2023-F-059

核技术利用建设项目

核工业总医院

扩建放射诊疗项目环境影响报告表

核工业总医院

2023 年 11 月

生态环境部监制

核技术利用建设项目

核工业总医院

扩建放射诊疗项目环境影响报告表

建设单位名称：核工业总医院

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：江苏省苏州市姑苏区三香路 1055 号

邮政编码：　　联系人：

电子邮箱：　　联系电话：

目录

表 1 项目基本情况 1
表 2 放射源 9
表 3 非密封放射性物质 9
表 4 射线装置 11
表 5 废弃物（重点是放射性废弃物） 13
表 6 评价依据 15
表 7 保护目标与评价标准 18
表 8 环境质量和辐射现状 35
表 9 项目工程分析与源项 40
表 10 辐射安全与防护 78
表 11 环境影响分析 100
表 12 辐射安全管理 156
表 13 结论与建议 161
附表：本项目“三同时”措施一览表 167
表 14 审批 171

表 1 项目基本情况

<table>
<tr><td colspan="2">建设项目名称</td><td colspan="7">扩建放射诊疗项目</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设单位</td><td colspan="7">核工业总医院</td></tr>
<tr><td colspan="2">法人代表</td><td>徐**</td><td>联系人</td><td>黄**</td><td>联系电话</td><td colspan="2">/</td></tr>
<tr><td colspan="2">注册地址</td><td colspan="7">江苏省苏州市姑苏区三香路 1055 号</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目建设地点</td><td colspan="7">苏州市高新区浒墅关镇康复弄 28 号</td></tr>
<tr><td colspan="2">立项审批部门</td><td colspan="3">/</td><td>批准文号</td><td colspan="2">/</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设项目总投资（万元）</td><td>15000</td><td>项目环保投资（万元）</td><td>1620</td><td>投资比例（环保投资/总投资）</td><td>10.8%</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目性质</td><td colspan="3">□新建 □改建 ☑扩建 □其他</td><td>占地面积（m^2）</td><td>/</td></tr>
<tr><td rowspan="9">应用类型</td><td rowspan="2">放射源</td><td>□销售</td><td colspan="5">□I类 □II类 □III类 □IV类 □V类</td></tr>
<tr><td>□使用</td><td colspan="5">□I类（医疗使用） □II类 ☑III类 □IV类 □V类</td></tr>
<tr><td rowspan="3">非密封放射性物质</td><td>☑生产</td><td colspan="5">☑制备 PET 用放射性物质</td></tr>
<tr><td>□销售</td><td colspan="5">/</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="5">☑乙 □丙</td></tr>
<tr><td rowspan="3">射线装置</td><td>□生产</td><td colspan="5">□II类 □III类</td></tr>
<tr><td>□销售</td><td colspan="5">□II类 □III类</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="5">☑II类 ☑III类</td></tr>
<tr><td>其他</td><td colspan="6">/</td></tr>
</table>

项目概述

1 建设单位基本情况、项目建设规模及任务由来

1.1 建设单位基本情况

核工业总医院又名苏州大学附属第二医院，是一所集医疗、教学、科研、预防、核应急等为一体的三级甲等医院，是苏州大学第二临床学院，设有临床医学博士后流动站、临床医学一级学科博士、硕士学位授予点，住院医师规范化培训基地，国家药物临床试验基地。医院现由三香院区和浒关院区组成，共设床位 2000 多张。医院设有临床科室 32 个，医技科室 8 个，职能科室 20 个。

2018 年苏大附二院浒关院区正式运营，为苏州西北部居民提供三级甲等综合医院同质化优质医疗服务。浒关院区一期于 2018 年底建设完成并投入使用，目前医院拟开始浒关院区二期建设，二期总投资 84090 万，主要包括 1 栋住院楼与 1 栋科研教

学楼，新增住院床位 440 张，研究型床位 100 张。二期已履行建设项目（非辐射类）环境影响评价手续并已取得环评批复（见附件 4）。

1.2 项目建设规模及任务由来

本项目位于浒关院区二期，医院计划在浒关院区二期住院楼地下三层新建放疗中心、地下二层新建核医学科、三层新建介入治疗中心，项目具体情况如下：

1.2.1 放疗科项目

根据规划，医院计划在浒关二期住院楼地下三层新建放疗中心，主要包括 5 个加速器机房（1#~5#加速器机房）、 1 个射波刀机房， 2 个 CT 模拟定位机房、1 个 MRI 模拟定位机房及相关配套用房等。医院计划在 5 个加速器机房内各配备一台医用电子直线加速器（型号未定），在射波刀机房内配备一台射波刀（型号未定），用于肿瘤放射治疗；在 2 个 CT 模拟定位机房内各配备一台 CT 模拟定位机（型号未定），用于患者肿瘤位置定位。放疗科拟使用设备情况见下表 1-1。

表 1-1 放疗科拟使用设备情况一览表

序号	射线装置名称及型号	数量	设备参数	类别	场所名称	活动种类	环评情况	许可情况
1	医用直线加速器	1	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	II	浒关院区放疗科 1#加速器机房	使用	新建项目本次环评	未许可
2	医用直线加速器	1	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	II	浒关院区放疗科 2#加速器机房	使用	新建项目本次环评	未许可
3	医用直线加速器	1	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	II	浒关院区放疗科 3#加速器机房	使用	新建项目本次环评	未许可
4	医用直线加速器	1	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	II	浒关院区放疗科 4#加速器机房	使用	新建项目本次环评	未许可
5	医用直线加速器	1	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	II	浒关院区放疗科 5#加速器机房	使用	新建项目本次环评	未许可
6	射波刀	1	X 射线：≤6MV 剂量率：≤10Gy/min	II	浒关院区放疗科射波刀机房	使用	新建项目本次环评	未许可
7	CT 模拟定位机	1	管电压：≤140kV 管电流：≤800mA	III	浒关院区放疗科 1#模拟定位机房	使用	新建项目本次环评	未许可
8	CT 模拟定位机	1	管电压：≤140kV 管电流：≤800mA	III	浒关院区放疗科 2#模拟定位机房	使用	新建项目本次环评	未许可

1.2.2 核医学科项目

（1）回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验

医院在二期住院楼地下二层新建 1 间回旋加速器机房，在该机房内使用制备正电子发射计算机断层显像装置(PET）放射性药物的回旋加速器 1 台。回旋加速器为自屏蔽式设备，型号为 HM-10HC，加速粒子最大能量为 10MeV，最大束流为 100uA。本项目回旋加速器生产的放射性核素包括 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、 ^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga，均用于医院 PET 显像诊断和动物 PET/CT 影像实验，不外销。医院在回旋加速器机房西侧设有合成热室等功能用房，PET 显像用放射性药物的自动合成、分装等操作在该场所内进行，回旋加速器每天最多生产 2 种核素。

医院在二期住院楼地下二层回旋加速器西侧新建 1 间小动物 PET/CT 机房，使用一台 microPET/CT 进行正电子核素药物影像实验。医院给小老鼠注射正电子药物，使用 PET/CT 扫描显像，并对其扫描图像进行研究，不进行动物解剖。使用放射性核素包括 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、 ^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga，每次实验动物最多 10 只，每次使用核素种类最多 1 种。

（2）核素显像诊断

在二期住院楼地下二层新建两座 PET/CT 机房和一座 PET/MRI 机房，计划配备两台 PET/CT 和一台 PET/MRI，使用 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 正电子核素药物进行显像诊断。医院预计 PET 使用 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 核素显像诊断日最大门诊量分别为 40、5、1、1、1、2，年最大门诊量分别为 8000、200、20、10、5、50，单人使用药物活度均为 3.70E+08Bq。

新建两座 SPECT/CT 机房，计划配备两台 SPECT/CT，使用 ^{99m}Tc、^{201}Tl、^{67}Ga、^{123}I 单光子核素药物进行显像诊断。医院预计 SPECT/CT 使用 ^{99m}Tc、^{201}Tl、^{67}Ga、^{123}I 核素显像诊断日最大门诊量分别为 30、1、1、1，年最大门诊量分别为 7000、100、100、100，其中单人使用 ^{99m}Tc 活度为 9.25E+08Bq，其它核素单人使用药物活度均为 3.70E+08Bq。

（3）核素治疗项目

核素治疗项目位于浒关院区二期住院楼地下二层，使用核素主要包括 ^{131}I 、^{177}Lu、^{89}Sr、^{223}Ra、^{188}Re、^{153}Sm 和 ^{90}Sr （^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器）。核素治疗场所新建 10 间房间，其中最北侧为 ^{177}Lu 专用病房，5 间为 ^{131}I 核素治疗病房，4 间为预留用房，每个病房设置一张病床；为了使甲癌病房与非甲癌病房隔开，在进入甲癌病房区域的走廊上设置有门禁。核素治疗场所中 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{188}Re、^{153}Sm 门诊量较少，

医院根据病人数量进行预约治疗，治疗时间在周六开展；于每周一开展甲癌、甲亢和 ^{177}Lu 核素治疗。

^{131}I 用于甲癌及甲亢治疗。每次最多预约 5 名甲癌患者，单人服药活度平均为 5.55E+09Bq（150mCi）；每次最多预约 10 名甲亢患者，单人服药活度不超过 3.70E+08Bq（10mCi）。

^{89}Sr、^{188}Re、^{153}Sm、^{223}Ra 均用于骨转移治疗。医院预计每名患者所使用 ^{89}Sr 的活度约为 1.85E+08Bq（5mCi）左右，年门诊量约为 72 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 3 次，每次约诊 2 人。医院预计每名患者所使用 ^{153}Sm 的活度约为 1.85E+08Bq（5mCi）左右，年门诊量约为 72 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 3 次，每次约诊 2 人。医院预计每名患者所使用 ^{188}Re 的活度约为 9.25E+08Bq（25mCi）左右，年门诊量约为 12 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 1 次，每次约诊 1 人。

医院预计每名患者所使用 ^{223}Ra 的活度约为 5.55E+06Bq（0.15mCi）左右，年门诊量约为 36 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 3 次，每次约诊 1 人。

^{177}Lu 用于前列腺癌治疗。医院预计每名患者所使用 ^{177}Lu 的活度约为 7.4E+09Bq（200mCi）左右，年门诊量约为 50 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每周开展治疗 1 次，每次约诊 1 人。

^{90}Sr （^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器）用于敷贴治疗。本项目敷贴器活度约为 9.25E+08Bq（25mCi）的密封面源，属于V类密封源。不使用时贮存在敷贴室一角的贮源保险箱柜内。医院根据患者情况，确定治疗剂量后，病人在负二层专用的敷贴治疗室内接受敷贴治疗，医生手持 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器，将敷贴器持续的放在病人病灶部位，一次或分次完成疗程总剂量。治疗完毕后病人即可离院，年门诊约为 200 人。

根据核医学科布局平面布置（见附图 13）可知，该核医学科的核素显像诊断工作场所、核素治疗工作场所和回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所相对分开布置。诊断区域设置了注射前候诊室、高活室、控制室、机房、注射后候诊室、留观室等功能用房，核素治疗区域设置了给药室、高活室、病房、被服室等功能用房，且两个区域都设置了清洁用品间、设有淋浴和检测功能的卫生通过

间、抢救室、放射性废物储存间等辅助用房。回旋加速器生产正电子药物及动物PET/CT 影像实验场所包括回旋加速器机房、控制室、热室、质控室、小动物PET/CT 机房等。这三大区域有各自独立的出入口，且与其它功能用房之间有明显物理隔断，可划分明确的监督区和控制区范围，且设计有独立辐射防护措施，因此根据《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)的有关规定，本项目核医学科工作场所可分为 3 个独立场所。

医院正电子药物由核医学科提前根据就诊病人预约情况确定药物使用量，使用回旋加速器进行生产，当回旋加速器出现故障时，向正规供应商购买药物；SPECT/CT 项目使用的单光子核素药物均向正规供应商购买；核素治疗使用的核素药物均向正规供应商购买。核医学科非密封核素使用情况见下表 1-2。

表 1-2 核医学科非密封核素使用情况一览表

场所	核素	日最大使用活度（Bq）	活动种类	操作方式修正因子①	毒性修正因子②	日等效最大操作量（Bq)
回旋加速器生产正电子药物场所③	^{18}F	3.22E+10	生产	1	0.01	3.22E+08
	^{11}C	1.47E+10	生产	1	0.01	1.47E+08
	^{13}N	1.22E+09	生产	1	0.01	1.22E+07
	^{89}Zr	8.33E+08	生产	1	0.1	8.33E+07
	^{64}Cu	7.99E+08	生产	1	0.01	7.99E+06
	^{68}Ga	3.66E+09	生产	1	0.01	3.66E+07
动物PET/CT影像实验场所	^{18}F	3.70E+07	使用	10	0.01	3.70E+04
	^{11}C	3.70E+07	使用	10	0.01	3.70E+04
	^{13}N	3.70E+07	使用	10	0.01	3.70E+04
	^{89}Zr	3.70E+07	使用	10	0.1	3.70E+05
	^{64}Cu	3.70E+07	使用	10	0.01	3.70E+04
	^{68}Ga	3.70E+07	使用	10	0.01	3.70E+04
核素显像诊断场所④	^{18}F	1.48E+10	使用	10	0.01	1.48E+07
	^{11}C	1.85E+09	使用	10	0.01	1.85E+06
	^{13}N	3.70E+08	使用	10	0.01	3.70E+05
	^{89}Zr	3.70E+08	使用	10	0.1	3.70E+06
	^{64}Cu	3.70E+08	使用	10	0.01	3.70E+05

	^{68}Ga	7.40E+08	使用	10	0.01	7.40E+05
	^{99m}Tc	2.78E+10	使用	10	0.01	2.78E+07
	^{67}Ga	3.70E+08	使用	10	0.1	3.70E+06
	^{201}Tl	3.70E+08	使用	10	0.01	3.70E+05
	^{123}I	3.70E+08	使用	10	0.01	3.70E+05
核素治疗场所⑤	^{131}I（甲癌）	2.78E+10	使用	1	0.1	2.78E+09
	^{131}I（甲亢）	3.70E+09	使用	1	0.1	3.70E+08
	^{89}Sr	3.70E+08	使用	1	0.1	3.70E+07
	^{153}Sm	3.70E+08	使用	1	0.1	3.70E+07
	^{188}Re	9.25E+08	使用	1	0.1	9.25E+07
	^{177}Lu	7.40E+09	使用	1	0.1	7.40E+08
	^{223}Ra	5.55E+06	使用	1	10	5.55E+07

注：

① ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{68}Ga 药物生产操作方式均为简单操作，修正因子为 1；动物 PET/CT 影像实验和 PET 核素显像诊断操作方式均为很简单操作，修正因子为 10；核素治疗场所操作方式均为简单操作，修正因子为 1。

② ^{89}Zr、^{67}Ga、^{131}I、^{89}Sr、^{153}Sm、^{188}Re、^{177}Lu 毒性均为中毒，毒性修正因子为 0.1，^{223}Ra 毒性均为极毒，毒性修正因子为 10，其它核素毒性均为低毒，毒性修正因子均为 0.01。

③ 根据核医学设计布局，回旋加速器生产场所和动物 PET/CT 影像实验场所作为一个场所，该场所一天最多生产 2 种核素，其中 ^{18}F 和 ^{11}C 日等效最大操作量最大，因此回旋加速器生产电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所日等效最大操作量为 4.69E+08Bq，为乙级非密封放射性物质工作场所。

④ 核素显像诊断中 SPECT/CT 项目每天最多同时使用 4 种核素，根据上表可知其日等效最大操作量合计为 3.22E+07Bq；PET 项目每天最多使用 2 种核素，其中 ^{18}F 和 ^{11}C 日等效最大操作量最大，根据上表可知合计为 1.67E+07Bq；因此核素显像诊断场所日等效最大操作量为 4.89E+07Bq（3.22E+07+1.67E+07=4.89 E+07），为乙级非密封放射性物质工作场所。

⑤ 医院核素治疗场所中 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{188}Re、^{153}Sm 门诊量较少，医院根据病人数量进行预约治疗，治疗时间在周六开展；于每周一开展甲癌、甲亢和 ^{177}Lu 核素治疗。因此核素治疗场所日等效最大操作量为甲癌、甲亢和 ^{177}Lu 核素治疗三者相加，根据上表可知三者日等效最大操作量分别为 2.78E+09Bq、3.70E+08Bq 和 7.40E+08Bq，合计为 3.89E+09Bq，为乙级非密封放射性物质工作场所。

根据上表可知，核医学科中回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验、核素显像诊断场所、核素治疗场所均为乙级非密封放射性物质工作场所。

1.2.3 DSA 项目

医院在二期住院楼三层介入科内新建四间 DSA 手术室，医院计划配备 4 台 DSA（型号未定），用于介入治疗和诊断。DSA 项目基本情况一览表见下表 1-3：

表 1-3 DSA 项目基本情况一览表

序号	射线装置名称及型号	数量	管电压（kV）	管电流（mA）	类别	场所名称	活动种类	环评情况	许可情况
1	DSA	1	≤125	≤1000	II	浒关院区二期住院楼 1#DSA 手术室	使用	新建项目本次环评	未许可
2	DSA	1	≤125	≤1000	II	浒关院区二期住院楼 2#DSA 手术室	使用	新建项目本次环评	未许可
3	DSA	1	≤125	≤1000	II	浒关院区二期住院楼 3#DSA 手术室	使用	新建项目本次环评	未许可
4	DSA	1	≤125	≤1000	II	浒关院区二期住院楼 4#DSA 手术室	使用	新建项目本次环评	未许可

根据《中华人民共和国环境影响评价法》、《中华人民共和国放射性污染防治法》、《建设项目环境保护管理条例》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》、《建设项目环境影响评价分类管理名录》等法律法规的规定，本项目涉及使用II类射线装置及乙级非密封放射性物质工作场所应编制核技术利用项目环境影响评价报告表。受核工业总医院委托，江苏玖清玖蓝环保科技有限公司承担该项目的环境影响评价工作。我公司通过资料调研、现场监测、评价分析，编制该项目环境影响报告表。

2 项目周边保护目标及项目选址情况

本项目位于核工业总医院浒关院区二期内，浒关院区位于高新区浒墅关镇康复弄 28 号，地理位置见附图 1。浒关院区东侧为浒墅关工商分局和浒墅关路，南侧为兴贤路，西侧为明光路；北侧为南津路。浒关院区平面布局及周围环境见附图 2。

2.1 放疗科项目

放疗科位于浒关院区二期住院楼地下三层东南侧，放疗科主要包括 5 个加速器机房、1 个射波刀机房，2 个 CT 模拟定位机房，各机房控制室、水冷机房、物理室、计划室、仪器室等辅助用房，以及医生办公室、更衣室等。放疗科东侧和南侧为土层，西侧为停车场，北侧为库房，楼上为核医学科，楼下为土层。放疗科场址不邻接产科、儿科、食堂等部门。地下三层、二层平面布局分别见附图 4 和附图 5，放疗科平面布局见附图 10。

2.2 核医学科项目

核医学工作场所位于浒关院区二期住院楼地下二层东南侧，二期住院楼地下三层、二层和一层见附图 4~附图 6，核医学科平面布局图见附图 13。核医学科包括回

旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所、核素治疗场所、核素显像诊断场所。核医学场所东侧和南侧为土层，西侧和北侧为停车场，楼上为卸货区、气动物流机房、送风机房等场所，楼下为放疗科。核医学科场址不邻接产科、儿科、食堂等部门，集中设置在地下二层东南侧，核医学科诊疗后患者专用电梯设置在一层东北角， 出口即为外部广场，不与门诊大厅相通，未邻接人群稠密区域。

2.3 DSA 项目

DSA 项目位于浒关院区二期住院楼三层介入治疗中心。工作场所主要由 DSA 手术室、控制廊、设备间、无菌间、敷料间、铅衣间、患者/污物走廊、污洗间、更衣淋浴间等组成。介入治疗中心东侧为存储机房、配血实验室及功能房间、外空间等，南侧为住院电梯、卫生间、外空间等，西侧为介入手术中心相关功能房间、外空间等，北侧为外空间，楼下为睡眠中心治疗区域，楼上为康复科治疗区域。浒关院区二期住院楼二层、三层和四层平面布局分别见附图 7、附图 8 和附图 9。

根据本项目特点，结合《辐射环境保护管理导则-核技术利用项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）的相关规定，确定以本项目拟建址周围 50m 的范围作为评价范围。根据现场调查分析及附图 2 可知，本项目拟建址周围 50m 评价范围周围无学校、居民区等环境敏感点。综上所述，本项目保护目标主要为辐射工作人员、评价范围内院内医护人员、患者、患者家属及南侧电机房值班人员等。

3 建设单位已有核技术利用项目许可情况

核工业总医院目前已取得辐射安全许可证编号为苏环辐证[00333]，见附件 5，许可种类和范围为：使用III类、V类放射源；使用II类、III类射线装置；乙级、丙级非密封放射性物质工作场所，有效期至 2027 年 12 月 25 日。医院现有许可的核技术应用项目均已履行了环保手续。

4 实践正当性分析

本项目的建设可更好地满足患者多层次、多方位、高质量和便利的放射治疗和诊断需求，提高患者治疗能力。本项目的开展可达到一般非放射性治疗和诊断方法所不能及的治疗效果，对保障人民群众身体健康、拯救生命起了十分重要的作用。医院通过采取相应的辐射防护措施和管理措施，产生的辐射影响很小。因此，本项目所带来的利益是大于付出的代价的，符合辐射防护“实践的正当性”原则。

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	^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器	9.25E+08×1	V	使用	治疗	浒关院区核医学科	敷贴治疗室	新增
/	/	/	/	/	/	/	/	/

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

表 3 非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量（Bq）	日等效最大操作量（Bq）	年最大用量（Bq）	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
1	^{18}F	液态/低毒	生产	3.22E+10	3.22E+08	6.44E+12	科研实验和放射诊断	简单操作	回旋加速器生产正电子药物场所	药物当天使用，多余药物暂存在合成柜内
2	^{11}C	液态/低毒	生产	1.47E+10	1.47E+08	7.33E+11		简单操作		
3	^{13}N	液态/低毒	生产	1.22E+09	1.22E+07	6.11E+10		简单操作		
4	^{89}Zr	液态/中毒	生产	8.33E+08	8.33E+07	8.33E+09		简单操作		
5	^{64}Cu	液态/低毒	生产	7.99E+08	7.99E+06	4.00E+09		简单操作		
6	^{68}Ga	液态/低毒	生产	3.66E+09	3.66E+07	1.83E+11		简单操作		
7	^{18}F	液态/低毒	使用	3.70E+07	3.70E+04	7.40E+08	科研实验	很简单操作	动物 PET/CT 影像实验场所	通风橱
8	^{11}C	液态/低毒	使用	3.70E+07	3.70E+04	3.70E+08		很简单操作		
9	^{13}N	液态/低毒	使用	3.70E+07	3.70E+04	1.85E+08		很简单操作		
10	^{89}Zr	液态/中毒	使用	3.70E+07	3.70E+05	1.85E+08		很简单操作		
11	^{64}Cu	液态/低毒	使用	3.70E+07	3.70E+04	1.85E+08		很简单操作		

12	^{68}Ga	液态/低毒	使用	3.70E+07	3.70E+04	1.85E+08		很简单操作		
13	^{18}F	液态/低毒	使用	1.48E+10	1.48E+07	2.96E+12	放射诊断	很简单操作	核素显像诊断场所	通风橱
14	^{11}C	液态/低毒	使用	1.85E+09	1.85E+06	7.40E+10		很简单操作		
15	^{13}N	液态/低毒	使用	3.70E+08	3.70E+05	7.40E+09		很简单操作		
16	^{89}Zr	液态/中毒	使用	3.70E+08	3.70E+06	3.70E+09		很简单操作		
17	^{64}Cu	液态/低毒	使用	3.70E+08	3.70E+05	1.85E+09		很简单操作		
18	^{68}Ga	液态/低毒	使用	7.40E+08	7.40E+05	1.85E+10		很简单操作		
19	^{99m}Tc	液态/低毒	使用	2.78E+10	2.78E+07	6.48E+12		很简单操作		
20	^{67}Ga	液态/中毒	使用	3.70E+08	3.70E+06	3.70E+10		很简单操作		
21	^{201}Tl	液态/低毒	使用	3.70E+08	3.70E+05	3.70E+10		很简单操作		
22	^{123}I	液态/低毒	使用	3.70E+08	3.70E+05	3.70E+10		很简单操作		
23	^{131}I（甲癌）	液态/中毒	使用	2.78E+10	2.78E+09	1.39E+12	放射治疗	简单操作	核素治疗场所	通风橱
24	^{131}I（甲亢）	液态/中毒	使用	3.70E+09	3.70E+08	1.85E+11		简单操作		
25	^{89}Sr	液态/中毒	使用	3.70E+08	3.70E+07	1.33E+10		简单操作		
26	^{153}Sm	液态/中毒	使用	3.70E+08	3.70E+07	1.33E+10		简单操作		
27	^{188}Re	液态/中毒	使用	9.25E+08	9.25E+07	1.11E+10		简单操作		
28	^{177}Lu	液态/中毒	使用	7.40E+09	7.40E+08	3.70E+11		简单操作		
29	^{223}Ra	液态/极毒	使用	5.55E+06	5.55E+07	2.00E+08		简单操作		

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

表 4 射线装置

（一）加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各类型加速器

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	医用直线加速器	II	1	待定	电子	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	X 射线：≤1400cGy/min 电子线：≤2400cGy/min	放射肿瘤治疗	浒关院区放疗科 1#加速器机房	新增
2	医用直线加速器	II	1	待定	电子	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	X 射线：≤1400cGy/min 电子线：≤2400cGy/min	放射肿瘤治疗	浒关院区放疗科 2#加速器机房	新增
3	医用直线加速器	II	1	待定	电子	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	X 射线：≤1400cGy/min 电子线：≤2400cGy/min	放射肿瘤治疗	浒关院区放疗科 3#加速器机房	新增
4	医用直线加速器	II	1	待定	电子	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	X 射线：≤1400cGy/min 电子线：≤2400cGy/min	放射肿瘤治疗	浒关院区放疗科 4#加速器机房	新增
5	医用直线加速器	II	1	待定	电子	X 射线：≤15MV 电子线：≤22MeV	X 射线：≤1400cGy/min 电子线：≤2400cGy/min	放射肿瘤治疗	浒关院区放疗科 5#加速器机房	新增
6	射波刀	II	1	待定	电子	X 射线：≤6MV	X 射线：≤10Gy/min	放射肿瘤治疗	浒关院区放疗科射波刀机房	新增
7	回旋加速器	II	1	HM-10HC	束流粒子：质子；最大质子速流能量：10MeV；质子束流强度：100μA			正电子药物生产	浒关院区回旋加速器机房	新增

（二）X 射线机：包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压（kV）	最大管电流（mA）	用途	工作场所	备注
1	DSA	II	1	待定	≤125	≤1000	放射诊断与介入治疗	浒关院区二期住院楼 1#DSA 手术室	新增
2	DSA	II	1	待定	≤125	≤1000	放射诊断与介入治疗	浒关院区二期住院楼 2#DSA 手术室	新增

3	DSA	II	1	待定	≤125	≤1000	放射诊断与介入治疗	浒关院区二期住院楼 3#DSA 手术室	新增
4	DSA	II	1	待定	≤125	≤1000	放射诊断与介入治疗	浒关院区二期住院楼 4#DSA 手术室	新增
5	PET/CT	III	1	待定	≤140	≤800	放射诊断	浒关院区核医学科 1#PET/CT 机房	新增
6	PET/CT	III	1	待定	≤140	≤800	放射诊断	浒关院区核医学科 2#PET/CT 机房	新增
7	SPECT/CT	III	1	待定	≤140	≤800	放射诊断	浒关院区核医学科 1#SPECT/CT 机房	新增
8	SPECT/CT	III	1	待定	≤140	≤800	放射诊断	浒关院区核医学科 2#SPECT/CT 机房	新增
9	CT	III	1	待定	≤140	≤800	放射诊断	浒关院区放疗科 1#模拟定位机房	新增
10	CT	III	1	待定	≤140	≤800	放射诊断	浒关院区放疗科 2#模拟定位机房	新增
11	microPET/CT	III	1	待定	≤90	≤1	科研	浒关院区核医学科 microPET/CT 机房	新增

（三）中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压（kV）	最大靶电流（μA）	中子强度（n/s）	用途	工作场所	氚靶情况			备注
										活度（Bq）	贮存方式	数量	
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

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	年排放量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
核素显像诊断、回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所废水	液态	^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{67}Ga、^{201}Tl、^{123}I	/	/	约 234.5m^3	总 α＜1Bq/L 总 β<10Bq/L	由专用管道统一排入 B 衰变池	暂存于 B 衰变池内 33 天，经监测达到排放标准后排入医院污水处理系统
核素治疗场所废水	液态	^{131}I、^{177}Lu	/	/	约 185m^3	总 α＜1Bq/L 总 β<10Bq/L	由专用管道统一排入 A 衰变池	暂存于 A 衰变池内 180 天，经监测达到排放标准后排入医院污水处理系统
注射器、一次性手套、棉签、滤纸、动物排泄物的收集袋、体内带有放射性核素的动物尸体等	固态	^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{67}Ga、^{201}Tl、^{123}I	/	/	约 175kg	/	分类收集于各场所的放射性废物桶内，送至放射性固体废物间暂存	暂存于固体废物间内不少于 33 天，经监测满足清洁解控要求后，作为医疗废物处理
服药杯、擦拭纸、注射器等	固态	^{131}I、^{177}Lu 等	/	/	约 50kg	/	收集于各场所的放射性废物桶内，送至甲癌治疗中心放射性固体废物间暂存	暂存于固体废物间内不少于 180 天，经监测满足清洁解控要求后，作为医疗废物处理。
废活性炭	固态	主要为 ^{131}I	/	/	约 50kg	/	更换的废活性炭作为放射性固体废物处理，送至甲癌治疗中心放射性固体废物间暂存。	暂存于固体废物间内不少于 180 天，经监测满足清洁解控要求后，作为医疗废物处理。

放射性药物操作时挥发的微量气溶胶	气体	^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{131}I 等	/	/	微量	/	不暂存	通过通风橱排放至室外，经通风橱管道内及屋顶排放口活性炭装置过滤后排放
废弃 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器	固态	^{90}Sr、^{90}Y		/	/	/	暂存在敷贴治疗室内	由原生产厂家回收处理
退役废靶	固态	/	/	/	/	/	暂存于铅罐中	委托有放射性固废处理资质的单位处理
臭氧、氮氧化物	气态	/	/	/	少量	/	不暂存	直接排入大气，臭氧的有效化学分解时间约为 50 分钟
医用器具、纱布手套等医疗废物	固态	/	/	/	/	/	放于污物暂存室	由医院统一作为医疗废物处理

注：1.常规废弃物排放浓度，对于液态单位为 mg/l，固体为 mg/kg，气态为 mg/m^3,年排放总量用 kg。

2.含有放射性的废弃物要注明，其排放浓度用比活度(Bq/l，或 Bq/kg，或 Bq/m^3)，年排放总量分别用 Bq 和 kg。

表 6 评价依据

法规文件	（1）《中华人民共和国环境保护法》（修订版），国家主席令第 9 号，2015 年 1 月 1 日施行 （2）《中华人民共和国环境影响评价法》（2018 修正版），中华人民共和国主席令第 24 号，2018 年 12 月 29 日修订，2018 年 12 月 29 起施行 （3）《中华人民共和国放射性污染防治法》，国家主席令第 6 号，2003 年 10 月 1 日起施行 （4）《建设项目环境保护管理条例》（2017 年修正版），国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日发布施行 （5）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2019 年修正版），国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日公布施行 （6）《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021 年版），生态环境部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日实施 （7）《关于发布放射性废物分类的公告》，环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局公告 2017 年第 65 号，2018 年 1 月 1 日起施行 （8）《关于发布放射源分类办法的公告》，国家环境保护总局公告 2005 年第 62 号，2005 年 12 月 23 日起施行 （9）《关于发布射线装置分类的公告》，原环境保护部、国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年 第 66 号，2017 年 12 月 5 日起施行 （10）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2021 年修正版），生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日施行 （11）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，环保部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日起施行 （12）《放射性废物安全管理条例》国务院令第 612 号，2012 年 3 月 1 日起施行 （13）《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》国家环保总局，环发[2006]145 号，2006 年 9 月 26 日起施行 （14）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》生态环境部部令第 9 号，2019 年 11 月 1 日起施行

	（15）《关于发布<建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法>配套文件的公告》生态环境部公告 2019 年第 38 号，2019 年 11 月 1 日起施行 （16）《关于启用环境影响评价信用平台的公告》生态环境部公告第 39 号，2019 年 10 月 25 日印发 （17）《江苏省辐射污染防治条例》（2018 年修正版），江苏省第十三届人民代表大会常委会公告第 2 号，2018 年 5 月 1 日起施行 （18）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》生态环境部公告 2019 年第 57 号，2020 年 1 月 1 日起施行 （19）《江苏省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》，苏政发〔2018〕74 号，2018 年 6 月 9 日 （20）《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》，苏政发〔2020〕1 号，2020 年 1 月 8 日 （21）《省政府关于印发江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知》，苏政发〔2020〕49 号，2020 年 6 月 21 日 （22）《省生态环境厅关于进一步做好建设项目环境影响报告书（表）编制单位监管工作的通知》，苏环办〔2021〕187 号，2021 年 11 月 9 日
技术标准	（1）《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016） （2）《辐射环境保护管理导则-核技术利用项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016） （3）《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021） （4）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021） （5）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021） （6）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002） （7）《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020） （8）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010） （9）《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020） （10）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007） （11）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗

	机房》（GBZ/T201.2-2011） （12）《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020） （13）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021） （14）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 3 部分：γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T201.3-2014）
其它	**与本项目相关附件：** （1）项目委托书（附件 1） （2）射线装置、放射源、非密封放射性核素使用承诺书（附件 2） （3）放射源退役承处置诺书（附件 3） （4）二期建设项目（非辐射类）环评批复（附件 4） （5）辐射安全许可证（附件 5） （6）辐射环境现状检测报告（附件 6） （7）核医学工作人员情况说明（附件 7）

表 7 保护目标与评价标准

评价范围

本项目核医学场所为乙级非密封放射性物质工作场所，加速器、射波刀和 DSA 属于II类射线装置，根据《辐射环境保护管理导则-核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）中 1.5 的规定，本项目评价范围确定为核医学科乙级工作场所取其半径 50m 的范围，加速器机房、射波刀机房及 DSA 机房取其机房边界外 50m 的范围。评价范围见附图 2，项目所在楼层及上下楼层间附图 4~附图 9。

环境保护目标

本项目位于核工业总医院浒关院区二期，二期为医院内预留区域，不涉及自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74 号）及《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》（苏政发〔2020〕1 号），本项目评价范围不涉及行江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域（详见附图 3）。本项目使用为医用核技术利用项目，不会降低管控区的水、气、土壤的环境功能类别和环境质量，符合“三线一单”相关要求。

本项目中的放疗科和核医学科分别位于浒关院区二期住院楼地下三层和地下二层，其所在场所位于地下，因此保护目标主要为本项目工作人员、住院楼内医护人员、患者及患者家属。介入治疗中心位于浒关院区二期住院楼三层，DSA 手术室周围均介入治疗中心相关配套功能房间，楼下为睡眠中心治疗区域，楼上为康复科治疗区域。因此保护目标主要为本项目工作人员、住院楼内医护人员、患者及患者家属、南侧电机房值班人员等。本项目评价范围内环境保护目标详细情况见表 7-1。

表 7-1 本项目评价范围内保护目标情况一览表

项目	保护目标名称	方位	最近距离	规模
回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验项目	辐射工作人员	工作场所内	紧邻	3~5 人
	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
	住院楼内患者及家属	四周、上方和下方	约 5m	流动人群
	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
核素显像诊断项目	辐射工作人员	工作场所内	紧邻	15~20 人
	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
	住院楼内患者及家属	四周、上方和下方	约 5m	流动人群
	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
核素治疗项	辐射工作人员	工作场所内	紧邻	15~20 人

目	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
	住院楼内患者及家属	四周、上方和下方	约 5m	流动人群
	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
放疗科项目	辐射工作人员	工作场所内	紧邻	20~25 人
	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
	住院楼内患者及家属	四周、上方和下方	约 5m	流动人群
DSA 项目	辐射工作人员	工作场所内	紧邻	20~25 人
	住院楼内医护人员	四周、上方和下方	约 5m	150~200 人
	住院楼内患者及家属	四周、上方和下方	约 5m	流动人群
	电机机房值班人员	南侧	约 40m	约 5 人

评价标准

1《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）

表 7-2 工作人员职业照射和公众照射剂量限值

	剂量限值
职业照射剂量限值	工作人员所接受的职业照射水平不应超过下述限值： ①由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv； ②任何一年中的有效剂量，50mSv。
公众照射剂量限值	实践使公众有关关键人群组的成员所受的平均剂量估计值不应超过下述限值： ①年有效剂量，1mSv； ②特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

11.4.3.2剂量约束值通常在公众照射剂量限值10%~30%（即0.1mSv/a~0.3mSv/a）的范围之内。但剂量约束的使用不应取代最优化要求，剂量约束值只能作为最优化值的上限（见4.3.4）。

表7-3 表面污染控制水平（单位 Bq/cm^2）

表面类型		α 放射性物质		β 放射性物质
		极毒性	其他	
工作台、设备、墙壁、地面	控制区 1)	4	4×10	4×10
	监督区	4×10^{-1}	4	4
工作服 手套、工作鞋	控制区、监督区	4×10^{-1}	4×10^{-1}	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-2}	4×10^{-2}	4×10^{-1}
1）该区内的高污染子区除外。				

表 7-4 非密封源工作场所的分级

级别	日等效最大操作量/Bq
甲	>4E+09
乙	2E+7~4E+09
丙	豁免活度值以上~2E+7

表 7-5 放射性核素毒性组别修正因子

毒性组别	核素名称	毒性组别修正因子
中毒	^{67}Ga、^{131}I、^{89}Sr、^{153}Sm、^{188}R、^{177}Lu、^{89}Zr	0.1
低毒	^{18}F、^{99m}Tc、^{201}Tl 、^{123}I、^{11}C、^{13}N、^{68}Ga、^{64}Cu	0.01
极毒	^{223}Ra	10

8.5 放射性废物管理

8.5.1 注册者和许可证持有者应确保在现实可行的条件下，使其所负责实践和源所产生的放射性废物的活度与体积达到并保持最小。

8.5.2 注册者和许可证持有者应按照本标准和国家其他有关法规与标准的要求，对其所负责实践和源所产生的放射性废物实施良好的管理，进行分类收集、处理、整备、运输、贮存和处置，确保：

a）使放射性废物对工作人员与公众的健康及环境可能造成的危害降低到可以接受的水平；

b）使放射性废物对后代健康的预计影响不大于当前可以接受的水平；

c）不给后代增加不适当的负担。

8.5.3 注册者和许可证持有者进行放射性废物管理时，应充分考虑废物的产生与管理各步骤之间的相互关系，并应根据所产生废物中放射性核素的种类、含量、半衰期、浓度以及废物的体积和其他物理与化学性质的差别，对不同类型的放射性废物进行分类收集和分别处理，以利于废物管理的优化。

8.6 放射性物质向环境排放的控制

8.6.1 注册者和许可证持有者应保证，由其获准的实践和源向环境排放放射性物质时符合下列所有条件，并已获得审管部门的批准：

a）排放不超过审管部门认可的排放限值，包括排放总量限值和浓度限值；

b）有适当的流量和浓度监控设备，排放是受控的；

c）含放射性物质的废液是采用槽式排放的；

d）排放所致的公众照射符合本标准附录 B（标准的附录）所规定的剂量限制要求；

e）已按本标准的有关要求使排放的控制最优化。

8.6.2 不得将放射性废液排入普通下水道，除非经审管部门确认是满足下列条件的低放废液，方可直接排入流量大于 10 倍排放注量的普通下水道，并应对每次排放作好记录：

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

b）每一次排放的活度不超过 1ALImin，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

2《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）

5.3.1 辐射工作人员应熟练掌握安全与防护技能，取得相应资质。

5.3.2 辐射工作人员应根据实际需要配备适用、足够和符合标准的个人防护用具（器械、衣

具），并掌握其性能和使用方法。个人防护用具应有备份，均应妥善保管，并应对其性能进行检验。

5.3.3 辐射工作场所应具备适当的防护手段与安全措施，做好个人防护工作。

5.3.4 在伴有外照射的工作场所，应做好个人外照射防护，包括 β 外照射防护。

5.3.5 在任何情况下均不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物件的 操作。

3《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）

5.1.1 在医疗机构内部区域选择核医学场址，应充分考虑周围场所的安全，不应邻接产科、儿科、食堂等部门，这些部门选址时也应避开核医学场所。尽可能做到相对独立布置或集中设置，宜有单独出、入口，出口不宜设置在门诊大厅、收费处等人群稠密区域。

5.1.2 核医学工作场所平面布局设计应遵循如下原则：

a) 使工作场所的外照射水平和污染发生的概率达到尽可能小；

b) 保持影像设备工作场所内较低辐射水平以避免对影像质量的干扰；

c) 在核医学诊疗工作区域，控制区的入口和出口应设置门锁权限控制和单向门等安全措施，限制患者或受检者的随意流动，保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射；

d) 在分装和给药室的出口处应设计卫生通过间，进行污染检测。

5.1.3 核医学工作场所从功能设置可分为诊断工作场所和治疗工作场所。其功能设置要求如下：

a) 对于单一的诊断工作场所应设置给药前患者或受检者候诊区、放射性药物贮存室、分装给药室（可含质控室）、给药后患者或受检者候诊室(根据放射性核素防护特性分别设置)、质控（样品测量）室、控制室、机房、给药后患者或受检者卫生间和放射性废物储藏室等功能用房；

b) 对于单一的治疗工作场所应设置放射性药物贮存室、分装及药物准备室、给药室、病房（使用非密封源治疗患者）或给药后留观区、给药后患者专用卫生间、值班室和放置急救设施的区域等功能用房；

c) 诊断工作场所和治疗工作场所都需要设置清洁用品储存场所、员工休息室、护士站、更衣室、卫生间、去污淋浴间、抢救室或抢救功能区等辅助用房；

d) 对于综合性的核医学工作场所，部分功能用房和辅助用房可以共同利用；

5.1.4 核医学放射工作场所应划分为控制区和监督区。控制区一般包括使用非密封源核素的房间（放射性药物贮存室、分装及（或）药物准备室、给药室等）、扫描室、给药后候诊室、样品测量室、放射性废物储藏室、病房（使用非密封源治疗患者）、卫生通过间、保洁用品储存场所等。监督区一般包括控制室、员工休息室、更衣室、医务人员卫生间等。应根据 GB 18871 的有关规定，结合核医学科的具体情况，对控制区和监督区采取相应管理措施。

5.1.5 核医学工作场所的布局应有助于开展工作，避免无关人员通过。治疗区域和诊断区域应相对分开布置。根据使用放射性药物的种类、形态、特性和活度，确定核医学治疗区(病房)的位置及其放射防护要求，给药室应靠近病房，尽量减少放射性药物和给药后患者或受检者通过非放

射性区域。

5.1.6 通过设计合适的时间空间交通模式来控制辐射源（放射性药物、放射性废物、给药后患者或受检者）的活动，给药后患者或受检者与注射放射性药物前患者或受检者不交叉，给药后患者或受检者与工作人员不交叉，人员与放射性药物通道不交叉。合理设置放射性物质运输通道，便于放射性药物、放射性废物的运送和处理；便于放射性污染的清理、清洗等工作的开展。

5.1.7 应通过工作场所平面布局的设计和屏蔽手段，避免附近的辐射源（核医学周边场所内的辐射装置、给药后患者或受检者）对诊断区设备成像、功能检测的影响。

5.2 放射防护措施要求

5.2.1 核医学的工作场所应按照非密封源工作场所分级规定进行分级，并采取相应防护措施。

5.2.2 应依据计划操作最大量放射性核素的加权活度对开放性放射性核素工作场所进行分类管理，把工作场所分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类。不同类别核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求见表 1，核医学工作场所分类的加权活度计算方法见附录 G。

5.2.3 核医学工作场所的通风按表 1 要求，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。

5.2.4 分装药物操作宜采用自动分装方式，^{131}I 给药操作宜采用隔室或遥控给药方式。

5.2.5 放射性废液衰变池的设置按环境主管部门规定执行。暴露的污水管道应做好防护设计。

5.2.6 控制区的入口应设置电离辐射警告标志。

5.2.7 核医学场所中相应位置应有明确的患者或受检者导向标识或导向提示。

5.2.9 应为放射性物质内部运输配备有足够屏蔽的储存、转运等容器。容器表面应设置电离辐射标志。

5.2.10 扫描室外防护门上方应设置工作状态指示灯。

5.3 工作场所的防护水平要求

5.3.1 核医学工作场所控制区的用房，应根据使用的核素种类、能量和最大使用量，给予足够的屏蔽防护。在核医学控制区外人员可达处，距屏蔽体外表面 0.3m 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 2.5μSv/h，控制区内屏蔽体外表面 0.3m 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 25μSv/h，宜不大于 2.5μSv/h；核医学工作场所的分装柜或生物安全柜，应采取一定的屏蔽防护，以保证柜体外表面 5cm 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 25μSv/h；同时在该场所及周围的公众和放射工作人员应满足个人剂量限值要求。

8 医用放射性废物的放射防护管理要求

8.1 放射性废物分类，应根据医学实践中产生废物的形态及其中的放射性核素种类、半衰期、活度水平和理化性质等，将放射性废物进行分类收集和分别处理。核医学常用放射性核素的

物理特性参见附录 H。

8.2 设废物储存登记表，记录废物主要特性和处理过程，并存档备案。

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

8.4 开展放射性药物治疗的医疗机构，应为住院治疗患者或受检者提供有防护标志的专用厕所，专用厕所应具备使患者或受检者排泄物迅速全部冲入放射性废液衰变池的条件，而且随时保持便池周围清洁。

8.5 供收集废物的污物桶应具有外防护层和电离辐射警示标志。在注射室、注射后病人候诊室、给药室等位置放置污物桶。

8.6 污物桶内应放置专用塑料袋直接收纳废物，装满后的废物袋应密封，不破漏，及时转送存储室，放入专用容器中存储。

8.7 对注射器和碎玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入利器盒中，然后再装入专用塑料袋内。

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

8.9 储存场所应具有通风设施，出入处设电离辐射警告标志。

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

8.11 废物包装体外表面的污染控制水平：$\beta < 0.4 Bq/cm^2$。

4《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）

4.2 辐射工作场所分级

应按照 GB18871 的规定，将辐射工作场所按放射性核素日等效最大操作量的大小分为甲级、乙级和丙级。核医学常用放射性核素的毒性与操作方式修正因子可参考附录 A。

4.3 辐射工作场所分区

4.3.1 应按照 GB18871 的要求将核医学工作场所划分出控制区和监督区，并进行相应的管理。

4.3.2 核医学工作场所的控制区主要包括回旋加速器机房、放射性药物合成和分装室、放射性药物贮存室、给药室、给药后候诊室、扫描室、核素治疗病房、给药后患者的专用卫生间、放射性废物暂存库、衰变池等区域。

4.3.3 核医学工作场所的监督区主要包括回旋加速器和显像设备控制室、卫生通过间以及与控制区相连的其他场所或区域。

4.3.4 控制区的入口应设置规范的电离辐射警告标志及标明控制区的标志，监督区入口应设置标明监督区的标志。

4.4.2.1 一般情况下，职业照射的剂量约束值不超过 5mSv/a；

4.4.2.2 公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

4.4.3 放射性表面污染控制水平

核医学工作场所的放射性表面污染控制水平按照 GB 18871 执行。

4.5 服药患者出院要求

4.5.1 为确保放射性核素治疗患者出院后，不至于使接触患者的家庭成员及公众超过相关的剂量约束或剂量限值，出院患者体内放射性核素活度应符合附录 B 的相关规定。

4.5.2 接受碘-131 治疗的患者，应在其体内的放射性活度降至 400MBq 以下或距离患者体表 1 米处的周围剂量当量率不大于 25μSv/h 方可出院。

5 选址和布局

5.1 选址

5.1.1 核医学工作场所宜建在医疗机构内单独的建筑物内，或集中于无人长期居留的建筑物的一端或底层，设置相应的物理隔离和单独的人员、物流通道。

5.1.2 核医学工作场所不宜毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，并应与非放射性工作场所有明确的分解隔离。

5.1.3 核医学工作场所排风口的位置尽可能远离周边高层建筑。

5.2 布局

5.2.1 核医学工作场所应合理布局，住院治疗场所和门诊诊断场所应相对分开布置；同一工作场所内应根据诊疗流程合理设计各功能区域的布局，控制区应相对集中，高活室集中在一端，防止交叉污染。尽量减小放射性药物、放射性废物的存放范围，限制给药后患者的活动空间。

5.2.2 核医学工作场所应设立相对独立的工作人员、患者、放射性药物和放射性废物路径。工作人员通道和患者通道分开，减少给药后患者对其他人员的照射。注射放射性药物后患者与注射放射性药物前患者不交叉，人员与放射性药物通道不交叉，放射性药物和放射性废物运送通道应尽可能短捷。

