号，核医学科放射性固体废物须设置独立的暂存室。药物操作场所、废物暂存室应分别设置有屏蔽能力并有电离辐射警示标志的废物桶、废物箱，并按照 A 类、B 类废物进行标识。药物操作场所废物桶内应使用不易破损的塑料袋对固体废物进行收集，密封袋口后转移至暂存室废物箱中，并在塑料袋外表面注明废物类别（A 类、B 类）、重量（或体积）、所含核素名称、暂存起始日期等信息。

A 类固体废物暂存时间超过 30 天、B 类固体废物暂存时间超过 10 倍最长半衰期且不少于 30 天（其中碘-131 核素放射性废物至少暂存 180 天）后，使用经检定或校准合格的检测仪器对废物表面污染和辐射剂量率水平进行监测，辐射剂量率监测为所处环境本底水平且 α 、 β 表面污染水平分别小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 和 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物解控作为医疗废物处置，并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

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

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 7-3。

表 7-3 非密封源工作场所的分级

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

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

7.5 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 7-4。

表 7-4 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	4×10	4×10
	监督区	1×10^{-1}	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4×10^{-1}	1×10^{-1}	4
	监督区			
手、皮肤、内衣、工作袜		1×10^{-2}	4×10^{-2}	4×10^{-1}

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

GB18871-2002 附录 B2.2 条款规定: 工作场所中的某些设备与用品, 经去污使其污染水平降低到上述表 7-4 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(手套箱)及排风口设置要求

《核医学放射防护要求》(GBZ120-2020) 第 5.2.3 条要求: 合成和操作放射性药物所用的通风橱应有专用的排风装置, 风速应不小于 0.5m/s。排气口应高于本建筑物屋顶并安装专用过滤装置, 排出空气浓度应达到环境主管部门的要求。

《核医学科辐射防护与安全要求》(HJ1188-2021) 通风要求: 放射性物质的合成、分装以及挥发性放射性核素的操作应在手套箱、通风橱等密闭设备中进行, 防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出。手套箱、通风橱等密闭设备应设计单独的排风系统, 并在密闭设备的顶壁安装活性炭或其他过滤装置。通风橱应有足够的通风能力。制备放射性药物的回旋加速器工作区域、I-131 治疗病房以及设有通风橱、手套箱等场所的通风系统排气口应高于本建筑物屋顶,

尽可能远离邻近的高层建筑。

本项目核医学科辐射工作场所设置的排风系统的排风口拟设 1 处，位于医疗楼东侧，高度约 59.8m，高于医疗楼顶部并高于周围 50m 范围内建筑物。

本项目核医学科内药物制备场所（热室设备间）内安装热室，治疗场所、诊断场所的放药室内安装手套箱，操作口风速均 $\geq 0.5\text{m/s}$ 。热室和手套箱设置独立的排风系统，配备高效过滤器（过滤效率 $\geq 99.97\%$ ）和活性炭过滤器（过滤效率 $\geq 90\%$ ）。过滤器每年更换一次。核医学排风共分为 9 个排风系统，其中地下三层为 3 个独立排风系统，地下一层为 6 个独立排风系统。各排风出口处拟还设置活性炭过滤装置。

活性炭过滤器具体要求：过滤效率大于 90%，每个常用活性炭重量不大于 5kg，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

《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）第 5.2.2 款给出了核医学科工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求，具体见表 7-5。

表 7-5 核医学相关工作场所的室内表面及装备结构要求

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

^a下水道宜短，大水流管道应有标记以便维修检测。

^b洗手盆应为感应式或脚踏式等手部非接触开关控制。

经核算，地下二层核医学科治疗区，在按照最大工作量开展 I-131 治疗时，放射性的加权活度大于 50000MBq，属于 I 类场，所地下三层回旋加速器热室设备间，按照最大使用量合成 F-18 药物时，放射性的加权活度大于 50000MBq，属于 I 类场所；核医学科诊断区属于 II 类场所。

综上，本项目核医学科治疗区、回旋加速器热室设备间属于 I 类场所，其它场所均属于 II 类场所，均需按照表 7-5 要求，采取屏蔽措施，采用易清洗材料敷设地面，设分装柜和通风设施，设洗手盆和去污设备。核医学科治疗区、回旋加速器热室设备间需设计强制排风。

7.8 射线装置机房屏蔽防护基本要求

7.8.1 CT 机房屏蔽防护要求

本项目 PET-CT、SPECT-CT 设备机房屏蔽还执行《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）给出的 CT 机房的屏蔽防护要求。

表 7-6 不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

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

7.8.2 CT 机房的面积要求

《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）第 6.1 条款指出：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 7-7 的要求。

表 7-7 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(不含头颅移动 CT)	30	4.5

7.9 非放射性控制值

(1) 室内空气质量

根据 GBZ2.1-2019，工作场所空气中 O₃ 和 NO₂ 的浓度限值分别为 0.3mg/m³ 和 5mg/m³。

(2) 环境空气质量

臭氧和氮氧化物的环境空气质量浓度限值执行 GB3095-2012《环境空气质量标准》中的二级浓度限值，臭氧的 1 小时平均浓度 0.2mg/m³，NO₂ 的 1 小时平均浓度 0.2mg/m³。

表 8 环境质量和辐射现状

8.1 辐射环境现状监测

评价单位委托有资质单位于 2022 年 8 月 8 日对本次新增的辐射工作场所周围进行了 γ 辐射空气吸收剂量率和中子辐射剂量率本底监测,对空气中 I-131 的浓度进行了检测。

8.1.1 监测项目

γ 辐射空气吸收剂量率; 环境中子辐射剂量率; 空气中 I-131 的浓度。

8.1.2 监测对象及点位布设

监测对象: 本次监测针对拟建场所周边进行环境辐射现状监测。

监测点位: 本次监测对拟建场所在区域及周边进行环境地表 γ 辐射、中子剂量率监测和空气中 I-131 的浓度, 监测点位布设见图 8-1。

8.1.3 监测仪器及方法

(1) 监测设备

本次监测采用的监测设备见表 8-1。

(2) 监测方法

γ 辐射剂量率: 采用便携式监测仪表, 以定点的测量方式进行。监测时每点测量 10 次, 每次间隔 10 秒钟, 取平均值。

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

空气中 I-131 浓度: 采用大流量空气采样器, 以定点采样后实验室测量方式进行, 取样流速为 60L/min, 取样时间不少于 2h, 采用国防最高计量标准装置进行样品定值测量。

表 8-1 监测设备及性能指标

仪器名称	型号/编号	检定/校准证书、有效日期	主要技术性能指标
X、 γ 剂量率仪	GH-102A/20170404	DLjl2022-02038、2022-3-7~2023-3-6	测量范围: 0.01 μ Gy/h~100 μ Gy/h; 能量范围: 30keV~8MeV; 相对响应之差: < \pm 15%。
中子周围剂量当量仪	LB123/20170412	DLjs2022-00219、2022-1-24~2023-1-23	测量范围: 30nSv/h~100mSv/h; 能量依赖: 0keV~10MeV 这间为 \pm 30%。 中子能量响应范围: 热中子)~20MeV, 热中子检测效率约 90%

低本底 γ 能谱活度标准装置	自建	[1998]国量标国防证字第264号、2024-4-15	测量范围：0.1Bq~3.7×10 ⁶ Bq； 能量范围：45keV~2000keV； 不确定度：40%~1.4% ($k=2$)。
-----------------------	----	------------------------------	---

8.1.4 监测依据

- (1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- (2) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；
- (3) 《空气中碘-131 的取样与测定》（GB/T14584-1993）。

8.1.5 监测结果

γ 剂量率和中子辐射剂量率的监测数据见表 8-2，空气中 I-131 浓度见表 8-3。

表 8-2 拟建辐射工作场所周围 γ /中子辐射环境本底水平监测结果

场所名称	点位序号	测点描述	辐射剂量率 ($\mu\text{Gy/h}$)	中子辐射剂量率 $\mu\text{Sv/h}$
拟建辐射工作场所周围	1	医院北侧入口	0.07±0.01	0.03±0.00
	2	门诊楼北侧	0.07±0.01	0.03±0.00
	3	西侧停车场	0.07±0.01	0.02±0.00
	4	行政楼南侧	0.08±0.01	0.02±0.00
	5	二期施工区域北侧	0.08±0.01	0.03±0.00
	6	医院南侧入口	0.07±0.01	0.03±0.00

注：检测结果含宇宙射线响应值。

表 8-3 拟建辐射工作场所周围中子辐射环境本底水平监测结果

编号	取样位置	取样体积 (m^3)	检测结果 (Bq)	空气中 I-131 浓度 (Bq/m^3)
1	二期医疗楼西北侧	7.20	<0.1*	<1.39E-2
2	二期医疗楼东南侧	7.68	<0.1*	<1.30E-2

注：检测结果 0.1Bq 为仪器的探测下限。

8.2 监测结果评价

根据《中国环境天然放射性水平》（1995），北京市天然辐射水平范围为 60~123nGy/h（室外，含宇宙射线）和 69.8~182nGy/h（室内，含宇宙射线）。因此，本项目拟建室外场所 γ 辐射剂量率水平属于正常本底水平，拟建场所室

内中子周围剂量当量率均低于探测下限水平。周围空气中 I-131 的浓度低于探测下限水平。

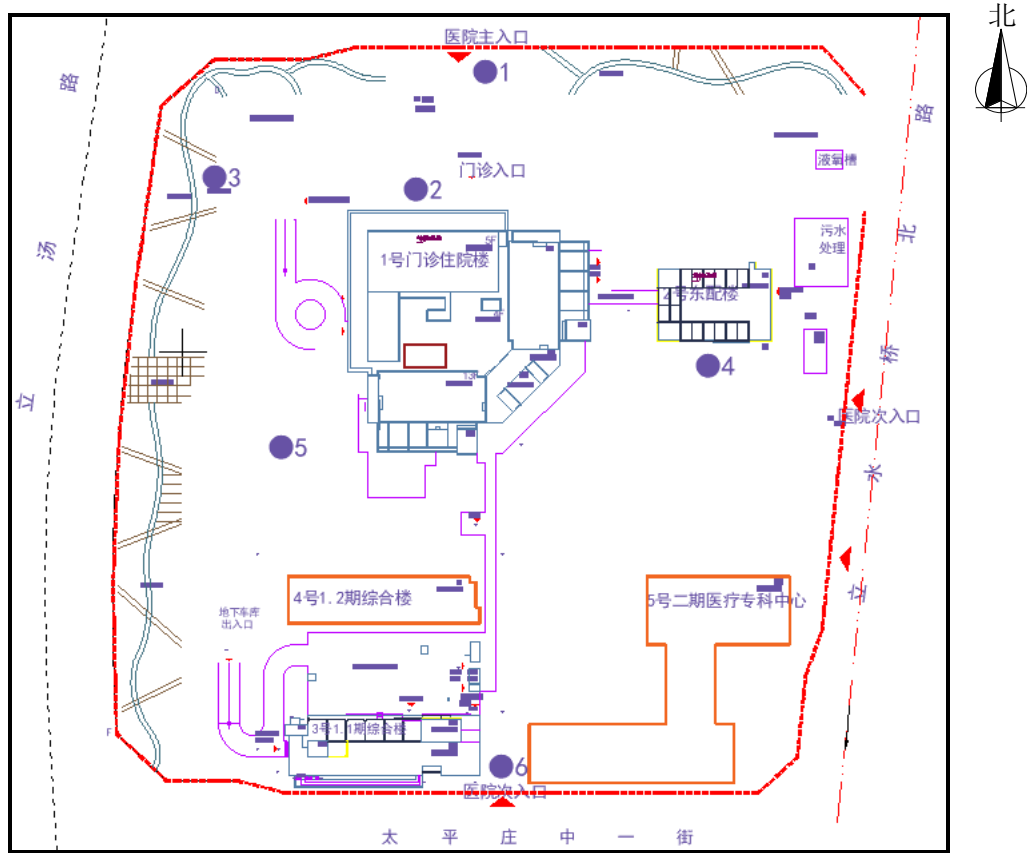


表 8-1 拟建二期辐射场所周围辐射环境水平监测点位图

表 9 项目工程分析与源项

9.1 正电子核素药物制备区

回旋加速器打靶在回旋加速器机房内完成，属于II类射线装置的使用范畴，后续放射性药物合成/纯化、质检和分装属于使用非密封放射性物质工作场所范畴，故本报告表分别描述其污染源项。图 9-1 中后续的“临床应用”属于核医学科诊断场所使用内容，在“9.2 核医学科诊疗”中进行了描述。

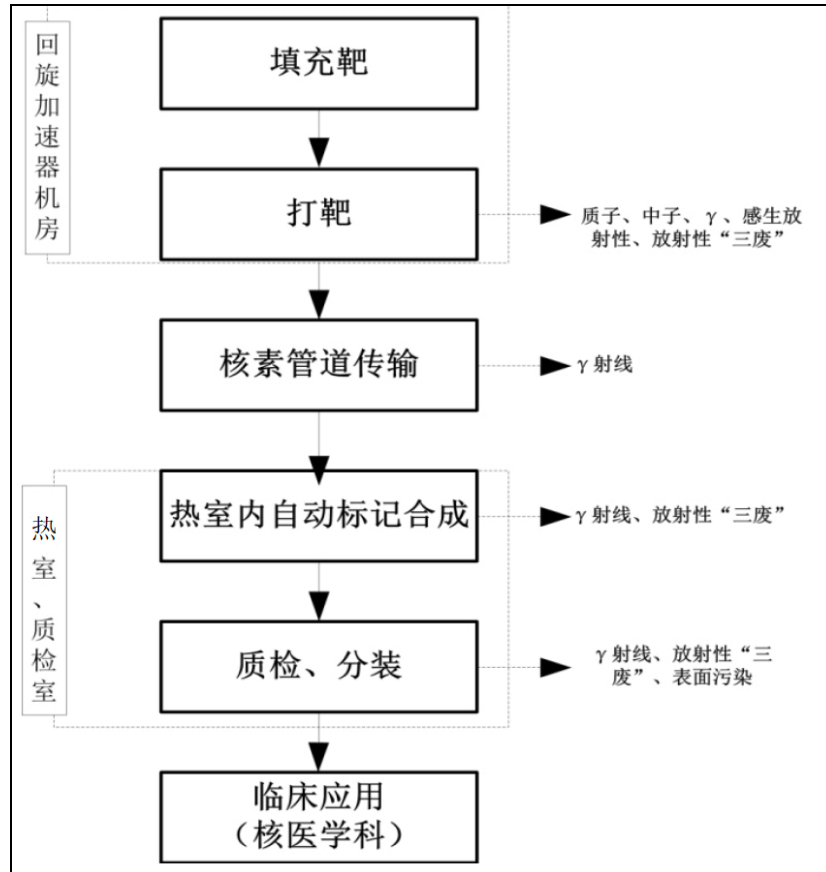


图 9-1 回旋加速器制备 PET 药物的放射性污染示意图

9.1.1 正电子核素药物的生产、合成及分装

9.1.1.1 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，回旋加速及剥离原理示意图见图 9-2，回旋加速器典型工作原理示意图见图 9-3。

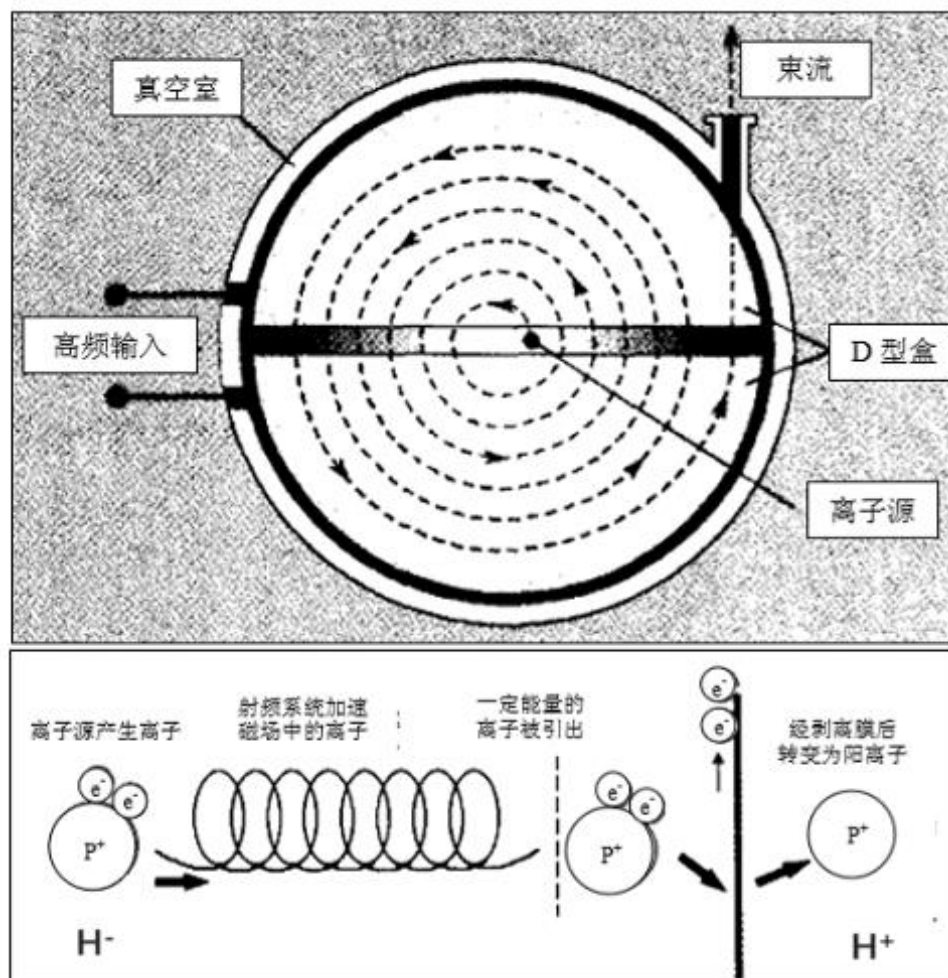


图 9-2 粒子加速及剥离工作原理示意图

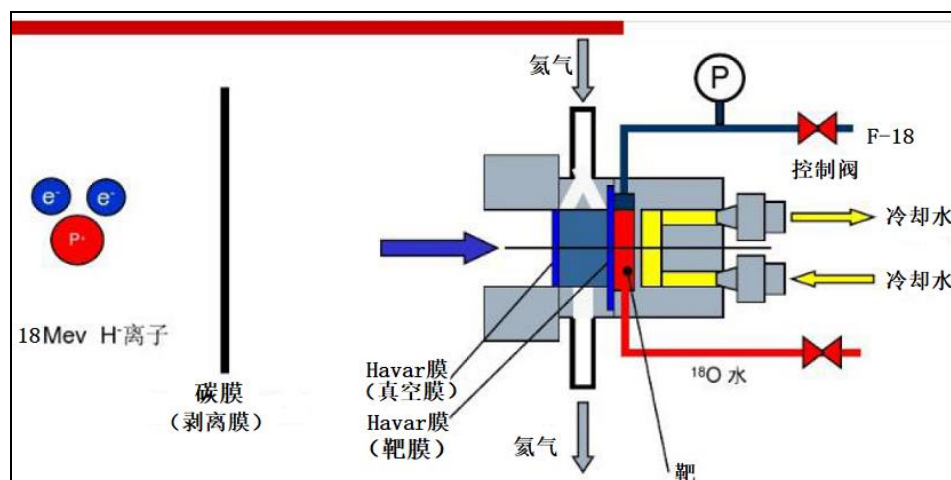


图9-3 回旋加速器典型工作原理示意图

回旋加速器靶内产生的核素通过气动方式通过专用的管道运输至热室设备间内的药物合成模块，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热室设备间运输至分装热室，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 9-4。

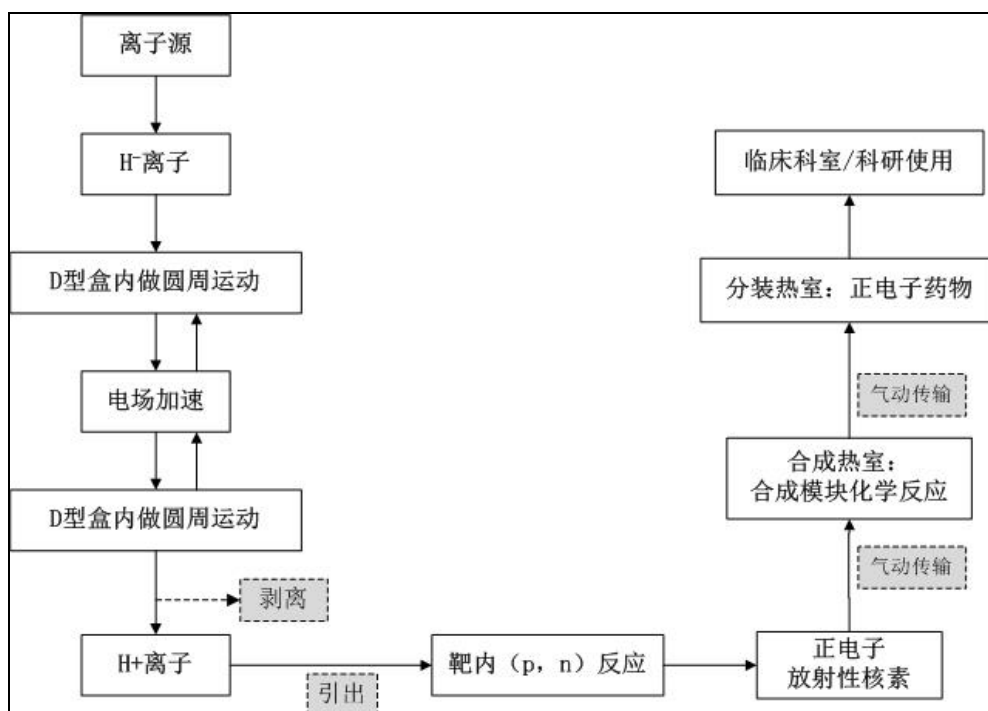


图 9-4 正电子药物生产流程示意图

9.1.1.2 系统组成

本项目拟配置的 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 9-5 所示。



图 9-5 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主真空腔的隔离。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

	<p>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。</p> <p>氮气冷却系统——在束流轰击期间对靶室和靶窗的靶膜与真空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。</p>
--	--

9.1.1.3 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 $2 \times 75 \mu\text{A}$ （双束流），可生产多种放射性核素，详见表 9-2 所示。实际工作中，多数使用一个靶，每小时正电子生产量最大在 3.0Ci 左右（F-18），足够满足医院核医学科的使用需要。

表 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	本项目日最大制备量 GBq
1	H ₂ ¹⁸ O 液体	¹⁸ O (p, n) ¹⁸ F	F-18	60	18	111	1~2 次/天	111
2	N ₂ +1%O ₂ 气体	¹⁴ N (p, α) ¹¹ C	C-11	30	18	14.8	1 次/周	14
3	H ₂ O+5 毫摩尔乙醇	¹⁶ O (p, α) ¹³ N	N-13	20	16	37	1 次/周	37

备注：每天最多生产制备两种核素。

9.1.1.4 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 4 个靶位（本型号加速器可配 8 个靶位，本项目只配备 4 个，F-18 为双靶）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。在回旋加速器正式制备放射性同位素之前，先清洗靶并用纯氦吹干，然后注入靶物质，这些操作均由技师在控制室内完成，无须进入回旋加速器机房操作。

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（纯化）模块中，进行化学合成/纯化工艺。

本项目回旋加速器生产核素采用的靶分为液体靶和气体靶，操作方式略有区别。生产 F-18、N-13 核素采用液体靶（其中 3 和 7 号靶位拟都生产 F-18，1 号

靶位拟生产 N-13 核素), 生产 C-11 核素采用气体靶 (2 号靶位), 均通过管道利用自动加样装置装入靶腔。其中气体靶是由气瓶间通过管道自动输送到回旋加速器, 更换气体罐的操作是在气瓶间 (设备间) 完成, 操作人员不需要进入加速器机房。对于液态靶, 工作人员在回旋加速器机房外通过管道自动加入, 也不需要进入回旋加速器机房。液体靶填充瓶容量约为 50ml, 可多次 (16~17 次) 通过远程控制给靶室填充靶水, 从而减少技师进入回旋加速器室的次数。预计 O-18 水 (生产 F-18) 更换周期约 1 次/周, 每次填充操作时间约 10s。生产 C-11 核素使用 N-14 气体靶, 气瓶存储于气瓶间, 一般使用期限可长达几年。

制备工艺: 靶材料准备完毕后, 由工作人员在控制室或热室设备间操作回旋加速器, 以一定的束流轰击靶物质, 生产核素。使用束流轰击装入靶腔内的液体靶或气体靶一段时间后, 通过预装在靶线地沟内的特氟龙毛细管, 利用高压氦气将靶腔内的靶物质输送至放化室内的热室中, 并进行靶腔清洗, 再用高纯氦气将放射性核素输送管道吹干。

以生产 $^{18}\text{F-FDG}$ 为例, 先利用回旋加速器将质子加速, 使其撞击 ^{18}O 发生反应 $^{18}\text{O} (p,n) ^{18}\text{F}$ 而产生 ^{18}F 。回旋加速器在生产 ^{18}F 的过程中, 是在屏蔽热室内自动完成的, 由控制室的计算机根据输入的参数来进行控制。轰击过程中若有不可自动调整的参数偏差, 回旋加速器将自动停机。自动生产 ^{18}F 的打靶时间可以根据所需 ^{18}F 产量预先设定, 通常不超过 1h。

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

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

根据最大工作负荷考虑, 预计加速器每天上、下午各开机一次制备 F-18 药物, 再开机一次制备其它核素药物, 将来加速器每天打靶次数不超过 3 次, 总运行时间约 2.0h (F-18 打靶 1.0 或 1.5h, 其它核素约 0.5h), 实际运行时, 工作人员会根据药物的实际需求量调整打靶时间。

(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、气态或固体靶形式传输到热室的模块控制箱中。核素传输地沟采用混凝土浇筑, 地沟

盖板采用 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，其中热室所在的操作间为最核心的场所。热室设备间为开展开放性核素操作的场所，热室设备间拟设置 7 个合成、分装热室（其中 4 个为预留热室，分别为 3 个固体靶热室和 1 个预留合成热室，本项目拟先配备 4 个），本项目拟配备的 3 个合成热室（一个 C-11 多功能模块热室，一个 FDG 合成模块热室，一个预留合成热室），1 个为分装和 N-13 共用模块热室。如果指定热室内的合成器在药物合成过程中出现故障，启用预留备用热室开展药物合成工作，避免工作人员因维护受到放射性污染的合成器而受到不必要的照射。

热室设备间：加速器生产的放射性核素进入热室设备间内的合成模块，F-18 等在合成热室内制成 F-18 等标记药物（如：FDG 等），整个流程在热室内为全自动操作。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，采用耐腐蚀不锈钢内胆。采用耐腐蚀不锈钢内胆，设有同箱体防护能力相当的铅玻璃观察窗。药物合成热室安装专用通风系统进行空气净化，通风量约 500m³/h，排风经高效过滤器（粒径≥0.3μm 的微粒的过滤效率不低于 99.97%）净化后，引至楼顶经活性炭过滤后排放（医疗楼东侧，高度 59.8m），分别用于合成 F-18、C-11（N-13 不用合成），合成热室外观示意图如图 9-6 所示。



图 9-6 合成热室模块箱外观图

在洁净合成模块中，计算机自动设置的步骤主要包括以下几种（以 F-18-FDG 为例），FDG 合成流程图见图 9-7 所示：

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

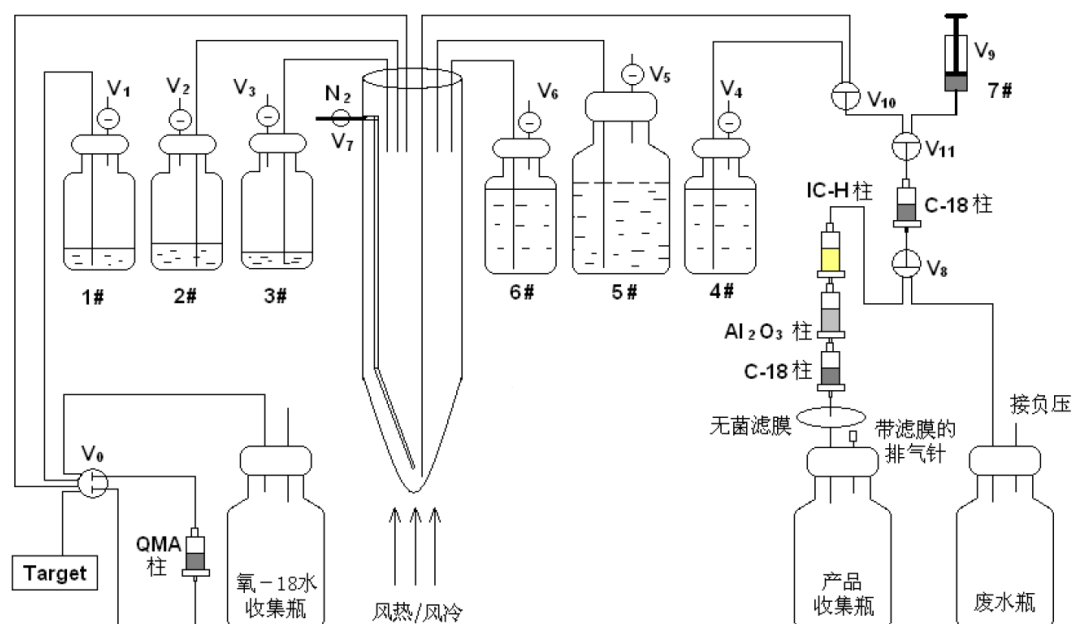
② 除水：淋洗结束后加热反应管使乙腈与水共沸进行除水。

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

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

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

⑥ 分包装、留样和质控：在分装热室内，采用自动或手动方式从产品瓶内抽取一定体积的药液（如：0.2mL）装入注射器或西林瓶内，放入铅盒或铅罐内并从分装热室内取出，通过传递窗送至放化质控室用于放射性分析，检测合格后，在分装热室内再按需要进行分包装和留样，分别用于病人PET检查使用和药品追溯性全检使用。



1#: 1.5ML K2.2.2/K₂CO₃ 2#: 2ML 无水乙腈 3#: 1ML 无水乙腈溶解的前体
4#: 10ML 水 5#: 30ML 水 6#: 10ML 水 7#: 1ML 2N NaOH 溶液

图 9-7 药物 FDG 合成流程图

分装热室：合成后的¹⁸F-FDG等放射性药物，经由屏蔽的专用管路自动传送到分装热室内的收集瓶内，收集瓶被预先放置在药品分装防护装置内，分装人员根据需要利用无菌器皿抽取一定活度（一般低于100mCi）的¹⁸F-FDG等药物，装入10ml或30ml的无菌西林瓶内，经压盖密封后放入铅制容器内。分装热室的内部是负压洁净百级的环境，并且具有良好的辐射屏蔽能力，分装人员通过分装热室正面手套孔操作，透过铅玻璃防护视窗来进行操作。分装热室及分装器示意图见图9-8。

热室设备间内拟设置1个分装热室，用来分装放射性药物。分装热室安置在合成热室旁，内屏蔽层采用铅板（正面≥70mmPb铅当量，其余四面屏蔽≥60mmpb），采用耐腐蚀不锈钢内胆，设有同箱体防护能力相当的铅玻璃观察窗。分装热室安装高效过滤器（滤除粒径≥0.3μm的微粒的过滤效率不低于99.97%），引至楼顶部经活性炭过滤后排放（医疗楼东侧，高度59.8m）。

药物分装过程也采用计算机全自动控制，无需人工干预，药物在自动分装模块中将根据预先设计的程序，将试剂分装到各个试剂瓶中，分装程序结束后，模块箱提示工作人员，此时工作人员戴着专用的手套，使用机械手将分装完成的试剂瓶装载到专用的铅屏蔽容器中（整个过程中类似在手套箱中操作），铅屏蔽容器采用42mm的铅当量屏蔽，铅屏蔽容器的尺寸为半径6cm，高16cm，铅容器盖子为旋转式卡扣盖子，该过程持续20min/次。

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



图 9-8 分装热室模块和药物分装器外观图

9.1.1.5 放化质控实验

(1) 热室：每制备一批次 F-18、C-11 等放射性药物后，在分装热室内，采用自动或手动方式从无菌收集瓶（产品瓶）内抽取一定体积的药液样品（如：0.2mL，用量 3.7~7.4MBq）装入注射器或西林瓶内，放入铅盒或铅罐内并从分装热室内取出，通过传递窗直接转到热室东侧的放化质控室用于放射性检验分析。

(2) 放化质控室：在质控柜内取出西林瓶，用点样管抽取样品（用量 3.7~7.4MBq）置于薄层硅胶板上，用乙腈展开后，即可以开始 TLC 检测（放化纯度检测）；点样 PH 试纸检测 PH 值范围；西林瓶剩余的样品可用于伽马能谱仪的检测（核素鉴别）；活度（浓度）的检测在分装热室内取样后可以直接测量，同时做外观检测；进行放射性检测时，一般正面安装有 L 型屏或铅玻璃，屏蔽

当量为 10mmPb, 用于质控人员的防护。本环节操作时间较短且放射性药物极少, 对工作人员的辐射影响较小, 基本可以忽略。完成后铅罐会盖上, 放在手套箱中自然衰变, 待药物衰变十个半衰期后, 放入专用塑料袋中在铅废物桶中暂存, 检测表面辐射剂量率达标后, 作为医疗废物处置。

9.1.1.6 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热室内的工作箱进行分装合成操作, 分装并屏蔽好的放射性药物通过东侧的药品传输专用梯送至地下一层核医学科。本项目中采用药物转运防护罐 (42mmPb) 和注射器转运防护箱 (25mmPb), 见图 9-9, 其中药物转运防护罐分为罐体、罐盖两部分, 适用于 10ml-30ml 产品的转运, 其屏蔽厚度为 42mmPb 当量。经屏蔽后, 防护罐表面剂量率低于 25 μ Sv/h, 1m 处剂量率低于 2.5 μ Sv/h。



图 9-9 PET 药物转运防护罐示意图

转运内容包括:

加速器生产的放射性药物通过传输管道输送到热室设备间内的工作箱进行分装合成操作, 分装并屏蔽好的放射性药物通过东侧核素专用梯送至地下一层, 传递窗送到核医学科诊断区高活室内, 进行病人 PET 诊断相关操作。

9.1.2 污染源描述

9.1.2.1 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, 质子在物质中的射

程较短，其射程仅为同等能量的电子射程的几十分之一到百分之一，故质子的穿透性很弱，很容易被物质阻挡，其外照射防护在本项目中不作考虑。贯穿辐射主要是中子和 γ 射线。

1) 中子

中子是回旋加速器的主要污染因子之一。质子轰击靶材料时发生 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ 等核反应，核反应发生的位置主要位于靶部位，在生成所制备核素同时，也产生最大中子能量约为 15MeV（峰值约在 2MeV）。

2) 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 的 γ 射线。

3) 正电子放射性核素的制备量

根据表 1 使用非密封放射性同位素规划，核医学科诊断区使用的 F-18 的日最大使用量约 $1.11 \times 10^{10}\text{Bq}$ （300mCi）。正电子核素药物半衰期都很短，衰减损失严重。按照回旋加速器每天最多打靶 2 次（早上 7:00-7:30，下午 1:00-1:30），考虑核素衰变和药物合成效率及将来 PET 检查量的增加，在回旋加速器打靶时，F-18 正电子生产量约需是实际使用量的 5 倍（PET 使用的年最大用量是按照平均患者注射量估算，即生产量是年最大使用量的 6.25 倍），即回旋加速器每天打靶产生 $5.55 \times 10^{10}\text{Bq}$ （约 1.5Ci）的 F-18 核素，能够保证合成的放射源药物能够满足后续的诊断和实验需要。同样，对于半衰期更短的 C-11、N-13 的裕量分别为 12 倍、50 倍。

回旋加速器每天最多制备 2 种核素，1 种为 F-18，另外是 C-11、N-13 之中的 1 种。制备 C-11、N-13 药物时，每天生产 3 次。不使用上述两种核素时，将根据病人数量，每天生产 1 次~2 次 F-18 药物。每年总的生产次数为 600 次（每天最大 3 次），其中 F-18 的生产次数每年最多 500 次，C-11、N-13 的年生产次数最多为 100 次。实际运行时，工作人员会根据诊断区的需求量，确定具体的打靶时间，从而控制放射性药物的制备量。本项目拟制备的几种放射性药物，均衰变释放 γ 射线，会对周围环境有一定的辐射影响。几种放射性药物的辐射特性见表 9-3。

表 9-3 本项目使用的显像放射性核素主要参数

序号	核素名称	毒性	半衰期	衰变类型	主要能量/平均能量 (keV)
----	------	----	-----	------	-----------------

1	F-18	低毒	109.8min	β^+ 、EC	β^+635 、 $\gamma511$
2	C-11	低毒	20.4min	β^+	β^+960 、 $\gamma511$
3	N-13	低毒	9.97min	β^+	β^+1190 、 $\gamma511$

(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 射线最高能量约为 10MeV，因此，不需要考虑 γ 射线再引起的活化。

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

①结构材料活化

回旋加速器引起活化的主要部位是束流损失较大处的部件，如束流管、偏转磁铁、结构材料。该设备使用的材质主要是铜、铝和不锈钢。产生的感生放射性核素主要是 ^{27}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。随着回旋加速器运行时间的增加，短寿命活化成份很快达到平衡状态，长寿命活化成份会不断累积，且达到平衡状态所需时间较长。

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

核安全医学所曾对某型号回旋加速器进行了检测，在打靶 1h 后，靶口处的最大剂量率为 280 μ Sv/h，1m 处的最大剂量率约为 5 μ Sv/h。可见，在设备维修和维护时，需特别注意活化部件的外照射问题。辐射工作人员（为厂家工程师）需佩带个人剂量报警仪，以防止长时间工作导致人员受照大剂量照射，厂家规定每月对个人剂量计进行检测一次，1mSv/月，每年不超过 10mSv，超过年度限值后就暂停维护工作。设备维修和维护都是由厂家维保工程师完成，不属于本评价范畴。

②空气活化

加速器厅的空气活化后，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。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。在正常工况下回旋加速器是不会排泄放射性废水的，仅当闭环水管冷却系统意外老化破损时有发生冷却水泄漏的可能。因此采用的处置方法是：在回旋加速水冷机组下方预先设置地坑，地坑底部预埋排水管与放射性废液处理监测系统连接。通过这些预埋的下水管道设施，意外破损时泄漏的冷却水被暂存在放射性废液处理监测系统收集处理，最后排到 1 号衰变池里。

中子引起加速器冷却水活化，产生的感生放射性核素主要是 ^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 。

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

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

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。

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

放化质控室会有少量剩余药液及冲洗废液，每批次产生量不足 20ml，单次产生量非常少，且放射性很低，但属于有机废液，这些废液收集于塑料桶内，暂存于实验室内，待积攒到一定量满足解控后由有资质的单位回收处理。

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

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

合成和分装放射性药物的专用热室，设有独立废气排放系统，废气经高效过滤器和活性炭过滤后，管道经排风竖井到达楼顶排放。回旋加速器机房和设备间分别经过过滤器过滤后并入另一套独立排风系统，管道经排风竖井到达楼顶排放。放射性药物合成和分装过程中，放射性物质挥发量通常低于总量的 1%。当传输系统发生气路、液路泄漏时，短期释放量会增加，

有可能会扩散到加速器机房和放化室内。为防止放射性气体对周围环境的污染，本项目除回旋加速器室设专用废气处置系统外，合成及分装热室还设置了独立排风处置系统，少量的放射性废气经过高效过滤器净化过滤（滤除粒径 $\geq 0.3\mu\text{m}$ 微粒的过滤效率不低于 99.97%）后，由单独管道引至楼顶经活性炭过滤后在 59.8m 高处排放。

（4）非放射性污染物

空气在射线强辐射作用下，吸收辐射能量并通过电离产生臭氧（ O_3 ）和氮氧化物（ NO_x ）。主要由空气重的二氧化氮（ NO_2 ）在光子照射下形成一氧化氮（ NO ）和氧原子（ O ），氧原子与空气中的氧气（ O_2 ）结合生成臭氧。同时，氮气（ N_2 ）分解成氮原子（ N ），氮原子与氧气作用产生一氧化氮和氧原子，氧原子通过下式反应生成臭氧，而一氧化氮通过与氧气和臭氧反应生成二氧化氮。

