编号：RSHP-NJ-2022100801

核技术利用建设项目

南京鼓楼医院

新建放射诊疗项目

环境影响报告表

（报批本）

南京鼓楼医院

2023 年 5 月

生态环境部监制

核技术利用建设项目

南京鼓楼医院

新建放射诊疗项目

环境影响报告表

建设单位名称：南京鼓楼医院

建设单位法人代表（签名或盖章）：

通讯地址：江苏省南京市鼓楼区中山路 **321** 号

邮政编码：**210003**　　联系人：

电子邮箱：　　联系电话：

表 1 项目基本情况

<table>
<tr><td colspan="2">建设项目名称</td><td colspan="7">南京鼓楼医院新建放射诊疗项目</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设单位</td><td colspan="7">南京鼓楼医院
（统一社会信用代码　　）</td></tr>
<tr><td colspan="2">法人代表</td><td colspan="2"></td><td>联系人</td><td></td><td>联系电话</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">注册地址</td><td colspan="7">江苏省南京市鼓楼区中山路 321 号</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目建设地点</td><td colspan="7">南京市浦口区浦珠中路 359 号
南京鼓楼医院江北院区</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></td><td colspan="2">项目环保总投资（万元）</td><td></td><td>投资比例（环保投资/总投资）</td><td>10%</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目性质</td><td colspan="4">☑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="6">□I类□II类□III类□IV类□V类</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="6">□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="6">□制备 PET 用放射性药物</td></tr>
<tr><td>□销售</td><td colspan="6">/</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="6">☑乙　□丙</td></tr>
<tr><td rowspan="3">射线装置</td><td>□生产</td><td colspan="6">□II类□III类</td></tr>
<tr><td>□销售</td><td colspan="6">□II类□III类</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="6">☑II类☑III类</td></tr>
<tr><td>其他</td><td colspan="7">/</td></tr>
</table>

项目概述

一、建设单位基本情况、项目建设规模及由来

南京鼓楼医院又称“南京大学医学院附属鼓楼医院”，创建于 1892 年，前身是由美国基督会资助的加拿大籍传教士威廉·爱德华·麦克林医学博士创建的一所“基督医院”，目前已成为集医教研为一体的大型综合性三级甲等医院，也是全国较早的西医院。

医院目前有三个院区，本院区位于南京市鼓楼区中山路 321 号，北院区位于南京市鼓楼区中山北路 53 号，江北院区位于南京市浦口区浦珠中路 359 号。

南京鼓楼医院江北院区是国家级新区—江北新区布局的重点民生工程和以精准

医疗为特色的“三中心一高地”三级医院首发项目，也是鼓楼医院十四五发展的重中之重。基于南京鼓楼医院江北院区的前期建设基础，进一步依托鼓楼医院资源优势和学科优势，鼓楼医院实行“一院两区”的管理模式，发挥好公共服务平台和引领区域医学高地发展的作用，适应鼓楼医院从“技术内涵型”向“质量效益型”的转型发展需求，进一步在鼓楼医院做大做强以“大专科，强综合”为特色的十大国际创新医疗专科中心，建立现代医院“医教研管产”创新示范基地，为长三角地区乃至全国的患者提供更加优质的医疗服务，实现建立江北“医疗创新高地”的要求。

南京鼓楼医院江北院区分两期建设。目前，一期工程于2020年09月完成竣工环境保护验收，并开始正式营运。二期工程由南京江北新区管理委员会卫生健康和民政局建设，也由南京鼓楼医院运营管理。该项目已委托南京国环科技股份有限公司于2022年完成了南京鼓楼国际医院二期工程项目的环境影响评价工作，并于2022年06月08日取得了南京江北新区管理委员会行政审批局关于该项目的批复文件，批复文号为：宁新区管审环建[2022]10号，详见附件2。