5.2.3 核医学工作场所宜采取合适的措施，控制无关人员随意进入控制区和给药后患者的随意流动，避免工作人员和公众受到不必要的照射。控制区的出入口应设立卫生缓冲区，为工作人员和患者提供必要的可更换衣物、防护用品、冲洗设施和表面污染监测设备。控制区内应设有给药后患者的专用卫生间。

6 工作场所的辐射安全与防护

6.1 屏蔽要求

6.1.1 核医学场所屏蔽层设计应适当保守，按照可能使用的最大放射性活度、最长时间和最短距离进行计算。

6.1.2 设计核医学工作场所墙壁、地板及顶面的屏蔽层时，除应考虑室内的辐射源外，还要考虑相邻区域存在的辐射源影响以及散射辐射带来的照射。

6.1.5 距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10μSv/h。

6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h。

6.1.7 固体放射性废物收集桶、曝露于地面致使人员可以接近的放射性废液收集罐体和管道应增加相应屏蔽措施，以保证其外表面 30cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。

6.1.8 放射性物质贮存在专门场所内，并应有适当屏蔽。

6.2 场所安全措施要求

6.2.1 核医学工作场所的放射性核素操作设备的表面、工作台台面等平整光滑，室内地面与墙壁衔接处应无接缝，易于清洗、去污。

6.2.2 操作放射性药物场所级别达到乙级应在手套箱中进行，丙级可在通风橱内进行。应为从事放射性药物操作的工作人员配备必要的防护用品。放射性药物给药器应有适当的屏蔽，给药后患者候诊室内、核素治疗病房的床位旁应设有铅屏风等屏蔽体，以减少对其他患者和医护人员的照射。

6.2.3 操作放射性药物的控制区出口应配有表面污染监测仪器，从控制区离开的人员和物品均应进行表面污染监测，如表面污染水平超出控制标准，应采取相应的去污措施。

6.2.4 放射性物质应贮存在专门场所的贮存容器或保险箱内，定期进行辐射水平监测，无关人员不应入内。贮存的放射性物质应建立台账，及时登记，确保账物相符。

6.2.5 应为核医学工作场所内部放射性物质运送配备有足够屏蔽的贮存、转运等容器，容器表面应张贴电离辐射标志，容器在运送时应有适当的固定措施。

6.2.9 扫描机房外门框上方应设置工作状态指示灯。

6.3 密闭和通风要求

6.3.1 核医学工作场所应保持良好的通风，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。

6.3.3 碘-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，保持治疗区域内的负压，治疗区域内的空气应经单独的排气管道有组织排放。

6.3.4 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、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。

6.3.5 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、碘-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。

7 放射性废物的管理

7.2.3 固体放射性废物处理

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测满足清洁解控要求后，α 表面污染小于 0.08 Bq/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：

a）所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；

b）所含核素半衰期大于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过核素最长半衰期的 10 倍；

c）含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天。

7.2.3.2 不能解控的放射性固体废物应该按照放射性废物处理的相关规定予以收集、整备，并送交有资质的单位处理。放射性废物包装体外的表面剂量率应不超过 0.1mSv/h，表面污染水平对 β 和 γ 发射体以及低毒性 α 发射体应小于 4Bq/cm^2、其他 α 发射体应小于 0.4Bq/cm^2。

7.2.3.3 固体放射性废物的存储和处理应安排专人负责，并建立废物存储和处理台账，详细记录放射性废物的核素名称、重量、废物产生起始日期、责任人员、出库时间和监测结果等信息。

7.3.3 放射性废液排放

7.3.3.1 对于槽式衰变池贮存方式：

a）所含核素半衰期小于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 30 天后可直接解控排放；

b）所含核素半衰期大于 24 小时的放射性废液暂存时间超过 10 倍最长半衰期（含碘-131 核素的暂存超过 180 天），经监测达到排放标准后，按照 GB 18871 中 8.6.2 规定方式进行排放。放射性废液总排放口总 α 不大于 1Bq/L、总 β 不大于 10Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10 Bq/L。

7.3.3.2 对于推流式衰变池贮存方式，所含核素半衰期大于 24 小时的，每年应对衰变池中的放射性废液进行监测，碘-131 和最长半衰期核素的放射性活度浓度应满足 GB 18871 附录 A 表 A1 的要求。

7.3.3.3 放射性废液的暂存和处理应安排专人负责，并建立废物暂存和处理台账，详细记录放射性废液所含的核素名称、体积、废液产生起始日期、责任人员、排放时间、监测结果等信息。

7.4 气态放射性废物的管理

7.4.1 产生气态放射性废物的核医学场所应设置独立的通风系统，合理组织工作场所的气流，对排出工作场所的气体进行过滤净化，避免污染工作场所和环境。

7.4.2 应定期检查通风系统过滤净化器的有效性，及时更换失效的过滤器，更换周期不能超过厂家推荐的使用时间。更换下来的过滤器按放射性固体废物进行收集、处理。

5《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）

4 一般要求

4.6 从事放射治疗的医疗机构应规范收集、妥善暂存和处理放射治疗活动中产生的放射性废物。

4.7 从事放射治疗的医疗机构应对放射治疗场所和周围环境进行定期的辐射监测和评估，证明采取的辐射安全与防护措施的有效性。

4.8 辐射工作人员和公众成员的辐射照射应符合 GB 18871-2002 中剂量限值相关规定。

4.9 从事放射治疗的工作人员职业照射和公众照射的剂量约束值应符合以下要求：

a）一般情况下，从事放射治疗的工作人员职业照射的剂量约束值为 5 mSv/a。

b）公众照射的剂量约束值不超过 0.1 mSv/a。

4.10 开展放射治疗活动的医疗机构应制定相应的辐射事故应急预案，做好辐射事故应急准备、应急演练和应急响应，确保有效防范辐射事故或缓解辐射事故的后果。

5 选址、布局与分区要求

5.1 选址与布局

5.1.1 放射治疗场所的选址应充分考虑其对周边环境的辐射影响，不得设置在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。

5.1.2 放射治疗场所宜单独选址、集中建设，或设置在多层建筑物的底层的一端，尽量避开儿科病房、产房等特殊人群及人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。

5.2 分区原则

5.2.1 放射治疗场所应划分控制区和监督区。一般情况下，控制区包括加速器大厅、治疗室（含迷路）等场所，如质子/重离子加速器大厅、束流输运通道和治疗室，直线加速器机房、含源装置的治疗室、放射性废物暂存区域等。开展术中放射治疗时，术中放射治疗室应确定为临时控制区。

5.2.2 与控制区相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区（如直线加速器治疗室相邻的控制室及与机房相邻区域等）。

6 放射治疗场所辐射安全与防护要求

6.1 屏蔽要求

6.1.1 放射治疗室屏蔽设计应按照额定最大能量、最大剂量率、最大工作负荷、最大照射野等条件和参数进行计算，同时应充分考虑所有初、次级辐射对治疗室邻近场所中驻留人员的照射。

6.1.2 放射治疗室屏蔽材料的选择应考虑其结构性能、防护性能，符合最优化要求。使用中子源放射治疗设备、质子/重离子加速器或大于 10 MV 的 X 射线放射治疗设备，须考虑中子屏蔽。

6.1.3 管线穿越屏蔽体时应采取不影响其屏蔽效果的方式，并进行屏蔽补偿。应充分考虑防护门与墙的搭接，确保满足屏蔽体外的辐射防护要求。

6.1.4 剂量控制应符合以下要求：

a） 治疗室墙和入口门外表面 30 cm 处、邻近治疗室的关注点、治疗室房顶外的地面附近和楼层及在治疗室上方已建、拟建二层建筑物或在治疗室旁邻近建筑物的高度超过自辐射源点治疗室房顶内表面边缘所张立体角区域时，距治疗室顶外表面 30 cm 处和在该立体角区域内的高层建筑人员驻留处的周围剂量当量率应同时满足下列 1）和 2）所确定的剂量率参考控制水平 $\dot{H}_c$：

1）使用放射治疗周工作负荷、关注点位置的使用因子和居留因子（可依照附录 A 选取），由以下周剂量参考控制水平（Ḣc） 求得关注点的导出剂量率参考控制水平 Ḣc,d (μSv/h)：

机房外辐射工作人员：Ḣc≤100 μSv/周；

机房外非辐射工作人员：Ḣc≤5 μSv/周。

2）按照关注点人员居留因子的不同，分别确定关注点的最高剂量率参考控制水平 Ḣc,mAx (μSv/h)：

人员居留因子 T＞1/2 的场所： Ḣc,mAx≤2.5 μSv/h；

人员居留因子 T≤1/2 的场所： Ḣc,mAx≤10 μSv/h。

b）穿出机房顶的辐射对偶然到达机房顶外的人员的照射，以年剂量 250 μ Sv 加以控制。

c）对不需要人员到达并只有借助工具才能进入的机房顶，机房顶外表面 30 cm 处的剂量率参考控制水平可按 100 μ Sv/ 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。

6.2 安全防护设施和措施要求

6.2.1 放射治疗工作场所，应当设置明显的电离辐射警告标志和工作状态指示灯等：

a）放射治疗工作场所的入口处应设置电离辐射警告标志，贮源容器外表面应设置电离辐射标志和中文警示说明；

b）放射治疗工作场所控制区进出口及其他适当位置应设电离辐射警告标志和工作状态指示灯；

c）控制室应设有在实施治疗过程中能观察患者状态、治疗室和迷道区域情况的视频装置，并设置双向交流对讲系统。

6.2.2 质子/重离子加速器大厅和治疗室内、含放射源的放射治疗室、医用电子直线加速器治疗室（一般在迷道的内入口处）应设置固定式辐射剂量监测仪并应有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内或机房门附近。

6.2.3 放射治疗相关的辐射工作场所，应设置防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全联锁措施：

a）放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置门－机/源联锁装置，防护门未完全关闭时不能出束/出源照射，出束/出源状态下开门停止出束或放射源回到治疗设备的安全位置。含放射源的治疗设备应设有断电自动回源措施；

b）放射治疗室和质子/重离子加速器大厅应设置室内紧急开门装置，防护门应设置防夹伤功能；

c）应在放射治疗设备的控制室/台、治疗室迷道出入口及防护门内侧、治疗室四周墙壁、质子/重离子加速器大厅和束流输运通道内设置急停按钮；急停按钮应有醒目标识及文字显示能让在上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发；

f）安全联锁系统一旦被触发后，须人工就地复位并通过控制台才能重新启动放射治疗活动；安装调试及维修情况下，任何联锁旁路应通过单位辐射安全管理机构的批准与见证，工作完成后

应及时进行联锁恢复及功能测试。

6.2.4 后装治疗室内应配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具。

8 放射性废物管理要求

8.1 总体要求

医疗机构应尽量减少放射性废物的产生；对产生的放射性废物按核素的种类、活度、半衰期、理化性质等分类收集处理。

8.2 固态废物管理要求

8.2.1 废旧放射源管理要求

废旧放射源应按法律法规要求返回放射源生产厂家或原出口方。确定无法交回生产单位或者返回原出口方的，送交有相应资质的单位收贮，并承担相关费用。

8.2.2 其他固态废物管理要求

8.2.2.1 质子/重离子加速器、直线加速器等治疗装置在调试及运行过程中，如活化后的回旋加速器、准直器、束流阻止器及加速器靶等组成部件，在更换或退役时，应作为放射性固体废物处理，拆卸后先放进屏蔽容器或固态废物暂存间衰变暂存，最终送交有资质的单位收贮。

8.2.2.3 建立放射性固态废物台账，存放及处置前进行监测，记录部件名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率)、监测日期、去向等相关信息，低于清洁解控水平的可作为一般固态废物处置，并做好存档记录。

8.4 气态废物管理要求

8.4.1 放射治疗室内应设置强制排风系统，采取全排全送的通风方式，换气次数不少于 4 次/h，排气口位置不得设置在有门、窗或人流较大的过道等位置。

6《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）

6.1 布局要求

6.1.1 放射治疗设施一般单独建造或建在建筑物底部的一端；放射治疗机房及其辅助设施应同时设计和建造，并根据安全、卫生和方便的原则合理布置。

6.1.2 放射治疗工作场所应分为控制区和监督区。治疗机房、迷路应设置为控制区；其他相邻的、不需要采取专门防护手段和安全控制措施，但需经常检查其职业照射条件的区域设为监督区。

6.1.3 治疗机房有用线束照射方向的防护屏蔽应满足主射线束的屏蔽要求，其余方向的防护屏蔽应满足漏射线及散射线的屏蔽要求。

6.1.4 治疗设备控制室应与治疗机房分开设置，治疗设备辅助机械、电器、水冷设备，凡是可以与治疗设备分离的，尽可能设置于治疗机房外。

6.1.5 应合理设置有用线束的朝向，直接与治疗机房相连的治疗设备的控制室和其他居留因子较大的用室，尽可能避开被有用线束直接照射。

6.1.6 X 射线管治疗设备的治疗机房、术中放射治疗手术室可不设迷路；γ 刀治疗设备的治疗

机房，根据场所空间和环境条件，确定是否选用迷路；其他治疗机房均应设置迷路。

6.2 空间、通风要求

6.2.1 放射治疗机房应有足够的有效使用空间，以确保放射治疗设备的临床应用需要。

6.2.2 放射治疗机房应设置强制排风系统，进风口应设在放射治疗机房上部，排风口应设在治疗机房下部，进风口与排风口位置应对角设置，以确保室内空气充分交换；通风换气次数应不少于 4 次/h。

6.4 安全装置和警示标志要求

6.4.1 监测报警装置：含放射源的放射治疗机房内应安装固定式剂量监测报警装置，应确保其报警功能正常。

6.4.2 联锁装置：放射治疗设备都应安装门机联锁装置或设施，治疗机房应有从室内开启治疗机房门的装置，防护门应有防挤压功能。

6.4.3 标志

医疗机构应当对下列放射治疗设备和场所设置醒目的警告标志：

a）放射治疗工作场所的入口处，设有电离辐射警告标志；b）放射治疗工作场所应在控制区进出口及其他适当位置，设有电离辐射警告标志和工作状态指示灯。

6.4.4 急停开关

6.4.4.1 放射治疗设备控制台上应设置急停开关，除移动加速器机房外，放射治疗机房内设置的急停开关应能使机房内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。通常应在机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧和控制台等处设置。

6.4.6 视频监控、对讲交流系统：控制室应设有在实施治疗过程中观察患者状态、治疗床和迷路区域情况的视频装置；还应设置对讲交流系统，以便操作者和患者之间进行双向交流。

7《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）

6.1 X 射线设备机房布局

6.1.1 应合理设置 X 射线设备、机房的门、窗和管线口位置，应尽量避免有用线束直接照射门、窗、管线口和工作人员操作位。

6.1.2 X 射线设备机房（照射室）的设置应充分考虑邻室（含楼上和楼下）及周围场所的人员防护与安全。

6.1.3 每台固定使用的 X 射线设备应设有单独的机房，机房应满足使用设备的布局要求；每台牙椅独立设置诊室的，诊室内可设置固定的口内牙片机，供该设备使用，诊室的屏蔽和布局应满足口内牙片机房防护要求。

6.1.5 除床旁摄影设备、便携式 X 射线设备和车载式诊断 X 射线设备外，对新建、改建和扩建项目和技术改造、技术引进项目的 X 射线设备机房，其最小有效使用面积、最小单边长度应符合表 2 的规定。

本项目 X 射线设备，机房最小有效使用面积、最小单边长度需要满足下表的要求。

表 7-6 不同 X 射线设备机房使用面积、单边长度的要求

设备类型	机房内最小有效使用面积 d（m^2）	机房内最小单边长度 e（m）
CT 机（不含头颅移动 CT）	30	4.5
双管头或多管头 X 射线机 a（含 C 形臂）	30	4.5
单管头 X 射线机 b（含 C 形臂）	20	3.5

a 双管头或多管头 X 射线设备的所有管球安装在同一间机房内。b 单管头 、双管头或多管头 X 射线设备的每个管球各安装在 1 个房间内。c 透视专用机指无诊断床、标称管电流小于 5 mA 的 X 射线设备。d 机房内有效使用面积指机房内可划出的最大矩形的面积。e 机房内单边长度指机房内有效使用面积的最小边长。

6.2 X 射线设备机房屏蔽

6.2.1 不同类型 X 射线设备（不含床旁摄影设备和便携式 X 射线设备）机房的屏蔽防护应不低于表 3 的规定。

本项目为 X 射线设备机房，机房的屏蔽防护铅当量需要满足下表的要求。

表 7-7 不同类型 X 射线设备机房的屏蔽防护铅当量厚度要求

机房类型	有用线束方向铅当量 mmPb	非有用线束方向铅当量 mmPb
C 形臂 X 射线设备机房	2.0	2.0
CT 机房（不含头颅移动 CT） CT 模拟定位机房	2.5	

6.3 X 射线设备机房屏蔽体外剂量水平

6.3.1 机房的辐射屏蔽防护，应满足下列要求：

a) 具有透视功能的 X 射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于 2.5μSv/h；测量时，X 射线设备连续出束时间应大于仪器响应时间。

6.4 X 射线设备工作场所防护

6.4.1 机房应设有观察窗或摄像监控装置，其设置的位置应便于观察到受检者状态及防护门开闭情况。

6.4.2 机房内不应堆放与该设备诊断工作无关的杂物。

6.4.3 机房应设置动力通风装置，并保持良好的通风。

6.4.4 机房门外应有电离辐射警告标志；机房门上方应有醒目的工作状态指示灯，灯箱上应设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句；候诊区应设置放射防护注意事项告知栏。

6.4.5 平开机房门应有自动闭门装置；推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施； 工作状态指示灯能与机房门有效关联。

6.4.6 电动推拉门宜设置防夹装置。

6.4.7 受检者不应在机房内候诊；非特殊情况，检查过程中陪检者不应滞留在机房内。

6.4.10 机房出入门宜处于散射辐射相对低的位置。

6.5 X 射线设备工作场所防护用品及防护设施配置要求

6.5.1 每台 X 射线设备根据工作内容，现场应配备不少于表 4 基本种类要求的工作人员、受检者防护用品与辅助防护设施，其数量应满足开展工作需要，对陪检者应至少配备铅橡胶防护衣。

6.5.3 除介入防护手套外，防护用品和辅助防护设施的铅当量应不小于 0.25mmPb；介入防护手套铅当量应不小于 0.025mmPb；甲状腺、性腺防护用品铅当量应不小于 0.5mmPb；移动铅防护屏风铅当量应不小于 2mmPb。

6.5.4 应为儿童的 X 射线检查配备保护相应组织和器官的防护用品，防护用品和辅助防护设施的铅当量应不小于 0.5mmPb。

6.5.5 个人防护用品不使用时，应妥善存放，不应折叠放置，以防止断裂。

本项目个人防护用品和辅助防护设施需要满足下表的要求。

表 7-8 个人防护用品和辅助防护设施配置要求

放射检查类型	工作人员		受检者	
	个人防护用品	辅助防护设施	个人防护用品	辅助防护设施
CT 体层扫描（隔室）	—	—	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套选配：铅橡胶帽子	—
介入放射学操作	铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套选配：铅橡胶帽子	铅悬挂防护屏/铅防护吊帘、床侧防护帘/床侧防护屏选配：移动铅防护屏风	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套选配：铅橡胶帽子	—
注 1：“—”表示不做要求。 注 2：各类个人防护用品和辅助防护设施，指防电离辐射的用品和设施。 鼓励使用非铅材料防护用品，特别是非铅介入防护手套。				
a 工作人员、受检者的个人防护用品和辅助防护设施任选其一即可。				

8 项目管理目标

（1）本项目辐射工作人员及公众的辐射剂量约束值：其中职业人员年有效剂量不超过**5mSv**，公众年有效剂量不超过**0.1mSv**。

（2）核医学工作场所周围剂量当量率控制值：距核医学工作场所各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应小于2.5 μSv/h，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于10 μSv /h。放射性药物合成和分装的箱体、通风柜、注射窗等设备外表面 30cm处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5 μSv/h，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25 μSv/h；衰变池外表面 30 cm 处的周围剂量当量率小于 2.5 μSv/h；回旋机房北侧控制室外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应小于2.5 μSv/h，机房其它相邻区域一般无人停留，外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应小于10μSv/h。

核医学科表面污染控制水平控制值：本项目表面污染为β放射性物质，核医学科控制区内的工作台、设备、墙壁、地面等表面污染控制水平不大于40Bq/cm^2，监督区的工作台、设备、墙壁、地面等表面污染控制水平不大于4Bq/cm^2，工作人员的工作服、手套、工作鞋等工作台、设备、墙壁、地面等表面污染控制水平不大于4Bq/cm^2，工作人员的手、皮肤、内衣、工作袜等工作台、设备、墙壁、地面等表面污染控制水平不大于0.4Bq/cm^2。

（3）DSA机房和CT模拟定位机房外30cm周围剂量当量率应不大于2.5μSv/h。

（4）根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）中相关规定及本项目开机与治疗时间，估算得到直线加速器机房、射波刀机房外30cm处的周围剂量当量率参考控制水平H_c。根据布局图（附图10）可知，各加速器机房周围情况见7-9。1#~3#机房并排设计，3#机房南侧主屏蔽厚度与1#、2#机房一致，但其宽度大于1#、2#机房；4#机房和5#机房并排对称设计，屏蔽防护一致；1#、2#机房与4#、5#机房仅布局上不同（顺时针90°），屏蔽防护设计一致；1#-5#机房内拟配备的加速器的X射线、电子线能量、距靶1m处剂量率等设备参数一致；且4#机房东侧为射波刀控制室。因此选取4#机房进行分析。4#机房、射波刀机房估算30cm处的周围剂量当量率参考控制水平，见表7-10、表7-11。

表 7-9 加速器机房周围情况一览表

机房	东侧	南侧	西侧	北侧	上方	下方
1#机房	土层	2#机房	控制室、水冷机房、过道	送风机房、污泵间和楼梯	核医学	土层
2#机房	土层	3#机房		1#机房	核医学	土层
3#机房	土层	射波刀机房		2#机房	核医学	土层
4#机房	射波刀控制室、水冷机房	土层	5#机房	控制室、水冷机房、过道	核医学	土层
5#机房	4#机房	土层	送风机房、污泵间		核医学	土层

表 7-10 4#加速器机房外 30cm 处的周围剂量当量率参考控制水平

参数	东墙（射波刀控制室）	东墙（水冷机房）	西墙（5#机房）	北墙（加速器控制室）	顶部（热室）	防护门
	次屏蔽	主屏蔽	主屏蔽/次屏蔽	次屏蔽	主屏蔽/次屏蔽	
使用因子 U	1/4	1/4	1/4	1	1/4	1
居留因子 T	1	1/20	1/2	1	1/8	1/8
周剂量控制值（μSv/周）	100	5	5	100	5	5

周工作时间（h）	10	10	10	10	10	10
剂量当量率计算控制水平（μSv/h）	40	80	4	10	16	4
标准控制水平（μSv/h）	2.5	10	10	2.5	10	10
剂量率控制水平取值（μSv/h）	2.5	10	4	2.5	10	4

表7-11 射波刀机房外30cm处的周围剂量当量率参考控制水平

参数	西墙（射波刀控制室）	北墙（3#机房）	顶部（排风机房和病房）	防护门
使用因子 U	1/4	1/4	1/4	1/4
居留因子 T	1	1/2	1/2	1/8
周剂量控制值（μSv/周）	100	5	5	5
周工作时间（h）	20	20	20	20
剂量当量率计算控制水平（μSv/h）	20	2	2	8
标准控制水平（μSv/h）	2.5	10	10	10
剂量率控制水平取值（μSv/h）	2.5	2	2	8

9 参考资料

（1）《辐射防护导论》，方杰主编；

（2）《辐射防护手册（第一分册）》、《辐射防护手册（第三分册）》，李德平、潘自强著

（3）《医用外照射源的辐射防护》，国际放射防护委员会第 33 号出版物

（4）《医用电气设备第 1 部分：安全通用要求三.并列标准诊断 X 射线设备辐射防护通用要求》(GB9706. 12-1997)

（5）《江苏省环境天然贯穿辐射水平调查研究》（辐射防护 第 13 卷第 2 期，1993 年 3 月），江苏省环境监测站。

表 7-12 江苏省室内、室外天然贯穿辐射所致（空气吸收）剂量率（单位：nGy/h）

	室外剂量率	室内剂量率
范围	62.6～101.9	77.2～152.4
均值	79.5	115.1
标准差（s）	7.0	16.3

*：评价时采用“均值±3s”作为辐射现状评价的参考标准。

表 8 环境质量和辐射现状

环境质量和辐射现状

1 项目地理和场所位置

本项目位于核工业总医院浒关院区内，浒关院区位于苏州市高新区浒墅关镇康复弄 28 号，地理位置见附图 1。浒关院区东侧为浒墅关工商分局和浒墅关路，南侧为兴贤路，西侧为明光路和金辉浅湾雅苑，北侧为南津路。浒关院区平面布局及周围环境见附图 2。

本项目包括核医学科项目、放疗科项目、DSA 项目，其中放疗科位于浒关院区二期住院楼地下三层内，核医学科项目位于浒关院区二期住院楼地下二层内，DSA 项目位于浒关院区二期住院楼三层内。根据现场调查可知，本项目周围 50m 范围内无居民区、学校等敏感点。本项目周围环境现状图见图 8-1。

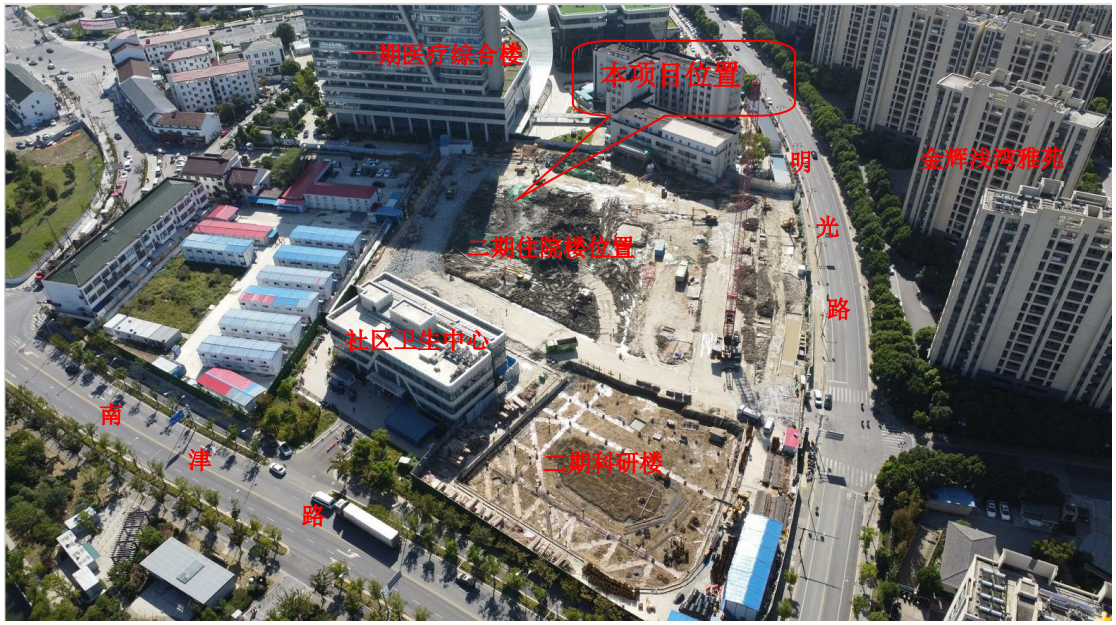


图 8-1 本项目周围环境现状图

2 环境现状评价的对象、监测因子和监测点位

环境现状评价的对象：本项目周围辐射环境。

监测因子：γ 辐射空气吸收剂量率和 β 表面污染。

监测点位：γ 辐射空气吸收剂量率布点 4 个，β 表面污染布点 4 个。

3 监测方案、质量保证措施及监测结果

3.1 监测方案

监测单位：江苏玖清玖蓝环保科技有限公司。

监测仪器：FH40G 型辐射剂量检测仪（探头型号 FHZ672E-10）（编号：J0317，检定有效期：2022 年 10 月 10 日-2023 年 10 月 09 日）；

Como170 高灵敏 α/β/γ 便携式沾污检测仪（编号：J0417，检定有效期：2022 年 10 月 12 日-2023 年 10 月 11 日、2023 年 10 月 27 日-2024 年 10 月 26 日）；

RJ37-7105He5 中子周围剂量当量仪（编号：J0519，检定有效期：2022 年 12 月 15 日-2023 年 12 月 14 日）。

监测项目：γ 辐射空气吸收剂量率、β 表面污染水平、α 表面污染和中子剂量率。

监测布点：项目周围进行布点，具体点位见图 8-2 和图 8-3。

监测时间：2023 年 6 月 16 日、2023 年 11 月 03 日

监测方法：《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）、《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）、《表面污染测定第 1 部分 β 发射体（$E_{\beta mAx}$>0.15MeV）和 α 发射体》（GB/T14056.1-2008）。

数据记录及处理：γ 辐射空气吸收剂量率监测每个点位读取 10 个数据，读取间隔不小于 20s，并待计数稳定后读取数值。每组数据计算每个点位的平均值并计算方差。根据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），本项目空气比释动能和周围剂量当量的换算系数参照 JJG 393-2018，使用 ^{137}Cs 作为检定/校准参考辐射源，换算系数取 1.20Sv/Gy。表面污染水平和中子每个点位读取 5 个数据，读取间隔不小于 20s，并待计数稳定后读取数值。每组数据计算每个点位的平均值并计算方差。

3.2 质量保证措施

监测单位：公司已通过检验检测机构资质认定。

监测布点质量保证：根据《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）有关布点原则进行布点。

监测过程质量控制质量保证：本项目监测按照《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）的要求，实施全过程质量控制。

监测人员、监测仪器及监测结果质量保证：监测人员均经过考核并持有检测上岗证，所有监测仪器均经过计量部门检定，并在有效期内，监测仪器使用前经过校准或检验，监测报告实行三级审核。

3.3 监测结果

评价方法：监测结果见表 8-1~表 8-4，γ 辐射空气吸收剂量率参照江苏省环境天然γ辐射剂量率调查结果，详细检测结果见附件 6。

表 8-1 项目拟建址及周围环境γ辐射空气吸收剂量率

序号	监测点位描述	监测结果（nGy/h）	备注
1	二期住院楼拟建址西侧道路	58.7	/
2	二期住院楼拟建址东侧道路	57.1	
3	二期住院楼拟建址南侧道路	59.2	
4	二期住院楼拟建址北侧道路	58.2	

说明：表中结果已扣除仪器宇宙响应值。

表 8-2 项目拟建址及周围β表面污染检测结果

序号	监测点位描述	监测结果（Bq/cm²）	备注
1	二期住院楼拟建址西侧道路	＜MDL	/
2	二期住院楼拟建址东侧道路	＜MDL	
3	二期住院楼拟建址南侧道路	＜MDL	
4	二期住院楼拟建址北侧道路	＜MDL	

说明：MDL=0.017Bq/cm²。

表 8-3 中子剂量率检测结果

测点号	**点位描述**	**测量结果 (μSv/h)**	**备注**
1	拟建场址东侧道路	0	/
2	拟建场址南侧道路	0	
3	拟建场址西侧道路	0	
4	拟建场址北侧道路	0	

表 8-4 α 表面污染检测结果

测点号	**点位描述**	**测量结果 (Bq/cm²)**	**备注**
1	拟建场址东侧道路	＜MDL	/
2	拟建场址南侧道路	＜MDL	
3	拟建场址西侧道路	＜MDL	
4	拟建场址北侧道路	＜MDL	

说明：MDL=5.30×10^{-3} Bq/cm²。

4 环境现状调查结果评价

根据监测结果可知，本项目拟建址及周围的环境 γ 辐射空气吸收剂量率为（57.1~59.2）nGy/h，处于江苏省环境天然 γ 辐射水平涨落范围；拟建址周围表面污染监测结果均＜MDL，中子剂量率检测结果为 0μSv/h。



图 8-2 γ 辐射空气吸收剂量率和 β 表面污染检测点位图

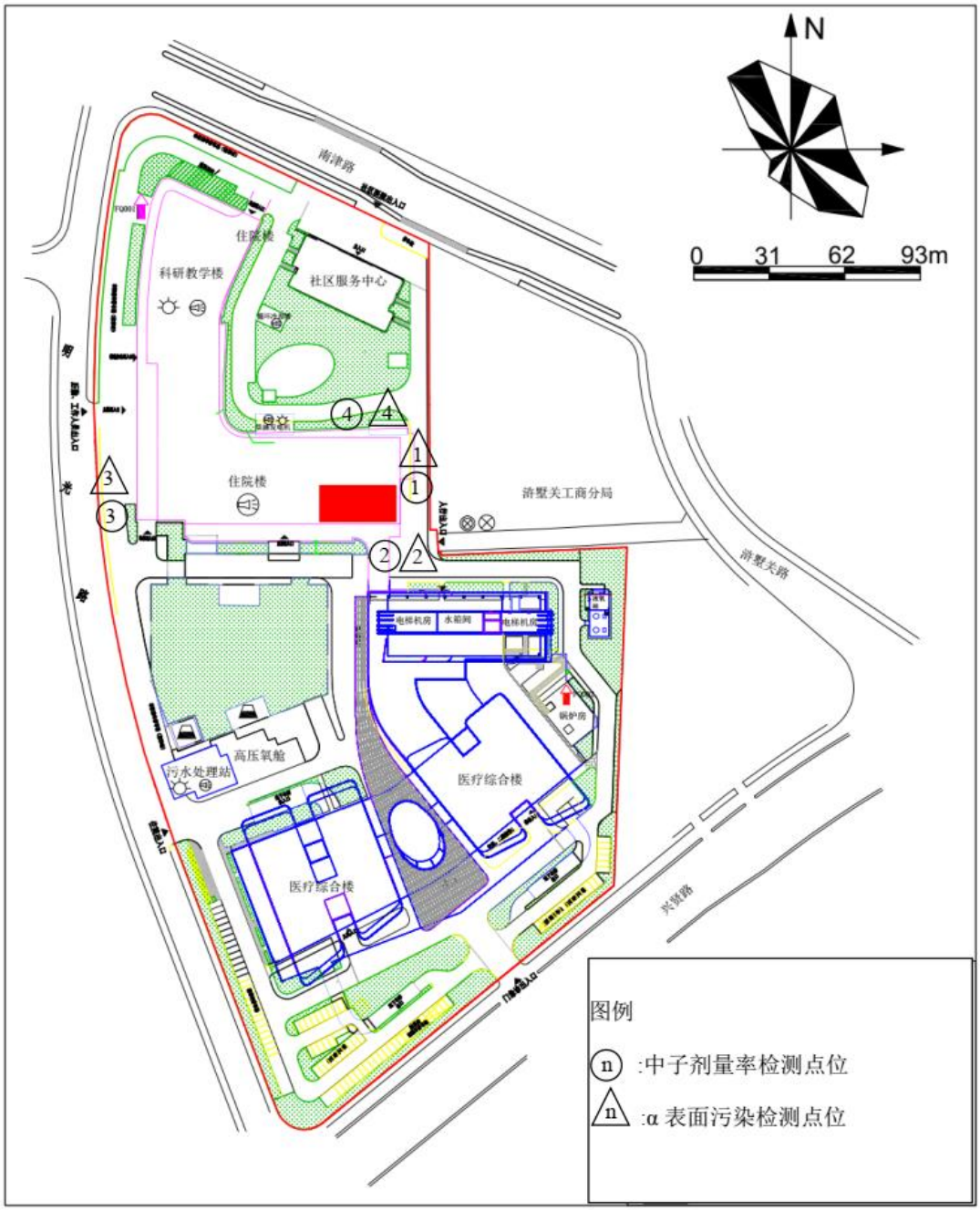


图 8-3 α 表面污染和中子剂量率检测点位图

表 9 项目工程分析与源项

工程设备和工艺分析

1 核医学科项目

1.1 回旋加速器

1.1.1 工程设备

回旋加速器位于浒关院区二期住院楼地下二层，主要包括一座回旋加速器机房、合成分装热室、质控室、气瓶间、控制室及相关配套用房。医院拟配备一台自屏蔽的 HM-10HC 型回旋加速器。加速粒子最大能量为 10MeV，最大束流为 100uA。本项目回旋加速器生产的放射性核素包括 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga，均用于医院核医学科及动物实验使用，不外销。本项目回旋加速器基本参数见表 9-1。

表 9-1 本项目回旋加速器基本参数一览表

项目	
束流粒子	
最大质子速流能量	
引出质子束流强度（μA）	
靶材料	
产额	
屏蔽情况	
尺寸	
重量（含自屏蔽体）	

回旋加速器是专为生产 ^{18}F，^{11}C 等正电子核素的小型一体化医用加速器，主要由磁场系统、真空系统、射频系统、离子源系统、束流提取系统、靶系统、冷却系统、气体系统、控制系统等组成，具体见表 9-2，加速器装置外观见图 9-1。

表 9-2 医用回旋加速器系统组成及作用

系统名称	组成及作用
控制系统	进行回旋加速器的自动操作，进行连锁管理和安全控制。
磁场系统	提供被加速器的带电粒子做圆周运动所需的磁场。
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	提供提取离子并进行加速的高频振荡电压。
离子源系统	由离子源、离子源电源配给器和气体控制系统组成，主要功能是产生需要的加速器带电粒子。
束流提取系统	主要包括剥离碳膜、引出器等装置。该系统直接将加速的且具有最大能量的带电负离子从真空腔中引出，主要是通过剥离膜剥去 H 的两个电子，使其转变成为带正电荷的 H，此时粒子束运行轨道发生逆相偏转，然后通过引出装置将束流引入靶内。
靶系统	主要由准直器、氦冷却室、靶室、水冷却室和双相三通阀组成。生产正电子核素的核反应在此装置内完成。
冷却系统	水冷却系统：分为一级水冷却系统和二级水冷却系统。一级水冷却系统为普通的冷水机组；二级水冷却系统中的去离子水带走回旋加速器产生的热量，通过热交换传递给一级水冷却系统。 氮气冷却系统：在束流轰击期间对靶室和靶窗的箔膜和钛箔膜之间进行冷去，两个箔膜之间的氮气流提供了所必需的冷却。



图 9-1 回旋加速器外观

1.1.2 工作原理

医用回旋加速器是制备 PET 用放射性核素的主要设备，其工艺原理是在回旋加

速器中通过改变磁场加速质子从而使质子获得必要的能量，高速运动的质子轰击靶物质产生核反应生成放射性核素。放射性核素通过气动自动传输装置传输到化学合成器进行合成、检测、标定，最终成为所需要的放射性药品。在加速器运行过程中，通过改变靶物质可以获得不同的放射性核素供临床和科研应用。

回旋加速器工作原理主要是使处于真空室内的带电粒子在高频、交变磁场作用下，不断加速，当被加速粒子能量达到一定值时偏转引出，引出到加速器外部的入射粒子束与其路径上的靶核碰撞，入射粒子被靶核吸收，激活的靶核发生核反应发射出中子、质子或 α 粒子，同时可产生具有一定阈能的正电子放射性核素。通过回旋加速器的自屏蔽系统，可吸收核反应引起的瞬发射线，也可吸收在屏蔽块中由于碰撞而产生的热中子。

回旋加速器的工作原理如图 9-2 所示。

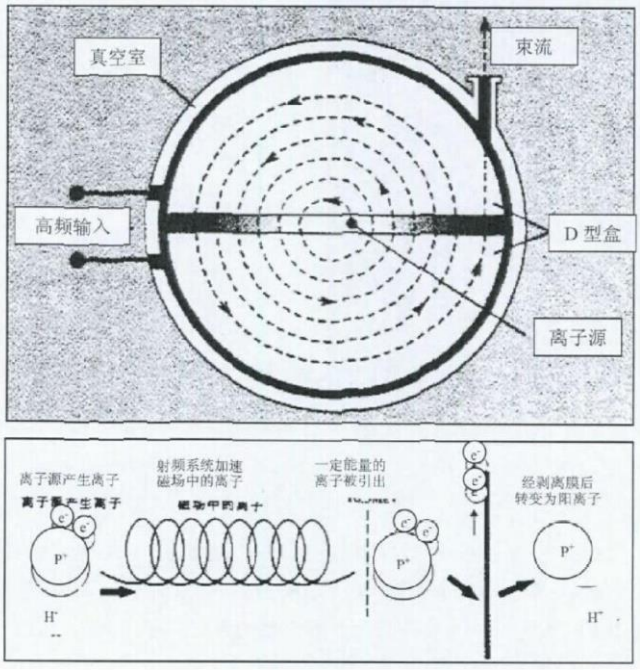


图 9-2 回旋加速器工作原理简图

1.1.3 正电子放射性药物生产工艺流程

根据医院核医学科实际工作要求，预计 PET 影像诊断每周使用 ^{18}F 药物最多为 5 天，每周使用 ^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 等药物最多均为 1 天，PET 影像诊断使用核素基本情况一览表见表 9-3。

表 9-3 PET 影像诊断使用核素基本情况一览表

核素	日最大门诊量	单人使用量（Bq)	日最大使用量（Bq)	年最大人数	年最大使用量（Bq）
^{18}F					
^{11}C					
^{13}N					
^{64}Cu					
^{89}Zr					
^{68}Ga					

医院使用小老鼠开展 PET/CT 影像实验，每周选定一天开展 PET/CT 影像实验，每次最多开展 1 种正电子药物实验，使用核素基本情况一览表见表 9-4。

表 9-4 动物 PET/CT 影像实验使用正电子核素一览表

核素	每次实验老鼠最大量	单只动物使用量（Bq)	日最大使用量（Bq)	年最多实验次数	年最大使用量（Bq）
^{18}F					
^{11}C					
^{13}N					
^{64}Cu					
^{89}Zr					
^{68}Ga					

根据医院使用正电子药物情况，同时考虑正电子药物衰减、质控等因素，医院回旋加速器每天最多生产 2 种核素，一天最多打靶两次。回旋加速器生产正电子核素基本情况见表 9-5。

表 9-5 生产正电子核素一览表

核素	单次打靶最大时间（h)	生产能力（mCi/h）	合成效率	单次生产药物活度（Bq）	年最大次数	年生产药物活度（Bq)
^{18}F						
^{11}C						
^{13}N						
^{89}Zr						
^{64}Cu						
^{68}Ga						

根据上表可知，回旋加速器生产的正电子药物活度能够满足医院核医学科和动物 PET/CT 影像实验的药物需求。回旋加速器涉及生产的放射性同位素半衰期较短，每次生产的放射性同位素均为即产即用，不存在暂存以及销售的情况。

整个制备流程如下：

（1）根据核医学科当日使用放射药物量的要求，进行放射性同位素生产前的物料准备；

（2）在回旋加速器开机前，工作人员先进入机房进行巡视，确保机房内无人及各个环节准备就绪后，关闭回旋加速器机房防护门，进入回旋加速器控制室内开启回旋加速器；

（3）回旋加速器运行中打击靶物质生成所需核素后，通过靶产物传输管道进入合成分装热室中的合成热室箱进行化学合成，以上整个过程（包括加速器打靶及化学合成）为全自动控制，无工作人员参与，只在控制室监控整个过程的执行情况；

（4）化学合成后工作人员进入质控室，并取样进入质控室作质量检验；待检验合格后，装入厚约 40mm 的铅罐经传递窗由专人转移至核医学科和动物 PET/CT 机房内。

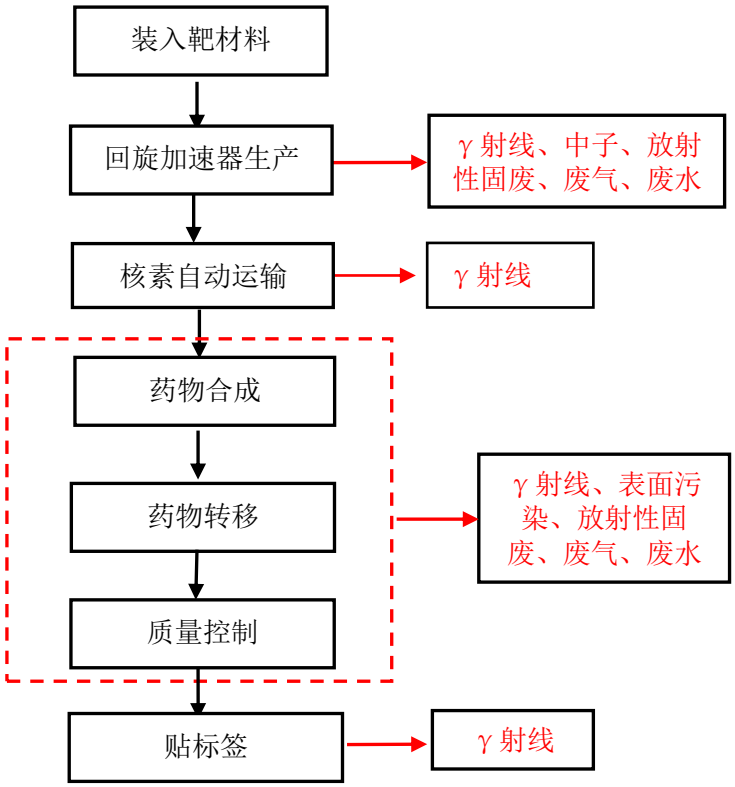


图 9-3 正电子放射性药物生产工艺流程及产污环节

1.2 动物 PET/CT 影像实验

1.2.1 工程设备

医院拟在二期住院楼地下二层开展动物 PET/CT 影像实验研究，给小老鼠注射正电子药物，使用 PET/CT 扫描显像，并对其影像图进行研究，不进行动物解剖。

拟新建 1 座 PET/CT 机房，拟配备一台 microPET/CT 用于正电子药物影像研究。

microPET/CT 使用的放射性核素为 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga，每天只开展 1 种核素影像实验，每次动物实验扫描最多 10 只老鼠，每只小鼠注射药物剂量最多为 100μCi，该部分药物在质控室内完成分装和质控，注射在动物 PET/CT 机房内进行，一般为一次性依次注射药物，也可以根据实验间隔的需要进行 2~3 次分批给药，给药后的老鼠放置在 10mmPb 的防护拖车内，依次进行扫描，每次最多同时扫描两只小鼠。每次实验注射药物时间约为 10min，每次扫描时间为 10~60min，平均扫描时间约 30min。^{18}F 每年最多开展实验 20 次，^{11}C 每年最多开展实验 10 次，^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 每年最多开展实验均为 5 次。

1.2.2 工作原理

PET（正电子发射断层显像仪）显像的原理是把微量正电子示踪剂注射到实验动物内，利用 PET 探测这些正电子核素在体内的分布情况，经计算机重建成断层图像，从而反映组织器官的生理代谢情况和早期病理变化，从而为临床提供疾病的生物代谢信息。但 PET 显像空间分辨率较差，难以精确定位，只有当疾病发生到“形态改变”这一阶段才能被发现，因此不能达到“早期诊断”的目的。

PET/CT 是一种将 PET（功能代谢显像）和 CT（解剖结构显像）两种影像技术有机地结合的新型影像设备，是将微量的正电子核素示踪剂注射到动物体内，然后采用特殊的体外探测仪（PET）探测这些正电子核素动物各脏器的分布情况，通过计算机断层显像的方法显示动物的主要器官的生理代谢功能，同时应用 CT 技术为这些核素分布情况进行精确定位，使这台机器同时具有 PET 和 CT 的优点，发挥出各自的最大优势。

本项目 microPET/CT 小动物用 PET/CT，其最大管电压为 90kV，最大管电流为 1mA。

1.2.3 工作流程

放射性药物在质控室内完成分装和质控，置 40mmPb 铅罐中，经工作人员送至动物 PET/CT 内，在 PET-CT 机房内配备注射车，辐射工作人员注射车的防护屏后给实验动物注射药物，注射完毕后，将动物放置于防护拖车内，依次置于 PET 传送床上，完成动物显像。工作流程及产污环节如图 9-4 所示。

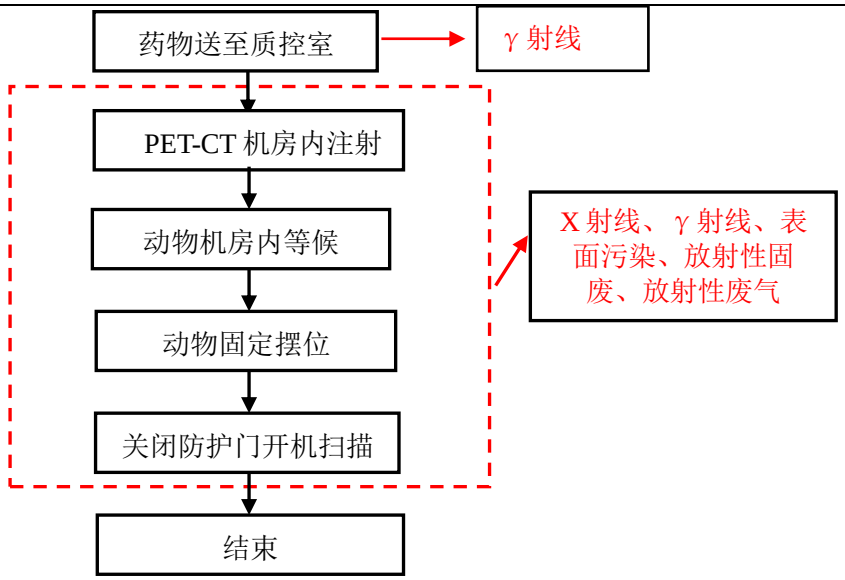


图 9-4 动物 PET/CT 影像实验工作流程及产污环节

1.3 核素影像诊断项目

医院在二期住院楼地下二层新建两座 PET/CT 机房和一座 PET/MRI 机房，计划配备两台 PET/CT 和一台 PET/MRI，使用 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 等正电子核素药物进行显像诊断；新建两座 SPECT/CT 机房，计划配备两台 SPECT/CT，使用 ^{99m}Tc、^{201}Tl、^{67}Ga、^{123}I 等单光子核素药物进行显像诊断。