9.1.2.2 事故工况

（1）人员误入或误留回旋加速器大厅

回旋加速器工作人员误留或非工作人员误闯到正在工作中的加速器机房。由于管理疏忽，在未察觉机房内有停留人员的情况下开机；或加速器联锁装置发生故障时，可能会发生人员停留在正在运行的加速器大厅内，造成人员不必要的照射。停留人员受到中子、 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 1 号衰变池，当冷却水泄漏时，可将其导入到 1 号衰变池贮存。

二级冷却水为回旋加速器设备闭合循环，总水量大概 100L 左右。二级水冷却系统主要用于从不同系统中将热量带出，带出的热量在一级冷却系统中进行热交换。因此此部分水可能会造成严重放射性污染，必须通过专门放射性管道收集道衰变池。

一级水冷却系统同样使用闭合循环，一级水冷泄露可能会把加速器机房内部放射性物质带入排水，因此同样排入衰变池。此部分水量预估为 1 立方米。

为防止水流入其他区域，加速器机房内拟设置地漏，利用机房内管沟充当集

水沟保证水能及时排出。

(3) 靶破裂事故

在核素的生产过程中，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) 药物传递管道泄漏

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

(5) 同位素洒落

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

(6) 拟采取的风险防范措施

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

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

3) 若发生回旋加速器装置失灵、损坏、调试和操作失误及生产核素的过程中靶膜破裂，或核素传靶过程中的管子破裂，合成系统管道堵塞或泄漏等情况，加速器将立即自动停机，设备处于关闭状态，并且要经过 24 小时后，加速器才能重新启动或做维修处理。距离发生意外时，加速器机房内泄漏的微量的 F-18 已经过 13 个半衰期（保守以 37GBq F-18 考虑，经 24h 衰变后，残留量为 9.0MBq，此时，50cm 距离处的 γ 剂量率降为 5.15 μ Sv/h，人员可以接近并进行应急处理），泄漏的微量的 C-11 已经过 70 个半衰期，放射性活度衰减到豁免水平。若有必要，

可继续停机一段时间, 再进行换靶和去污。如发生传输管道脱落或破裂等导致放射性药物泄漏事故, 应及时采取去污措施防止污染扩散, 并对去污后的工作场所进行必要检测。

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

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

5) 靶破裂事故措施: 靶破裂会触发系统自动停机。报修后由厂家 (亿比亚 (北京) 粒子加速器技术有限公司) 维保工作人员来完成, 首先要确定生产的核素种类及轰击时间, 以便判断辐射剂量和等待时间。待辐射剂量满足安全要求时, 进入加速器室进行维修并佩戴个人剂量报警仪。具体需要收集和清除破碎的靶膜, 更换靶膜, 排查靶膜破裂的原因, 恢复使用。如发生靶膜破裂时, 此部分冷却系统为高纯氦气。氦冷却系统主要在轰击期间对真空腔真空膜和靶体靶膜之间进行冷却, 两个箔膜之间的氦气流提供了所必须的冷却。在打靶过程中破裂会造成放射性气体泄漏。如果是液体靶, 会有微量的高活度靶水溢出 (不超过 3ml)。靶水不会溢出到屏蔽体以外空间。即使溢出少量的放射性废气, 加速器机房设计为负压, 换气次数为不小于 4 次/小时。通过放射性排风管道排放到建筑物顶部, 经过活性炭过滤后高空排放。

6) 气体靶放射性泄漏: 药物传递管道为整根无接头独立传药管 (PEEK 管或不锈钢管), 直接从加速器靶出口通过预留的地下专用靶线屏蔽地沟连接至热室内, 所以可能存在泄漏的地方就是药物传递管道与加速器靶出口或热室内的二端连接处。加速器在轰靶或放射性核素传输过程中, 万一药物传递管道脱落而造成放射性泄漏时, 应立即封闭现场, 核素封存于热室内, 并向单位辐射事故应急响应领导小组报告, 领导小组根据事故的情况及时启动应急响应预案。现场工作

人员立即采取以下应急措施：

- ① 立即停止加速器运行或放射性核素传输活动；
- ② 撤离现场工作人员，封闭事故现场；
- ③ 对现场进行辐射监测,确定辐射安全边界；
- ④ 设置警戒标识，禁止无关人员入内；
- ⑤ 待放射性核素衰变 1 天后，C-11 已经过 70 个半衰期，放射性活度衰减到豁免水平，由辐射防护人员对现场进行辐射监测，确认无辐射危险后，工作人员可在辐射防护人员的监督下开展检修工作。
- ⑥ 加强回旋加速器相关设备的日常维护保养工作，定期检查或更换易损部件，杜绝此类事故的再次发生。

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

9.2 核医学科诊断区

9.2.1 X 射线诊断装置和密封校验源

本项目配套使用 1 台 PET/CT 装置和 2 台 SPECT/CT，属于 III 类射线装置，及拟配套密封源开展 PET 装置的定期校验，一般属于 V 类放射源，这 III 类射线装置和 V 类放射源对环境的影响很小，本评价报告对 III 类射线装置和刻度操作流程、环境影响进行简要分析。

9.2.2 放射性同位素显像设备与诊断流程

9.2.2.1 核医学扫描诊断装置

核医学是采用核技术来诊断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。本项目核医学科诊断区使用 Tc-99m、I-131 和 I-123 核素药物开展 SPECT 诊断，使用 F-18、C-11、N-13 核素药物开展 PET（PET/CT 或 PET/MR）诊断。

(1) SPECT 显像

SPECT 技术是把标记有发射单光子核素（如 Tc-99m）的重要生命物质（如糖、蛋白质、脂肪等）注射到人体内，然后借助 SPECT 装置进行扫描成像，以观察这些单光子核素在人体全身脏器的分布情况，以研究它们在人体内的代谢过

程，该技术已成为生命科学研究的一个有力工具。

SPECT 在癌症骨转移、冠心病、肺动脉栓塞、急性脑梗塞、甲状腺癌诊断和评价等方面，能够发挥不可替代的作用，CT 设备的主要功能是获取投影数据和重建断层图像，典型的 SPECT/CT 扫描装置如下图 9-10 所示。



图 9-10 SPECT/CT 机设备外观

(2) PET 显像

PET 作为一种先进的核医学影像手段，对于功能、代谢和受体分布等的显示具有优势，被称为“生化显像”或“分子成像”，利用核素示踪原理，在分子水平上，通过动态、定量的监测人体内部的生化变化来观察其功能状态，显示人体器官组织正常或病变。所以 PET 又称之为“生化显像”或“分子显像”。PET 正电子药物显像技术的应用实现了医学影像领域的功能显像和定量分析，而且具有灵敏度高，核素半衰期短，成像速度快等特点，为生物、基础研究、疾病的诊断、治疗预后的判断和保健提供了超前或提前的信息，对推动生命科学、现代医学和其他学科的发展具有重要的意义。

正电子药物 PET 显像剂按功能大致分为脑功能显像剂、心功能显像剂、肿瘤阳性显像剂等，其中 ^{18}F -脱氧葡萄糖（FDG）是目前应用最为广泛的正电子药物。FDG 可测定肿瘤、心脏及脑中的葡萄糖代谢，用于肿瘤、冠心病及神经/精神疾病的早期诊断、鉴别诊断及指导治疗。

1) PET/CT 显像

PET/CT 是由正电子发射型计算机断层显像仪（PET）和计算机断层 X 射线摄影术（CT）融合而成的最新高端分子影像设备，它同时具备 PET 和 CT 的检

查功能，在显示解剖结构、形态和密度等方面具有优势。将两种检查设备的结合起到优势互补、相互配合、互为对照的作用。PET 通过与 CT 结合，提高病灶定位的准确性。还有另一方面的价值，即可以大大缩短 PET 的检查时间，从而提高仪器和正电子药物的使用效率。

PET/CT 显像诊断观察肿瘤代谢异常明显早于其他影像学手段，其探测灵敏度更高，主要有以下几方面的优势及应用：（1）肿瘤的良好鉴别诊断，并为疑难的病灶提供准确的穿刺活检部位；（2）恶性肿瘤的分期和分级；（3）通过采用多种 PET 显像剂来确定肿瘤病灶的多元化代谢特征；（4）为恶性肿瘤的放射治疗（尤其是精准放疗）提供准确的定位；（5）对肿瘤各种治疗的疗效进行评估；（6）早期鉴别肿瘤复发；（7）为不明原因的转移性肿瘤寻找原发病灶；（8）恶性肿瘤的预后判断。

PET/CT 心肌显像是公认评估心肌活力的“金标准”，对梗塞区内的心肌可明确鉴别活性与非活性心肌，还能鉴别血管狭窄、斑块形成、钙化以及供血情况，能为心血管疾病的诊治提供指导，可以明显提高动脉搭桥手术的成功率，此外，还可对术后心功能恢复进行预测。

在肿瘤检查方面，用常规方法发现肿瘤时病变往往已进入临床的中晚期，极大的延误了患者最佳的治疗时机。PET/CT 全身检查，可以一次性明确全身各脏器情况，可实现肿瘤高危人群（肿瘤高发家族、肿瘤标志物异常人员）全身全方位早期肿瘤筛查的目的。此外，也可对肿瘤病人进行复查，有效地发现全身转移情况，了解治疗后肿瘤残留部分的性质等。

2) PET/MR 显像

PET/MR 是由正电子发射型计算机断层显像仪（PET）和磁共振成像（MRI）融合而成的最新高端分子影像设备，它同时具备 PET 和 MRI 的检查功能，且不受呼吸运动、血管搏动等的影响，不会影响图像质量。在软组织分辨率、检查的无创性等方面相比 PET/CT 更有优势。更为重要的是，其辐射剂量远远小于 PET/CT，是目前在细胞分子水平上进行人体功能代谢显像最先进的医学影像技术。

PET/MR 设备在肿瘤、心血管和神经系统疾病诊治中具有广泛的应用前景，特别是能够使脑肿瘤、上腹部肿瘤、盆腔肿瘤、儿科肿瘤、心脏功能评估、骨和软组织等疾病的早期诊断、疗效评价和预后判断会更加精准。PET/MR 比

PET-CT 的优势在于：

更加精准：真正实现等中心一体化协同采集，压缩时空平台实现时间分辨率极速融合、空间分辨率精准匹配。

更加高效：PET/MR 一次检查可获取完整的解剖、功能、生理信息，完美实现解剖结构与代谢功能信息的实时精准融合。

更多信息：PET 多种特异性分子探针、MR 多参数多序列可提供更丰富的信息。

更加安全：正电子药物剂量减少，PET/MR 中 MR 扫描无辐射，故 PET/MR 辐射剂量比 PET/CT 可降低 60% 以上，更适合儿童、需要多次复查的肿瘤患者、肿瘤高危人群的筛查。

PET/MR 在颅脑肿瘤、神经内分泌肿瘤、胰腺癌、前列腺癌、乳腺癌、肝癌、宫颈癌、头颈部肿瘤、多发性骨髓瘤、淋巴瘤、宫颈癌等肿瘤疾病诊断方面具有显著优势。在肿瘤的诊断、TNM 临床分期、治疗后再分期，肿瘤治疗疗效评价和监测，良、恶性疾病的鉴别诊断，引导肿瘤穿刺活检，肿瘤放疗靶区勾画，不明原因发热、肿瘤标志物升高等疑难病症的诊断，肿瘤高危因素患者的肿瘤筛查等方面也可发挥重要的作用

典型的 PET 扫描装置如下图 9-11 和图 9-12 所示：



图 9-11 PET/CT 机设备外观



图 9-12 PET/MR 机设备外观

9.2.2.2 工作流程

(1) 放射性同位素显像工作流程

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（如原子高科股份有限公司）订购标记的放射性药物（试剂 Tc-99m、I-123 和 I-131 厂家送来时已根据当天使用情况分装好）；PET 用核素大部分都直接由地下三层回旋加速器室提供（考虑到回旋加速器故障等情况，不大于 10% 的 F-18 外购，外购的路径与试剂 Tc-99m 一致），按照实际使用量直接从专用电梯进入核医学，

然后送到高活室，F-18 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手套箱内进行分装。

注射、口服或吸入：在注射室内，打开铅屏蔽盒，取出一次性注射器或口服胶囊，给患者注射或口服标记放射性药物，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，其中镓气制备内容见以下章节。

检查：病人在给药后病人候诊区等候（如 F-18 候诊时间约 40min~90min，短半衰期的无需候诊），待药物有一定程度的代谢后，进行 PET 扫描检查（PET/CT 检查一般不超过 20min，PET/MR 检查时间 20min~60min，平均不超过 40min）；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，留观片刻（SPECT/CT 患者一般不用留观），如显像符合要求即离开核医学科。

（2）镓气制备操作步骤和工艺流程

核医学科镓气发生器操作步骤和工艺流程为：订货→质检→设备充电→连接氙气→气体制备→施给气体→清除残余气体。

订货：提前一天根据预约的肺通气病人数，向药品公司订购 Tc-99m 放射性药品。

质检：在高活室手套箱取 Tc-99m 淋洗液（用量为 370~740MBq，厂家已按每人份分装好）。

设备充电：镓气发生器插入电源输入端，打开电源主开关为设备电池充电。

连接氙气：在镓气体制备前插上与镓气发生器相连的气体输出管，并确保自锁机构锁定，转动主调节器阀直到低压表指示在绿区。

气体制备：首先打开抽屉，将坩埚固定在接触器上，再将不大于 740MBq Tc-99m 液体注入，关闭抽屉后按下开始按钮，在充满氙气的密闭装置内通电加温，在 2550°C 条件下加热 15s 蒸发得到 Tc-99m 气体，产生碳包裹的 Tc-99m

纳米颗粒 (technegas), 气体制备完成后断开主电源。气体制备过程中约有 30% Tc-99m 液体转化为 Tc-99m 气体, 其中患者吸入体内的活度大约 37MBq, 其余沉积在石墨坩埚。

锝气的施用: 向患者说明检查的整个过程, 以取得患者的配合。将 PAS 的管道开端接到发生器上, 让患者用嘴咬住口管, 用鼻夹夹住鼻子, 通过雾化器回路进行正常呼吸, 按下给气按钮施给病人 Tc-99m 气体, 在所要求的放射性计数达到要求 (一般 3~5 个呼吸周期) 后松开给气按钮, 嘱咐病人进行 5~6 个呼吸周期的呼吸, 以清除管道和病人气道中的 Tc-99m 气体, 病人呼出的少许气体由 PAS 过滤装置收集后按放射垃圾处理。

残余Tc-99m气体清除: 病人Tc-99m气体施给完成后, 再次接上氩气和电源, 发生器内过滤器装置清除残余锝气体。核医学科肺通气检查每周约2例病人, 每个病人操作量不大于740MBq, 每次制备的Tc-99m放射性气体施给一位病人, 施给过程均在核医学科锝气室内集气罩下进行。

(3) 甲状腺摄碘功能测定

- 1) 医生开申请单;
- 2) 受检者到核医学登记台预约, 医生询问病史, 告知注意事项;
- 3) 确定检查日期后, 订药: 131-碘胶囊 (统一规格, 活度为0.333MBq), 送药时间为检查当日;
- 4) 检查当日, 24小时甲状腺吸碘率测定步骤如下:
 - ①测本底计数和标准源 (131-碘胶囊) 计数;
 - ②受检者口服0.333MBq后, 随后离开核医学科, 2小时后、4小时后、6小时后和24小时 (第2日) 后返回核医学科, 分别进行甲状腺摄碘功能测定 (检查时间60s);
 - ③测完后打印报告, 上级医生审核签字后发报告。

(4) PET 刻度源质控流程

本项目 PET/MR 拟配备 1 枚活度为 $9.25\text{E}+7\text{Bq}$ 的 Ge-68 密封源, PET/CT 拟配备 1 枚活度为 $1.11\text{E}+8\text{Bq}$ 的 Ge-68 密封源, 都是 V 类放射源, 由物理师每周或两周一次质控使用, 质控时物理师把密封源从源库按要求取出放到 PET 检查床指定位置后回到控制室按规定程序进行扫描, 扫描结果都通过后结束质控, 把密封源取下运回源库。平常不使用时都储存在储源室内, 并至少配有 20mmPb

的铅桶屏蔽。

9.2.3 放射性核素使用量

PET 检查使用 F-18 药物的用量不大于 370MBq/人,每个检查日最多实施 PET 检查 30 人次,每周工作 5 天; N-13、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。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 40 人次,每周工作 5 天(另肺通气检查每周约 2 例病人,每个病人操作量不大于 740MBq); I-123 药物的用量为 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 1 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;用于甲状腺功能检查的 I-131 使用量 5 名病人/天,用量按 0.333MBq/人,每周工作 2 天。

9.2.4 放射性核素特性

(1) F-18、N-13、C-11 半衰期分别为 109.6min、9.97min、20.4min,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; I-123 半衰期为 13.13h,衰变方式是 EC,发出主要能量为 159keV 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。本项目使用的放射性核素主要物理参数列于表 9-4。

表 9-4 本项目使用的显像放射性核素主要参数

序号	核素名称	毒性	半衰期	衰变类型	主要能量/平均能量 (keV)
1	F-18	低毒	109.8min	β^+ 、EC	β^+635 、 $\gamma 511$
2	N-13	低毒	9.97min	β^+	β^+1190 、 $\gamma 511$
3	C-11	低毒	20.4min	β^+	β^+960 、 $\gamma 511$
4	Tc-99m	低毒	6.02h	IT	$\gamma 141$
5	I-123	低毒	13h	EC	$\gamma/189$
6	I-131	中毒	8.03d	β^- 、 γ	β^-606 、 $\gamma 364/360$

9.2.5 使用放射性核素污染途径分析

9.2.5.1 正常工况的污染途径

(1) 贯穿辐射。在进行药物交接、质检、分装、注射(服用)、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等停留的公众可能受到核素释放出的 β 射线、 γ 射线的影响。因此，核素诊疗项目的污染因素主要是产生 γ 射线和 β 射线。Tc-99m气体制备过程施用中，工作人员吸入Tc-99m气溶胶造成内照射。

(2) 使用放射性物质过程中，会产生一定量的放射性废水和放射性固体废物。放射性废水主要来自于卫生间冲刷废水，高活室洗手废水、冲洗拖布废水、应急废水。放射性固体废物主要来源于患者使用的注射器、棉棒、一次性个人防护用品和垫布等物品。项目产生含放射性废物收集于高活室铅桶内暂存。

(3) 本场所使用除了 F-18 等正电子核素外，Tc-99m 等放射性药物都是向专业公司购买。一般都在热室设备间内分装好后转运到注射室，特殊情况下会在手套箱内只对 F-18 正电子核素进行少量分装。F-18 等放射性药物为液体溶液，不易挥发，且分装时间较短，故使用过程中产生的放射性气体十分微量。

本项目使用的 I-131 属于挥发性核素，但是为液态的碘 ^{131}I 化钠溶液或者胶囊，挥发性相对较低。其它核素的挥发性更小，如 ^{18}F FDG（脱氧葡萄糖的氟代衍生物）为液体溶液，不易挥发，且分装时间较短，故使用过程中产生的放射性气体十分微量。

9.2.5.2 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。核医学科场所在分装室暂存的放射性同位素，采用视频监控和门禁管理，储源室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。

操作不当或患者不配合引起的Tc-99m气溶胶弥散：患者在吸气时与工作人员配合较差，导致Tc-99m气体泄漏或逸出，或者吸药结束后工作人员未要求患者继续呼吸以清除管道和患者气道中的Tc-99m气体，造成Tc-99m气体弥散，得

气发生器装置或阀门泄露造成Tc-99m气体泄露或逸出。工作人员应嘱咐患者正确的吸气方式，严格遵守操作规程，吸入管道或面罩连接好患者之前，不能开启病人通气开关，停止吸气吸入后，继续连接吸入器并在传送开关开启状态至少呼吸5次，以清除管道和病人气道中的放射性气体，石墨坩埚易碎，要谨慎安装并确保接触良好。

9.3 核医学科治疗区（放射性药物门诊和住院治疗）

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，未被甲状腺摄取的 I-131 多在 48h 内由肾脏代谢排出，机体内残留的活度约为给药量的 10%~20%。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， β 粒子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。预计全年甲癌病人数量不大于 560 例（每批次最多收治 8 例，每年最多 70 批次）。

Sr-89 是一种亲骨性放射性核素，用于治疗骨转移瘤骨痛，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) 用于治疗晚期去势抵抗性且有骨转移的前列腺癌。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

放射性药物经由静脉注射或口服方式进入受检者体内，药物分布到特定器官并释放 β 射线，从而抑制或破坏病变组织，达到治疗目的。治疗工作流程如下：向有相应资质厂家订购 Sr-89、Ra-223 注射液或 I-131 胶囊→患者（在注射区）施予药物→要求门诊治疗患者服药后马上离开医院（无需留观）。

预约患者：提前制定核素治疗工作计划，通知患者。

订货：提前一天根据预约的检查人数及诊断项目，用核素向药品公司订购标记的放射性药物。

接收药物：外购药物由药品公司负责把药品送至地下二层，沿通道，经缓冲间运至病房高活室门口。

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和活度，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：Sr-89、I-131 药物不分装，由供药公司已按照人份分装。Ra-223 药物在高活室手套箱内按患者体重进行分装。

注射或口服：在注射窗口防护下，给受检人员注射 Sr-89、Ra-223 治疗药物。在治疗室窗口，患者口服 I-131 胶囊。

(2) 甲癌病房治疗

①甲状腺癌患者全切术后，病理若提示分化型甲状腺癌，建议到核医学科就诊；

②核医学科接诊后，开具相关检查，根据危险分层决定是否进行碘-131 治疗；

③确定治疗日期，开具住院证明；

④治疗前准备。治疗前应向患者详细介绍其治疗过程和治疗前准备、治疗后的注意事项，如 I-131 治疗前 3~4 周停用含碘食品、药物等，患者确认后应签署治疗同意书；

⑤治疗用药前，进行“三查五对”，治疗内容必须执行医嘱，核对患者姓名、

性别、年龄、剂量、治疗时间，检查治疗项目、治疗核素、治疗内容。

⑥患者到服碘室窗口，听工作人员指挥自行服用 I-131 口服液（待胶囊普及后患者直接口服胶囊），服药之后进入相应防护病房。

⑦甲癌患者需要在防护病房内住院 3~4 天，离院前进行剂量率测量，确保低于 400MBq 方可出院。出院前医护人员发放 I-131 治疗患者告知书，告知患者出院后注意事项（例如与家庭成员距离，出行、上班避免与他人长时间接触等）。

⑧患者出院后，医护人员及时更换床单、被套、枕套，上述物品按照放射性污染物的规定处理。

⑨部分出院一周后回院进行全身显像；服用 I-131 一月后，返核医学门诊复查，检测甲状腺激素，调整优甲乐药量。

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，经卫生通过间运至病房服碘室贮存，通过自动分装仪分装后按要求给患者口服（胶囊普及后患者直接口服胶囊，无需分装）。

（3）碘放射性溶液自动分装仪

本项目拟配备碘放射性溶液自动分装仪（型号待定），辅助工作人员实施甲癌病人治疗量的自动化服药，实现碘放射性溶液的自动稀释、定量分装及活度在线测量等操作工作。碘自动分装仪内置有活度计装置，可直接进行在线的活度测量，计算机按照活度测量的结果反馈控制采样，无需得到母液的活度数据就可以实现甲癌的准确给药。工作人员使用自动分装仪分装后准备给病人服用。工作人员在分装仪一侧，通过铅观察窗，指导对面一侧的病人服药。



图 9-13 某两种型号的碘放射性溶液自动分装仪外观图

9.3.3 放射性核素使用量

（1）门诊治疗

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 2 名病人/天，每周 1 天，148MBq/病人；用于治疗甲亢的 I-131 使用量最多为 5 名病人/天，每周 2 天，370MBq/病人；Ra-223 使用量最多为 2 名病人/天，每周 1 天，6.6MBq/病人，每个患者一般共注射 6 次（隔月一次）。

(2) 甲癌治疗

I-131 甲癌治疗使用的含 I-131 的放射性药品主要为碘[I-131]化钠溶液（胶囊普及后患者直接口服胶囊），用量通常为 80mCi、100mCi、150mCi，个别用量达 200mCi。

施行甲状腺全切术或次全切术患者，通常行 I-131“清甲”或“清灶”治疗。“清甲”是指用 I-131 摧毁术后残留的正常甲状腺组织，“清灶”是指用 I-131 治疗甲状腺床残留甲状腺癌、甲状腺床复发灶和转移灶。“清甲”的剂量较低，为 30~100mCi，“清灶”的剂量较大，甲状腺癌复发或淋巴结转移的治疗剂量为 100~150mCi，少数肺部或骨转移治疗剂量可达 200mCi。

尽管“清灶”治疗的 I-131 用量大，但是蓄积进入甲状腺的量少，多数很快从体内排除；“清甲”治疗的 I-131 尽管用量少，但是蓄积进入甲状腺份额相对多，在体内滞留时间相对较长一些。汤敏敏等（日尿排泄 I-131 值估算甲状腺癌患者体内残留活度，中国医药前沿，2013，3（6）:8）报道，20 例“清灶”治疗患者平均住院时间为 3.1d，20 例“清甲”治疗患者的平均住院时间为 1.9d。

表 9-5 甲癌患者“清甲”治疗后体内残留活度（MBq）

时间	甲状腺 (残留率%)	非甲状腺 (残留率%)	合计 (MBq)	备注
0	4.11	95.89	3700	“清甲”剂量30~100mCi，按100mCi计算
24h	2.9	25.3	1043	
48h	2.0	6.7	322	第2d后，低于400MBq，达到出院标准
72h	1.4	1.8	118	

表 9-6 甲癌患者“清灶”治疗后体内残留活度（MBq）

时间	转移病灶 (残留率%)	非甲状腺 (残留率%)	合计 (MBq)	备注
0	1.74	98.26	7400	“清灶”剂量150~250mCi，保守按200mCi计算

24h	1.1	52.3	1976	
48h	0.7	13.9	540	
72h	0.5	3.7	155	第3d低于400MBq，达到出院标准

依据表 9-5 和表 9-6 估算结果，甲癌 I-131 治疗患者住院 3d 后，都可以满足出院标准，设 8 间碘病房，采用预约方式入院，预计全年甲癌病人数量不大于 560 例（每批次最多收治 8 例，每年最多 70 批次）。

根据中国原子能院开展的《I-131 核素治疗的环境影响及管理对策》，调查 7 期共 44 名甲癌患者，平均用药量约为 118mCi，故本项目保守按照人均用量 4.44GBq（120mCi）核算场所使用量和场所等级。本项目屏蔽防护保守按照 5.55GBq（150mCi）进行设计。

9.3.4 主要放射性核素特性

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。本项目使用的放射性核素主要物理参数列于表 9-7。

表 9-7 本项目使用的治疗放射性核素主要参数

序号	核素名称	毒性	半衰期	衰变类型	主要能量（keV）
1	I-131	中毒	8.03d	β 、 γ	β 606、 γ 364
2	Sr-89	中毒	50.5d	β	β 1495.1
3	Ra-223	极毒	11.43d	α	11.7/83.8/269.5

9.3.5 使用放射性核素污染途径分析

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。I-131发生 β 衰变时伴随发射364keV的 γ 射线，其他核素 α 、 β 衰变时发射 γ 射线，因此，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等核素释放出的 γ 射线的影响。

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，解控后清洗和消毒、重复使用。其他放射性废物暂存后，达到解控水平后办理清洁解控，之后按普通医疗废物处置。

④放射性废气。使用的I-131属于挥发性核素，但是本项目均为碘 ^{131}I 化钠胶囊或溶液，挥发性相对较低。其它核素的挥发性更小，都为液体溶液，不易挥发，且分装时间较短，故使用过程中产生的放射性气体十分微量。

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）随呼气进入空气中，故碘病房需安装通风系统，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，发生遗失或被盜。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 核医学科辐射安全与防护

10.1.1 项目选址与合理性分析

本项目北京清华长庚医院二期核医学科项目包括：地下三层的正电子核素药物制备区（含放化质控室），地下一层的核医学科诊断区和核医学科治疗区，周围 50m 区域除了东侧和南侧部分为院外马路区域外，其它都是医院内部。

（1）地下三层正电子核素药物制备区东侧为通风井，南侧为地下土层，西侧为送风、排风机房，北侧毗邻停车位。回旋加速器室东侧毗邻控制室和配电室，南侧为地下土层，西侧毗邻通道，北侧毗邻热室设备间，机房上方为汽车通道和停车位，下方为地下土层。

（2）地下一层核医学科分为东侧核医学科诊断区、西侧核医学科治疗区和北侧的办公区，地下一层核医学科诊断区东侧为预留的同位素实验室，南侧为汽车坡道，西侧为地下土层，北侧为核医学科办公场所，隔公共走廊外为放射科和放射治疗科，楼上为院内路面，楼下为停车库。门诊显像患者从东北侧进入核医学科（病房患者从西北侧进入病房），外购核素入口、病患出口位于核医学科的西南部，通过患者专梯直通一层地面。回旋生产放射性药物由地下三层专用核素电梯送至地下一层高活室，使用放射性同位素过程中对周围环境和公众的影响很小。

项目选址充分考虑了周围场所的安全，不邻接产科、儿科、食堂等部门等及人员密集区，尽可能做到了集中设置，出口避开了门诊大厅、收费处等人群稠密区域，总体认为该项目核医学科选址合理。

10.1.2 场所平面布局与分区

10.1.2.1 核医学科场所布局

正电子核素药物制备区、诊断区和治疗区场所按照 3 个独立场所进行布置，均有明确的监督区和控制区划分，工艺流程连续完整，且有相对独立的辐射防护措施。设计时考虑了以下因素：

（1）正电子核素药物制备区设有单独的辐射工作人员通道，与核医学科诊断区、治疗区患者不交叉。药物场所设置了回旋加速器机房、控制室、设备间、气瓶间、热室设备间（药物合成和分装）和放化质控室，满足 GBZ120 标准要求

的“正电子药物制备工作场所至少应包括回旋加速器机房工作区、药物制备区、药物分装区及质控区等”要求。

(2) 核医学科诊断区布置在药物制备场所的楼上(地下一层), 之间拟配有专门药品传输梯通道(只在地下三层和地下一层开门), 便于放射性药物从制备场所转移到使用场所, 并有效缩短了药物转移距离, 也符合相对集中的原则。

(3) 诊断区根据诊疗流程, 合理设计各功能房间的布局, 4 台扫描设备的控制区集中布置, 高活室设在每个场所的一端, 可防止交叉污染。

(4) 诊断区设有相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。患者路径单向设计, 从东北侧独立入口分别进入核医学 SPECT 区域和 PET 区域, 依次完成注射、候诊、检查和留观活动后, 从西南侧出口离开核医学科。给药后患者与给药前患者不交叉。医护人员设有专用的通往高活室、控制室和办公区的通道, 和给药后患者路径不交叉。医护人员进入控制区的出入口设立了缓冲区, 用来更换工作服和工作鞋, 防止放射性污染扩散至控制区外。放射性废物都是每周一早晨(患者检查前)转移至废物间, 可避开与患者间的影响。

(5) 核医学科治疗区设有住院病房和门诊治疗, 也设计了患者单向流动的路径, 患者从西北侧入口进入病房区域或门诊治疗区域, 住院或门诊治疗结束后, 住院患者经检测体表剂量率合格后从西南侧出口离开。病房配置了高活室、给药室、病房、污洗间、废物间、缓冲间等必要的功能场所。放射性废物每周一早晨转移至废物间(病房内废物下一批治疗患者入住前转移至废物间), 可避开与患者间的影响。

(6) 核医学科工作人员办公场所设在地下一层核医学科北侧, 与诊断区、药物制备场所和病房这四个场所之间设有通道, 医护人员可以方便到达 3 个场所。

从功能分区来看, 患者候诊、工作人员办公、放射性操作等区域划分明确, 且相对隔离, 满足了核医学科分区管理的要求, 尽可能避免公众和医护人员受到不必要的辐射照射。

核医学科内部设置的 3 个放射性工作场所相对独立, 分区明确。在控制区与普通场所之间采用实体屏蔽或者缓冲区隔离, 医护人员通道和患者通道相对独立且没有交叉, 有效避免了医护人员受到不必要照射。

在放射性操作场所内部设计了辐射防护门、铅玻璃观察窗, 排风设施和放射性废水收集及暂存设施。此外, 还配备有热室、铅玻璃观察窗、防辐射实体屏蔽、

铅罐、铅屏蔽注射窗、废物桶等安全防护设施、器材，以及配备铅衣、铅帽、铅围脖、铅手套、铅眼镜等工作人员防护用品。

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

10.1.2.2 正电子核素药物制备区及质控场所分区

正电子核素药物制备区位于地下三层东南侧，设有回旋加速器室及配套的水冷设备间、配电室、控制室、气瓶间、热室设备间、拆包间、洗消间、缓冲间、一更、二更、更衣缓冲室、放化质控室、废物间、药品传输梯、空调机房、弱电间，以及走廊等。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求，正电子核素药物制备区的辐射分区如下，平面布局及辐射分区(控制区、监督区)见图 10-1 所示。

控制区：包括回旋加速器室、洗消间、热室设备间、缓冲间、一更、二更、放化质控室、废物间、运输药物电梯、设备间。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：控制室、缓冲更衣间、配电室、气瓶间、北侧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。

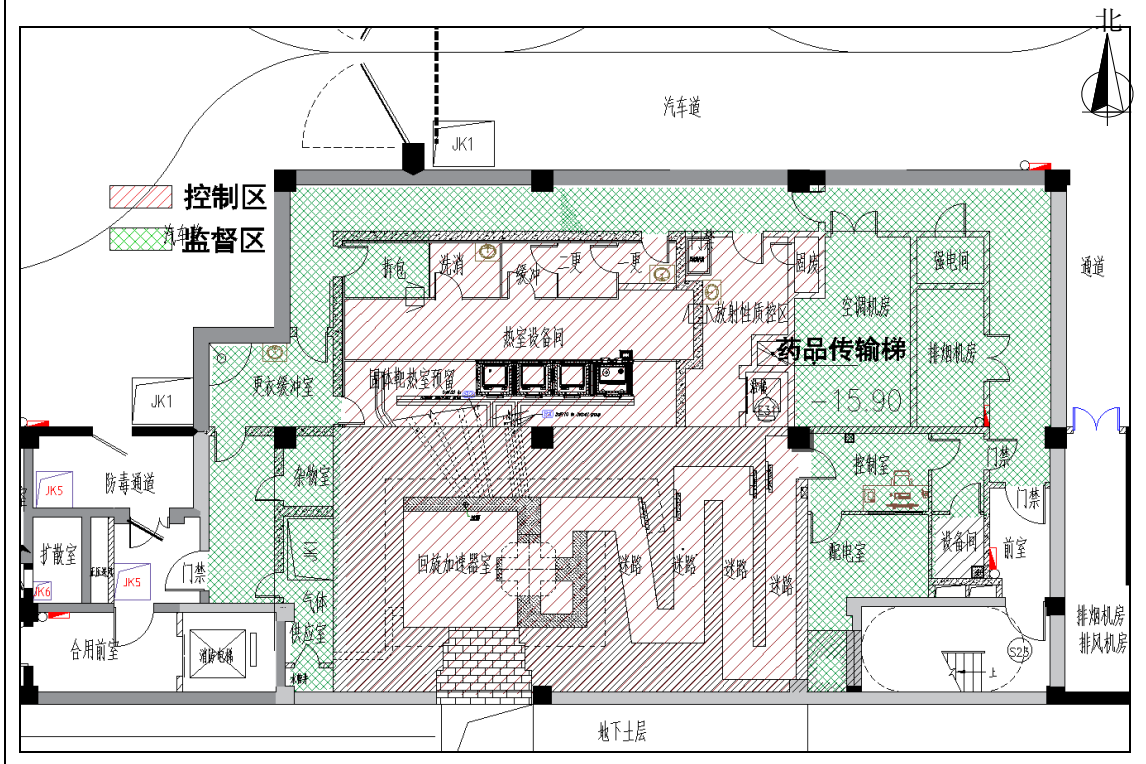


图 10-1 地下三层正电子核素药物制备区布局与分区示意图

10.1.2.3 核医学科诊断区与分区

核医学科诊断区使用核素 F-18、Tc-99m 等核素开展核素显像检查，核医学科诊断区布局与分区见图 10-2。按照使用功能区划设计为三个分区：

(1) 接诊区：包括注射前候诊区，患者及其陪护人员由东北侧人员入口处进出该区域。

(2) 核素诊疗工作区（控制区），包括抢救兼运动室、肺通气兼甲功室、高活室、储源库、PET/CT 室、PET/MR 室、2 间 SPECT/CT 室、4 间高能候诊室、1 间低能候诊室、废物间、给药后患者通道、抢救室、留观室等。该区出入通道拟安装单向门禁系统。

(3) 监督区，包括控制廊。

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。

核素诊断区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断的辐射安全管理的要求。

监督区和控制区拟设有多个门禁隔离，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。

高活室配套有手套箱，废气有组织在楼顶排放。诊断区域配套使用 1 号衰变池，诊断患者的排泄物及控制区产生的其它废水、应急淋浴废水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，达到解控水平后办理清洁解控，可有效减少放射性固体废物对环境的影响。

10.1.2.4 核医学科治疗区分区

核医学科治疗区规划使用核素为 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监督区、核素治疗操作区和住院病区（控制区），监督区和控制区通过缓冲区和门禁隔离。具体使用如下：

a) 监督区，包括走廊、缓冲区等。

b) 核素治疗操作区（控制区），包括工作人员高活室、服药室、病房（含卫生间）、抢救处置室、放射性废物库、清洁间、污存污洗、门诊治疗留观室（含卫生间）、放射性污水泵间、给药后患者走廊等。

c) 住院病区，设8间甲癌病房，共8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。核医学科治疗区平面分区图见图10-3。从功能分区来看，普通办公区、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，达到解控水平后办理清洁解控，可有效减少放射性固体废物对环境的影响。

10.2 工作流程及路径

10.2.1 正电子核素药物制备区工作流程及路径

（1）回旋加速器制备放射性药物工作流程

根据诊疗需要，确定利用回旋加速器制备 PET 药物的种类和数量→调试回旋加速器至工作状态→填充靶→打靶→传输正电子核素至热室设备间合成热室→标记合成PET 药物→质检合格→分装PET 药物（F-18 一般 100mCi 整瓶转运到核医学科诊断区高活室）→诊断区使用。

（2）工作人员路径

➤ 药物制备人员: 药物制备人员在地下三层缓存更衣室更换鞋和工作服后进

入药物制备区域→一更、二更、缓冲间到达热室设备间开展放射性药物制备（回旋加速器制备）、分装工作→放射性药物转移至使用场所（PET 区域高活室）→工作结束，在更衣室更换工作服、工作鞋，离开药物制备区。

➤ 控制室操作人员：

工作人员由在地下三层缓存更衣室更换鞋和工作服后进入→由走廊到达控制室，完成工作后从原路离开。

（3）放射性药品转移路径

回旋加速器制备的 F-18、C-11、N-13 正电子核素→由地下管沟敷设的毛细管气动传输至热室设备间合成热室内→在合成热室中自动完成标记和合成→传输至分装热室→分装热室内分装→转运防护罐（42mmPb）内→由药品传输梯运到地下一层→再经传递窗转移至高活室。

（4）放射性废物转移路径

1) 热室设备间内均设置一个含20mm铅的废物桶（1L）→存放放射性废物→于每周一早晨转移至放化质控室东侧废物桶，设置2个5mmPb废物桶（10L），轮流暂存放射性废物→放置30d后按照A类放射性废物解控为医疗废物处置→详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括废物分类、所含核素名称，重量，暂存起止时间，表面污染和辐射剂量自测结果，废物处置日期，处置操作人员，废物去向，部门审核人员等内容。

2) 回旋加速器机房内设置一个含50mm铅的废物桶（10L）→存放废弃的靶箔片和真空箔片等→至少放置一年，送交城市放射性废物库。

（5）放射性废水暂存和排放流程

热室设备间合成放射性药品时产生的少量放射性废水，以及回旋加速器事故情况排放的冷却水（地漏）→地下三层回旋加速器室西侧专用集水坑→通过污水提升设备→放射性废水1号衰变池暂存→满足要求后排至医院污水处理站处理→市政污水管网。