二期项目总体分为门诊医技楼、住院楼、先进技术楼三部分。二期建设功能主要为门诊、医技、住院、行政、科研、会议等，项目建成将实现三级甲等综合医院医疗服务功能，增加床位1400张。根据“一院两区”的管理模式，南京鼓楼医院江北院区所有科室均为鼓楼医院本部科室在江北的延伸，与本部实行一体化运行、同质化管理、差异化发展；院区将秉承鼓医人文理念，借助优质的“鼓医”资源，辅以优化的流程设计、先进的诊疗设备、高效的信息系统，着力为江北乃至更广区域提供更便捷的“鼓医”医疗服务。二期项目预计2024年12月投入运营。

根据规划，南京鼓楼医院拟在江北院区先进技术楼负一层**肿瘤中心**新建3座医用电子直线加速器机房，并配备3台医用电子直线加速器（X射线最大能量为15MV，属II类射线装置）；拟于肿瘤中心新建1座射波刀机房，并配备1台射波刀（X射线最大能量为6MV，属II类射线装置）；拟于肿瘤中心新建1座后装治疗机机房，并配备1台后装治疗机（内含1枚^{192}Ir放射源，单枚最大装源活度为$3.70\times10^{11}Bq$，为III类放射源）均用于肿瘤的放射治疗，同时配套建设2座定位CT机房，配备2台定位CT，属III类射线装置。

拟于先进技术楼负一层**回旋加速器制药区**新建1处乙级非密封放射性物质工作场所，使用1台自屏蔽式回旋加速器（最大束流能量为16.5MeV，最大束流强度为

60μA，属II类射线装置）生产制备放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O。

拟于先进技术楼一层**核医学科-影像中心**新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga 开展 PET/CT（属III类射线装置）和 PET/MRI 显像诊断，放射性同位素 ^{68}Ga 由医院使用锗镓发生器自行淋洗所得，使用 3 枚 ^{68}Ge 放射源（属V类放射源）对 PET/CT 和 PET/MRI 进行校准；使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT（属III类射线装置）显像诊断；使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲状腺吸碘率测定和甲亢治疗项目，使用放射性同位素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 开展骨转移治疗项目。

拟于先进技术楼二层**核医学科-核素治疗中心**新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲癌治疗项目。

同时，拟于门诊医技楼三层**手术中心**新建 2 座杂交手术室，并各配备 1 台数字减影血管造影机（Digital Subtraction Angiography，简称“DSA”，属II类射线装置），拟于病房楼 C 四层 **DSA 介入中心**新建 6 座 DSA 机房，并各配备 1 台 DSA，均属II类射线装置，共计新增 8 台 DSA 均用于开展介入诊断项目。以上项目均属于核技术利用范畴。

为加强核技术应用项目的辐射环境管理，防止辐射污染和意外事故的发生，确保其使用过程不对周围环境和工作人员及公众产生不良影响，根据《中华人民共和国环境保护法》《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》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关法律法规要求，建设方南京鼓楼医院需对该项目进行环境影响评价。受南京鼓楼医院的委托，南京瑞森辐射技术有限公司承担了该单位新建放射诊疗项目的环境影响评价工作（委托书见附件 1）。

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 版）》（生态环境部令第 16 号，2021 年 1 月 1 日起施行）的规定，本项目属于“第 172 条 核技术利用建设项目”中“**使用III类放射源的；生产、使用II射线装置的；乙、丙级非密封放射性物质工作场所（医疗机构使用植入治疗用放射性粒子源的除外）的**”应编制环境影响报告表。

南京瑞森辐射技术有限公司接受委托后，通过现场勘察、收集资料并结合现场监测等工作的基础上，结合本项目的特点，按照国家有关技术规范要求，编制了该项目环境影响报告表。

二、项目周边保护目标以及场址选址情况

南京鼓楼医院本部位于江苏省南京市鼓楼区中山路 321 号，江北院区位于南京市浦口区浦珠中路 359 号，江北院区东南侧为浦五路东段，西南侧为石佛大街，西北侧为江北大道，北侧为平江大街及石佛寺驾校训练场。江北院区地理位置示意图见附图 1，医院江北院区总平面布置及周围环境情况见附图 2，江北院区建成后效果图如图 1-1 所示。