1.3.1 PET/CT 和 PET/MRI 项目

（1）工作原理

PET（正电子发射断层显像仪）显像的原理是把微量正电子示踪剂注射到人体内，利用 PET 探测这些正电子核素在体内的分布情况，经计算机重建成断层图像，从而反映组织器官的生理代谢情况和早期病理变化，从而为临床提供疾病的生物代谢信息。但 PET 显像空间分辨率较差，难以精确定位，只有当疾病发生到“形态改变”这一阶段才能被发现，因此不能达到“早期诊断”的目的。

PET/MRI 即正电子发射计算机断层显像仪和核磁共振成像技术结合一体化组合成的大型功能代谢与分子影像诊断设备，扫描过程中 PET 对进入人体内的正电子核素进行扫描并显像，可获得代谢显像，而 MR 对 PET 图像做放射性的衰减校正，可以提供解破学和组织特征，两者相结合可以看到组织功能和新陈代谢，可提供比传统成像方式更为优质的影像结果，是目前最好的高端体检手段。

PET/CT 全称正电子发射断层与计算机断层诊断技术，是在 PET 和 CT 的基础上

发展起来的新设备，充分结合了 PET 高灵敏度和 CT 高分辨率的优势。其原理是通过正电子核素或其标记的示踪剂，示踪人体内特定生物物质的生物活动，采用多层、环形排列于发射体周围的探头，由体外探测正电子示踪剂湮灭辐射所产生的光子，然后将获得的信息，通过计算机处理，以解剖影像的形式及其相应的生理参数，显示靶器官或病变组织的状况，藉此诊断疾病，又称为生化显像或功能分子显像，是目前唯一可以在活体分子水平完成生物学显示的影像技术；同时结合应用高档多排 CT 技术进行精确定位，可精确地提供靶器官的解剖和功能双重信息，并能够独立完成多排螺旋 CT 的临床显像，大大提高临床使用价值。

正电子发射是放射性核素衰变的方式之一。这类核素在自发的从不稳定状态向基态衰变过程中，从核内释放出与普通电子一样但电荷相反的粒籽，即正电子。正电子是一种反物质，从核内放出后很快与环境中自由电子碰撞湮灭，转化为一对方向相反、能量为 0.511MeV 的 γ 光子。如果在这对光子飞行方向上对置一对探测器，便可以几乎同时接受到这两个光子，并可推定光子发源（即正电子发射）点在两探头间连线上。通过环绕 360°排列的多组配对探头，经探头对之间符合线路检验判定每只探头信号时间耦合性，排除其他来源射线的干扰，得到探头对连线上的一维信息，再用滤波反投射方式，将信号按探头对的空间位置向中心点反投射，便可形成与探头组连线轴平行的断层面正电子发射示踪剂分布图像。这种探测方式一次只反映一个层面的信息。实用中常用多层排列的探头对，配合层间符合线路，以利探测并重建更多层面的图像。PET/MRI 和 PET/CT 机器外形见图 9-5。



PET/MRI 机器外形图



PET/CT 机器外形图

图 9-5 PET/MRI 和 PET/CT 机器外形图

PET/CT 工作时，其 CT 的 X 射线管会产生 X 射线，日常运行时常用管电压为 80~120kV、管电流为 20~200mA。使用的正电子示踪剂属非密封放射性物质，本项

目显像用正电子核素特性见表 9-6。

表 9-6 本项目正电子核素特性一览表

核素种类	半衰期	衰变模式	α/β 最大能量 MeV	光子能量（MeV）	周围剂量当量率常数（裸源）μSv·m²/MBq·h
^{18}F	109.8min	β+，EC	0.63(+)	0.511	0.143
^{11}C	20.4min	β+，EC	0.96(+)	0.511	0.148
^{13}N	10.0 min	β+，EC	1.19(+)	0.511	0.148
^{64}Cu	12.7h	β^-；β+，EC	0.65(+)	0.511	0.029
^{89}Zr	78.4h	β+，EC	0.897	0.511	0.19
^{68}Ga	68.3 min	β+，EC	1.9 (+)	0.511	0.134

医院正电子药物由核医学科提前根据就诊病人预约情况确定药物使用量，使用回旋加速器进行生产，当回旋加速器出现故障时，向正规供应商购买药物。生产的放射性同位素自动进入合成分装热室内的合成柜并采用全自动化学合成，无工作人员参与，合成后由工作人员对放射性同位素合成液进行质检和分装，质检、分装后的药品由工作人员送至核医学科工作场所，然后等待病人注射，注射后的病人等待观察后进入 PET/CT 和 PET/MRI 机房进行显像。

（2）工作流程及产污环节分析

PET/MRI和PET/CT项目整体工艺及操作程序见图9-6。

1、医院根据患者预约情况，确定当天所使用的放射性核素及其剂量；

2、回旋加速器生产的放射性同位素自动进入热室合成柜并采用全自动化学合成，无工作人员参与，合成后由工作人员对放射性同位素合成液进行质检和分装，质检、分装后的药品由工作人员送至核医学科工作场所；当回旋加速器出现故障时，向正规供应商购买药物，并由其送回核医学工作场所；

3、医护人员为患者注射药物，注射后患者在候诊室停留一定时间后，进入机房进行扫描诊断。

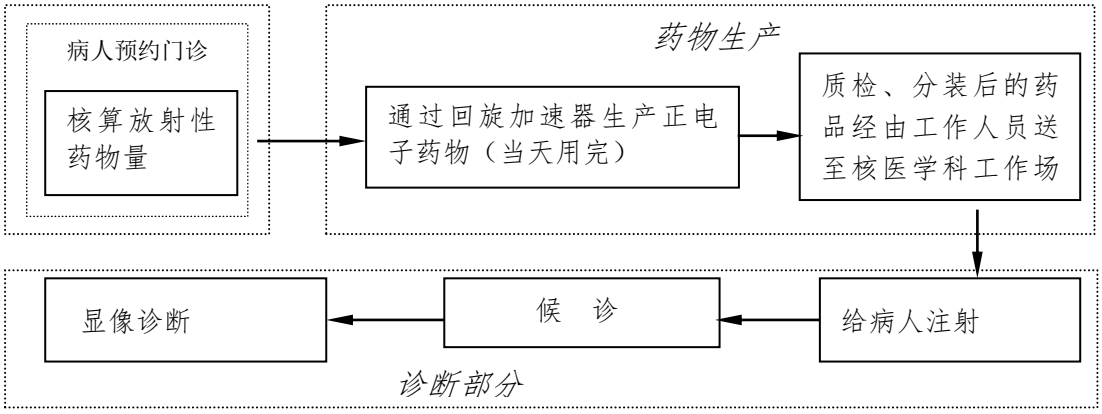


图 9-6 PET/MRI 和 PET/CT 诊断操作流程示意图

PET/MRI和PET/CT诊断部分具体工艺流程及产污环节见图9-7。

1、通过回旋加速器生产的放射性药物，通过质检、分装后的药品经药物工作人员送至核医学科工作场所；

2、给病人注射药物（静推给药）；

3、病人在注射后候诊室静坐候诊20～30分钟；

4、到PET/MRI和PET/CT检查床开始扫描（10～20分钟不等）；

5、图像后处理。

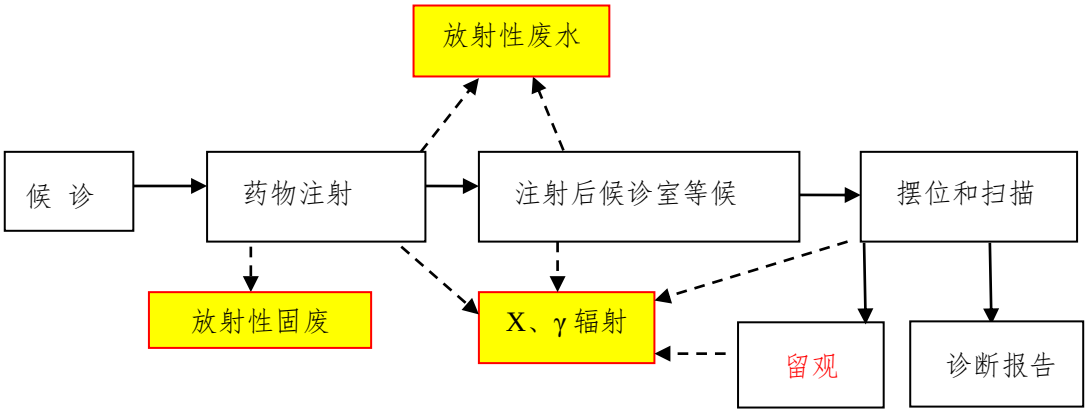


图 9-7 PET/MRI 和 PET/CT 诊断部分具体工艺流程及产污环节

1.3.2 SPECT/CT 项目

（1）工作原理

SPECT/CT 是单光子发射计算机断层成像技术的英文缩写（Single-Photon Emission Computed Tomography），是一种进行功能代谢显像的分子影像学设备，其工作原理是利用仪器探测人体内同位素的动态分布而成像，特点是可做功能、代谢方面的影像观察。SPECT/CT 不仅能显示二维平面图像，更主要的还能给出脏器的断

层图像。它实际上就是一个探头可以围绕病人某一脏器进行 360°旋转的 γ 相机，在旋转时每隔一定角度（3°或 6°）采集一帧图片，然后经电子计算机自动处理，将图像叠加，并重建为该脏器的横断面、冠状面、矢状面或任何需要的不同方位的断层和切面图像，利用专用的核医学应用软件，对断层图像和数据做进一步的分析和处理，为核医学医生提供更多更精确的信息和定量分析的数据，从而极大地提高了诊断的灵敏度和准确性。SPECT/CT 装置结合了诊断级多层 CT 的复合成像设备 SPECT/CT，可以精确定位病变的位置、性质和程度。

SPECT/CT 工作时，其 CT 的 X 射线管会产生 X 射线，日常运行时常用管电压为 80~120kV、管电流为 20~200mA。使用的单光子示踪剂属非密封放射性物质，本项目显像用核素特性见表 9-7。

表 9-7 本项目单光子核素特性一览表

核素种类	半衰期	衰变模式	α/β 最大能量 MeV	光子能量（MeV）	周围剂量当量率常数（裸源）μSv·m²/MBq·h
^{99m}Tc	6.02h	同质异能跃迁	-	0.14	0.0303
^{67}Ga	3.26d	EC	-	0.11	-
^{201}Tl	72.91h	EC	-	0.061	0.012
^{123}I	13.2h	EC	-	0.027， 0.159，0.529	0.061

SPECT/CT 药物由核医学科根据就诊病人预约情况确定药物使用量向医药公司预定，医药公司按约定的时间将单名病人用药量分装成针剂后配送至核医学科注射室，该院核医学科不自行分装药物。

（2）工作流程及产污环节分析

SPECT/CT项目整体工艺及操作程序见图9-8。

1、医院根据患者预约情况，确定当天所使用的放射性核素及其剂量；

2、医院向专业医药公司预订放射性药物，医药公司按照医院要求在规定时间内将药物按医院要求分装后送到医院；

3、医护人员为患者注射药物，注射后患者在候诊室停留一定时间后，进入机房进行扫描诊断。

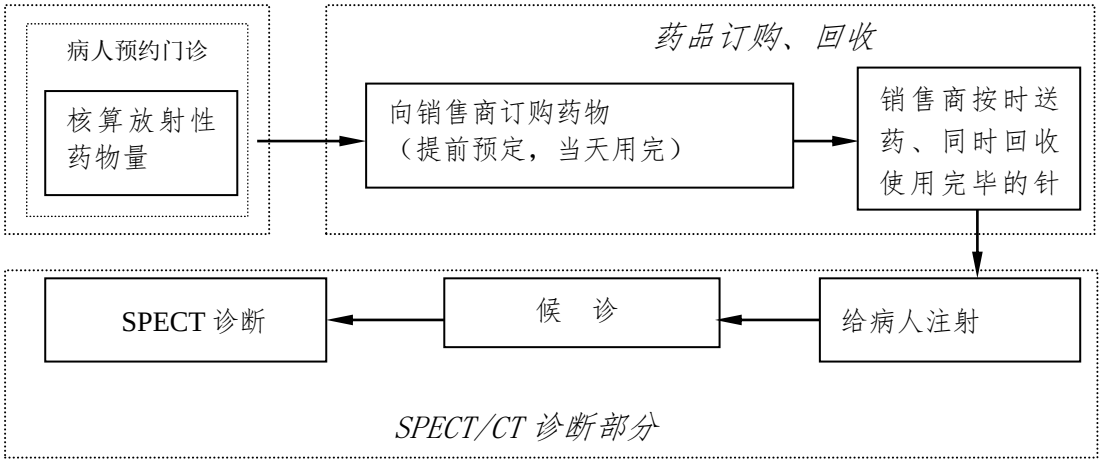


图 9-8 SPECT 项目诊断操作流程示意图

SPECT/CT诊断部分具体工艺流程及产污环节见图9-9。

1、购置的药物在医药公司分装好后送至核医学科；

2、给病人注射药物（静推给药）；

3、病人在注射后候诊室静坐候诊约20～30分钟；

4、到SPECT/CT检查床开始扫描（10～20分钟不等）；

5、图像后处理。

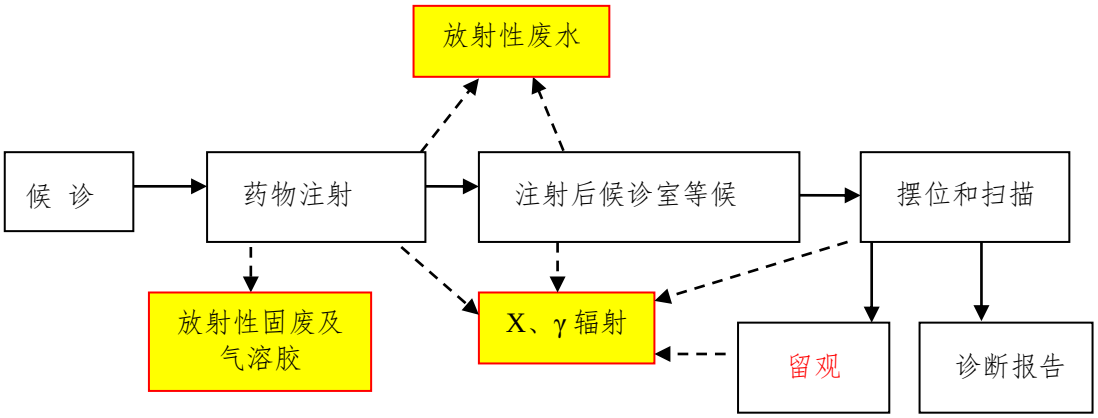


图 9-9 SPECT/CT 诊断部分具体工艺流程及产污环节

1.4 核素治疗

1.4.1 放射性核素治疗工作原理

一些放射性核素在衰变过程中，可释放出 α 射线或 β 射线等，具有较强的电离辐射效应，对于肿瘤细胞或异常增殖组织等具有较强的杀灭作用。放射性核素治疗就是指利用具有治疗作用的放射性核素，如 ^{131}I、^{90}Sr、^{177}Lu、^{223}Ra 等核素或标记药物以及 ^{32}P 敷贴片等，近距离精准杀伤病变细胞和组织，达到治疗的目的。

放射性核素治疗主要有内照射、粒子或玻璃微球治疗、体外敷贴和硼中子俘获治疗等方法。素治疗的主要适应证为恶性肿瘤和其他异常增殖性病变，如甲状腺机能亢进症、血管瘤、瘢痕、结节等。每一种诊治项目都有不同的适应证，如 ^{131}I 治疗的适应证有甲状腺功能亢进和分化型甲状腺癌等，^{177}Lu 奥曲肽的适应证为生长抑素受体高表达的神经内分泌肿瘤等，具体需参看不同的项目。

其中内照射治疗主要是摄入或注射具有治疗作用的核素或核素标记分子，这些分子将在病变靶细胞和组织高度聚集，利用放射性核素释放出来的 α 射线或 β 射线等，近距离精准杀伤病变细胞和组织，达到治疗目的。其中适合于治疗用的 β 放射性核素有 ^{131}I、^{90}Sr、^{177}Lu 等，适合于治疗用 α 放射性核素仅有 ^{213}Bi、^{225}Ac、^{212}Bi、^{223}Ra、^{211}At、^{149}Tb 和 ^{227}Th 等。其中 $^{89}SrCl_2$、^{153}Sm-EDTMP、^{188}Re-HEDP 主要用于治疗骨转移肿癌，这些药物均具有趋骨性、在骨组织代谢活跃的部分浓聚更多，静脉注射后骨转移肿瘤病灶呈明显的浓聚，利用这些趋骨性放射性药物发射的 β 射线对肿瘤进行内照射，达到止痛、抑制或破坏骨转移肿瘤病灶。^{177}Lu-PSMA、^{225}Ac-PSMA 可用来治疗转移性去势抵抗性前列腺癌（mCRPC）。由于 ^{223}Ra 具有趋骨性，^{223}Ra 的二氯化物 $^{223}RaCl_2$ 为一种可发射 α 射线的新型放射性药物，可用来治疗前列腺癌骨转移。

体外敷贴治疗一般使用发射 β 射线的放射性核素，如 ^{32}P、^{90}Sr 或 ^{90}Y，将其均匀吸附于滤纸或银箔上，按病变大小和形状制成专用的敷贴器，紧贴于病变表面，对体表病变进行外照射，经电离辐射作用，而达到治疗效果。主要适用于皮肤血管瘤、瘢痕疙瘩、顽固性湿疹和局限性神经性皮炎等疾病的治疗。其中 ^{90}Sr- ^{90}Y 敷贴器为成品供应的放射源，治疗首先根据患者情况，确定治疗剂量后，病人在专用的敷贴治疗室内接受敷贴治疗，将敷贴器持续的放在病人病灶部位，一次或分次完成疗程总剂量。

本项目拟使用的放射性治疗核素 ^{177}Lu、^{89}Sr、^{223}Ra、^{188}Re、^{153}Sm 均为针剂注射，^{90}Sr（^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器）为片状，直接敷贴在皮肤表面，各核素特性见表 9-8。

表 9-8 放射性核素性质一览表

核素	半衰期	衰变类型	α/β 最大能量 MeV	光子能量（MeV）	周围剂量当量率常数（裸源）μSv·m²/MBq·h
^{89}Sr	50.53d	β^-	0.5846	-	-
^{188}Re	17.0h	β^-	2.120	0.155	0.007
^{153}Sm	46.5h	β^-	0.2652	0.042，0.047，0.103	0.072
^{177}Lu	6.73d	β^-	0.2058	0.2084	0.00517
^{223}Ra	11.44d	α	5.871（α） 0.427（β）	0.0117	-
^{90}Sr	28.79a	β^-	0.546	-	-

根据上述核素一览表的核素特性可知，本项目用于治疗的放射性核素均为 α 放射性核素及 β 放射性核素，其中 α 粒子的射程一般在 50~90um，约为 10 个细胞直径的距离，β 射线在生物组织内的射程为 1~10mm，因此治疗用核素的外照射影响可以忽略，主要考虑其对辐射工作场所周围的内照射影响。

1.4.2 ^{89}Sr、^{188}Re、^{177}Lu、^{153}Sm 及 ^{223}Ra 放射性核素治疗工作流程

核素治疗项目使用核素主要包括 ^{131}I 、^{177}Lu、^{89}Sr、^{223}Ra、^{188}Re、^{153}Sm 和 ^{90}Sr（^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器）。核素治疗场所新建 10 间房间，其中最北侧为 ^{177}Lu 专用病房，5 间为 ^{131}I 核素治疗病房，4 间为预留用房，每个病房设置一张病床；为了使甲癌病房与非甲癌病房隔开，在进入甲癌病房区域的走廊上设置有门禁。医院核素治疗场所中 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{188}Re、^{153}Sm 门诊量较少，医院根据病人数量进行预约治疗，治疗时间在周六开展；于每周一开展甲癌、甲亢和 ^{177}Lu 核素治疗。

本项目 ^{89}Sr、^{188}Re、^{177}Lu、^{153}Sm 及 ^{223}Ra 核素治疗均采用针剂注射方式给药进行治疗，医院拟根据与病人预约情况提前向药物供货商订药，药物供货商按照医院要求在规定时间内将按要求分装好的针剂送到医院高活室，辐射工作人员叫号患者在注射窗口给患者注射，患者注射后如无异常即可离开。

^{89}Sr、^{188}Re 、^{153}Sm、^{223}Ra 均用于骨转移治疗。医院预计每名患者所使用 ^{89}Sr 的活度约为 1.85E+08Bq（5mCi）左右，年门诊量约为 72 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 3 次，每次约诊 2 人。医院预计每名患者所使用 ^{153}Sm 的活度约为 1.85E+08Bq（5mCi）左右，年门诊量约为 72 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 3 次，每次约诊 2

人。医院预计每名患者所使用 ^{188}Re 的活度约为 9.25E+08Bq（25mCi）左右，年门诊量约为 12 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 1 次，每次约诊 1 人。

医院预计每名患者所使用 ^{223}Ra 的活度约为 5.55E+06Bq（0.15mCi）左右，年门诊量约为 36 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每月开展治疗 3 次，每次约诊 1 人。

^{177}Lu 用于前列腺癌治疗。医院预计每名患者所使用 ^{177}Lu 的活度约为 7.4E+09Bq（200mCi）左右，年门诊量约为 50 人，由于门诊量较少，医院根据病人数量进行约诊治疗，计划每周开展治疗 1 次，每次约诊 1 人。

本项目 ^{89}Sr、^{188}Re、^{153}Sm 及 ^{223}Ra 核素治疗工作流程及产污环节分析见图 9-10，^{177}Lu 核素治疗工作流程及产污环节分析见图 9-11。

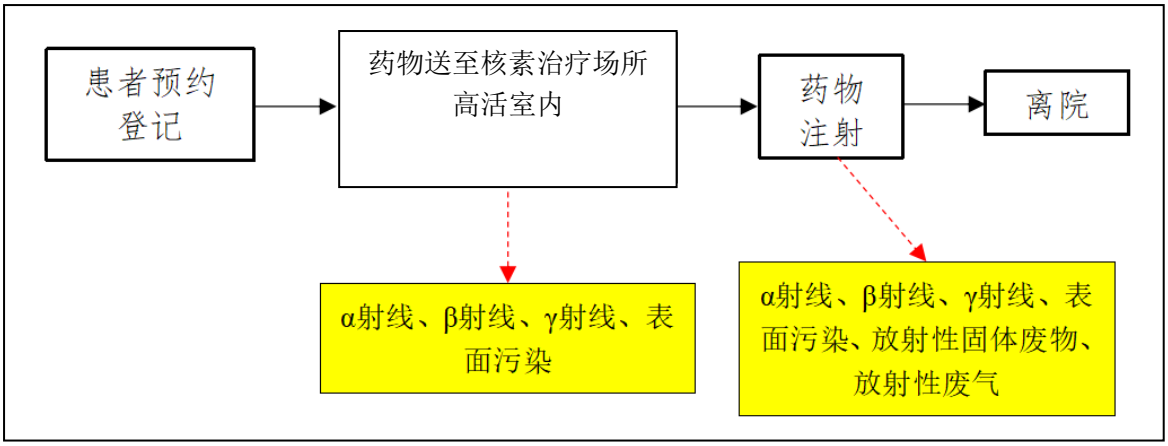


图9-10 ^{89}Sr、^{188}Re、^{153}Sm及^{223}Ra核素治疗工作流程及产污环节

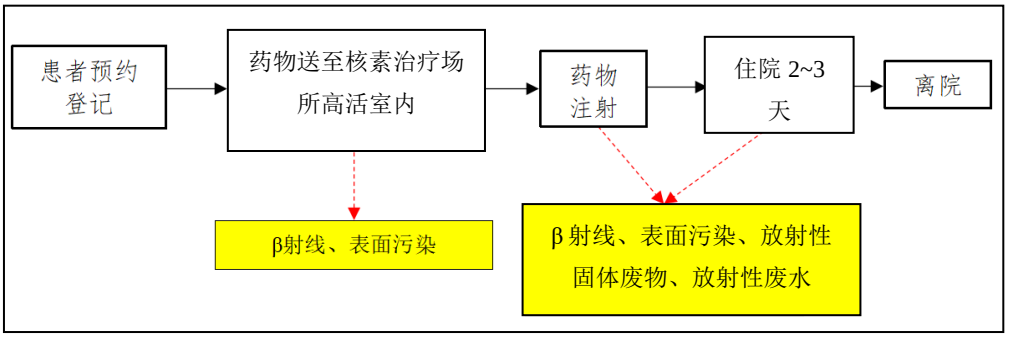


图9-11 ^{177}Lu核素治疗工作流程及产污环节图

1.4.3 敷贴治疗工作流程

本项目用于敷贴治疗的锶钇敷贴器是活度为 9.25E+08Bq 的密封面源，为V类密封放射源。不使用时贮存在敷贴室一角的贮源保险箱柜内。医院根据患者情况，确定治疗剂量后，病人在负二层专用的敷贴治疗室内接受敷贴治疗，医生手持 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴

器，将敷贴器持续的放在病人病灶部位，一次或分次完成疗程总剂量。治疗完毕后病人即可离院。医院预计每年 ^{90}Sr-^{90}Y 发生器的治疗门诊约为 200 人。

1.4.4 甲亢和甲癌治疗项目工作流程

^{131}I 主要用于甲状腺方面疾病的治疗。I 是合成甲状腺激素的物质之一，甲状腺细胞通过钠/碘共转因子克服电化学梯度从血循环中浓聚 ^{131}I。因此，甲状腺疾病患者口服的 ^{131}I 药剂大都聚集在甲状腺内；^{131}I 衰变发射的 β 射线在组织内平均射程仅为 1mm，因此 β 粒籽的能量几乎全部释放在甲状腺组织内，对甲状腺周围的组织和器官影响较小。甲亢患者，如给予适当剂量的 ^{131}I，则可利用其放射性“切除”部分甲状腺组织而又保留一定量的甲状腺组织，达到治疗目的，使甲状腺功能恢复正常。对于甲癌患者，给予大剂量 ^{131}I，能够消除手术残留的甲状腺组织，减少复发和转移；^{131}I 治疗后，随访变得十分容易和灵敏可靠，测量血里的甲状腺球蛋白（Tg）及 B 超、X 线检查就可以监测有无复发和转移；^{131}I 治疗甲状腺癌转移灶具有高度的靶向性，副作用小，效果好。^{131}I 核素特性见表 9-9。

表 9-9 放射性核素特性一览表

核素种类	半衰期	衰变模式和分支比	α/β 最大能量 MeV	光子能量（MeV）	周围剂量当量率常数（裸源）μSv·m²/MBq·h
^{131}I	8.02d	β^-（100%）	0.602	0.284,0.365, 0.637	0.0595

医院采取预约登记方式开展 ^{131}I 核素治疗，先开展甲亢治疗，再开展甲癌治疗。本项目甲亢治疗的单次口服剂量不超过 3.70E+08Bq，小于 GBZ120 要求的 400MBq 住院剂量，病人可以在服药窗口口服 ^{131}I 药物后直接离开。甲癌治疗患者单次给药剂量在 150mCi 左右，一般住院 3~5 天。本项目甲癌病人日收治量为 5 人，医院计划每周二集中预约甲癌病人在服药室服药。供货商将药物送至甲亢高活室自动分装仪内，医务人员远程操控自动分装仪对药物进行分装，患者在服药窗口服药后进入甲癌病房住院，住院治疗期间活动仅限于甲癌病房、卫生间及患者走廊，医院拟在配餐室内设置递窗口用于配餐。

由于甲癌患者的甲状腺大部分或者全部切除，其对碘的摄取量非常低，大部分碘由大小便及汗液排出，因此，在核素半衰期及生物半排期同时作用下，病人体内的 ^{131}I 约一天时间即只剩一半（见参考资料 7《分化型甲状腺癌患者的 ^{131}I 有效半衰期》），约住院 5 天后体内 ^{131}I 药物活度小于 3.70E+08Bq，即可以出院。病人住院期间，保洁人员不对病房内进行清扫，待病人出院后再对房间进行清扫，清扫的被服等

物品收集后放入北侧的被服间贮存衰变。

本项目 ^{131}I 药液购自有资质的专业供货商并由其运输至分装室。到货时为装入铅套内的整罐药液，需要由医护人员按病人所需活度进行分装和质控，为进一步减少大剂量 ^{131}I 对医护人员的辐射影响，医院拟采用放射性药物自动分装仪进行分装，工作流程如下：

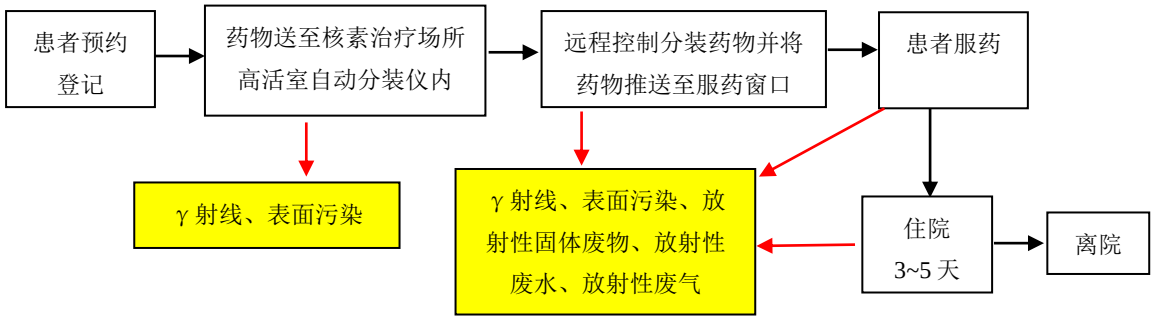


图9-12 ^{131}I核素治疗工作流程及产污环节图

1.5 工作场所等级

根据核医学科布局平面布置（见附图 13）可知，该核医学科的核素显像诊断工作场所、核素治疗工作场所和回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所相对分开布置。诊断区域设置了注射前候诊室、高活室、控制室、机房、注射后候诊室、留观室等功能用房，核素治疗区域设置了给药室、高活室、病房、被服室等功能用房，且两个区域都设置了清洁用品间、设有淋浴和检测功能的卫生通过间、抢救室、放射性废物储存间等辅助用房。回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所包括回旋加速器机房、控制室、热室、质控室、小动物 PET/CT 机房等。这三大区域有各自独立的出入口，且与其他功能用房之间有明显物理隔断，可划分明确的监督区和控制区范围，且设计有独立辐射防护措施，故根据《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)的有关规定，本项目核医学科工作场所分为 3 个独立场所，即回旋加速器生产电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所、核素显像诊断场所、核素治疗场所。核医学科放射性核素日使用量及年使用量见表 9-10。

表 9-10 核医学科放射性核素日使用量及年使用量

场所	核素	单次生产/单只动物实验/单人使用量（Bq）	日最大次数/小鼠/门诊量	日最大操作量（Bq）	年最大次数/门诊量	年最大用量（Bq）
回旋加	^{18}F					

速器生产场所	
动物 PET/CT 影像实验场所	
核素显像诊断场所	
核素治疗场所	

通过查阅 GB18871-2002 得到各核素的毒性组别及使用因子，根据核素的日最大操作量，经过毒性组别及使用因子的双重修正，得到最终的工作场所分级。计算结果见表 1-2，回旋加速器生产电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所日等效最大操作量为 4.69E+08Bq，核素显像诊断场所日等效最大操作量为 4.89E+07Bq，核素治疗场所日等效最大操作量为 3.89E+09Bq，均属于 GB18871-2002 中乙级非密封放射性物质工作场所范围（2E+7Bq~4E+9Bq）。

2 放疗科项目

2.1 直线加速器项目

2.1.1 工程设备

医院在浒关院区二期地下放疗科内新建五座加速器机房，并购置 5 台直线加速器（型号未定）用于肿瘤放射治疗。直线加速器项目主要由加速器、加速器机房、控制室、水冷机房等组成。加速器机房则由治疗室、迷路和防护门组成。加速器结构见图 9-13，加速器外观见图 9-14。医院拟购置医用直线加速器技术参数见下表。

表 9-11 本项目直线加速器技术参数

加速器型号	待定
能量	X 射线（MV）：≤15；电子线（MeV）：≤22
距靶 1m 处剂量率	X 射线：≤1400cGy/min；电子线：≤2400cGy/min
射线最大出射角	28°（等中心点每侧 14°）
源轴距 SAD	1m
最大照射野大小	40cm×40cm
等中心点至机房地坪的高度	1.3m
机架旋转	±180°
靶材料	钨合金
年开机时间	≤500h

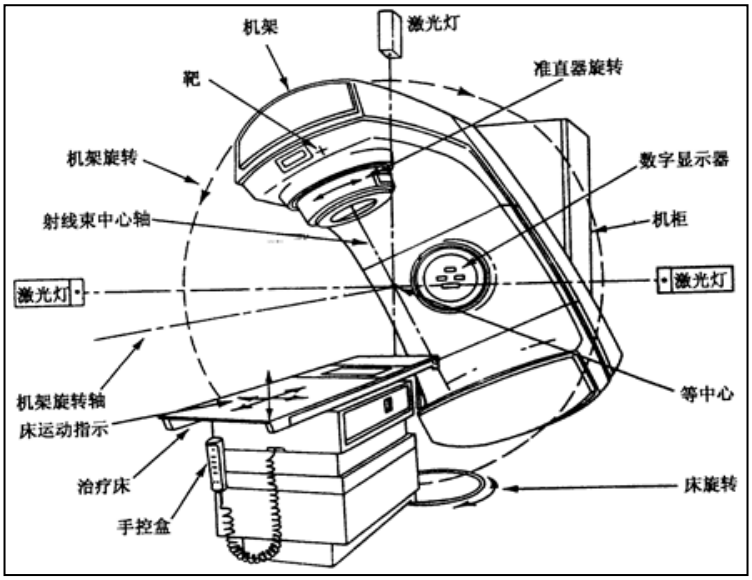


图 9-13 加速器结构图



图 9-14 加速器外观图

2.1.2 工作原理

医用直线加速器通常是以磁控管为微波功率源的驻波型直线加速器，它的结构单元为：加速管、电子枪、微波系统、调制器、束流传输系统及准直系统、真空系统、恒温水冷系统和控制保护系统。电子枪产生的电子由微波加速波导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子束由电子窗口射出，通过 2cm 左右的空气射到金属钨靶，产生大量高能 X 线，经一级准直器和滤线器形成剂量均匀稳定的 X 线束，再通过监测电离室和二次准直器限束，最后到达患者病灶实现治疗目的。

2.1.3 工作流程及产污环节分析

本项目加速器的工作流程及产污环节示意见下图。

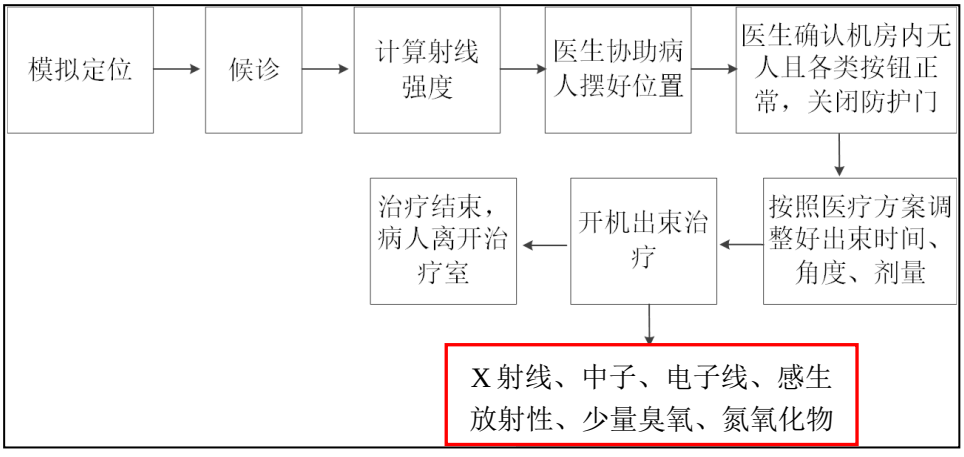


图 9-15 加速器项目作业流程及产污环节示意图

1）模拟定位：先通过模拟定位机对患者的病变部位进行详细检查，然后确定照射的方向、角度和射野大小，拍片定位；

2）候诊登记：对已做模拟定位检查的患者进行登记候诊；

3）计算射线强度：根据患者疾病性质、部位和大小确定照射剂量和照射时间；

4）摆位准备：在利用加速器进行治疗时需对患者进行定位、标记，调整照射角度及视野；

5）实施照射：根据已制定的诊疗计划，实施照射；照射过程加速器开机会产生的 X 射线、电子线对治疗室外工作人员、公众及周围环境有一定的辐射影响； X 射线能使加速器机房内空气分子发生电离，产生的少量有害气体臭氧和氮氧化物。

6）治疗结束。

7）加速器工作人员进行肿瘤放射治疗时正常的开机治疗程序为：

①核对病人的姓名和治疗数据，仔细按治疗单要求摆位，除病人外全部离开治疗室，关闭治疗室门；

②选择运行模式；

③输入治疗参数；

④确认后开始治疗；

⑤治疗中通过电视屏幕监视病人情况和机器运行情况，一旦发现异常，立即停机、停束等妥善措施，及时报告维修、物理人员，做好记录。

2.2 射波刀项目

2.2.1 工程设备

医院在浒关院区二期地下放疗科内新建一座射波刀机房，并购置 1 台射波刀（型号未定）用于肿瘤放射治疗。射波刀项目主要由射波刀、射波刀机房、控制室、水冷机房等组成。射波刀机房则由治疗室、迷路和防护门组成。射波刀外形结构示意图见图 9-16，射波刀出束治疗示意图见图 9-17。医院拟购置射波刀技术参数见下表。

表 9-12 本项目射波刀技术参数

参数	性能指标
型号	待定
治疗射线	X 射线（MV）：≤6MV；无电子线
距靶 0.8m 处 X 辐射剂量率	≤10Gy/min
源轴距 SAD	0.8m
成像中心到地面的距离	0.92m
最大照射野	10cm×11.5cm

泄漏辐射	＜1E-3
机械臂运动角度	除向上方向外，机械臂端加速器可从任何角度将射线束投向靶区。射线束向上照射的最大角度 23.8°（即与水平夹角 23.8°）
X 射线球管	2 个、管电压≤150kV、管电流≤1000mA

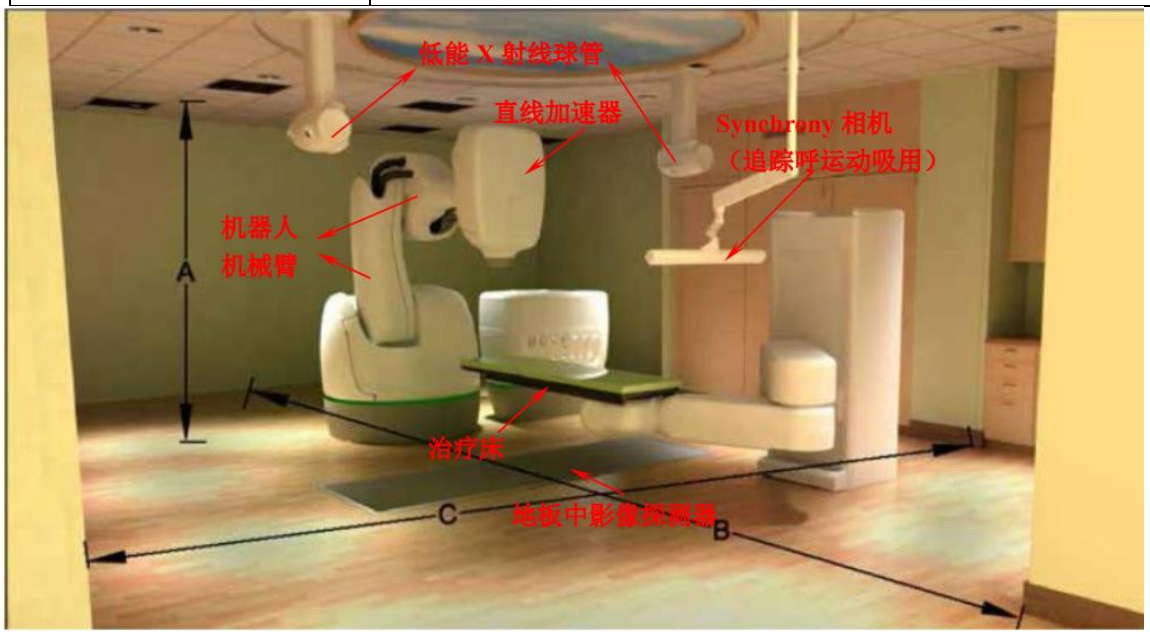


图 9-16 射波刀外形结构示意图

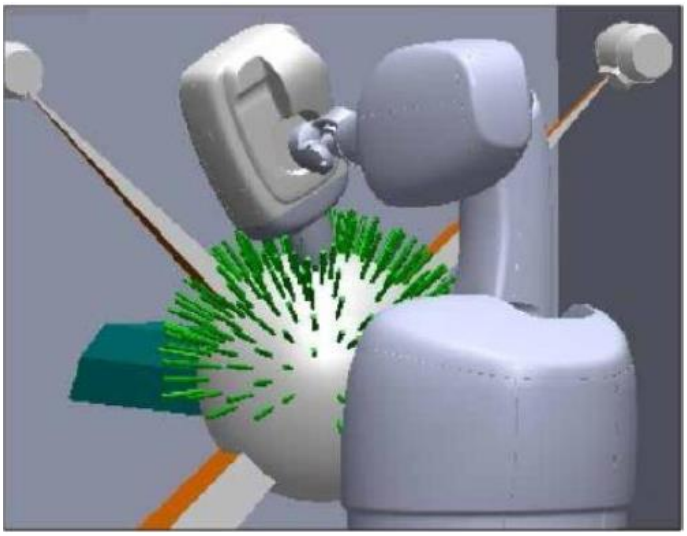


图 9-17 射波刀出束治疗示意图

2.2.2 工作原理

Cyber Knife（中文译名射波刀或赛博刀）是一种新型立体定向放射治疗装置，由美国 Stanford 大学医疗中心脑外科与 Accuray（安科锐）公司合作研发，1994 年投入使用。它集影像引导系统和高准确性的治疗系统于一身，将一个 6MV X 射线的轻型电子直线加速器安放在一个有 6 个自由度的机械臂上，利用机械臂的全向投照能力对肿瘤进行精确地、非共面和多中心的放射治疗。射波刀结构包括：

（1）直线加速器（Linear accelerator）：射波刀使用一个紧凑型、能产生能量为6MV 的 X 射线的轻型直线加速器，直线加速器安装在由机器人控制的机械臂上。该直线加速器配有 12 个准直器，准直器直径从 5mm 到 60mm。

（2）机器人机械臂(Robot arm)：机器人机械臂头端上安装有直线加速器，它带动直线加速器围绕患者在前、后、左、右、上、下六度空间自由转动，按照计算机预设的路线，机械臂可将直线加速器调整到最多两百余个位置（或节点），在每个节点处可以从 12 个角度投照射线，因此提供多达最多三千个方位发出射线。每到一个预设治疗点，机械臂停止运动，直线加速器对准靶区投照相应的放射剂量。

（3）治疗床（treatment table）：射波刀的治疗床也由机器人控制，可以在六度空间自由移动。

（4）靶区定位（影像）追踪系统 (target localization system)：与传统放射外科使用立体定向架固定患者头部以确保射线精确投照不同，射波刀使用人体骨骼结构作为参考框架，颅内病灶与颅骨之间产生固定的对应关系。靶区定位（影像）追踪系统是利用天花板上安装的两组诊断 X 射线球管和安装于地板平面下的影像探测器组成。两组 X 射线球管发出的低能 X 线相互垂直，交叉穿过头颅（或患者肿瘤的治疗部位），影像探测器获得颅骨的数字图像，并将影像资料传输到数据处理系统（imAge processing system，IPS），计算机与事先 CT 扫描获得的颅骨数字重建图像(DDR)相比较，首相先确定颅骨的精确位置，然后得出治疗靶目标（病灶）的精确位置。靶区定位追踪系统使用 4 套计算机软件，治疗颅内病变时，使用 6 维颅骨追踪软件；治疗脊髓、脊柱及其周围肿瘤时，使用 Xsight Spine(脊柱追踪软件）；治疗部分周围型肺癌时，使用 X sight Lung(肺部追踪软件)；治疗随呼吸运动的肿瘤时或需要埋置金标时，使用金标追踪和呼吸追踪系统。

（5）治疗计划系统：治疗计划系统由计算机工作站和 Multiplan 治疗计划软件组成。病人治疗前，先作 CT 定位，将定位影像传输到计算机内。医生先勾画出计划治疗的肿瘤和重要器官，然后设置中心点，最后选择准直器并给出肿瘤和重要器官的剂量要求，计算机能自动设计一个满足设定条件、适形满意、剂量分布均匀、照射范围与肿瘤形状几乎吻合的治疗计划。根据治疗的需要，医生可设计单次治疗，也

可设计分次治疗。射波刀治疗计划系统不仅具有常规的正向治疗计划，而且还有任意形状逆向治疗计划。正向治疗计划是医生根据病灶的大小和形状，选择相应的准直器和照射方式逐步设计出一个和病灶形状几乎一样的照射形状，然后给出周边剂量和中心剂量。逆向治疗计划是医生先勾画出计划照射的靶区以及给出靶区和重要器官的剂量要求，计算机自动设计一个满足设定条件的治疗计划。

（6）呼吸追踪系统：当治疗肺部肿瘤或受呼吸运动影响的肿瘤（肝癌、胰腺肿瘤等）时，肿瘤随着病人的呼吸而上下左右运动。治疗这些体部肿瘤之前，需要向肿瘤内或周围放置金标（由黄金制成的，长 5mm，直径 0.8mm 的圆柱体称为金标），金标放置 5-7 天后才能实施射波刀治疗。呼吸追踪是让病人穿上胸前带有发红光二极管的背心，呼吸追踪摄像机通过捕捉二极管的运动获得肺部的呼吸运动节律，计算机建立呼吸模型。治疗时，通过追踪金标的位置获得肿瘤的精确位置，同时计算机根据呼吸节律，自动微调机器人机械臂，让射线始终精确瞄准病灶。

（7）计算机网络集成与控制系统：射波刀拥有一个计算机工作站（SGI），SGI 计算机通过网络控制机器人机械臂、控制直线加速器何时投照射线、治疗床的移动和治疗靶区位置的追踪。此外，治疗时获得的骨骼图像与定位图像的自动比对均在 SGI 计算机掌控下自动进行。

2.2.3 工作流程及产污环节分析

射波刀放疗工作流程如下：

（1）定位扫描：通过 CT 对病变部位进行扫描，用于确定肿瘤的精确位置。

（2）治疗计划：根据之前定位 CT 图像等，主治医师勾画靶区，选择合适的追踪模式，选择准直器的大小、射线强度、靶区范围、剂量分布、治疗剂量和其它参数，计算机能自动设计一个满足设定条件、适形满意、剂量分布均匀、照射范围与肿瘤形状几乎吻合的治疗计划。治疗计划设计完毕，将治疗计划保存并传输到射波刀主控计算机。

（3）靶区定位：患者平卧并固定在治疗床上，其余人员撤离射波刀机房，关闭大门。影像系统采集靶区的实时影像，并与治疗计划系统的治疗影像进行比对，找到靶区方位误差。工作人员通过电脑操作，移动治疗床，使实时影像与治疗影像完全拟合。此时计算机获得了患者病灶的初步方位。

（4）射线治疗：机械臂将直线加速器旋转到初始坐标位，然后按照程序将加速器围绕着患者旋转到预定节点。直线加速器每到一个节点，机械臂停止运动，此时靶区定位追踪系统立刻获得新的靶区影像，计算机确认目前的靶区影像与治疗开始时影像完全一致。如果病人靶区有轻微的移动，靶区定位追踪系统立刻计算出移动造成的偏差，并将此偏差传输到机器人机械臂，机械臂微调加速器的方位或射线的入射角度，最后加速器将所需的剂量精确投射到病灶内。如果患者的移动超过计算机自动调整的范围，治疗会紧急暂停（E-stop）。加速器每到一个预定节点，将重复上述影像实时验证步骤。在治疗过程中，X 射线球管每 10 秒钟发射一次，靶区影像追踪系统获取一次影像信息。从摄像到调整数据只需要几秒钟，射波刀基本上做到了在治疗过程中实时跟踪治疗靶区。根据病情需要射波刀可将单次治疗变成多次分割治疗。