（6）放射性废气收集与排放流程

药物制备场所共计有3套通风系统，废气经管道组织，由管道井延伸至2期医疗楼楼顶处排放。具体如下：

1)回旋加速器机房和设备间→独立通风系统→活性炭过滤器过滤→医疗楼楼顶处排放；

2) 热室设备间、放化质控室等控制区→独立净化空调通风系统→活性炭过滤器过滤→医疗楼楼顶处排放；

3) 热室设备间7个热室（含预留的4个热室）、放化质控室层流通风橱→独立通风系统→高效过滤器→活性炭过滤器过滤→医疗楼楼顶处排放；

通风系统要求：1) 热室和回旋加速器机房内保持负压；2) 热室安装高效过滤器，过滤效率大于 99.97%（对粒径大于 0.3 μm 的气溶胶）；排风系统中放置活性炭过滤器，过滤效率不小于 90%；3) 排气口设在医疗楼楼顶，排放高度 59.8m，满足要求。

为便于管理、减少交叉污染，本项目在布局时进行了优化，已尽可能合理安排人流、物流的流向。人流通道主要位于环形走廊内，辐射工作人员由更衣缓冲间，从走廊进入加速器控制室和热室设备间。物流通过热室设备间东侧药品传输梯与楼上相连，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。设置有固废间，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，本项目同位素场所的布局是合理可行的。回旋加速器室人流物流示意图见图 10-4。

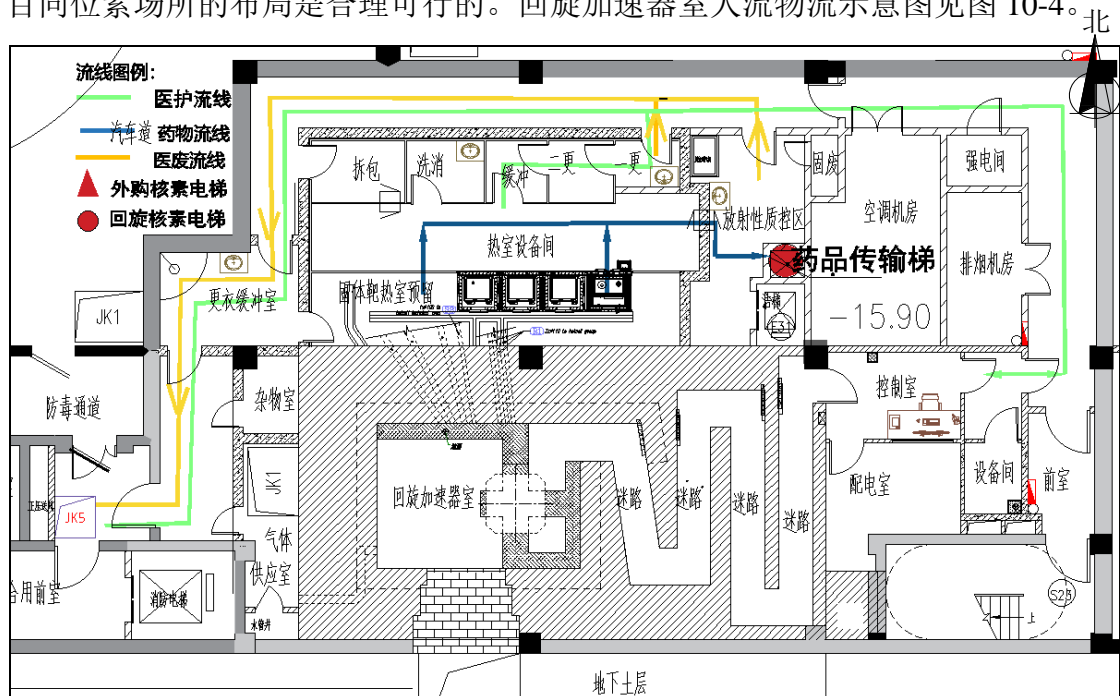


图 10-4 人流物流示意图

10.2.2 核医学科诊断区工作流程及路径

核医学科诊断区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、物流示意图见图 10-5。

(1) 核素SPECT显像诊断流程

患者乘电梯到达地下一层→在接诊前厅候诊→由患者入口（设单向门禁）进入检查区→在注射室接受药物注射、口服（或者肺通气室接受雾化吸入）→做运动负荷后或者直接在 SPECT 候诊室休息→按医嘱要求排尽小便→进行 SPECT 扫描检查→检查完毕，根据地面引导由西南角离开核医学科。

(2) 核素 PET 显像诊断流程

患者乘电梯到达地下一层→在接诊前厅候诊→由患者入口（设单向门禁）进入检查区→在注射窗口接受药物注射→分别在 PET/CT 候诊室或 PET/MR 候诊室休息→按医嘱要求排尽小便→分别进行PET/CT 或PET/MR 扫描检查→检查完毕，在留观室留观片刻→根据地面引导由西南角离开核医学科。

(3) 甲状腺摄碘功能测定流程

患者在候诊区进行登记→在注射前候诊区候诊→由患者入口（设单向门禁）进入检查区→在甲功室接受药物注射→甲功室测量→检查完毕→根据地面引导由西南角离开核医学科。

(4) 核医学科人员工作路径

工作人员乘北侧医护专用电梯到达地下一层→进入办公区域→医师进入阅片室和诊室，技师进入控制廊，护士由缓冲间进入高活室→医师出诊、阅片或出具诊断报告，技师进行摆位和扫描，护士开展药物接收、质检、分装和注射操作→工作结束后离开核医学科诊断区。

(5) 放射性药品转移流转路径

外购的放射性药物：放射性药物由供药公司从患者出口电梯运至地下一层核医学科→由核医学科西侧患者出口门进入核医学科 SPECT 区域、PET 区域→经缓冲间进入高活室，在高活室内，核医学科药品管理员与送货人员办理“点对点”交接验收手续，并记录药品规格、批次、数量以及收货时间→在储药室暂存，后续开展显像工作。

自制的 PET 药物：自行合成的放射性药物在地下三层回旋制备场所分装热室内分装到安瓶内，每份一般不大于 100mCi→置入 42mmPb 转运铅防护罐内→由药品传输梯运到地下一层→经高活室与走廊之间传递窗转移至转运至诊断区的 PET 区域的高活室→转入手套箱内→开展显像工作。

(6) 诊断区放射性废物转移路径

注射窗旁设置 2 个废物桶（20mm 铅当量和 5mm 铅当量各 1 个），存放注射器、包装物、棉棒、一次性用品等放射性药物，5mm 铅当量的铅废物存放 I-131 的包装物等→每周一早晨转移至各自场所内的废物间并标注日期→废物间设置 4 个 5mm 铅当量的废物桶（20L），轮流暂存 A 类和 B 类放射性废物→A 类放射性废物放置一个月后解控为医疗废物处置、B 类放射性废物暂存 10 倍核素半衰期（含 I-131 核素放射性废物暂存 180 天）后解控为医疗废物处置→详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括废物分类、所含核素名称，重量，暂存起止时间，表面污染和辐射剂量自测结果，废物处置日期，处置操作人员，废物去向，部门审核人员等内容。

(7) 放射性废水暂存和排放

PET/CT 候诊室、SPECT/CT 候诊室、PET/MR 候诊室内卫生间的冲厕废水、高活室和运动负荷室洗手废水、清洁间保洁废水，应急淋浴废水等→地下一层专用集水坑→污水泵房→放射性废水衰变池暂存→废水暂存 180 天后，经检测达标后排至医院污水处理站处理→市政污水管网。

(8) 放射性废气收集与排放

肺通气检查时，患者吸入钨气在肺通气室的集气罩下进行。给药时开启集气罩，外泄的少量钨气气溶胶可及时抽走。

药物分装和质检在手套箱内进行。诊断显像药物中，只有 PET 检查的正电子药物需要在注射前进行分装。Tc-99m 和 I-123 等，半衰期相对较长，由供药公司根据每人份订药量直接分装在注射器或药瓶内，无需再次分装。上述需要分装的药物中，均为液体且物理性质稳定，在正常工作情况下产生气溶胶和蒸汽很少。在出现放射性物质泼洒的异常情况时，废气经活性炭过滤并经排风系统排放至楼顶处，经大气扩散后浓度会更低，对周围公众的剂量贡献很小。医院委托设备厂家定期检查维护手套箱和集气罩的吸附过滤装置，确保过滤效率满足设计要求。

核医学科诊断区设置 3 套通风系统，废气经管道组织，由管道井延伸至医疗楼顶东南角并经活性炭过滤后排放。具体如下：1）高活室手套箱和肺通气排风罩；2）诊断区运动负荷室、高活室、废物间、肺通气室、SPECT 候诊室、PET/CT 候诊室、PET/MR 候诊室、患者通道等控制区场所共用 1 套通风系统；3）患者卫生间单独 1 套。上述 3 套通风系统的排气口设在医疗楼楼顶。

10.2.3 核医学科治疗区工作流程及路径

核医学科治疗区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、物流示意图见图10-5。

(1) 碘病房工作流程

患者乘电梯到达地下一层→在接诊室接诊→入院宣教→领取被服→由碘病房入口（设单向门禁）进入病房区域→在给药室口服 I-131 药物→在碘病房住院 3~4d→体内 I-131 含量满足出院要求（活度 $\leq 400\text{MBq}$ 或 1m 处剂量率 $< 25\mu\text{Sv/h}$ ）时，根据地面引导由西南角出口门离开碘病房。

(2) 核素门诊治疗流程

患者乘电梯到达地下一层→在接诊前厅候诊→由门诊治疗检查入口（设单向门禁）进入检查区→在门诊治疗窗口口服或者注射→无明显症状后，根据地面引导由西南角离开核医学科诊断区治疗区域。

(3) 碘病房工作人员工作路径

工作人员乘北侧医护专用电梯到达地下一层→进入碘病房区域→医师进入医师接诊室，护士进入导诊台或值班室→护士负责接收、管理、患者管理和门诊治疗患者给药，医师负责甲癌给药患者给药→下班后离开核医学科治疗区。

(4) 放射性药品转移路径

放射性药物由供药公司从患者出口电梯运至地下一层核医学科→由核医学科治疗区门诊治疗患者出口门进入核医学科治疗区区域→经缓冲间进入高活室，在高活室内，核医学科药品管理员与送货人员办理“点对点”交接验收手续，并记录药品规格、批次、数量以及收货时间→在储药室暂存，后续开展甲癌和门诊患者治疗工作。

(5) 放射性废物转移路径

高活室给药窗口旁设置 1 个 20mm 铅当量的废物桶，存放药杯和药瓶等放射性药物→每周一早晨转移至废物间（病房内废物下一批治疗患者入住前转移至废物间）并标注日期→碘病房废物间设置 2 个 10mm 铅当量的废物桶（20L）和 2 个 5mm 铅当量的废物桶（2L），轮流 B 类放射性废物（2L 废物桶存放 Sr-89 废物）→B 类放射性废物放置 180d 后解控为医疗废物处置（Sr-89 废物存放 505 天解控为医疗废物处置）→经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 表面污染小于 0.08Bq/cm^2 、 β 表面污染小于 0.8Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处

理→详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括废物分类、所含核素名称，重量，暂存起止时间，表面污染和辐射剂量自测结果，废物处置日期，处置操作人员，废物去向，部门审核人员等内容。

(6) 放射性废水暂存和排放流程

碘病房卫生间的冲厕废水、高活室洗手废水、清洁间保洁废水，应急淋浴废水、门诊治疗留观室等→地下一层碘病房专用集水坑→污泵房→放射性废水衰变池暂存→B类废水暂存180d后，经检测放射性废液衰变池排放口总 α 、总 β 监测结果分别小于1Bq/L、10Bq/L、I-131的放射性活度浓度不大于10Bq/L后，按照GB18871中8.6.2规定方式排至医院污水处理站处理，并在放射性废液暂存、处置管理台账上详细记录排放时间、排放体积等相关内容→市政污水管网。

(7) 放射性废气收集与排放流程

碘病房设置3套独立排风系统（1套为高活室手套箱专用，1套覆盖碘病房全部区域，1套患者卫生间）→全部房间均设排气口，以减少污染物的聚积→碘病房废气经风管组织由竖管至医疗楼顶部的东南侧，排气口设置活性炭过滤器装置。

10.3 正电子核素制备及放化实验项目安全设施

10.3.1 辐射屏蔽设计

(1) 回旋加速器室辐射屏蔽设计

回旋加速器室六面墙体拟采用砼（现浇混凝土）屏蔽。具体如下：

1) 西墙、北墙为2300mm砼（现浇混凝土）屏蔽，南墙为2500mm砼（之外为土层），顶为2200mm砼（上方为汽车道）；

2) 东侧迷路呈Z形设计，设有四道迷路内墙和一个迷路外墙，其中两个楔形迷路内墙厚度分别为930mm~1394mm砼、520mm~1248mm砼，外侧三个迷路墙厚度分别为600mm砼、400mm砼（局部600mm砼）、400mm砼。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10-6、图10-7。

3) 机房内配备铅屏蔽容器，用于存储放射性固体废物（如靶窗），容积约为200×200×200mm；屏蔽材料为厚度50mm的铅。

表 10-1 回旋加速器室屏蔽设计

机房名称	尺寸	屏蔽墙体方向	屏蔽设计	周围环境
回旋加速	6.00×4.25×	南	2500mm 砼	土层

器机房	2.50m(不含迷路)	北	2300mm 砼	热室设备间、放化质控室	
		西	2300mm 砼	杂物室、气体供应室	
		东	迷路墙分别为：930mm~1394mm 砼、520mm~1248mm 砼、600mm 砼、400mm 砼（局部 600mm 砼）、400mm 砼		控制室、配电室
		顶	2200mm 砼	汽车道	
		防护门	普通门	控制室	

注：铅密度不低于 11.34g/cm³；砼（混凝土）密度不低于 2.35g/cm³。

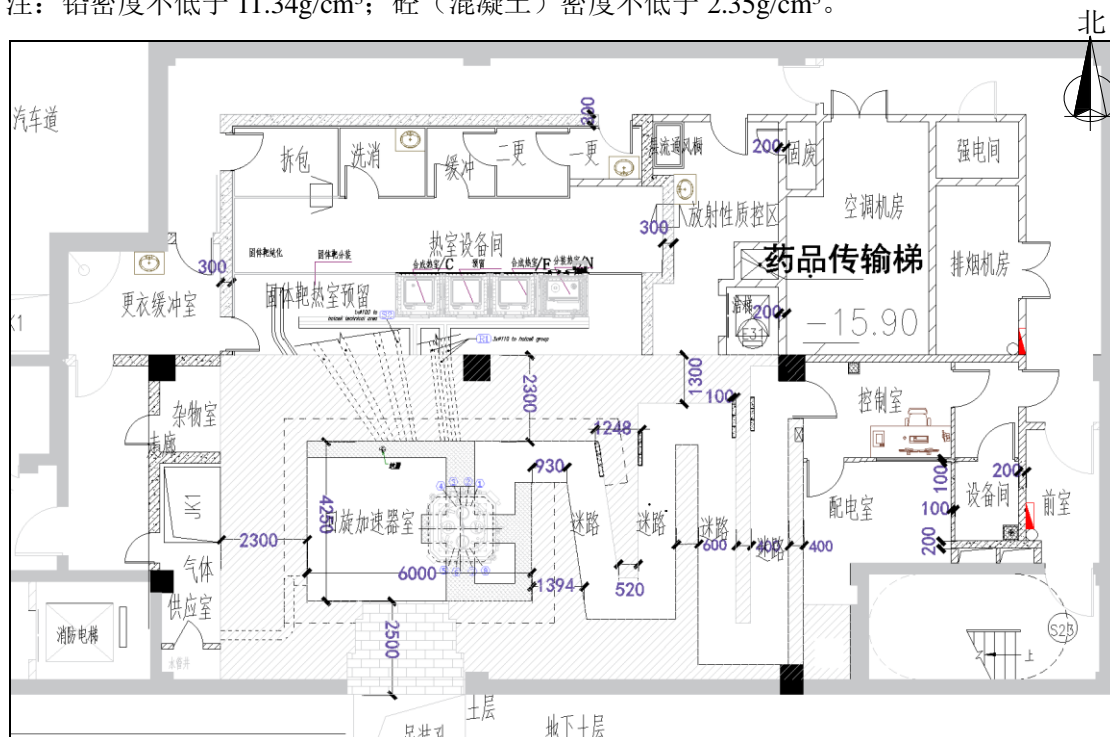


图 10-6 回旋加速器机房平面图

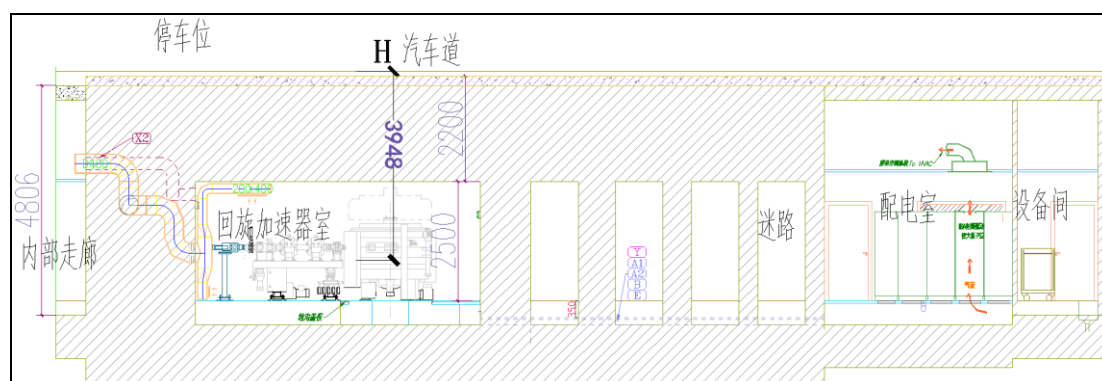


图 10-7 回旋加速器机房东西向剖面图

回旋加速器与热室设备间内的热室之间预留有靶线传输地沟，放射性核素的每一个输送管路都是一根直径约为 16mm 的塑料软管，内含数根用于传送放射性

核素的 1/16"特氟龙/聚丙烯管（固体、液体靶）或 1/8"不锈钢管（气体靶），管二端分别与加速器和热室连接。生产的 PET 用正电子核素是由气动方式通过专用的特氟龙等管，经过预留的靶线地沟传输到合成热室内，从回旋加速器室到热室的靶线地沟屏蔽全程覆盖铅砖，防护当量 50mmpb，铅砖上面覆盖 0.5cm 的铁板。回旋加速器机房的电缆管沟等穿过屏蔽体时，将采用地沟斜穿过墙壁，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。通风（排风）管道穿过屏蔽体时将采用在不同的方向 3 个弯头穿过墙壁，进风管道为直穿门上方墙体。

（2）热室设备间

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。热室设备间东、西、北面墙体为 30cm 砼（混凝土）墙，南墙 230cm 砼，顶板不低于 55cm 砼，检修门为 3mm 铅防护门。

（3）放化质控室

东、南、北墙 20cm 砼，南墙 130cm 砼，西墙 30cm 砼，顶板不低于 55cm 砼，门为普通门。

（4）废物间

废物间四面墙都为 20cm 砼，顶板不低于 55cm 砼，门为 2mm 铅防护门。

（5）设备间

设备间东、南墙为 20cm 砼，西、北墙为 10cm 砼，顶板不低于 35cm 砼（含垫层），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 1 号衰变池。

10.3.2 药物制备场所辐射安全与防护措施

（1）药物制备场所采用实体屏蔽措施，保证回旋加速器机房、热室设备间及质控室边界外 30cm 处辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

（2）在回旋加速器机房、热室设备间、放化质控室等工作场所出入口处设置电离辐射警告标志和中文警示说明；在回旋加速器机房出入口门外安装回旋加速器工作状态指示灯（红、黄、绿、蓝），回旋加速器出束时，红灯亮起；当射频系统工作时，黄灯亮；从任何靶体转换是激活状态，蓝灯闪烁；主磁体供应电源就绪时，绿灯亮起。

(3) 工作场所按照控制区和监督区实行分区管理。本项目回旋加速器室、热室设备间、缓冲间、一更、二更、洗消间、放化质控室、运输药物电梯、设备间等为控制区，缓冲更衣间、配电室、控制室、气瓶间、空调机房、弱电间、走廊等区域划为监督区。回旋加速器场所有明确的人流和物流通道。

(4) 在地下三层缓冲更衣间内将放置 1 台表面污染监测仪器，供工作人员离开回旋加速器工作场所前进行放射性表面污染监测。在缓冲间配备去污用品和洗消试剂，一旦发现放射性污染及时去污。

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

(6) 急停按钮：加速器机房南、西、北面墙体、迷路各设置急停按钮 1 个、控制台上设置 1 个急停按钮，并有明显的标志，此外，按下任一急停按钮，可立即终止加速器运行，按下急停按钮后需人工复位加速器才能重新启动。

(7) 清场按钮：在西墙和控制室墙拟设有清场确认按钮，并有明显的标志，机房防护门打开之后需按下西墙上清场巡检按钮，并在 30 秒内关闭机房防护门，防护门关闭后再按下控制室墙上清场确认按钮；否则视为巡检失败，无法进行出束。每打开一次防护门都要进行一次巡检，以确认机房内没有人员停留。

(8) 药物制备场所内设置闭路监视系统（无盲区），用于监视设备和热室设备间运行情况，加速器机房内西南角、东北角、东南角和迷路角各安装 1 个摄像头（一共拟安装 4 个），热室设备间内拟安装 2 个摄像头，便于工作人员实时监控机房内状况。

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

(10) 门机联锁：加速器机房防护门与加速器的高压联锁，当防护门未关闭到位时，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。

(11) 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，自动检测热室设备间内热室的铅门是否已经关闭，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。

(12) 药物制备场所配备 1 台多探头固定式剂量率报警仪（至少在回旋加速器机房内南墙上、热室设备间内东墙上位置设剂量率探头），剂量率仪有超阈值的声/光报警功能。热室设备间剂量率报警（超阈值 $10\mu\text{Sv/h}$ ），立即停止回旋加速器运行。回旋加速器控制室配备 2 台个人剂量报警仪，热室设备间新增配备 1 台便携式表面污染监测仪，回旋加速器室新配备 1 台便携式的剂量测量仪。

(13) 热室设备间、放化质控室等控制区的地面、墙面均采取易清洗不易渗透的材料；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。

(14) 药物制备场所共设有 3 套独立排风系统，废气通过专用排风管道引至医疗楼顶部排放。具体为：1) 回旋加速器机房和设备间 1 套独立排风系统；2) 热室设备间、放化质控室、控制区走廊等控制区 1 套独立排风系统；3) 热室设备间热室和放化质控室层流通风橱合用 1 套独立排风系统（每个热室上方都设有止逆阀）。上述排风系统排放的废气，经活性炭过滤后再由风机引至屋顶排放。

热室模块箱设置单独的排风系统，自带独立排风管道，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，同时每个热室上方都设有止逆阀，防止气体逆流；热室气体经自带活性炭过滤后再由风机引至屋顶排放，屋顶排风口设活性炭过滤装置。

(15) 回旋加速器机房设置 1 个铅废物桶（ 50mmPb ），用来收集更换下来活化部件或靶材料。热室设备间设置 1 个废物桶，收集放射性废物。

(16) 回旋加速器机房内设置放射性废液（冷却水泄漏）收集地漏，排水汇入放射性废水衰变池。

(17) 热室设备间内拟配备的合成热室正面、侧面、顶面、底面采用 70mm 铅当量的铅板和铅玻璃进行屏蔽防护，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。分装热室（N-13）正面采用 70mm 的铅进行防护，侧面、顶面、地面都采用 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。拟配备 2 个药物运转盒（ 42mmPb ）和 1 台不锈钢转运车，用于转运放射性药物。

(18) 从事回旋加速器操作人员通过辐射安全与防护考核，持证上岗。

(19) 回旋加速器委托设备生产厂家(亿比亚(北京)粒子加速器技术有限公司)进行定期维护和故障维修。在维护和维修时不得擅自解除安全联锁系统。

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

(21) 本项目回旋加速器机房内进风口和排风口按照“对角布置、上进下排”的原则设置:排风通风管道等穿过屏蔽体时将采用在不同的方向 3 个弯头穿过墙壁。送风管采用直穿方式从防护门上方进入机房内,送风口设置在屋顶,排风口设在机房的西南角,采用管道延伸方式到距离地面 30cm 处,加速器室回旋加速器机房设计通风量为 2500m³/h,每小时通风换气次数不低于 10 次,以保证空气及时更新。

(22) 门禁:药物制备场所、控制室、放化质控室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。

(23) 安装有火灾报警器,配备有灭火器材,设有应急通道。

(24) 本项目所用回旋加速器的固有安全性

1) 本项目回旋加速器设有 3 个独立的靶体和束流引出系统,可一次性换靶多次使用,减少职业人员的进入回旋加速器机房的换靶次数,进而可以减少受照剂量。

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

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

4) 回旋加速器的操作系统自带靶的密封性自动检测系统,能够及时发现靶体泄漏并停止设备运行。

5) 自屏蔽系统带有废气滞留排放系统,其运行期间产生的活化气体可滞留一定时间后再排出,减少其对环境的辐射影响。

回旋加速器室安全设施布置见图 10-8,风管和电缆沟穿墙节点图见图 10-9。

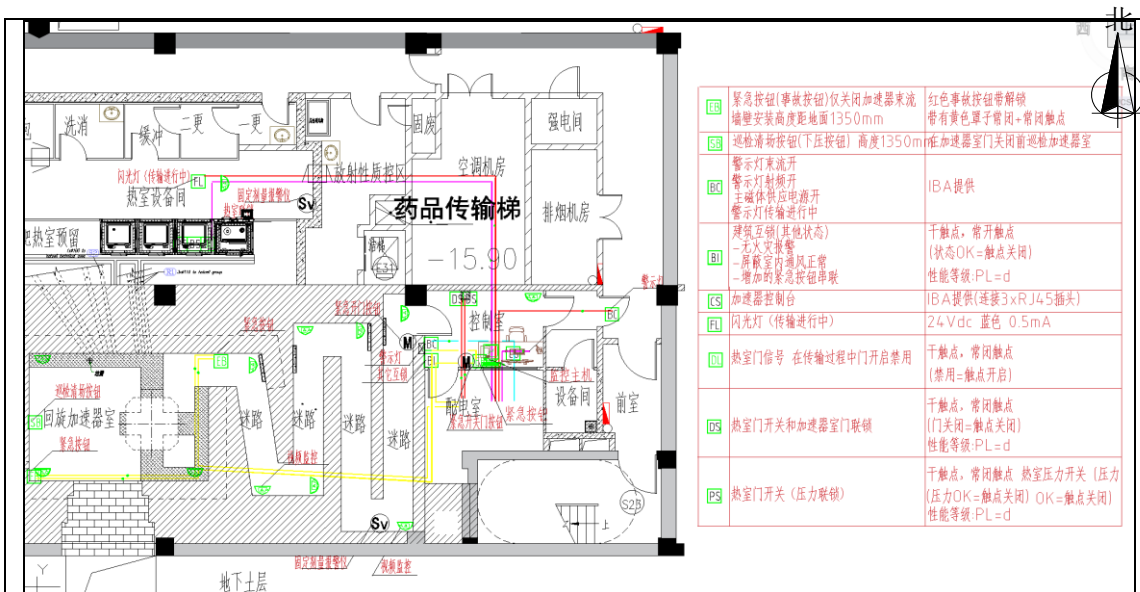


图 10-8 回旋加速器室安全设施位置图

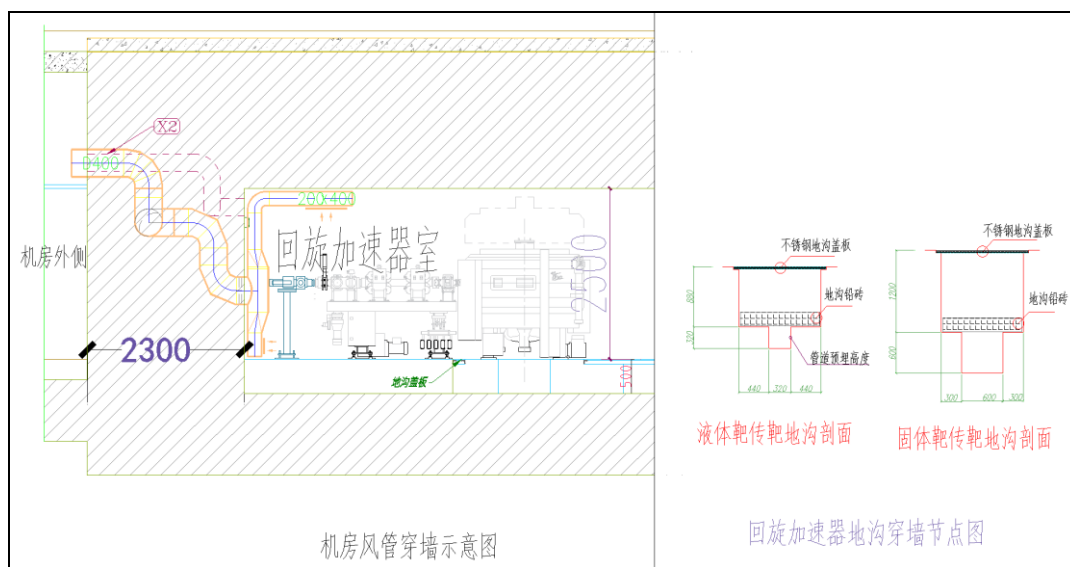


图 10-9 回旋加速器室风管和电缆沟穿墙节点图

回旋加速器和热室设备间工作场所安全与防护设施见表 10-2、表 10-3。

表 10-2 回旋加速器机房防护与安全

序号	检查项目	是否拟设置	备注
1*	加速器工作室为控制区	√	回旋加速器室拟设为控制区
2*	入口电离辐射警示标志	√	防护门外设置
3*	入口加速器运行状态显示	√	设置 4 色工作状态指示灯
4*	视频监控系统	√	加速器机房和热室设备间均设置视频监控

5		语音广播系统	√	拟在控制室、加速器室内和热室设置对讲系统
6*		控制区有工作警报装置和警示标志	√	机房内拟设出束声光报警
7*	B 安全联锁	机柜或操作台有防止非工作人员操作的锁定开关	√	机柜或操作台有防止非工作人员专用钥匙
8*		门与加速器高压触发联锁	√	门机联锁系统
9*		控制台有紧急停机按钮	√	急停按钮 1 个
10*		加速器室内设置紧急停机按钮或紧急开门按钮	√	急停按钮 4 处，开门按钮 1 处
11		火灾报警仪与加速器联锁	√	火灾报警仪与加速器联锁
12		热室门与加速器药物传输系统联锁	√	热室门与药物传输系统联锁
13*	C 监测	加速器室内有固定式 γ 辐射剂量监测仪	√	设置多探头固定式剂量率报警仪
14*	D 感生放射性	强活化部件表面或适当位置标有电离辐射警告标志	√	储存靶部件的废物桶上粘贴电离辐射警告标志
15*		更换下来的活化部件有专设的存放地	√	配置废物桶，贮存更换下来活化部件
16*	E 其他	控制区通风系统	√	设置 3 套通风系统
17		停机后，控制区通风	√	停机后机房通风 30min 人员再进入
18		灭火器材	√	气体灭火器

注：加*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

表 10-3 同位素生产场所辐射防护与安全

序号	检查项目	是否拟设置	备注
1*	场所分区布局是否合理及有无相应措施/标识	√	分为控制区和监督区，地面设有文字标注
2*	入口处电离辐射警示标志	√	场所入口、热室设备间门口粘贴电离辐射警示标志
3*	卫生通过间	√	设缓冲间
4*	人员出口配备表面污染监测仪	√	缓冲更衣间设置表面污染监测仪
5*	单独的放射性通风设施	√	热室设置有独立通风系统
6*	设置有高效过滤器的工作箱	√	热室设备间内拟先配备 4 个热室，均设有高效过滤器的工作箱
7*	易去污的工作台面和防污染覆盖材料	√	台面采用不锈钢

8*		放射性液体容器不易破裂或有防止破裂的包装	√	采用塑料瓶收集
9*		放射性下水系统或暂存设施	√	设置放射性废水暂存池。药物制备场所设置专用下水管线和地漏
10		放射性下水系统标识	√	特殊下水和地漏粘贴警示文字
11*		放射性同位素暂存设施	√	产品暂存在分装热室内，热室外墙上设监控
12*		放射性固体废物暂存设施	√	设置废物间，配备废物桶，收集放射性废物
13		安保设施	√	热室设备间墙上设监控
14	B 防护用品	工作服、防护手套、口罩等个人防护用品	√	配备一次性医用口罩和手套
15*	C 应急物资	去污用品	√	配备洗涤灵等去污用品
16		灭火器材	√	气体灭火器

注：加*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

10.4 核医学科诊断区辐射安全防护设施

10.4.1 辐射屏蔽设计

核医学科诊断区位于二期医疗楼南侧（地下3层，无地上诊疗建筑物）地下一层的中部，控制区外墙都是混凝土砖（楼板为砼）结构。场所根据辐射防护要求，设计了含混凝土砖、砼、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，核医学科辐射安全防护设施见表10-5。

表10-4 核医学科诊断区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*	周围环境
1	PET/CT室（有效尺寸为5.1m×8.0m）	东墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	SPECT/CT2室
		南墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	患者走廊
		西墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	设备间和储源室
		北墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	控制廊
		楼上	35cm 砼	院内道路

		楼下	35cm 砼	汽车道
		防护门	6mmpb	控制廊、患者走廊
		观察窗	8mmpb 当量铅玻璃	控制廊
2	PET/MR 室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	设备间和控制室
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	治疗留观室
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道
		防护门	6mmpb	控制廊、患者走廊
		观察窗	8mmpb 当量铅玻璃	控制室
3	2 间 SPECT/CT 室（最小有效尺寸为 5.1m×7.5m）	东墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	2 间机房为东西紧邻设置，机房东侧为 SPECT 候诊室、弱电间，西侧为 PET/CT 室，北侧为控制廊，南侧为患者走廊
		南墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	
		西墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	
		北墙	24cm 混凝土砖+3cm 硫酸钡水泥	
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道
		防护门	4mmpb	控制廊、患者走廊
		观察窗	4mmpb 当量铅玻璃	控制廊
4	SPECT 候诊室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	缓冲区
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	SPECT/CT1 室
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	弱电间和信息间
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道

		防护门	3mmpb	患者走廊
5	PET/CT 候诊室 1	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	保洁间和楼梯间
		南墙	35cm 砼	汽车道
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	PET/CT 候诊室 2
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	车位、信息间
		防护门	6mmpb	患者走廊
6	PET/CT 候诊室 2	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	PET/CT 候诊室 1
		南墙	35cm 砼	汽车道
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	PET/CT 候诊室 3
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	车位、弱电
		防护门	6mmpb	患者走廊
7	PET/CT 候诊室 3	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	PET/CT 候诊室 2
		南墙	35cm 砼	汽车道
		西墙	35cm 砼	楼梯间和风井
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	停车位
		防护门	6mmpb	患者走廊
8	PET/MR 候诊室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	楼梯间
		南墙	35cm 砼	汽车道
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	留观室
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊

		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道
		防护门	6mmpb	患者走廊
9	高活室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		防护门	6mmpb	缓冲间、走廊、抢救兼运动、肺通气室
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	停车位
		注射窗	40mmpb、20mmpb 当量铅玻璃	/
		手套箱	50mmpb/10mmpb 当量铅玻璃	两个手套箱，铅当量分别为 50mmpb、10mmpb
10	源库	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	竖井
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	楼梯间
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	保洁间
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	车位
		防护门	防盗门	患者走廊
11	废物间	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	高活室
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	高活室
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道

		防护门	2mmpb	高活区
12	抢救兼运动室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	肺通气兼甲功室
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	缓冲区
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊和高活室
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道
		防护门	3mmpb	患者走廊、高活室
13	肺通气兼甲功室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	更衣室
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	抢救兼运动室
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	高活室
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道
		防护门	3mmpb	患者走廊、高活室
14	留观室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	PET/MR 室
		南墙	35cm 砼	汽车道
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	补风机房
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	35cm 砼	汽车道
		防护门	6mmpb	患者走廊

备注：砼（混凝土）密度不低于 2.35t/m³，混凝土砖密度不低于 2.0t/m³，硫酸钡水泥密度不低于 2.7t/m³，墙面和楼板厚度已加混凝土垫层或混凝土抹灰。

表 10-5 核医学科诊断区辐射安全防护设施表

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	√	场所标注控制区和监督区,地面设置引导文字和标线。
2*		电离辐射警告标志	√	出入口、显像室防护门、高活室等门上粘贴电离辐射警示标志
3*		独立的通风设施	√	高活室设带屏蔽设计的手套箱,配有负压手套箱。场所也设有通风系统。
4*		治疗病房病人之间防护	√	诊断区无治疗病房
5*		给药操作人员屏蔽	√	配备两个给药铅防护窗口
6		易去污的工作台面	√	采用不锈钢台面
7*		病人专用卫生间	√	专用卫生间及排水管线
8*		放射性核素暂存场所或设施	√	同位素在高活室、贮源室暂存,设闭路监控。
9*	B 监测设备	表面污染监测仪	√	1 台表面污染监测仪
10*		便携式辐射水平监测仪	√	1 台辐射剂量巡测仪
11*		个人剂量计	√	所有工作人员配备 TLD 个人剂量计
12		个人剂量报警仪	/	不配备
13*	C 放射性废物和废液	放射性废液处理排放系统及标识	√	114.7m ³ 槽式衰变池 (3 格)
14*		放射性固体废物暂存场所或设施	√	设废物间,贮存放射性废物
15*	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等
16*		放射性表面去污用品和防污染材料	√	洗涤灵、酒精和棉球

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/。

10.4.2 辐射防护措施

(1) 实行控制区和监督区分区管理。在控制区出、入口分别拟安装单向门禁系统,防止无关人员进入控制区。控制区出入口上张贴电离辐射警告标识,警示无关人员不要在出、入口长久停留。受检者检查区入口和出口均设有门禁系统。

SPECT 机房、PET/CT 机房防护门上方设置工作状态指示灯，安装门灯联锁装置，控制室防护门关闭，警示灯自动亮起。

(2) 放射性表面污染控制措施：注射区、高活室、扫描室、源库、废物间、候诊室及卫生间和控制区走廊地面用无缝隙、防渗，且容易清洗和去污的材料覆盖（如地胶等），墙面 1.5m 高度张贴防渗的墙面（如铝塑面板或釉面砖）等，便于去污。手套箱和工作台面选用表面光洁、耐腐蚀、防渗漏、易去污的材料。工作人员进入辐射工作区，穿工作服，涉及放射性药物的操作佩戴乳胶手套。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。

(3) 外照射防护：2 个具有防护功能的铅玻璃窗的注射窗（40mmPb/20mmPb 当量）和 1 个 5mmPb 可移动铅屏蔽注射台（运动负荷室注射时使用），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，至少配备 13 个铅废物桶（其中 1 个为 20mmPb，另外为 5mmPb，详见表 12-5）、1 个贮存放射性药物的铅屏蔽盒、2 个钨合金注射防护套和 2 套铅衣（SPECT/CT 使用）。核医学科诊断控制区边界、核素操作、受检人员候诊和扫描场所外围墙体采用实体屏蔽措施，顶棚和底板为混凝土浇筑，患者进、出通道门安装铅制防护门。检查机房安装铅制防护门（具有防夹功能），观察窗安装铅玻璃。保证核医学科诊断控制区边界外的辐射剂量率不大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

(4) 内照射的防护：高活室配备 2 个具有防护功能 50mmPb/10mmPb 当量的手套箱，在肺通气室配备 1 套集气罩，并都带有活性炭过滤器，手套箱设备正面配有铅玻璃、观察窗及操作工作孔。在手套箱内分装放射性药物。手套箱设置专用排风管道，排风口引至楼顶。手套箱的风量满足要求（风速大于 0.5m/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。此外，在高活室、留观区、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、PET/MR 机房、源库、废物间等其它场所均设置排风口，排风同样由专用排风管道引至建筑物顶部，经活性炭过滤后排放。

(5) 妥善收集固体放射性废物。注射窗旁设 20mmPb 和 5mmPb 的废物桶各 1 个（容积 10L），暂存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，每周星期一早上转移至核医学科诊断区放射性废物间。核医学科