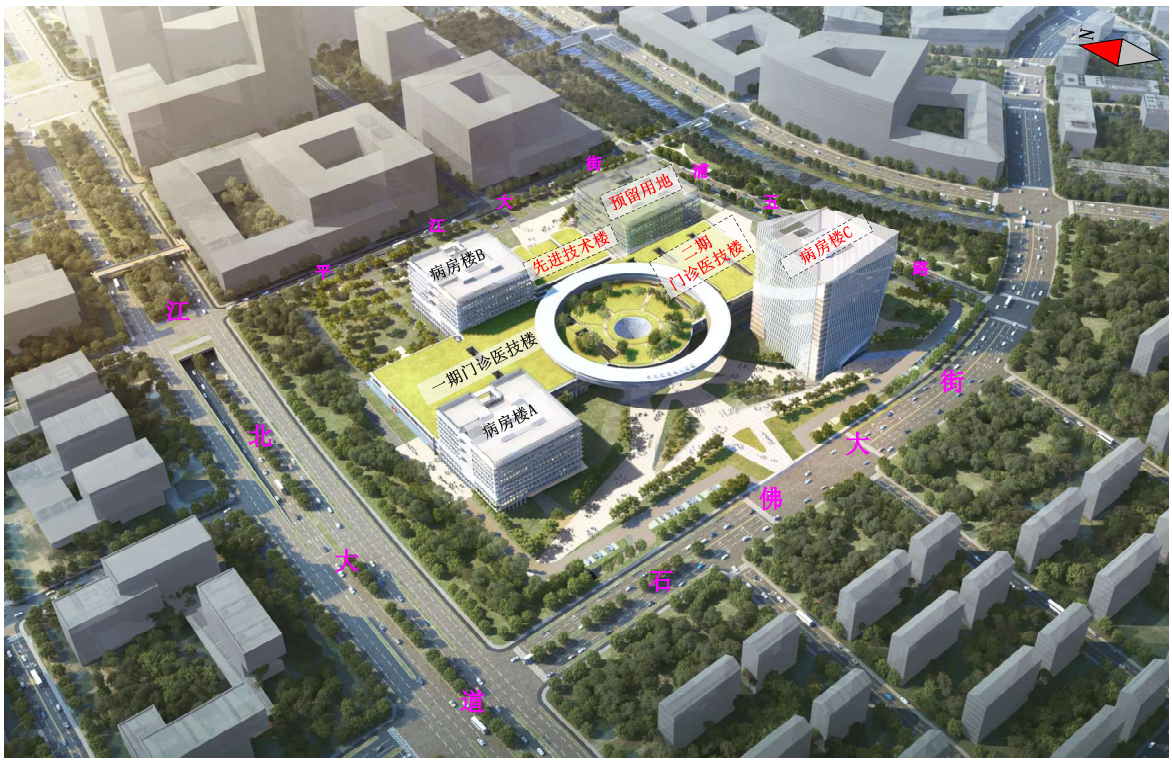


图 1-1 南京鼓楼医院江北院区效果图

本次新建放射诊疗项目分别位于江北院区拟建的先进技术楼、二期门诊医技楼和病房楼 C 内。先进技术楼位于院区中北部，其东南侧预留用地，西南侧为二期门诊医技楼，西北侧为一期病房楼 B，东北侧为院内空地；二期门诊医技楼位于院区中部，其东南侧为院内道路，西南侧为病房楼 C，西北侧为院内道路及一期门诊医技楼，东北侧为预留用地（花园）及先进技术楼；病房楼 C 位于院区东南角，其东南侧为院内绿化用地，西南侧为住院入口及院内道路，西北侧为门诊主入口及院内绿化用地，东北侧为门诊医技楼。

本项目肿瘤中心位于先进技术楼负一层北部，拟在肿瘤中心新建 3 座医用电子直线加速器机房，并配备 3 台医用电子直线加速器（X 射线最大能量为 15MV，属II类射线装置）用于肿瘤的放射治疗。本次新建的 3 座医用电子直线加速器机房呈南北向并排布置，3 座机房东南侧均为控制室及水冷机房等，3#机房西南侧为射波刀机房，