（5）治疗结束：加速器完成治疗，机器人回到停车位。工作人员打开防护门，护理人员将病人送出射波刀机房。

射波刀在放射治疗应用中，采用非等中心且从不同方向，以上千个小的圆形照射野（直径一般为 1.5cm）照射肿瘤部位，主射束会照射到射波刀机房的所有墙面上。射波刀放疗工作流程及产污环节示意图见下图。

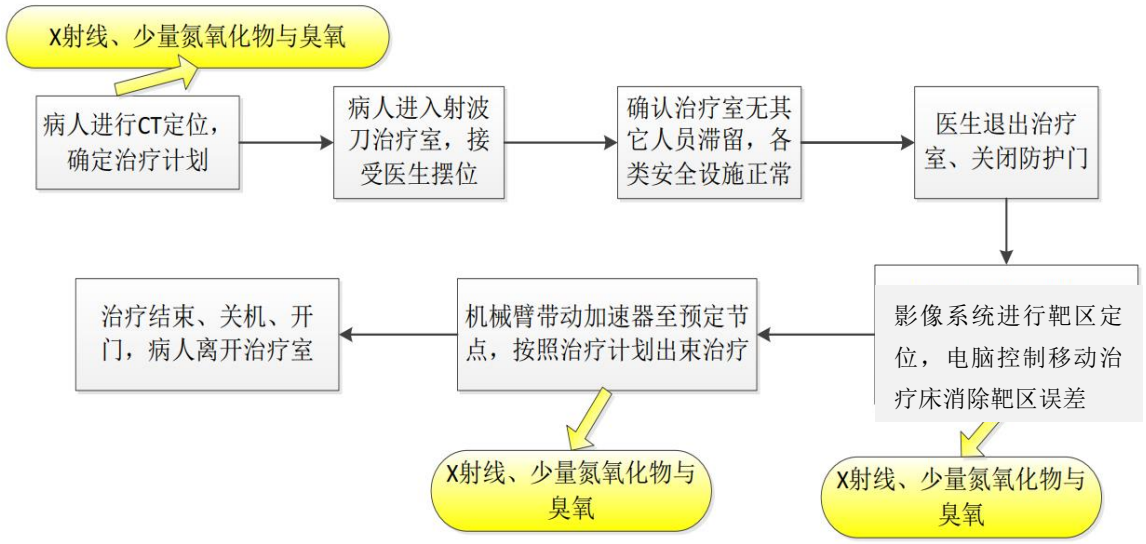


图 9-18 射波刀工作流程及产污环节示意图

2.3 CT 模拟定位机

医院拟在放疗科内新建两座 CT 模拟定位机房，配备 2 台 CT 模拟定位机，设备型号未定，设备管电压最大为 140kV，管电流最大为 800mA。CT 模拟定位机主要用于患者肿瘤定位，使用过程中会产生 X 射线。

3 DSA 项目

3.1 设备组成

医院在浒关院区二期住院楼三层介入治疗中心内新建四间 DSA 手术室，医院计划配备 4 台 DSA（型号未定，管电压≤125kV，管电流≤1000mA），用于介入治疗和诊断。DSA 因其整体结构像大写的“C”，因此也称作 C 型臂 X 光机，DSA 设备主要由 X 射线发生系统、影像增强接收器和显示系统、影像处理和系统控制部分、机架系统和导管床、影像存储和传输系统、防护屏及防护铅帘等构成。数字减影血管造影（DSA）是通过电子计算机进行辅助成像的血管造影方法，是 70 年代以来用于临床的一种崭新的 X 射线检查技术，是应用计算机程序两次成像完成的，DSA 外观见下图。

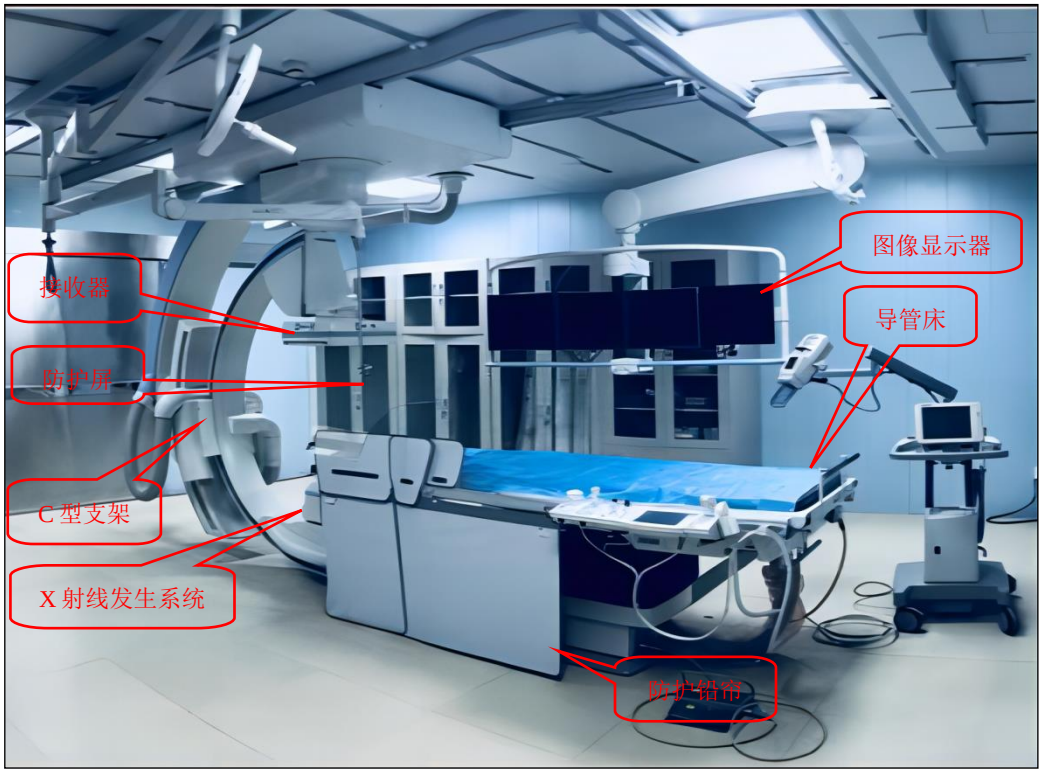


图 9-19 数字减影血管造影机外观图

表 9-13 DSA 技术参数

型号	待定（单球管）
最大管电压	≤125kV
最大管电流	≤1000mA
主射线方向	主射线朝上照射
滤过	固有滤过≥2.5mmAl、附加滤过≥0.5mmCu

照射野	最大照射野：30cm×30cm
焦皮距	＞20cm

DSA 配套设备配置情况见表 9-2。

表 9-14 DSA 配套设备一览表

序号	名称	数量	用途	位置
1	电源柜	4 套	DSA 配电	设备间
2	高压发生柜	4 套	DSA 高压装置	设备间
3	系统控制柜	4 套	设备控制	设备间
4	控制系统	4 套	DSA 设备操作	控制室

3.2 工作原理介绍

数字减影血管造影技术是常规血管造影术和电子计算机图像处理技术相结合的产物。DSA的成像基本原理为：将受检部位没有注入造影剂和注入造影剂后的血管造影X射线荧光图像，分别经影像增强器增益后，再用高分辨率的电视摄像管扫描，将图像分割成许多的小方格，做成矩阵化，形成由小方格中的像素所组成的视频图像，经对数增幅和模/数转换为不同数值的数字，形成数字图像并分别存储起来，然后输入电子计算机处理并将两幅图像的数字信息相减，获得的不同数值的差值信号，再经对比度增强和数/模转换成普通的模拟信号，获得了去除骨骼、肌肉和其他软组织，只留下单纯血管影像的减影图像，通过显示器显示出来。通过DSA处理的图像，使血管的影像更为清晰，在进行介入手术时更为安全。DSA系统结构图见图9-20。

介入治疗具有不开刀、创伤小、恢复快、效果好的特点，目前，基于数字血管造影系统指导的介入治疗医生已能把导管或其他器械，介入到人体几乎所有的血管分支和其他管腔结构（消化道、胆道、气管、心脏等），以及某些特定部位，对许多疾病实施局限性治疗。

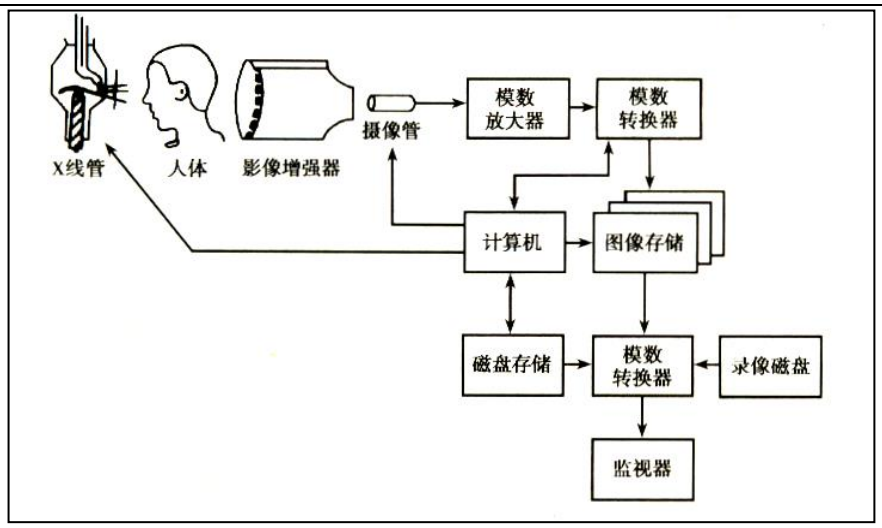


图 9-20 DSA 系统结构图

3.3 工作流程及产污环节分析

患者进行DSA诊断和在DSA引导下进行介入治疗时，先仰卧进行无菌消毒，局部麻醉后，经皮穿刺动脉，送入引导钢丝及扩张血管与外鞘，退出钢丝及扩张管将外鞘保留于静脉内，经鞘插入导管，推送导管，在X线透视下将导管送达静脉，顺序取血测定静、动脉，并留X线片记录，探查结束，撤出导管，穿刺部位止血包扎。DSA在进行曝光时分为两种情况：

第一种情况（拍片）：操作人员采取隔室操作的方式（即操作医师在控制室内对病人进行曝光），医生通过铅玻璃观察窗和操作台观察手术室内病人情况，并通过对讲系统与病人交流。

第二种情况（透视）：医生需进行手术治疗时，为更清楚的了解病人情况时会有连续曝光，并采用连续脉冲透视，此时操作医师位于铅屏风后身着铅服、戴铅眼镜等在曝光室内对病人进行直接的手术操作。

本项目DSA工作流程及产污环节（医疗废物无放射性）如下图：

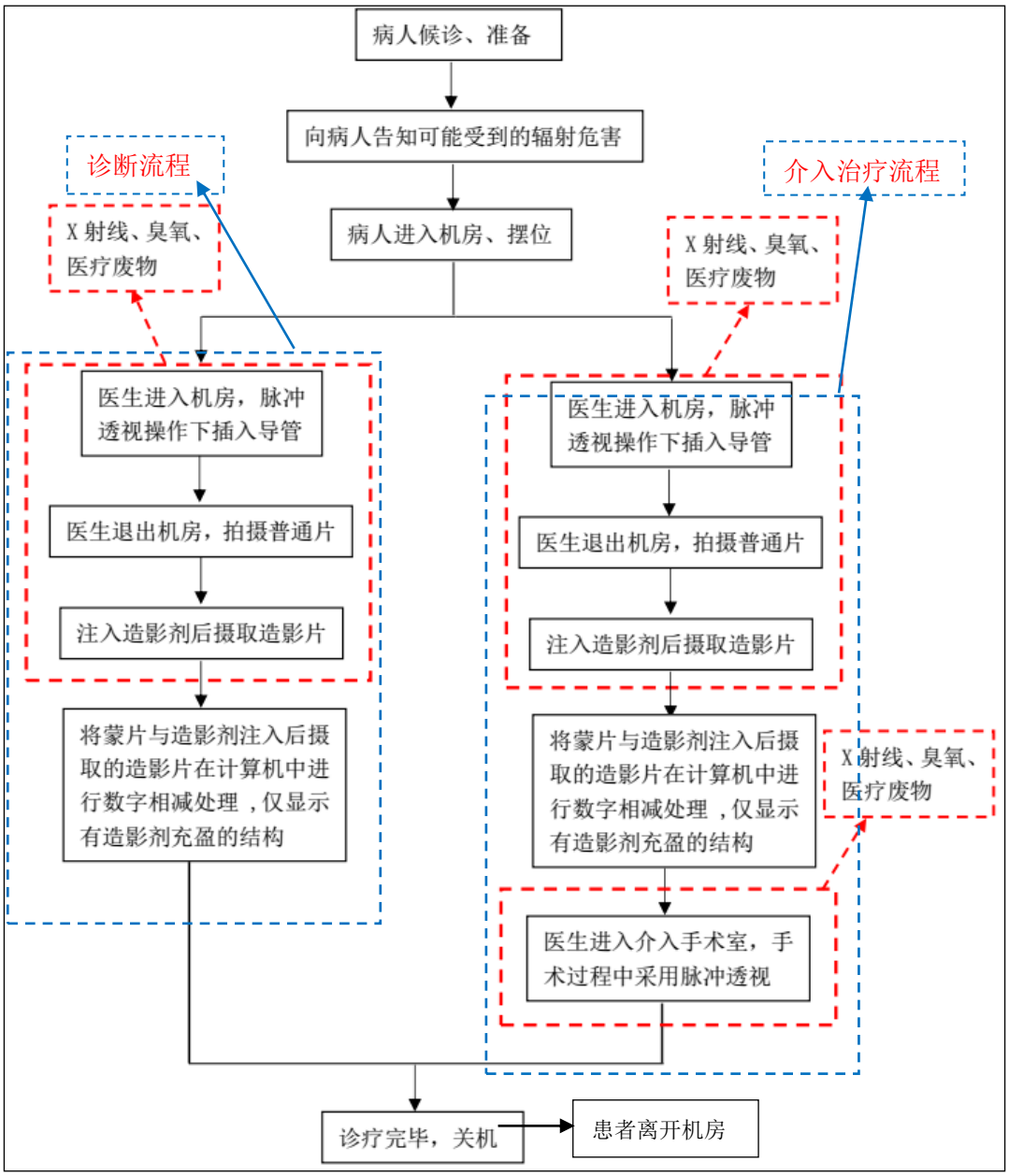


图 9-21 DSA 工作流程及产污环节示意图

3.4 工作负荷

本项目单台 DSA 的最大工作负荷情况见下表。

表 9-15 本项目单台 DSA 最大工作负荷

透视	手术类别	年开展工作量		每台手术透视曝光时间		年透视曝光时间
	心脏介入	200 台		约 15min		约 50.0h
	神经介入	50 台		约 20min		约 16.7h
	综合介入	100 台		约 20min		约 33.3h
	小计	/		/		约 100.0h
拍片	手术类别	年开展工作量	单次采集时间	单台手术采集次数	单台手术最大采集时间	年采集时间
	心脏介入	200 台	3～4s	6～10 次	约 0.7min	约 2.3h
	神经介入	50 台	6～10s	4～10 次	约 1.7min	约 1.4h
	综合介入	100 台	3～8s	7～15 次	约 2min	约 3.3h
	小计	/	/	/	/	约 7.0h
总 计						约 107.0h

医院拟为本项目配备 20~25 名辐射工作人员，所配备人员满足医院介入放射学日常工作需要。其中放射影像医师和放射影像技师在设备使用过程中不进入手术室，受到透视与拍片模式经手术室屏蔽体后的散射线、漏射线的照射；相关内外科专业技术人员在设备透视条件下会进入手术室进行操作，受到透视模式下手术室内散射线、漏射线照射。

污染源项描述

1 核医学污染源项分析

根据医院规划，医院在浒关院区二期住院楼地下二层开展回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验项目、核素显像诊断项目和核素治疗项目。项目主要放射性污染因子见下表。

表 9-16 核医学工作场所主要放射性污染一览表

放射性工作场所	主要放射性污染因子
回旋加速器生产正电子药物场所	γ 射线、中子、表面污染、放射性固废、放射性废气、放射性废水
动物 PET/CT 影像实验场所	X 射线、γ 射线、表面污染、放射性固废、放射性废气、放射性废水
核素显像诊断场所	X 射线、γ 射线、表面污染、放射性固废、放射性废气、放射性废水
核素治疗场所	α 射线、β 射线、γ 射线、表面污染、放射性固废、放射性废气、放射性废水

1.1 放射性污染

回旋加速器拟生产的放射性核素为 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga，其产生的放射性污染因子包括：γ 射线、中子和 β 表面污染。放射性同位素在生产过程中伴随回旋加速器使用产生中子（平均能量为 5MeV）以及中子慢化过程中产生的 γ 射线（平均能量为 8MeV。生产的核素衰变方式均为 β^+衰变，粒在衰变时伴随发射 0.511MeV 的 γ 射线）。

PET/MRI 和 PET/CT 使用放射性核素为 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga，其衰变方式均为 β^+衰变，在衰变时伴随发射 0.511MeV 的 γ 射线。SPECT/CT 使用放射性核素为 ^{99m}Tc、^{67}Ga、^{201}Tl、^{123}I，其中 ^{99m}Tc 使用量大，衰变方式为同质异能跃迁时伴随发射 0.14MeV 的 γ 射线。PET/CT 和 SPECT/CT 中的 X 线球管和探测器分别安装在被扫描组织的两侧，方向相对，有用线束透射方向为朝向诊断床（即患者方向），当球管产生的 X 线穿过患者被扫描组织，透过组织的剩余射线为探测器所接收。因此 PET/CT 和 SPECT/CT 开机过程中需要考虑其散射和泄漏的 X 射线辐射影响。为了防止球管烧毁并延长其使用寿命，实际使用时，管电压和管电流通常留有一定的裕量。本项目 PET/CT 和 SPECT 日常使用中管电压范围为 80kV~120kV、管电流为 20~200mA。

综上所述核医学科放射性污染因子主要为中子、γ 射线、X 射线和 β 表面污染。

1.2 放射性废水

核医学科产生放射性废水的主要来源是工作人员操作过程手部受到微量污染、清扫工作台面、地坪的清洁工具清洗时可能会有带有微量放射性的废液，质检及废弃药物废水以及病人冲洗排便用水。回旋加速器二级水冷机组是闭环水管冷却方式，在正常工作时不会排放冷却用水，但考虑到在设备维修或长久使用过程中可能会出现水管老化、接口脱落等意外情况发生冷却水泄漏。

（1）靶体清洗废水

根据厂家提供资料，本项目对制备后靶体的清洗均采用氮气和灭菌注射液配合清洗，产生清洗废液 13mL/次。根据 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 年打靶次数分别为 200、50、50、10、5、50 次，则年产生清洗废液为 4745mL。

（2）病人排泄废水

根据医院工作流程分析可知，PET/CT 和 PET/MRI 显像诊断项目日最大门诊量

为 50 人，SPECT/CT 显像诊断项目日最大门诊量为 33 人，该部分病人不需要进行住院观察，病人每次诊疗废水产生量以 10L 计，主要来源于排泄、清洗废水，就诊期间产生的废水量最多为 830L/d。

^{131}I 的甲癌治疗日最大病人数量为 5 人，该部分病人需要进行住院，住院时间平均取 4 天，病人平均每天废水产生量以 150L 计，主要来源于淋浴、排泄废水，所以甲癌治疗的病人产生的废水量为 750L/d。

^{177}Lu 前列腺治疗日最大病人数量为 1 人，病人需要进行住院，住院时间一般不超过 4 天，病人平均每天废水产生量以 150L 计，主要来源于淋浴、排泄废水，所以 ^{177}Lu 前列腺治疗的病人产生的废水量为 150L/d。

^{89}Sr、^{188}Re、^{153}Sm 及 ^{223}Ra 核素治疗均采用成品药，针剂注射方式给药进行治疗，医院根据与病人预约情况提前向药物供货商订药，供货商按照医院要求在规定时间内将按要求分装好的针剂送到医院高活室，辐射工作人员叫号患者在注射窗口给患者注射，患者注射后如无异常即可离开，无放射性废水产生。

（3）动物 PET/CT 影像实验清洗废水

动物 PET/CT 影像实验过程中产生的放射性废水主要来自于工作人员操作过程手部受到微量污染或清扫工作台面、地坪的清洁工具清洗时可能会有带有微量放射性的废液，每次实验冲洗废水约为 10L，年实验次数最多为 50 次，则年产生清洗废液为 500L。

（4）工作场所清洁废水

回旋加速器生产正电子药物场所：在完成一天的制药和实验工作后需进行污染检测，并进行去污清洗而产生放射性废水，每天清洗废水产生量约为 50L，年工作保守取 250 天，则年产生量为 12500L。

核素显像诊断场所：在完成一天的核素显像诊断工作后需进行污染检测，并进行去污清洗而产生放射性废水，每天清洗废水产生量约为 50L，年工作保守取 250 天，则年产生量为 12500L。

核素治疗场所：主要考虑 ^{131}I 清洗废水，每周清洗一次，每次清洗废水量约为 100L，年工作保守取 50 周，则年产生量为 5000L。

（5）冷却废水

回旋加速器二级水冷机组是闭环水管冷却方式，在正常工作时不会排放冷却用

水，但考虑到在设备维修或长久使用过程中可能会出现水管老化、接口脱落等意外情况发生冷却水泄漏，回旋加速器二级水冷机组闭环水管容量最大不超过 1m^3，因此，一次泄漏量以 1m^3 计，假设一年发生两次泄漏，则年产生量为 2m^3。

综上所述，核医学科工作场所产生的放射废水量见下表：

表 9-17 放射性废水产生量

工作场所	核素名称	来源	日废水量（L）	年生产天数（天）	年产生量（m^3）
回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验					
核素显像诊断					
核素治疗					

注：①核医学科设有两个衰变池，其中核素治疗场所产生的放射性废水排入 A 衰变池，回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验、核素显像诊断场所产生的放射性废水排入 B 衰变池。

1.3 放射性固废

本项目在生产、实验过程中产生的放射性固废主要有：

（1）回旋加速器机房内产生的高活及非高活放射性固废。

（2）放射性药物生产、合成以及实验过程中产生的如废试剂瓶、注射器、一次性手套、滤纸、吸水纸等带微量放射性核素的固体废弃物。

（3）药物使用过程中产生的注射器、棉签、试管、手套、一次性服药杯、擦拭纸、动物排泄物的收集袋、体内带有放射性核素的动物尸体等。

（4）本项目放射性工作场所产生的含放射性核素的废活性炭。

表 9-18 放射性固废产生量

工作场所	核素名称	来源	日产生量（kg）	年生产天数（天）	年产生量（kg）
回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验					
核素显像诊断					
核素治疗					
通风系统					

1.4 放射性废气

回旋加速器运行时，加速器机房室内空气受中子照射后将生成放射性活化气体，主要核素有 ^{11}C（半衰期 20.4min）、^{13}N（半衰期 10min）、^{15}O（半衰期 2.1min）和 ^{41}Ar（半衰期 110min）等，其中关键核素为 ^{41}Ar。由于空气中可以生成 ^{41}Ar 的 ^{40}Ar 只占 1.3%，加上产生 ^{41}Ar 的活化反应截面很小，所以 ^{41}Ar 的生成率极低。本项目放射性核素生产为自动化工艺，停机后，工作人员无需进入回旋加速器机房内进行操作，放射性气体对辐射工作人员的影响可以忽略。

放射性药物在合成、使用过程中会产生微量放射性气体，由于放射性药物合成、标记、分装及注射等操作在合成柜或通风橱内进行，合成柜及通风橱内均拟设置独立的通风系统，通风系统设置活性炭过滤装置，排放口高出本栋建筑屋脊。放射性气体不会对项目周围环境带来明显影响。放射性气体对放射工作人员的影响可以忽略。

1.5 非放射性污染

本项目运行过程中产生的非放射性污染主要是回旋加速器、PET/CT 和 SPECT/CT 工作过程中时产生的射线电离空气产生的少量臭氧和氮氧化物。

2 放疗科项目污染源项分析

2.1 直线加速器污染源项分析

2.1.1 放射性污染

（1）X 射线外照射

直线加速器以 X 射线模式运行时，从加速器电子枪里发出来的电子束，在加速管内经加速电压加速，轰击到靶上，产生 X 射线。发射出来的 X 射线主要用于治疗，治疗剂量与剂量率的大小、加速器电子能量、受照射的靶体材料、电子束流强度、电子入射方向、考察点到源的距离等因素有关。 医院拟新增的加速器 X 射线最大能量为 15MV，由于 X 射线的贯穿能力极强，可能对工作人员、公众及周围环境造成辐射污染。

（2）电子束

当加速器按电子束模式运行时，从电子枪里发出来的电子束经加速管加速后直接从加速管引出用于治疗病人。产生的电子属初级辐射，贯穿物质时受物质库仑场的影响，贯穿深度有限。加速器在运行时产生的高能电子束，因其贯穿能力远弱于 X 射线，在 X 射线得到充分屏蔽的条件下，电子束亦能得到足够的屏蔽。因此，在加速器电子束治疗时，电子线对周围环境辐射影响小于 X 射线治疗。

（3）中子

当医用电子加速器的 X 射线能量大于 10MeV 时，光子与加速器的靶、准直器、均整器及电子束和光子束通道上的其他物质相互作用发生光核反应所产生的中子。包括直接光中子以及直接光中子与加速器厅壁作用发生弹性散射和非弹性散射后产生的散射中子。

中子的辐射生物效应远高于 X、γ 射线，因此在高能医用电子加速器的防护设计中需要考虑中子的防护。一般情况下，治疗室墙体、天花板的屏蔽厚度满足了对 X 射线的防护要求时也能够满足对污染中子的防护要求，但要特别注意散射中子的防护，散射中子的影响主要考虑对防护门的影响。

（4）感生放射性

当入射电子加速电压大于 10MeV，它发射的强电离辐射照射在加速器设备的结构材料，治疗室内的各种设备、器械，治疗室的墙壁等物质上时，都可能使它们活化而产生感生放射性。感生放射性主要包括加速器结构材料的感生放射性、空气活化

产生的放射性气体和冷却水的感生放射性。感生放射性的剂量水平与加速电子的能量、束流、靶体物质、照射时间等因素有关。它不与加速器辐射的发射同步。

加速器设备（特别是加速器管）材料中主要元素铝、不锈钢和铜，它们由于（n，r）反应生成的子体核素寿命很短，在加速器刚停机的时候影响最大。加速器机房内空气活化产生的放射性核素，主要有 ^{11}C、^{15}O、^{16}N、^{41}Ar，半衰期较小，范围从 7.3 秒至 1.83 小时，长半衰期的核素产生率很低，这些放射性气体在空气中存在时间较短。冷却水中被活化而形成的放射性核素主要是 ^{15}O 和 ^{16}N，它们的半衰期为 2.1 分钟和 7.3 秒，所以正常运行时被活化的水对人体的危害是不重要的，但在停机后立即检修水系统时，活化的放射性核素可能对人体造成危害。

（5）放射性固体废物

加速器靶物质（件）以及机头等金属部件由于受电子的轰击会产生较强的感生放射性，机器退役（约使用 10 年）后更换下来的废靶件等应作为放射性废物处理。加速器退役委托资质单位进行整体回收处置。

综上所述，加速器产生的辐射源项有 X 射线、电子束、中子及感生放射性。

2.1.2 非放射性污染

加速器装置在工作状态时，会使机房内的空气电离产生少量臭氧和氮氧化物，少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排至室外，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

2.2 射波刀污染源项分析

2.2.1 放射性污染

本项目拟配备的射波刀 X 线最大能量为 6MV，距靶 0.8m 处 X 辐射最大剂量率为 10Gy/min；自带两组诊断 X 射线球管，管电压最大为 150kV，管电流为 1000mA。射波刀正常运行时所产生的 X 射线可能对工作人员和公众造成危害。此外，本项目设备产生的 X 射线穿过限束装置或与结构材料、患者可以产生泄漏辐射或散射线。泄漏辐射、散射线的性质与有用线束相同，但能量可能有所不同。

综上所述，本项目产生主要辐射源项为 X 射线。

2.2.2 非放射性污染

射波刀在工作状态时，会使机房内的空气电离产生少量臭氧和氮氧化物，少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排至室外，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧

气，这部分废气对周围环境影响较小。

2.3 CT 模拟定位机污染源项分析

本项目 CT 模拟定位机在正常运行情况下工作人员和公众可能受照的辐射源为 X 射线。对机房外的工作人员、公众而言，可能受到的照射主要是机房外的漏、散射线，对机房内的患者而言，可能受到的照射主要为主射线束的直接照射、X 射线源组件泄漏照射和散射，以上射线对人体产生的危害主要为外照射电离辐射。

CT 在工作状态时，会使机房内的空气电离产生少量臭氧和氮氧化物，少量臭氧和氮氧化物可通过通风系统排至室外，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

3 DSA 污染源项分析

3.1 放射性污染

DSA 产生的 X 射线随机器的开、关而产生、消失，因此在设备使用期间，X 射线是主要污染因子。

3.1.1 有用线束

本项目 DSA 的有用线束方向为由下至上，有用线束的射线能量、强度与 X 射线管靶物质、管电压、管电流有关。DSA 具有自动照射量控制调节功能（AEC），摄影时，如果受检者体型偏瘦，功率自动降低，照射量率减小；如果受检者体型较胖，功率自动增强，照射量率增大。为了防止球管烧毁并延长其使用寿命，实际使用时，管电压和管电流通常留有一定的裕量。根据医院提供资料，DSA 正常运行时，透视模式的工况为（70~80kV/1~20mA），拍片模式的工况为（70~80kV/100~500mA）。

本项目 DSA 运行时离靶 1 米处的 X 射线发射率根据运行时管电压和 DSA 的 X 射线管的过滤条件从《辐射防护导论》（方杰著）附图 3 查取。DSA 常用过滤片为 0.5mmCu，查《辐射防护导论》（方杰著）附图 3，额定电压 125kV 时离靶 1 米处的发射率约为 3.2mGy·m^2/mA•min，本项目正常运行时最大电压为 80kV，离靶 1 米处的发射率约为 0.8mGy·m^2/mA•min。

3.1.2 泄漏射线

根据国际放射防护委员会第 33 号出版物《医用外照射源的辐射防护》“（77）用于诊断目的的每一个 X 射线管必须封闭在管套内，以使得位于该套管内的 X 射线管在

制造厂规定的每个额定值时，离焦点 1m 处所测得的泄漏辐射在空气中的比释动能不超过 1 mGy/h”（在距离源 1m 处不超过 100cm^{2}的面积上或者在离管或源壳 5cm 处的 10cm^{2}面积上进行平均测量），以及《医用电气设备 第 1-3 部分：基本安全和基本性能的通用要求 并列标准：诊断 X 射线设备的辐射防护》（GB 9706.103-2020）中 12.4 的相应要求，取本项目 DSA 离焦点 1m 处的泄漏辐射空气比释动能率为 1.0mGy/h。

3.1.3 散射线

本项目 DSA 的散射线主要考虑有用线束照射到受检者人体产生的侧向散射线，其强度与有用线束的 X 射线能量、X 射线机的输出量、散射面积和距离等有关。

3.2 非放射性污染

DSA 在工作状态时，使手术室内的空气电离产生少量臭氧和氮氧化物，可通过通风系统排至室外，臭氧在空气中短时间可自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。本项目 DSA 在投入使用后，还会产生一定量的医疗垃圾。

表 10 辐射安全与防护

项目安全设施

1 放疗科项目

1.1 项目工作场所布局合理性分析

放疗科位于浒关院区二期住院楼地下三层东南角，包括 5 个加速器机房、1 个射波刀机房，2 个 CT 模拟定位机房和 1 个 MRI 模拟定位机房，以及各机房控制室、水冷机房、物理室、计划室、仪器室等辅助用房，以及医生办公室、更衣室等。放疗科东侧和南侧为土层，西侧为停车场，北侧为库房，楼上为核医学科，楼下为土层，地下三层、二层平面布局分别见附图 4 和附图 5，放疗科平面布局见附图 10。

如附图 10 所示，5 个加速器机房和 1 个射波刀机房位于放疗科东侧和南侧，控制室均位于治疗室外一侧，与治疗室分开设置，并设置了水冷机房；2 个模拟定位机房和 1 个 MRI 模拟定位机房均位于放疗科北侧。治疗计划室、仪器室、物理室、 医生办公室、 值班室、更衣室等位于放疗科西侧。候诊区、医生诊室、示教室等位于放疗科中部。医院拟对放疗科进行控制区和监督区划分管理，拟将加速器机房、射波刀机房和模拟定位的治疗室内区域划为控制区，治疗期间严禁任何人进入；将控制室、水冷机房、设备间、入口等区域划为监督区域，对监督区实施监控管理。工作场所具体分区情况见表 10-1，控制区与监督区划分见附图 10。综上所述本项目工作场所控制区和监督区划分明显，能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）的布局要求。

表 10-1 放疗科工作场所分区情况一览表

控制区	监督区
1#~5#加速器机房、射波刀机房、1#和 2#模拟定位机房	1#~5#加速器控制室、水冷机房和入口处、射波刀控制室、水冷机房和入口处 1#和 2#模拟定位机控制室、设备间及入口处

1.2 辐射防护屏蔽设计

本项目的五座加速器机房除所处位置不同外，屏蔽设计方案一致，因此选取 4 号加速器机房进行屏蔽分析。4#加速器机房和射波刀机房平面和剖面示意图见附图 11，4#加速器机房和射波刀机房屏蔽参数分别见表 10-2 和表 10-3。

表 10-2 4#加速器机房辐射防护屏蔽设计参数

分类		屏蔽参数
东墙	主屏蔽	3000mm 混凝土，宽度 4.4m
	次屏蔽	1500mm 混凝土
南墙	次屏蔽	1100mm 混凝土+土层
西墙	主屏蔽	3000mm 混凝土，宽度 4.4m
	次屏蔽	1500mm 混凝土
北墙	迷道内墙	570mm~1550mm 混凝土
	迷道外墙	550mm~1550mm 混凝土
顶部	主屏蔽	厚度：3000mm 混凝土；宽度：4.4m
	次屏蔽	1500mm 混凝土
底部		地面（土层）
防护门		40mmPb+20cm 含硼石蜡

注：①混凝土密度为 2.35g/cm^3，铅板密度为 11.35g/cm^3。
②加速器机房防护门与墙体间隙小于防护门与墙体搭接长度的 1/10。

表 10-3 射波刀机房辐射防护屏蔽设计参数

分类		屏蔽参数
东墙		2400mm 混凝土+土层
南墙		700mm 混凝土+土层
西墙	迷道内墙	640mm~1700mm 混凝土
	迷道外墙	600mm~1700mm 混凝土
北墙		2400mm~3000mm 混凝土
顶部		1800mm 混凝土（宽度 0.95m），其余为 3000mm 混凝土
底部		地面（土层）
防护门		15mmPb

注：①混凝土密度为 2.35g/cm^3，铅板密度为 11.35g/cm^3。
②加速器机房防护门与墙体间隙小于防护门与墙体搭接长度的 1/10。

1.3 辐射安全措施

为确保辐射安全，保障本项目安全运行，设计有相应的安全措施，安全措施见附图 12（选取 4#加速器机房和射波刀机房）。安全措施主要有：

（1）钥匙开关控制：决定设备产生辐射的主要控制系统用开关钥匙进行控制。

（2）门机联锁装置：机房防护门拟安装门机联锁装置，只有当防护门完全关闭后才能开启设备；在出束状态下意外打开防护门，立即停止出束。

（3）开门开关和防夹装置：在机房防护门内侧拟设置紧急开门按钮，紧急情况

下按开门按钮防护门打开；防护门拟设置红外线防夹装置（距离地面约 60cm），防护门关闭过程中有人穿过防护门时，防护门自动开启。

（4）急停开关：在控制室内、迷道内和治疗室内屏蔽墙合适位置均拟安装急停开关，治疗床设有急停开关，在发生紧急情况时能够及时切断加速器系统电源。

（5）工作状态指示灯及警示标志：在防护门上方拟安装工作状态指示灯，其中红灯代表加速器开机工作，黄灯代表加速器准备工作，绿灯代表加速器停止工作。门外拟张贴醒目、规范的电离辐射警告标志。

（6）监控与对讲装置：在机房内拟安装实时监控装置，监控终端显示器位于控制室内，并拟配备对讲装置，在治疗过程中辐射工作人员可以及时观察病人情况，与病人交流，防止意外情况的发生。

（7）辐射剂量监测：在机房迷道内入口出设置固定式辐射剂量监测仪，其显示单位设置在控制室内，可实时监测治疗室内的辐射水平。

（8）电缆布设：加速器机房电缆线布设采用了地下“U”型穿墙管道，管道埋地深约 40cm，未破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

（9）通风：1#~5#加速器机房和射波刀机房均设有通风装置，见图 10-5。进风管道和排风管道均从防护门上方斜穿进入并经迷道进入机房，每个机房进风口和排风口各有 2 个。进风口和排风口为对角设置，可以保证室内空气充分交换。以 4#加速器机房为例，2 个进风口分别位于屋顶的东北角和东南角，距离地面约 3.5m，2 个排风口分别位于西北角和西南角，距离地面约 0.3m。

1.4 CT 模拟定位机

CT 模拟定位机房尺寸、最小单边长度、有效使用面积及屏蔽参数见表 10-4。

表 10-4 CT 模拟定位机房辐射防护屏蔽参数一览表

参数		要求	评价
最小单边长度	4.66m；	4.5m	满足
有效使用面积	1#CT 模拟定位机房：4.66×7.10≈33.80m^2 2#CT 模拟定位机房：4.66×7.005≈32.64m^2	30m^2	满足
防护（两个机房屏蔽防护一致）	四周墙面： 24cm 蒸压灰砂砖+2mmPb 铅板（4.0mm 铅当量） 顶部： 25cm 混凝土（3.1mm 铅当量） 地面： 25cm 混凝土（3.1mm 铅当量） 防护门： 4 mm 铅当量 铅玻璃观察窗： 4mm 铅当量（4mmPb）	2.5mmPb	满足
注：混凝土密度为 2.35g/cm^3，蒸压灰砂砖密度为 1.80g/cm^3，铅板密度为 11.35g/cm^3。			

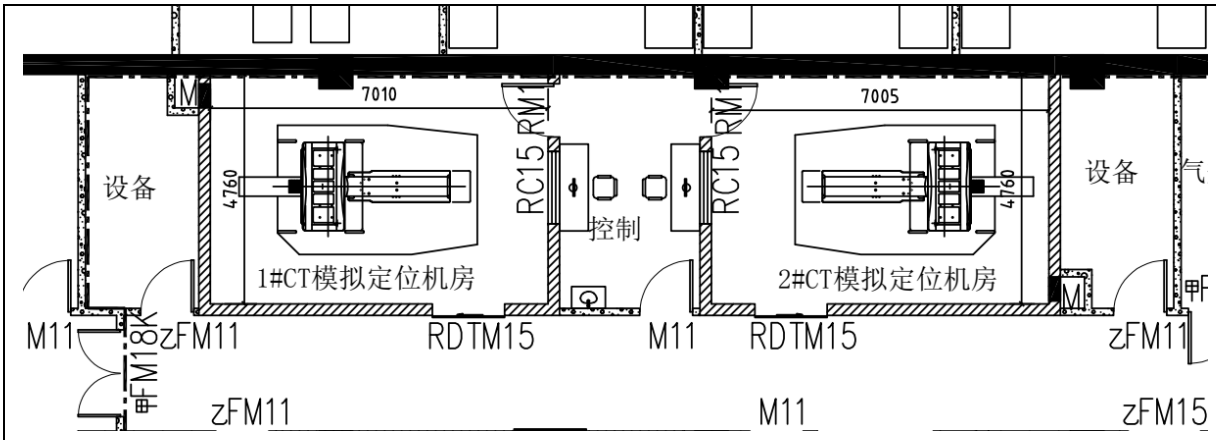


图 10-1 CT 模拟定位机房平面图

CT 模拟定位机房设计有相应的辐射安全装置和保护措施，主要有：

（1）控制台处设置观察窗，工作人员通过观察窗观察机房内患者状态。

（2）在机房入口处设置工作警示灯，警示灯箱处设置警示语句，并在醒目位置张贴“当心电离辐射”以及放射防护注意事项。

（3）防护门设置闭门装置，工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动。

（4）辐射工作人员均拟配备个人剂量计并定期送检，同时建立个人剂量档案，拟开展职业健康监护并建立个人职业健康监护档案。

2 核医学科项目

2.1 项目选址

核医学工作场所位于浒关院区二期住院楼地下二层南侧，地下三层、二层和一层见附图 4~附图 6，核医学科平面布局见附图 13。核医学科包括回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所、核素治疗场所、核素显像诊断场所。核医学场所东侧和南侧为土层，西侧和北侧为停车场，楼上为卸货区、气动物流机房、送风机房等场所，楼下为放疗科。核医学科场址不邻接产科、儿科、食堂等部门，集中设置在地下二层东南侧，核医学科诊疗后患者专用电梯设置在一层东北角，出口即为外部广场，不与门诊大厅相通，未邻接人群稠密区域。综上所述本项目选址合理。

2.2 工作场所分区

为便于辐射防护管理和职业照射控制，根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》要求，工作场所按其功能及放射性操作水平进行划分，实施分区管理，核医学科控制区与监督区划分见附图 14。医院将回旋加速器机房、热室、质控室、小动物 PET/CT 机房、PET/CT 机房、SPECT/CT 机房、核素治疗病房、给药室、

高活室、注射室、注射后候诊区、卫生通过间、清洁用品间、放射性废物储存间和衰变池等区域作为控制区进行管理，严禁无关人员进入；将注射前候诊室、SPECT/CT 控制室、PET/CT 控制室、PET/MRI 控制室、小动物 PET/CT 控制室和机房邻近区域等作为监督区进行管理，不需要采取专门防护手段和安全控制措施，无关人员不得随意进入该区域。综上所述核医学科控制区和监督区划分明显，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第 6.4 款中有关辐射工作场所的分区规定。

2.3 工作场所布局

核医学科设有工作人员、患者和受检者路线图见附图 15。

工作人员路线：如绿色实线路线所示，工作人员乘坐员工电梯进入到地下二层核医学科。通过门 D1 进入到回旋加速器控制室；通过门 D2、一更、二更、缓冲间进入到正电子药物合成热室、质控室等；通过门 D3 进入到小动物 PET/CT 控制室。通过门 D4、卫生通过间，进入到 SPECT 和 PET 显像区域高活室，进行药物分装和注射；通过门 D5 进入到 2 台 PET/CT 和 1 台 PET/MRI 机房的控制室；通过门 D6 进入到 2 台 SPECT/CT 机房的控制室。通过门 D7、卫生通过间进入到核素治疗高活室，进行药物分装和给药。

注射前受检者/患者路线：如青色实线路线所示，受检者/患者乘坐住院电梯进入到地下二层核医学科。SPECT 和 PET 显像受检者通过门 D8 进入到注射前候诊区，在病历室进行血压、血糖测量，设置留置针后，通过门 D9 进入控制区，分别在 SPECT 注射窗口和 PET 注射窗口进行放射性药物注射。核素治疗患者通过门 D10 进入到缓冲区，然后到服药室口服 ^{131}I 药物或接受其他放射性药物。敷贴治疗患者通过门 D11 进入到敷贴治疗室接受敷贴治疗。

注射后受检者/患者路线：如红色实线所示，PET 显像受检者在注射室注射放射性药物后，先到 1#、2#、3#PET/CT 注射后候诊室和 PET/MRI 注射后候诊室候诊，在语音系统叫号后，分别进入到 2 个 PET/CT 机房和 1 个 PET/MRI 机房接受显像检查，检查结束后在 PET 留观室留观一段时间，确定无不良反应后，通过核医学专用电梯离开核医学科。如红色虚线所示，SPECT 显像受检者在注射室注射放射性药物后，首先到 SPECT 注射后候诊室候诊，在语音系统叫号后，分别进入到 2 个 SPECT 机房接受显像检查，检查结束后在 SPECT 留观室留观一段时间，确定无不良反应后，通过核医学专用电梯离开核医学科。如洋红色实线所示，甲癌患者在给药后，经过门 D14 入住

单间病房，在治疗结束后，通过门 D14、D13 和 D12 后，乘坐核医学专用电梯离开核医学科。如蓝色实线所示，^{177}Lu 患者在给药后进入 ^{177}Lu 专用病房，治疗结束后，经过门 D13 和 D12 后，乘坐核医学专用电梯离开核医学科；其它核素患者给药后，经过门 D13 和 D12 后，乘坐核医学专用电梯离开核医学科。如蓝色实线所示，敷贴治疗患者经门 D11 进入敷贴治疗室，治疗结束后原路返回乘坐住院电梯厅离开。

医院核素治疗场所中 ^{89}Sr、^{223}Ra、^{188}Re、^{153}Sm 门诊量较少，根据病人数量进行预约治疗，治疗时间在周六开展，同时间段内核素显像诊断项目不开展；于每周一上午开展甲癌、甲亢和 ^{177}Lu 核素治疗，同时间段内核素显像诊断项目不开展；甲癌和 ^{177}Lu 患者出院时选择在核素显像诊断当时工作结束后。

放射性药物运输、放射性废物运输路线见附图 16。

放射性药物运输路线：如黑色实线所示，回旋加速器生产的正电子药物在热室合成后，由工作人员通过传递窗口将药物传递到质控室和药品打包室，沿黑色路线从走廊将药物送至显像区域， 然后将药物从卫生通过间将药物送至 PET 通风橱内；及送到小动物 PET 机房供小动物实验使用。SPECT 显像药物由药物公司提供，药物运输车停到地下二层停车场，然后公司人员将装有药物的铅罐运进核医学科，通过卫生通过间将药物放至高活室的 SPECT 通风橱内。放射性治疗药物同样由药物公司提供，药物运输车停到地下二层停车场后，由公司人员将装有药物的铅罐送进核医学科，并通过医护走廊、卫生通过间放到药物治疗病区内的高活室通风橱内。

放射性废物运输路线：如红色实线所示，SPECT 和 PET 显像区域的高活室、注射室、注射后候诊室、留观室、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/MRI 机房、负荷室/抢救室等房间产生的放射性废物首先暂时放置在本房间的放射性废物桶内，然后统一收集放置到废物间内存储。核素治疗区域内的高活室、服药室、病房、抢救室等房间产生放射性废物首先暂时放置在本房间的放射性废物桶内，然后统一收集放置到废物间内存储。小动物 PET 机房和正电子药物生产区域产生的放射性废物首先暂时放置在本房间的放射性废物桶内，然后统一收集放置到核素治疗区域内的废物间存储。

综上核医学科的核素显像诊断工作场所、核素治疗工作场所和回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所相对分开布置。工作人员与注射后患者/受检者不交叉，注射前患者/受检者与注射后患者与受检者不交叉，放射性药物运输在工作人员上班前完成，避免与工作人员的交叉，该核医学工作场所的布局符合《核医学放射

防护要求》GBZ120-2020 和《核医学辐射防护与安全要求》HJ1188-2021 的要求。

2.4工作场所分级和分类

根据表 1-2 可知，回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所、核素显像诊断场所和核素治疗工作场所的日等效最大操作量分别为 4.69E+08Bq、4.89E+07Bq 和 3.89E+09Bq，均属于 GB18871-2002 中乙级非密封放射性物质工作场所范围（2E+7Bq~4E+9Bq）。因此本项目核医学科包括 3 个**乙级**非密封放射性物质工作场所，即回旋加速器生产正电子药物及动物 PET/CT 影像实验场所、核素显像诊断场所和核素治疗工作场所。

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）的要求，对工作场所进行分类，加权活度等于计划的日操作最大活度与该核素毒性组别修正因子的乘积除以与操作性质修正因子所得的商。计算结果见下表。

表10-5 核医学科工作场所分类一览表

房间	核素	日操作最大活度（Bq）	毒性权重因子	操作性质修正因子	操作最大量的加权活度（Bq）	场所类别
回旋加速器/热室	^{18}F	3.22E+10	1	1	3.22E+10	II
小动物PET/CT 机房	^{18}F	3.70E+07	1	1	3.70E+07	III
PET高活室/注射室	^{18}F	1.48E+10	1	1	1.48E+10	II
SPECT高活室/注射室	^{99m}Tc	2.78E+10	1	1	2.78E+10	II
抢救室	^{99m}Tc	9.25E+08	1	10	9.25E+07	II
PET/CT和PET/MRI注射后候诊室	^{18}F	4.44E+09	1	10	4.44E+08	II
SPECT/CT注射后候诊室	^{99m}Tc	2.78E+10	1	10	2.78E+09	II
2个PET/CT和1个PET/MRI机房	^{18}F	7.40E+08	1	10	7.40E+07	II
SPECT/CT机房	^{99m}Tc	1.85E+10	1	10	1.85E+09	II
PET 留观室	^{18}F	1.48E+10	1	10	1.48E+09	II
SPECT 留观室	^{99m}Tc	2.78E+10	1	10	2.78E+09	II
核素治疗高活室/服药室	^{131}I	3.70E+10	100	1	3.70E+12	I
甲癌病房（6个）和抢救室	^{131}I	5.55E+09	100	1	5.55E+11	I
其它核素病房	^{177}Lu	7.40E+09	100	1	7.40E+11	I
注：（1）选取其中常用且用量最大的核素进行核算；（2）抢救室使用频次很少，一天最多1人使用；（3）PET的注射后候诊室一天最多12人候诊；PET机房一天最多进行15人扫描检查；（4）SPECT机房一天最多进行20人扫描检查。						