诊断区废物间设置 4 个 5mm 铅的废物桶（容积 20L），2 个用来轮流贮存 A 类废物，2 个用来轮流贮存 B 类废物，每间候诊室、抢救兼运动室、肺通气兼甲功室、留观室各配 1 个 5mmPb 的废物桶（共 7 个，每个容积 5L）。放射性固废依照 HJ1188-2021 和《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》固体废物相关要求了解控处置，并详细记录放射性固体废物暂存、处置管理台账，清晰记录放射性废物的暂存、检测、解控、排放等信息。在患者给药候诊室拟配备普通废物桶。

（6）放射性废水收集处置设施：核医学科诊断区高活室内洗手池废水，清洁间废水，给药后患者专用卫生间的冲厕废水以及应急产生的废水等，通过专用管道一并进入的 1 号衰变池（另设有轮流使用的 2 个沉淀池）。放射性废水排放管道路线在建筑面层内敷设时有混凝土垫层，或者在管道层、管道井，没人员活动区，管道外表面无需铅皮进行包裹防护。衰变池采用槽式设计，衰变池总容积不低于 114.7m^3 ($40\text{m}^3+38.2\text{m}^3+36.5\text{m}^3$)。核医学科解控排放的废水，排入医院污水处理站，并详细记录“放射性废水暂存、处置管理台账”，清晰记录放射性废水的暂存、检测、解控、排放等信息。

（7）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，落实放射源和放射性药品的三级安全防范措施，安装火灾报警器，配备灭火器材，以及必要的警示标志，活度高的放射源平常储存在铅桶内。

（8）在核医学科患者通道入口处、留观室、给药后候诊区等处均拟设置视频监控系統，便于观察和管理给药患者的活动。在控制室和机房、留观室、待检患者候诊区等处安装对讲装置。淋浴水采用刷卡控制器进行控制，磁卡由核医学科主任保管，刷卡才能出水。

（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诊断区高活室手套箱内，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。

（10）全部辐射工作人员须通过辐射安全与防护考核合格后持证上岗，所有人员开展个人剂量监测。

（11）核医学科诊断区拟新配的表面污染监测仪和便携式辐射剂量巡测仪各 1 台，用于表面污染和剂量率水平的检测。工作人员进入辐射控制区，穿工作服，

涉及放射性的操作佩戴乳胶手套，工作结束后，离开控制区前进行体表和相关场所的表面污染监测。

定期开展工作场所和环境辐射监测。每月自行对辐射工作场所卫生通过间、工作人员操作位、病区走廊等工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存放射性物质的区域进行常规的 X/γ 剂量率。每天工作结束后，对高活室台面、地面，手套箱台面，注射窗台面以及肺通气设备表面等进行表面污染监测，监测数据记录存档 β 表面污染监测。每年委托有能力的检测单位对辐射场所的剂量率水平和表面污染水平监测。

(12) 候诊室受检者座椅之间设铅屏风或者铅隔断，其中 SPECT 候诊室患者间设 6 个 2mm 铅当量铅屏风（长×高尺寸不低于 1.0m×1.0m），每间 PET 候诊室患者之间各配 1 个 6mm 铅当量的铅屏风（长×高尺寸不低于 1.2m×1.2m，共 4 个），留观室拟配 1 个 6mm 铅当量的铅屏风（长×高不低于 1.2m×1.2m），减少受检者候诊期间的相互照射。

(13) 部分患者因身体不便等原因需要家属陪护检查的，将告知其近距离接触可能受到少量辐射照射的实际。在患者候诊室内设铅屏风，以减少陪护家属的受照剂量。

(14) 在诊断区地面设置受检者导流标志，依次为登记，注射，候检，检查，留观，出口等。

(15) 外单位送药时间一般安排在上上午 7:00，科室病患较少的时间，可以减少与送药人员的交汇。自产的回旋核素可能涉及两次送药，时间一般在上上午 7:00 和中午 13:00，也是由回旋药品传输梯把药送到高活室，为内部通道，可达到减少无关人员与送药人员的交汇。核医学科设专门人员负责在诊断区高活室内摄像头下“点对点”接收同位素，清点数量，登记放射性药品台账。

10.5核医学科治疗区辐射安全与防护措施

10.5.1 辐射屏蔽设计

核医学科治疗区设置在地下一层核医学科西侧，其中病房、留观室、放射性废物贮存间、高活室等墙壁均采用砈（混凝土）防护（具体见表 10-6），安装铅防护门。拟配备有铅罐、防辐射放射性废物桶等安全防护设施、器材，以及铅防护用品，配套建造放射性废水收集排放设施。治疗工作区辐射安全防护设施见表 10-7。

表 10-6 核医学科治疗区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	周围环境
1	病房 1	东墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	过渡病房
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	病房 2
		西墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		北墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	停车位
		防护门	10mmpb	患者走廊
2	病房 2	东墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	过渡病房
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		西墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊和缓冲区
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	病房 1
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	停车位
		防护门	10mmpb	患者走廊
3	病房 3~病房 4	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2 间病房为东西紧邻排列 (位于治疗区中部北侧), 病房 3 东侧为患者走廊, 病房 4 西侧为患者走廊, 北侧为监督区走廊, 南侧 为患者走廊
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	
		北墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	
		两病房间墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	停车位
		防护门	10mmpb	患者走廊

4	病房 5~病房 8	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	4 间病房为南北紧邻排列 (位于治疗区西侧), 病房 东侧为患者走廊, 西侧为 地下土层, 病房 5 北侧为 走廊和清洁间, 南侧为风 井和楼梯间
		病房 8 南墙	35cm 砼	
		西墙	35cm 砼	
		病房 5 北墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	
		病房 6 南墙	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	
		病房间墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	加压机房、停车位
		防护门	10mmpb	患者走廊
5	放射性废物库	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	缓冲间
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	高活室
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	汽车道
		防护门	3mmpb	高活室
6	治疗留观室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	PET/MR 室
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	患者走廊
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	汽车道
		防护门	3mmpb	患者走廊

7	高活室	东墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	走廊
		南墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	给药窗口
		西墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	病房走廊
		北墙	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	抢救处置室
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	汽车道
		门诊治疗窗口	20mmpb 当量	/
		甲癌服药窗口	40mmpb 当量	/
		防护门	3mmpb	缓冲间
8	甲癌服药窗口	西墙	30cm 砼	患者走廊
		楼上	35cm 砼	院内道路
		楼下	50cm 砼	汽车道
9	控制区出入口 门	/	6mmPb	/

备注：备注：砼（混凝土）密度不低于 2.35t/m³，混凝土砖密度不低于 2.0t/m³，楼板厚度已加混凝土垫层。

表 10-7 核医学科治疗区辐射安全防护设施表

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*		电离辐射警告标志	√	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	√	高活室设带屏蔽设计的手套箱，配有负压手套箱设独立通风，每间病房、服药室等设独立通风
4*		治疗病房病人之间防护	√	该场所病房为单人间
5*		给药操作人员屏蔽	/	配备服药和注射窗口

6		易去污的工作台面	√	采用不锈钢台面
7*		病人专用卫生间	√	专用卫生间和排水管线
8*		放射性核素暂存场所或设施	√	同位素在高活室、贮源室暂存，设闭路监控。
9*	B 监测 设备	表面污染监测仪	√	拟配备 1 台表面污染监测仪
10*		便携式辐射水平监测仪	√	拟配备 1 台辐射剂量巡测仪
11*		个人剂量计	√	所有工作人员配备 TLD 个人剂量计
12		个人剂量报警仪	×	/
13*	C 放射 性废 物和 废液	放射性废液处理排放系统及标识	√	488.5m ³ 废水衰变池
14*		放射性固体废物暂存场所或设施	√	设废物间，贮存放射性废物
15*	D 防护 器材	个人防护用品	√	墙体和铅桶屏蔽，配备一次性医用口罩和手套
16*		放射性表面去污用品和防污染材料	√	洗涤灵、酒精和棉球

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/。

10.5.2 辐射防护措施

(1) 设置 I-131 治疗专用病区。病区设有值班室、缓冲间、放射性废物库、高活室（I-131 服碘、门诊治疗给药）、单人病房、留观室以及患者走廊等作为控制区管理，患者入口前的缓冲走廊等作为监督区进行管理。在控制区患者出、入口分别安装单向门禁系统，防止无关人员进入控制区。控制区出入口上张贴电离辐射警告标识，警示无关人员不要在出、入口长久停留。

(2) 放射性表面污染控制措施：高活室、留观室和病房等控制区地面用无缝隙、防渗，且容易清洗和去污的材料覆盖（如地胶等），墙面 1.5m 高度张贴防渗的墙面（如铝塑面板或釉面砖）等，便于去污。手套箱和工作台面选用表面光洁、耐腐蚀、防渗漏、易去污的材料。工作人员进入辐射工作区，穿工作服，涉及放射性药物的操作佩戴乳胶手套。核医学科治疗区拟配备表面污染监测仪，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。

(3) 外照射防护措施。2 个具有防护功能的铅玻璃的给药窗 (I-131 服碘、门诊治疗给药, 分别为 40mmPb/20mmPb 当量), 可有效减少给药过程中工作人员受照剂量, 病房墙壁、留观室、防护门等都采用具有屏蔽 γ 射线的材料建造。至少配备 16 个铅废物桶 (其中 2 个为 15mmPb, 另外 14 个为 10mmPb), 其中给药窗旁设 15mm 铅废物桶 2 个、门诊治疗留观室 1 个、每个病房 1 个 (共 8 个)、病房患者出口处 1 个、废物间 4 个。含 I-131 治疗药物置于专用屏蔽盒内贮存。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。

(4) 内照射的防护: 高活室配备 1 个具有防护功能 50mmPb 当量的手套箱, 并带有活性炭过滤器, 设备正面配有铅玻璃、观察窗及操作工作孔。在缓冲间、服碘室、碘病房和放射性废物库等场所均设排风口, 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, 经过核医学科北侧竖管在医疗楼顶部排放, 排放口设置活性炭过滤装置。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。一旦碘病房发生放射性污染, 将及时去污, 并收集污染物, 视情况采取封闭病房措施, 减少污染物的扩散。工作人员进入碘病房区域, 佩戴 N95 口罩, 减少放射性气溶胶的吸入。

(5) 放射性废水集中收贮衰变。核医学科治疗区高活室内洗手池废水, 清洁间废水, 给药后患者专用卫生间的冲厕废水以及应急产生的废水等, 通过专用管道, 放射性废水排放管道路线在建筑面层内敷设时有至少 20cm 混凝土垫层, 或者在管道层、管道井, 为没人活动区, 管道外表面基本无需铅皮进行包裹防护 (除了局部裸露外面部分包裹 6mm 铅皮), 排至病房区域的集水坑 (集水坑底砼厚度不小于 40cm), 储水量高度达到 0.3m 时 (储水量不大于 0.3m^3), 就泵至楼外东侧的 B 类衰变池 (另配有轮流使用的 2 个沉淀池)。B 类衰变池共 3 个, 衰变池采用槽式设计, 衰变池总容积不低于 488.5m^3 ($162.6\text{m}^3+164.6\text{m}^3+161.3\text{m}^3$)。排至 2 号衰变池。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。

放射性废水衰变池池壁采取严格防渗措施, 设有超位溢流和报警功能, 防止

废液溢出。衰变池前端设可轮流使用的 2 个沉淀池，防止大量淤泥进入衰变池。采用带铰刀潜污泵，防止少量的污泥硬化淤积或将出水口堵塞。放射性废液管道应有文字标记和流动方向标记。对放射性废水衰变池进行任何维修前，均需进行辐射水平和有害气体监测， 并进行记录。

患者卫生间你采用节水马桶设计，淋浴装置采取洗浴控制措施，每日洗浴次数不超过一次，单次 20min 等。患者住院宣教时，提醒住院人员注意节约用水，尽量减少废液产生。

(6) 妥善收集固体放射性废物。病房区域设置废物间，用于暂存废弃药物操作过程产生的手套、吸水纸，盛装放射性药物的药杯，服药患者使用过存在放射性污染的物品，如纸巾、喝水空瓶、纸杯等，还有排风装置更换的活性炭过滤器，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。放射性固废依照 HJ1188-2021 和《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,Sr-89 至少暂存 505 天）后，使用经检定或校准合格的检测仪器对满足衰变时间要求的废物逐袋进行表面巡测，辐射剂量率监测为所处环境本底水平且 α 、 β 表面污染水平分别小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 和 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，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。

住院患者使用过的被服，在废物间暂存至少 8 天后，经检测被服表面 γ 剂量率小于 $1\mu\text{Sv}/\text{h}$ 且 β 表面污染水平小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 时，方可进行清洗并再次使用。

(7) 每间病房内、病房内走廊两头、病房出口、服药室各安装 1 个摄像头（一共拟安装 14 个），便于工作人员实时监控病房内状况。在高活室和留观室、病房内等处安装对讲装置。

(8) 核医学科治疗区场所拟新配的表面污染监测仪和便携式辐射剂量巡测仪各 1 台，用于表面污染和剂量率水平的检测。在高活室出入口处，设卫生通过间，用来更换个人防护用品，并放置一台污染监测仪用于表面污染监测。

(9) 核医学科碘病房除配备便携式监测仪外，还设置多探头固定式剂量报警仪，在碘病房东侧过度病房（2 间）、患者入口处、患者出口处、高活室内设置剂量率探头，在线监测场所周围的辐射水平。

(10) 定期开展工作场所和环境辐射监测。每月自行对辐射工作场所卫生通过间、工作人员操作位、病区走廊等工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的区域进行常规的 γ 剂量率和 β 表面污染监测。每年委托有能力的检测单位对碘病房周围环境进行辐射监测，监测项目为 γ 射线、 β 表面污染和放射性废气排放口的 I-131 放射性气体气溶胶浓度。

(11) 全部辐射工作人员通过辐射安全与防护考核合格后持证上岗，所有人员开展个人剂量监测。

(12) 留观室受检者座椅之间设铅屏风或者铅隔断，设 1 个 6mm 铅当量铅屏风（长 \times 高尺寸不低于 1.0m \times 1.0m），减少受检者候诊期间的相互照射。

(13) 送药通道为从患者出口专梯到地下一层南侧门诊治疗患者出口进入病房的高活室。外单位送药时间一般安排在上午 7:00，科室病患较少的时间，可以减少与送药人员的交汇。

(14) 住院病房入口处拟设有两道防护门，通过电控确保不能同时打开两道门，便于工作人员给患者送餐。

10.6 放射性废水暂存和排放

本项目拟设有两个放射性废水池，位于楼外东侧地下（衰变池上方至少还有 1.5m 土层），见图 10-10，1 号衰变池（槽式，3 池总容积约为 114.7m³，40m³+38.2m³+36.5m³）位于南侧，2 号衰变池（槽式，3 池总容积约为 488.5m³，162.6m³+164.6m³+161.3m³）位于北侧。

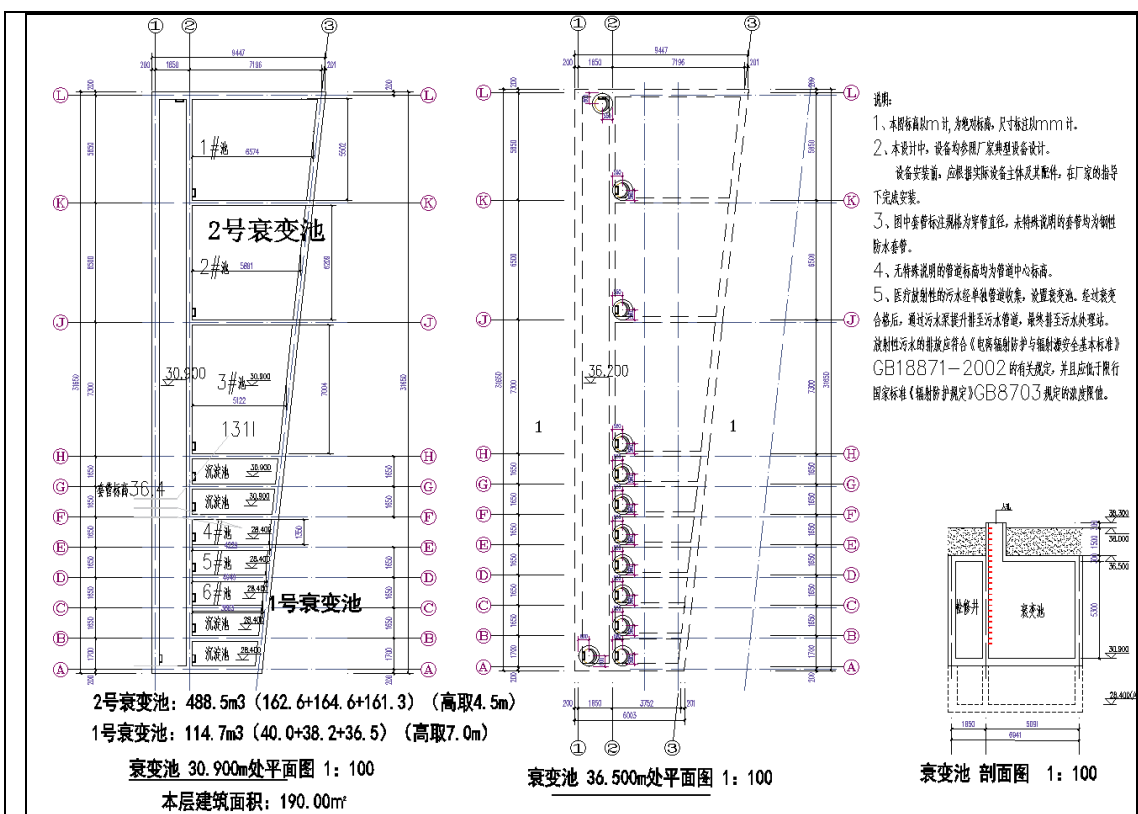


图 10-10 衰变池平剖面图

两个衰变池结构及管理如下:

(1) 2号衰变池池结构

- 采用 C30 抗渗混凝土建造,四周池壁厚不小于 300mm 砼,四周都是地下土层(衰变池西侧为检修井,之外为土层),槽与槽之间隔板厚 200mm,底板厚 300mm 砼,顶板厚 300mm 砼。采取防渗措施。
- 总容积约为 488.5m³ (162.6m³+164.6m³+161.3m³)。

(2) 1号衰变池池结构

- 采用 C30 抗渗混凝土建造,四周池壁厚不小于 300mm 砼,四周都是地下土层(衰变池西侧为检修井,之外为土层),槽与槽之间隔板厚 200mm,底板厚 300mm,顶板厚 300mm。采取防渗措施。
- 总容积约为 114.7m³ (40m³+38.2 m³+36.5m³)。

(3) 衰变池控制和管理

- 设计液位指示装置,自动进、排水阀门。智能控制系统、人性化操作管理、通过PLC和触摸屏设定工作参数和状态提醒机制。
- 衰变池独立工作,为防止“液位控制装置失灵导致衰变池盛满后不能自动

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

- 所有运行状态自行监控，可在无人值守状态下实现全自动稳定运行。
- 废水衰变系统整体采用“储存式衰变”方式，各衰变池循环运作。
- 内置设备泵体采用切割式潜水泵，可将固体杂质粉碎成颗粒排除，阀门采用电/手动双控制球阀，为后续设备维护检修提供保障。
- 放射性区域废水流入衰变区域，衰变池进水管设电动阀，出水采用潜水泵压力排出。运行时先开启 1 池（或 4 池）进水管电动阀，关闭 2-3 池（5-6 池）进水管电动阀，待 1 池（或 4 池）水位达到设计液位后，关闭 1 池（或 4 池）进水管电动阀，打开 2 池（或 5 池）进水管电动阀，使排水进入 2 池（或 5 池）。按照相同的操作方式。使排水依次进入 3 池（或 6 池）。待第 3 池（或 6 池）开始进水时，第 1 池（或 4 池）已过 10 个半衰变期（1 号和 2 号衰变池的废水至少暂存 180 天的要求），检测达标后开动潜水泵排放。待第 3 池水位达到设计液位后，重复向 1 池进水（此时为排空状态）完成进水一个循环。

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

本项目核医学科产生的放射性废水排放情况如下：

地下一层核医学科诊断区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以及应急淋浴水等。这些放射性废水经独立的排水管道排入 1 号衰变池，衰变池的废水排出前，至少经 180 天衰变并检测合格后将经医院污水管网，排至市政污水处理厂，1 号衰变池收集排放系统示意图见图 10-11。

地下一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、应急淋浴水、核医学科诊断区 I-131 候诊室的下水等。这些放射性废水经独立的排水管道从地面下排入 2 号衰变池，衰变池的废水排出前，至少经 180 天衰变并检测合格后将经医院污水管网，排至市政污水处理厂，2 号衰变池收集排放系统示意图见图 10-12。

地下一层和地下三层核医学科控制区的废水路由图见图 10-13 和图 10-14。

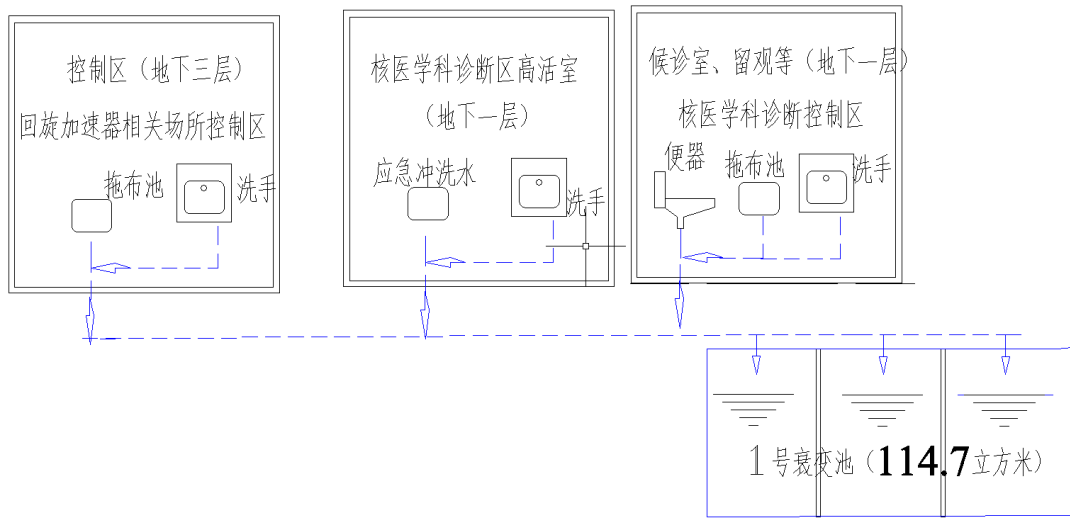


图 10-11 1号衰变池收集排放系统示意图

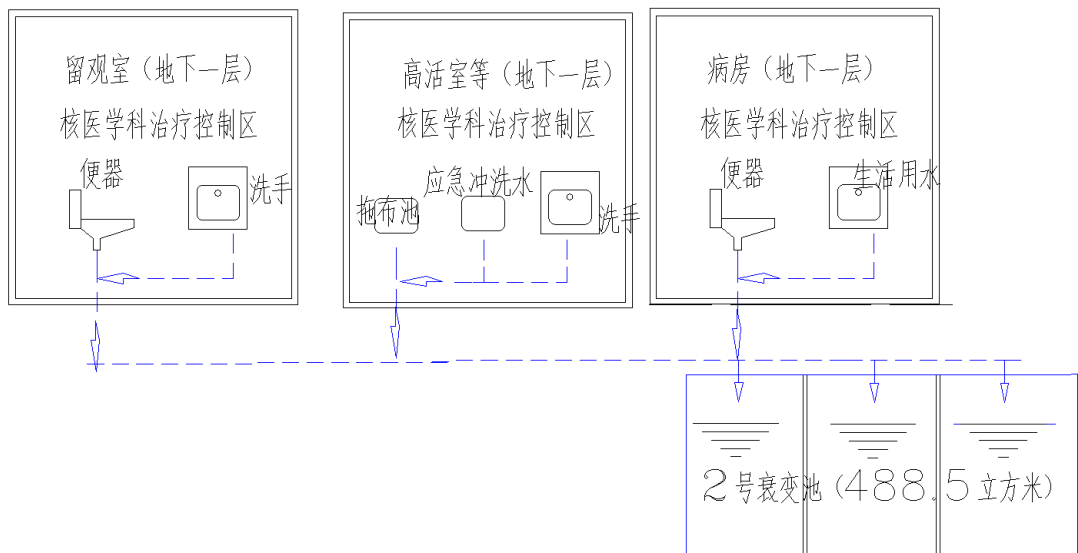


图 10-12 2号衰变池收集排放系统示意图

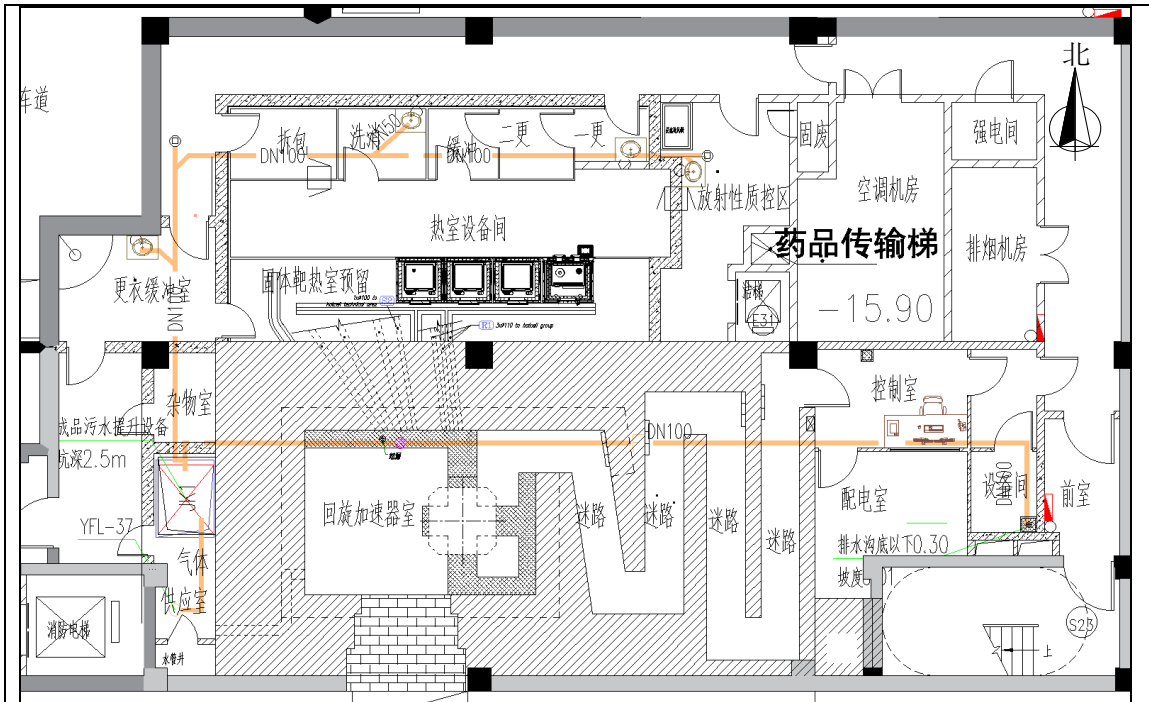


图 10-13 地下三层放射性废水排放图

10.7 二期核医学排风系统

核医学排风共分为 9 个排风系统，其中地下三层为 3 个独立排风系统，地下一层为 6 个独立排风系统。各排风机出口处都设置活性炭过滤装置。具体如下：

核医学科排风简化图见图 10-14，核医学科控制区的排风图见图 10-15 和图 10-16，楼顶排风口位置图见图 10-17。

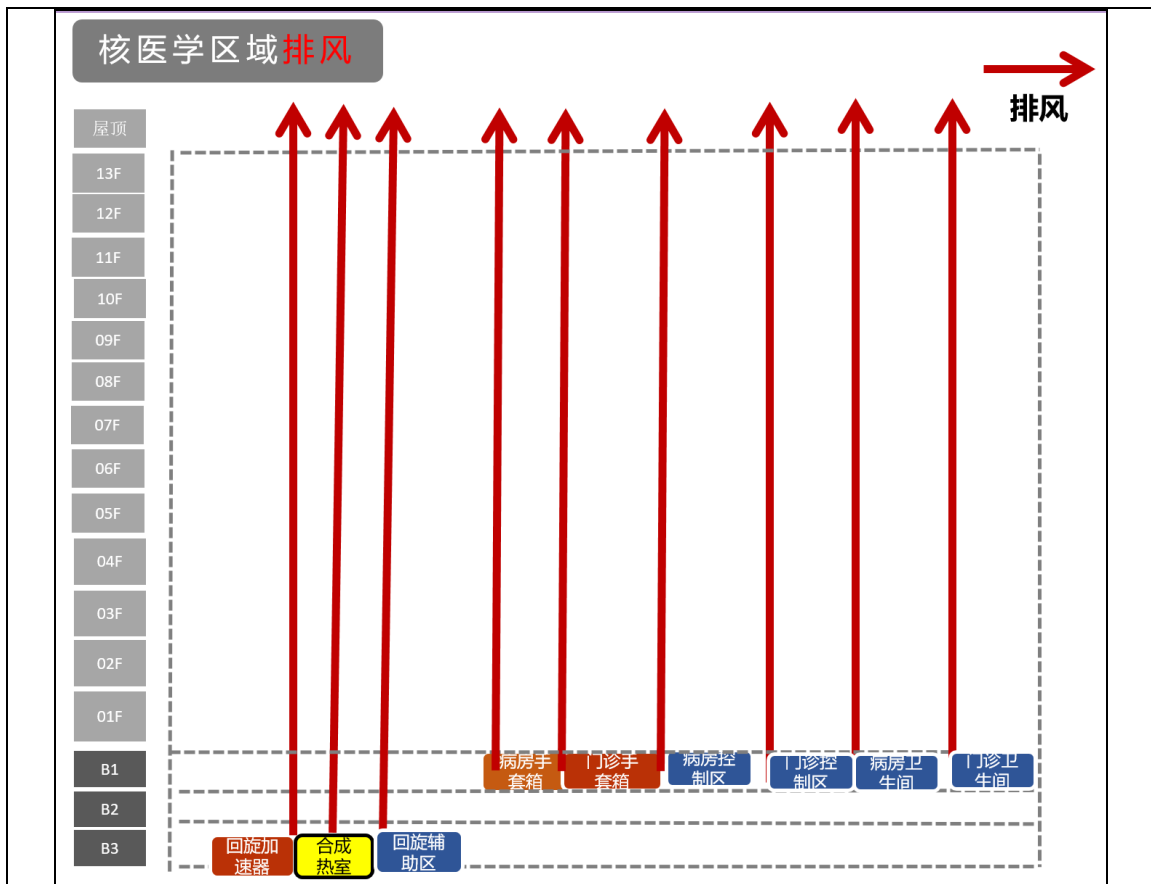


图 10-14 核医学科排风简化图

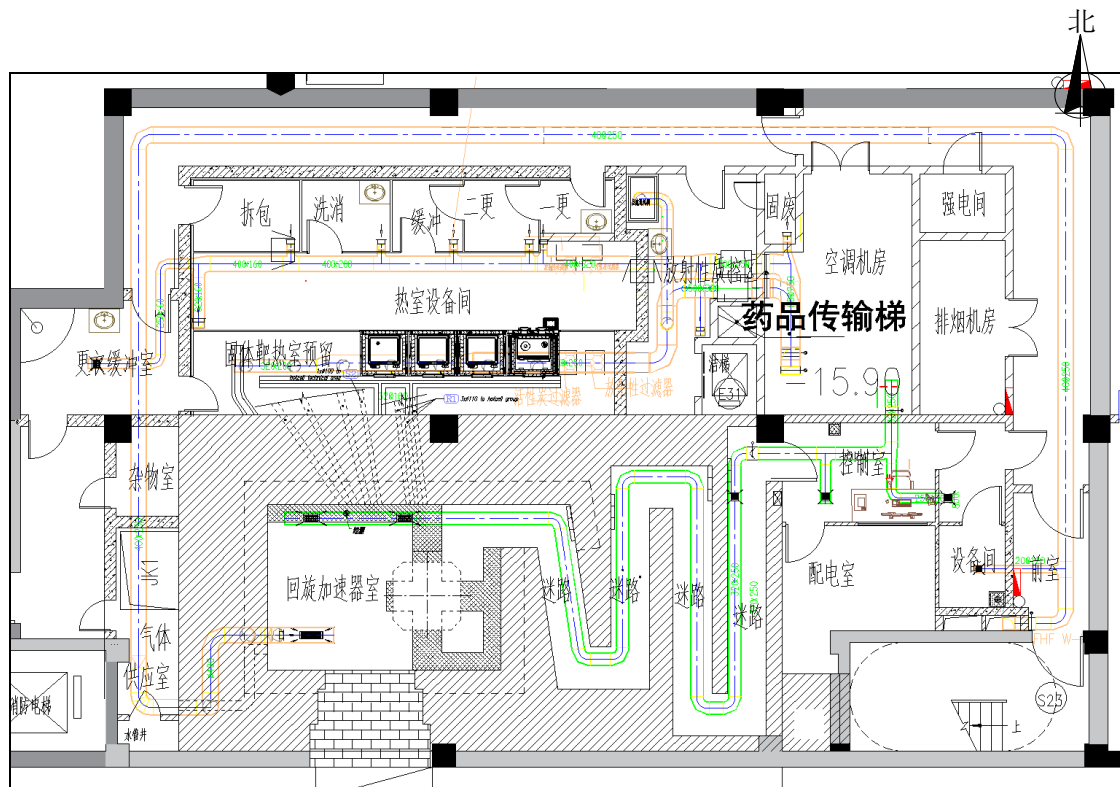


图 10-15 地下三层排风图

10.8 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，现对北京清华长庚医院从事本项目辐射活动能力评价列于表 10-8 和表 10-9。

10.8.1 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。	成立了由工会主席（医技部部长）为主席的辐射防护和安全管理委员会，全面负责医院的辐射防护监督和管理的工作，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，本项目都是已有科室改扩建项目，相关部门负责人不变。	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，在上岗前将参加辐射安全与防护考核。北京清华长庚医院拟为本项目配置至少新增 15 人辐射工作人员，在通过辐射安全与防护考核合格后持证上岗。	落实后符合
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。	落实后符合
4	放射性同位素与射线装置，应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	在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。回旋加速器室防护门外拟设置电离辐射警告标志，拟安装工作状态指示灯；拟安装急停按钮、巡检清场、监控对讲等安全防护设施	落实后符合
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐	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、4 台个人剂量报警仪、2 套固定式剂量报警仪（多个探头），能够满足现	落实后符合

	射监测等仪器。	在工作的需要。	
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。	拟完善和制定规章制度、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。	落实后符合
7	产生放射性废气、废液、固体废物的，还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	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 HJ1188-2021 和《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。	落实后符合
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。	落实后符合

10.8.2 《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	<p>第五条</p> <p>生产、销售、使用、贮存放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定设置明显的放射性标志，其入口处应当按照国家有关安全和防护标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全连锁、报警装置或者工作信号。</p>	<p>机房和病房外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等。在回旋加速器机房门外拟设有出束工作状态指示灯，防护门外贴有电离辐射警告标志，设置安全和防护设施以及必要的防护安全</p>	落实后符合

		联锁、报警装置等。	
2	<p>第九条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。</p>	<p>医院将委托有辐射水平监测资质单位每年对辐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。</p>	落实后符合
3	<p>第十二条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当对本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年1月31日前向发证机关提交上一年度的评估报告。</p>	<p>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。</p>	落实后符合
4	<p>第十七条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲，对直接从事生产、销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗。</p>	<p>医院规定所有辐射工作人员，在上岗前将参加辐射安全与防护考核。</p> <p>北京清华长庚医院拟为本项目配置至少15人辐射工作人员，在通过辐射安全与防护考核合格后持证上岗。</p>	落实后符合
5	<p>第二十三条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测；发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。</p>	<p>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）。</p>	落实后符合
6	<p>第二十四条</p> <p>生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，不具备个人剂量监测能力的，应当委托具备条件的机构进行个人剂量监测。</p>	<p>拟委托有资质单位对辐射工作人员进行个人剂量监测。</p>	落实后符合