3 座机房西北侧均为汽车停车位，1#机房东北侧为汽车坡道，上方均为室外地面，下方为土层。

医院拟于肿瘤中心新建 1 座射波刀机房，并配备 1 台射波刀（X 射线最大能量为 6MV，属II类射线装置）用于肿瘤的放射治疗。射波刀机房东南侧为控制室及水冷机房，西南侧为后装治疗机机房及其控制室，西北侧为汽车停车位，东北侧为 3#直线加速器机房，上方为室外地面，下方为土层。

医院拟于肿瘤中心新建 1 座后装治疗机机房并配备 1 台后装治疗机（内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，为III类放射源）用于肿瘤的放射治疗。后装治疗机机房东南侧为控制室，西南侧为输液室，西北侧为汽车停车位，东北侧为射波刀机房，上方为室外地面，下方为土层。

同时，医院拟于肿瘤中心新建 2 座定位 CT 机房，位于肿瘤中心的东南角，2 座定位 CT 机房东南侧为过道，西南侧为控制廊，西北侧为模具室，东北侧为病人等候区，上方为会议室及肿瘤中心门厅，下方为土层。

医院本次新建的核医学科-回旋加速器制药区位于先进技术楼负一层，拟于回旋加速器机房内配备 1 台自屏蔽式回旋加速器（最大束流能量为 16.5MeV，最大束流强度为 60μA，属II类射线装置）用于生产制备放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O。回旋加速器机房东南侧为设备间及回旋加速器控制室，西南侧为人防工程的非机动车坡道等，西北侧为人防停车位等，东北侧为缓冲间及空调机房等，上方为 PET/MRI 机房及阅片室等，下方为土层。

医院拟建的核医学科-影像中心位于先进技术楼一层，拟于核医学科-影像中心工作场所内使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT（型号未定，管电压≤140kV，管电流≤1000mA）显像诊断项目，使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga 开展 PET/CT（型号未定，管电压≤140kV，管电流≤1000mA）和 PET/MRI 显像诊断项目，使用 3 枚 ^{68}Ge 放射源（属V类放射源）对 PET/CT 和 PET/MRI 进行校准，使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲状腺吸碘率测定和甲亢治疗项目，使用放射性同位素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 开展骨转移治疗项目，属于乙级非密封放射性物质工作场所。

核医学科-影像中心东南侧为阅片室及示教/会议室，西南侧为控制廊等，西北侧为室外绿地，东北侧为会议室、肿瘤中心门厅和电梯厅等，上方为核医学科-核素治疗中心，下方为肿瘤中心候诊大厅、定位 CT 室及回旋加速器制药区等。

医院拟建的核医学科-核素治疗中心位于先进技术楼二层，拟于核医学科-核素治疗中心工作场所内使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲癌治疗项目。核医学科-核素治疗中心东南侧为实验室（预留），西南侧为护士站及缓冲间，西北侧为室外，东北侧为楼梯间，上方为屋顶（人员不可达），下方为核医学科-影像中心。先进技术楼负一层平面布局示意图详见附图 3，一层平面布局详见附图 4，二层平面布局详见附图 5。

南京鼓楼医院江北院区本次新建的 2 座杂交手术室位于二期门诊医技楼三层手术中心，新建的 6 座 DSA 机房均位于病房楼 C 四层 DSA 介入中心。拟于杂交手术室和 DSA 机房内各配备 1 台 DSA（型号未定，管电压≤125kV，管电流≤1000mA），用于医学诊断及介入治疗。2 座杂交手术室东南侧为缓冲过道，5#杂交手术室西南侧为 4#骨科手术室，西北侧为污物走道，6#杂交手术室东北侧为污物走道，2 座杂交手术室上方为手术机房及屋顶花园，下方为彩超诊室。二期门诊医技楼二层平面布局见附图 6，三层平面布局见附图 7，四层平面布局见附图 8。