根据上表可知，核素治疗高活室/服药室、病房和抢救室为I类临床核医学工作场所；回旋加速器/热室、核素显像诊断中的高活室/注射室、抢救室、PET/CT 和 PET/MRI 注射后候诊室、SPECT/CT 注射后候诊室、PET/CT 和 PET/MRI 机房、SPECT/CT 机房、PET 留观室、SPECT 留观室及其它核素病房均为Ⅱ类临床核医学工作场所；小动物 PET/CT 机房为Ⅲ类临床核医学工作场所。医院应根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中“表 1 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求”进行设计和施工。

2.5工作场所屏蔽设计

2.5.1 回旋加速器屏蔽

本项目 HM-10HC 回旋加速器为自屏蔽式加速器，回旋加速器自屏蔽体尺寸为4.8m×3.15m×2.8m，加速质子能量最大为 10MeV，最大束流为 100μA。本项目根据不同打靶核素可进行束流能量及强度的调节，在满足打靶的需要求下尽量降低出束能量及强度。回旋加速器本身自带有屏蔽装置，自屏蔽体由内、外两层组成，内层为富氢光材料组成，用于慢化快中子，吸收热中子；外层为富含氢的混凝土，用于慢化和吸收中子，降低次级 γ 辐射，以及机体表面辐射剂量。加速器有完整的安全连锁系统，采用循环冷却水冷却靶。

回旋加速器室拟采用混凝土结构，设计见图 10-2 和附图 19，参数见表 10-6。

表 10-6 回旋加速器室辐射防护屏蔽设计参数

分类	屏蔽参数
东墙、南墙、西墙、北墙	70cm 混凝土
顶部	70cm 混凝土
底部	地面（土层）
防护门	15mmPb+150mm 含硼聚乙烯
机房净尺寸	7.35m（长）×7.20m（宽）×5.9m（高）

注：混凝土为 2.35g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3

生产出的液态产品从回旋加速器内部用气体推送方式，通过传输管道在通过套在地沟中铅块覆盖的管道内传送至放合成分装热室（四周墙体为30cm混凝土，顶部为25cm混凝土，地面为30cm混凝土）中的合成柜，然后在传送至分装柜，合成柜和分装柜均是一个自屏蔽体，主要由铅块（正面70mm铅，其他面60mm铅）垒成。整个合成分装过程由计算机自动控制，分装好的药物储存在铅罐（40mmPb）中，根据需要

送至质控室，在整个过程中医生均要做好个人防护措施，包括穿戴铅衣、铅眼镜、铅帽、铅围裙、铅手套和铅围脖等。

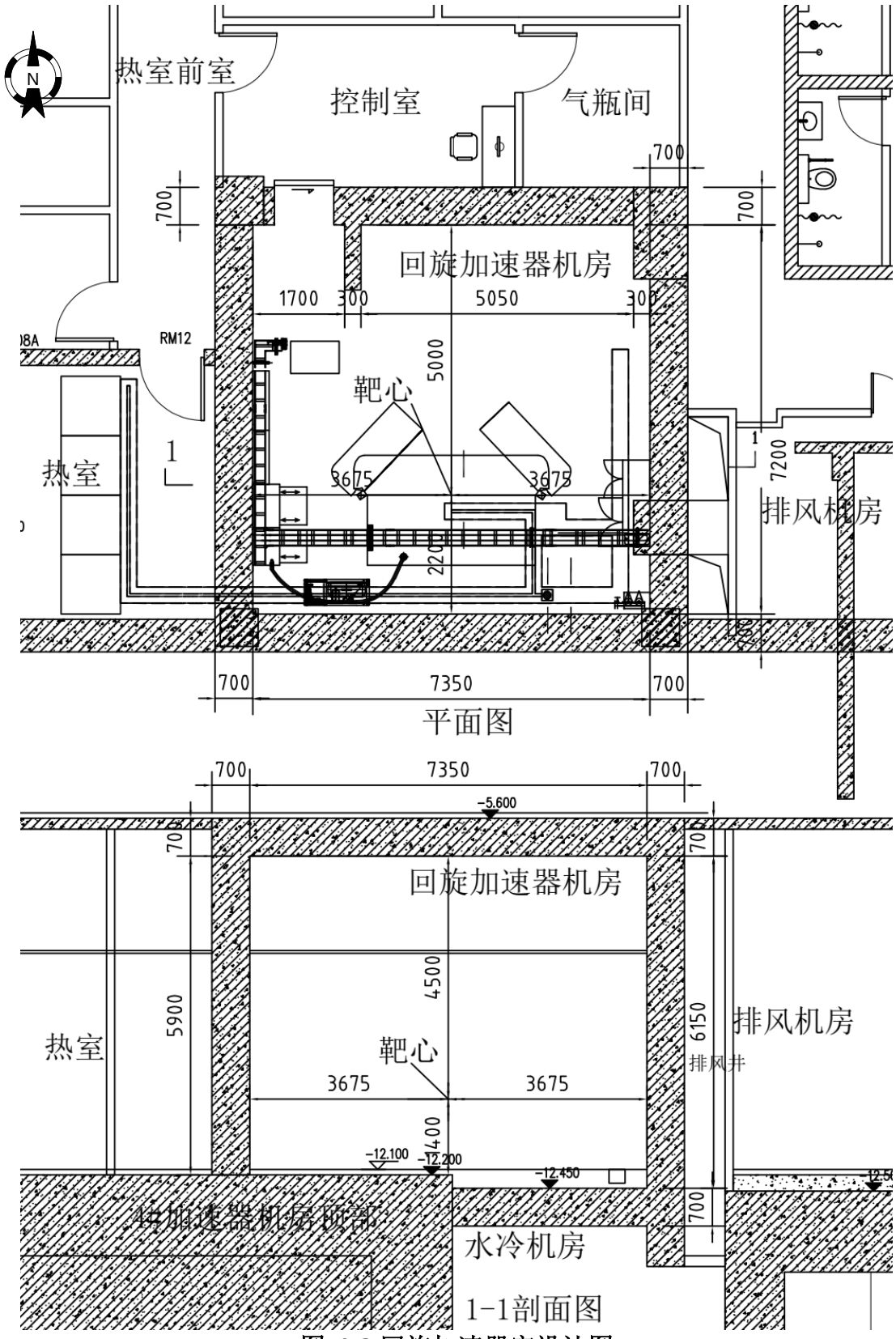


图10-2 回旋加速器室设计图

2.5.2 核医学科其它工作场所屏蔽

核医学科其它工作场所的屏蔽防护设计见下表。

表 10-7 核医学科工作场所辐射防护屏蔽设计参数

核素显像诊断场所					
房间	墙面	顶面	地面	防护门	观察窗
1～2#PET/CT 机房	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	8mmPb 铅	10mmPb 铅玻璃
PET/MRI 机房	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	8mmPb 铅+铜屏蔽门	10mmPb 铅玻璃+铜网玻璃
1～3#PET/CT 注射后候诊	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	8mmPb 铅	-
PET/MRI 注射后候诊	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	8mmPb 铅	-
PET 留观室	东墙为 600mm 混凝土+土层，其它墙体均为 240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	8mmPb 铅	-
SPECT 注射后候诊	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	8mmPb 铅	-
SPECT 留观室	240mm 蒸压灰砂砖+15mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	3mmPb 铅	-
1～2#SPECT/CT 机房	240mm 蒸压灰砂砖+45mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	5mmPb 铅	6mmPb 铅玻璃
高活室	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	8mmPb 铅	传递窗 8mmPb
注射	240mm 蒸压灰砂砖+30mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	4mmPb 铅	PET 和 SPECT 注射窗分别为 25mmPb、5mmPb
运动负荷/抢救室	240mm 蒸压灰砂砖+30mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	4mmPb 铅	-
废物间	240mm 蒸压灰砂砖+30mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	4mmPb 铅	-
储源间	240mm 蒸压灰砂砖+30mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	4mmPb 铅	-
通风橱	PET：40mmPb；SPECT:10mmPb				
核素治疗诊断场所					
房间	墙面	顶面	地面	防护门	观察窗

^{177}Lu 病房	东墙为 600mm 混凝土+土层，其它墙体均为 240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	10mmPb 铅	-
1～5#甲癌病房	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	10mmPb 铅	-
配餐/家属探视	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	传递窗 40mmPb
敷贴治疗	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
治疗抢救室	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
卫生通过、淋浴	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
清洁间	240mm 蒸压灰砂砖	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
服药室	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
固废衰变间	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
被服回收	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
患者缓冲	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
患者走廊	240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	-
microPET/CT 机房	240mm 蒸压灰砂砖+90mm 硫酸钡	250mm 混凝土	250mm 混凝土	6mmPb 铅	10mmPb 铅玻璃
衰变池	A 衰变池和 B 衰变池的池体由 30cm 厚防渗混凝土浇筑，并涂抹防水层。				
放射性废水管道	核素病房中排水管道采用地面板下敷设，并使用 3mm 铅皮包裹，高活室排水管道采用顶板下敷设，并使用 3mm 铅皮包裹；回旋加速器及小动物 PET/CT 影像实验项目和核素显像诊断项目场所排水管道采用降板区覆土内敷设。				
注：15mm 硫酸钡等效铅当量为 1mmPb，混凝土密度为 2.35g/cm^3，蒸压灰砂砖密度为 1.80g/cm^3，铅密度为 11.3g/cm^3。					

2.6 辐射安全措施设计

2.6.1回旋加速器机房辐射防护措施

本项目回旋加速器机房拟设置相应的辐射安全装置和保护措施，安全措施图见附图10-3，主要有：

（1）加速器操作许可

回旋加速器控制台用户操作控制界面，设置有用户密码，只有被专门授权许可的操作人员才能进行回旋加速器的开机操作。

（2）门机联锁

回旋加速器机房入口门与加速器的高压拟设置联锁（即门机联锁），当防护门未关闭到位时，加速器无法开启高压出束，无法进行生产；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。

（3）信号警示装置

防护门外拟设置红黄绿3色工作指示灯和音响警告信号，用于提示机房内设备的运行状态。红灯亮表示加速器正在出束工作，同时音响警告信号发出音响报警；黄灯亮表示加速器已停机，但停机时间较短，机房内感生放射性影响较大，人员暂不能进入；绿灯亮表示加速器已停机一段时间，人员可进入加速器机房。

（4）电离辐射警告标志

回旋加速器机房入口醒目位置均拟设置符合GB18871-2002规范的电离辐射警告标志，用于提醒无关人员不要靠近和逗留。

（5）紧急开门开关

回旋加速器机房内侧靠近防护门处拟设置1个开门开关，当人员被关在机房内时，紧急情况下按下开关，可实现防护门从内部打开，同时因门机联锁装置，门一打开加速器停止运行。

（6）急停按钮

回旋加速器机房内和操作台上拟设置急停按钮，并在醒目处设置标签，标明使用方法，紧急状态下，按下急停按钮，即终止加速器的运行，防止误照射，急停按钮按下后需要手动复位。

（7）固定式辐射剂量监测系统

回旋加速器机房近防护门处拟设置固定式辐射剂量监测探头，与加速器机房防护门联锁。当探测到机房内辐射剂量率超过设置阈值时，加速器机房防护门从外部无法打开，同时控制室内操作台和加速器机房防护门门口有辐射剂量率实时显示。

（8）视频监控系统

回旋加速器机房内均拟安装视频监控，监视器设置于控制室内，工作人员可及时掌握回旋加速器机房内部情况。

（9）巡检按钮

回旋加速器机房内均拟设置巡检按钮，并与控制台联锁。加速器门开启后，开机前，操作人员进入机房内按序按动巡检按钮，巡查有无人员误留，完成巡检流程后，加速器才能开启高压。

本项目回旋加速器拟设置的辐射安全装置和保护措施符合《核医学放射防护要求》GBZ120-2020 和《核医学辐射防护与安全要求》HJ1188-2021 的要求。

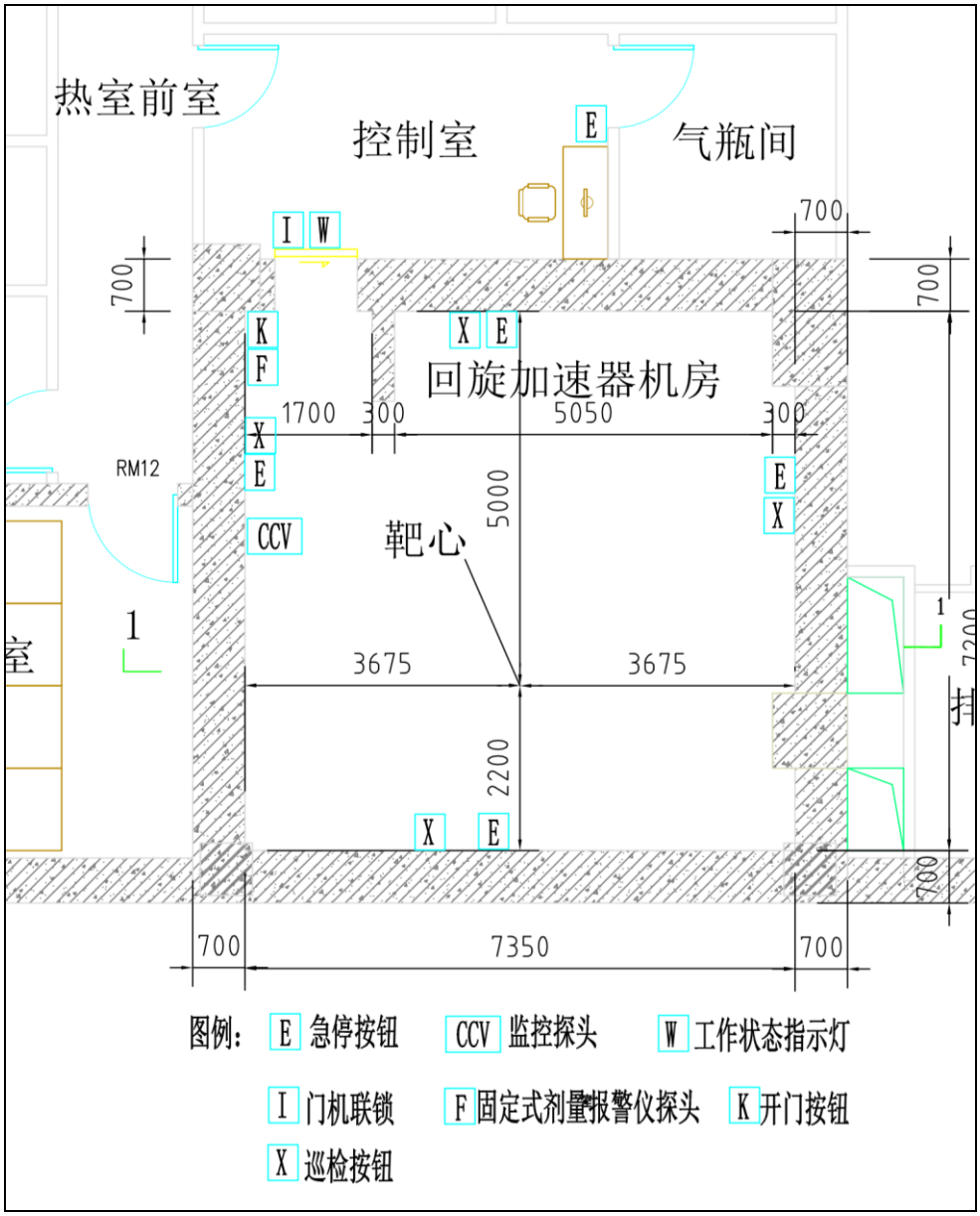


图 10-3 回旋加速器安全措施图

2.6.2核医学科工作场所辐射防护措施

（1）医院拟在核医学科的控制区出入口、控制区内各房间门口、合成柜、通风橱等核素操作场所表面、放射性废物桶表面等醒目位置均拟设置电离辐射警告标志，用于提醒无关人员不要靠近和逗留。

（2）医院拟在核医学科扫描机房门口设置工作状态指示灯，用于提示机房内设备的运行状态，同时拟在机房防护门安装闭门装置，确保防护门处于常闭状态，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动。

（3）医院拟在核医学科控制区病患入口及病患出口处设带门禁系统的单向门，实现“入口只进不出，出口只出不进”的单向路线，加强对控制区带药患者的管理，并防止无关人员入内。同时医务人员应告知检查完成后病人离开路线，防止其对其他公众造成不必要照射。

（4）医院拟在核医学科的控制区内安装监控及对讲设备，通过监控及对讲设备对控制区内用药后患者进行有序管理，使患者有序进入核医学科用药就诊。同时，除了使用监控及对讲设备对患者进行逐个叫号注射（服药）以及扫描外，医院计划在地面设置指示箭头以及指示牌指示患者进行有序注射（服药）以及扫描，通过加强管理的方式减少患者的直接交叉辐射影响。

（5）核医学科工作场所内不得安排与放射性无关的工作。

（6）核医学科所有放射性药物的操作均应在高活室的通风橱内进行。放射性药物操作时均应在衬有吸水纸的托盘内进行，药物在使用前有铅盒和铅套屏蔽，注射药物时工作人员穿戴个人防护用品，并尽可能缩短操作时间。

（7）在控制区和监督区内不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物件。辐射工作人员操作后离开工作室前洗手和作表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施。从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区。

（8）使用操作应在指定的工作台或搪瓷盘内进行，操作人员需配戴个人防护用品，应避免皮肤直接接触放射性物质。

（9）非密封工作场所门窗及内部结构应尽量简单，墙面、地面应采用易于去污的材料或涂料，并平整光滑；地面与墙面交接应做成圆角，且应有一定的坡度朝向地漏（如设地漏）。

（10）医院计划为 SPECT/CT 工作人员配备铅当量不小于 0.5mm 的铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖、铅橡胶帽、铅玻璃眼镜；计划给 PET/CT 和 ^{131}I 核素治疗工作人员配备放射性污染防护服。

（11）医院计划为核医学科配备应急及去污用品，主要包括下列物品：一次性防水手套、气溶胶防护口罩、安全眼镜、防水工作服、胶鞋、去污剂和/或喷雾（至少为

加入清洗洗涤剂和硫代硫酸钠的水）；小刷子、一次性毛巾或吸水纸、毡头标记笔（水溶性油墨）、不同大小的塑料袋、酒精湿巾、电离辐射警告标志、胶带、标签、不透水的塑料布、一次性镊子。

本项目拟设置的辐射安全装置和保护措施符合《核医学放射防护要求》GBZ120-2020 和《核医学辐射防护与安全要求》HJ1188-2021 的要求。

3 DSA 项目

3.1 项目工作场所布局合理性分析

医院在浒关院区二期住院楼介入中心开展 DSA 项目，工作场所主要由 DSA 手术室、控制廊、设备间、无菌间、敷料间、铅衣间、患者/污物走廊、污洗间、更衣淋浴间等组成。介入中心出入口设有门禁系统，除科室人员刷门禁卡可以进入外，其他人员一般不允许进入。医院将 DSA 手术室划为控制区，将手术室相邻的控制廊、设备间、铅衣间、患者/污物走廊、污洗间等区域划为监督区。控制区与监督区划分见附图 10-4，其中红色表示控制区，蓝色表示监督区。本项目分区符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的规定，将辐射工作区域进行分区，同时对控制区和监督区采取相应的措施，可以有效避免人员误闯入而造成的误照。

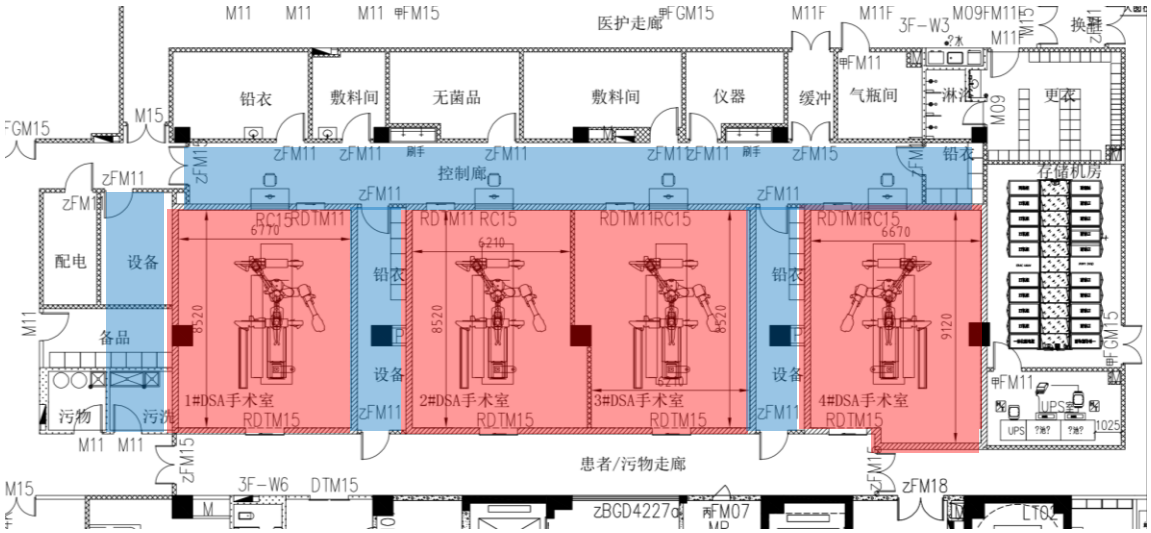


图 10-4 DSA 手术室布局及分区图

3.2 辐射防护屏蔽设计

本项目 1#~4#DSA 手术室除机房尺寸不一致外，其它屏蔽防护设计一致。因此选取其中机房单边长度和有效面积最小的 2#DSA 手术室进行屏蔽防护分析。2#DSA 手术室尺寸、最小单边长度、有效使用面积及屏蔽参数见下表。

表 10-8 2#DSA 手术室辐射防护屏蔽参数一览表

机房	设计参数		GBZ130-2020 要求	评价
2#DSA 手术室	最小单边长度	6.21m	3.5m	满足
	有效使用面积	6.21×8.52≈52.91m^2	20m^2	满足
	四周墙面：24cm 蒸压灰砂砖+2mmPb 铅板（4.4mm 铅当量） 顶部： 25cm 混凝土（3.4mm 铅当量）；地面： 25cm 混凝土（3.4mm 铅当量）；防护门： 4 mm 铅当量；观察窗：4mm 铅当量		2mmPb	满足
注：混凝土密度为 2.35g/cm^3，蒸压灰砂砖密度为 1.80g/cm^3，铅板密度为 11.35g/cm^3。				

3.3 辐射安全措施

本项目设计有相应的辐射安全装置和保护措施，主要有：

（1）控制台处设置观察窗，工作人员通过观察窗观察机房内患者状态。

（2）医院在 DSA 手术室入口处设置工作警示灯，警示灯箱处设置警示语句，并在醒目位置张贴“当心电离辐射”以及放射防护注意事项。

（3）防护门设置闭门装置，工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动。

（4）医院拟为本项目 DSA 工作人员配备双个人剂量计。

（5）医院拟为参与介入手术的辐射工作人员配备一系列的个人防护用品，具体配备情况见下表。

表 10-9 拟配备的个人防护用品一览表

使用场所	标准要求			拟配备的防护用品		数量
	使用人员	防护用品名称	标准铅当量	防护用品名称	标准铅当量	
浒关院区二期住院楼 1#~4# DSA 手术室	受检者	铅橡胶性腺防护围裙（方形）或方巾、铅橡胶颈套	≥0.50mmPb	铅橡胶性腺防护方巾	0.5mmPb	4
				铅橡胶颈套		4
		选配：铅橡胶帽子	成人≥0.25mmPb；儿童≥0.50mmPb	铅橡胶帽子		4
	工作人员	铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套	介入防护手套≥0.025mmPb、铅橡胶围裙、铅橡胶颈套≥0.50mmPb、其它≥0.25mmPb	铅橡胶围裙	0.5mmPb	10
				铅橡胶颈套	0.5mmPb	10
				铅防护眼镜	0.25mmPb	10
				介入防护手套	0.025mmPb	若干
		选配：铅橡胶帽子		铅橡胶帽子	0.25mmPb	10

表 10-10 拟配置的辅助防护用品一览表

使用场所	标准要求		拟配备防护用品		数量
	防护用品名称	标准铅当量	防护用品名称	标准铅当量	
浒关院区二期住院楼1#~4#DSA手术室	铅悬挂防护屏	≥0.25mmPb	铅悬挂防护屏	0.25mmPb	4
	床侧防护帘		床侧防护帘		4
	选配：移动铅防护屏风	≥2.0mmPb	移动铅防护屏风	2.0mmPb	4

（6）其他辐射安全措施

介入手术需要长时间的透视和大量的摄片，对病人和医务人员来说辐射剂量较高，因此在评估介入放射的效应和操作时，其辐射损伤必须要加以考虑。由于需要医务人员在机房内，X 射线球管工作时产生的散射线对医务人员有较大影响，根据辐射防护“三原则”，医院还应在以下方面加强对介入放射的防护工作：

a）操作中减少透视时间和减少照相的次数可以显著降低工作人员的辐射剂量，介入人员在操作时应尽量远离检查床。

b）一般说来，降低病人的剂量的措施可以同时降低工作人员的辐射剂量，应加强对介入人员的培训，包括放射防护的培训，参与介入的人员应该技术熟练、动作迅速，以减少病人和介入人员的剂量。

c）所有在 DSA 机房内的工作人员，并不仅限于介入手术医生，而包括周围护理人员，都应开展个人剂量监测，医院应结合工作人员个人剂量监测的数据采取措施，控制和减少工作人员的受照剂量。

d）引入的 DSA 及配套设备必须符合国际的或者国家的标准，满足各种特殊操作的要求，其性能必须与操作性质相符合；设备应该常规调节到满足低剂量的有效范围内，并尽可能提高图像质量。

e）介入人员应该结合 DSA 设备的特点，了解一些降低剂量的方法，比如采用小照射野、低频率脉冲透视等方法。

f）加强 DSA 设备的质量保证工作，设备的球管与高压发生器、透视和数字成像的性能以及其它相关设备应该定期进行检测。

g）临床介入手术时，介入医生需站在 DSA 床边操作，仅依赖于医务人员身着铅衣、机器自带的铅吊帘等防护设备被动防护。一般来说，床下球管机对医务人员的辐射剂量，由头、颈、胸至腹部呈现剂量逐渐上升的趋势，故操作人员除个人防护用品

（铅衣、铅围脖、铅帽及铅眼镜等）外，应着重考虑 X 射线机操作侧的屏蔽，该屏蔽要做到既不影响操作者的操作，又能达到防护目的，且能消毒。如：床侧立地防护屏、防护手术手套、床侧竖屏及床上防护屏、床下吊帘、床侧吊帘、床上防护覆盖板等。以上组合屏蔽防护措施的使用，能够有效降低介入手术医务人员的吸收剂量，尤其是胸部以下部位屏蔽效果在 80%以上。

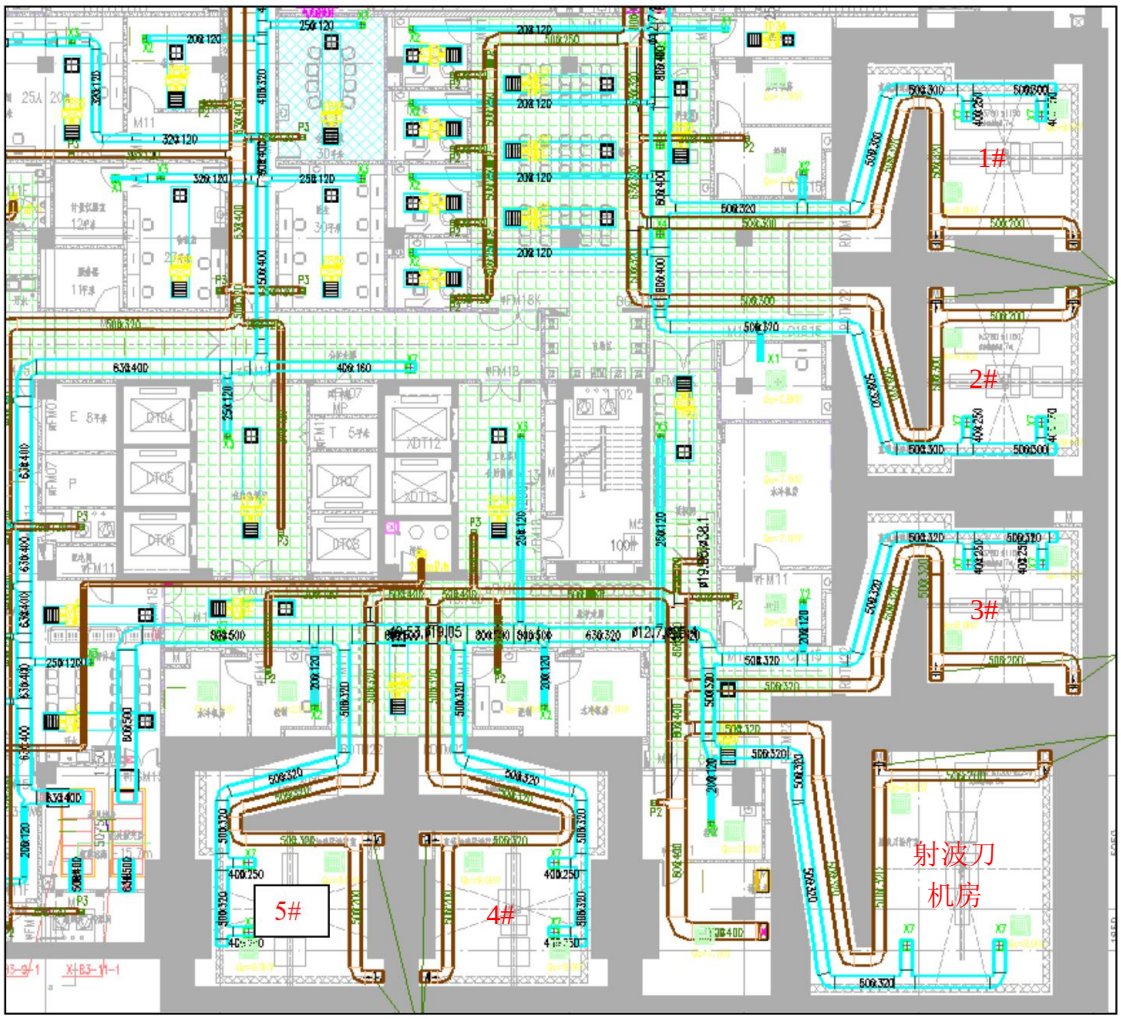
三废的治理

1 放疗科项目

本项目运行过程中无放射性废水、废气产生。直线加速器靶物质（件）以及机头等金属部件由于受电子的轰击会产生较强的感生放射性，机器退役（约使用 10 年）后更换下来的废靶件等应作为放射性废物处理，送城市放射性废物库收贮。

设备在工作状态时，产生的 X 射线会使机房内空气电离产生少量臭氧和氮氧化物。本项目治疗室内设计有通风装置，通风设计见图 10-5。进风管道和排风管道均从防护门上方斜穿进入并经迷道进入机房，每个机房进风口和排风口各有 2 个。以 4 号加速器机房为例，2 个进风口分别位于屋顶的东北角和东南角，距离地面约 3.5m，2 个排风口分别位于西北角和西南角，距离地面约 0.3m。进风口和排风口为对角设置，可以保证室内空气充分交换。医院为每个机房均配备 1 台风机，其中加速器机房拟配备风机最大风量约为 2500m^3/h，治疗室净体积约为 320m^3（包括迷道），治疗室内通风换气频率约为 7.81 次/h；射波刀机房拟配备风机最大风量约为 3000m^3/h，治疗室净体积约为 471m^3（包括迷道），治疗室内通风换气频率约为 6.37 次/h。综上机房的通风次数能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中的换气次数不少于 4 次/h 的要求。

在工作中要保证治疗室通风设施完好和正常工作，在此前提下臭氧和氮氧化物等有害气体将不会对人员和设备产生危害。治疗室内产生的少量臭氧和氮氧化物通过排风系统排入外环境，臭氧在常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。



注：蓝色管道为进风管道，棕色管道为排风管道。

图 10-5 加速器机房和射波刀机房通风设计图

2 核医学科项目

2.1 放射性废水处理措施

医院在二期工程住院楼东北侧地下设置一个衰变池，位置见附图 5。衰变池体由 30cm 厚防渗混凝土浇筑，并涂抹防水层。衰变池分为 A、B 两部分，A 衰变池用于长半衰期放射性废水的储存，收集核素治疗工作场所产生的废水，由 3 个 63m^3 衰变池组成；B 衰变池用于短半衰期放射性废水储存，收集诊断工作场所和正电子药物生产场所产生的废水，由 3 个 28m^3 衰变池组成；除此之外，另设了 1 个 28m^3 事故衰变池和 2 个化粪池。本项目衰变池设计见附图 17，衰变池构造、容积及工作流程见下表：

表 10-11 衰变池构造、容积及工作流程

名称	基本信息
A 衰变池	
B 衰变池	

医院拟将核素治疗场所产生的放射性废水暂存于 A 衰变池内。根据表 9-17 可知，核素治疗场所年产生的废水量约为 185m^3，则月产生的废水量约为 15.42m^3，A 衰变池中单个衰变池容积约为 63m^3，当其中一个衰变池内废水储满开始至其它两个衰变池储满时间约为 8.17 个月（126/15.42≈8.17），满足暂存时间超过 180 天的要求，

并在排放前进行取样监测，经监测达到排放标准后排入医院污水处理系统。

医院拟将回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验核素显像诊断场所及核素显像诊断场所产生的放射性废水暂存于 B 衰变池内。根据表 9-17 可知，该部分年产生的废水量约为 234.5m^3，则月产生的废水量约为 19.54m^3，B 衰变池中单个衰变池容积约为 28m^3，当其中一个衰变池内废水储满开始至其它两个衰变池储满时间约为 2.86 个月（56/19.54≈2.86），满足暂存时间超过核素最长半衰期 10 倍（33 天）的要求，并在排放前进行取样监测，经监测达到排放标准后排入医院污水处理系统。

综上所述，核医学科医院采取的放射性废水处置措施能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的要求。

2.2 放射性固体废物处理措施

本项目各场所控制区房间内均拟设置放射性废物收集桶，分别用于收集放射性物质操作过程中各场所产生的放射性固废。核素显像诊断场所设有一间放射性固体废物间，体积约为 24m^3；核素治疗场所设有一间放射性固体废物间，体积约为 27m^3。

根据表 9-18 可知，回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验核素显像诊断场所及核素显像诊断场所年产生的放射性固体废物量约为 175kg，放射性固体废物间体积约为 24m^3。医院拟将该部分放射性固体废物暂存于固体废物间内不少于 33 天，并经监测辐射剂量率满足所处环境本底辐射水平后可作为医疗废物处理，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的要求。

根据表 9-18 可知，核素治疗场所年产生的放射性固体废物量约为 50kg，废活性炭年产生量约为 50kg，放射性固体废物间体积约为 27m^3。医院拟将该部分放射性固体废物暂存于核素治疗场所固体废物间内不少于 180 天，并经监测辐射剂量率满足所处环境本底辐射水平后可作为医疗废物处理，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的要求。

根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020），医院拟对放射性废物的管理措施主要有：

（1）各场所设置的放射性废物桶均拟采用 5mm 铅当量的铅屏蔽，并拟在废物桶外明显位置设置电离辐射警示标志。废物桶的放置于房间角落，避开工作人员工作和经常走动的区域。

（2）废物桶内拟放置专用塑料袋直接收纳废物，拟对装满后的废物袋进行密封，

不破漏，并再标记相应信息后及时送放射性废物间专用容器中贮存。

（3）对注射器和碎玻璃器皿等含尖刺及棱角的放射性废物，应先装入利器盒中，然后再装入专用塑料袋内。

（4）放射性废物贮存间拟设通风设施，出入口设电离辐射警告标志。

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

（6）各放射性废物包装体外表面的污染控制水平：$\beta<0.4Bq/cm^2$。

2.3 放射性废气处理措施

核医学科工作场所内设有套单独的通风系统（见附图 18），监督区拟设为正压通风，控制区域均拟设为微负压通风，以保证工作场所内的空气由低活区向高活区流动。回旋加速器机房的体积约为 312m^3，机房的排风量不低于 2000m^3/h，则机房内的通风系统设计换气次数不小于 6.41 次/h，由单独的外排口由楼顶排出，排风口高于本建筑的屋顶，排风口处设有活性炭过滤装置对放射性气溶胶进行吸附，并每季度更换一次活性炭，更换的废活性炭作为放射性固体废物处理。

本项目放射性药物在合成柜和通风橱内操作，合成柜或通风橱均拟设计独立的排风系统，风速不小于 0.5m/s，外排口由专用管道延伸至楼顶，排风口高于本建筑的屋顶，排风口处设有活性炭过滤装置对放射性气溶胶进行吸附，并每季度更换一次活性炭，更换的废活性炭，暂存于放射性固废室，满足清洁解控标准后解控处理。

综上所述医院采取的放射性废气处理措施能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的要求。

3 DSA 项目

DSA 运行时不产生放射性废水、放射性废气及放射性固体废物，但其在开机并处于出束状态时，会使机房内的空气电离产生少量的臭氧和氮氧化物，产生的臭氧和氮氧化物可通过机房的机械通风系统排出，臭氧常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。

表 11 环境影响分析

建设阶段对环境的影响

本项目属于新建项目，项目建设施工时对环境会产生如下影响：

（1）大气：根据《江苏省大气污染防治条例》等有关规定，本项目施工期拟采取以下环保措施：1）施工工地主要道路和操作场地应当用混凝土进行硬化，场内硬化地面、出入口道路无明显积尘；2）工地出口应设置车辆冲洗平台，确保车辆驶离建筑工地前车厢及厢盖外部、底盘、轮胎等处不得粘有污物和泥土；3）进场施工前建设安装智慧工地系统和围挡喷淋系统，配备酒水车、雾炮等降尘设备；4）建筑垃圾、工程渣土在四十八小时内完成清运，未及时清运的在施工工地内临时堆放并采取围挡、遮盖等防尘措施；5）挖掘机加装喷淋装置，配备小型雾炮等洒水设备，挖掘和拆除过程中进行全程跟随洒水或者喷淋；6）使用商品混凝土及成品砂浆，严禁露天搅拌砂浆、混凝土，砂浆罐应当用硬质材料密封，并在顶部加装喷淋；7）设置钢筋加工焊接作业棚，禁止露天焊接作业，配备焊烟回收处理装置，禁止焊烟直排；8）施工所用非道路移动机械应张贴环保标识，尾气排放应符合达标排放要求；9）制作并张贴扬尘控制承诺书，制定施工期环境保护制度。

（2）噪声：在施工时严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）标准，尽量使用噪声低的设备，同时严禁夜间进行强噪声作业。

（3）固体废物：施工期间，产生一定量以建筑垃圾为主的固体废弃物，委托有资质的单位清运，并做好清运工作中的装载工作，防止建筑垃圾在运输途中散落。

（4）废水：项目施工期间，有一定量含有泥浆的建筑废水产生，对这些废水进行初级沉淀处理，并经隔渣后排放。

医院在施工阶段计划采取上述污染防治措施，将施工期的影响控制在局部区域，对周围环境影响较小。

运行阶段对环境的影响

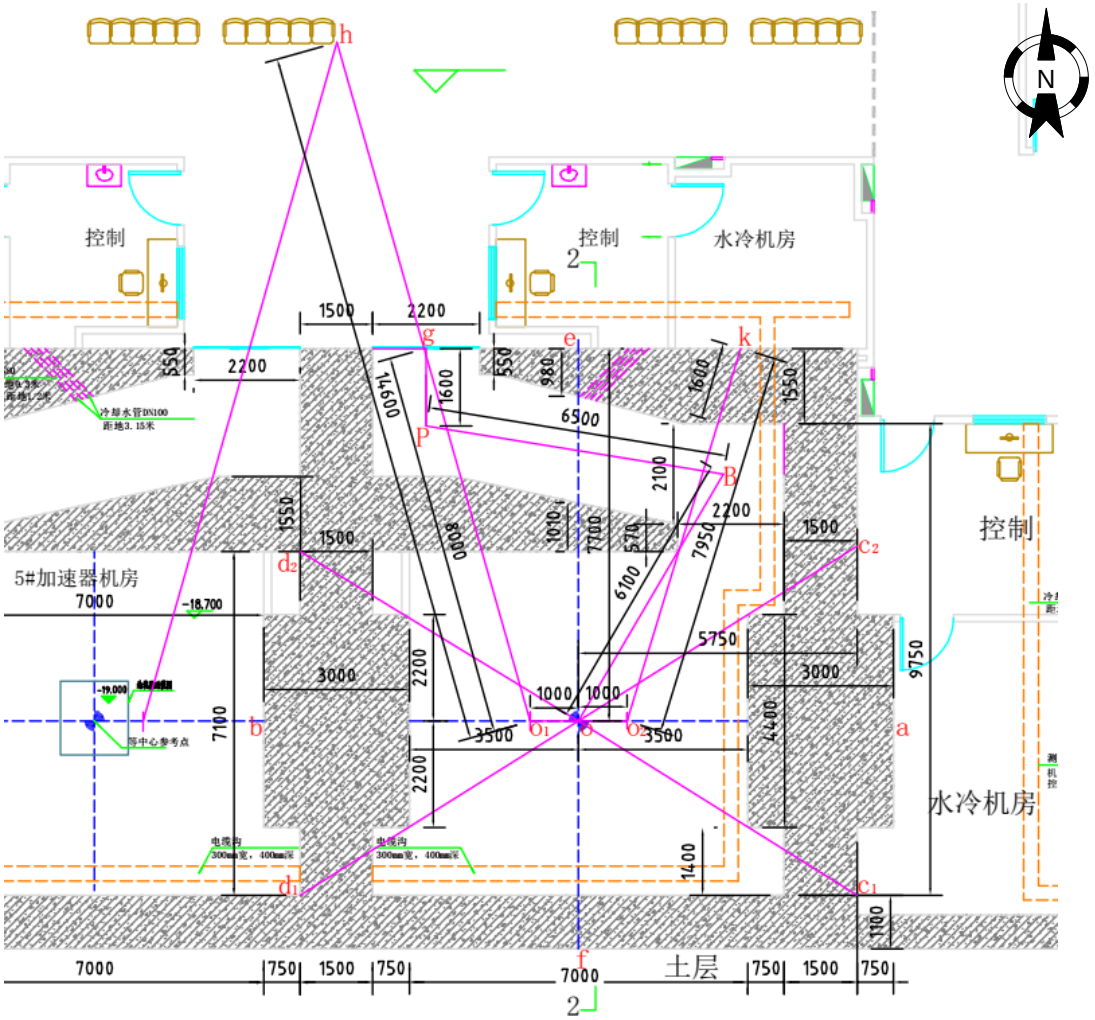
1 放疗科项目辐射环境影响分析

1.1 直线加速器

1.1.1 参考点位选取

本项目的五座加速器机房除所处位置不同外，屏蔽设计方案一致，且配备的加速器的 X 射线、电子线能量、距靶 1m 处剂量率等参数一致。因此，选取 4#加速器

进行辐射环境影响分析，若其能够满足辐射防护要求，则其四座加速器机房必能满足要求。根据 GBZ/T201.2-2011 的要求，在加速器机房外设定关注点。以加速器最大功率运行并针对关注点最不利的情况进行预测计算。预测参考点见图 11-1。



4#加速器机房平面图

4#加速器机房2-2剖面图

图 11-1 4#加速器机房屏蔽墙体和防护门参考点位图

1.1.2 有用线束主屏蔽区宽度核算

根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）的相关公式，可计算出有用线束主屏蔽区宽度。

$$Y_p=2[（a+SAD）\cdot\tan\theta+0.3] \quad \cdots\cdots（1）$$

式中，Y_p：机房有用束主屏蔽区域宽度，m；

SAD：源轴距，m；

θ：治疗束的最大张角（相对束中的轴线），即射线最大出射角的一半；

a：等中心点至“墙”的距离，m。当主屏蔽区向机房内凸时，“墙”指与主屏蔽墙相连接的次屏蔽墙（或顶）的内表面；当主屏蔽区向机房外凸时，“墙”指主屏蔽区墙（或顶）的外表面。

将各参数代入式（1）可估算出 4#加速器机房主屏蔽墙宽度，见下表：

表 11-1 4#加速器主屏蔽区域宽度设计评价表

参数	取值		
	东主屏蔽	西主屏蔽	屋顶主屏蔽
a（m）	6.5	6.5	5.2
SAD（m）	1	1	1
θ(°)	14	14	14
计算宽度 Y_p（m）/半宽度	4.34/2.17	4.34/2.17	3.70/1.85
设计宽度（m）/最小半宽度	4.4/2.2	4.4/2.2	4.4/2.2
评价	满足	满足	满足

从上述估算结果可知，4#加速器机房主屏蔽区域屏蔽墙宽度能够满足拟配置的医用加速器有用射线束宽度的防护要求。

1.1.3 主屏蔽墙防护效果预测（东侧主屏蔽墙 a 点、西侧主屏蔽墙 b 点和屋顶 l 点）

（1）主射线路径：东侧主屏蔽墙：O_1→a，西侧主屏蔽墙 O_2→b、屋顶 O_3→l

（2）计算模式及参数选择：

加速器主射线照射方向为东墙、西墙及屋顶。主屏蔽区域受到辐射主要有有用射线束、泄漏射线及散射射线。与有用射线相比，泄漏射线及散射射线影响较小，因此主要考虑有用射线的影响。辐射防护预测模式可采用 GBZ/T 201.2 -2011 第 5.2 章中推荐的估算公式，相关参数均取自该标准中的附录 B：

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots（2）$$

式中：$\dot{H}$：参考点辐射剂量水平，μSv·h^{-1}

$\dot{H}_0$：加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶 1m 处最高剂量率，μSv·m^2·h^{-1}，本报告以最大剂量率进行估算。

R：辐射源（靶点）至参考点的距离，m

f：对有用线束为 1，对泄漏辐射为泄漏辐射比率，一般取有用线束的 0.1%

B: 屏蔽透射因子，可通过下式进行计算

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots（3）$$

式中：Xe 为有效屏蔽厚度（cm），TVL 和 TVL1 为辐射在在屏蔽物质中平衡什值层厚度和第一什值层厚度（cm）

有效屏蔽厚度与射线与屏蔽墙的斜射角 θ 有关，主屏蔽墙取 0°。设屏蔽墙外参考点距离屏蔽墙的距离均为 30cm，各参考点处的辐射水平理论估算结果见表 11-2。

表 11-2 4#加速器机房主屏蔽区域防护能力计算结果

参数		东墙（a 点）	西墙（b 点）	屋顶（l 点）
厚度 X（*cm*）		300cm 砼	300cm 砼	300cm 砼
有效屏蔽厚度 Xe（cm）		300cm 砼	300cm 砼	300cm 砼
TVL_1（cm）		44	44	44
TVL（cm）		41	41	41
B		5.70E-08	5.70E-08	5.70E-08
$\dot{H}_0$（μSv·m^2·h^{-1}）（以 1m 处最大剂量率预测）		8.40E+08	8.40E+08	8.40E+08
R（*m*）①		7.8	7.8	6.5
参考点处辐射剂量率 $\dot{H}$ (μSv·h^{-1})	$\dot{H}$ 估算值	0.79	0.79	1.13
	$\dot{H}$ 控制值	10	4.0	10
	评价结果	满足	满足	满足
注：①R 值均从图 11-1 中参数计算得出。				

1.1.4 与主屏蔽相连的次屏蔽防护效果预测（c_1、c_2 点、d_1、d_2 点和屋顶 m_1 点、m_2 点）

与主屏蔽区域相连的次屏蔽区域受到辐射主要为来自加速器机头的泄漏射线和来自患者的一次散射射线及机房地面、墙面的二次或多次散射射线。二次或多次散射射线影响较小，因此主要考虑泄漏射线和患者的一次散射射线的影响。

（1）射线路径：

泄漏辐射：东墙：O→c_1、O→c_2，西墙：O→d_1、O→d_2，屋顶：O→m_1、O→m_2

散射辐射：东墙：O_1→O→c_1、O_1→O→c_2；西墙：O_2→O→d_1、O_2→O→d_2；屋顶：O_3→O→m_1、O_3→O→m_2

（2）计算模式及参数选择：

泄漏辐射的屏蔽能力计算：在进行泄漏辐射防护计算时，为简化漏射线辐射计算，通常假定漏射线与有用线束射线具有相同的能量，且与靶心距离相同的漏射线辐射的最大强度不会超过有用射线强度的 0.1%。辐射防护预测模式与主射线估算相同（同公式（2）），斜射角 θ 可取 30°。