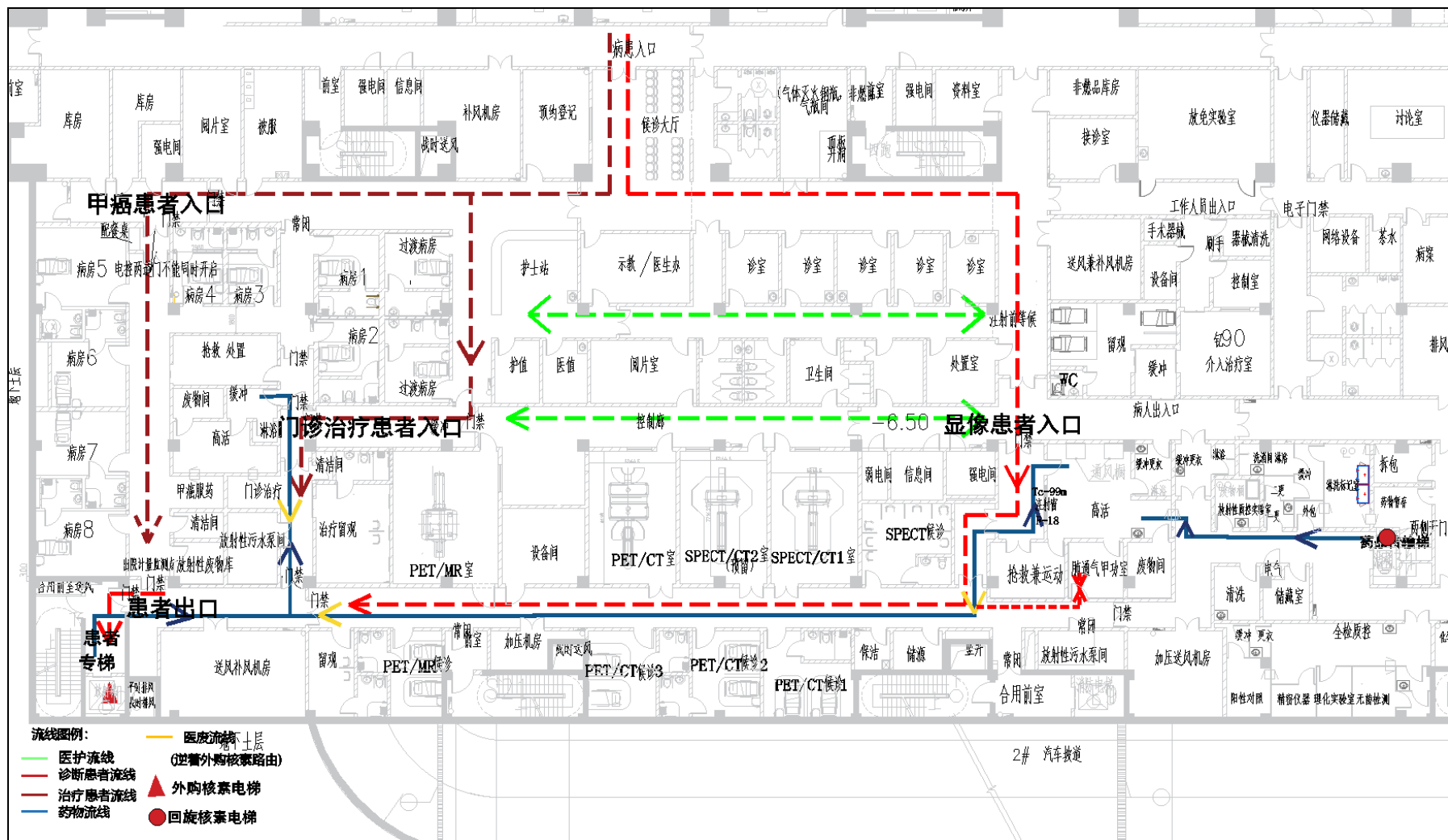


图 10-5 核医学科诊疗场所人流、物流示意图

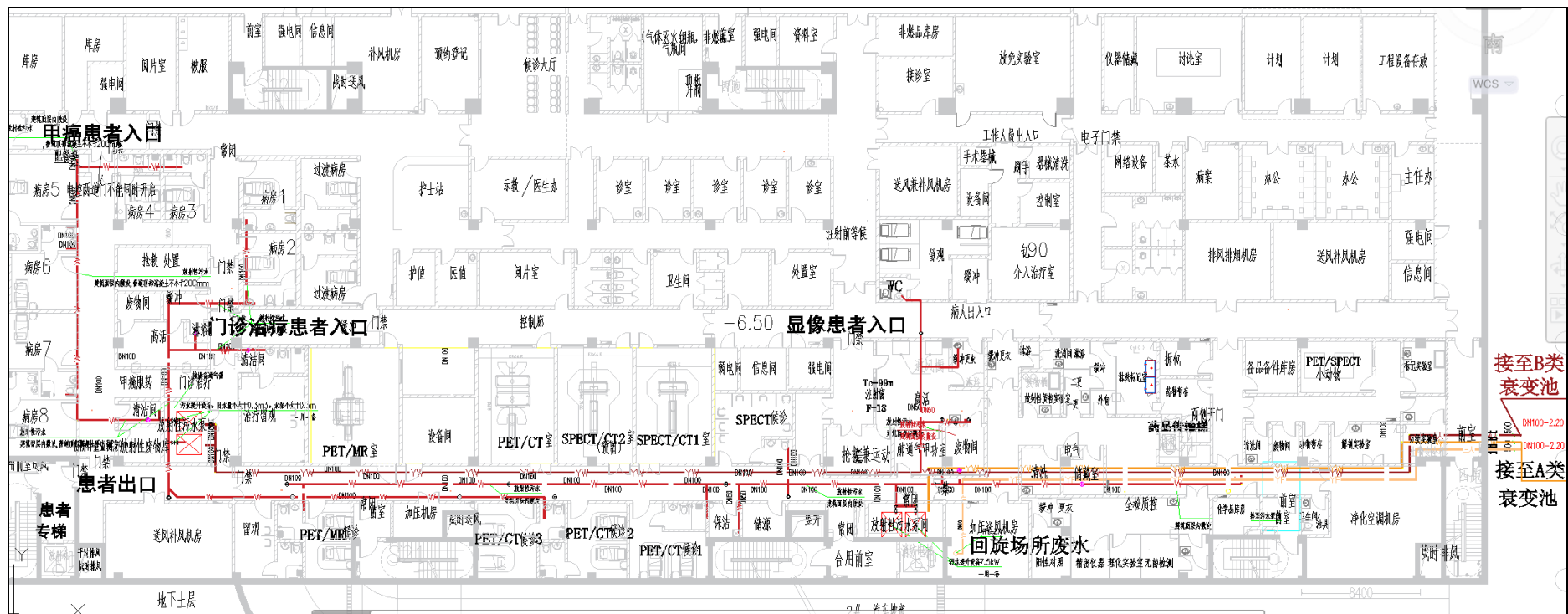


图 10-14 核医学科放射性废水排放图

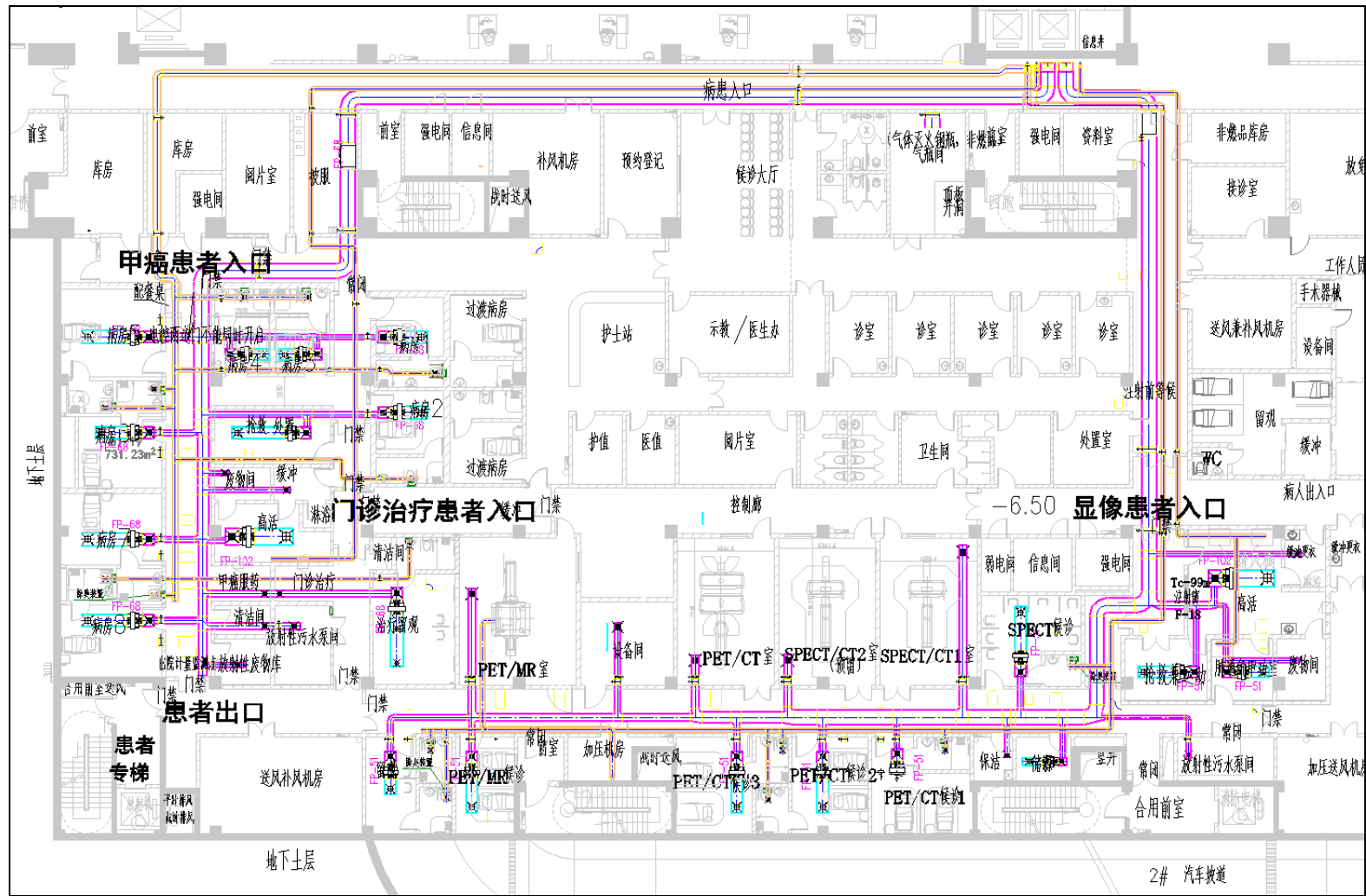


图 10-16 地下一层排风图

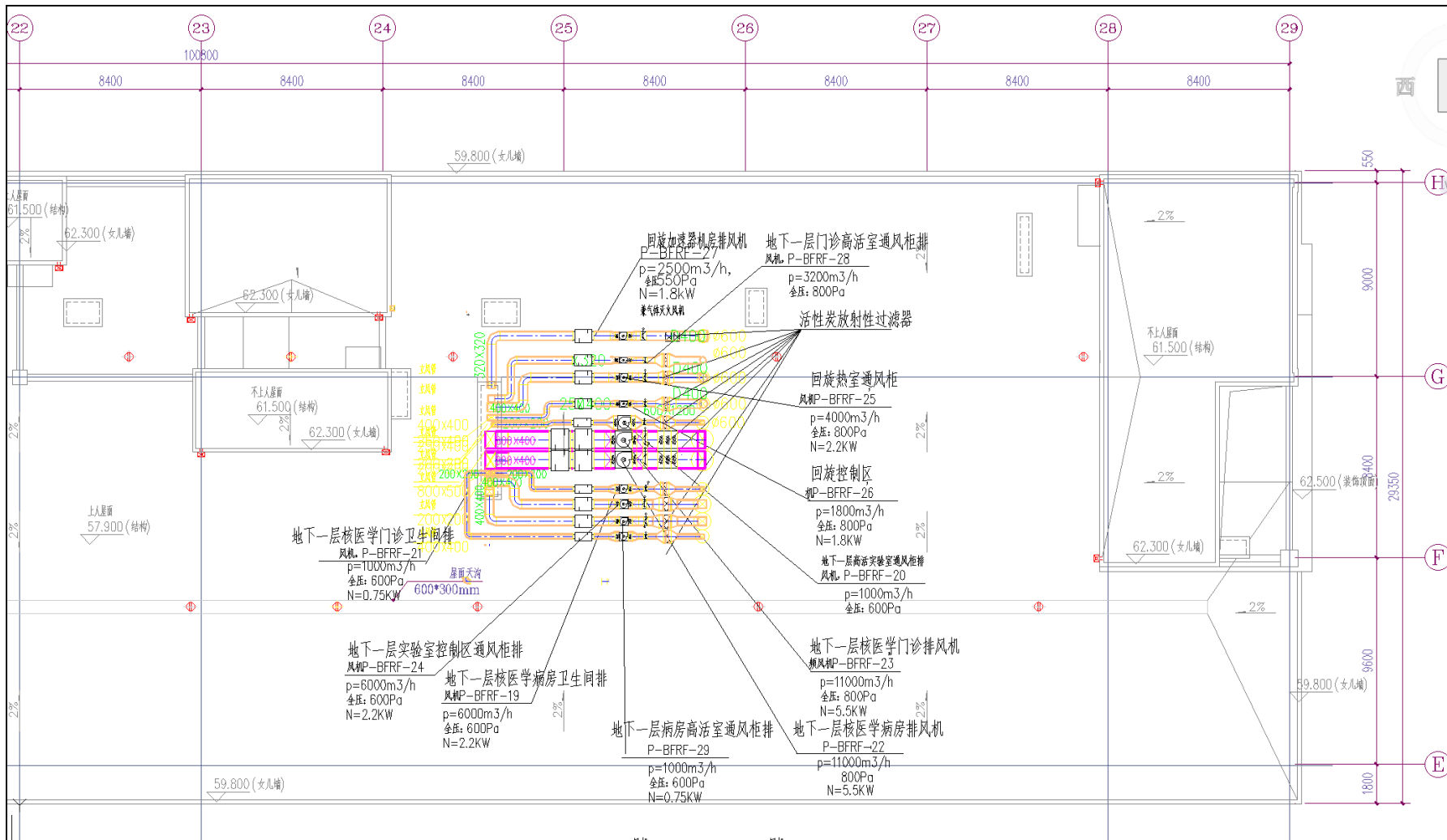


图 10-17 楼顶排风口位置图

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 回旋加速器室和相关场所运行（使用）后对环境的影响

11.2.1 回旋加速器辐射剂量估算

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。
- (3) 机房尺寸为 $400\text{cm}\times 400\text{cm}\times 250\text{cm}$ 。

本项目加速器机房屏蔽厚度均大于厂家推荐值，机房尺寸不低于推荐值，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 MCNPX2.7.0 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（ $2\times 75\mu\text{A}$ ）生产 F-18，靶位分别考虑#1+#5 靶和#3+#7 靶。

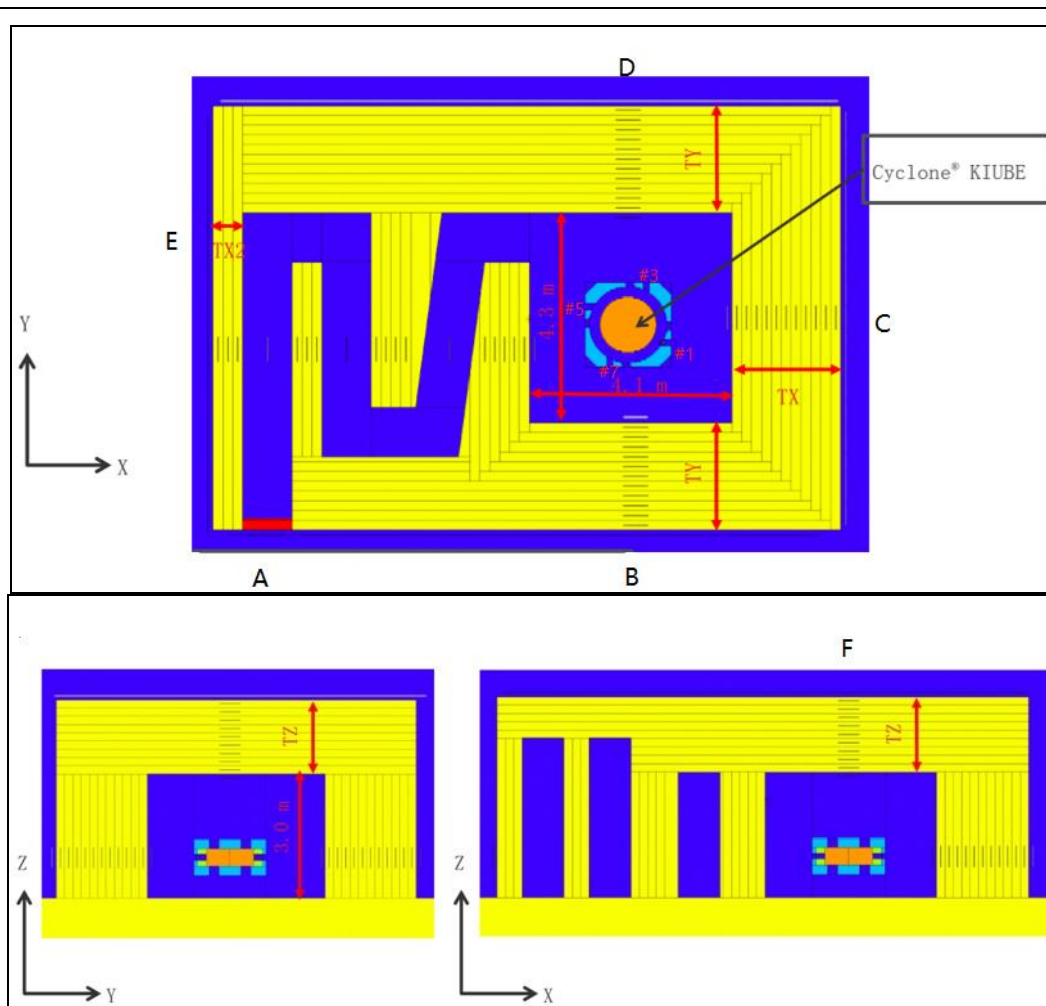
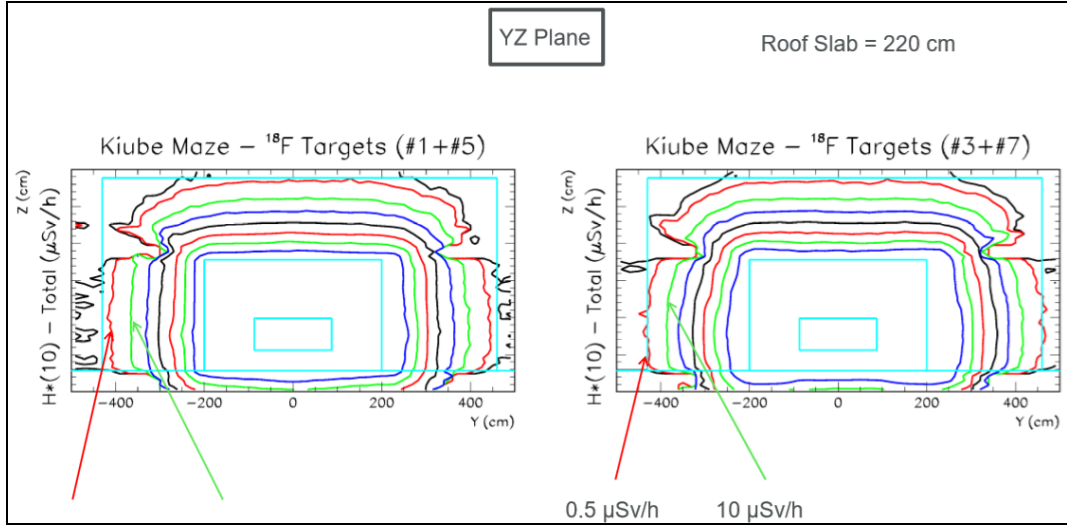
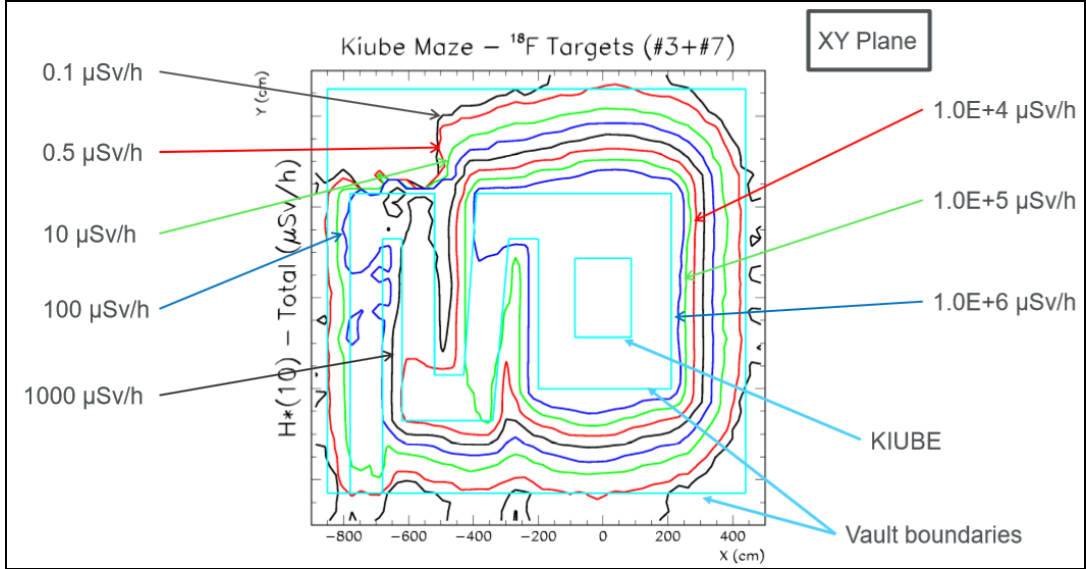
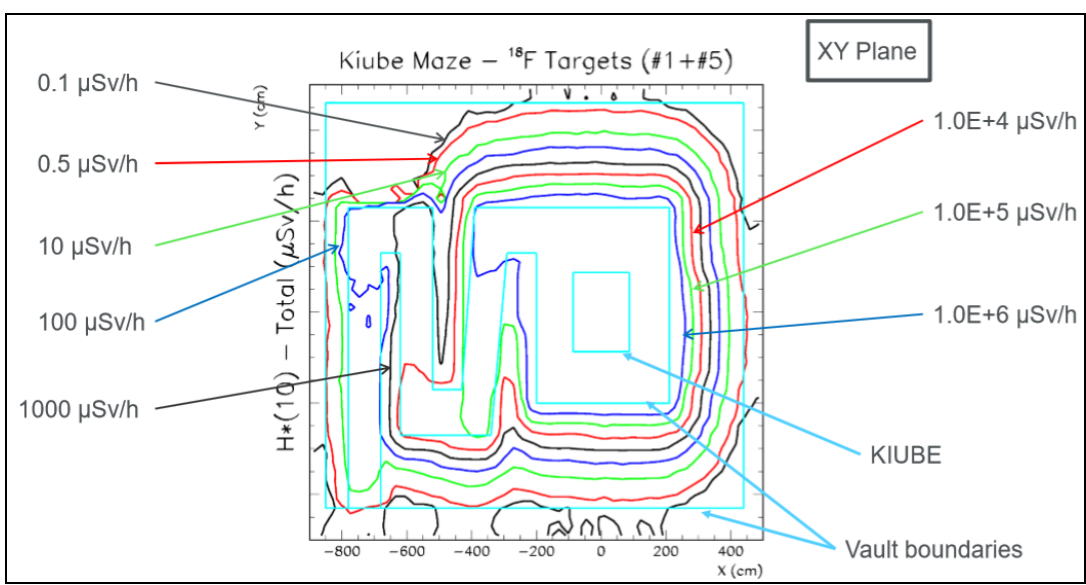


图 11-1 Cyclone®KIUBE 回旋加速器标准机房示意图

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	0.5m 混凝土	0.380	0.381
F	2.2m 混凝土	0.270	0.312



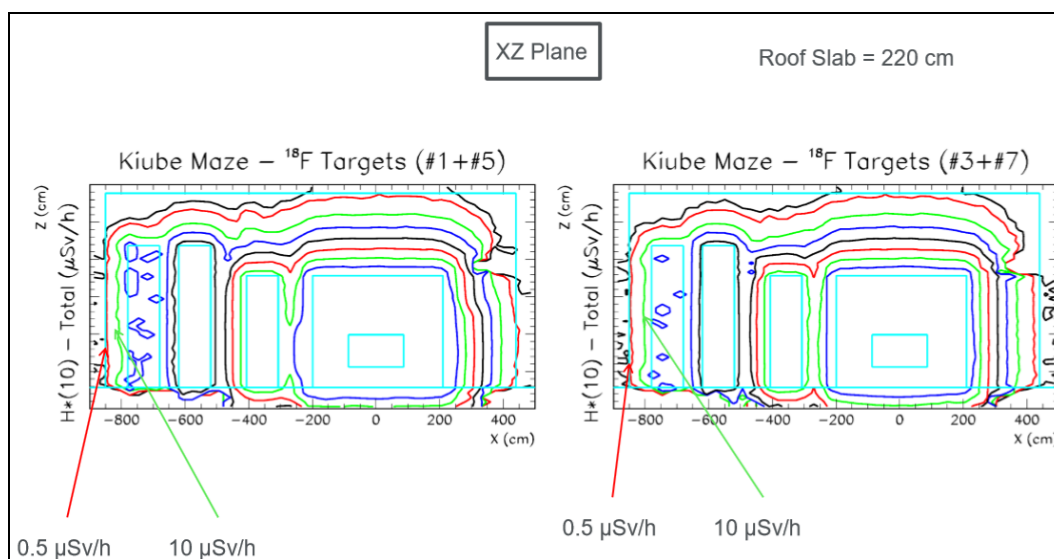


图 11-2 剂量分布曲线图

从标准机房外各关注点周围剂量当量率计算结果和剂量分布曲线来看，标准机房外周围剂量当量率低于 $0.5\mu\text{Sv/h}$ 。生产其他核素时在同样屏蔽条件下，周围的剂量水平约为 F-18 情况的 1/10。本项目加速器机房与标准机房布局相同，屏蔽设计厚度高于厂家推荐值，且本项目回旋加速器也采用双束流 ($2\times 75\mu\text{A}$) 生产 F-18，因此类比分析判断本项目加速器机房外周围剂量当量率将低于 $0.5\mu\text{Sv/h}$ 。

11.2.1.3 经验公式估算

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

屏蔽估算时，本项目保守考虑最大双束流 ($2\times 75\mu\text{A}$) 操作生产正电子核素。本项目加速器共配有 4 个靶位，每个靶位可用于生产不同的核素（其中 3 和 7 号靶位都生产 F-18），所有靶都导致类似的中子能谱。由于 F-18 的生产是回旋加速器设备的主要活动（用量最大），且用 ^{18}O 靶获得的总产量 n/p 比任何其他靶大 10 倍，用 F-18 来估算回旋加速器机房周围附加剂量率水平。

(1) Cyclone@KIUBE 加速器基本参数

加速器共设计有 8 个靶位（本项目拟使用 4 个），每个靶位可用于生产不同的核素，所有靶都导致类似的中子能谱。由于 F-18 的生产是回旋加速器设备的主要活动，且根据生产商提供的技术参数，Cyclone@KIUBE 加速器运行时，最高中子

流由靶体上 $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ 反应产生, 且用 ^{18}O 靶获得的总产量 n/p 比任何其他靶大 10 倍。本项目采用双束流 ($2 \times 75 \mu\text{A}$) 操作生产 F-18 正电子核素。其最高中子能量能达到 15MeV (能谱峰值为 2MeV), γ 射线最高能量能达到 10MeV , 中子产额为 $6.95 \times 10^{-3} (\text{n/p})$, 光子产额为 $8.3 \times 10^{-3} (\text{g/p})$ 。这双束流模式下 (常用单束流就满足使用要求) 基本参数见表 11-2。

表 11-2 双束流基本参数

方式	距离靶 1m 处的最大剂量率 $H^* (10)$, $\mu\text{Sv/h}$	备注
	双束流 ($2 \times 75 \mu\text{A}$)	
0° 方向 (靶前方)	$9.0 \times 10^7 (6.0 \times 10^5)$	括号内的数值为 γ 辐射水平
90° 方向 (垂直)	$2.0 \times 10^7 (4.0 \times 10^5)$	
180° 方向 (靶后方)	$9.0 \times 10^7 (6.0 \times 10^5)$	

根据表 11-2 的基本参数, 本项目分别按表中给出的剂量水平进行估算: 靶前方 (0°) $9.0 \times 10^7 \mu\text{Sv/h}$, 90° 方向 (与墙面垂直) $2.0 \times 10^7 \mu\text{Sv/h}$, 其中 γ 辐射基本是各向同性的, 其剂量率取 $6 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$ 。1 μA 束流相当于 6.24×10^{12} 质子/s, 富集 H_2^{18}O 靶一个质子最多产生 6.95×10^{-3} 个中子, 则 $2 \times 75 \mu\text{A}$ 的中子发射率为 $6.5 \times 10^{12} \text{n/s}$ 。

(2) 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, $6.5\text{E}+12\text{n/s}$ (单靶时 $3.25\text{E}+12\text{n/s}$);

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

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 。

(3) 加速器机房外 γ 剂量率估算

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

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）。

根据上述公式（11-1）和（11-2）方法计算的加速器机房关注点周围剂量当量率结果见表 11-3 所示，计算时机房外各关注点位置见图 11-3 和图 11-4 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。

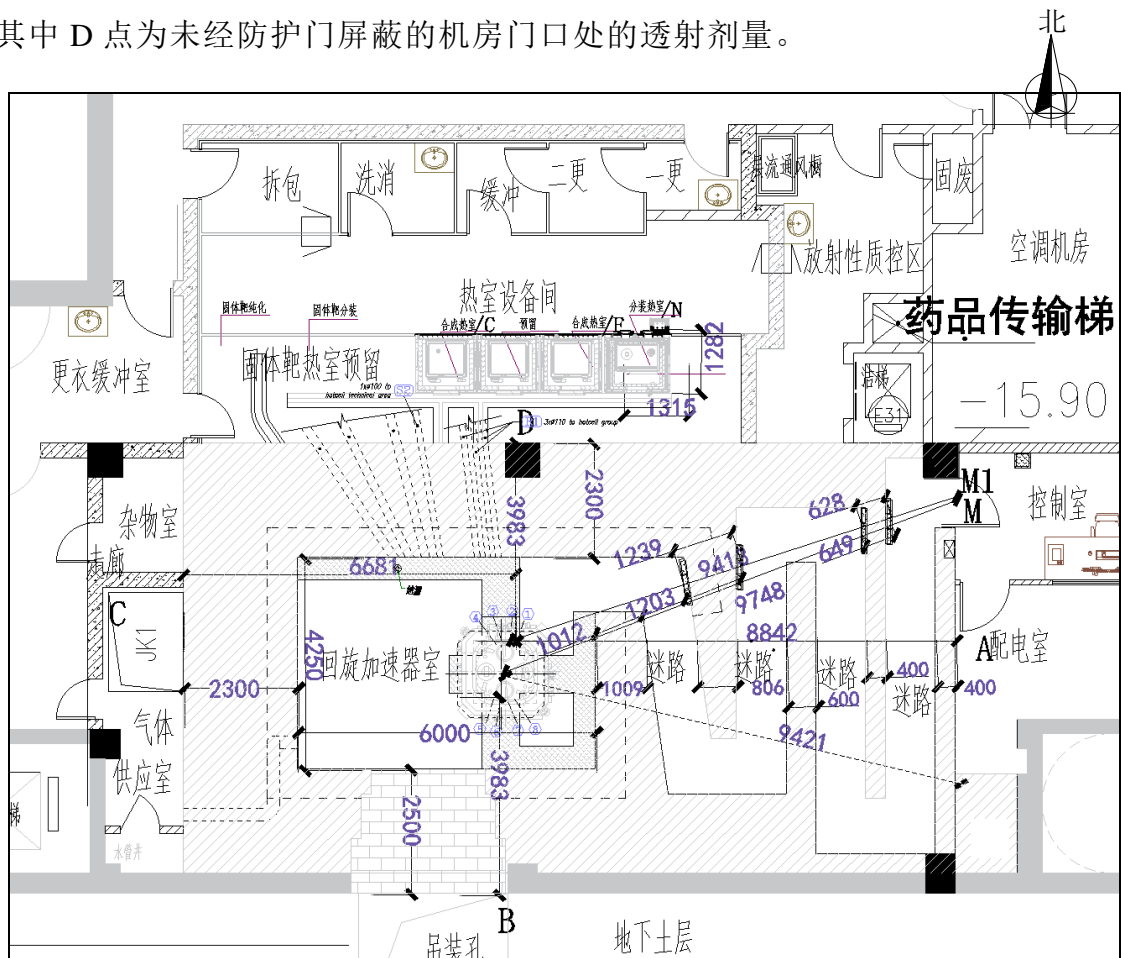


图 11-3 回旋加速器机房关注点平面位置图

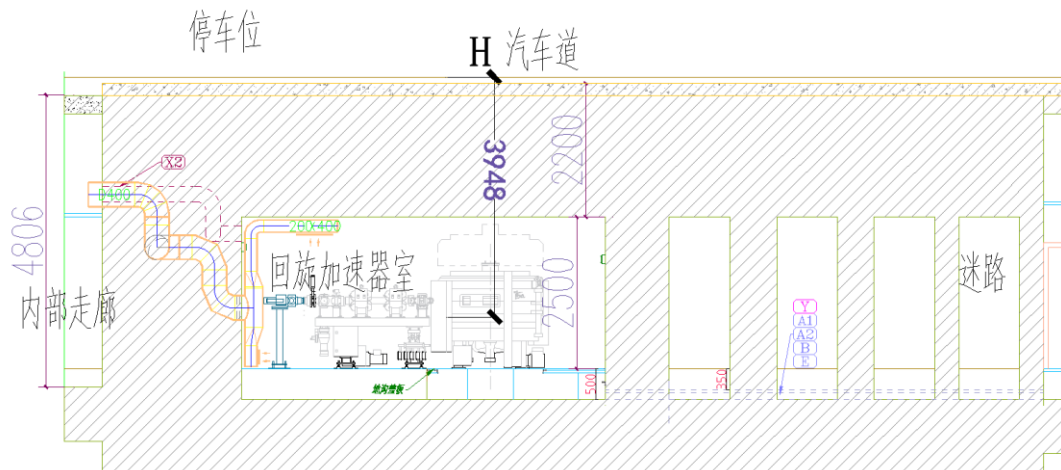


图 11-4 回旋加速器机房关注点剖面位置图

表 11-3 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 (μSv/h)	γ 剂量率 (μSv/h)	总剂量率 (μSv/h)	位置描述
A	884	321cm 砼	4.34E-7	1.14E-4	1.14E-4	配电室
B	428	250cm 砼	1.49E-3	2.62E-2	2.77E-2	土层
C	698	230cm 砼	3.68E-3	3.02E-2	3.39E-2	走廊
D	428	230cm 砼	9.79E-3	8.04E-2	9.02E-2	热室设备间
H	425	220cm 砼	2.55E-2	9.54E-2	1.21E-1	车道
M	1005	286cm 砼	9.08E-6	6.28E-4	6.37E-4	门口
M1	971	187cm 砼	5.46E-2	1.75E-1	2.29E-1	门口

备注：估算点为屏蔽体墙外 30cm 处。除了 M1 为单靶外，其它点位都是保守按双靶工作时估算（M1 点位 1m 处 γ 辐射的最大剂量率取 $4.0 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$ ），防护门外剂量率未考虑防护门的屏蔽。

从表 11-3 估算结果，都不高于加速器机房外周围剂量当量率 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 出厂要求。

(4) 防护门外剂量率估算

防护门外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 $9.0 \times 10^7 \mu\text{Sv/h}$;

d_1 —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 11-3~11-6, 中子反散射计算参数与结果见表 11-4, 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 $1.92\text{E-}1\mu\text{Sv/h}$, 叠加透射剂量 $2.29\text{E-}1\mu\text{Sv/h}$ 后为 $4.21\text{E-}1\mu\text{Sv/h}$ 。

表 11-4 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 (MeV)	入射角 θ_0 (°)	散射角 θ (°)	散射距离 d_n (m)	散射面积 A_n (m^2)	反散射系数 α_n	剂量 H_s ($\mu\text{Sv/h}$)
1	2	45	20	5.1	2.8	0.0667	3.50E+04
2	0.48	20	20	6.0	1.3	0.075	9.47E+01
3	0.115	20	20	7.3	1.4	0.075	1.87E-1
4	0.027	20	20	7.2	0.8	0.075	1.92E-1

备注: 反散射系数采用内插法所得。

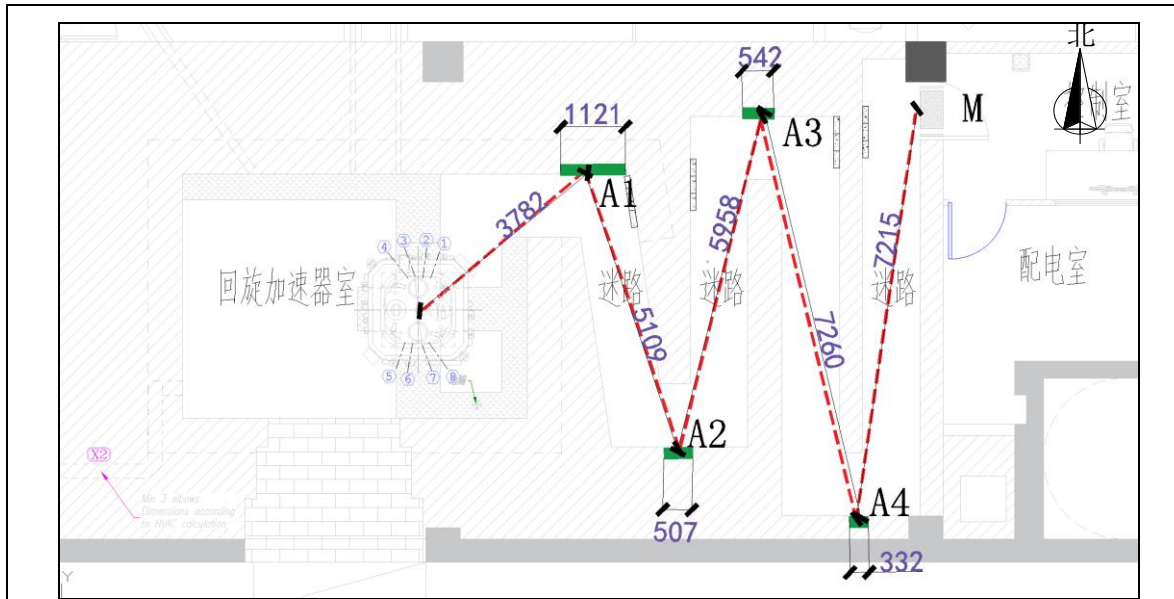


图 11-5 中子反散射路径示意图

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 600 次，每次 1h，年出束时间为 600h。估算各个关注点人员的年有效剂量见表 11-5。

表 11-5 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 (h)	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年有效剂量, μSv
工作人员	D	热室设备间	1	600	9.02E-2	5.41E+01
	M1	防护门	1/8	600	4.21E-1	3.16E+01
公众	H	地下二层公众	1/16	600	1.21E-1	4.54E+00

由表 11-5 中可知，本项目加速器室工作人员所受剂量为 $54.1\mu\text{Sv/a}$ ，公众人员所受剂量最大为 $4.54\mu\text{Sv/a}$ 。

11.2.2 合成分装热室辐射剂量估算

(1) 合成分装热室环节工作人员的受照剂量

热室设备间规划设置 7 个模块箱（外尺寸约为 $128\times 131\text{cm}$ ，其中 4 个预留），本项目 2 个合成热室正面采用 70mm 的铅进行防护，侧面、顶面、地面都采用 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。

分装热室（含操作 N-13 核素）正面采用 70mm 的铅进行防护，侧面、顶面、地面都采用 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。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，分装程序结束后，模块箱提示工作人员，此环节提前把试剂瓶装载到专用的铅屏蔽容器中（自动分装后药品是储存在铅罐里），铅屏蔽容器采用 42mm 的铅当量屏蔽，铅屏蔽容器的尺寸为半径 6cm，高 16cm，铅容器盖子为旋转式卡扣盖子。对于 511keV γ 射线，铅屏蔽的十值层 $TVL=16.6\text{mm}$ ，混凝土屏蔽的 $TVL=176\text{mm}$ ($\rho=2.35\text{t/m}^3$)。

采用下列公式计算热室模块箱外表面的剂量率：

$$D = K \times A \times r^{-2} \times 10^{-d/TVL} \text{-----} \quad (\text{公式 11-7})$$

式中：

D —热室模块箱外的 γ 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$ ；

K —剂量率常数，F-18: $0.143\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}/\text{MBq}$ ，C-11、N-13: $0.148\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}/\text{MBq}$ ；

A —为点源活度，MBq

r —关注点（热室外表面 30cm 处）距源中心的距离，0.9m；

d —屏蔽厚度，cm；

TVL — γ 射线 1/10 值层厚度，cm

F-18、C-11、N-13 每天最大生产量分别为 111GBq、14GBq、37GBq，其中 F-18 为一天两次生产，每次最大生产量不大于 55.5GBq，分装热室保守按 N-13 的 37GBq 估算，实际每次 F-18 分装一般只有 3.7GBq，且都是储存在 42mmPb 的铅罐里。由于热室都是紧邻设置，中间的热室为 F-18 合成热室，则模块箱（热室）外表面的剂量率计算结果如下表所示：

表 11-6 模块箱周围的剂量率计算结果

序号	核素名称	初始活度 (MBq)	位置	屏蔽厚度 (cm)	距离 (m)	衰减因子	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	备注
1	F-18	5.55E+4	正面 30cm 处	7cm 铅	0.9	6.07E-5	5.95E-1	F-18 合成热室
2			后面 30cm 处 (平常无人区)	6cm 铅	0.9	2.43E-4	2.38E+00	

3			楼上	6cm 铅 +55cm 砼	3.9	1.82E-7	9.51E-5	
4	N-13	3.70E+4	正面 30cm 处	7cm 铅	0.9	6.07E-5	3.96E-1	分装热室
5			后面 30cm 处 (平常无人区)	6cm 铅	0.9	2.43E-4	1.59E+00	
6			侧面 30cm 处 (平常无人区)	6cm 铅	0.9	6.07E-5	3.96E-1	
7			东侧放射质控室	6cm 铅 +30cm 砼	2.6	4.80E-6	3.75E-3	
8			C-11	1.40E+4	正面 30cm 处	7cm 铅	0.9	
9	后面 30cm 处 (平常无人区)	6cm 铅			0.9	2.43E-4	6.01E-1	
10	侧面 30cm 处 (平常无人区)	6cm 铅			0.9	2.43E-4	6.01E-1	