新建的 6 座 DSA 机房东南侧均为污物走廊，6#机房西南侧为操作间及设备间，6 座机房西北侧均为过道，1#机房东北侧为污物走廊，上方为心内科病房，下方为 ICU 病房。病房楼 C 三层平面布置示意图详见附图 9，四层平面布局详见附图 10，五层平面布局详见附图 11。

本项目 50m 评价范围除东北侧涉及院外道路和石佛寺驾校训练场外，其余方向均位于医院范围内，环境保护目标主要是本项目辐射工作人员及院内外其他公众。

本项目为南京鼓楼医院江北院区二期建设的核技术利用部分，项目用地性质为医疗卫生用地。从周边外环境关系可知，医院周边规划为居民区和市政道路，周边无自然保护区等生态环境保护目标，无大的环境制约因素。

南京鼓楼医院于 2022 年完成了南京鼓楼国际医院二期工程项目的环境影响报告书，并取得了南京江北新区管理委员会行政审批局关于该项目的批复文件，批复文号为：宁新区管审环建[2022]10 号。项目选址合理性已在相关环评报告中进行了论述，本项目建设地点均位于院区内，不额外新增用地，医院整体布局合理，且拟建的辐射工作场所有良好的实体屏蔽设施和防护措施，产生的辐射通过采取相应的治理措施后对周围环境影响较小，从辐射安全防护角度分析，本项目选址是合理的。

三、原有核技术利用项目许可情况

南京鼓楼医院于 2021 年 08 月 24 日重新申领了辐射安全许可证（苏环辐证

[00157]），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；使用非密封放射性物质，乙级非密封放射性物质工作场所，有效期至 2023 年 08 月 06 日。辐射安全许可证正副本见附件 4。

四、实践正当性及产业政策相符性分析

本项目为新增医用放射源、医用射线装置及非密封放射性物质工作场所，对照《产业结构调整指导目录（2019 年本）》及其修订（国家发展改革委令 2021 年第 49 号），不属于“限制类”或“淘汰类”项目，符合国家现行的产业政策。本项目的运行，可为病人提供放射诊疗服务，并可提高当地医疗卫生水平，具有良好的社会效益和经济效益，经辐射防护屏蔽和安全管理后，其获得的利益远大于对环境的影响，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）“实践的正当性”的原则。

表 2 放射源

序号	核素名称	总活度（Bq）/活度（Bq）×枚数	类别	活度种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注
1	^{192}Ir	3.70×10^{11}Bq×1 枚	III类	使用	近距离放射治疗	负二层肿瘤中心	随机器存放于后装治疗机屏蔽体内	约 180 天更换一次，半衰期为 74.02 天
2	^{68}Ge	5.5×10^{7}×1 枚 3.5×10^{6}×2 枚	V类	使用	校准源	核医学科-影像中心	校准源库	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/

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 $T_{1/2}$=109.8min	使用	1.11×10^{10}	1.11×10^{8}	2.78×10^{12}	生产使用	简单操作	核医学科-回旋加速器制药区	不贮存
2	^{11}C	液态/低毒 $T_{1/2}$=20min	使用	7.4×10^{8}	7.4×10^{6}	1.85×10^{11}	生产使用	简单操作		不贮存
3	^{13}N	液态/低毒 $T_{1/2}$=10min	使用	7.4×10^{8}	7.4×10^{6}	1.85×10^{11}	生产使用	简单操作		不贮存
4	^{15}O	液态/低毒 $T_{1/2}$=2min	使用	7.4×10^{8}	7.4×10^{6}	1.85×10^{11}	生产使用	简单操作		不贮存
5	^{99m}Tc	液态/低毒 $T_{1/2}$=6.01h	使用	2.22×10^{10}	2.22×10^{7}	5.55×10^{12}	核素显像	很简单操作	核医学科-影像中心	药物合成、自动分装后转移至手套箱
6	^{18}F	液态/低毒 $T_{1/2}$=109.8min	使用	1.11×10^{10}	1.11×10^{7}	2.78×10^{12}	核素显像	很简单操作		
7	^{11}C	液态/低毒 $T_{1/2}$=20min	使用	7.4×10^{8}	7.4×10^{5}	1.85×10^{11}	核素显像	很简单操作		