患者一次散射、泄漏辐射散射屏蔽能力计算：散射辐射预测模式可采用 GBZ/T 201.2 -2011 第 5.2 章中推荐的估算公式，

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot \alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_s^2} \cdot B \qquad \text{……（4）}$$

式中：$\dot{H}$、$\dot{H}_0$ 及 B 均与（1）式相同

R_s^2：患者（位于等中心点）至参考点的距离，m

F：治疗装置有用束在等中心处的最大治疗面积（cm^2），取 40×40cm^2

α_{ph}：400cm^2 面积上的散射因子，查 GBZ/T 201.2-2011 附录 B 中表 B.2，本项目保守取能量为 10MV 散射角度 30 度下 α_{ph} 值，3.18E-3。

设屏蔽墙外参考点距离屏蔽墙的距离均为 30cm，各参考点处的泄漏辐射及散射辐射水平理论估算结果见表 11-3。

表 11-3 4#加速器机房与主屏蔽相连次屏蔽区域防护能力计算结果

参数		东墙	西墙	屋顶
		c_1点（c_2点）	d_1（d_2点）	m_1点（m_2点）
泄漏辐射	混凝土建筑厚度 X（*cm*）	150	150	150
	θ（°）	30	30	30
	有效屏蔽厚度 Xe（cm）	173.2	173.2	173.2
	TVL_1	36	36	36
	TVL	33	33	33
	B	6.97E-6	6.97E-6	6.97E-6
	$\dot{H}_0$（$\mu Sv \cdot m^2 \cdot h^{-1}$）	8.40E+08	8.40E+08	8.40E+08
	R（*m*）	6.94	6.94	5.96
	$\dot{H}$ 估算值($\mu Sv \cdot h^{-1}$)	0.12	0.12	0.17
患者散射辐射	有效屏蔽厚度 Xe（cm）	173.2	173.2	173.2
	TVL_1	31	31	31
	TVL	31	31	31
	B	2.59E-6	2.59E-6	2.59E-6
	α_{ph}	3.18E-3	3.18E-3	3.18E-3
	Rs	6.94	6.94	5.96
	$\dot{H}$ 估算值($\mu Sv \cdot h^{-1}$)	0.58	0.58	0.78
泄漏辐射和散射辐射的复合作用 $\dot{H}$ ($\mu Sv \cdot h^{-1}$)		0.70	0.70	0.95
$\dot{H}$ 控制值($\mu Sv \cdot h^{-1}$)		2.5	4	10
评价结果		满足	满足	满足

注：①散射角取 30°；②根据图 11-1 中相关参数，可计算出 $R_{(c1)}$=等中心点 o 至东墙外表面距离 5.75m/cos(30°)+0.3m（参考点距离）=6.94m；$R_{(d1)}$=等中心点 o 至西墙外表面距离 5.75m/cos(30°)+0.3m（参考点距离）=6.94m；$R_{(m1)}$=等中心点 o 至顶部次屏蔽墙外表面距离 4.9m/cos(30°)+0.3m（参考点距离）=5.96m。

1.1.5 侧屏蔽墙屏蔽效果预测（e 点、f 点）

（1）射线路径：O→e 、O→f

（2）计算模式及参数选择：

加速器机房南墙、北墙为侧屏蔽墙，主要考虑泄漏射线的辐射影响，辐射防护预测模式与主射线估算相同（同公式（2））。机房南侧为混凝土加土层，因此南墙不进行预测。

（3）预测计算结果

屏蔽墙外参考点 e 的位置见图 11-1，其辐射水平预测结果见表 11-4。

表 11-4 4#加速器机房侧屏蔽墙防护能力计算结果

参数	北墙（e 点）	
混凝土建筑厚度 X（*cm*）	199（迷道内墙 101+迷道外墙 98）	
有效屏蔽厚度 Xe（cm）	199	
TVL_1	36	
TVL	33	
B	1.15E-6	
泄漏辐射比 f	0.001	
$\dot{H}_0$（μSv·m²·h⁻¹）	8.40E+08	
R（*m*）	8.0	
参考点处辐射剂量率 $\dot{H}$ (μSv·h⁻¹)	$\dot{H}$ 估算值	0.015
	$\dot{H}$ 控制值	2.5
	评价结果	满足

1.1.6 迷路外墙设计核算（k 点）

加速器机房主射线不向迷道照射，加速器靶点位于 O_2 点（偏离 O 点 1m）时，迷道外墙 k 点处辐射剂量率最大，泄漏辐射起决定性作用。根据公式（2），可估算出加速器机房迷道外墙 k 点处辐射剂量率水平，计算结果见表 11-5。

表 11-5 4#加速器机房迷路外墙 k 处的泄漏辐射剂量率

参数	厚度 X（cm）	有效厚度 Xe（cm）	TVL_1	TVL	B	*R*（*m*）	$\dot{H}$（μSv/h）
加速器机房	155	160	36	33	1.75E-05	8.25	0.22

注：Xe 根据图 11-1 厚度为 160cm；O_2 至 K 为 7.95m，参考点墙外 0.3m。

1.1.7 迷路入口处辐射水平核算（g 点）

（1）穿透过迷路内墙的泄漏 X 射线在 g 点处的辐射影响

射线路径（射线类型）：O_1→g（泄漏射线）

g 点泄漏辐射剂量使用公式（2）计算。TVL_1 和 TVL 为附录 B 表 B.1 的泄露辐射值，分别为 TVL_1=36cm，TVL=33cm，O_2 点至 k 的泄漏辐射的斜射取 30º 进行估算。g 点辐射剂量率计算参数和结果下表。

表 11-6 治疗室入口门外参考点泄漏辐射剂量率计算参数和计算结果

参 数	机房入口门外（g 点）
混凝土建筑厚度 X（*cm*）	155
θ（º）	30
有效屏蔽厚度 Xe（cm）	179
TVL_1（cm）	36
TVL（cm）	33
B	4.66E-6
R（m）	8.89
f	0.001
H_0（μSv•m^2/h）	8.40E+08
入口门外关注点泄漏辐射剂量率 H_{og}（μSv/h）	0.05
注：R= o_1 至入口垂直距离 7.7m/cos(30°) =8.89m。	

根据上述结果可知，加速器的泄露辐射 O_1 经迷路内墙屏蔽后在迷路入口 g 点的辐射剂量为 0.05μSv/h，满足标准要求（剂量率应小于参考控制水平的 1/4，即 1.0μSv/h）。

（2）中子辐射

1）总中子注量率（ϕ_B）

迷道的中子散射路径为“o-B-g”。B 点是从等中心点与迷道内墙端的连线和迷道长轴中心线之间的交点。总中子注量率计算采用公式（5）进行计算：

$$\varphi_B = \frac{Q_n}{4\pi d_1^2} + \frac{5.4Q_n}{2\pi S} + \frac{1.26Q_n}{2\pi S} \qquad \text{……（5）}$$

式中：ϕ_B-等中心处 1Gy 治疗治疗照射时 B 处的总中子注量。(中子数/m^2)/ Gy；

Q_n-在等中心处每 1Gy 治疗照射时射出加速器机头的总中子数，中子数/Gy，拟配备的加速器 Q_n 不超过 0.76E+12 中子数/Gy；

d_1-等中心点 O 至 B 点的距离，m，根据图 11-1 得到为 6.1m；

S-治疗机房总内表面积（m^2）包括四壁墙、顶面和底面，不包括迷路内各面积。

2）机房入口的中子剂量率

机房内的中子经迷道散射后，在机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的剂量率采用公式（6）进行计算：

$$\dot{H}_n = 2.4\times10^{-15}\cdot\phi_B\cdot\sqrt{\frac{S_0}{S_1}}\cdot\left[1.64\times10^{-(d_2/1.9)}+10^{-(d_2/T_n)}\right]\cdot\dot{H}_o \quad \text{……（6）}$$

式中，$\dot{H}_n$、$\dot{H}_o$、ϕ_B、d_2意义同前文；

2.4×10^{-15}-该计算方法中的经验因子，Sv /（中子数/m^2）；

S_0 -迷路内口的面积，m^2，迷路内口宽 2.2m，机房高 4.7，则 S_0=10.34；

d_2 -B 点至机房入口的距离，m，根据图 11-1 保守取 d2=6.50+1.6=8.1m；

S_1-迷路横截面积，m^2，迷路宽 2.1m，机房高 4.7，则 S_1=9.87；

T_n-迷路中能量相对高的中子剂量组分式（7）方括号中得第二项衰减至十分之一行径的距离（m），称为什值距离。T_n是一个经验值，与迷路横截面积有关，T_n按下式计算：$T_n = 2.06\sqrt{S_1}$

3）机房入口的中子俘获γ射线的剂量率（$\dot{H}_\gamma$）

机房内及迷路中的中子在与屏蔽物质作用时产生中子俘获 γ 射线，机房入口门外 30cm（g 点）无防护门时的中子俘获 γ 射线的剂量率采用公式（7）进行计算：

$$\dot{H}_\gamma = 6.9\times10^{-16}\cdot\phi_B\cdot10^{-d_2/TVD}\cdot\dot{H}_o \quad \text{……（7）}$$

式中，$\dot{H}_\gamma$意义同前文；

6.9×10^{-16}-该计算方法中的经验因子，Sv/（中子数/m^2）；

ϕ_B-等中心处 1Gy 治疗照射时 B 处的总中子注量，（中子数/ m^2）/Gy，B 点是从等中心点与迷路内墙端的连线和迷路长轴中心线之间的交点；

d_2 -B 点至机房入口（g）的距离，m，同上；

TVD-什值距离，对于 15MV 加速器为 3.9m；

$\dot{H}_o$-等中心点处治疗 X 射线剂量率（μGy/h），本项目取 8.40E+08。

4）入口门屏蔽（$\dot{H}$）

入口门屏蔽设计时，通常使中子和中子俘获 γ 射线屏蔽后有相同的辐射剂量率，对于中子俘获γ射线，以铅屏蔽；对于中子，以含硼（5%）聚乙烯屏蔽，当给定防护门屏蔽厚度 X_γ和 X_n时，防护门外的辐射剂量率按下式计算：

$$\dot{H} = \dot{H}_\gamma\cdot10^{-(X_\gamma/TVL_\gamma)}+\dot{H}_n\cdot10^{-(X_n/TVL_n)}+\dot{H}_{og}\cdot B_{og} \quad \text{……（8）}$$

式中，$\dot{H}$意义同前文；

X_γ -防护门铅屏蔽厚度，cm；

X_n-防护门含硼（5%）聚乙烯屏蔽厚度，cm；

$\dot{H}_{\gamma}$-意义同前文；$\dot{H}_{n}$-意义同前文；

$\dot{H}_{og}$-穿过迷路内墙的泄漏辐射在防护门入口处无防护门时的剂量率，μSv/h；

B_{og}-防护门对 $\dot{H}_{og}$ 的屏蔽透射因子，在 $\dot{H}_{og}$ 相对防护门入口处的总剂量率较小时，可以忽略 $\dot{H}_{og} \cdot B_{og}$ 项；

TVL_{γ}-中子俘获 γ 射线在铅屏蔽中的什值层，cm，取值 3.1；

TVL_{n}-中子在含硼（5%）聚乙烯屏蔽中的什值层，cm，取值 4.5。

5）机房入口辐射剂量预测计算结果

机房入口辐射剂量预测计算参数及计算结果见下表。

表 11-7 机房入口辐射剂量预测计算参数及计算结果

参 数		防护门屏蔽设计核算
Q_n（中子数/Gy）①		7.6E+11
d_1（m）		6.1
S（m^2）		266.82
Φ_B（中子数/m^2）/Gy；		4.65E+09
d_2（m）		8.1
TVD（m）		3.9
H_{γ}（μSv/h）		22.56
S_0（m^2）		10.34
S_1（m^2）		9.87
T_n=2.06×（S_1）$^{0.5}$		6.47
H_n(μSv/h)		538.1
X_{γ}（cm）		4
X_n（cm）		20
TVL_{γ}（cm）		3.1
TVL_n 此处引用 附表 C 5%聚乙烯（cm）		4.5
H_{og}		0.05
B_{og}		0.199
相应屏蔽体外关注点剂量率 H （μSv/h）	H 估算值	1.19
注：①拟配备的加速器 Q_n 不超过 0.76E+12 中子数/Gy		

1.1.8 加速器机房辐射防护评价

4#加速器机房屏蔽墙、顶部及防护门外估算结果及与剂量率控制水平值见下表：

表 11-8 4#加速器机房屏蔽防护设计理论估算结果汇总表

位置	东墙		西墙		北墙		屋顶		防护门
	主屏蔽	次屏蔽	主屏蔽	次屏蔽	次屏蔽		主屏蔽	次屏蔽	
参考点	a	c_1（c_2）	b	d_1（d_2）	e	k	l	m_1（m_2）	g
参考点剂量率值（μSv/h）	0.79	0.70	0.79	0.70	0.015	0.22	1.13	0.95	1.19
剂量率控制水平（μSv/h）	10	2.5	4.0	4.0	2.5	2.5	10	10	4
结论	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

根据上述结果可知，4#加速器机房的屏蔽墙、屋顶及防护门的防护设计能够满足拟配置的医用加速器的辐射防护要求，加速器运行过程中治疗室屏蔽墙和防护门外的剂量当量率均能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中剂量率限值要求。

本项目五座加速器机房屏蔽防护设计一致且拟配备的加速器的 X 射线、电子线能量、距靶 1m 处剂量率等设备参数一致。因此，可推定 2#加速器机房屏蔽防护设计必能够满足防护要求。

当加速器机房共同运行时，1#和 2#、2#和 3#、4#和 5#之间将产生辐射叠加影响。图 11-1 中 h 点为同时运行时机房外关注点，根据表 11-6 治疗室入口门外参考点 g 辐射剂量率为 1.19μSv/h，辐射剂量率与距离平方成反比，叠加后 h 点处辐射剂量率约为 0.71μSv/h（2*1.19*(8/14.6)^2），满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中剂量率限值要求。

1.1.9 加速器机房电子线治疗时防护评价

本项目加速器最大 X 射线能量为 15MV，电子线最大能量为 22MeV。由于电子束的穿透能力远小于 X 射线，对治疗 X 射线的屏蔽机房完全满足屏蔽电子束的要求。电子束治疗时，平均束流为 nA 量级，X 射线治疗时平均束流为 μA 量级，治疗电子束所产生的韧致辐射远小于 X 射线治疗时的辐射，即使电子能量大于治疗 X 射线的最大能量，对屏蔽电子束的韧致辐射所需要的厚度也低于对 X 射线的屏蔽要求。

1.1.10 感生放射性的影响分析与评价

对于能量大于 10MV 的医用直线加速器，每次开机治疗时会产生感生放射性，它

主要包括以下两个方面：①加速器结构材料的固态感生放射性：在加速器运行期间，由于有足够的结构屏蔽，由部件产生的感生放射性不会危害到屏蔽体外的人员。但当加速器停机后，人员进入机房会对人员造成一定的辐照危害。②气态感生放射性核素：加速器治疗室内的空气受到高能粒子照射时产生的感生放射核素（如 11C、^{13}N 和 ^{15}O 等）。参考《高能医用直线加速器感生放射性辐射场特点和防护研究》（职业与健康，2014 年 7 月第 30 卷第 13 期）中的表 2 和表 3：

表 11-9 15MV X 射线 600MU 不同照射野和不同时间机头感生放射性水平（μSv/h）

照射野（cm×cm）	30s	1min	2min	3min	4min	5min	6min	7min	8min	9min	10min
10×10	7.73	6.64	5.55	5.15	3.96	3.50	3.05	2.55	2.29	2.03	1.90
20×20	8.08	7.16	6.54	5.45	4.59	3.96	3.60	3.03	2.94	2.60	2.33
30×30	7.71	7.46	6.14	5.38	4.44	3.78	3.53	3.38	3.08	2.63	2.49
40×40	6.87	6.46	5.75	5.16	4.57	3.71	3.44	3.14	3.01	2.58	2.44

表 11-10 15MV X 射线 600MU 机房内不同位置和不同时间感生放射性水平（μSv/h）

位置	1min	2min	3min	5min	8min	10min
机头	6.46	5.75	5.16	3.71	3.01	2.44
治疗床平面照射野中心处	4.15	3.15	2.85	1.80	1.22	1.02
治疗床平面照射野中心 50cm 处	4.30	3.56	3.01	1.84	1.15	0.89
治疗床平面照射野中心 100cm 处	4.69	3.85	3.02	1.67	1.12	0.88
治疗床平面照射野中心 150cm 处	3.88	3.52	2.77	1.67	0.99	0.75
治疗床平面照射野中心 200cm 处	2.51	2.21	1.85	1.28	0.77	0.65

从上述两个表可知，在加速器照射结束后短时间内会对进入治疗室的工作人员造成一定的辐射危害。因此，在保证放疗质量的同时，应使放疗工作人员所遭受的辐射剂量合理保持在可以做到的最低水平作为放疗防护的目标，可以从以下几个方面减少其对工作人员造成的危害：

①做好个人防护，穿戴好铅衣、铅围脖、铅帽和铅眼镜；

②提高摆位效率，缩短滞留机房时间；

③待第一位病人治疗结束后，第二位病人可合理推迟进入治疗室（最少 5min 后再进入治疗室）；

④加强加速器室内通风，减少加速器室内空气中感生放射性核素的含量。

1.1.11 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

本项目单台加速器年开机治疗时机不超过 500 小时，项目运行后工作人员位于加速器控制室内，工作人员及公众年有效剂量可通过下式进行估算，根据公式（9）估算辐射工作人员及机房外 30cm 处公众年有效剂量结果见表 11-11。

$$H_e=H_{e,d}\cdot t\cdot U\cdot T \qquad \cdots\cdots(9)$$

上式中：H_e－年剂量，mSv/a；

$H_{e,d}$－参考点处剂量率，μSv/h；

U－使用因子；

T－人员在相应关注点驻留的居留因子；

t－照射时间，单位为 h/a。

表 11-11 辐射工作人员及机房周围公众年有效剂量计算结果

位置	北墙（控制室）	东墙（射波刀控制室）	西墙（5#机房）	防护门	顶部（热室）
参考点剂量率值（μSv/h）①	0.22	0.70	0.70	1.19	1.13
使用因子 U	1	1/4	1/4	1	1/4
居留因子 T	1	1	1/2	1/8	1/8
年工作时间（h）	500				
年有效剂量（mSv/a）	0.11	0.088	0.044	0.074	0.018
目标管理值（mSv/a）	5	5	0.1	0.1	5
结论	满足	满足	满足	满足	满足
注：①保守取各侧屏蔽墙体外辐射剂量率最大值。					

从上表可知，本项目加速器项目运行后，工作人员年有效剂量为 0.11mSv，机房为 30cm 处公众为 0.074mSv，能够满足本项目管理目标剂量约束值要求：辐射工作人员年有效剂量不超过 5mSv，公众照射年有效剂量不超过 0.1mSv。

1.2 射波刀辐射环境影响分析

1.2.1 参考点选取

根据 GBZ/T 201.2-2011 D.3 推荐方法核算射波刀机房屏蔽是否达标。

由于来自于射波刀的漏射线及人体散射线的剂量率及能量都远小于主射线，射波刀机房墙体若能屏蔽主射线，也一定能够屏蔽来自于射波刀的漏射线及人体散射线。故本项目射波刀机房仅以主射线屏蔽核算屏蔽体外辐射剂量率是否达标。从保守角度出发，在射波刀机房设计的尺寸厚度基础上，假定以最大剂量率 10Gy/min（6MV）运行并针对关注点最不利的情况进行预测计算。本项目射波刀机房的平面、剖面布局设计图及关注点设定如图 11-2。根据图 11-2 可知，机房东侧和南侧均为土层，因此不选取参考点进行屏蔽计算；射线经过迷道内墙至迷道外墙 c 点位于南侧，因此不考虑 c 点屏蔽计算；顶部 d 点屏蔽厚度大于屏蔽 h 点屏蔽厚度，因此选取 h 点进行屏蔽计算，若其满足要求则 d 点必能满足要求。

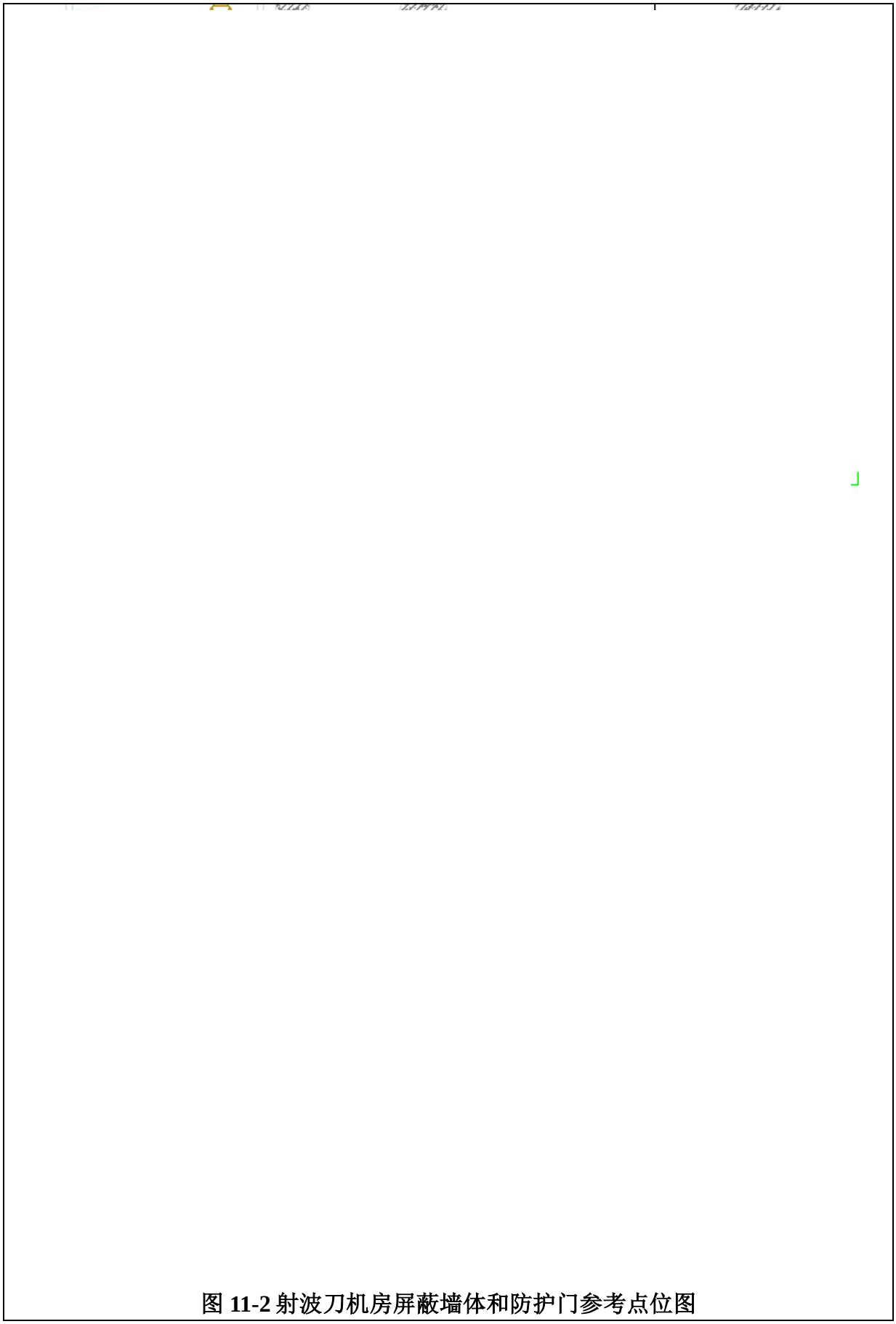


图 11-2 射波刀机房屏蔽墙体和防护门参考点位图

1.2.2 有用线束墙体防护效果预测

（1）主射线路径：西墙：O→a、O→g，北墙：O→b，顶部 O→h

（2）计算模式及参数选择：

射波刀在治疗应用中，采用非等中心且从不同方向，以几百个小的圆形照射野（直径一般为 1.5cm）照射肿瘤部位，主射线束能照射到射波刀机房的所有墙面上。所以射波刀各墙面均按有用束来估算机房的屏蔽是否达标。

辐射防护计算采用公式（2）和公式（3），相关参数均取自用 GBZ/T201.2-2011 中的附录 B。设屏蔽墙外参考点距离屏蔽墙的距离均为 30cm，各参考点处的辐射水平理论估算结果见下表。

表 11-12 射波刀机房屏蔽墙体防护能力计算结果

参数	a 点	b 点	h 点
混凝土建筑厚度（cm）	220	300	300.0
B	2.855E-07	1.07 E-09	1.07 E-09
TVL1（cm）	37	37	37
TVL（cm）	33	33	33
R（m）	8.8	8.73	5.88
$\dot{H}_0$（μSv·m^2·h^{-1}）	3.84E+08		
参考点处辐射剂量率 $\dot{H}$ (μSv·h^{-1})	1.41	0.005	0.01
注：R 值见图 11-2 读数。			

1.2.3 防护门防护效果预测

射波刀机房防护门处的辐射，是来自迷道内墙的贯穿辐射、有用线束穿过迷道内墙垂直射入屏蔽墙并散射及来自迷道的散射的叠加。射线路径：O→g（贯穿射线），O→j→f→g（贯穿后散射线），O→i→g（迷道散射线）。

贯穿射线

迷道内墙的贯穿辐射在入口 g 处造成的剂量率计算方法，参考加速器方法，以 6MV 主射线朝向 g 点照射估算，根据图 11-2 中标注距离可知，迷道内墙等效厚度不小于 210cm，防护门厚度为 15mm 铅，混凝土 TVL1 为 37cm，TVL 为 33cm，铅 TVL1 和 TVL 均为 5.7cm；R 为 10.55m，根据公式（10）和公式（12）计算得到辐射剂量率小于 1.08μSv/h。

贯穿后散射线

参考 GBZ/T201.2-2011 中，对于有用线束穿过迷道内墙垂直射入屏蔽墙并散射至入口 g 处的辐射剂量率计算方法可采用第 5.2 章中推荐的估算公式：

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \cdot \frac{F/10^4}{R^2} \cdot \alpha_w \cdot B_P \quad \text{……（10）}$$

式中：$\dot{H}$：计算点的辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_0$：加速器有用线束中心轴上距靶 1m 处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h；本项目射波刀为 3.84E+08μSv·m^2/h；

F：治疗装置有用线束在等中心处的最大治疗野面积，cm^2，本项目取 10×11.5cm^2；

10^4：将 1m^2 面积转换为 10^4 cm^2；

R：散射体中心点（有用线束在屏蔽墙上的投影点）与计算点的距离，m，本项目为距离保守取值 10.55m；

α_w：散射因子，单位面积（1m^2）散射体散射到距其 1m 处的散射辐射剂量率与该面积上的入射辐射剂量率的比，本项目为 5.3E-3；

B_P：有用线束射入散射体（屏蔽墙）前的屏蔽透射因子，本项目有用线束向迷道内墙照射，依内墙的屏蔽厚度按公式（2）计算为 6.14 E-04。

上述参数代入公式（10），得到 g 点处的贯穿后散射剂量率约为 0.13μSv/h。

迷道散射线

参考 GBZ/T201.2-2011 中，对于 X 射线能量≤10MV 的加速器机房，入口 N 处的散射辐射剂量率计算方法可采用第 5.2 章中推荐的估算公式：

$$\dot{H}_N = \frac{\alpha_{ph} \cdot (F/400)}{R_1^2} \cdot \frac{\alpha_2 \cdot A}{R_2^2} \dot{H}_0 \quad \text{……（11）}$$

式中：$\dot{H}_N$：N 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_0$：为加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶（以下简称靶）1m 处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h；本项目射波刀为 3.84E+08μSv·m^2/h；

F：治疗装置有用束在等中心处的最大治疗面积（cm^2），取 10×11.5cm^2；

α_{ph}：400cm^2 面积上的散射因子，即患者 400cm^2 面积上垂直入射 X 射线散射至距离其 1m 处（关注点方向）处的剂量比例，见附录 B.2，通常取 45°散射角的

值，1.39E-3；

α_2：砼墙入射的患者散射辐射的散射因子，通常取 i 处的入射角为 45°，散射角为 0°，查表 B.6 中 0.5MeV 栏里的值，22.0E-3；

A：N 处的散射面积，约 1.7m（宽）×3.5m（高）=6.84m^2；

R_1：“O-i”之间的距离，7.88m；

R_2：“i-g”之间的距离，保守取 11.44m。

上述参数代入公式（12），得到 g 点处的散射剂量率约为 2.47μSv/h。

入口处散射辐射能量约为 0.2MeV，铅的 TVL 为 5mm，本项目防护门为 15mm，则门外剂量率（μSv/h）按公式（12）计算：

$$\dot{H} = \dot{H}_N \cdot 10^{-(X/TVL)} + \dot{H}_{oN} \quad \cdots\cdots（12）$$

按上式计算得到防护门外的贯穿后散射辐射、迷道散射辐射及贯穿辐射辐射剂量率之和约为 1.08μSv/h。

1.2.4 射波刀机房辐射防护评价

射波刀机房屏蔽墙、顶部及防护门外估算结果及与剂量率控制水平值见下表。

表 11-13 射波刀机房屏蔽防护设计理论估算结果汇总表

位置	西墙	北墙	顶部	防护门
参考点	a	b	h	g
参考点剂量率值（μSv/h）	1.41	0.005	0.01	1.08
剂量率控制水平（μSv/h）	2.5	2	2	8
结论	满足	满足	满足	满足

根据上述结果可知，射波刀机房的屏蔽墙、屋顶及防护门的防护设计能够满足拟配置的医用加速器的辐射防护要求，加速器运行过程中治疗室屏蔽墙和防护门外的剂量当量率均能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中剂量率限值要求。

1.2.5 辐射工作人员和公众年有效剂量评价

工作人员及公众年有效剂量可通过公式（9）估算，结果见下表。

表 11-14 辐射工作人员及机房周围公众年有效剂量计算结果

位置	西墙（控制室）	北墙（3#加速器机房）	顶部（排风机房和病房）	防护门
参考点剂量率值（μSv/h）	1.41	0.005	0.01	1.08
使用因子 U	1/4	1/4	1/4	1/4
居留因子 T	1	1/2	1/2	1/8
年工作时间（h）	1000			
年有效剂量（mSv/a）	0.35	＜0.001	0.001	0.034
目标管理值（mSv/a）	5	0.1	0.1	0.1
结论	满足	满足	满足	满足

从上表可知，本项目射波刀运行后，工作人员年有效剂量为 0.35mSv，机房为 30cm 处公众为 0.034mSv，能够满足本项目管理目标剂量约束值要求：辐射工作人员年有效剂量不超过 5mSv，公众照射年有效剂量不超过 0.1mSv。

1.3 CT 模拟定位机辐射环境影响分析

本项目模拟定位机房屏蔽防护、机房尺寸设计见表 10-3。从表中可知模拟定位机房屏蔽铅当量不少于 3.1mmPb，能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中 CT 机房屏蔽铅当量不小于 2.5mmPb 的要求。

2 核医学科项目辐射环境影响评价

2.1 回旋加速器

2.1.1 回旋加速器机房屏蔽防护评价

HM-10HC 型回旋加速器主要用于生产 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 等核素，在生产正电子放射性核素时，运行时的质子能量及束流强度基本相同，因 ^{18}F 产量最大，对周围环境影响最大，故选取操作生产 ^{18}F 核素模式对本项目加速器运行时的辐射影响进行理论估算。根据生产厂家提供资料，HM-10HC 回旋加速器屏蔽体外表面 γ 射线和中子剂量分布图见图 11-3，自屏蔽体各表面外 1m 参考点的中子和 γ 射线的当量剂量率，见表 11-15。根据图 11-4 可知，机房南墙为 70cm 厚混凝土加土层，因此不需进行防护评价；底部部分墙体为 300cm 混凝土，部分墙体为 70cm 混凝土+35cm 轻集料混凝土回填层（密度不小于 0.85g/cm^3），因此底部计算保守取屏蔽体为 70cm 混凝土+35cm 轻集料混凝土。

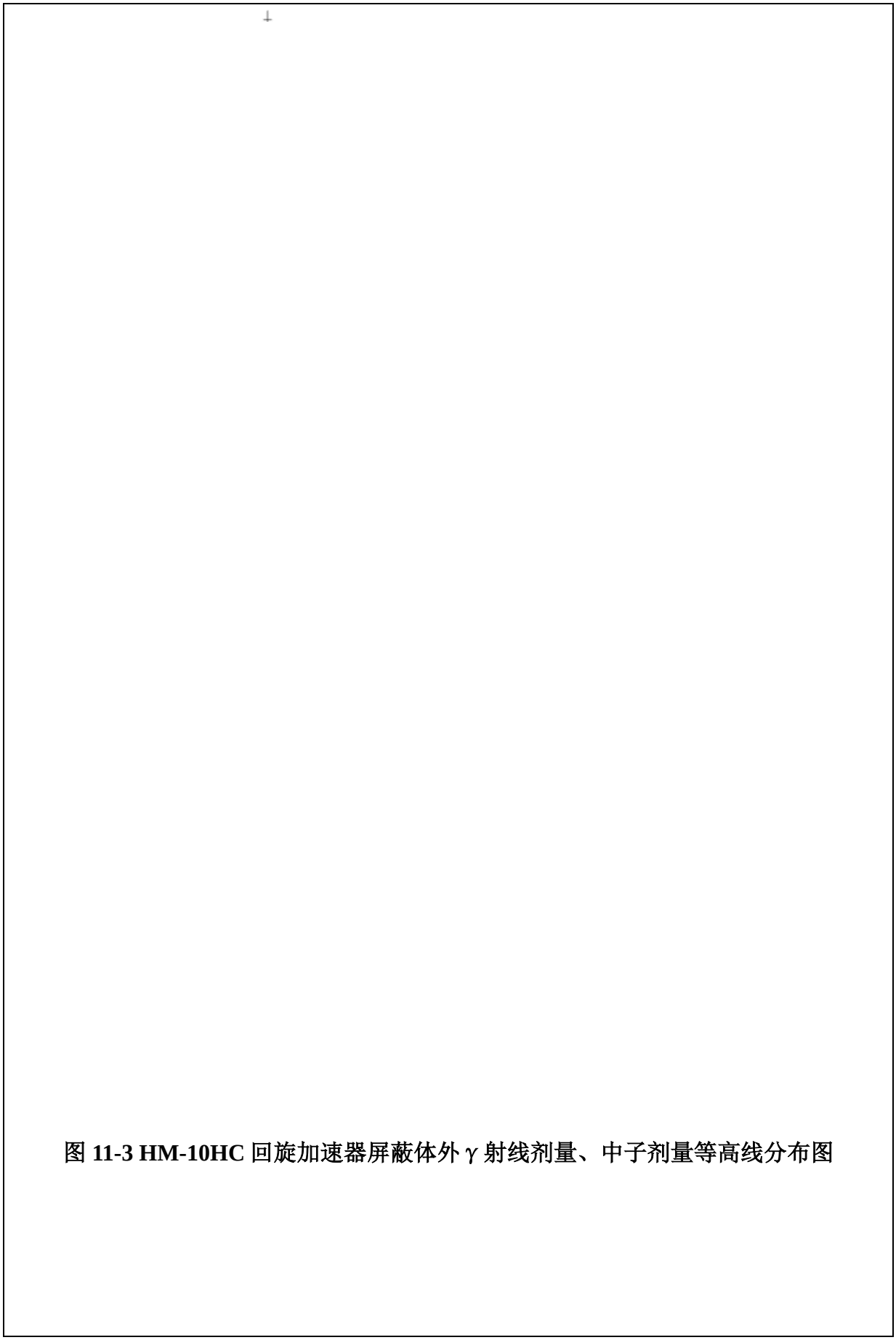


图 11-3 HM-10HC 回旋加速器屏蔽体外γ射线剂量、中子剂量等高线分布图

表 11-15 回旋加速器自屏蔽体表面 1m 处剂量当量率

方位	至靶心的距离（m）①	中子（μSv/h）②	γ 射线剂量当量率（μSv/h）②
注			

对于自屏蔽型回旋加速器，机房外的剂量率可采用生产厂家提供的泄漏辐射剂量率，采用近似方法估算。采用 GBZ 120—2020 中公式 I.2 计算，估算公式见下：

$$\dot{H}_R = \left(\frac{r_0}{R}\right)^2 \bullet \left(\dot{H}_n \times 10^{-x/HVL_n} + \dot{H}_\gamma \times 10^{-x/TVL_\gamma}\right) \quad \cdots\cdots（13）$$

式中：H_R—回旋加速器室外关注点剂量率，单位为微希沃特每小时（μSv/h）；

r_0—参考点距靶心的距离，单位为米（m）；

R—屏蔽墙外 30cm 关注点距靶心的距离，单位为米（m）；

H_n—参考点 r_0 处的中子剂量率，单位为微希沃特每小时（μSv/h）；

x—屏蔽墙厚度，单位为厘米（cm）；

HVL_n—中子射线的二分之一减弱层厚度，单位为厘米（cm）；

H_γ—参考点 r_0 处的 γ 射线剂量率，单位为微希沃特每小时（μSv/h）；

TVL_γ—γ 射线的十分之一减弱层厚度，单位为厘米（cm）。

本项目回旋加速器自屏蔽体外 γ 射线能量取 8MeV，中子能量取 5MeV，回旋加速器在机房外参考点见图 11-4，屏蔽防护计算参数及计算结果见表 11-16。

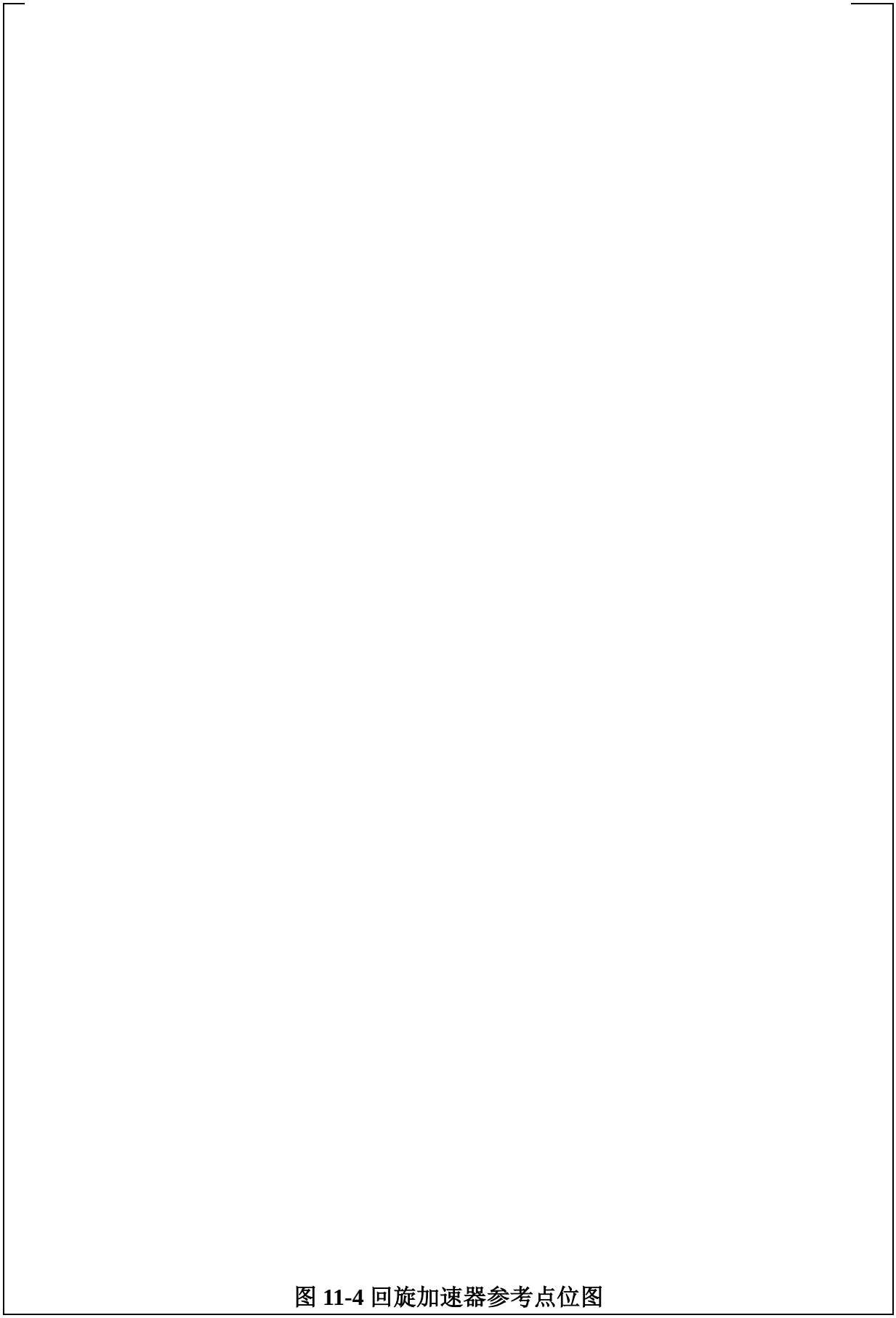


图 11-4 回旋加速器参考点位图

表 11-16 回旋加速器机房墙体、屋顶、防护门屏蔽防护计算参数及结果

		东墙（a 点）	西墙（c 点）	北墙（d 点）	顶部（h 点）	底部（e 点）	防护门（g 点）
X（cm）							
r_0（m）							
R（m）①							
H_n（μSv/h）②							
HVL_n（cm）③							
H_γ（μSv/h）②							
TVL_γ（cm）③							
关注点剂量率(μSv/h)	估算值						
	控制值						
	评价结果						

注：①R 取值见图 11-
②底部剂量率相
③根据《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中表 1.3 得到。

根据上表预测结果可知，本项目回旋加速器机房周围辐射剂量率最大约为 1.21μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.1.2 合成分装热室屏蔽防护评价

根据 GBZ120-2020 中公式 I.1 推导公式计算，推导公式见下：

$$H_p = \frac{A \times \Gamma}{r^2} 10^{\frac{-x}{TVL}} \quad \cdots\cdots（14）$$

上式中：

H_p—屏蔽体外关注点剂量率控制值，单位为微希沃特每小时（μSv/h）；

x—屏蔽厚度,单位为毫米（mm）；

TVL—γ 射线的十分之一值层厚度，单位为毫米（mm），^{18}F 铅 TVL=16.6mm，混凝土 TVL=17.6cm；

A—放射源的最大活度，单位为兆贝可（MBq）；

Γ—距源 1m 处的周围剂量当量率常数，单位为 μSv·m^2/MBq·h；

r—参考点与放射源间的距离，单位为米（m）。

在回旋加速器生产正电子放射性药物经地下管道自动传送至合成柜（正面 65mm 铅，其它面 60mm 铅）中进行药物合成。根据正电子药物实际生产情况，生产 ^{18}F 频率最大，每次生产 ^{18}F 活度远大于其它正电子核素，且 ^{18}F 与其它正电子核素的周围剂量当量率常数相当。因此选取 ^{18}F 进行理论预测，药物合成时预测结果见下表。

表 11-17 ^{18}F 合成时周围参考点辐射水平估算结果

参数	合成柜表面 30cm①	传递窗外 30cm②	北墙外 30cm②	北侧防护门外 30cm②	楼顶外 30cm③	底部距地面 170cm④
A（MBq）	3.22E+04	3.22E+04	3.22E+04	3.22E+04	3.22E+04	3.22E+04
X（cm，混凝土）	0	0	30	5	25	300
X（mm，铅）	60	65	60	65	60	60
TVL（cm,混凝土）	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6
TVL（mm,铅）	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6
r（m）	0.75	1.4	1.4	1.4	5.55	5.8
Γ	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
H_p（μSv/h）	1.99	0.29	0.01	0.15	0.001	＜0.001

注：①：r=0.75m（药物距离合成柜外表面约 0.45m，参考点通风橱外表面 30cm）

②r=1.4m（合成模块距离墙约 0.8m，墙厚 0.3m，参考点 0.3m），合成柜距东墙、西墙距离均大于距北墙距离，因此选取北侧墙体预测；北侧防护门和北侧传递穿保守取 1.4m。

③r=5.55m（合成模块距楼顶约 5m，屏蔽墙厚 0.25m，参考点 0.3m）

④r=5.8m（合成模块距楼地面约 1m，屏蔽墙厚 3m，底部加速器机房高 3.5m-1.7m=1.8）

从上表理论估算结果可知，合成柜表面 30cm 剂量当量率为 1.99μSv/h，热室外参考点处辐射剂量率最大为 0.29μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.1.3 质控室屏蔽防护评价

本项目正电子放射性药物在热室合成后，取约 10μCi（3.7 E+05Bq）在质控室内进行酸碱度、核纯度等质控检测，辐射工作人员进行质控操作时距离药物约 0.5m，穿戴 0.5mmPb 铅衣进行防护，正电子核素中 ^{89}Zr 周围剂量当量率常数最大即 0.19μSv·m^2/MBq·h，则计算得到辐射工作人员操作位的辐射剂量率约为 0.26μSv/h，每次质控时间不超过 1h，每年生产正电子核素最多 365 次，则计算得到辐射工作人

员的年有效剂量约为 0.095mSv。对于质控室周围的公众，在经过四周及顶部混凝土的屏蔽后，其辐射剂量率远小于 0.01μSv/h，对周围公众的年有效剂量小于 0.001mSv。

2.1.4 通风系统、电缆沟及传输管道辐射防护评价

回旋加速器通风系统管道均从防护门上方斜穿（斜穿处做好密封防护措施）进入机房，排风管道紧靠西墙顶部至机房西南角，管道再向下至地面约 30cm 处设一个排风口；进风管道先紧靠迷道墙顶部至北墙顶部，管道再沿北墙顶部延伸至东北角处设一个进风口（距离地面约 4m）。通风系统管道设置能够确保机房内的射线在管道内至少经过 4 次散射后到达出口，能够满足辐射防护要求。

回旋机房电缆线布设采用了地下“U”型穿墙管道，管道埋地深约 20cm，未破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

回旋机房药物传输管道布设采用了地下“U”型穿墙管道，管道埋地深约 50cm，管道上方铺盖 30mm 铅板防护（传输管道附图 19 和附图 20），传输管道未破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

2.1.5 辐射工作人员及公众年有效剂量评价

（1）回旋加速器辐射工作人员及公众年有效剂量评价

根据公式（9），估算得到回旋加速器周围的辐射工作人员及公众的辐射剂量率见下表。

表 11-18 回旋加速器辐射工作人员及公众年有效剂量估算

	东墙（排风机房和过道）	西墙（热室和过道）	顶部（停车场）	底部（e 排风机房）	防护门（控制室）
$\dot{H}_{e,d}$（μSv/h）	0.30	0.30	0.06	0.04	1.21
t（h）①	205	205	205	205	205
T	1/20	1	1/20	1/20	1
U	1	1	1	1	1
H_e（mSv/a）	0.003	0.003	0.001	＜0.001	0.25

注：①^{18}F 每年打靶约为 200 次，每次打靶时间 30min，年打靶时间约为 100h；^{11}C、^{13}N、^{68}Ga 每年打靶均约为 50 次，每次打靶时间均为 30min，年打靶时间均约为 25h；^{89}Zr 每年打靶约为 10 次，每次打靶时间 60min，年打靶时间约为 10h；^{64}Cu 每年打靶约为 5 次，每次打靶时间 4h，年打靶时间约为 20h；总计打靶时间 205h。

根据上述表可知，回旋加速器机房周围辐射工作人员的年有效剂量最大为 0.25mSv，周围公众的年有效剂量约 0.003mSv。

（2）合成分装热室辐射工作人员及公众年有效剂量评价

本项目每年生产正电子核素约 365 次，每次生产放射性药物在合成时间按 2h 计，则年合成时间约为 730h。回旋加速器运行中打击靶物质生成所需核素后，通过靶产物传输管道进入合成分装热室中的合成热室箱进行化学合成，以上整个过程（包括加速器打靶及化学合成）为全自动控制，无工作人员参与。根据布局图可知，热室周围主要考虑位于东北侧的控制室内工作人员、热室顶部和底部公众。

控制室位于热室东北侧，距离约为 6m，根据理论预测结果可知，热室北侧防护门外剂量率为 0.15μSv/h，剂量率与距离平方成反比关系，不考虑控制室门和墙体等情况下，计算得到控制室剂量率为 0.005μSv/h，其辐射影响可忽略不计；热室底部剂量率小于 0.001μSv/h，辐射影响可忽略不计；热室顶部剂量率为 0.001μSv/h，辐射影响可忽略不计；热室周围均为控制区，公众不可靠近。

综上所述，回旋加速器项目辐射工作人员的年有效剂量为 0.25mSv，周围公众的年有效剂量约为 0.004mSv。能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和本项目管理目标（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）的剂量限值要求。

2.2 动物 PET/CT 影像实验辐射影响分析

本项目影像实验主要分为正电子核素，其中使用正电子核素为 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga 等核素。每次跟踪实验扫描老鼠最多 10 只，每只老鼠注射药物剂量约 3.7E+6Bq，放射性药物在质控室内分装完成，microPET/CT 机房内配备 10mmPb 的注射车，注射在 microPET/CT 机房内进行。