备注：距离取值都没考虑热室与墙面间的距离。

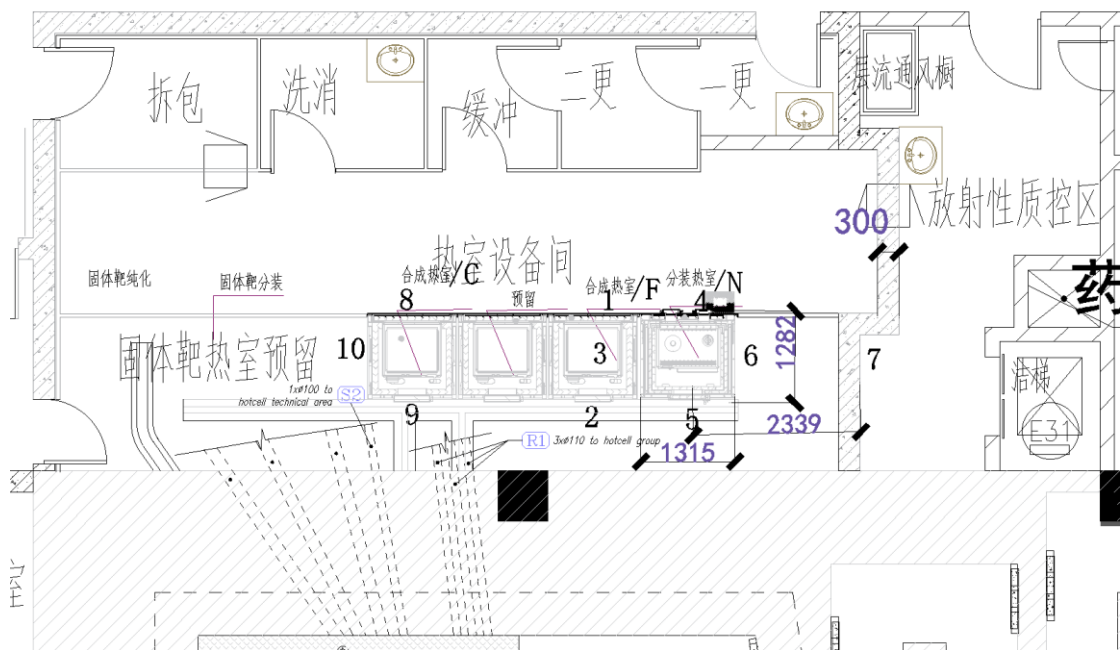


图 11-6 热室设备间合成热室周围估算点位图

计算得到，模块箱表面正面的最大剂量率为 $5.95E-1\mu\text{Sv/h}$ ，热室后面最大剂量率为 $2.38\mu\text{Sv/h}$ （平常无人区，只有故障时厂家维修或维护时才进入），满足剂量率 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的要求。回旋制备场所周围墙体至少 300mm 厚混凝土，混凝土（砼）屏蔽对 $511\text{keV}\gamma$ 射线的 $\text{TVL}=176\text{mm}$ ，衰减因子不大于 0.02，不考虑距离衰减情况下，热室设备间外剂量率水平不大于 $0.05\mu\text{Sv/h}$ 。

对应于回旋加速器打靶次数，合成分装年操作次数最多为 600 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 100h，人员年受照剂量为 $5.95E-1\mu\text{Sv}/\text{h}\times 100\text{h}=59.5\mu\text{Sv}$ 。预计对周围公众的年受照剂量不超过 $0.05\mu\text{Sv}/\text{h}\times 200\text{h}=10\mu\text{Sv}$ （20min/次）。

（2）工作人员为药物转运环节工作人员的受照剂量

本项目中正电子核素采用药物转运防护罐（42mmPb）或注射器转运防护箱（25mmPb）运输，1m 处剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，运输过程中距工作人员的距离按 50cm 估算（剂量率不大于 $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ 估算）。每次药物从热室到高活室手套箱转运平均时间以 2min 估算，则运转到注射位时工作人员的受照剂量为 $10\mu\text{Sv}/\text{h}\times 120\text{s}/\text{人}\times 600\text{次}\times 1/3600\text{s}/\text{h}=200\mu\text{Sv}$ 。

11.2.3 放化质控室辐射影响

使用的放射性药物单次最大操作量为 $7.4\times 10^6\text{Bq}$ ，1m 处操作位剂量率约 $1.06\mu\text{Sv}/\text{h}$ ，质控时与辐射工作人员之间有 10mm 铅当量的铅玻璃进行屏蔽（衰减因子为 2.5×10^{-1} ），操作位置距源 0.5m，每次操作源约 10 分钟，每年保守操作 600 次，辐射工作人员年附加剂量为 $106\mu\text{Sv}$ （ $1.06\times 2.5\times 10^{-1}\times 2^2\times 10/60\times 600$ ），放化实验室紧邻的监督区墙体为 20cm 砼屏蔽（衰减因子为 6.24×10^{-2} ），因此放化质控室操作过程对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 $^{27}\text{Al}(\text{n}, \text{p})^{27}\text{Mg}$ 、 $^{27}\text{Al}(\text{n}, \alpha)^{24}\text{Na}$ 、 $^{27}\text{Al}(\text{n}, \gamma)^{28}\text{Al}$ 、 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, 2\text{n})^{62}\text{Cu}$ 、 $^{65}\text{Cu}(\text{n}, 2\text{n})^{64}\text{Cu}$ 、 $^{63}\text{Cu}(\text{n}, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 、 $^{65}\text{Cu}(\text{n}, \gamma)^{66}\text{Cu}$ 、 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 、 $^{64}\text{Zn}(\text{n}, \gamma)^{65}\text{Zn}$ 和 $^{64}\text{Ni}(\text{n}, \gamma)^{65}\text{Ni}$ 反应。

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。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、20μA 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% (285μSv/h), 之后感生放射性水平衰变趋于平缓。可见, 在设备维修和维护时 (此环节由亿比亚 (北京) 粒子加速器技术有限公司工程师完成), 需特别注意活化部件的外照射问题。辐射工作人员 (亿比亚 (北京) 粒子加速器技术有限公司工程师) 需佩带个人剂量报警仪, 以防止长时间工作导致人员受照大剂量照射, 厂家规定每月对个人剂量计进行检测一次, 1mSv/月, 每年不超过 10mSv, 超过年度限值后就暂停维护工作。

加速器的定期维护需要更换 Hava 膜, 每年约 2 次, 每次需 1min, 类比同类型 HM-20 回旋加速器更换 Hava 膜时, 打开真空腔后, 距离机器外表面 20cm 处 γ 的周围剂量当量率为 512μSv/h, 则更换 Hava 膜的受照剂量约 17μSv (此环节也由亿比亚 (北京) 粒子加速器技术有限公司工程师完成)。

工作人员 (厂家工程师) 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 Ar-41, Ar-41 为惰性气体, 被人员吸入后多数会再次呼出, 故吸入所致内照射可以忽略。考虑到核素 Ar-41 的半衰期较长 (1.83h), 且 β 射线能量 (2.492MeV) 和 γ 射线能量 (1.677MeV) 较高, 故估算其排放到环境后对排风口周围停留的公众的浸没外照射贡献。采用下式计算其浓度:

$$A = \frac{2R_0\lambda\sigma Y\rho A_0 f_n f_m}{(\lambda + F/V)GV} \left[1 - e^{-(\lambda + \frac{F}{V})t} \right] \text{----- (公式 11-8)}$$

式中:

A—核素的浓度, Bq/cm³

R₀—机房等体积等效球的半径, 228cm

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, 3.25×10¹²n/s

ρ—空气的密度, 0.0012g/cm³

A_0 —阿伏伽德罗常数, 6.022E+23/mol

f_n —母核的天然丰度, 1

f_m —母核在空气的重量百分比, 0.013

G —母核的摩尔质量, 39.95g/mol

t —加速器的运行时间, 7200s

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

V —机房的体积, $5.0 \times 10^7 \text{cm}^3$

按照上式的计算公式, 本项目回旋加速器机房内 Ar-41 饱和浓度为 $4.42\text{E-}2\text{Bq}/\text{cm}^3$, 假设有 0.1%Ar-41 气载放射性物质经高效过滤(两级过滤, 两级均为 99%过滤效率)后排入大气, Ar-41 产生的空气浸没外照射估算模式为

$$D_A = t \cdot S_f \cdot C_i \cdot G_A \text{----- (公式11-9)}$$

式中:

D_A —年空气浸没全身剂量, Sv/a;

t —年受照时间, s/a, $1.8\text{E}+6\text{s}/\text{a}$;

S_f —建筑物屏蔽产生的剂量减弱因子, 对于个体, 取0.7;

C_i —地面空气浓度, Bq/m^3 ;

G_A —烟云浸没照射剂量转换因子, Ar-41为 $6.13\text{E-}14\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

根据以上公式, 不考虑大气稀释作用以排风口的浓度进行公众剂量估算, 估算结果为 $3.4\mu\text{Sv}$, 再考虑大气稀释作用和人员居留等因素的影响, 远小于公众受照剂量约束值。

11.2.5 非放射性气体影响分析

本项目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)。

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

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，228cm

L — γ -光子在空气中的减弱长度，122cm

V —辐照区域的体积， $5.0 \times 10^7 \text{cm}^3$

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 $2.14 \text{E}-2 \text{mg}/\text{m}^3$ ，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》(GBZ2.1-2019) 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 放射性药物合成过程释放的放射性气溶胶

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

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

以生产 F-18 为例，热室中一次最大操作量 55.5GBq (1.5Ci)，完成一次合成操作大约需要 20min。假设在操作过程中，保守假设有 1% (555MBq) F-18 气载放射性物质经三级高效过滤 (过滤效率以 99.9% 计) 后排入大气，通风量取 $1000 \text{m}^3/\text{h}$ (热室的设计通风量为 $2000 \text{m}^3/\text{h}$)，则排气口 F-18 的释放率约为 $4.63 \times 10^2 \text{Bq}/\text{s}$ ，

排放浓度约为 1665Bq/m³。

根据《环境影响评价技术导则》-大气环境（HJ2.2-2018）推荐的估算模式，计算地面最大浓度为 4.78×10⁻²Bq/m³（26m 处）。

采用下式估算：

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

式中： $H_{h,i}$ —吸入内照射待积有效剂量，Sv/h；

T —年受照时间，600h；

u —为个人正常情况下的呼吸率，m³/h，成人取 1.2m³/h；

$C_{a,i}$ —评价点的空气浓度，Bq/m³；保守取 4.78×10⁻²Bq/m³；

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

计算得出公众受到的内照射剂量为 2.7×10⁻³μSv，可见，热室合成过程中排出的 F-18 等放射性核素对周围公众的内照射剂量贡献几乎可以忽略。

11.2.7 放射性三废

11.2.7.1 放射性废水

本项目产生的放射性废水主要包括：在正常运行过程中回旋加速器生产核素时的淋洗废液、实验质检过程中的药物试剂样品；应急状态下产生的废液包括清洗废液和事故情况下加速器冷却水废液。

（1）回旋加速器生产核素的淋洗废液

本项目回旋加速器在生产核素时，会产生极少量的含有杂质离子的淋洗废液，单次产量约 6.8ml，按照各个核素的年最大累计操作次数 600 次计算，年废液产生量约为 4.1L/年，采用滤纸吸附的方法将其转化为固体废物（实际操作过程基本不产生废液），存放在废物桶内，符合清洁解控标准后按照医疗废物处理。

（2）质检药物试剂样品

本项目在同位素操作的各个实验环节，放射性废水的产生量如表 11-7 所示：

表 11-7 质检过程放射性废液产生量

实验名称	核素名称	单次废液产生量 (ml)	单次废液活度 (Bq)	年操作次数	年废液产生量 (ml)
放化纯检验	F-18 等	1.5	3.70E+7	600	900

上述废液单次产生量非常少，且放射性很低，但属于有机废液，这些废液收

集于塑料桶内，暂存于实验室内，待积攒到一定量满足解控后由有资质的单位回收处理。

(3) 应急清洗废水

本项目应急清洗废水主要来源于应急情况下冲手、淋浴、以及加速器冷却水、模块管路冲洗水，废水的产生量如表 11-8 所示。

表 11-8 清洗废液产生量

工作过程	废水来源	最大发生次数	一次水量 (L)	每个合计 (L)	备注
F-18 等质检	应急冲手	5 次/月	1	60L/年	进入 1 号衰变池
F-18 等合成、分装	应急淋浴	1 次/年	50	50L/年	
回旋加速器	加速器冷却水	100L (意外全部流出)			
各生产热室	模块管路冲洗	23/月	0.1	27.6L/年	
总计	/	/	/	237.6L/年	

11.2.7.2 放射性废气

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

11.2.7.3 放射性固废

(1) 在 F-18 等正电子药物生产环节，放射性固体废物主要是来自加速器维修更换产生的废弃件（碳膜支架和靶膜），产生量很少，年总量约 0.1kg。这些高活性固废统一收集到铅放射性废物桶，最后委托有放射性固废处理资质的单位处理。

(2) 在核素药物的生产过程中产生极少量的沾污放射性核素的硅胶、树脂、氧化铝、滤膜及过滤柱等，每天产生的固体废弃物的量约为 0.1kg，每年按 250 个工作日计算，年产生量约 25kg/年。

(3) 本项目通风系统中高效过滤和活性炭过滤装置平均每年更换一次（中高效过滤每个不大于 2kg，活性炭过滤不大于 5kg），由于该滤芯中吸附了一定的放射性气溶胶，所以滤芯也按放射性固废处理，年产生量约 21kg/年。

(4) 同位素药物质检环节放射性固体废物的产生量如表 11-9 所示：

表 11-9 同位素药物质检环节放射性固体废物产生量

实验名称	核素名称	单次固废产生量 (kg)	年操作次数	年固废产生量 (kg)

放化纯及核纯度 检验	F-18 等	0.1	600	60
---------------	--------	-----	-----	----

因此，本项目产生的放射性固体废物合计约 106.1kg/年。其中 106kg 能依据 HJ1188-2021 和《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》办理自行解控的放射性固体废物，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检测仪器对废物表面污染和辐射剂量率水平进行监测，辐射剂量率监测为所处环境本底水平且 α 、 β 表面污染水平分别小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 和 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物解控作为医疗废物处置，并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

11.2.8 回旋加速器场所受照剂量合计

根据以上估算结果工作人员的受照剂量分别为回旋加速器室 $54.1\mu\text{Sv}/\text{a}$ ，热室及转运 $259.5\mu\text{Sv}/\text{a}$ ($59.5\mu\text{Sv}+200\mu\text{Sv}$)，放化实验室 $106\mu\text{Sv}/\text{a}$ ，即使各环节都累加后约为 $419.6\mu\text{Sv}/\text{a}$ ，公众附加剂量不大于 $10\mu\text{Sv}/\text{a}$ ，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 核医学科诊断区运行（使用）后对环境的影响

11.3.1 辐射环境影响预测

1 核医学科诊断区的使用规划

医院根据本部核医学科目前诊疗使用的核素现状，结合核医学科的新药物发展，给出了本项目辐射工作场所核医学科使用规划，表 11-10 给出了拟使用的放射性核素种类、用途以及最大工作量等信息。

表 11-10 核医学科的使用规划

序号	核素种类	类别	最大工作量			用途（年总人次）
			人次/天	天数/年	用量/年	
1	F-18	A	30	250	$2.78\text{E}+12$	PET 诊断（7700）
2	C-11	A	2	50	$3.70\text{E}+10$	

3	N-13	A	2	50	3.70E+10	
4	Tc-99m	A	40	250	7.40E+12	SPECT 诊断 (10700)
5	Tc-99m (锝气)	A	2	50	7.40E+10	
6	I-123	A	5	50	9.25E+10	
7	I-131	B	5	100	9.25E+10	
8	I-131	B	5	100	3.33E+08	甲功检查 (500)

根据使用规划,核医学科每天使用 SPECT 开展影像诊断最多 52 人次,每天使用 PET 开展影像诊断最多 32 人次(每天最多使用两组核素),甲功检查最多 5 人。

2 剂量估算源强

(1) 骨扫描最大用量为 $9.25 \times 10^8 \text{Bq}$, 心肌、甲状旁腺显像最大用量为 $7.40 \times 10^8 \text{Bq}$, 甲状腺、肾动态、肝脾、肺灌注、下肢静脉及颌下腺等各种脏器扫描用量相对较小,用量为 $1.85 \sim 3.7 \times 10^8 \text{Bq}$, 锝气用量一般不超过 $5.55 \times 10^8 \text{Bq}$ 。保守按照最大注射 925MBq 的 99mTc 药物估算其辐射影响。注射 925MBqTc-99m 药物病人,其注射后 0、1、3h 后 1m 处的辐射剂量率分别为 $11.3 \mu\text{Sv/h}$ 、 $7.9 \mu\text{Sv/h}$ 、 $4.4 \mu\text{Sv/h}$ (Handbook of Health Physics and Radiological Health.3rd)。核素 Tc-99m 源的 K_γ 常数为 $0.0303 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{h} \cdot \text{MBq})$, 距 925MBq (25mCi) Tc-99m 1m 处的裸源剂量率为 $28.0 \mu\text{Sv/h}$

(2) PET 扫描中 F-18 平均用量约为 296MBq/人次,其中 N-13、C-11 核素基本每个检查日最多实施 PET 检查 2 人次,每周工作 1 天,候诊时间短且半衰期相对 F-18 更短,对环境的影响小于 F-18。本项目保守以 F-18 使用量 370MBq/人次估算其辐射影响。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 的 F-18 后,距离患者 1m 处的剂量率为 $34 \mu\text{Sv/h}$ (考虑患者自吸收因子 0.36); 注射时裸源 1m 处剂量率 $52.9 \mu\text{Sv/h}$ 。

(3) 参照 GBZ120 标准,核素 I-131 的 K_γ 常数为 $0.0595 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{h} \cdot \text{MBq})$, I-131 进行 SPECT/CT 显像时,给药量不大于 185MBq/人次。服用 I-131 药物进行显像的病人,距离患者 1m 处的剂量率为 $11 \mu\text{Sv/h}$ 。

(4) F-18 需要在高活室再次分装,每次转运防护罐盛装最大量一般不超过 3.7GBq (保守按 7.4GBq 估算),操作上述活度的溶液,1m 处的剂量率为 $1058 \mu\text{Sv/h}$,

储存在手套箱内有 42mmPb 的铅罐和 50mmPb 手套箱屏蔽(92mmPb 的衰减因子为 2.87E-6)，屏蔽后剂量率为 4.74E-3 μ Sv/h (手套箱外 0.3m, 取 0.8m 估算)。假设分装时铅罐盖打开(即朝斜上方没有铅罐屏蔽)，源距手套箱上表面至少 1m 以上，则距手套箱外 30cm 处的剂量率不大于 6.1E-1 μ Sv/h, 但铅罐储存时基本都是盖屏蔽，因此在储存状态对环境的影响可忽略。考虑到抽取药液时，短时存在屏蔽盖打开的情况，分装操作在正面 50mmPb 当量的手套箱进行，手套箱外表面 30cm 处(人员操作位，约 0.8m) 的周围剂量当量率约为 1.61 μ Sv/h。分装过程中每次最多只有 10mCi 在铅罐外(其他都储存在铅罐里)，操作位也经过 50mmPb 手套箱屏蔽(衰减因子为 9.73E-4)，屏蔽后剂量率为 8.04E-2 μ Sv/h (距离取 0.8m, 距手套箱正面外 0.3m 处)，则放射性药物分装的通风柜外表面 30cm 处的周围剂量当量率能保证小于 2.5 μ Sv/h 的要求，因此在储存状态对环境的影响可忽略。

(5) 每间 PET 候诊室最多 2 名受检者同时候诊，SPECT/CT 候诊室最多 7 名受检者同时候诊。留观区最多同时停留 2 名检查后留观片刻的受检者，其中 1 名 PET/CT 受检者，1 名 PET/MR 受检者。考虑到候诊床或者座椅间隔布置，在计算楼上附加剂量率时，考虑叠加效果。

(6) PET 使用密封校验源开展设备校验，使用的 3 枚 Ge-68 活度分别为 92.5MBq、55MBq 和 3.5MBq，Ge-68 的衰变子体为 Ga-68。根据 AAPM Task Group 108 报告和辐射安全手册，核素 Ga-68 的 K_{γ} 常数为 0.134 μ Sv·m²/(h·MBq)，距离质控源 1m 处的剂量率为 27.3 μ Sv/h，在储源室存储时有 20mm 铅屏蔽桶屏蔽，经过屏蔽后 1m 处剂量率约为 1.26 μ Sv/h。

(7) 注射窗口废物桶铅当量不低于 20mm 铅当量(相对 F-18 的衰减因子为 6.24E-2)，保守每次注射器中残留 0.1mCi，则距废物桶 30cm 处(约 0.5m) 的附加剂量率为 0.13 μ Sv/h，假设上午有 20 个患者，考虑到时间的衰减，剂量率约 1.24 μ Sv/h；废物间废物桶铅当量不低于 5mm 铅当量，放射性废物周一上班时转移至废物间，废物的放射性活度大大降低，废物桶 30cm 处的剂量率一般低于 0.5 μ Sv/h，能够满足距废物桶 30cm 处 2.5 μ Sv/h 的要求。

(8) 根据 AAPM Task Group 108 报告，注射 F-18 核素后经过(60min、90min) 后的活度衰减因子为 0.68、0.57，每人候诊或检查期间(60min、40min、20min) 平均活度相对检查初始的活度因子分别为 0.83、0.88、0.94。

3 关注点的选取

参考 AAPM108 号报告, 给出了计算关注点的原则, 即四周屏蔽墙关注点位置在墙外 0.3m 处, 屋顶关注点位置在楼板地面上方 0.5m 处, 楼下关注点在楼板上方 1.7m 处, 同时也增加楼上和楼下 30cm 处剂量水平。

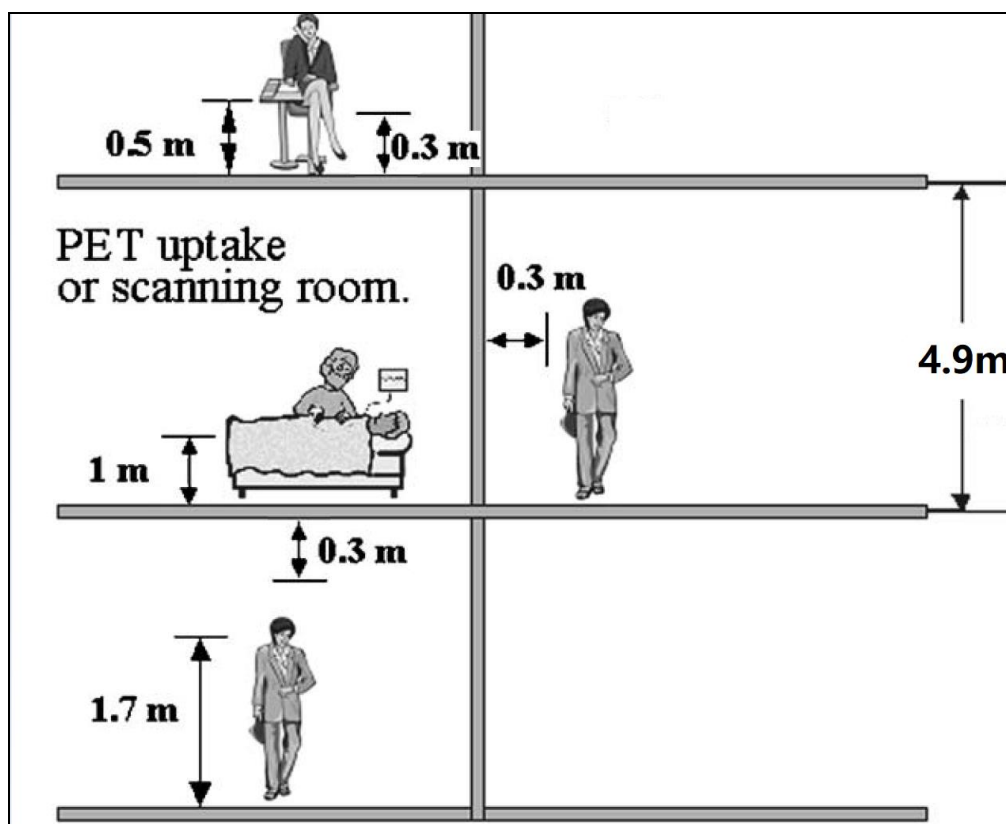


图11-7 核医学科诊断区周围关注点位置示意图

4.估算方法

PET 诊断以 F-18 核素评价 PET 相关区域周围剂量率水平并进行受照剂量估算。

SPECT 诊断使用的核素有 Tc-99m、I-131 和 I-123。注射 925MBqTc-99m 药物的病人, 其 1m 处的剂量率与注射 185MBq Na¹³¹I 的病人相当, 但 I-131 衰变 γ 射线能量较 Tc-99m 高, 故本评价以 I-131 为目标核素评价 SPECT/CT 室附加剂量率水平是否满足控制水平要求。公众和职业人员受照剂量时, 分别考虑 I-131 和 Tc-99m 的贡献。

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。

(1) 辐射剂量率估算公式

$$D_{\gamma} = D_0 \times r^{-2} \times 10^{-d/TVL} \dots\dots\dots \text{（公式 11-12）}$$

式中：

D_{γ} —关注点的 γ 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$ ；

D_0 —距源 1m 处的 γ 剂量率 $\mu\text{Sv/h}$ ；

r —关注点距源中心的距离，m；

d —屏蔽厚度，cm；

TVL — γ 射线 1/10 值层厚度，cm，对 F-18 来讲，铅中 TVL 为 16.6mm，混凝土中 TVL 为 176mm。对于 Tc-99m 来讲，铅中 TVL 为 1mm，混凝土中 TVL 保守取 110mm。对于 I-131 来说，铅中 TVL 为 11mm，混凝土中 TVL 为 170mm。其中 F-18 的估算考虑衰减因子的影响。

(2) 年有效剂量

$$\text{附加年有效剂量计算公式：} E=H \times t \times T \quad \text{（公式 11-13）}$$

式中： E --年有效剂量， μSv ；

H --计算点附加剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

T 为人员的居留因子；

t 为年曝光时间，h/a

11.3.2 诊断区周围不同位置的附加剂量率水平

(1) 场所周围不同位置的附加剂量水平

基于上述源项，依照公式（11-12）和公式（11-13），估算高活室、PET 机房、SPECT 机房、候诊室、留观室周围（含楼上、楼下）不同位置的最大附加剂量率。估算结果见表 11-11 所示，估算点位示意图见图 11-8 和图 11-9 所示。

表 11-11 核医学科诊断区周围不同位置的剂量率

场所名称	编号	估算点位 (见图 11-8-9)	屏蔽材料与厚度	距离 (m)	衰减因子 B	附加剂量 率($\mu\text{Sv/h}$)	备注
PET/CT 室 (1 名 F-18 患者, $23\mu\text{Sv/h@1m}$)	c1	东墙 SPECT/CT2 室	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水 泥	3.6	4.44E-2	7.89E-2	控制区
	c2	南墙患者走 廊	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水 泥	5.9	4.44E-2	2.94E-2	控制区
	c3	西墙设备间 和储源室	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水 泥	3	4.44E-2	1.14E-1	控制区

	c4	北墙控制廊	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	3.5	4.44E02	8.35E-2	工作人员
	c5	控制室门	6mmpb	4.2	4.35E-1	5.68E-1	工作人员
	c6	观察窗	8mmpb 当量铅玻璃	3.5	3.30E-1	6.20E-1	工作人员
	c7	机房门外	6mmpb	5.9	4.35E-1	2.88E-1	控制区
	c8	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	1.22E-2	公众
	c9	楼下汽车道	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.34E-2	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.34E-2	/
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	8.18E-2	/
PET/MR 室 (1 名 F-18 患者, 23 μ Sv/h@1m)	d1	东墙设备间和控制室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	4.2	3.95E-2	5.16E-2	工作人员
	d2	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	4	3.95E-2	5.68E-2	控制区
	d3	西墙治疗留观室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	3.6	3.95E-2	7.02E-2	控制区
	d4	北墙走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	5.2	3.95E-2	3.36E-2	工作人员
	d5	控制室门	6mmpb	6.1	4.35E-1	2.69E-1	工作人员
	d6	观察窗	8mmpb 当量铅玻璃	5.2	3.30E-1	2.81E-1	工作人员
	d7	机房门外	6mmpb	5.2	4.35E-1	3.70E-1	工作人员
	d8	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	1.22E-2	公众
	d9	楼下汽车道	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.34E-2	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.34E-2	
/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	8.18E-2		
SPECT/CT1 室 (1 名 I-131 患者, 11 μ Sv/h@1m)	a1	东墙 SPECT 候诊室、弱电间	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	3.3	6.31E-4	6.37E-4	公众
	a2	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	5.9	6.31E-4	1.99E-4	控制区
	a3	西墙 SPECT/CT2 室	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	3.5	6.31E-4	5.67E-4	控制区
	a4	北墙控制廊	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	3.4	6.31E-4	6.00E-4	公众

	a5	控制室门	4mmpb	4.1	4.33E-01	2.83E-01	工作人员
	a6	观察窗	4mmpb 当量铅玻璃	3.4	4.33E-01	4.12E-01	工作人员
	a7	机房门外	4mmpb	6.3	4.33E-01	1.20E-01	控制区
	a8	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	4.96E-3	公众
	a9	楼下汽车道	35cm 砼	4.2	8.73E-3	5.45E-3	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	6.40E-3	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	3.91E-2	
SPECT/CT2 室 (1 名 I-131 患者, 11 μ Sv/h@1m)	b1	东墙 SPECT/CT1 室	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	3.5	6.31E-4	5.67E-4	控制区
	b2	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	5.9	6.31E-4	1.99E-4	控制区
	b3	西墙 PET/CT 室	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	3.3	6.31E-4	6.37E-4	控制区
	b4	北墙控制廊	24cm 混凝土砖 +3cm 硫酸钡水泥	3.4	6.31E-4	6.00E-4	工作人员
	b5	控制室门	4mmpb	4.1	4.33E-01	2.83E-01	工作人员
	b6	观察窗	4mmpb 当量铅玻璃	3.8	4.33E-01	3.30E-01	工作人员
	b7	机房门外	4mmpb	6.3	4.33E-01	1.20E-01	控制区
	b8	楼上走廊	35cm 砼	4.4	8.73E-3	4.96E-3	公众
	b9	楼下车库	35cm 砼	4.2	8.73E-3	5.45E-3	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	6.40E-3	
/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	3.91E-2		
SPECT 候诊室 (7 名 Tc-99m 患者叠加, 79.1 μ Sv/h @1m)	e1	东墙缓冲区	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.9	5.68E-3	5.34E-2	控制区
	e2	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	3.3	5.68E-3	4.13E-2	控制区
	e3	西墙 SPECT/CT1 室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	3.7	5.68E-3	3.28E-2	控制区
	e4	北墙弱电间和信息间	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.8	5.68E-3	5.73E-2	公众
	e5	防护门患者走廊	3mmpb	4	1.00E-3	4.94E-3	控制区

	e6	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	6.58E-4	2.69E-3	公众
	e7	楼下汽车道	35cm 砼	4.2	6.58E-4	2.95E-3	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	6.58E-4	2.95E-3	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	6.58E-4	1.80E-2	
PET/CT 候诊室 1 (1 名 F-18 患者, 33.9 μ Sv/h@1m , 叠加估算见表 11-12)	f1	东墙保洁间 和楼梯间	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹 灰	2.1	3.95E-2	3.03E-1	公众
	f2	南墙汽车道	35cm 砼	1.7	1.03E-2	1.20E-1	公众
	f3	西墙 PET/CT 候 诊室 2	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹 灰	2.4	3.95E-2	2.32E-1	控制区
	f4	北墙患者走 廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹 灰	4.8	3.95E-2	5.81E-2	控制区
	f5	防护门外	6mmpb	4.8	4.35E-1	6.39E-1	控制区
	f6	楼上院内道 路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	1.80E-2	公众
	f7	楼下车位、 信息间	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.97E-2	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.97E-2	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	1.20E-1	
PET/CT 候诊室 2 (1 名 F-18 患者, 33.9 μ Sv/h@1m , 叠加估算见表 11-12)	g1	东墙 PET/CT 候 诊室 1	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹 灰	1.5	3.95E-2	5.94E-1	控制区
	g2	南墙汽车道	35cm 砼	2.5	1.03E-2	5.56E-2	公众
	g3	西墙 I-131 候诊室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹 灰	3.8	3.95E-2	9.26E-2	控制区
	g4	北墙患者走 廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹 灰	1.9	3.95E-2	3.71E-1	控制区
	g5	防护门外	12mmpb(含铅屏 风)	3.2	1.89E-1	6.26E-1	控制区
	g6	楼上院内道 路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	1.80E-2	公众
	g7	楼下车位、 信息间	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.97E-2	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.97E-2	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	1.20E-1	
PET/CT 候诊室 3 (1 名 F-18 患者, 33.9 μ Sv/h@1m	h1	东墙 PET/CT 候 诊室 2	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹 灰	3.7	3.95E-2	9.77E-2	控制区

, 叠加估算见表 11-12)	h2	南墙汽车道	35cm 砼	2.4	1.03E-2	6.03E-2	公众
	h3	西墙楼梯间和风井	35cm 砼	1.6	1.03E-2	1.36E-1	公众
	h4	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.9	3.95E-2	3.71E-1	控制区
	h5	防护门	6mmpb	3.4	4.35E-1	1.27	控制区
	h6	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	1.80E-2	公众
	h7	楼下停车位	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.97E-2	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	3.80E-2	7.29E-2	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	1.20E-1	
PET/MR 候诊室 (1 名 F-18 患者, 33.9 μ Sv/h@1m, 叠加估算见表 11-12)	i1	东墙楼梯间	35cm 砼	1.5	1.03E-2	1.54E-1	公众
	i2	南墙汽车道	35cm 砼	2.5	1.03E-2	5.56E-2	公众
	i3	西墙留观室	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.8	3.95E-2	1.71E-1	控制区
	i4	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.9	3.95E-2	3.71E-1	控制区
	i5	防护门	12mmpb	2.7	1.89E-1	8.79E-1	控制区
	i6	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	1.80E-2	公众
	i7	楼下停车位	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.97E-2	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.97E-2	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	1.20E-1	
留观室 (1 名 F-18 患者, 23 μ Sv/h@1m, 叠加估算见表 11-12)	j1	东墙 PET/MR 室	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.1	3.95E-2	7.52E-1	控制区
	j2	南墙土层	35cm 砼	3.2	1.03E-2	2.31E-2	/
	j3	西墙补风机房	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.7	3.95E-2	1.25E-1	公众
	j4	北墙患者出口处	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmPb	3.8	3.95E-2	6.30E-2	控制区
	j5	防护门	12mmpb	2.4	1.89E-1	7.57E-1	控制区
	j6	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	1.22E-2	公众
	j7	楼下停车位	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.34E-2	公众

	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	1.34E-2	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	8.18E-2	
高活室 (370MBqF-18, 52.9 μ Sv/h@1m)	k1	东墙走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	6.9	3.25E-2	3.61E-2	公众
	k2	东墙工作人员入口	6mmpb	5.1	4.56E-1	9.28E-1	公众
	k3	北墙走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	3.9	3.95E-2	1.37E-1	公众
	k4	北墙患者入口处	12mmpb	5.1	1.89E-1	3.85E-1	公众
	k5	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	2.81E-2	公众
	k6	楼下停车位	35cm 砼	4.2	1.03E-2	3.08E-2	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	3.08E-2	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	1.88E-1	
源库 (3 枚 Ge 刻度源, 1m 剂量率 1.26 μ Sv/h)	11	东墙患者走廊	80cm 砼	5.1	2.85E-5	1.38E-6	控制区
	12	南墙楼梯间	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	1.3	3.95E-2	2.94E-2	公众
	13	西墙保洁间	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	1.8	3.95E-2	1.54E-2	工作人员
	14	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.1	3.95E-2	1.13E-2	工作人员
	15	防盗门外患者走廊	0	2.3	1.00E+00	2.38E-1	控制区
	16	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	6.68E-4	公众
	17	楼下停车位和污水泵间	35cm 砼	4.2	1.03E-2	7.33E-4	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	1.03E-2	7.33E-4	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	1.03E-2	4.48E-3	
抢救兼运动室 (1 名 Tc-99m 患者, 11.3 μ Sv/h @1m)	m1	东墙通气兼甲功室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.4	5.68E-3	1.11E-2	控制区
	m2	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.4	5.68E-3	1.11E-2	控制区
	m3	西墙缓冲区	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	3.2	5.68E-3	6.27E-3	控制区
	m4	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.1	5.68E-3	1.46E-2	控制区

	m5	北侧防护门外患者走廊	3mmpb	2.2	1.00E-3	2.33E-3	控制区
	m6	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	6.58E-4	3.84E-4	公众
	m7	楼下汽车道	35cm 砼	4.2	6.58E-4	4.21E-4	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	6.58E-4	4.21E-4	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	6.58E-4	2.57E-3	
肺通气兼甲功室 (1 名 Tc-99m 患者, 11.3μSv/h @1m)	n1	东墙更衣室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	1.7	5.68E-3	2.22E-2	工作人员
	n2	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.4	5.68E-3	1.11E-2	控制区
	n3	西墙抢救兼运动室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.7	5.68E-3	8.81E-3	控制区
	n4	北墙高活室	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2.1	5.68E-3	1.46E-2	控制区
	n5	南侧防护门外患者走廊	3mmpb	2.1	1.00E-3	2.56E-3	控制区
	n6	东南侧外走廊	24cm 混凝土砖 +5cm 混凝土抹灰	2	5.68E-3	1.61E-2	公众
	n7	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	6.58E-4	3.84E-4	公众
	n8	楼下汽车道	35cm 砼	4.2	6.58E-4	4.21E-4	公众
	/	楼上 30cm 处	35cm 砼	4.2	6.58E-4	4.21E-4	
	/	楼下 30cm 处	35cm 砼	1.7	6.58E-4	2.57E-3	
注: *距离为患者到屏蔽体外 30cm 处估算点。砼(混凝土)密度不低于 2.35g/cm ³ , 混凝土砖密度不低于 2.0g/cm ³ , 铅板的密度为 11.4g/cm ³ 。校准源室周围剂量以 1m 处剂量率为 1.23μSv/h 估算所得。上表估算的剂量率为初始的活度的剂量。							

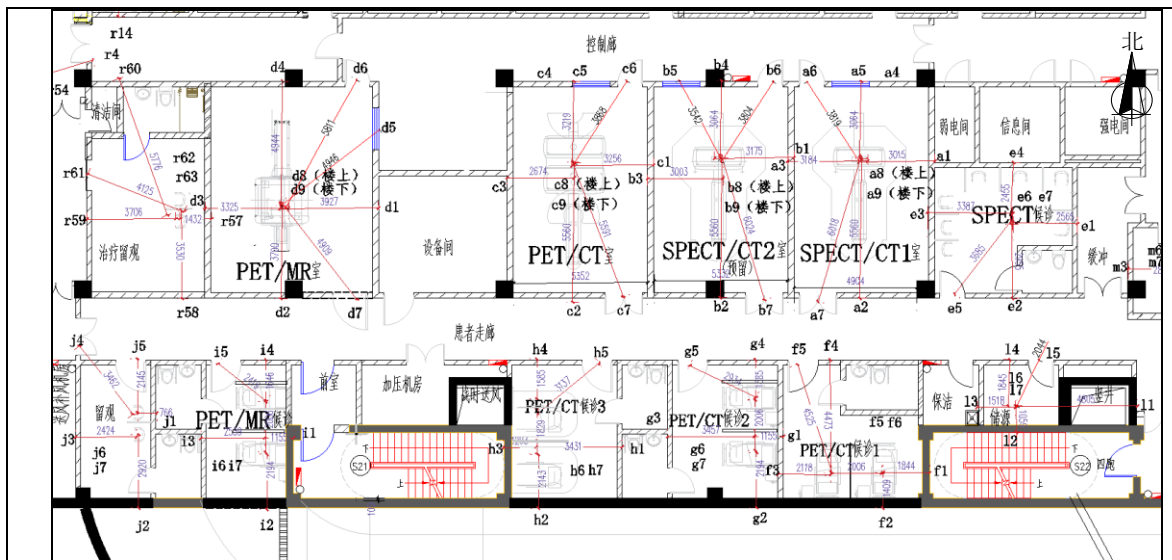


图 11-8 核医学诊断区检查室和候诊室场所估算点位置图

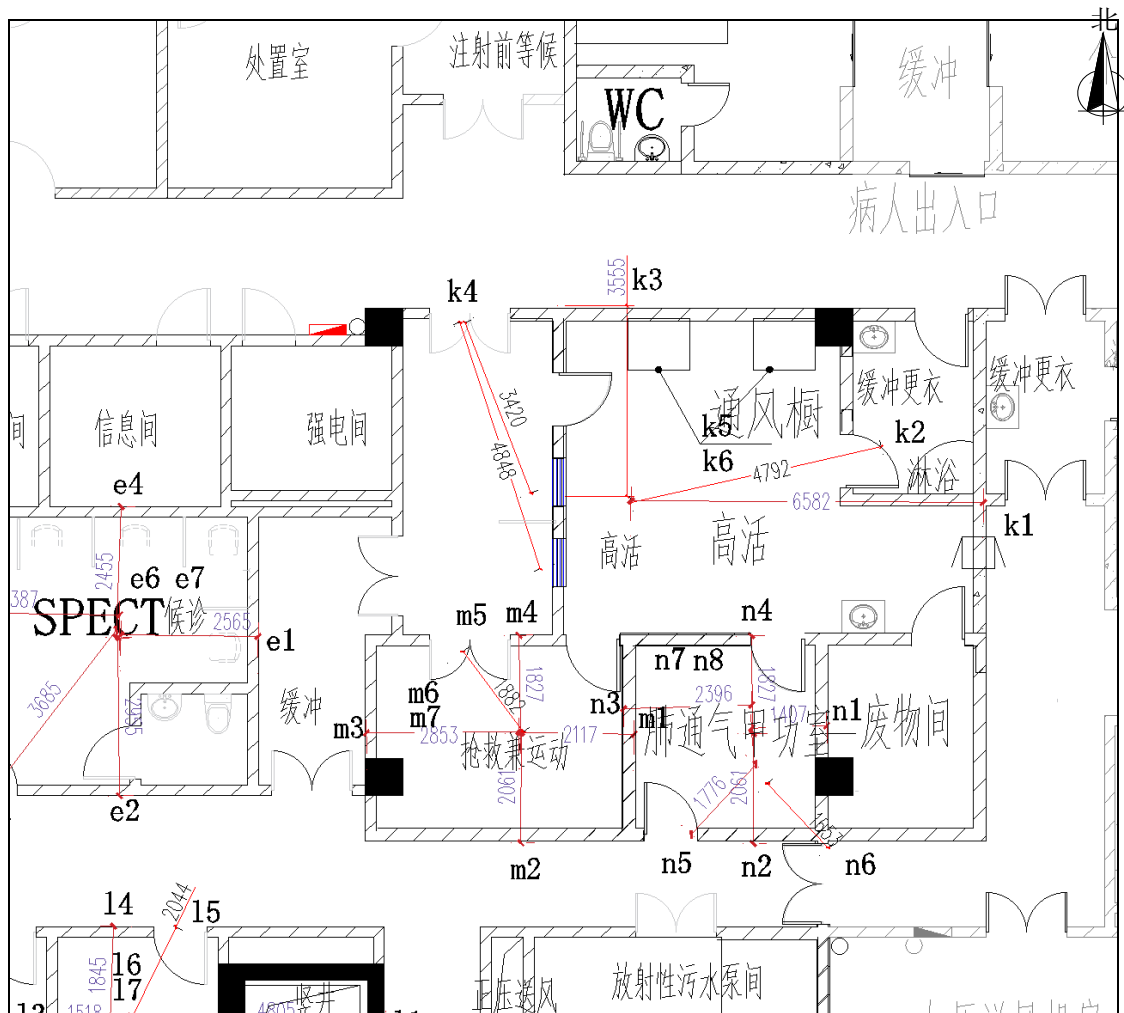


图 11-9 核医学诊断区高活室估算点位置图

(2) 周围不同位置的附加剂量叠加情况

上表种 SPECT 相关场所已保守按多名患者进行估算，主要以 PET 注射后候诊

室同时存在两名注射后患者情况下的进行最大附加剂量率见表 11-20，核医学科 PET 相关场所估算点位置见图 11-10。

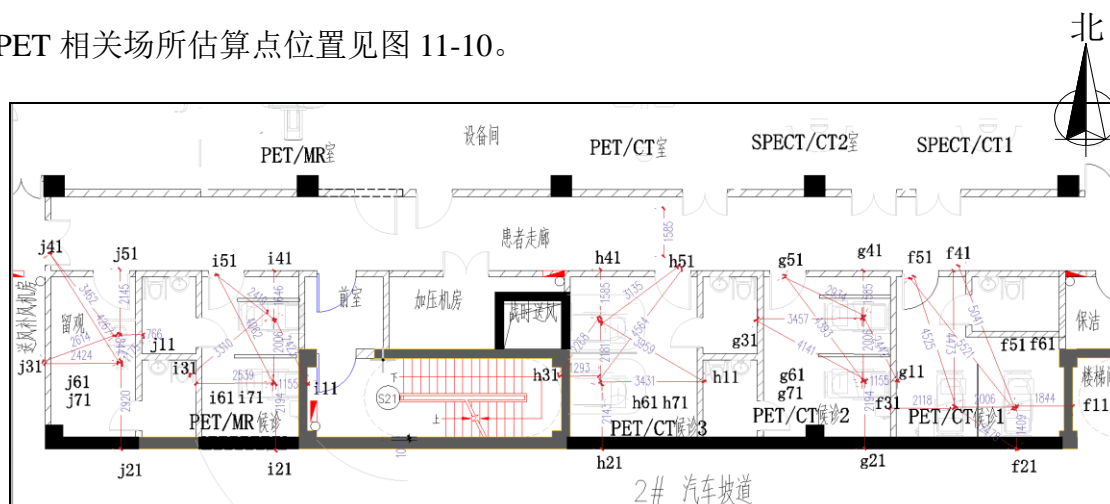


图 11-10 候诊室累加剂量率估算点位置图

表 11-12 候诊室周围不同位置的累加剂量率

场所名称	编号	估算点位	有效屏蔽材料与厚度	距离 (m) *	衰减因子	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	累加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
PET/CT 候诊室 1 (2名F-18患者, 67.7 $\mu\text{Sv/h}@1\text{m}$)	f11	东墙保洁间和楼梯间	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.1	3.95E-2	3.03E-1	3.38E-1
			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmPb	4.1	1.72E-2	3.46E-2	
	f21	南墙汽车道	35cm 砼	1.7	1.03E-2	1.20E-1	1.23E-1
			57.6cm 砼	2.8	5.30E-4	2.29E-3	
	f31	西墙 PET/CT 候诊室 2	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.4	3.95E-2	2.32E-1	2.62E-1
			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmPb	4.4	1.72E-2	3.01E-2	
	f41	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	4.8	3.95E-2	5.81E-2	1.07
			58cm 混凝土砖	5.3	1.56E-3	1.88E-3	
	f51	防护门外	6mmpb	4.8	4.35E-1	6.39E-1	1.01
			7.2mmpb	5.8	3.66E-1	3.68E-1	
f61	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	3.59E-2	3.59E-2	
f71	楼下车位、信息间	35cm 砼	4.2	1.03E-2	3.94E-2	3.94E-2	
PET/CT 候诊室 2 (2名F-18患者, 67.7 $\mu\text{Sv/h}@1\text{m}$)	g11	东墙 PET/CT 候诊室 1	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.5	3.95E-2	5.94E-1	6.08E-1
			52.2cm 混凝土砖	2.7	2.98E-3	1.38E-2	
	g21	南墙汽车道	35cm 砼	2.5	1.03E-2	5.56E-2	6.31E-2
			35cm 砼+6mmPb	4.5	4.47E-3	7.47E-3	
	g31	西墙 I-131 候诊室	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3.8	3.95E-2	9.26E-2	1.34E-1
			33.6cm 混凝土砖	4.4	2.37E-2	4.15E-2	
g41	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.9	3.95E-2	3.71E-1	4.09E-1	

			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmPb	3.9	1.72E-2	3.83E-2	
	g51	防护门外	12mmpb	3.2	1.89E-1	6.26E-1	9.16E-1
			12mmpb	4.7	1.89E-1	2.90E-1	
	g61	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	3.59E-2	3.59E-2
	g71	楼下车位、信息间	35cm 砼	4.2	1.03E-2	3.94E-2	3.94E-2
PET/CT 候诊室 3 (2名F-18患者, 67.7μSv/h@1m)	h11	东墙PET/CT候诊室2	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3.7	3.95E-2	9.77E-2	1.41E-1
			33.7cm 混凝土砖	4.3	2.34E-2	4.28E-2	
	h21	南墙汽车道	35cm 砼	2.4	1.03E-2	6.03E-2	6.75E-2
			35cm 砼+6mmPb	4.6	4.47E-3	7.15E-3	
	h31	西墙楼梯间和风井	35cm 砼	1.6	1.03E-2	1.36E-1	1.38E-1
			59cm 砼	2.7	4.41E-4	2.05E-3	
	h41	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.9	3.95E-2	3.71E-1	4.05E-1
			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmPb	4.1	1.72E-2	3.46E-2	
	h51	防护门	6mmpb	3.4	4.35E-1	1.27E+00	1.54
			12mmpb	4.9	1.89E-1	2.67E-1	
h61	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	3.59E-2	3.59E-2	
h71	楼下停车位	35cm 砼	4.2	1.03E-2	3.94E-2	3.94E-2	
PET/MR 候诊室 (2名F-18患者, 67.7μSv/h@1m)	i11	东墙楼梯间	35cm 砼	1.5	1.03E-2	1.54E-1	1.56E-1
			63cm 砼	2.7	2.63E-4	1.22E-3	
	i21	南墙汽车道	35cm 砼	2.5	1.03E-2	5.56E-2	6.31E-2
			35cm 砼+6mmPb	4.5	4.47E-3	7.47E-3	
	i31	西墙留观室	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.8	3.95E-2	1.71E-1	2.12E-1
			37.3cm 混凝土砖	3.6	1.57E-2	4.10E-2	
	i41	北墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.9	3.95E-2	3.71E-1	4.09E-1
			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmPb	3.9	1.72E-2	3.83E-2	
	i51	防护门	12mmpb	2.7	1.89E-1	8.79E-1	1.21
			12mmpb	4.4	1.89E-1	3.31E-1	
i61	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	3.59E-2	3.59E-2	
i71	楼下停车位	35cm 砼	4.2	1.03E-2	3.94E-2	3.94E-2	
留观室(2名F-18患者, 46μSv/h@1m)	j11	东墙PET/MR室	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.1	3.95E-2	7.52E-1	8.77E-1
			39.5cm 混凝土砖	1.5	1.22E-2	1.25E-1	
	j21	南墙土层	35cm 砼	3.2	1.03E-2	2.31E-2	2.95E-2
			35cm 砼+6mmPb	4	4.47E-3	6.43E-3	
	j31	西墙补风机房	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.7	3.95E-2	1.25E-1	2.10E-1
31.1cm 混凝土砖			2.9	3.11E-2	8.51E-2		

	j41	北墙患者出口处	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmPb	3.8	1.72E-2	2.74E-2	3.55E-2
			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+12mmPb	4.6	7.48E-3	8.14E-3	
	j51	防护门	12mmpb	2.4	1.89E-1	7.57E-1	1.18E+00
			12mmpb	3.2	1.89E-1	4.26E-1	
	j61	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	1.03E-2	2.44E-2	2.44E-2
	j71	楼下停车位	35cm 砼	4.2	1.03E-2	2.68E-2	2.68E-2

备注：*距离为患者到屏蔽体外 30cm 处估算点。砼（混凝土）密度不低于 2.35g/cm³，混凝土砖密度不低于 2.0g/cm³，铅板的密度为 11.4g/cm³。与患者垂直方向候诊室外剂量按楼板厚度（未考虑有效厚度的影响）保守估算。

由表 11-11 和表 1112 可见：

1) 本项目运行后，核医学科诊断区的控制区边界外（四周）的附加剂量率水平低于 3.85E-1μSv/h（患者入口处），对楼上的附加剂量最大为 3.59E-2μSv/h（院内道路），对楼下的附加剂量率最大为 3.94E-2μSv/h（停车场）。

2) PET/CT 机房周围的附加剂量率低于 6.20E-1μSv/h（观察窗外），PET/MR 机房周围的附加剂量率低于 3.70E-1μSv/h（患者防护门外），SPECT/CT 机房周围的附加剂量率低于 4.12E-1μSv/h（观察窗外），均满足 2.5μSv/h 的剂量率控制要求。

3) 控制区内候诊室、留观室周围的附加剂量率最大为 1.21μSv/h（PET/MR 候诊室门口），也满足不大于 2.5μSv/h 的剂量率控制要求。

（3）SPECT/CT 中 CT 的剂量叠加分析

本项目 SPECT/CT 和 PET/CT 机房墙体、顶棚、地板、观察窗和防护门采取的辐射屏蔽措施均不低于 4mm 铅当量，满足《放射诊断放射防护要求》(GBZ130-2020) 给出的 2.5mm 铅当量防护要求，机房面积和单边长度也分别满足 30m² 和 4.5m 的要求。

参照西门子厂家 140kVp 工况下普通 CT 周围的剂量率分布曲线，1m 处的杂散辐射为 0.052μGy/mAs(垂直)和 0.051μGy/mAs(水平)，CT 扫描通常不超过 300mA，故 1m 处的杂散辐射剂量率最高约 56.16mGy/h，故以此为例评价 CT 运行时叠加辐射影响。

根据本项目 PET/CT、SPECT/CT 机房的屏蔽设计，相对于 CT 的铅当量不小于 4.0mmPb（SPECT 机房防护门），透射系数小于 1.2E-5，按照关注点距散射点的最近距离大于 3.0m 估算，CT 运行所致周围的附加剂量率约为 0.07μGy/h。

保守假设全部 PET/CT、SPECT/CT 检查人员做 CT 扫描,全年运行时间约 41.7h (30s/人),对机房周围全居留人员的最大附加剂量贡献不大于 3.0 μ Sv。

PET/CT、SPECT/CT 中 CT 运行时工作条件低于放射科诊断 CT,可以预计, PET/CT、SPECT/CT 设备的 CT 装置运行时,机房周围剂量率水平将保持在正常本底水平,对给药患者发射的 γ 射线和刻度源的叠加效果可以忽略,主要是要关注施工过程中防护材料的搭接问题(如门体与门框、铅玻璃与墙面的搭接等),如果能保证施工工艺的情况下,可以忽略 PET/CT、SPECT/CT 中 CT 的影响。

11.3.3 周围公众受照剂量估算

核医学科实行每日一班制,全年工作 250d。根据表 11-10 所列最大工作量进行剂量估算。假设:

(1)每年 SPECT 检查最大人数为 11350 人次,扫描时间平均约为 20min/人次,受检者在每间机房内的停留时间约为 1891h(I-131 扫描患者停留时间 167h),SPECT 候诊室内人员的停留时间保守取 2000h(候诊时周围剂量率水平按 7 人累加估算)。

(2)按照 10%的 SPECT 检查患者做运动负荷试验,每人次约 15min 左右,抢救兼运动室患者的停留时间为 250h。

(3)以每年最多开展 7700 人次 PET 检查,其中每年开展 5133 人次 PET/CT 检查,2567 人次的 PET/MR 进行估算,每次 PET/CT 平均扫描时间为 20min 计,PET/MR 扫描时间为 40min,则每间 PET 机房显像时间为 1711h,候诊室停留时间保守取 2000h(候诊时周围剂量率水平都按 2 人累加估算);每人留观 10min,留观室内的年留观时间约为 856h(剂量率已考虑叠加,留观时间以 PET/CT 患者估算)。

(4)PET 扫描患者采用预置针方式注射,每人次的药物注射时间为 30s/人。SPECT 患者采用直接静脉注射的方式注射,注射时间按 60s/人计。注射室全年注射 SPECT 药物总时间为 189.2h,注射 PET 药物总时间为 64.2h。

(5)手套箱内每天进行 PET 药物分装时间 1min/人次,全年累计分装时间为 128.3h(保守按每种正电子核素都要分装估算)。

表 11-13 给出了公众可能受照剂量估算结果。可见,检查对公众的辐射照射剂量最大不超过 35.1 μ Sv/a(PET/CT 候诊室 1 东墙楼梯间),满足本项目设定的 0.1mSv/a 的剂量约束值要求。

核医学科场所分区管理,病人给药、候诊和检查区域等属于控制区,通常只有受检病人停留,不按公众区域考虑,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， $T < 1/40$ ）。

表 11-13 核医学诊断区主要位置的公众年附加剂量估算

场所名称	编号	估算点位	附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	居留因子	全居留时间 (h/a)	年附加剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)
PET/CT 室（1 名 F-18 患者， $23\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	c8	楼上院内道路	1.22E-2	6.25E-2	1711	1.23E+00
	c9	楼下汽车道	1.34E-2	6.25E-2	1711	1.35E+00
PET/MR 室（1 名 F-18 患者， $23\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	d8	楼上院内道路	1.22E-2	6.25E-2	1711	1.15E+00
	d9	楼下汽车道	1.34E-2	6.25E-2	1711	1.26E+00
SPECT/CT1 室（1 名 I-131 患者， $11\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	a1	东墙弱电间	3.56E-2	6.25E-2	1891	4.21E+00
	a8	楼上院内道路	4.96E-3	6.25E-2	1891	5.86E-1
	a9	楼下汽车道	5.45E-3	6.25E-2	1891	6.44E-1
SPECT/CT2 室（1 名 I-131 患者， $11\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	b8	楼上走廊	4.96E-3	6.25E-2	1891	5.86E-1
	b9	楼下车库	5.45E-3	6.25E-2	1891	6.44E-1
SPECT 候诊室（7 名 Tc-99m 患者叠加， $79.1\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	e4	北墙弱电间和信息间	5.73E-2	6.25E-2	1891	6.77E+00
	e6	楼上院内道路	2.69E-3	6.25E-2	1891	3.18E-1
	e7	楼下汽车道	2.95E-3	6.25E-2	1891	3.49E-1
PET/CT 候诊室 1（2 名 F-18 患者， $67.7\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	f11	东墙楼梯间	3.38E-1	6.25E-2	2000	3.51E+01
	f21	南墙汽车道	1.23E-1	6.25E-2	2000	1.28E+01
	f61	楼上院内道路	3.59E-2	6.25E-2	2000	3.72E+00
	f71	楼下车位、信息间	3.94E-2	6.25E-2	2000	4.09E+00
PET/CT 候诊室 2（2 名 F-18 患者， $67.7\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	g21	南墙汽车道	5.56E-2	1.00E+00	2000	5.77E+00
	g61	楼上院内道路	3.59E-2	6.25E-2	2000	3.72E+00
	g71	楼下车位、信息间	3.94E-2	6.25E-2	2000	4.09E+00
PET/CT 候诊室 3（2 名 F-18 患者， $67.7\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	h21	南墙汽车道	6.75E-2	6.25E-2	250	1.05E+00
	h31	西墙楼梯间和风井	1.38E-1	1.00E+00	250	2.16E+00
	h61	楼上院内道路	3.59E-2	6.25E-2	250	5.61E-01
	h71	楼下停车位	3.94E-2	6.25E-2	250	6.16E-01
PET/MR 候诊室（2 名 F-18 患者， $67.7\mu\text{Sv/h@1m}$ ）	i11	东墙楼梯间	1.56E-1	6.25E-2	2000	1.62E+01
	i21	南墙汽车道	5.56E-2	6.25E-2	2000	5.77E+00
	i61	楼上院内道路	3.59E-2	6.25E-2	2000	3.72E+00

	i71	楼下停车位	3.94E-2	6.25E-2	2000	4.09E+00
留观室(2名F-18患者, 46μSv/h@1m)	j31	西墙补风机房	1.25E-1	6.25E-2	856	6.69E+00
	j61	楼上院内道路	2.44E-2	6.25E-2	856	1.31E+00
	j71	楼下停车位	2.68E-2	6.25E-2	856	1.43E+00
高活室(10mCiF-18, 52.9μSv/h@1m)	k1	东墙走廊	4.39E-2	6.25E-2	253.4	6.95E-1
	k2	东墙工作人员入口	3.44E-2	6.25E-2	253.4	5.45E-1
	k3	北墙注射前候诊	1.37E-1	6.25E-2	253.4	2.17E+00

备注：其中 F-18 年附加剂量考虑用药后检查和候诊期间药物活度的衰减，由公式 $D(t) = D_1 \times T \times t \times R_{d1}$ 算出，其中 t 为时间， R_{d1} 为每人检查期间平均活度相对检查初始的活度因子（60min、40min、20min 平均活度相对检查初始的活度因子分别为 0.83、0.88、0.94），其中注射室、留观室周围未考虑 R_{d1} 的影响。

11.3.4 工作人员显像环节年受照剂量

(1) 工作人员进行分装同位素环节时受照剂量

该场所一般只有 F-18 正电子核素需要分装，放射性药物分装的通风柜外表面 30cm 处的周围剂量当量率保守按照 2.5μSv/h 估算。分装操作时间全年保守按 128.3h 估算，则工作人员所受的年附加剂量为 320.8μSv。

(2) 工作人员为药物转运环节工作人员的受照剂量

本项目中正电子核素采用药物转运防护罐（42mmPb）或注射器转运防护箱（25mmPb）运输，1m 处剂量率低于 2.5μSv/h，运输过程中距工作人员的距离按 50cm 估算（剂量率不大于 10μSv/h 估算）。每次从手套箱到注射窗口 10s 估算，则运转到注射位时工作人员的受照剂量为 10μSv/h×10s/人×7700 人次×1/3600s/h≈214μSv。

(3) 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 1.81×10^{-3} mSv/h，注射 370MBq 的 F-18 距 30cm 处人的深部当量剂量率为 670μSv/h。注射时采用了具有 40mm 铅防护功能的铅玻璃进行防护，剂量率可以降低两个量级（在约 340MBq 的注射量情况下，北京肿瘤医院工作人员腹部位的实测值为 6.6μSv/h），本项目衰减后值取 10μSv/h。注射操作时间短，每人每次的注射时间为 30s，年总操作时间约 64.2h，则工作人员所受的年附加剂量为 642μSv。

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)，若注射窗完全屏蔽时衰减因子小于 7.4×10^{-17} ，5mmPb 注射车衰减因子为 1.0×10^{-5} ，操作时注射窗口可能不能完全屏蔽人体的所有部位，剂量率按降低两个量级 $2.4 \mu\text{Sv/h}$ 估算，年总操作时间约 189.2h，则工作人员所受的年附加剂量为 $454 \mu\text{Sv}$ 。

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。

(4) 工作人员指导病人摆位环节的年受照剂量

PET/MR 摆位: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/MR 检查时 (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 $23.1 \mu\text{Sv/h}$ ($34 \mu\text{Sv/h} \times 0.68$ ，在北京肿瘤医院工作人员摆位的实测值为 $13.5 \mu\text{Sv/h}$ ，患者的注射量大约 300MBq)，全年进行检查人数 2567 人次，PET/MR 扫描和摆位工作由 2 人完成，PET/MR 摆位时间相对较长 (头部专用线圈、颈胸腰联合阵列线圈码放需要近距离接触)：0.5m 处核磁摆位 30s/人，1m 处摆位 1.5min，则每人分配累计摆位时间：0.5m 处 10.7h，1m 处摆位时间 32.1h，则每位摆位工作人员所受到的年附加剂量 $92.4 \mu\text{Sv/h} \times 10.7\text{h} + 23.1 \mu\text{Sv/h} \times 32.1\text{h} \approx 1729 \mu\text{Sv}$ 。

PET/CT 摆位:PET/CT 摆位 (1m 处) 时间 30s/人，医院制度规定 PET/CT 患者都是广播指导摆位，扫描和摆位工作由 2 人完成，则每人分配累计摆位时间不大于 21.4h，则每位摆位工作人员所受到的年附加剂量 $23.1 \mu\text{Sv/h} \times 21.4\text{h} \approx 494 \mu\text{Sv}$ 。

SPECT/CT 摆位:注射 925MBq (25mCi) 的 Tc-99m 药物的病人，1m 处的剂量率约为 $11.3 \mu\text{Sv/h}$ 。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 (11350 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 189.2h，摆位时工作人员穿 0.5mmPb 当量的铅衣 (衰减因子为 3.16×10^{-1})，总剂量为： $11.3 \mu\text{Sv/h} \times 189.2\text{h} \times 0.316 \approx 675 \mu\text{Sv}$ ，则每位摆位工作人员所受到的年附加剂量为 $676 \mu\text{Sv} / 4 \approx 169 \mu\text{Sv}$ 。

(5) 控制室操作工作人员的年受照剂量

控制室内工作人员 (技师) 本项目的附加剂量主要有两部分：患者显像时对工

作人员在控制室操作位操作时的附加剂量和给患者摆位时的附加剂量叠加。考虑到周围场所对控制室内工作人员剂量叠加后的年附加剂量见表 11-14。

表 11-14 控制室工作人员受照剂量统计

场所		附加剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	人均操作时 间 (h)	年附加剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)	合计($\mu\text{Sv/a}$)
PET/CT 室	控制室观察窗 c6	6.20E-1	855.5	530	1024
	机房内摆位	/	/	494	
PET/MR 室	观察窗 d6	2.81E-1	855.5	240	1970
	机房内摆位	/	/	1730	
SPECT/CT1 室	观察窗 a6	4.12E-1	946	156.6	325.6
	机房内摆位	/	/	169	
SPECT 室 2	观察窗 b6	3.30E-1	946	156.6	325.6
	机房内摆位	/	/	169	

备注：其中 F-18 年附加剂量考虑用药后检查和候诊期间药物活度的衰减，由公式 $D(t) = DI \times T \times t \times R_{it}$ 算出，其中 t 为时间， R_{it} 为每人检查期间平均活度相对检查初始的活度因子（40min、20min）平均活度相对检查初始的活度因子分别为 0.88、0.94。

SPECT/CT 和 PET/CT 中 CT 机为 III 类射线装置，工作条件低于诊断用 CT 机，机房墙体、顶棚、地板、观察窗和防护门采取的辐射屏蔽措施均不低于 3mm 铅当量，满足标准（GBZ130-2020）的防护要求，且 CT 出束时工作人员都是隔室操作，医院放射科操作 CT 工作人员的年附加剂量很低，因此 SPECT/CT 和 PET/CT 隔室操作的工作人员附加剂量可忽略。

（6）质控时工作人员的年受照剂量

根据《北京市核医学大型设备稳定性检测指南》（试行版）和《伽玛照相机、单光子发射断层成像设备（SPECT）质量控制检测规范》WS523-2019 中的相关规定，医院需自行或委托有能力机构进行定期质控检测，故需对进行质控检测的工作人员进行附加剂量估算：

1) SPECT

本次假设工作人员每年应稳定检测共需操作含 Tc-99m 药物活度为 740MBq（包括均匀性、平面灵敏度等各项指标所需），操作距离为 30cm，每台操作时间为 1h/a

(本项目 2 台共 2h/a), 由 1MBqTc-99m 药液时对距 30cm 处人的深部当量剂量率为 0.26 μ Sv/h, 则 740MBq 对应 30cm 处剂量率为 192.4 μ Sv/h, 工作人员一般穿 0.50mmPb 当量铅围裙操作, 对应透射系数 0.31, 即操作位附加剂量率约为 21.5 μ Sv/h (50cm 处), 则工作人员附加剂量为 43 μ Sv/a。

2) PET

①使用密封源

工作人员至少每周使用 1 次密封源进行均匀度等质控检测, 该环节需将带有铅屏蔽的刻度源从储源室运到机房, 取出源放于 PET 扫描床上, 并在控制室进行操作, 完成后需将密封源送回储源室。Ge-68 质控源产生光子平均能量仅约 9.2keV, 但其子体 Ga-68 将发生正电子衰变产生湮灭辐射并发射 511keV 光子, 故该环节主要考虑 Ga-68 的影响, GBZ120-2020 表 H.1 中给出其周围剂量当量率常数为 0.134 μ Sv \cdot m² \cdot h⁻¹ \cdot MBq⁻¹, 保守按最大活度 92.5MBq 考虑, 操作距离取 50cm, 操作位剂量率为 49.6 μ Sv/h, 每次操作时间约 2min, 每台总操作时间为 1.67h/a (本项目 2 台共 3.33h/a), 则工作人员附加剂量约为 165 μ Sv/a。

②稳定性

本次假设工作人员每年应稳定检测共需操作含 F-18 药物活度为 37MBq (包括 SUV、灵敏度、空间分辨力等各项指标所需), 操作距离为 50cm, 每台操作时间为 10min/a (本项目 2 台共 0.33h/a), 37MBqF-18 药液距 50cm 处人的深部当量剂量率为 21.16 μ Sv/h, 则工作人员附加剂量约为 7.0 μ Sv/a。

(7) 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 \times 10⁻⁴mSv/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。按照每周 2 例病人, 一年 100 例病人, 年操作时间为 1.67h, 则工作人员加样环节所受年附加剂量为 86.2 μ Sv (按 50cm 距离估算)。

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 5min，则患者施用过程对工作人员的外照射剂量为 $0.26 \times 0.3^2 \times 20 \times 2 \times 5 / 60 \times 100 = 7.8 \mu\text{Sv}$ ，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 $0.94 \mu\text{Sv}$ 。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 $0.38 \sim 1.0 \mu\text{Sv}$ ，与检测结果一致。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 $17 \sim 195 \text{kBq/m}^3$ 。一次 Technegas 制备和给药过程按 10min 考虑，一年 100 位受检患者，工作人员在高活室内照射的时间为 1000min，根据《辐射安全手册》单位活度 Tc-99m 致人有效剂量约 $10 \mu\text{Sv/MBq}$ ，则工作人员内照射剂量为 $195 \times 10^{-3} \text{MBq/m}^3 \times 0.02 \text{m}^3/\text{min} \times 1000 \text{min} \times 10 \mu\text{Sv/MBq} = 39 \mu\text{Sv}$ 。制备施给过程均在核医学科高活室手套箱或集气罩边进行，手套箱和集气罩工作中有足够风速（一般不小于 0.5m/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，使用镓气发生器制备和施用药物对工作人员的年附加剂量为 $86.2 + 7.8 + 39 = 133 \mu\text{Sv}$ 。

(8) 甲功检查致工作人员年受照剂量

甲功检查每粒活度为 0.333MBq ($0.9 \mu\text{Ci}$)，则距 0.333MBq ($0.9 \mu\text{Ci}$) I-131 胶囊 100cm 处人的剂量率约为 $1.98 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ ，则 I-131 胶囊对工作人员增加的附加剂量可忽略。

(9) 核医学科诊断区环节工作人员受照剂量总结

根据以上估算，核医学科诊断区环节工作人员的附加有效剂量如表 11-15。

表 11-15 核医学科诊断区环节工作人员各环节附加有效剂量 ($\mu\text{Sv/a}$)

环节	分装	运转	注射	摆位	控制室	得气	质控
PET/CT	490.5	214	642	1024		/	215
PET/MR				1970		/	
SPECT	/	/	454	325.6		133	
备注	由护士完成			由技师完成			物理师完成

本项目 PET 和 SPECT 都由不同的护士和技师操作，由此核医学科诊断区环节每名护士、技师和物理师年受照附加剂量分别不大于 1.1mSv、1.97mSv、0.22mSv，由于本项目估算按工作人员全职工作量进行估算，可不考虑辐射工作的累加情况。

11.3.5 放射性废物产生及排放情况

(1) 放射性废气

核医学科诊断区的高活室设计有手套箱，肺通气室也设计有集气罩，废气由专用管道分别引至医疗楼楼顶东北角高出楼顶排放（总高度59.8m）。

放射性药物分装、活度测定均在通风橱内进行，使用量较大、使用次数较多的含Tc-99m、F-18显像药物，物理性质稳定，均为液体，口服或注射环节挥发到空气中的份额可以忽略不计。

I-131和I-123虽然具有一定的挥发性，但是I-131基本都是胶囊、I-123为液体溶液，且I-131按照人份定购不分装，故在正常操作过程中，只可能有极少量挥发进入大气形成气溶胶。二种核素的使用频次较低（年次数占比3%）。此外，通风系统设置有活性炭过滤器，会进一步过滤净化，对周围环境的影响十分轻微，故本项目不予详细评价。

若操作放射性物质发生意外泼洒情况时，短时间进入空气的份额较多，经过滤器吸附处理后高空排放，放射性物质经大气扩散后浓度会进一步降低，故偶发排放对周围公众的辐射剂量贡献很小。

工作期间每个月至少检查一次通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不得超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器应按放射性固体废物进行收集及处理。

(2) 放射性液体废物

核医学科诊断区高活室内产生的废水、给药后患者专用卫生间产生的废水、控制区清洁废水、应急淋浴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医疗楼东侧的放射性废水 1 号衰变池池，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。

1 号衰变池池收集的放射性废液中含有少量回旋加速器场所、生产过程中产生的正电子短半衰期核素，主要的放射性核素来源于核医学诊断区受检患者的排泄物，门诊显像检查使用的核素包括 F-18、C-11、N-13 用于 PET 检查的正电子核素，以及 Tc-99m、I-123、I-131 用于 SPECT 检查用核素，核医学科诊断区的放射性废水含有 A 类和 B 类核素，参照 HJ1188-2021 和《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》相关规定，1 号衰变池池衰变池的废水暂存时间按照超过 180 天，排放前委托有资质的检测机构对废水进行检测，废水中 I-131 核素的放射性活度浓度和总 α 、总 β 符合排放限值要求的，排放时将在“放射性废水暂存、处置管理台帐”上详细记录解控排放废水所含核素、体积、废水暂存起始日期，处置人员和处置日期等信息。

放射性废液产生量预计如下：

①门诊核素显像检查：核医学科诊疗设置受检患者专用卫生间。核医学门诊卫生间按坐便器大档水位 4L、小档水位 2.8L，5s 洗手、水嘴流量 0.1L/s 设计患者用水量设计，患者一次入厕用水量不超过 4.5L，本项目按照所有受检者每人每次如厕产生放射性废水的总量为 6L 考虑；洗手池和拖布池产生的废水也将排入衰变池，预计产生量为 60L/d；质控废水，每次 1L；另外应急淋浴水保守每年按一次 50L。根据表 11-10，核医学科诊疗年检查人数不超过 18050 人，年产生废水约 $6L/人 \times 18050 人 + 60L/d \times 250d + 1L/次 \times 4 次/月 \times 12 月/年 + 50L/年 \approx 123.8m^3$ 。

②回旋加速器场所正常情况下产生的废水约 237.6L/年。

1 号衰变池池的总容积为为 $114.7m^3 (40m^3 + 38.2 m^3 + 36.5m^3)$ ，废水从充满至排放可贮存衰变约 219 天，满足 HJ1188-2021 和《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》中 A 类放射性废水暂存衰变满 10 个半衰期（含 I-131 废水 180 天）的要求。排放前委托有资质的检测机构对废水进行检测，废水中 I-131 核素的放射性活度浓度和总 α 、总 β 符合排放限值要求的，排放时将在“放射性废水暂存、处置管理台帐”上详细记录解控排放废水所含核素、体积、废水暂存起始日期，处置人员和处置日期等信息。

（3）放射性固体废物

核医学科诊断区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，标注日期于每周一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显像人数 18050 人次，平均每人次产生含放射性固体废物 0.02kg（含患者注射器每只 4g），则项目满负荷运行年产生量约 361kg。此外，每年更换手套箱活性炭过滤器，预计额外产生 57kg 固体废物（每个活性炭不大于 5kg 和高效过滤不大于 2kg），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。

参照 HJ1188 和《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 类废物分开储存，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（含 I-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天）后，使用经检定或校准合格的检测仪器对废物表面污染和辐射剂量率水平进行监测，辐射剂量率监测为所处环境本底水平且 α 、 β 表面污染水平分别小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 和 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物解控作为医疗废物处置，并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

根据“11.2.7.3 放射性固废”章节分析回旋相关场所分析，产生的固体废物包含有：硅胶、树脂、氧化铝、滤膜及过滤柱、收集瓶、三通阀、单向阀、连接管材、穿刺针、同位素交换反应柱、无菌滤膜等，目产生的放射性固体废物合计约 96kg/年，放射性废物暂存至少一个月（10 个半衰期以上），经监测确认达到清洁解控水平要求后，作为医疗废物处置。

核医学科诊疗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废物间自行衰变。废物间内拟配置 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，标注日期于每周一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（其中 I-131 和 Ra-223B 类放射性固体废物暂存超过 180 天，Sr-89 超过 505 天），经监测

确认达到清洁解控水平要求后，作为医疗废物处置。

依据《北京市生态环境局办公室关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》，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（其中 I-131 和 Ra-223 的放射性固体废物暂存超过 180 天），使用经检定或校准合格的检测仪器对废物表面污染和辐射剂量率水平进行监测，辐射剂量率监测为所处环境本底水平且 α 、 β 表面污染水平分别小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 和 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物解控作为医疗废物处置，并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

除了以上能自行解控的外，还有来自加速器维修更换产生的废弃件（碳膜支架和靶膜），产生量很少，年总量约 0.1kg。这些高活性固废统一收集到铅放射性废物桶，最后委托有放射性固废处理资质的单位处理。

11.4 核医学科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）剂量估算源强

I-131 治疗药物的剂型通常为 Na^{131}I 水溶液或胶囊，采用口服给药方式。 Na^{131}I 口服液或胶囊事先由供药公司根据病人用量储存药瓶内，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）。根据《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 $0.5\text{mSv}/\text{h}$ 。罐体直径按照 10cm 估算，预计 1m 处的剂量率低于 $1.25\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。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（如果胶囊时，直接按患者预定量口服），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 3~4d，对周围的环境有一定的影响。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，可以估算出给药室和病房周围（含楼上楼下）的附加剂量率水平。根据《辐射安全手册》表 9.29 数据，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 11-16，24 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 11-16 施用 3.7GBqI-131 药物后不同时间 1m 处剂量水平（ μ Sv/h）

用药后时间 (h)	0	6	12	18	24	36	48	72
1m处剂量率 (μ Sv/h)	216	173	120	117	109	81.4	67.4	17.7

(2) 估算方法

将接受药物治疗的人员近似作为点源，依照剂量率和距离平方成反比衰减的关系，同时考虑墙壁和防护门、窗的衰减作用，估算病房周围的附加辐射剂量率，结合可能照射时间，估算职业人员和公众的受照剂量。

屏蔽设计：病房和放射性废物间四周墙体除了外墙为砼外其它均为混凝土砖结构，地板、顶板均为砼，病房拟安装不低于 10mm 铅当量防护门。病房保守按每个患者施药活度 5.55GBq（150mCi，即 1m 处初始剂量率为 324 μ Sv/h），估算其周围的附加剂量率和对环境的辐射影响。

(3) 病房周围不同位置的附加剂量率水平

核素治疗项目运行对周围环境影响的估算点及参数选取和估算结果见表 11-17 所示，估算点位见图 11-11。

表 11-17 注射核素后患者在病房周围不同位置的附加剂量率

场所名称	编号	估算点位(见图 11-11)	屏蔽厚度	距离 (m)	衰减因子	附加剂量率 (μ Sv/h)	备注
出入口	r1	病房东北侧常闭门外	16mmpb (45°斜射)	3.6	8.82E-3	2.20E-1	公众
			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmpb (45°斜射)	4.6	1.49E-3	2.29E-2	
	r2	病房入口	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmpb (45°斜射)	4.9	1.49E-3	2.02E-2	监督区
			24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmpb (45°斜射)	6.8	1.49E-3	1.05E-2	

	r3	病房出口	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰 (30°斜射) +6mmpb (60°斜射)	7.1	1.73E-3	1.11E-2	/
	r4	工作人员入口	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰+6mmpb (30°斜射)	8	5.04E-3	2.55E-2	控制区
病房 1	r5	东墙过渡病房	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3.6	1.40E-2	3.51E-1	公众
	r6	南墙病房 2	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3.5	3.52E-2	9.32E-1	控制区
	r7	南墙病房 2	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰 (45°斜射)	4.5	8.85E-3	1.42E-1	控制区
	r8	西墙患者走廊	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.4	1.40E-2	2.32	控制区
	r9	北墙走廊	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.6	1.40E-2	6.72E-1	公众
	r10	防护门患者走廊	10mmpb (45°斜射)	2.2	5.23E-2	3.50	控制区
	r11	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r12	楼下停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
病房 2	r13	东墙过渡病房	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3.6	1.40E-2	3.51E-1	公众
	r14	南墙走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3.5	3.52E-2	9.32E-1	监督区
	r15	西墙缓冲区	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.4	1.40E-2	2.32	工作人员
	r16	北墙病房 1	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.6	3.52E-2	1.69	控制区
	r17	防护门患者走廊	10mmpb (45°斜射)	2.2	5.23E-2	3.50	控制区
	r18	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r19	楼下停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
病房 3	r20	东墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.7	3.52E-2	1.57	控制区
	r21	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.2	3.52E-2	2.36	控制区
	r22	西墙病房 4	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.4	1.40E-2	2.32	控制区
	r23	北墙走廊	63cm 混凝土砖	3.5	4.94E-4	1.31E-2	公众
	r24	防护门患者走廊	10mmpb (45°斜射)	2.5	5.23E-2	2.71	控制区
	r25	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r26	楼下停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
病房 4	r27	东墙病房 3	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.4	1.40E-2	2.32	控制区

	r28	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.2	3.52E-2	2.36	控制区
	r29	西墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	2.7	3.52E-2	1.57E+0	控制区
	r30	北墙走廊	63cm 混凝土砖	3.5	4.94E-4	1.31E-2	监督区
	r31	防护门患者走廊	10mmpb (45°斜射)	2.3	5.23E-2	3.20	控制区
	r32	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r33	楼下停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
病房 5	r34	东墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	5	3.52E-2	4.57E-1	控制区
	r35	南墙病房 6	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	4.9	3.52E-2	4.76E-1	控制区
	r36	北墙走廊	32cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3	1.40E-2	5.05E-1	监督区
	r37	防护门患者走廊	10mmpb (30°斜射)	5.2	9.01E-2	1.08	控制区
	r38	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r39	楼下停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
病房 6	r40	东墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	4.3	3.52E-2	6.18E-1	控制区
	r41	防护门患者走廊	10mmpb (45°斜射)	4.7	5.23E-2	7.67E-1	控制区
	r42	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r43	楼下污水泵间、停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
病房 7	r44	东墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	4.3	3.52E-2	6.18E-1	控制区
	r45	防护门患者走廊	10mmpb (45°斜射)	4.6	5.23E-2	8.00E-1	控制区
	r46	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r47	楼下加压机房、停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
病房 8	r48	东墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	5	3.52E-2	4.57E-1	控制区
	r49	南墙楼梯间	35cm 砼	3.5	8.73E-3	2.31E-1	公众
	r50	南墙电梯间	35cm 砼 (45°斜射)	3.7	1.24E-3	2.94E-2	/
	r51	防护门患者走廊	10mmpb	5.2	1.23E-1	1.48	控制区
	r52	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r53	楼下加压机房、停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众