2.2.1 microPET/CT 机房周围参考点辐射剂量率预测

根据动物 PET/CT 影像实验实际情况，其中 ^{89}Zr 的周围剂量当量率常数最大。因此选取 ^{18}F 进行理论预测，采用公式（14）计算，得到其周围的辐射影响见下表。

表 11-19 ^{18}F 实验时 microPET/CT 机房周围参考点辐射水平估算结果

参考点		A（MBq）	x（mm）	TVL（mm）	r（m）①	结果（μSv/h）
1	注射位	7.4（单次注射/扫描 2 只）	10.5mmPb（注射车 10+铅衣 0.5）	16.6	0.5	1.30
2	摆位处		0.5mmPb 铅衣	16.6	0.5	**5.26**
3	机房北侧观察窗外 30cm		4mmPb	16.6	2.54	＜0.01
4	机房南和北墙外 30cm		240mm 蒸压灰砂砖 +30mm 硫酸钡	176	2.54	＜0.01

5	机房东和西墙外 30cm		25cm 混凝土	176	3.04	＜0.01
6	楼顶 30cm 处		25cm 混凝土	176	5.55	＜0.01
7	底部 170cm 处		25cm 混凝土	176	5.8	＜0.01

注：①参考点 1、2：r=0.5m（医生给老鼠注射、摆位时距离老鼠约 0.5m）
参考点 3、4：r=2.54m（用药后老鼠距离墙、观察窗约 2.0m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙、门外 0.3m）
参考点 5：r=3.04m（用药后老鼠距离墙约 2.5m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）
参考点 6：r=5.55m（用药后老鼠距楼顶约 5m，屏蔽墙厚 0.25m，参考点 0.3m）
参考点 7：r=5.8m（用药后老鼠距楼地面约 1m，屏蔽墙厚 3m，底部加速器机房高 3.5m-1.7m=1.8）

microPET/CT 机房需要考虑其 CT 散射辐射和泄漏辐射。本项目 microPET/CT 管电压小于 90kV，管电流小于 1mA，根据公式（15）~公式（17）计算得到 microPET/CT 机房外剂量当量率小于 0.01μSv/h，辐射影响可忽略。综上所述，microPET/CT 机房屏蔽防护能够满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.2.2 辐射工作人员及公众年有效剂量评价

根据上述理论预测结果，结合正电子药物的实验次数，得到辐射工作人员及公众的年有效剂量见下表。

表 11-20 辐射工作人员和周围保护目标年有效剂量

	注射位	摆位	北侧控制室	东侧过道	西侧更衣室	楼顶车库	底部就餐室
$\dot{H}_{e,d}$（μSv/h）	1.30	5.26	＜0.01	＜0.01	＜0.01	＜0.01	＜0.01
t（h）	8.33	8.33	125	141.7	141.7	141.7	141.7
T	1	1	1	1/20	1/4	1/40	1
U	1	1	1	1	1	1	1
H_e（mSv/a）	0.011	0.044	＜0.001	＜0.001	＜0.001	＜0.001	＜0.001

注：注射时间每次约 10min，摆位时间每次约 10min，每次实验扫描约 2.5h，年实验最多 50 次。

根据上表可知，进行影像实验的辐射工作人员年有效剂量最大约为 0.044mSv，周围公众的年有效剂量小于 0.001mSv。

2.3 核素显像诊断项目

2.3.1 计算公式

（1）放射性同位素辐射影响计算公式

核医学科中使用放射性同位素时采取公式（14）进行计算。

（2）CT 泄漏辐射和散射辐射影响计算公式

根据前面“污染源项描述”中所述，本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 在开机过程中需要考虑泄漏辐射和散射辐射。本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 型号未定，扫描过程中

CT 最大工况为 140kV、200mA，根据《辐射防护手册（第一分册）》（李德平 潘自强著）P448 的能量散射公式计算一次散射能量与初级能量的比值，140kV 射线经过一次散射后能量约为 109.9kV，本项保守取 120kV、200mA 计算。

根据《辐射防护手册（第一分册）》给出的 X 射线机散射线在关注点的周比释动能计算公式（公式 10.10）进行推导，得到散射线计算公式（推导中，将原公式中的使用因子、居留因子均取为 1）：

$$H_s = \frac{H_0 \cdot I \cdot a \cdot (s / 400) \cdot B_s}{d_0^2 \cdot d_s^2} \quad \cdots\cdots(15)$$

式中：H_0—X 射线机发射率常数（当管电流为 1mA 时，距离阳极靶 1m 处由主束产生的比释动能率），$mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 正常使用的最大管电压为 120kV、过滤片取 2.5mmAl（根据《辐射防护手册（第一分册）》P232 可知，对于医用 X 射线机来说，为了减少低能光子对皮肤的照射，机头窗口处按照有符合要求的永久性过滤片，其中 100kV 以上用 2.5mm 铝片）。根据《辐射防护导论》附图 3 查得本项目取 $9mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$；

I—管电流，mA；本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 正常使用的最大管电流为 200mA；

a—人体对 X 射线的散射照射量与入射照射量之比值，查《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1，对于本项目 PET/CT 和 SPECT/CT 正常工作使用电压最大为 120kV 下 90°时的 a 查取值为 0.0016；

S—主束在受照人体上的散射面积，本项目取 $100cm^2$；

d_0—源至受照点的距离，根据设备参数确定，本项目取 d_0 最小值 0.45m；

d_s—受照体至关注点的距离。

Bs—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见下式：

$$B_s = [(1 + \frac{\beta}{\alpha})e^{\alpha\gamma X} - \frac{\beta}{\alpha}]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \cdots\cdots(16)$$

式中：X—铅厚度；

α、β、γ——铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数，根据 GBZ130-2020 表 C.2 可知，管电压为 120kV（本项目正常运行最大管电压）下铅的 α、β、γ 数值分别为 2.246、5.73、0.547。

泄漏辐射影响采用下述公式计算：

$$\dot{H}=\frac{H_l \bullet B}{r^2} \quad \cdots\cdots（17）$$

式中：H_l—距靶 1m 处泄漏射线的空气比释动能率，mGy/h；根据国际放射防护委员会第 33 号出版物《医用外照射源的辐射防护》“(77)”及《医用电气设备 第 1-3 部分：基本安全和基本性能的通用要求 并列标准：诊断 X 射线设备的辐射防护》（GB 9706.103-2020）中 12.4 的相应要求，本项目 1m 处泄漏射线的空气比释动能率取 1.0mGy/h。

B—泄漏射线屏蔽透射因子，PET/CT 和 SPECT/CT 正常运行最大管电压 120kV 工况下屏蔽墙、防护门与观察窗的泄漏射线屏蔽透射因子同表散射线中 Bs 计算值。

将 PET/CT 和 SPECT/CT 机房屏蔽体的铅厚度 X（见表 10-7）、有关的拟合参数 α、β、γ 值代入公式（16），计算相应的散射辐射屏蔽透射因子值，列于表 11-21。

表 11-21 PET/CT 和 SPECT/CT 机房屏蔽体的屏蔽透射因子计算结果

屏蔽体（设施）		等效铅当量（mm）	B_S
PET/CT 机房	四周墙体	8	1.55E-09
	顶部	3.1	9.62E-05
	地板	3.1	9.62E-05
	防护门	8	1.55E-09
	观察窗	10	1.74E-11
SPECT/CT 机房	四周墙体	6	1.39E-07
	顶部	3.1	9.62E-05
	地板	3.1	9.62E-05
	防护门	5	1.31E-06
	观察窗	6	1.39E-07

2.3.2 PET/CT 计算结果及评价

PET 机房包括两座 PET/CT 机房和一座 PET/MR 机房，均使用正电子放射性药物，三座机房屏蔽防护一致；考虑 1#PET/CT 机房东侧、西侧和北侧均为监督区，因此选取 1#PET/CT 机房进行计算及评价。

PET 设有 3 个注射后候诊室和 1 个留观室，屏蔽防护设计一致。根据医院计划 2#、3#注射后候诊室为常用候诊，同时候诊最多 3 人，1#为 VIP 候诊，同时候诊最多 1 人；且 2#东侧和南侧外均为监督区，因此选取 2#注射后候诊室进行计算及评价。

PET/CT 使用正电子药物包括 ^{18}F 、^{11}C、^{13}N、^{64}Cu、^{89}Zr、^{68}Ga，其年门诊量人数分别为 8000、200、20、10、5、50；根据表 9-6 可知周围剂量当量率常数分别为

0.143、0.148、0.148、0.029、0.19、0.134μSv·m^2/MBq·h，^{64}Cu 的围剂量当量率常数最小，^{89}Zr 周围剂量当量率常数稍大于其它正电子核素值，但其门诊量最小，其它正电子核周围剂量当量率常数相当。因此结合使用药物频率和核素周围剂量当量率常数，选取 ^{18}F 进行理论预测。PET/CT 使用 ^{18}F 药物活度为 10mCi，主要分析核素在注射过程、注射后病人候诊、扫描过程及候诊过程中对辐射工作人员和周围公众的辐射环境影响。根据核素显像诊断场所布局情况，其中 PET 机房选取根据公式（15）进行计算，PET/CT 开机过程中泄漏辐射和散射辐射根据公式（15）~公式（17）进行计算，预测结果分别见下表。

表 11-22 PET/CT 使用 ^{18}F 时参考点辐射水平估算结果

序号	点位	A	Γ	X	X	TVL	TVL	r	结果
		MBq	μSv·m^2/MBq·h	cm(墙体)	mm(铅)	cm(墙体)	mm(铅)	m	（μSv/h）
1	通风橱表面	14800	0.143	/	60	/	16.6	0.80	0.80
2	注射位置	370	0.143	/	30	/	16.6	0.6	2.29
3	摆位处	370	0.143	/	0.5	/	16.6	1	49.36
4	东侧防护门	370	0.143	/	8	/	16.6	4.8	0.76
5	东侧观察窗	370	0.143	/	10	/	16.6	4.5	0.65
6	东侧和西侧墙体	370	0.143	24	6	26.3	16.6	3.04	0.30
7	南侧和北侧墙体	370	0.143	24	6	26.3	16.6	4.84	0.12
8	南侧防护门	370	0.143	/	8	/	16.6	5.8	0.52
9	机房顶部	370	0.143	25	/	17.6	/	5.55	0.07
10	机房底部	370	0.143	25	/	17.6	/	5.8	0.06
11	注射后候诊室西墙	1110	0.143	24	6	26.3	16.6	2.54	1.31
12	注射后候诊室南墙	1110	0.143	24	6	26.3	16.6	4.04	0.52
13	注射后候诊室顶部	1110	0.143	25	/	17.6	/	5.55	0.20
14	注射后候诊室底部	1110	0.143	25	/	17.6	/	5.8	0.18

注：（1）药物至于 20mm 铅罐中，铅罐放置通风橱中。

（2）参考点 1：r=0.8m（药物距离通风橱外表面约 0.5m，参考点通风橱外表面 30cm）；参考点 2：r=0.6m（医生给病人注射时距离药物和病人约 0.3m，参考点注射窗外表面 30cm）;参考点 3：r=1m（指导摆位时医生距离扫描床约 1m）;参考点 4：r=4.8m（取病人距离门约 4.8m）;参考点 5：r=4.5m（取病人距离观察窗约 4.5m）;参考点 6：r=3.04m（取病人距离墙约 2.5m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）;参考点 7：r=4.84m（取病人距离墙约 4.3m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）;参考点 8：r=5.8m（取病人距离门约 5.8m）；参考点 9、13：r=5.55m（病人距楼顶约 5m，屏蔽墙厚 0.25m，参考点 0.3m）；参考点 10、14：r=5.8m（病人距楼地面

约 1m，底部楼高 6.5m-1.7m=4.8）；参考点 11：r=2.54m（取病人距离墙约 2m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙、门外 0.3m）；参考点 12：r=4.04m（取病人距离墙约 3.5m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙、门外 0.3m）

表 11-23 PET/CT 机房散射辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_0	I	a	S	Bs	d_0	ds	Hs
	mGy•m²/（mA•min）	mA	/	cm²	/	m	m	μGy/h
东侧防护门	9	200	0.0016	100	1.55E-09	0.45	4.8	2.39E-07
东侧观察窗	9	200	0.0016	100	1.74E-11	0.45	4.5	3.06E-09
东侧和西侧墙体	9	200	0.0016	100	1.55E-09	0.45	3.04	5.96E-07
南侧和北侧墙体	9	200	0.0016	100	1.55E-09	0.45	4.84	2.35E-07
南侧防护门	9	200	0.0016	100	1.55E-09	0.45	5.8	1.64E-07
机房顶部	9	200	0.0016	100	9.62E-05	0.45	5.55	1.11E-02
机房底部	9	200	0.0016	100	9.62E-05	0.45	5.8	1.02E-02

表 11-24 PET/CT 机房泄漏辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_l	r	B	H_L
	mGy/h	m	/	μGy/h
东侧防护门	1	4.8	1.55E-09	6.73E-08
东侧观察窗	1	4.5	1.74E-11	8.59E-10
东侧和西侧墙体	1	3.04	1.55E-09	1.68E-07
南侧和北侧墙体	1	4.84	1.55E-09	6.62E-08
南侧防护门	1	5.8	1.55E-09	4.61E-08
机房顶部	1	5.55	9.62E-05	3.12E-03
机房底部	1	5.8	9.62E-05	2.86E-03

根据理论估算结果可知，在 PET/CT 项目开展过程中通风橱表面 30cm 剂量当量率为 0.80μSv/h，注射窗外剂量当量率为 2.29μSv/h，控制区内人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处剂量当量率最大为 0.52μSv/h；控制区外人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处剂量当量率最大为 1.31μSv/h；考虑放射性同位素和 CT 共同辐射影响后，PET/CT 机房外剂量当量率最大为 0.75μSv/h。综上所述，PET/CT 相关工作场所屏蔽能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

根据理论估算结果可知，在穿戴铅衣情况下负责指导病人摆位的医护人员有一定的外照射影响（49.36μSv/h），建议医院为指导摆位的医务人员配备铅屏风，以降低

其辐射影响。

2.3.3 SPECT/CT 计算结果及评价

两座 SPECT/CT 机房，机房屏蔽防护一致，且机房尺寸已知，因此选取 1# SPECT/CT 机房进行计算及评价。SPECT/CT 主要使用 ^{99m}Tc 药物，使用的活度为 9.25E+08Bq，大于其它核素活度 3.70E+08Bq；^{99m}Tc 衰变产生的光子能量大于或与其它核素衰变产生的光子能量相当；虽然 ^{123}I 周围剂量当量率常数约为 ^{99m}Tc 两倍，但 ^{99m}Tc 使用活度为 ^{123}I 使用活度 2.5 倍，其门诊量远大于 ^{123}I 门诊量。因此选取使用 ^{99m}Tc 药物进行计算及评价。

SPECT/CT 设有 1 个注射后候诊室和 1 个留观室，屏蔽设置一致，其中注射后候诊室内同时最多 4 人候诊，留观室一般 1~2 人留观，因此选取注射后候诊室进行计算及评价。主要分析核素在注射过程、注射后病人候诊、扫描过程中对辐射工作人员和周围公众的辐射环境影响。根据公式（14）进行计算，SPECT/CT 开机过程中泄漏辐射和散射辐射根据公式（15）~公式（17）进行计算，预测结果见下表。

表 11-25 使用 ^{99m}Tc 时参考点辐射水平估算结果

序号	点位	A	Γ	X	X	TVL	TVL	r	结果
		MBq	μSv·m^2/MBq·h	cm(墙体)	mm(铅)	cm(墙体)	mm(铅)	m	（μSv/h）
1	通风橱表面	27750	0.0303	/	15	/	1	0.8	1.31E-12
2	注射位置	925	0.0303	/	5.5	/	1	0.6	2.46E-04
3	摆位处	925	0.0303	/	0.5	/	1	1	8.86
4	机房东防护门	925	0.0303	/	5	/	1	3.54	2.24E-05
5	机房东观察窗	925	0.0303	/	6	/	1	3.54	2.24E-06
6	机房东墙和西墙	925	0.0303	24	3	16	1	3.54	7.07E-05
7	机房南墙和北墙	925	0.0303	24	3	16	1	4.04	5.43E-05
8	机房北防护门	925	0.0303	/	5	/	1	4.04	1.72E-05
9	机房顶部	925	0.0303	25	/	11	/	5.55	4.86E-03
10	机房底部	925	0.0303	25	/	11	/	5.8	4.45E-03
11	注射后候诊室东墙/西墙	3700	0.0303	24	6	16	1	2.54	5.50E-07

12	注射后候诊室南墙/北墙	3700	0.0303	24	6	16	1	4.04	2.17E-07
13	注射后候诊室顶部	3700	0.0303	25	/	11	/	5.55	1.94E-02
14	注射后候诊室底部	3700	0.0303	25	/	11	/	5.8	1.78E-02

注：
（1）药物至于 5mm 铅罐中，铅罐放置通风橱中。
（2）参考点 1：r=0.8m（药物距离通风橱外表面约 0.5m，参考点通风橱外表面 30cm）；参考点 2：r=0.6m（医生给病人注射时距离药物和病人约 0.3m，参考点注射窗外表面 30cm）;参考点 3：r=1m（指导摆位时医生距离扫描床约 1m）;参考点 4、5、6：r=3.54m（取病人距离门约 3.0m+屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）;参考点 7、8：r=4.04m（取病人距离墙约 3.5m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）；参考点 9、13：r=5.55m（病人距楼顶约 5m，屏蔽墙厚 0.25m，参考点 0.3m）；参考点 10、14：r=5.8m（病人距楼地面约 1m，底部楼高 6.5m-1.7m=4.8）；参考点 11：r=2.54m（取病人距离墙约 2m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙、门外 0.3m）；参考点 12：r=4.04m（取病人距离墙约 3.5m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙、门外 0.3m）

表 11-26 SPECT/CT 机房散射辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_0	I	a	S	Bs	d_0	ds	Hs
	mGy•m²/（mA•min）	mA	/	cm²	/	m	m	μGy/h
机房东防护门	9	200	0.0016	100	1.31E-06	0.45	3.54	3.72E-04
机房东观察窗	9	200	0.0016	100	1.39E-07	0.45	3.54	3.94E-05
机房东墙和西墙	9	200	0.0016	100	1.39E-07	0.45	3.54	3.94E-05
机房南墙和北墙	9	200	0.0016	100	1.39E-07	0.45	4.04	3.03E-05
机房北防护门	9	200	0.0016	100	1.31E-06	0.45	4.04	2.85E-04
机房顶部	9	200	0.0016	100	9.62E-05	0.45	5.55	1.11E-02
机房底部	9	200	0.0016	100	9.62E-05	0.45	5.8	1.02E-02

表 11-27 SPECT/CT 机房泄漏辐射参考点辐射水平估算结果

参考点	H_l	r	B	H_L
	mGy/h	m	/	μGy/h
机房东防护门	1	3.54	1.55E-09	1.24E-07
机房东观察窗	1	3.54	1.74E-11	1.39E-09
机房东墙和西墙	1	3.54	1.55E-09	1.24E-07
机房南墙和北墙	1	4.04	1.55E-09	9.50E-08
机房北防护门	1	4.04	1.55E-09	9.50E-08
机房顶部	1	5.55	9.62E-05	3.12E-03
机房底部	1	5.8	9.62E-05	2.86E-03

根据理论估算结果可知，在 SPECT/CT 项目开展过程中通风橱表面 30cm 剂量当量率、注射窗外剂量当量率均小于 0.001μSv/h，控制区内人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处剂量当量率均小于 0.001μSv/h；控制区外人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处剂量当量率最大为 1.94E-02μSv/h；考虑放射性同位素和 CT 共同辐射影响后，SPECT/CT 机房外剂量当量率最大为 1.90E-02μSv/h（顶部剂量：4.86E-03+1.11E-02+3.12E-03）。综上所述，SPECT/CT 相关工作场所屏蔽能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

根据理论估算结果可知，在穿戴铅衣情况下负责指导病人摆位的医护人员有一定的外照射影响（8.86μSv/h），建议医院为指导摆位的医务人员配备铅屏风，以降低其辐射影响。

2.4 核素治疗项目

2.4.1 I-131 核素治疗项目

根据医院提供资料，本项目甲亢治疗的单次口服剂量不超过 10mCi，小于 GBZ120 要求的 400MBq 住院剂量，病人可以在口服药物后直接出院。

对于甲癌治疗项目，本项目采用自动分装仪进行分装，辐射工作人员不需进行分装。甲癌治疗中心设有监控系统和对讲系统，患者住院过程中工作人员通过监控和对讲与患者进行交流，患者住院过程中工作人员一般不进入病房。因此，该项目过程中辐射工作人员几乎不会受到辐射影响。

由于 5 间甲癌病房屏蔽一致，病房尺寸相当，服药间顶部和底部区域屏蔽与病房一致，考虑患者长待病房内。因此选取 5#甲癌病房进行计算及分析。甲癌日治疗患者最多 5 人，病人平均药物用量为 150mCi，根据公式（14）可估算出各参考点处的辐射水平，预测结果分别见下表。

表 11-28 甲癌治疗项目周围参考点辐射水平估算结果

序号	点位	A	Γ	X	X	TVL	TVL	r	结果
		MBq	μSv·m²/MBq·h	cm(墙体)	mm(铅)	cm(墙体)	mm(铅)	m	（μSv/h）
1	通风橱表面	27750	0.0595	/	40	/	11	0.8	0.60
2	病房东防护门	5550	0.0595	/	10	/	11	4.54	1.98
3	病房东墙/西墙	5550	0.0595	24	6	24	11	3.54	0.75
4	病房南墙/北墙	5550	0.0595	24	6	24	11	3.04	1.02
5	病房顶部	5550	0.0595	25	/	17	/	5.55	0.36
6	病房底部	5550	0.0595	25	/	17	/	5.8	0.33

注：
参考点 1：r=0.8m（药物距离通风橱外表面约 0.5m，参考点通风橱外表面 30cm）；参考点 2：r=4.54m（取病人距离门约 4m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）;参考点 3：r=3.54m（取病人距离墙约 3.0m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）；参考点 4：r=3.04m（取病人距离墙约 2.5m，屏蔽墙厚 0.24m，参考点距离墙外 0.3m）;参考点 5：r=5.55m（病人距楼顶约 5m，屏蔽墙厚 0.25m，参考点 0.3m）；参考点 6：r=5.8m（病人距楼地面约 1m，底部楼高 6.5m-1.7m=4.8）

根据理论估算结果可知，在甲癌治疗项目开展过程中通风橱表面 30cm 处剂量当量率分别为 0.60μSv/h，控制区内人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处剂量当量率最大为 1.98μSv/h，控制区外人员可到达屏蔽体外表面 30cm 处剂量当量率最大为 0.36μSv/h。综上所述，甲癌治疗场所屏蔽防护能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.4.2 ^{89}Sr、^{188}Re、^{177}Lu、^{153}Sm 及 ^{223}Ra 核素治疗项目

（1）^{89}Sr 核素治疗项目

对于 ^{89}Sr 治疗的患者，一般单名病人用药活度约为 5mCi。由于核素 ^{89}Sr 释放的 β 射线的射线能量较低，项目运行过程中对环境产生的外照射影响较小，且门诊量较少，因此经过控制区墙体屏蔽以及防护后，其对辐射工作人员及周围公众的辐射影响较小。

（2）^{223}Ra 核素治疗项目

^{223}Ra 为 α 衰变，释放的 α、β 射线穿透性很弱，同时伴随有少量 γ 射线，又本项目核素使用量很少，一般单名患者的用药活度约为 5.55 E+06Bq（0.15mCi）左右，每月患者数量在 3 人左右，因此其对辐射工作人员及周围工作的辐射影响很小。

另外，^{223}Ra 主要为 α 衰变，其毒性组别为极毒，医院应加强对内照射的防护，而内照射主要通过吸入、食入及皮肤吸收等途径进入人体内，为减少内照射的影

响，应加强对核医学科管理：禁止在控制区和监督区内进食、饮水、吸烟，同时在控制区和监督区也不得进行无关工作及存放无关物件。辐射工作人员操作后离开工作室前洗手和作表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，采取去污措施。从控制区取出任何物件都应进行表面污染水平监测，以保证超过规定限值的物件不携出控制区。

（3）^{188}Re、^{153}Sm 核素治疗

^{188}Re、^{153}Sm 衰变产生 β 射线和 γ 射线，其中 β 射线能量较低，项目运行过程中对环境产生的外照射影响较小，且门诊量较少，因此经过控制区墙体屏蔽以及防护后，其对辐射工作人员及周围公众的辐射影响较小。因此主要考虑其 γ 射线辐射影响，^{188}Re、^{153}Sm 产生的 γ 射线能量分别为 0.155MeV 和 0.103MeV。

^{188}Re、^{153}Sm 使用活度分别为 9.25E+08Bq 和 1.85E+08Bq，患者注射完成后一般可直接离开医院，因此主要考虑药物注射过程对工作人员辐射影响。根据公式（14）计算，结果见下表。

表 11-29 核素治疗项目周围参考点辐射水平估算结果

核素	点位	A	Γ	X	TVL	r	结果
		MBq	μSv·m²/MBq·h	mm(铅)	mm(铅)	m	（μSv/h）
^{188}Re							
^{153}Sm							
注：^{188} TVL 取							

从上表可知，在开展 ^{188}Re、^{153}Sm 核素治疗过程中注射位置剂量当量率分别为 7.59E-03μSv/h 和 7.04E-08μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

（4）^{177}Lu 核素治疗

^{177}Lu 衰变产生 β 射线和 γ 射线，其中 β 射线能量较低，项目运行过程中对环境产生的外照射影响较小，且门诊量较少，因此经过控制区墙体屏蔽以及防护后，其对辐射工作人员及周围公众的辐射影响较小。因此主要考虑其 γ 射线辐射影响，产生的 γ 射线能量为 0.2084MeV。

^{177}Lu 使用活度分别为 7.4E+09Bq，患者注射完成后需要住院 2~3 天，因此主要考虑药物注射过程对工作人员辐射影响，及住院过程中对病房周围人员辐射影响。1 选取 ^{177}Lu 病房进行屏蔽计算。根据公式（14）计算，结果见下表。

表 11-30 核素治疗项目周围参考点辐射水平估算结果

序号	点位	A	Γ	X	X	TVL	TVL	r	结果
		MBq	μSv·m²/MBq·h	cm(墙体)	mm(铅)	cm(墙体)	mm(铅)	m	（μSv/h）
1									
2									
3									
4									
5									
6									

注：
240m

从上表可知，在开展 ^{177}Lu 核素治疗过程中注射位置剂量当量率为 0.45μSv/h，病房周围剂量当量率最大为 0.03μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.4.3 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴治疗

本项目 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器活度为 9.25E+08Bq，是密封面源，当 ^{90}Sr 衰变时，它放出 0.56MeV 的 β 粒子后变为 ^{90}Y，而 ^{90}Y 衰变时放出 2.27MeV 的 β 粒子。因此，起决定性影响的是 ^{90}Y 的 β 粒子，其韧致辐射剂量率较高，是治疗时医护人员主要的辐射来源。根据《电离辐射防护技术与管理》中的实测结果，在进行敷贴治疗时，医生手持 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器，离源 10cm 距离，无防护的状态下手部辐射剂量率达到 228μSv/h，而离源 40cm 的躯干处辐射剂量率也达到 31μSv/h。因此，开展敷贴治疗，也必须被限制在具有一定屏蔽的室内，而手持敷贴治疗源的工作人员也应进行屏蔽防护。

^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器自带生产厂家提供的贮源保险屏蔽箱，采用内外两层屏蔽结构，内层采用约 10mm 有机玻璃屏蔽 β 粒子，外层采用厚度约 3cm 的铅屏蔽韧致辐射，确保距离贮源箱表面 5cm 和 100cm 处的韧致辐射的空气吸收剂量率分别不超过 10μGy/h 和 1μGy/h。该贮源保险屏蔽箱具有防盗功能，将固定于敷贴室室内的一角，同时安装监控设备对放射源进行 24h 实时监控。能够满足《放射性核素敷贴治疗卫生防护标准》（GBZ134-2002）中，对于贮源屏蔽箱的要求。

本项目敷贴治疗室设置在负一层北侧，仅供敷贴治疗使用。敷贴治疗室采用四周墙体采用 240mm 蒸压灰砂砖+60mm 硫酸钡（4mmPb），顶部和底部均为 25cm 混凝

土，防护门具有 6mm 铅当量，在经过墙体及防护门屏蔽后，^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器治疗时对周围的辐射影响较小。

2.5 核医学科排水管道辐射环境影响分析

核医学科设有两个衰变池，其中核素治疗项目产生的放射性废水排入 A 衰变池，回旋加速器及小动物 PET/CT 影像实验项目和核素显像诊断项目产生的放射性废水排入 B 衰变池。核素治疗病房中排水管道采用地面板下敷设，并使用 3mm 铅皮包裹，高活室排水管道采用顶板下敷设，并使用 3mm 铅皮包裹；回旋加速器及小动物 PET/CT 影像实验项目和核素显像诊断项目场所排水管道采用降板区覆土内敷设。放射性废水管道见附图 21。

核素治疗项目中主要废水考虑 ^{131}I 和 ^{177}Lu，根据核素特性可知，^{131}I 产生的 γ 射线能量大于 ^{177}Lu，因此选取 ^{131}I 核素进行排水管道分析。

核素显像项目中使用较多的核素为 ^{99m}Tc 和 ^{18}F，因此选取该两个核素对其排水管道进行分析。

本项目计算放射性废水管道对外环境的辐射影响时，参照辐射防护导论 P78 公式（c）：其参考点处的辐射水平计算结果见下表。

$$\dot{K} = \frac{2A\Gamma_K}{Lr} tg^{-1}\frac{L}{2r} \quad \cdots\cdots（18）$$

式中：$\dot{K}$ —比释动能率，Gy • s^{-1}；

L —线源长度，m，本项目取 6m；

r —参考点至线源的垂直距离，m，本项目取 2m；

A —线源活度，Bq；

Γ_K —距源 1m 处的周围剂量当量率常数，单位为 Gy·m^2·Bq^{-1}·s^{-1}；

表 11-31 核医学科排水管道外辐射水平估算结果

核素	源强（Bq）	线源长度(m)	屏蔽材料及厚度	η	Γ_K (Gy·m^2·Bq^{-1}·s^{-1})	参考点至线源的距离（m）	参考点辐射水平（μSv/h）
18							
99m							
13							
注：守							
9.2							

由上表可知，本项目核医学科放射性废水管道外周围辐射剂量率约为0.20μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.6 衰变池辐射环境影响分析

衰变池体由 30cm 厚防渗混凝土浇筑，并涂抹防水层。衰变池分为 A、B 两部分。A 衰变池用于长半衰期放射性废水的储存，包括三个池子和两个化粪池，单个池子 2.8m（宽）×7.1m（长）×3.175m；B 衰变池用于短半衰期放射性废水储存，包括三个池子和两个化粪池，单个池子 1.3m（宽）×7.1m（长）×3.05m（高）。衰变池外辐射水平按照公式（14）进行计算。

（1）A 衰变池辐射水平估算

甲癌患者每周最多为 5 人，患者出院时保守取其排泄物内核素活度排泄比率保守按 80%进行计算。根据 HJ1188-2021 要求，含 I-131 核素的废水需要暂存超过 180 天。A 衰变池共 3 个池子，单个池子储满约 126 天，此时计算得到池子内 ^{131}I 核素活度约为 4.86E+10Bq。衰变池为地下，顶部为道路，四周和底部均为土层，因此 A 衰变池计算仅需要考虑顶部外辐射影响。将相关参数带入公式（14）得到 A 衰变池外辐射水平，见下表：

表 11-32 A 衰变池外辐射水平估算结果

点位	源强（Bq）	透射比		Γ（μSv·m^2/MBq·h）	距离（m）	H_p（μSv/h）
		衰变池	水			
衰						
注：守则						

由表可知，A 衰变池外周围辐射剂量率为 2.72E-03μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

（2）B 衰变池辐射水平估算

核素显像项目中使用较多的核素为 ^{99m}Tc 和 ^{18}F，其中 PET/CT 日门诊量最大为 40 人，SPECT/CT 日门诊量最大为 30 人。候诊室过程中取每人平均上一次厕所，排泄物内核素活度排泄比率保守按 30%进行计算。^{99m}Tc 和 ^{18}F 半衰期分别为 6.02h 和 109.8min，由于其半衰期短当暂存时间超过 10 个半衰期后其放射性影响很小，因此可预测在当日最后两人候诊时衰变池内核素活度最大。此时计算得到池子内 ^{18}F 核素活度约为 4.44E+09Bq，^{99m}Tc 核素活度约为 8.34E+09Bq。衰变池为地下，顶部为道路，四周和底部均为土层，因此 B 衰变池计算仅需要考虑顶部外辐射影响。将相关参数带入公式（14）得到结果，见下表：

表 11-33 B 衰变池外辐射水平估算结果

点位	核素	源强（Bq）	透射比		Γ（μSv·m^2/MBq·h）	距离（m）	H_p（μSv/h）
			衰变池	水			

由表可知，B 衰变池外周围辐射剂量率约为 2.13E-03μSv/h，能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中剂量当量率限值的要求。

2.7 β 射线辐射影响分析

根据《辐射防护手册（第三分册）》，β 射线在不同物质中与最大射程对应的防护厚度为：

$$d = \frac{1}{2\rho} E_{\rho max} \quad \cdots\cdots（19）$$

式中：$E_{\rho max}$—β 射线能量，MeV；

ρ—物质密度，g/cm^3；

d—与最大射程对应的防护厚度，cm。

根据工程分析可知，核医学科使用的核素中产生的 β 射线能量最大为 2.12MeV（^{188}Re 产生），将相关参数带入上式得到与最大射程对应的防护厚度，见下表。

表 11-34 与最大射程对应的防护厚度计算结果

核素	$E_{\rho max}$（MeV）	ρ（g/cm^3）	d（cm）
^{188}Re	2.12	铅：11.3	0.088
		混凝土：2.35	0.44

根据上表可知，核医学所使用核素中产生的 β 射线能量最大为 2.12MeV，其在铅、混凝土屏蔽材料中射程极短。核医学科工作场所采用混凝土、铅防护门、铅玻璃等进行防护，工作人员在使用核素过程中均穿戴 0.5mm 铅当量的防护服，且周围公众与放射性核素之间还采取了距离隔离措施。因此 β 射线对辐射工作人员和周围公众辐射影响很小。

2.8 β 放射性表面污染影响分析

β 放射性表面污染的影响主要来于辐射工作人员操作时，放射性物质溢出或飞散在操作台、地板、墙壁、个人防护用品等表面，对辐射工作人员和周围公众造成辐射影响。因此为了使本项目 β 放射性表面污染水平达到 GB18871-2002 规定的要求，环评要求医院做到以下防护措施：

（1）配备表面污染监测仪器，工作人员每天工作结束完成后，对操作台、地板、墙壁、个人防护用品及工作人员的手、皮肤、工作袜等进行表面污染检查、清洗、去污等。

（2）辐射工作人员应经过专业学习并持证上岗，具备相应的技能与防护知识。

（3）放射性核素操作应在负压的通风橱或手套箱内操作。

（4）操作放射性核素应在易去除污染的工作台上放置的搪瓷盘内进行，并辅以吸水性好的材料。

（5）不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物操作。

（6）做好就诊患者的管理，特别注射放射性药品的患者管理工作，严格划定好控制区和监督区，禁止无关人员随处走动。

（7）如 β 放射性表面污染水平超过 GB18871-2002 规定值，医院应暂停开展核医学科的相关业务，去污染经监测符合标准后方可重新开展业务，同时辐射工作人员的手、皮肤、工作袜等出现污染情况需及时进行去污操作并暂停放射性物质操作，评估其受照剂量，并根据评估结果采取下一步措施，如调整工作或接受治疗等。

2.9 辐射工作人员和公众剂量估算

2.9.1 核素显像诊断项目

根据预测的结果，结合工作时间，辐射工作人员和公众停留概率，根据公式（9）即可得到工作人员和周围公众的年受照剂量，见下表。

表 11-35 PET 辐射工作人员和周围保护目标年有效剂量

序号	点位	$\dot{H}_{e,d}$（μSv/h）	t（h）	U	居留人群	H_e（mSv/a）
1	注射位置	2.29	69	1	辐射工作人员	0.16
2	摆位处	49.36	138	1		6.81
3	控制室（东侧）	0.76	1000	1		0.76
4	西侧（医护走廊）	0.30	1000	1/16	公众	0.019
5	北侧（医护走廊）	0.12	1000	1/16	公众	0.008
6	顶部（设备用房）	0.20	691	1/16	公众	0.005
7	底部（放疗科）	0.18	691	1/4	公众	0.031
8		0.18	691	1	放疗科工作人员	0.12

注：年门诊量最多为 8285 人（累加所使用其它核素年门诊量），每名注射时间约 30s，年注射时间约为 69h；单人摆位约 1min，年摆位时间约 138h；单人扫描时间约 20min，年扫描时间约为 2760h，单台设备保守取扫描时间 1000h；单人在候诊室内时间约 30min（保守取两人同时候诊），总候诊室时间约为 2071h，共 3 个候诊室，则单个候诊室年候诊时间约为 691h。

表 11-36 SPECT/CT 项目辐射工作人员和周围保护目标年有效剂量

序号	点位	$\dot{H}_{e,d}$（μSv/h）	t（h）	U（居留因子）	居留人群	H_e（mSv/a）
1	注射位置	2.46E-04	61	1	辐射工作人员	＜0.001
2	摆位处	8.86	122	1		1.08
3	控制室（东侧）	3.72E-04	1300	1		＜0.001
4	南侧（公共走廊）	3.03E-05	1300	1/16		＜0.001
5	顶部（设备用房）	1.94E-02	1825	1/16	公众	0.002
6	底部（放疗科）	1.78E-02	1825	1/4	公众	0.008
7		1.78E-02	1825	1	放疗科工作人员	0.032

注：年门诊量为 7300 人（累加所使用其它核素年门诊量），每名注射时间约 30s，年注射时间约为 61h；单人摆位过程约 1min，年摆位时间约为 122h；单人扫描时间约 20min，年扫描时间约为 2433h，单台设备保守取扫描时间 1300h；单人在候诊室内时间约 30min（两人同时候诊），年候诊时间约为 1825h。

2.9.2 核素治疗项目

（1）甲癌治疗

考虑 ^{131}I 生物因素及 ^{131}I 核素本身因素，参考《分化型甲状腺癌患者的 ^{131}I 有效半衰期》（原子能科学技术，2010 年 9 月第 44 卷增刊）中患者服药后，在 t 时刻距患者 r 处辐射剂量率 H(r,t)可表示为公式（20）：

……（20）

式中 $H_0(r)$：初始时刻距离患者 r 处辐射剂量率，病人服药后该时刻辐射剂量率；

Teff：有效半衰期，参考《分化型甲状腺癌患者的 ^{131}I 有效半衰期》^{131}I 有效半衰期为（14.65±6.5）h。

对于甲癌治疗项目，本项目采用自动分装仪进行分装，辐射工作人员不需进行分装，因此，该项目过程中辐射工作人员几乎不会受到辐射影响。

医院开展 ^{131}I 甲癌治疗项目时，保守取病人住院 5 天，项目年运行约 250 天。根据公式（9）和（20），可估算得到其周围保护目标年剂量，见下表。

表 11-37 甲癌治疗项目周围保护目所受年剂量值

参考点		辐射剂量率（μSv/h）					年剂量（mSv）
		服药时（第 0 天）	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	
公众	顶部（停车场）						
	底部（加速器机房）						
放疗科工作人员	底部（加速器机房）						

注：年住院时间共 250 天，
1/16；底部为加速器机房，工作

（2）^{89}Sr、^{188}Re、^{177}Lu、^{153}Sm 及 ^{223}Ra 核素治疗

^{89}Sr、^{223}Ra 治疗过程中对环境产生的外照射影响较小，且门诊量较少，因此经过控制区墙体屏蔽以及防护后，其对辐射工作人员及周围公众的辐射影响较小。

^{188}Re、^{153}Sm 核素治疗主要考虑注射过程中对工作人员的辐射影响，^{177}Lu 核素治疗患者还需要住院，因此需要考虑注射过程中对工作人员的辐射影响及住院过程中病房周围公众辐射影响。根据预测的结果，结合工作时间，辐射工作人员和公众停留概率，根据公式（9）即可得到工作人员和周围公众的年受照剂量，见下表。

表 11-38 核素治疗项目周围保护目所受年剂量值

序号	点位	$\dot{H}_{e,d}$（μSv/h）	t（h）	U（居留因子）	居留人群	H_e（mSv/a）
1	注射位置（^{188}Re）					
2	注射位置（^{153}Sm）					
3	注射位置（^{177}Lu）					
4	顶部（设备用房）					
5	底部（放疗科）					
6						

注：^{188}Re、^{153}Sm、^{177}Lu 年门诊量分别为 12 人、72 人、50 人，每名注射时间约 30s，年注射时间分别为 0.2h、1.2h、0.83h；年住院时间共 250 天，病房顶部为卸货区和停车场，工作时间取 8h，人员停留因子 1/16；底部为加速器机房，工作时间 8h，工作人员日居留因子 1，公众人员居留因子 1/4。

综上所述，核医学科工作人员和公众年有有效剂量汇总见下表：

表 11-39 核医学科周围保护目所受年剂量值汇总一览表

场所		辐射工作人员（mSv/a）		公众（mSv/a）
		年有效剂量	叠加	年有效剂量
回旋加速器生产正电子药物		0.25	9.09	0.004
动物 PET/CT 影像实验		0.016		＜0.001
PET	注射	0.16		0.031
	摆位	6.81		
	操作	0.76		
SPECT/CT	注射	＜0.001		0.008
	摆位	1.08		
	操作	＜0.001		
核素治疗	甲癌	/		0.048
	其它核素注射	＜0.001		0.01

根据医院提供的核医学工作人员情况说明（附件 7）可知，医院计划为本项目配备不少于 20 名辐射工作人员，其中负责注射工作人员不少于 3 人，负责摆位工作人员不少于 3 人，负责 PET 和 SPECT/CT 操作人员不少于 3 人，医院计划采取轮岗制，则估算辐射工作人员年有效剂量最大为摆位工作人员即约为 2.63mSv/a。因此本项目辐射工作人员年有效剂量能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》

（GB18871-2002）和本项目管理目标（职业人员年有效剂量不超过 5mSv）的剂量限值要求。

根据上表可知，公众的年有效剂量最大为 0.048mSv，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和本项目管理目标（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）的剂量限值要求。

综上所述，本项目在做好个人防护措施、安全措施的情况下，辐射工作人员和公众年有效剂量能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和本项目管理目标（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）的剂量限值要求。

3 DSA 机房的屏蔽防护铅当量厚度与标准要求的相符性分析评价

本项目 1#~4#DSA 手术室除机房尺寸不一致外，其它屏蔽防护设计一致。因此选取其中机房单边长度、有效面积最小的 2#DSA 手术室进行分析。

3.1 评价标准

根据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）表 3 规定，C 形臂 X 射线设备机房有用线束方向、非有用线束方向屏蔽体的铅当量均应不小于 2.0mmPb。

3.2 本项目各屏蔽部位的铅当量厚度核算

由表 10-7，本项目使用的屏蔽材料除铅以外，还涉及混凝土、蒸压灰砂砖等。本项目按最大管电压 125kV 核算手术室各屏蔽部位屏蔽材料的等效铅当量厚度。

按照 GBZ 130-2020 中 C.1.2 b)给出的计算公式进行计算：

$$X=\frac{1}{\alpha\gamma}\ln\left(\frac{B^{-\gamma}+\frac{\beta}{\alpha}}{1+\frac{\beta}{\alpha}}\right) \qquad \text{……（21）}$$

式中：

X——不同屏蔽物质的铅当量厚度；

α、β、γ——相应屏蔽物质对相应管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

B——给定铅厚度的屏蔽透射因子；给定铅厚度的屏蔽透射因子 B 值对照 GBZ 130-2020 中 C.1.2 a）相应要求采用给出的计算公式进行计算：

$$B=\left[\left(1+\frac{\beta}{\alpha}\right)e^{\alpha\gamma X}-\frac{\beta}{\alpha}\right]^{-\frac{1}{\gamma}} \qquad \text{……（22）}$$

式中：

B——给定铅厚度的屏蔽透射因子；

α、β、γ——铅对对相应管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

X——铅厚度。

由 GBZ 130-2020 中表 C.2、表 C.3 查取 125kV 管电压工况下 X 射线（主束）辐射衰减的有关的拟合参数，列于下表。

表 11-40 125kV 管电压工况下 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

管电压	屏蔽材料	α	β	γ
125kV（主束）	铅	2.219	7.923	0.5386
	混凝土	0.03502	0.07113	0.6974

本项目机房顶部和底部为 25cm 混凝土，四周墙体为 24cm 蒸压灰砂砖，按照密度转换后，24cm 蒸压灰砂砖约为 18.4cm 混凝土。根据公式（21）和公式（22）计算其屏蔽透射因子 B、铅当量厚度，计算结果加下表。

表 11-41 混凝土屏蔽透射因子 B、铅当量厚度计算结果

屏蔽体	屏蔽透射因子 B	铅当量厚度（mmPb）
25cm 混凝土	3.22E-05	3.4
24cm 蒸压灰砂砖	3.28E-04	2.4

3.3 辐射环境影响分析

3.3.1 与标准对照预测

本项目 2#DSA 手术室辐射防护屏蔽设计参数与标准对比见下表。

表 11-42 屏蔽设计参数

--		2#DSA 手术室	标准要求（DSA）	是否满足要求
设计尺寸	最小有效使用面积	52.91m²	单管头 X 射线设备，最小单边长度不少于 3.5m，有效使用面积不少于 20m²	满足
	最小单边长度	6.21m		满足
屏蔽设计	四周墙体	24cm 蒸压灰砂砖+2mmPb 铅板（总等效铅当量 4.4mm）	C 形臂 X 射线设备机房的相关要求：有用线束方向和非有用线束方向铅当量不少于 2mm	满足
	顶部	25cm 混凝土（总等效铅当量 3.4mm）		满足
	防护门	4mm 铅板		满足
	观察窗	4.0mm 铅当量防护玻璃		满足

根据上表可知，本项目 DSA 手术室屏蔽设计均不低于 2mmPb，机房的有效使用面积、最小单边长度及屏蔽防护均能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中 C 形臂 X 射线设备机房的相关要求。因此可推断机房周围环境

辐射水平能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）中“具有透视功能的X射线设备在透视条件下检测时，周围剂量当量率应不大于2.5μSv/h”的要求。

3.3.2 理论计算

本项目DSA辐射影响构成情况见下表。

表11-43 本项目DSA设备有用线束及非有用线束的辐射影响构成情况

/	操作模式	正常运行时最大工况	射线种类	辐射影响对象
有用线束	摄影模式	80kV/500mA	有用线束	机房顶部外公众
	透视模式	80kV/20mA	有用线束	机房顶部外公众
非有用线束	摄影模式	80kV/500mA	散射线、泄漏射线	机房外公众、操作室操作人员
	透视模式	80kV/20mA	散射线、泄漏射线	机房外公众、操作室操作人员；机房内介入治疗操作人员

依照医院提供资料，本次评价的DSA最大管电压为125kV，最大管电流为1000mA。实际使用时，透视模式下最大管电压约为80kV，最大管电流约为20mA，摄影模式下最大管电压约为80kV，最大管电流约为500mA。

（1）关注点处有用线束辐射周围剂量当量率计算

由《辐射防护手册（第一分册）》（李德平 潘自强著）给出的X射线机散射线在关注点的比释动能计算公式（公式10.8）进行推导，得到有用线束在关注点处的比释动能率H_s的计算公式（推导中，将原公式中的使用因子、居留因子均取为1）：

$$H_s = \frac{H_0 \cdot I \cdot B \cdot K}{d^2} \quad \text{……（23）}$$

式中：H_0—X射线机发射率常数（当管电流为1mA时，距离阳极靶1m处由主束产生的比释动能率），$mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，按本项目正常使用的最大管电压为80kV、过滤片为0.5mmCu的条件从《辐射防护导论》附图3查得本项目取$0.8mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，即$48000\mu Gy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot h^{-1}$；

I—管电流，mA；本项目透视、摄影模式下正常使用的最大管电流分取20mA、500mA；

d—受照体至关注点的距离，本项目受照体至关注点的距离列于表11-7；

B—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见公式（22）；

K—从《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）附录表B2查取；对于本项目DSA运行管电压80kV时，查取K值为1.67。

表 11-44 受照体至关注点的距离

关注点位置	受照体至关注点的距离 *ds*（m）
手术室顶部外 1m	5.75
注：手术室所在楼层高约 5m，射线管距离地面约 0.5m，参考点取手术室顶部外 1m 处。	

本项目 DSA 正常运行最大管电压 80kV，由 NCRP147 报告 TABLE A.1 查取 80kV 管电压工况下 X 射线辐射衰减有关的拟合参数，具体见下表。

表 11-45 铅对 80kV 管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

管电压	α	β	γ
80kV	4.040	21.69	0.7187

利用公式（22）对手术室顶部屏蔽透射因子进行计算，见下表。

表 11-46 手术室屏蔽体、介入操作人员防护用品屏蔽透射因子计算结果

屏蔽体（设施）	等效铅当量（mmPb）	B_S
手术室顶部外 1m	3.4	8.25E-08

将前述有关参数代入公式（23），计算透视及拍片模式手术室顶部外公众辐射周围剂量当量率，计算结果见下表。

表 11-47 关注点处有用线束周围剂量当量率计算结果

关注点位置	扫描模式	H_0	I	B	d	Hs
		μGy•m²/（mA•h）	mA	/	m	μSv/h
顶部	透视模式	48000	20	8.25E-08	5.75	0.004
	拍片模式	48000	500	8.25E-08	5.75	0.10

（2）关注点处散射辐射周围剂量当量率计算

由《辐射防护手册（第一分册）》（李德平 潘自强著）给出的 X 射线机散射线在关注点的周比释动能计算公式（公式 10.10）进行推导，得到散射线在关注点处的比释动能率 H_S 的计算公式（推导中，将原公式中的使用因子、居留因子均取为 1）：

$$H_s = \frac{H_0 \cdot I \cdot a \cdot (s/400) \cdot B_s \cdot K}{d_0^2 \cdot d_s^2} \quad \text{……（24）}$$

式中：H_0—X 射线机发射率常数（当管电流为 1mA 时，距离阳极靶 1 m 处由主束产生的比释动能率），$mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，按本项目正常使用的最大管电压为 80kV、过滤片为 0.5mmCu 的条件从《辐射防护导论》附图 3 查得本项目取

48000μGy·m^2·mA^{-1}·h^{-1}；

I—管电流，mA；本项目透视、摄影模式下正常使用的最大管电流分别取20mA、 500mA；

a—人体对 X 射线的散射照射量与入射照射量之比值，查《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1，本项目常用最大管电压为 80kV，对于散射线向机房四侧墙体投射的情况，从《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1 中采用内插法查取散射角 90°时 80kV 对应的 a 值为 0.0008（该取值适用于机房四侧关注点相应预测计算）；

S—主束在受照人体上的散射面积，考虑手术需要的常用最大照射面积，本项目取 256cm^2；

d_0—源至受照点的距离，根据设备参数确定，本项目取 d_0 最小值 0.45m（根据《放射诊断放射防护要求》GBZ130-2020 中 5.2.1、5.8.3 中介入放射学用 X 射线设备最小焦皮距应不小于 20 cm）；

K—从《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）附录表 B2 查取；按前述 90°方向一次散射线能量对应的 kV 值为 70kV，K 值取 1.60；

d_s—受照体至关注点的距离, 见下表；

表 11-48 受照体至关注点的距离

关注点位置		受照体至关注点的距离 *ds*（m）
手术室外	东墙	3.4
	南墙	6.09
	西墙	3.89
	北墙	3.51
	防护门（北侧最近）	3.51
	观察窗	3.51
	底部	4.05
手术室内	第一术者位置	0.5
	第二术者位置	1.0
注：四侧墙体、门窗的参考点取距外表面 0.3m 处，手术室地面下方取距楼下地面 1.7m 处。		

B_S—屏蔽材料对散射线的透射因子。此处散射线是指本项目最大常用管电压（80kV，即 0.08MV）下有用线束（初级 X 射线）的散射线，其能量偏保守取有用线束侧向（散射角 θ=90º）的一次散射线能量，可借鉴康普顿散射定律计算一次散射线

能量 E 与入射的初级 X 射线能量 E_0 之比值 $E/E_0=1/[1+ E_0(1-\cos\theta)/0.511]= 1/[1+ 0.08*(1-\cos 90^o)/0.511]=0.865$, 继而计算一次散射线能量 E 对应的 kV 值为 80kV×0.865=69.2 kV，近似取为 70kV，再从 NCRP147 报告 TABLE C.1 查取对应于 70kV 的 α、β、γ 数值，见下表；

表 11-49 铅对 70kV 管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

管电压	α	β	γ
70kV	5.369	23.49	0.5883

将手术室屏蔽体和介入操作人员防护用屏蔽物的铅当量厚度、表 11-49 中有关的拟合参数 α、β、γ 值代入公式（22），计算相应的散射辐射屏蔽透射值，见下表。

表 11-50 手术室屏蔽体、介入操作人员防护用品屏蔽透射因子计算结果

屏蔽体（设施）			等效铅当量（mmPb）	B_S
手术室屏蔽体		四侧屏蔽墙	4.4	3.16E-12
		北防护门	4.0	2.71E-11
		观察窗	4.0	2.71E-11
		底部	3.4	6.78E-10
手术室内介入操作人员防护用品与辅助防护设施	第一术者	铅帘+铅衣	0.5+0.5	2.84E-04
		铅帘	0.5	5.35E-03
	第二术者	铅帘+铅衣	0.5+0.5	2.84E-04
		铅帘	0.5	5.35E-03

将前述有关参数代入公式（24），计算手术室外公众、控制室操作人员、手术室内介入操作人员处散射周围剂量当量率值，结果见下表。

表 11-51 关注点处散射周围剂量当量率计算结果

关注点位置		H_0	I	a	S	Bs	d_0	ds	Hs
		μGy•m²/（mA•h）	mA	/	cm²	/	m	m	μSv/h
手术室外	东墙	48000	20	0.0008	256	3.16E-12	0.45	3.4	1.06E-09
			500						2.66E-08
	南墙	48000	20	0.0008	256	3.16E-12	0.45	6.09	3.31E-10
			500						8.28E-09
	西墙	48000	20	0.0008	256	3.16E-12	0.45	3.89	8.11E-10
			500						2.03E-08
	北墙	48000	20	0.0008	256	3.16E-12	0.45	3.51	9.97E-10
			500						2.49E-08
	北防护门	48000	20	0.0008	256	2.71E-11	0.45	3.51	8.53E-09
			500						2.13E-07

	观察窗	48000	20	0.0008	256	2.71E-11	0.45	3.51	8.53E-09
			500						2.13E-07
	底部	48000	20	0.0008	256	6.78E-10	0.45	4.05	1.61E-07
			500						4.02E-06
第一术者	铅衣内	48000	20	0.0008	256	2.84E-04	0.45	0.5	4.41
	铅衣外	48000	20	0.0008	256	5.35E-03	0.45	0.5	83.11
第二术者	铅衣内	48000	20	0.0008	256	2.84E-04	0.45	1.0	1.10
	铅衣外	48000	20	0.0008	256	5.35E-03	0.45	1.0	20.78

（3）关注点处泄漏辐射周围剂量当量率计算

DSA 泄漏辐射剂量率$\dot{H}_L$采用下式计算：

$$\dot{H}_L = \frac{H_1 \cdot B \cdot K}{r^2} \qquad \cdots\cdots（26）$$

式中：

H_1——距靶 1m 处泄漏射线的空气比释动能率，mGy/h；本项目 1m 处泄漏射线的空气比释动能率取 1.0mGy/h。

B——屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲；

K—从《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）附录表 B2 查取；对于本项目 DSA 运行管电压 80kV 时，查取 K 值为 1.67。

本项目 DSA 正常运行最大管电压 80kV 从 GBZ 130-2020 表 C.2 查取铅的 X 射线辐射衰减的有关的三个拟合参数 a、β、γ，具体见表 11-45。将屏蔽体的铅厚度 X、有关的拟合参数 α、β、γ 值代入公式（22），计算室内介入操作人员防护用品与辅助防护设施的散射辐射屏蔽透射因子，列于下表。

表 11-52 DSA 机房屏蔽体、介入操作人员防护用品屏蔽透射因子计算结果

屏蔽体（设施）			等效铅当量（mm）	B_S
DSA 机房屏蔽体		四侧屏蔽墙	4.4	1.45E-09
		北防护门	4.0	7.31E-09
		观察窗	4.0	7.31E-09
		底部	3.4	8.25E-08
机房内介入操作人员防护用品与辅助防护设施	第一术者	铅帘+铅衣	0.5+ 0.5	1.43E-03
		铅帘	0.5	1.37E-02
	第二术者	铅帘+铅衣	0.5+ 0.5	1.43E-03
		铅帘	0.5	1.37E-02

将有关参数代入公式（26），计算手术室周围关注点处、手术室内介入操作人员

操作位关注点处的泄漏辐射周围剂量当量率，结果见下表。

表 11-53 关注点处泄漏周围剂量当量率计算结果

屏蔽体		H_l	r	B	H_L
		mGy/h	m	/	μSv/h
手术室外	东墙	1	3.4	1.45E-09	2.10E-07
	南墙	1	6.09	1.45E-09	6.54E-08
	西墙	1	3.89	1.45E-09	1.60E-07
	北墙	1	3.51	1.45E-09	1.97E-07
	北防护门	1	3.51	7.31E-09	9.91E-07
	观察窗	1	3.51	7.31E-09	9.91E-07
	底部	1	4.05	8.25E-08	8.40E-06
第一术者	铅衣内	1	0.5	1.43E-03	9.56
	铅衣外	1	0.5	1.37E-02	91.56
第二术者	铅衣内	1	1.0	1.43E-03	2.39
	铅衣外	1	1.0	1.37E-02	22.89

表 11-54 本项目手术室散射辐射和泄漏辐射关注点处叠加剂量

关注点		操作模式	周围剂量当量率(μSv/h)		
			散射辐射	泄漏辐射	总剂量率
手术室	东墙	透视模式	1.06E-09	2.10E-07	2.11E-07
		拍片模式	2.66E-08		2.36E-07
	南墙	透视模式	3.31E-10	6.54E-08	6.57E-08
		拍片模式	8.28E-09		7.37E-08
	西墙	透视模式	8.11E-10	1.60E-07	1.61E-07
		拍片模式	2.03E-08		1.81E-07
	北墙	透视模式	9.97E-10	1.97E-07	1.98E-07
		拍片模式	2.49E-08		2.22E-07
	北防护门	透视模式	8.53E-09	9.91E-07	9.99E-07
		拍片模式	2.13E-07		1.20E-06
	观察窗	透视模式	8.53E-09	9.91E-07	9.99E-07
		拍片模式	2.13E-07		1.20E-06
	底部	透视模式	1.61E-07	8.40E-06	8.56E-06
		拍片模式	4.02E-06		1.24E-05

根据上表可知，本项目手术室顶部外和其它屏蔽体外关注点的周围剂量当量率最大值分别为 0.10μSv/h 和 1.24E-05μSv/h，能够满足项目剂量约束值“机房屏蔽体外

30cm 处的周围剂量当量率应不超过 2.5μSv/h”的要求。

3.4 辐射工作人员和公众剂量评价

手术室外采用联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）2000 年报告附录 A 中的计算公式进行估算：

$$H_{Er} = D_r \times T \times t \quad \cdots\cdots（27）$$

式中：

H_{Er}——X 射线外照射年有效剂量,mSv/a；

D_r——关注点处剂量当量率，μSv/h；

T——居留因子；

t—— 年照射时间，h；

手术室内介入操作人员的外照射辐射年有效剂量计算借鉴《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）给出的公式进行估算：

$$E = \alpha H_{\mu} + \beta H_{O} \quad \cdots\cdots（28）$$

式中：

E—有效剂量中的外照射分量，单位为毫希沃特(mSv)；

α—系数，有甲状腺屏蔽时，取 0.79，无屏蔽时，取 0.84；

H_{μ}—铅围裙内佩戴的个人剂量计测得的 H(10)，单位为毫希沃特(mSv)；

β—系数，有甲状腺屏蔽时，取 0.051，无屏蔽时，取 0.100；

H_O—铅围裙外锁骨对应的衣领位置佩戴的个人剂量计测得的 H(10)，单位为毫希沃特(mSv)。

手术室周围公众、控制室辐射工作人员年有效剂量估算结果：

由计算结果可知，本项目手术室顶部外和其它屏蔽体外关注点的周围剂量当量率最大值分别为 0.10μSv/h 和 1.24E-05μSv/h，控制室内居留因子取 1，楼下为睡眠中心治疗区域，楼上为康复科治疗区域，手术室周围场所居留因子保守取 1，估算手术室四周公众及控制室辐射工作人员的年附加剂量，见下表。

表 11-55 手术室四周公众及控制室辐射工作人员的年附加剂量

关注点	射线类型	T（h）	T	D_r（μSv/h）	年有效剂量 H_{Er}[1]（mSv/a）	
控制室内（工作人员）	散射线、漏射线（透视）	100.0	1	＜0.001	＜0.001	＜0.001
	散射线、漏射线（拍片）	7.0	1	＜0.001	＜0.001	
非控制室内（公众）	散射线、漏射线（透视）	100.0	1	＜0.001	＜0.001	＜0.001
	散射线、漏射线（拍片）	7.0	1	＜0.001	＜0.001	
	有用线束	100.0	1	0.004	＜0.001	0.001
		7.0	1	0.10	0.001	

由上表，手术室四周公众的年附加剂量最大为 0.001mSv，满足公众项目剂量约束值 0.1mSv 的要求；控制室辐射工作人员的年附加剂量小于 0.001mSv，满足工作人员项目剂量约束值 5mSv 的要求。

手术室内介入操作人员年有效剂量估算结果：

将有关参数代入公式（28），计算第一术者、第二术者年有效剂量，见下表。

表 11-56 介入操作人员年有效剂量估算结果

	α	β	剂量当量率（μSv/h）				年照射时间（h）	年有效剂量 E（mSv）
			部位	散射线	漏射线	合计		
第一术者	0.79	0.051	铅衣内	4.41	9.56	13.96	100.0	1.99
			铅衣外	83.11	91.56	174.67		
第二术者			铅衣内	1.10	2.39	3.49		0.50
			铅衣外	20.78	22.89	43.67		

由上表可知，本项目手术室内的介入操作第一、第二术者操作位的年有效剂量分别为 1.99mSv、0.50mSv，能满足工作人员项目剂量约束值 5mSv/a 的要求。

本项目投入运行后医院根据手术量合理安排每名辐射工作人员手术量，确保辐射工作人员年受照剂量不超过项目剂量约束值 5mSv/a 的要求。对于介入手术，由于实际工作中透视工况及操作时间的不确定性，辐射工作人员需要按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）要求佩戴个人剂量计进行跟踪性监测，才能准确的测定其受照剂量。医院应加强对辐射工作人员的个人剂量监测管理，发现剂量异常的，应当对有关人员采取保护措施，并在接到检测报告之日起五日内报告发证的生态环

境、卫健委调查处理。辐射工作人员应按照《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）穿戴防护用品（铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套等），并利用铅悬挂防护屏及床侧防护帘等做好自身防护，确保其年有效剂量满足标准限值要求。

事故影响分析

1 潜在事故分析

1.1 核医学科潜在事故分析

本项目核医学科主要包括回旋加速器、动物实验、PET-CT、PET-MRI、SPECT/CT|、核素治疗等，其存在的事故工况主要有：

（1）回旋加速器机房事故工况

①在防护门关闭后，人员滞留在加速器室内；安全联锁系统失效、人员误入，加速 器运行时可能产生误照射。

②回旋加速器装置失灵、损坏、调试和操作失误等，导致放射性核素因意外停留在传输管道中，合成系统管道堵塞或泄漏等情况下，可能导致工作人员误照射或放射性核素污染相关工作场所。

③回旋加速器装置运行故障导致爆靶，可能导致工作人员误照射或放射性核素污染 相关工作场所。

（2）放射性同位素事故工况

①固体靶区传输管线压力不够、漏气、移位等，导致固体靶件卡在管道里，可能导致工作人员误照射或放射性核素污染相关工作场所。

②在放射性核素液体传输过程中，传输装置失灵、损坏，调试和操作失误等，放射性核素停留在传输管道中，传输管道堵塞或泄漏等情况下，可能导致工作人员误照射和放射性核素污染相关工作场所。

③在放射性核素或放射性药物操作过程中，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。

④放射性核素或药物在转移过程中由于操作人员违反操作规定或误操作引起意外泄漏而造成放射性表面污染。

⑤工作人员未按要求穿戴个人防护用品或设置屏蔽措施等，造成不必要的手或皮肤 等的污染以及附加辐射照射剂量。

⑥在动物实验过程中，进行动物扫描观察实验时，非相关人员误留、误入机房，导 致发生误照射。

⑦放射性核素或药物丢失或被盗，造成放射性事故，会对人员和环境造成危害。

⑧注射器排气时挤出放射性药物、注射器有损漏以及注射针头没有装牢固，导致放射性药物漏洒。

⑨放射性药物被盗、丢失等。

⑩用药后病人脱离控制区，导致公众遭受较大外照射。

（3）放射性废物管理事故工况

主要为放射性废物管理不善引起的事故工况。

（1）放射性废水：放射性废水未经足够的时间衰变即进行排放，使排放超出规定的限值，可能对环境或人体造成一定的危害。

（2）放射性固体废物：放射性固体废物未经足够的时间衰变，存放时间过短，即进行擅自处理，可能对环境造成污染。

（3）放射性废气：废气吸收装置因失灵、损坏或操作失误等，可能对环境造成污染和对公众造成危害。

1.2 放疗科项目潜在事故分析

医用电子直线加速器和射波刀主要用于肿瘤放射治疗，设备只有在治疗期间时才会产生大量 X 射线，因此，该项目辐射事故多为人员误留或误入治疗室产生的误照射事故，主要有：

（1）辐射工作人员违反操作规程或误操作，造成意外照射。

（2）设备开机治疗期间辐射工作人员或其他人员误留在治疗室内，使其受到大剂量辐照。

（3）由于安全联锁装置、工作状态指示灯或其他安全装置失灵，治疗期间人员误入加速器机房内受到误照射。

（4）设备维修调试过程中，维修人员误操作导致设备出束，可能发生误照射。

1.3 DSA 潜在事故分析

本项目使用的 DSA 为Ⅱ类射线装置，在射线装置开展医疗诊断和介入治疗过程中，如果不被安全管理或可靠保护，可能对误入机房的受照人员产生较严重放射损伤。本项目 DSA 主要事故风险为：

（1）DSA 正常工作时，人员误留、误入机房内，导致发生误照射。

（2）操作人员违反操作规程或误操作，造成意外超剂量照射。 针对上述可能发生的辐射事故。

2 辐射事故处置方法及预防措施

辐射事故可以通过完善辐射防护安全设施、制定相关管理规章制度等进行防范。医院拟在以下几个方面采取一系列预防措施，尽可能减小或控制事故的危害和影响：

（1）建立辐射安全管理机构，制定完善的规章制度，在实际工作过程中严格执行。

（2）加强辐射安全管理，加强辐射工作人员技能培训和辐射安全与防护知识的培训，提高个人的技能和辐射安全防范意识。

（3）定期检查各辐射工作场所的辐射安全措施运行情况，确保各项安全措施始终保持良好的工作状态。

（4）发生误照射，应立即切断电源，确保加速器停止工作。

（5）发生辐射事故立即向单位领导汇报，并控制现场区域，防止无关人员进入。

（6）对可能受到大剂量照射的人员，应及时送医院检查和治疗。

（7）依据《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》及《江苏省辐射污染防治条例》的要求制定辐射事故应急预案，明确建立应急机构和人员职责分工，应急人员的组织、培训以及应急，辐射事故分类与应急响应的措施。并在今后工作中定期组织应急人员进行应急演练。发生辐射事故时，应立即启动本单位的事故应急方案，采取必要防范措施，在 1 小时内向所在地生态环境部门和公安部门报告，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，造成或者可能造成人员超剂量照射的，同时向卫生部门报告。事故发生后医院应积极配合生态环境部门、公安部门及卫生部门调查事故原因，并做好后续工作。

表 12 辐射安全管理

辐射安全与环境保护管理机构的设置

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（环境保护部令第 47 号）要求，使用放射性同位素和射线装置的单位，应设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作，并以文件形式明确管理人员职责。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。

根据上述要求，核工业总医院目前已成立专门的辐射安全管理机构，由其负责医院的辐射安全管理工作。本项目工作人员由现有各科室辐射工作人员和新配备工作人员组成，医院现有辐射工作人员均已取得了辐射安全合格证书，对于医院后期计划增配辐射工作人员以及后续辐射安全培训证书到期人员，须通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习辐射安全和防护专业知识及相关法律法规，考核合格后方可上岗。

辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《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》中的有关要求，使用放射性同位素的单位、使用II类、III类射线装置的单位要健全操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、台账登记制度、人员培训计划、监测方案等，并有完善的辐射事故应急方案。

核工业总医院已根据相关标准要求制定了一系列辐射安全管理规章制度，包括辐射防护和安全保卫制度、操作规程、岗位职责、设备检修维护制度、使用登记制度、辐射工作人员培训计划、监测方案及事故应急制度等，医院应在今后运行中结合实际工作不断完善，使其具有较强的针对性和可操作性。现对各项制度提出相应的建议如下：

操作规程：针对本项目建立和完善现有操作规程。重点是明确辐射工作人员的资质条件要求、放射性药物的生产、分装、活度测量、给药流程及实验过程中应采取的具体防护措施、放射性同位素实验操作的具体防护措施，重点是明确放射性药物生产、分装、活度测量、给药操作步骤以及实验操作过程中必须采取的辐射安全措施。

岗位职责：明确辐射工作人员、台帐管理人员、操作人员及辐射安全管理人员的岗位责任，并落实到个人，使每一个相关工作人员明确自己所在岗位具体责任。

辐射防护和安全保卫制度：根据本项目的具体情况完善辐射防护和安全保卫制度。重点是：①定期检查相关的辐射安全检测仪器，发现问题及时修理或更换，确保个人剂量报警仪、表面沾污仪保持良好工作状态；②辐射工作人员定期开展个人剂量检测和职业健康监护。

放射性同位素使用登记制度：建立放射性同位素台帐，重点是对生产、使用情况进行登记和跟踪记录，由专人负责登记、形成台帐、每月核对，确保帐物相符。

人员培训计划：明确培训对象、内容、周期、方式以及考核的办法等内容，并强调对培训档案的管理，做到有据可查。相关辐射工作人员应及时学习最新的国家政策法规及标准，熟练掌握放射性防护知识、最新的操作技术。

监测方案：明确监测频次和监测项目。监测结果定期上报环境保护行政主管部门。为了确保辐射安全，该单位应制定监测方案，重点是：①配备表面沾污仪，用于核医学科每天工作完成后分别对场所及试验仪器进行表污监测；配备辐射巡测仪，定期对各个辐射工作 X-γ 剂量当量率进行巡测；②辐射工作人员个人剂量监测数据应建立个人剂量档案；③委托有资质监测单位对本项目辐射工作场所的安全和防护状况进行年度检测，每年 1 月 31 日前向发证机关提交上一年度的评估报告，年度评估发现安全隐患的，应当立即整改。

放射性同位素和射线装置台账管理制度：针对本项目所有放射性同位素、射线装置等完善现有台帐和使用登记制度，规范放射性核素台帐和核素使用登记记录，对生产、使用的放射性核素的使用情况进行登记和跟踪记录。

放射性废物管理制度：针对本项目产生的放射性固废和放射性废水，明确收集流程及登记信息，建立放射性废物及废液分类收集、登记管理制度，根据放射性固废及放射性废水的登记制度，规范放射性固废及放射性废水的解控程序，对满足解控要求的放射性固废及放射性废水进行解控并登记。

综上所述，医院在落实上述制度后，能够确保本项目满足国家相关的管理及技术层面要求。

辐射监测

1 监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，本项目应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，包括个人剂量报警仪、辐射剂量巡测仪等仪器；用于对辐射工作场所周围的辐射水平进行巡测。

本项目位于浒关院区，浒关院区目前在运行的项目包括介入科一台 DSA 和放射科 CT、DR 等Ⅲ类射线装置，尚未开展核医学和放射治疗项目。浒关院区介入科已配备一台 451P 型环境辐射巡测仪，3 台 FJ3200 型个人剂量报警仪。医院计划为本项目相应的监测仪器，配备计划如下：

（1）核医学科配备三台表面沾污仪、三台辐射巡测仪和两台个人剂量报警仪。

（2）医院在加速器机房、射波刀机房的迷道内入口处均设置固定式辐射剂量监测仪并有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内；同时为每个机房配备两台个人剂量报警仪。

（3）为每个 DSA 机房各配备 2 台个人剂量报警仪（共 8 台）。

（4）为 2 台 CT 模拟定位机各配备一台个人剂量报警仪。

2 监测方案

医院已定期（1 次/年）请有资质的单位对已有辐射工作场所周围的辐射水平进行监测；已定期对已有辐射工作场所及周围的辐射水平进行监测，并做相关记录。

医院已委托有资质的单位对已有辐射工作人员进行个人剂量监测，定期（每 3 个月/次）送有资质部门进行个人剂量测量，并建立了个人剂量档案。同时医院已定期安排已有辐射工作人员进行职业健康体检，并建立职业健康档案。医院每年对辐射安全和防护状况进行年度评估，并于每年 1 月 31 日前在全国核技术利用辐射安全申报系统提交上一年度的评估报告。

医院还应根据辐射管理要求，针对本项目完善现有监测方案：

（1）医院应委托有资质的单位定期对本项目各辐射工作场所周围的辐射水平进行监测，周期为 1 次/年。监测结果连同单位的年度辐射安全评估报告一起，在次年的 1 月 31 日前，在全国核技术利用辐射安全申报系统提交；

（2）医院应定期对本项目辐射工作场所及周围的辐射水平进行监测，每年 1～2 次，并对监测结果进行记录。

（3）本项目新增辐射工作人员均应佩戴个人剂量计，并定期（一般为 1 个月，最长不得超过 3 个月）送有资质部门进行监测，建立个人累积剂量档案。

（4）医院应定期组织本项目新增辐射工作人员进行职业健康体检（体检周期不超

过 2 年），并建立职业健康监护档案。

医院为本项目辐射工作场所监测计划一览表见表 12-1。

表 12-1 工作场所监测计划一览表

监测对象	监测项目	监测点	监测周期	监测方式
核医学科	α、β 表面沾污	放射性核素操作台面、设备表面、手套箱表面、墙壁、地面、辐射工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等	每次工作结束/出现放射性物质污染时	自主监测 α、β 表面沾污仪
			1 次/年	委托有资质单位监测
	X-γ 辐射剂量率	控制区防护墙外、控制区房间顶棚区域、控制区房间下方人员可达处、防护门缝隙和中央、操作位、手套箱表面等	不超过 3 个月/次	自主监测 便携式辐射剂量率仪
			1 次/年	委托有资质单位监测
	中子	回旋加速器机房防护门外	1 次/年	委托有资质单位监测
放疗科（加速器、射波刀和模拟定位机）	X-γ 辐射剂量率	加速器机房、射波刀机房和模拟定位机房四周、顶部、底部墙体外、防护门缝隙和中央、操作位、通风口外、电缆口外等	1 次/年	委托有资质单位监测
			不超过 3 个月/次	自主监测 便携式辐射剂量率仪
	中子	加速器机房防护门外	1 次/年	委托有资质单位监测
介入治疗中心（DSA）	X-γ 辐射剂量率	DSA 机房四周、顶部及底部墙体外、防护门缝隙和中央、操作位、通风口外、电缆口外等	不超过 3 个月/次	自主监测 便携式辐射剂量率仪
			1 次/年	委托有资质单位监测

落实以上措施后，医院扩建放射诊疗项目的管理措施能满足辐射安全的要求。

辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》中关于应急报告与处理的相关要求，核工业总医院应针对本项目可能产生的辐射事故情况制定事故应急方案，应急方案内容应包括：

（1）应急机构和职责分工；

（2）应急人员的组织、培训以及应急和救助的装备、资金、物资准备；

（3）辐射事故分级与应急响应措施；

（4）辐射事故调查、报告和处理程序；

（5）辐射事故信息公开、公众宣传方案。

核工业总医院目前已制定有辐射事故应急预案，医院还应依据《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》及《江苏省辐射污染防治条例》的要求，补充完善辐射事故应急预案，在预案中明确建立应急机构和人员职责分工，应急人员的组织、培训以及应急，辐射事故分类与应急响应的措施。并在今后工作中定期组织应急人员进行应急演练。

发生辐射事故时，医院应立即启动本单位的事故应急方案，采取必要防范措施，在事故发生后 1 小时内向所在地环境保护和公安部门报告，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，造成或者可能造成人员超剂量照射的，同时向卫生部门报告。事故发生后医院应积极配合环境保护部门、公安部门及卫生部门调查事故原因，并做好后续工作。

表 13 结论与建议

结论

1 辐射安全与防护分析结论

1.1 项目位置

本项目位于核工业总医院浒关院区二期内，浒关院区位于苏州市虎丘区康复弄 28 号。浒关院区东侧为浒墅关工商分局和浒墅关路，南侧为兴贤路，西侧为明光路；北侧为南津路。

本项目包括核医学科项目、放疗科项目、DSA 项目，其中放疗科位于浒关院区二期住院楼地下三层东南角、核医学工作场所位于浒关院区二期住院楼地下二层南侧、DSA 项目位于浒关院区二期住院楼三层介入治疗中心。根据现场调查可知，本项目周围 50m 范围内无居民区、学校等敏感点。

1.2 项目分区及布局

本项目核医学科工作场所控制区和监督区划分明显，设计有患者进出路线、医务人员进出路线，可有效避免带有放射性的患者对其它人员造成不必要照射，项目布局合理。

放疗科项目主要包括 5 个加速器机房、1 个射波刀机房，2 个 CT 模拟定位机房和 1 个 MRI 模拟定位机房，以及各机房控制室、水冷机房、物理室、计划室、仪器室等辅助用房，以及医生办公室、更衣室等。5 个加速器机房和 1 个射波刀机房位于放疗科东侧和南侧，控制室均位于治疗室外一侧，与治疗室分开设置，并设置了水冷机房；2 个模拟定位机房和 1 个 MRI 模拟定位机房均位于放疗科北侧。治疗计划室、仪器室、物理室、 医生办公室、 值班室、更衣室等位于放疗科西侧。候诊区、医生诊室、示教室等位于放疗科中部。医院拟对放疗科进行控制区和监督区划分管理，拟将加速器机房、射波刀机房和模拟定位的治疗室内区域划为控制区，治疗期间严禁任何人进入；将控制室、水冷机房、设备间、入口等区域划为监督区域，对监督区实施监控管理，项目布局合理。

医院在浒关院区二期住院楼介入中心开展 DSA 项目，工作场所主要由 DSA 手术室、控制廊、设备间、无菌间、敷料间、铅衣间、患者/污物走廊、污洗间、更衣淋浴间等组成。介入中心出入口设有门禁系统，除科室人员刷门禁卡可以进入外，其他人员一般不允许进入。医院将 DSA 手术室划为控制区，将手术室相邻

的控制廊、设备间、铅衣间、患者/污物走廊、污洗间等区域划为监督区，项目布局合理。

1.3 辐射安全措施

核医学科：（1）医院拟在核医学科的控制区出入口、控制区内各房间门口、合成柜、通风橱等核素操作场所表面、放射性废物桶表面等醒目位置均拟设置电离辐射警告标志；（2）在核医学科扫描机房门口设置工作状态指示灯；（3）在核医学科控制区病患入口及病患出口处设带门禁系统的单向门，实现“入口只进不出，出口只出不进”的单向路线；（4）在核医学科的控制区内安装监控及对讲设备；（5）在地面设置指示箭头以及指示牌指示患者进行有序注射（服药）以及扫描，通过加强管理的方式减少患者的直接交叉辐射影响；（6）核医学科工作场所内不得安排与放射性无关的工作；（7）核医学科所有放射性药物的操作均应在高活室的通风橱内进行；（8）在控制区和监督区内不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物件；（9）使用操作应在指定的工作台或搪瓷盘内进行，操作人员需配戴个人防护用品，应避免皮肤直接接触放射性物质。（10）回旋加速器机房拟设置加速器操作许可、门机联锁、信号警示装置、电离警告标志、紧急开门开关、急停按钮、固定式辐射剂量监测系统、视频监控系统，巡检按钮等辐射安全装置。

直线加速器和射波刀：（1）决定设备产生辐射的主要控制系统用开关钥匙进行控制；防护门拟安装门机联锁装置；（2）在控制室内、迷道内和治疗室内屏蔽墙合适位置拟安装急停开关；（3）在防护门上方拟安装工作状态指示灯，门外拟张贴醒目、规范的电离辐射警告标志；（4）在治疗室内拟安装实时监控装置，监控终端显示器位于控制室内，并拟配备对讲装置；（5）在迷道内入口处均设置固定式辐射剂量监测仪并有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内；（6）治疗室内拟设计通风装置；（7）在防护门内侧拟设置紧急开门按钮，紧急情况下按开门按钮防护门打开；防护门拟设置红外线防夹装置（距离地面约 60cm），防护门关闭过程中有人穿过防护门时，防护门自动开启；（8）加速器机房电缆线布设采用了地下“U”型穿墙管道，管道埋地深约 40cm。

CT 模拟定位机：（1）控制台处设置观察窗；（2）在机房入口处均设置工作警示灯，警示灯箱处设置警示语句，并在醒目位置张贴“当心电离辐射”以及放射防

护注意事项；（3）机房防护门均设置闭门装置，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动；（4）为工作人员配备个人剂量计；（5）配备铅橡胶围裙、铅橡胶颈套等防护用品。

DSA：（1）控制台处设置观察窗；（2）在 DSA 机房入口处均设置工作警示灯，警示灯箱处设置警示语句，并在醒目位置张贴“当心电离辐射”以及放射防护注意事项；（3）机房防护门均设置闭门装置，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动；（4）为 DSA 工作人员配备双个人剂量计；（5）配备铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套、铅悬挂防护屏、床侧防护帘等。

1.4 辐射安全管理

医院已成立专门的辐射安全与环境保护管理机构，由其负责医院的辐射安全管理工作。医院已根据相关法律条例制定有辐射安全管理制度，还应在实际工作中根据本报告提出的要求进行补充和完善。

本项目工作人员由现有各科室辐射工作人员和新配备工作人员组成，医院现有辐射工作人员均已取得了辐射安全合格证书，对于医院后期计划增配辐射工作人员以及后续辐射安全培训证书到期人员，医院应安排其参加并通过生态环境部培训平台上的线上考核方可上岗。

医院按要求为本项目配备相应的监测仪器，主要包括辐射巡测仪、表面污染仪及个人剂量报警仪，用于对所内日常运行时辐射场所周围的辐射水平进行监测；医院还应定期（不少于 1 次/年）请有资质的单位对辐射工作场所和周围环境的辐射水平进行监测，并委托资质的单位对本项目所有辐射工作人员进行个人剂量监测及职业健康检查，建立完整的个人剂量监测档案和职业健康监护档案。

2 环境影响分析结论

根据理论预测可知，本项目核医学科、放疗科和 DSA 工作场所的屏蔽设计能够满足辐射防护要求。在做好个人防护措施、安全措施的情况下，辐射工作人员和公众年有效剂量能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和本项目管理目标（职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）的剂量限值要求。

3 三废处理

3.1 核医学科

3.1.1 放射性废水

医院拟将核素治疗场所产生的放射性废水暂存于 A 衰变池内。核素治疗场所年产生的废水量约为 185m^3，则月产生的废水量约为 15.42m^3，A 衰变池中单个衰变池容积约为 63m^3，当其中一个衰变池内废水储满开始至其它两个衰变池储满时间约为 8.17 个月（126/15.42≈8.17），满足暂存时间超过 180 天的要求，并在排放前进行取样监测，经监测达到排放标准后排入医院污水处理系统。

医院拟将回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验核素显像诊断场所及核素显像诊断场所产生的放射性废水暂存于 B 衰变池内。根据表 9-15 可知，该部分年产生的废水量约为 234.5m^3，则月产生的废水量约为 19.54m^3，B 衰变池中单个衰变池容积约为 28m^3，当其中一个衰变池内废水储满开始至其它两个衰变池储满时间约为 2.86 个月（56/20.58≈2.86），满足暂存时间超过 30 天的要求。

3.1.2 放射性固体废物处理措施

本项目各场所控制区房间内均拟设置放射性废物收集桶，分别用于收集放射性物质操作过程中各场所产生的放射性固废。

回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验核素显像诊断场所及核素显像诊断场所年产生的放射性固体废物量约为 175kg，放射性固体废物间体积约为 24m^3。医院拟将该部分放射性固体废物暂存于固体废物间内不少于 30 天，并经监测辐射剂量率满足所处环境本底辐射水平后可作为医疗废物处理。

核素治疗场所年产生的放射性固体废物量约为 50kg，废活性炭年产生量约为 50kg，放射性固体废物间体积约为 27m^3。医院拟将该部分放射性固体废物暂存于核素治疗场所固体废物间内不少于 180 天，并经监测辐射剂量率满足所处环境本底辐射水平后可作为医疗废物处理。

医院核医学科使用 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器，使用一定时间后需要退役处置。医院已承诺将与放射源生产厂家签订废源回收协议，退役的 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器暂存在敷贴治疗室保险柜内，将由原生产厂家回收处置，满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中关于放射性废源处置的要求。

3.1.3 放射性废气处理措施

核医学科工作场所内设有套单独的通风系统，监督区拟设为正压通风，控制区域均拟设为微负压通风，以保证工作场所内的空气由低活区向高活区流动。本项目放射性药物在通风橱内操作，通风橱均拟设计独立的排风系统，风速不小于0.5m/s，外排口由专用管道延伸至病房楼顶，排风口高于本建筑的屋顶，排风口处设有活性炭过滤装置对放射性气溶胶进行吸附，并每季度更换一次活性炭，更换的废活性炭作为放射性固体废物处理。

综上所述医院采取的放射性三废处置措施能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的要求。

3.2 放疗科

3.2.1 直线加速器

医院内配备的直线加速器能量超过 10MV，直线加速器靶物质（件）以及机头等金属部件由于受电子的轰击会产生较强的感生放射性，机器退役（约使用 10 年）后更换下来的废靶件等应作为放射性废物处理，送城市放射性废物库收贮。

医院为每个加速器机房各配备 1 台风机，能够使加速器机房内通风换气频率均不小于 4 次/h，能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中的换气次数不少于 4 次/h 的要求。治疗室内产生的少量臭氧和氮氧化物通过排风系统排入外环境，臭氧在常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。

3.2.2 射波刀

医院为射波刀机房配备 1 台风机，能够使加速器机房内通风换气频率均达到 6.37 次/h，能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中的换气次数不少于 4 次/h 的要求。治疗室内产生的少量臭氧和氮氧化物通过排风系统排入外环境，臭氧在常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。

3.2.3 CT 模拟定位机

CT 模拟定位机运行时不产生放射性废水、放射性废气及放射性固体废物，但其在开机并处于出束状态时，会使机房内的空气电离产生少量的臭氧和氮氧化物，产生的臭氧和氮氧化物可通过机房的机械通风系统排出，臭氧常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。

3.3 DSA

DSA 装置运行时不产生放射性废水、放射性废气及放射性固体废物，但其在开机并处于出束状态时，会使机房内的空气电离产生少量的臭氧和氮氧化物，产生的臭氧和氮氧化物可通过机房的机械通风系统排出，臭氧常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。

4 可行性分析结论

综上所述，核工业总医院扩建放射诊疗项目在落实本报告提出的各项辐射安全措施和管理措施后，该医院将具有与其所从事的辐射活动相适应的技术能力和具备相应的辐射安全防护措施，其运行对周围环境产生的影响能够符合辐射环境保护的要求，从辐射环境保护角度论证，该项目的建设和运行是可行的。

建议与承诺

1、该项目运行中，应严格遵守操作规程，加强对辐射工作人员的培训，杜绝麻痹大意思想，以避免意外事故造成对公众和职业人员的附加影响，使对环境的影响降低到最低。

2、各项辐射安全措施及辐射防护设施必须正常运行，严格按国家有关规定要求进行操作，确保其安全可靠。

3、按照法规要求开展竣工环境保护验收工作，环境保护设施的验收期限一般不超过 3 个月，最长不超过 12 个月。

附表：本项目“三同时”措施一览表

项目	“三同时”措施	预期效果	预期投资（万元）
辐射安全管理机构	**以文件形式明确管理职责：** 医院前已成立专门的辐射安全管理机构，由其负责医院的辐射安全管理工作。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中相关要求	/
辐射安全和防护措施	**屏蔽措施：** （1）直线加速器机房屏蔽按照表 10-1 落实，射波刀机房屏蔽按照表 10-2 落实；CT 模拟定位机房按照表 10-3 落实。 （2）回旋加速器机房屏蔽按照表 10-5 落实，核医学科工作场所辐射防护屏蔽按照表 10-6 落实；核医学场所施工和设计按照《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）中“表 1 不同核医学工作场所用房室内表面及装备结构的基本放射防护要求”落实。 （3）DSA 手术室屏蔽按照表 10-7 落实。	（1）直线加速器机房、射波刀机房、CT 模拟定位机房、DSA 手术室外墙表面、防护门及顶部外 30cm 处的剂量率控制水平满足《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）辐射剂量率限值的要求。 （2）核医学科屏蔽措施能够满足《核医学放射防护要求》（GBZ120- 2020）和《核医学辐射防护与安全要求》HJ1188-2021 辐射剂量率限值的要求。	1100
	安全措施（警示标志、工作指示灯等）： 核医学科：（1）医院拟在核医学科的控制区出入口、控制区内各房间门口、合成柜、通风橱等核素操作场所表面、放射性废物桶表面等醒目位置均拟设置电离辐射警告标志；（2）在核医学科扫描机房门口设置工作状态指示灯；（3）在核医学科控制区病患入口及病患出口处设带门禁系统的单向门，实现“入口只进不出，出口只出不进”的单向路线；（4）在核医学科的控制区内安装监控及对讲设备；（5）在地面设置指示箭头以及指示牌指示患者进行有序注射（服药）以及扫描，通过加强管理的方式减少患者的直接交叉辐射影响；（6）核医学科工作场所内不得安排与放射性无关的工作；（7）核医学科所有放射性药物的操作均应在高活室的通风橱内进行；（8）在控制区和监督区内不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物件；（9）使用操作应在指定的工作台或搪瓷盘内进行，操作人员需配戴个人防护用品，应避免皮肤直接接触放射性物质。（10）回旋加速器机房拟设置加速器操作许可、门机联锁、信号警示装置、电离警告标志、紧急开门开关、急停按钮、固定式辐射剂量监测系统、视频监控系统，巡检按钮等辐射安全装置。 直线加速器和射波刀：（1）决定设备产生辐射的主要控制系统用开关钥匙进行控制；防护门拟安装门机联锁装	满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）、《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）标准中相关要求。	200

	置；（2）在控制室内、迷道内和治疗室内屏蔽墙合适位置拟安装急停开关；（3）在防护门上方拟安装工作状态指示灯，门外拟张贴醒目、规范的电离辐射警告标志；（4）在治疗室内拟安装实时监控装置，监控终端显示器位于控制室内，并拟配备对讲装置；（5）在迷道内入口处均设置固定式辐射剂量监测仪并有异常情况下报警功能，其显示单元设置在控制室内；（6）治疗室内拟设计通风装置；（7）在防护门内侧拟设置紧急开门按钮，紧急情况下按开门按钮防护门打开；防护门拟设置红外线防夹装置（距离地面约 60cm），防护门关闭过程中有人穿过防护门时，防护门自动开启；（8）加速器机房电缆线布设采用了地下“U”型穿墙管道，管道埋地深约 40cm。 CT 模拟定位机：（1）控制台处设置观察窗；（2）在机房入口处均设置工作警示灯，警示灯箱处设置警示语句，并在醒目位置张贴“当心电离辐射”以及放射防护注意事项；（3）机房防护门均设置闭门装置，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动；（4）为工作人员配备个人剂量计；（5）配备铅橡胶围裙、铅橡胶颈套等防护用品。 DSA：（1）控制台处设置观察窗；（2）在 DSA 机房入口处均设置工作警示灯，警示灯箱处设置警示语句，并在醒目位置张贴“当心电离辐射”以及放射防护注意事项；（3）机房防护门均设置闭门装置，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动；（4）为 DSA 工作人员配备双个人剂量计；（5）配备铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套、铅悬挂防护屏、床侧防护帘等。		
	三废处理措施： **（1）核医学科** 医院拟将核素治疗场所产生的放射性废水暂存于 A 衰变池内。核素治疗场所年产生的废水量约为 185m^3，则月产生的废水量约为 15.42m^3，A 衰变池中单个衰变池容积约为 63m^3，当其中一个衰变池内废水储满开始至其它两个衰变池储满时间约为 8.17 个月（126/15.42≈8.17），满足暂存时间超过 180 天的要求，并在排放前进行取样监测，经监测达到排放标准后排入医院污水处理系统。 医院拟将回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验核素显像诊断场所及核素显像诊断场所产生的放射性废水暂存于 B 衰变池内。根据表 9-15 可知，该部分年产生的废水量约为 234.5m^3，则月产生的废水量约为 19.54m^3，B 衰变池中单个衰变池容积约为 28m^3，当其中一个衰变池内废水储满开始至其它两个衰变池储满时间约为 2.86 个月（56/20.58≈2.86），满足暂存时间超过 30 天的要求。 本项目各场所控制区房间内均拟设置放射性废物收集桶，分别用于收集放射性物质操作过程中各场所产生的放射性固废。回旋加速器和动物 PET/CT 影像实验核素显像诊断场所及核素显像诊断场所年产生的放射性固体废物量约为 175kg，放射性固体废物间体积约为 24m^3。医院拟将该部分放射性固体废物暂存于固体废物间内不少于 30 天，并经监测辐射剂量率满足所处环境本底辐射水平后可作为医疗废物处理。核素治疗场所年产生的放射性固体废物量约	满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）、《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）、《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）标准中相关要求。	300

	为 50kg，废活性炭年产生量约为 50kg，放射性固体废物间体积约为 27m^3。医院拟将该部分放射性固体废物暂存于核素治疗场所固体废物间内不少于 180 天，并经监测辐射剂量率满足所处环境本底辐射水平后可作为医疗废物处理。 医院核医学科使用 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器，使用一定时间后需要退役处置。医院已承诺将与放射源生产厂家签订废源回收协议，退役的 ^{90}Sr-^{90}Y 敷贴器暂存在敷贴治疗室保险柜内，将由原生产厂家回收处置，满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中关于放射性废源处置的要求。 核医学科工作场所内设有套单独的通风系统，监督区拟设为正压通风，控制区域均拟设为微负压通风，以保证工作场所内的空气由低活区向高活区流动。本项目放射性药物在通风橱内操作，通风橱均拟设计独立的排风系统，风速不小于 0.5m/s，外排口由专用管道延伸至病房楼顶，排风口高于本建筑的屋顶，排风口处设有活性炭过滤装置对放射性气溶胶进行吸附，并每季度更换一次活性炭，更换的废活性炭作为放射性固体废物处理。。 **（2）直线加速器** 直线加速器靶物质（件）以及机头等金属部件由于受电子的轰击会产生较强的感生放射性，机器退役（约使用 10 年）后更换下来的废靶件等应作为放射性废物处理，送城市放射性废物库收贮。 医院为每个加速器机房各配备 1 台风机，能够使加速器机房内通风换气频率均不小于 4 次/h，能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中的换气次数不少于 4 次/h 的要求。治疗室内产生的少量臭氧和氮氧化物通过排风系统排入外环境，臭氧在常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。 **（3）射波刀** 医院为射波刀机房配备 1 台风机，能够使加速器机房内通风换气频率均达到 6.37 次/h，能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中的换气次数不少于 4 次/h 的要求。治疗室内产生的少量臭氧和氮氧化物通过排风系统排入外环境，臭氧在常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。 **（4）DSA、CT 模拟定位机** DSA、CT 模拟定位机运行时不产生放射性废水、放射性废气及放射性固体废物，但其在开机并处于出束状态时，使机房内的空气电离产生少量的臭氧和氮氧化物，臭氧和氮氧化物可通过机房的机械通风系统排出，臭氧常温下 50min 左右可自行分解为氧气，对环境影响很小。		
人员配备	**辐射防护与安全培训和考核：** 本项目工作人员由现有各科室辐射工作人员和新配备工作人员组成，医院现有辐射工作人员均已取得了辐射安全合格证书，对于医院后期计划增配辐射工作人员以及后续辐射安全培训证书到期人员，医院应安排其参加并通过生态环境部培训平台上的线上考核方可上岗。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法规条例中相关标准要求	定期投入
	个人剂量监测： 工作人员由现有各科室辐射工作人员和新配备工作人员组成，现有辐射工作人员均已委托有资质单位开展个人	每个季度送检一次	定期投入

	剂量监测，后续新增人员医院计划委托有资质单位开展个人剂量监测（不少于 1 次/季度），并建立个人剂量档案。		
	人员职业健康监护： 医院现有辐射工作人员均已委托有资质单位开展职业健康体检并已建立职业健康档案，后续新增人员在其上岗前安排其参加职业健康体检，在其体检合格后方可从事本项目工作。项目开展后辐射工作人员定期进行职业健康体检（1 次/2 年），并建立职业健康档案。	1~2 年体检一次	定期投入
监测仪器和防护用品	医院按要求为本项目配备相应的监测仪器，主要包括辐射巡测仪、表面污染仪及个人剂量报警仪，用于对所内日常运行时辐射场所周围的辐射水平进行监测。	满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》中相关要求以及审管部门关于监测仪器配备的要求	20
辐射安全管理制度	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 人员培训计划 监测方案 事故应急预案	满足《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法规条例中相关要求	/

以上措施必须在项目试运行前落实。

表 14 审批

审批意见：