高活室	r54	东侧缓冲间	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	5.6	3.52E-2	3.64E-1	控制区
	r55	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	1.46E-1	公众
	r56	楼下停车位	50cm 砼	4.2	1.15E-3	2.10E-2	公众
治疗留观室	r57	东墙 PET/MR 室	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	1.7	3.52E-2	2.68E-1	控制区
	r58	南墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	3.8	3.52E-2	5.37E-2	控制区
	r59	西墙患者走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	4	3.52E-2	4.85E-2	控制区
	r60	北墙走廊	24cm 混凝土砖+5cm 混凝土抹灰	6.1	3.52E-2	2.08E-2	监督区
	r61	防护门患者走廊	3mmpb	4.4	5.34E-1	6.06E-1	控制区
	r62	楼上院内道路	35cm 砼	4.4	8.73E-3	9.92E-3	公众
	r63	楼下汽车道	50cm 砼	4.2	1.15E-3	1.43E-3	公众

备注：*距离为患者到屏蔽体外 30cm 处估算点。铅屏蔽的 TVT=11mm，砼（混凝土）的 TVT=170mm ($\rho=2.35\text{t/m}^3$)。

由表 11-17 可见：在患者服用 5.55GBq (150mCi) I-131 药物后，控制区边界外的普通区域和监督区，如缓冲间、入口、电梯间、楼上楼下等位置，最大附加剂量率为 $6.72\text{E-}1\mu\text{Sv/h}$ （病房 1 北侧走廊）；控制区内病房最大值为 $3.50\mu\text{Sv/h}$ ，满足本项目辐射场所控制区边界和控制区内辐射剂量率小于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 和 $10\mu\text{Sv/h}$ 的要求。

上述估算是保守按照患者用量 150mCi 估算的。实际运行时，拟将用药量 $\geq 150\text{mCi}$ 患者安排在中间的病房（病房 5、6、7、8），将用药量 $< 150\text{mCi}$ 患者安排在外围的病房（病房 1、2、3、4），这样可以有效减少对控制区边界外的附加剂量率贡献，减少场所周围公众的受照剂量。

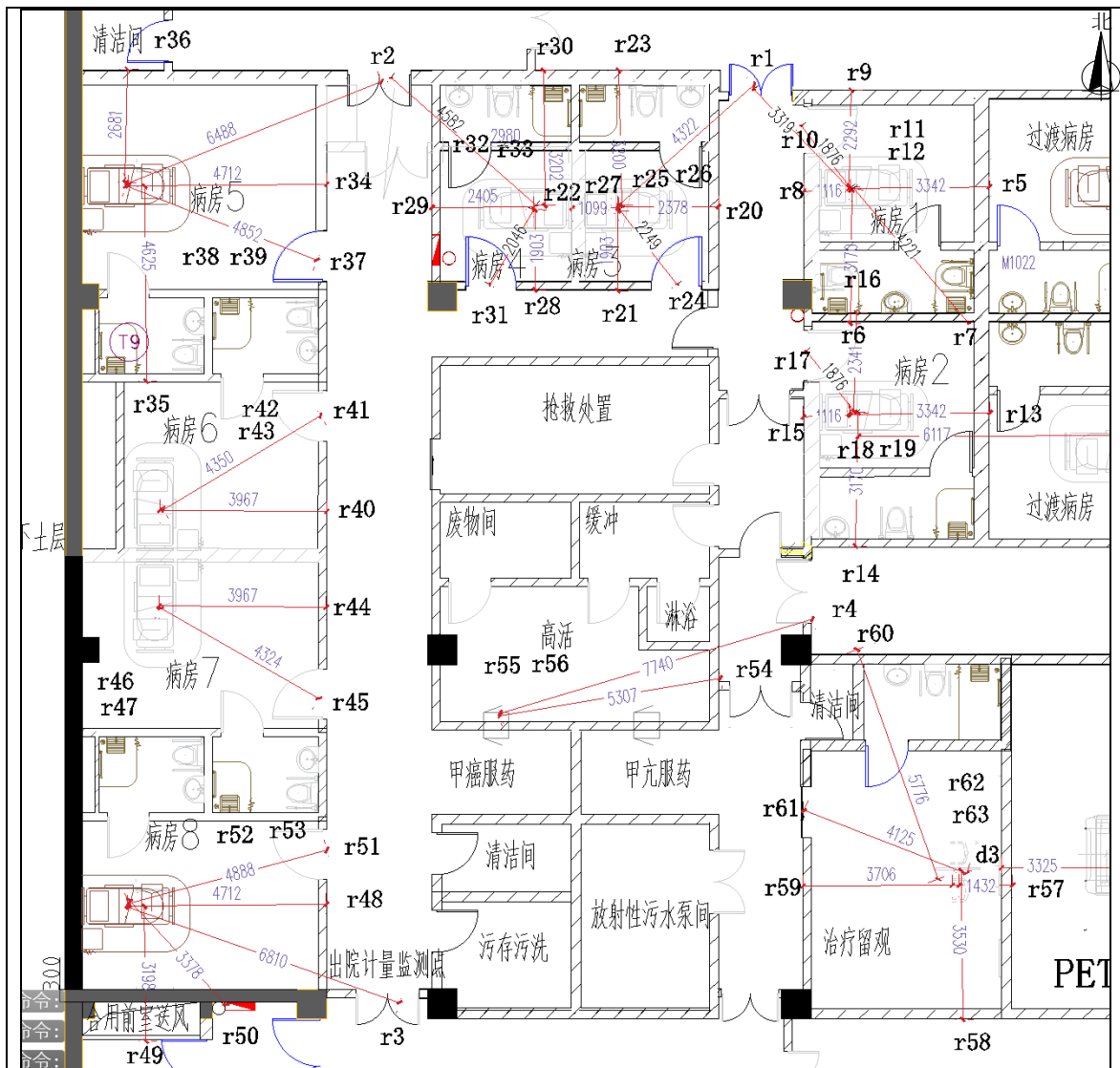


图 11-11 核医学科治疗区周围剂量率估算点位示意图

(4) 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%左右在最初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。

表11-16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11-16中可得72h内对周围公众1m平均剂量率的影响约为 $90.2\mu\text{Sv/h}$ ，为刚施药患者1m处 $216\mu\text{Sv/h}$ 的0.42倍，故本项目公众实际受照剂量保守按照第一天受照剂量的0.5倍进行折算，患者年操作量按照平均用量（120mCi）估算。

①场所周围停留公众

公众受照主要来自 γ 射线外照射，患者平均住院时间3.5天。本项目计划每5天统一安排一批甲癌患者入院治疗，全年最多安排70批次，按照全年治疗560人，全年病房周围相关场所总工作时间取2000h（假设患者平均住院时间3.5天，则每间病房的入住率为 $3.5 \times 560 / (365 \times 8) \approx 0.67$ ，即每间病房每年33%的时间都处于空闲状态，因此周围公众附加剂量按每人年工作时间2000h估算是保守的）。患者给药时间按照每人每次3min计，全年给药总时间为28h。I-131门诊治疗留观时间每人按15min，全年125h。表11-18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 $43.9\mu\text{Sv}$ （东墙过渡病房），低于设定的剂量约束目标值 $100\mu\text{Sv/a}$ 。

表 11-18 相关场所主要位置公众的年附加剂量估算

场所名称	编号	估算点位（见图 11-11）	附加剂量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）	居留因子	受照时间（h）	年附加剂量（ μSv ）
出入口	r1	病房东北侧常闭门外	2.43E-1	1/16	2000	1.52E+01
	r2	病房入口	3.07E-2	1/16	2000	1.92
病房 1	r5	东墙过渡病房	3.51E-1	1/8	2000	4.39E+01
	r9	北墙走廊	6.72E-1	1/16	2000	4.20E+01
	r11	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	9.13
	r12	楼下停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31
病房 2	r13	东墙过渡病房	3.51E-1	1/8	2000	4.39E+01
	r18	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	9.13
	r19	楼下停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31
病房 3	r23	北墙走廊	1.31E-2	1/16	2000	8.19E-1
	r25	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	9.13
	r26	楼下停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31
病房 4	r32	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	9.13
	r33	楼下停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31
病房 5	r38	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	9.13
	r39	楼下停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31
病房 6	r42	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	9.13
	r43	楼下污水泵间、停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31

病房 7	r46	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	9.13
	r47	楼下加压机房、停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31
病房 8	r48	东墙患者走廊	4.57E-1	1/16	2000	2.86E+01
	r49	南墙楼梯间	2.31E-1	1/16	2000	1.44E+01
	r52	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	2000	1.83E+01
	r53	楼下加压机房、停车位	2.10E-2	1/16	2000	1.31
高活室	r56	楼上院内道路	1.46E-1	1/16	28	2.56E-1
	r57	楼下停车位	2.10E-2	1/16	28	3.68E-2
治疗留观室	r63	楼上院内道路	9.92E-3	1/16	125	7.75E-2
	r64	楼下汽车道	1.43E-3	1/16	125	1.12E-2

备注：年有效剂量估算示例： $H_0 = D \times t \times U \times T = 1.11 \times 2000 \times 1/16 \times 0.5 = 69.4$ (μSv)，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左右，且体内放射性活度降至低于400MBq之下才能出院。出院前，进行患者剂量检测，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处的剂量率约20 $\mu\text{Sv/h}$ 。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 μSv 。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。

(5) 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。

参照表 11-16 数据，施用 370GBqI-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 4.44GBq/人 ，保守假设每周查房时间 1h，工作人员外照射剂量为 1.638mSv/a ($27.3\mu\text{Sv/h}\times 1.2\times 1\text{h/周}\times 50\text{周/a}$)。

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 $1.5\times 10^{-6}\text{Bq/h}\cdot\text{Bq}$ （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，每周查房一般都在住院第二天后，假设每周查房病房空气中 I-131 平均浓度 200Bq/m³，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 1.6mSv 左右。

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。

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，在用药正常后就可离开。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，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，其它两组核素影响分析如下。

(1) I-131 的辐射影响

使用 I-131 治疗甲亢的病人最多 500 名/年，不大于 370MBq/病人，I-131 的操作方式为口服（从铅罐里取出胶囊），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 $41.7\text{h}[5\text{min}\times 500\text{（人/年）}/60\text{（min/h）}]$ ，I-131 γ 辐射能量为 0.36MeV， K_γ 值为 $0.0595\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{MBq}$ ，距离患者（施用量 370MBq）1m 处的剂量率约为 $22.0\mu\text{Sv/h}$ ，则 I-131 核素对工作人员增加的附加剂量约为 $917\mu\text{Sv}$ 。

(2) Ra-223 的辐射影响

1) 本项目运行后预期每年治疗患者 100 人次，其中每例每次最大注射量为 6.6MBq (0.178mCi)。

2) 根据本项目工作流程和各环节主要内容，正式运行后，对各岗位的健康影响主要为：

①工作人员负责本项目的药物订购、接收、暂存、分装和活度检测，操作时在手套箱后，以及患者药物注射，操作时在注射车后，体部距药物 30cm，保守假设单次操作时长约 2min，年总操作时长为 4.0h。

②点源 Ra-223 剂量率常数为 $1.32E-11\mu\text{Gy}/\text{Bq}\cdot\text{s}$ ，本项目单次最大操作活度为 6.6MBq (0.178mCi)，距离该活度药物 1m 处的剂量率为 $0.31\mu\text{Gy}/\text{h}$ ，根据反平方定律，50cm 为 $1.24\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。

③由于 Ra-223 仅 1.1% 发射 γ 射线（能量为 11.7~269.5keV），为保守估算，本次假设所有操作均无防护条件下进行。

3) 外照射附加剂量估算

根据以上相关相关内容，本项目运行时，主要是辐射工作人员外照射附加年剂量约为 $5.0\mu\text{Sv}$ ($1.24\mu\text{Sv}/\text{h}\times 4\text{h}$)。

4) 内照射附加剂量估算

在正常工作条件下，护士通过手套箱操作药物，使用注射器抽取一定体积的药物，并将注射器转移到注射台，由护士完成注射，氯化镭注射液为稳定溶液，且在药罐或注射器内存放，基本无挥发，一般不会引起内照射，工作人员内照射附加剂量可忽略。

(4) 门诊治疗工作人员受照剂量总结

使用 I-131、Ra-223 和 Sr-89 开展门诊治疗对辐射工作人员的附加剂量为 $922\mu\text{Sv}$ ($917\mu\text{Sv}+5\mu\text{Sv}$)。

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、住院病区卫生保洁和应急淋浴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 560 人次。根据《建筑给水排水设计标准》(GB50015-2019) 表 3.2.2，医院住院病人使用卫生间、盥洗室（不包括洗澡

淋浴)平均日用水量90~160L/人,本项目住院病人用水按每人200L/d考虑,人均住院3.5天,年废水量为392m³,平均分摊至360d,每天废水量约为1.09m³;保洁(病人出院后进行)废水按平均每次60L计,保守按100次/年,则年排水量约12.0m³;另外应急淋浴水保守每年按一次一共50L。此外,诊断区“I-131患者候诊室”和门诊治疗患者产生冲厕废水也汇入2号衰变池,每年废水产生量约9.0m³。综合分析,病房每年废水产生量约为413m³,平均每天废水产生量约为1.15m³。

②放射性废水收集、处置与排放

治疗区高活室内产生的废水以及患者住院期间产生的废水(也包括门诊治疗患者和诊断区碘患者候诊室卫生间废水),将通过专用管道一并汇入位于病房区域的集水坑,然后泵入医疗楼外东侧的放射性废水2号衰变池,废水衰变180d并满足排放要求后,排至医院污水处理站进一步处理,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3个衰变池,采用槽式设计,衰变池总容积不低于488.5m³(162.6m³+164.6m³+161.3m³),衰变池顶部距地面约1.5m土层。

以每年560名I-131甲癌患者量及门诊废水等量估算,每一个池充满大约需140天,从充满至排放可贮存衰变280天,约34个半衰期,满足HJ1188-2021和《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》中I-131核素治疗病房产生的废水至少暂存180天的要求。161.3m³衰变池充满用时140天约20周,大约接收了220位甲癌患者产生的废水,I-131的排放总量为781.4GBq(220人×80%×4.44GBq/人)。考虑废水收集期间I-131的衰变,充满时总活度不大于82GBq,贮存180天排放,82GBqI-131经180天(衰变因子为1.83E-7)后的活度约为1.50×10⁴Bq,满足《电离辐射与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录A表A1单次排放总活度值10⁶Bq的要求;排放浓度为0.09Bq/L,满足总β排放限值10Bq/L的要求,更满足《电离辐射与辐射源安全基本标准》GB18871-2002附录A表A1排放活度浓度100Bq/g的要求。

本项目门诊使用I-131、Sr-89、Ra-223治疗的患者,注射药物后即离开核医学科,基本上没有如厕人员,且医院在管理上要求Sr-89等治疗患者在注射前进行排便,基本可以杜绝门诊治疗患者在治疗区间排便,故本项目I-131、Sr-89门诊核素治疗患者对放射性废水贡献很小。由于衰变池储存时间不能满足Sr-89(半衰期50.5d)的10个半衰期要求,简要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%~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%~90%。保守估算治疗结束排一次便时, 占用药量 (148MBq/次) 剩余的 17.5%, 则有 $148\text{MBq/次} \times 40\% \times 17.5\% \approx 1.04 \times 10^7 \text{Bq/次}$ 的核素 Sr-89 随尿液排出体外。本项目运行后每周最多 2 名患者使用 Sr-89 治疗, 每月约 8 名患者, 保守预计 50% 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 $4.16 \times 10^7 \text{Bq}$, 每格废水池充满按 3 个月估算 (衰变池废水储存 180 天), 废水 Sr-89 总活度不大于 $8.13 \times 10^7 \text{Bq}$ (考虑储存期间衰变的影响)。每级衰变池贮存周期最少为 6 个月, 废水中的 Sr-89 在衰变池内经过稀释扩散大约经过 180d 贮存后, 其总活度和活度浓度将进一步下降, 总活度约为 $6.88 \times 10^6 \text{Bq}$ (低于放射性核素 Sr-89 的每月排放限值 ($\leq 2.7 \times 10^7 \text{Bq}$)), 排放总活度能满足废水排放含放射性核素 Sr-89 污染控制要求。

核医学科总放射性废水暂存衰变超过 180 天, 排放前委托有资质的检测机构对废水进行检测, 废水中 I-131 核素的放射性活度浓度和总 α 、总 β 符合排放限值要求的, 排放时将在“放射性废水暂存、处置管理台帐”上详细记录解控排放废水所含核素、体积、废水暂存起始日期, 处置人员和处置日期等信息。

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, 排放衰变池废水须满足解控要求, 确保废水的放射性水平符合排放标准后, 依照相关规定放废水的排放要求排放。

⑤排水管道及集水坑周围的辐射水平

假设患者平均服用 120mCi 的 I-131, 在 24h 内通过尿液排泄 70%。当储水量高度达到 0.3m 时 (储水量不大于 0.3m^3), 水泵就启动直接排到衰变池, 保守假设集水坑里有废水含 120mCi 的 I-131, 结果集水坑 40cm 厚度底砵屏蔽 (衰减因子为 $4.44\text{E}-3$),

集水坑底板距楼下至少3m，在正常排水情况下，下方（地上1.7m处）的剂量率水平低于 $0.13\mu\text{Sv/h}$ 。楼下为停车场，无常居留人员。

（2）放射性废气

①服碘室

病房治疗甲癌口服用的I-131是溶液剂或胶囊型，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（如果是溶液剂型），上述操作均在控制区内完成，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 $4.44\times 10^5\text{Bq}$ 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 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，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 $88.8\text{Bq}/\text{m}^3$ ，经过空气稀释后最大落地浓度至少降个两个数量级（不大于 $0.888\text{Bq}/\text{m}^3$ ），远低于公众导出空气浓度 $5.6\text{Bq}/\text{m}^3$ 限值要求。此外，频次少（全年560人次），总排放时间约为28h，公众常居留的年受照剂量约为 $0.05\mu\text{Sv}$ （ $0.888\text{Bq}/\text{m}^3\times 0.02\text{m}^3/\text{min}\times 60\text{min}/\text{h}\times 28\text{h}/\text{年}\times$ ）。假设过滤器完全失效，地面浓度会增加2个量级，公众年受照剂量增加为 $5\mu\text{Sv}$ ，叠加外照射剂量贡献，公众受照剂量依然低于 0.1mSv/a 的剂量约束值。

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 $4\text{Bq}/\text{m}^3$ ，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100倍，远低于本评价建议的公众DAC限值 $5.6\text{Bq}/\text{m}^3$ 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/m^3 ，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。本项目衰变池都是位于衰变房内，且衰变房也设有专门的排风系统，可减少对周围的影响。

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衰变，达到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560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56kg。此外，核医学科每年更换排风过滤器一次，预计额外产生10kg固体废物，总计约66kg。

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放射性废物库衰变。被褥和病号服达到清洁解控要求后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1120kg。

依据 HJ1188 和《关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》，本场所使用核素为 B 类废物，固体废物暂存时间超过 10 倍最长半衰期且不少于 30 天（含 I-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天，Sr-89 核素的放射性固体废物暂存超过 505 天）后，使用经检定或校准合格的检测仪器对废物表面污染和辐射剂量率水平进行监测，辐射剂量率监测为所处环境本底水平且 α 、 β 表面污染水平分别小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 和 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物解控作为医疗废物处置，并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

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11-19，这几个场所都是不同的工作人员操作，理论上不存在累加情况。

可见，本项目工作人员和公众年受照总剂量分别不大于2.52mSv和43.9μSv，低于本项目设定的年剂量约束值5mSv/a和100μSv/a要求。

表11-19 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	核医学科诊断区			核医学科治疗	治疗场所排放I-131废气
		护士	技师	物理师		
辐射工作人员	419.6μSv/a	1.80mSv/a	1.97mSv/a	215μSv/a	2.52mSv/a	/
公众	10μSv/a	35.1μSv/a			43.9μSv/a	<10μSv/a

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) 核素正离子泄漏预防及处理措施

①回旋加速器运行前检查靶密封膜片和传输时管线的气密性。

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

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

(3) 冷却水泄漏预防及处理措施

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

根据《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》（环发[2006]145号）要求，当发生或发现辐射事故后，应立即向单位的辐射安全领导小组组长和法定代表人报告，立即启动辐射事故应急预案，并在2h内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成较大辐射事故或人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康行政部门报告。

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

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

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

(5) 操作放射性同位素时发生容器破碎，同位素泼洒等意外事件。

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

在完成去污后，采用表面污染检测仪对房间地面、墙面、实验台表面进行检测，确保其 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 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ 。

11.6.2 核医学科诊断区和治疗区异常事件分析与防范建议

核医学科诊断区和治疗区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) 储源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》（GA1002-2012）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。

在高活室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,达到解控水平后办理清洁解控,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备有专用厕所,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11-20。

表11-20 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、回旋加速器室、高活室、扫描机房、病人候诊室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。高活室和控制区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	核医学科工作场所实行分区管理,在控制区出、入口分别安装单向门禁系统,限制无关人员出入;热室设备间、注射区、高活室、扫描室、储源室、废物间、候诊室及卫生间和控制区走廊等场所采取放射性污染控制措施。病房采用实体屏蔽措施,安装视频监控系统 and 固定剂量探头等装置;高活室采用实体屏蔽措施,安装防盗门、视频监控系统 and 防盗窃报警装置,满足生态环境部门和公安部门有关安全保卫的要求。在核医学科患者候诊区内设铅屏风。
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、4 台个人剂量报警仪、2 套固定式剂量报警仪(多个探头),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 19 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；高活室安装手套箱，操作口风速大于 0.5m/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、工作人员培训考核计划等。辐射安全管理制度和操作规程得到宣贯和落实。
人员培训	辐射工作人员均通过辐射安全和防护考核。
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管理委员会作为专门管理机构，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 1-5 所示。本项目为在已许可项目迁建，相关负责人将继续担任辐射安全管理委员会成员，负责相关科室的日常管理。辐射安全管理小组的职责：

1. 在医院辐射安全管理委员会主席的领导下，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，在辐射安全管理委员会主席的指挥下负责事故现场的应急处理工作。

5. 负责办理辐射安全许可证的申请、登记、换证及年审等工作。

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

7. 对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 15 人，将在生态环境部培训平台报名参加并通过辐射安全和防护考核，经过考核合格后持证上岗，并及时参加每五年一次的重重新考核，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

北京清华长庚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、辐射工作人员培训考核制度、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。

本项目实施后，北京清华长庚医院将结合新项目的开展，在重新申领辐射安全许可证前，组织相关人员完善相关制度，如操作规程（如增加回旋操作规程、病房治疗规程等）、监测方案、辐射突发环境事件应急预案等，确保全部辐射工作有章可循。同时，组织各科室人员进行学习，确保依照规定安全使用放射性同位素和射线装置。

12.3 辐射监测

12.3.1 个人剂量监测

北京清华长庚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，监测频度为每3个月检测一次，并按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（原环境保护部令18号）要求建立个人剂量档案。辐射工作人员进行个人剂量监测发现监测结果异常的，立即核实和调查，并将有关情况进行文字记录。

全院现有的辐射工作人员的个人剂量监测工作已委托中国医学科学院放射医学研究所承担，本项目投入使用后，所涉及新增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

（1）委托监测

医院每年委托有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1次，病房内放射性空气浓度每年委托有资质的单位检测1~2次。

（2）本项目自行监测方案

医院针对本项目启用后,核医学科拟配备 3 台辐射剂量巡测仪(新增 1 台)、3 台表面污染监测仪(新增 2 台)、2 台个人剂量报警仪(新增 2 台)、2 套固定式剂量报警仪(新增 2 套),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。拟建立辐射环境自行监测记录或报告档案,并妥善保存,接受生态环境行政主管部门的监督检查。新增项目实施后,核医学科工作人员使用拟配备的辐射剂量巡测仪、表面污染监测仪和中子剂量当量率仪,对拟建辐射工作场所进行监测,本项目自行监测方案如下。

(1) 监测项目: γ 剂量率水平, 表面污染水平

(2) 检测设备: X- γ 辐射剂量巡测仪, 表面污染监测仪

(3) 检测频次: 剂量率水平每年不少于 1 次(有代表性点位不少于 1 次/月), 表面污染每天工作后检测 1 次。

(4) 工作场所 γ 剂量率水平监测: 点位包括点位回旋加速器室、PET/CT 室、PET/MR 室、SPECT 室四周和楼上、楼下, 注控制区边界外 30cm 处和衰变池四周的剂量率水平, 以及核医学科四周。监测数据记录存档, 回旋加速器药物制备场所和加速器室监测点位计划见表 12-1 和表 12-2, 核医学科诊疗场所的监测点位按照表 11-11 和表 11-12 点位进行监测(如控制室等有代表性点位不少于 1 次/月), 监测点位布置见图 12-1 和图 12-2 所示。

表 12-1 加速器室监测计划

场 所	测点编号	位置描述	检测频次
加速器室	1	控制室	1 次/年
	2~3	西侧走廊	1 次/年
	1-3	库房	1 次/年
	4	防护门外	1 次/年

表 12-2 回旋加速器药物制备场所监测计划

场 所	测点编号	位置描述	检测频次
回旋加速器药物制备场所	A	东侧配电室	1 次/年
	B	控制室	1 次/年
	C	西侧走廊	1 次/年

	D~F	热室北侧	1次/年
	G	热室东侧	1次/年
	H	放化质控室东侧	1次/年
	I	放化质控室北侧	1次/年

(5) 表面污染水平监测点位设置：每天工作结束后（治疗病房是下一批患者住院前），对高活室台面、地面，手套箱台面，注射窗台面以及相关设备表面等进行表面污染监测，监测数据记录存档。

表 12-3 表面污染水平监测点位设置

编号	场所名称	监测点位置	β 表面污染 (Bq/cm ²)
1~5	核医学科诊断区高活室（注射室）	手套箱台面、高活室地面、注射窗、抢救运动室、通气室	
6~8	SPCET 候诊室	候诊室地面、候诊椅、卫生间	
9~11	PET/CT 候诊室 1	候诊室地面、候诊椅、卫生间	
12~14	PET/CT 候诊室 2	候诊室地面、候诊椅、卫生间	
15~17	PET/CT 候诊室 3	候诊室地面、候诊椅、卫生间	
18~20	PET/MR 候诊室	候诊室地面、候诊椅、卫生间	
21~23	留观室	候诊室地面、候诊椅、卫生间	
24~25	SPECT/CT 1 室	病人床、地面	
26~27	SPECT/CT 2 室	病人床、地面	
28~29	PET/CT 室	病人床、地面	
30~31	PET/MR 室	病人床、地面	
32~35	核医学科治疗区高活室	手套箱台面、高活室地面、注射窗	
36~59	8 间病房	病房地面、病床、卫生间	
60~61	治疗留观室	候诊椅、地面	
62	热室设备间	地面	

12.3.3 本项目配备的监测仪器和防护用品

本项目投入使用前，医院将新购一批辐射监测设备，本项目检测仪器如表 12-4 所示。此外，将配备一些防护用品，具体见表 12-5 所示。

表 12-4 本项目检测仪器清单

序号	仪器名称	型号	数量	使用场所	备注
1	便携式辐射剂量巡测仪	待定	3	核医学门诊、病房各1台，正电子核素制备区1台	拟配
2	表面污染监测仪	待定	3	核医学门诊、病房各1台，正电子核素制备区1台	拟配或继续使用现有核医学科
3	个人剂量报警仪	待定	2	回旋加速器	拟配
4	固定式剂量报警仪	待定	2	回旋加速器和热室各1探头，核医学病房多探头	拟配

表 12-5 核医学科配备的防护设施表

名称	数量(个)	规格	使用场所
手套箱	1	50mmPb	核医学科诊断区高活室
	1	10mmPb	
	1	50mmPb	核医学科治疗区高活室
注射器防护套	2	1个20mmPb钨合金、1个10mmPb钨合金	核医学科诊断区高活室
翻转式铅罐	1	42mmPb	核医学科诊断区高活室
注射车	1	5mmPb	运动负荷室
转运防护盒	1	1个25mmPb	核医学科诊断区高活室
防护注射窗	4	2个40mmPb、2个20mmPb	核医学科诊断区和病房注射窗口
储源保险柜	1	型号待定	源库
药物转运防护罐	2	42mmPb	热室设备间
转运防护盒	2	25mmPb	热室设备间
合成热室	2	70mmPb铅当量，其它五面60mmPb铅当量	热室设备间
分装热室	1	正面及与走廊接触那面70mmPb铅当量，其它五面60mmPb铅当量	热室设备间
铅废物桶	1	50mmPb	回旋加速器室固废间
	1	5mmPb	热室设备间
	4	5mmPb	核医学科诊断区废物间
	1	20mmPb	核医学科诊断区注射室
	1	5mmPb	核医学科诊断区注射室

	7	5mmPb	每间候诊室、抢救兼运动室、肺通气兼甲功室、留观室
	2	15mmPb	核医学病房给药窗旁
	14	10mmPb	门诊治疗留观室 1 个、每个病房 1 个（共 8 个）、病房患者出口处 1 个、废物间 4 个
铅衣、铅围脖	5	0.5mmPb/0.25 mmPb	SPECT 机房和高活室
移动铅屏风	6	2mmPb	SPECT 候诊室、留观室
	5	6mmPb	每间 PET 候诊室和 I-131 候诊室、留观室
	1	6mmPb	门诊治疗留观室
铅玻璃	1	10 mmPb	放化质控室

12.4 辐射事故应急管理

北京清华长庚医院制定了《北京清华长庚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健康行政部门报告。医院将每年至少组织一次应急演练。

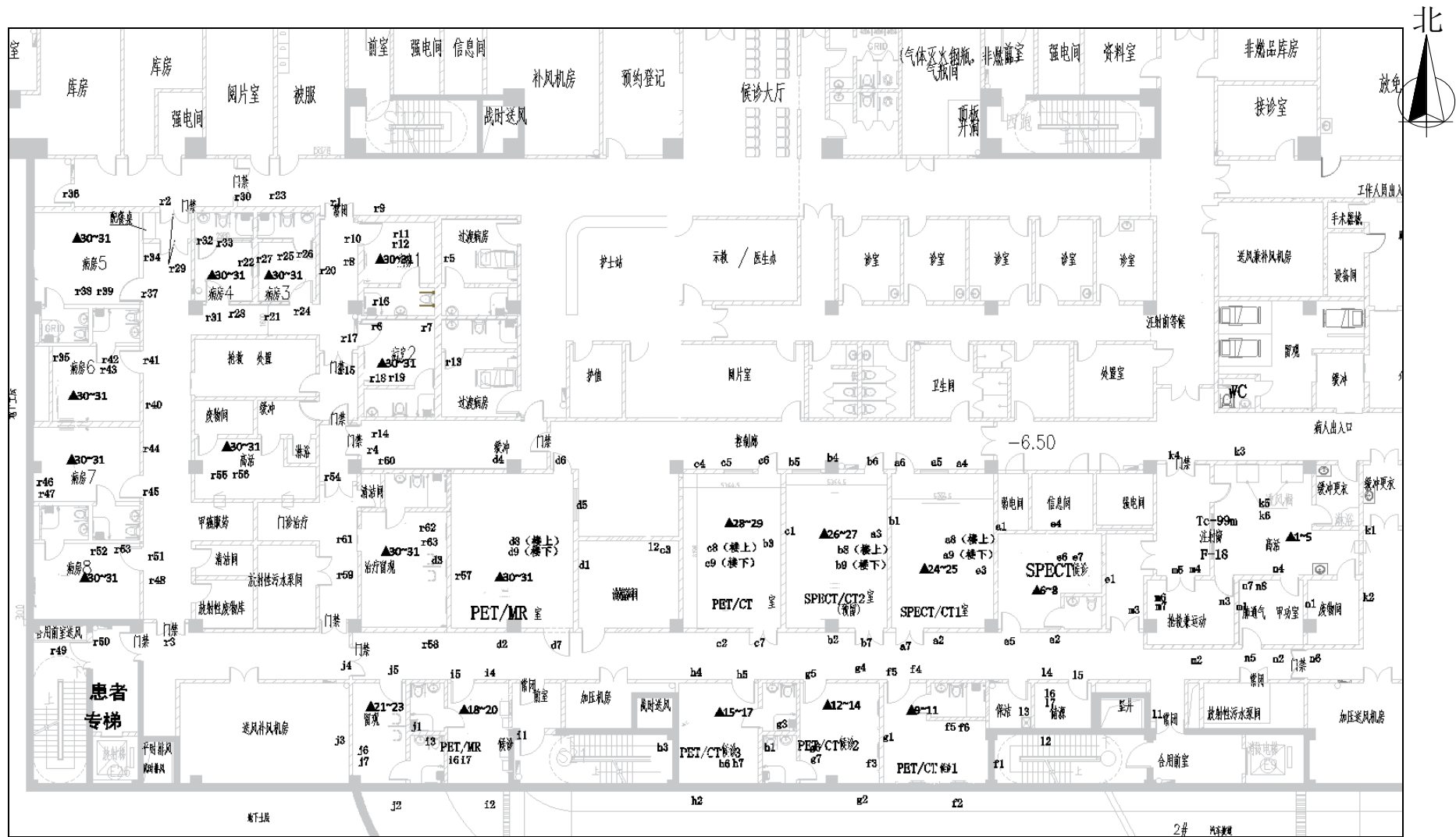


图 12-1 拟建核医学科场所自行检测点位图

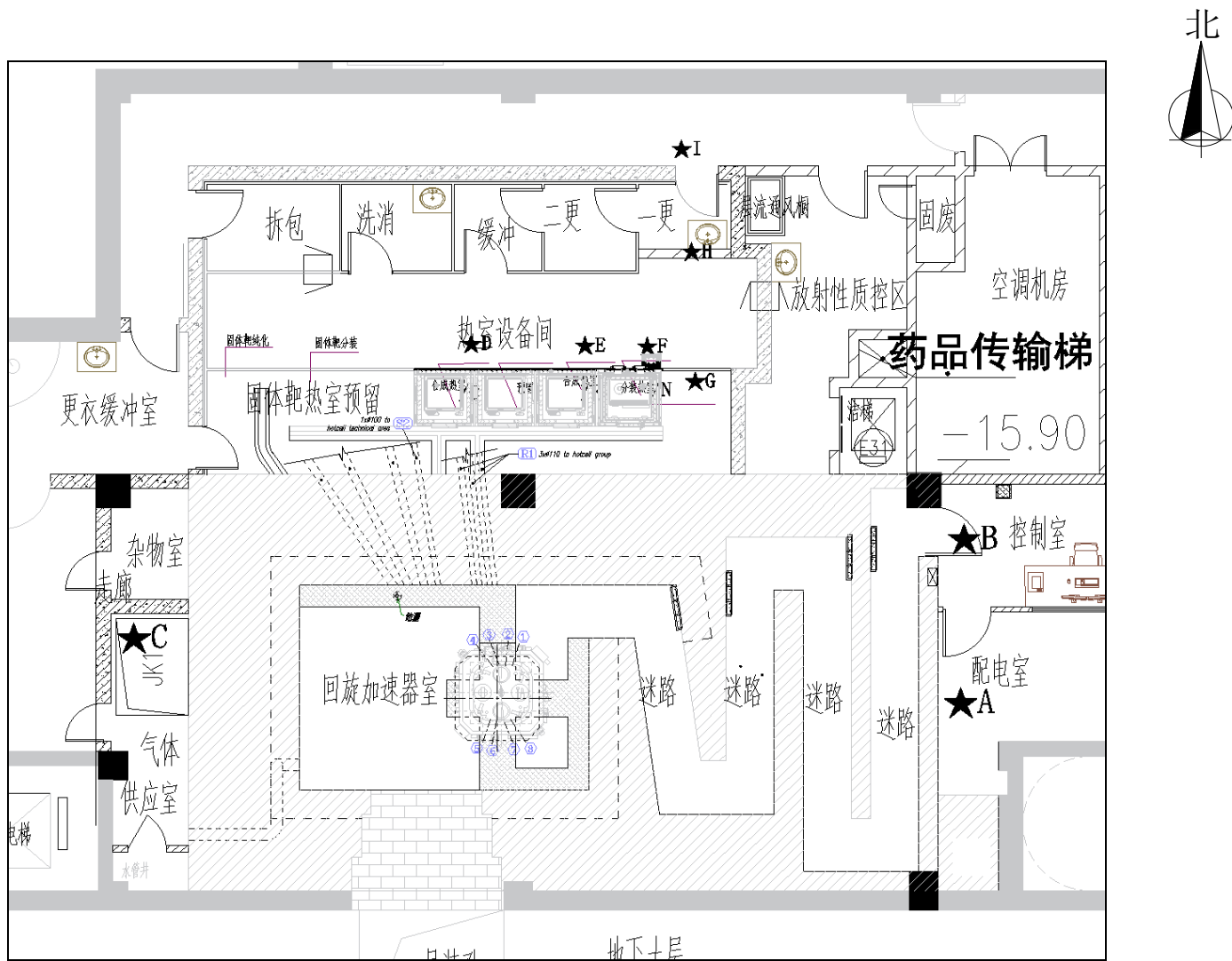


图 12-2 拟建回旋制药场所自行检测点位图

表 13 结论与建议

13.1 结论

13.1.1 项目概况

北京清华长庚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[O0116]），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，二期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等。

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，不仅可以满足患者日益增长的就诊需求，有效填补昌平区目前医疗资源缺口，提高全区整体医疗服务能力和技术水平；不仅可以健全昌平区的基本医疗服务体系，同时作为优质医疗资源，又可通过医疗联合体、技术支持、业务指导等模式发挥带动和辐射作用，全面提升京北地区的医疗服务能力和技术水平，为京北地区提供可靠的医疗保障，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

北京清华长庚医院本项目位于 2 期医疗楼南侧的地下一层和地下三层内（该区域只有地下 3 层建筑物，无地面诊疗建筑物），周围 50m 区域除了东侧和南侧部分为院外马路区域外，其它都是医院内部，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。

本项目正电子核素药物制备区位于地下三层，核医学科诊断区和治疗区位于地下一层，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，热室设备间模块箱均采用铅屏蔽；核医学门诊 PET/CT 室、PET/MR 室、SPECT 室、注射后候诊室、高活室、源库、废物间、运动负荷室、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；核医学科诊断区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手套箱，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 114.7m³、488.5m³）收集贮存核医学科诊断区、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、核医学科诊断区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《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的规定对照检查，满足要求。

13.1.5 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，本项目运行后，预计工作人员和公众的年受照剂量低于本项目设定的年剂量约束值 5mSv/a 和 $100\mu\text{Sv/a}$ 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 1600kg (包含手套箱过滤器等)。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；对于回旋加速器废旧靶膜、真空膜、碳膜、离子源等高活性固废统一收集到铅放射性废物桶，最后委托有放射性固废处理资质的单位处理。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、人员培训考核计划、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，北京清华长庚医院二期新建核医学科项目，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

为了保护环境，保障人员健康，北京清华长庚医院承诺：

（1）项目批复许可后，启用前须办理相关辐射安全许可和 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。

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

（4）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。

（5）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：

公 章

经办人

年 月 日

审批意见：

公 章

经办人

年 月 日