8	^{13}N	液态/低毒 $T_{1/2}$=10min	使用	7.4×10^{8}	7.4×10^{5}	1.85×10^{11}	核素显像	很简单操作		
9	^{15}O	液态/低毒 $T_{1/2}$=2min	使用	7.4×10^{8}	7.4×10^{5}	1.85×10^{11}	核素显像	很简单操作		
10	^{89}Sr	液态/低毒 $T_{1/2}$=50.53d	使用	2.96×10^{8}	2.96×10^{6}	1.48×10^{10}	核素治疗	很简单操作		暂存在储源室，使用时转移至手套箱
11	^{153}Sm	液态/中毒 $T_{1/2}$=46.5h	使用	2.96×10^{9}	2.96×10^{7}	1.48×10^{11}	核素治疗	很简单操作		
12	^{68}Ga	液态/低毒 $T_{1/2}$=68.3min	使用	1.85×10^{9}	1.85×10^{7}	4.62×10^{11}	核素显像	简单操作		
13	^{68}Ga-^{68}Ge	液态/中毒 $T_{1/2}$=280d	使用	1.85×10^{9}	1.85×10^{6}	1.85×10^{9}	制备 ^{68}Ga	简单操作		
14	^{131}I 甲吸	液态/中毒 $T_{1/2}$=8.04d	使用	7.40×10^{6}	7.40×10^{5}	1.85×10^{9}	核素治疗	简单操作		
15	^{131}I 甲亢	液态/中毒 $T_{1/2}$=8.04d	使用	7.40×10^{9}	7.40×10^{8}	1.85×10^{12}	核素治疗	简单操作		
16	^{131}I 甲癌	液态/中毒 $T_{1/2}$=8.04d	使用	2.78×10^{10}	2.78×10^{9}	1.39×10^{12}	核素治疗	简单操作	核医学科-核素治疗中心	暂存在自动分装仪内

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、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量（MeV）	额定电流（mA）/剂量率（Gy/h）	用途	工作场所	备注
1	医用电子直线加速器	II	3 台	待定	电子	X 射线最大能量：15MV 15MV 时 1m 处常用最高剂量率 6Gy/min 10MV 时 1m 处常用最高剂量率 24Gy/min 电子线最大能量为 20MeV，最高剂量率：10Gy /min		放射治疗	肿瘤中心 医用电子直线加速器机房	本次环评
2	射波刀	II	1 台	待定	电子	X 射线最大能量：6MV 0.85m 处常用最高剂量率 10Gy/min		放射治疗	肿瘤中心 射波刀机房	本次环评
3	回旋加速器	II	1	GE PET trace 840	质子	16.5	60μA	核素制备	核医学科	本次环评

（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	8	待定	125	1000	介入治疗	杂交手术室 DSA 介入中心	本次环评
2	PET/CT	III	1	待定	140	1000	核素显像	核医学科	
3	SPECT/CT	III	1	待定	140	1000	核素显像	核医学科	
4	定位 CT	III	2	待定	150	1500	放射诊断	肿瘤中心	

（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	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
沾有放射性核素的注射器、手套、擦拭废纸等	固体	^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O、^{99m}Tc 和 ^{68}Ga	/	/	/	/	存放于专用放射性废物铅桶与废物库	暂存超过 30 天以上，经检测合格后，由医院统一作为医疗废物处理
		^{131}I	/	/	/	/		暂存超过 180 天以上，经检测合格后，由医院统一作为医疗废物处理
		^{89}Sr 和 ^{153}Sm	/	/	/	/		暂存超过十个半衰期以上，经检测合格后，由医院统一作为医疗废物处理
含放射性核素的卫生间下水及清洗废水	液体	^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O、^{99m}Tc 和 ^{68}Ga	/	约 $36m^3$	约 $1800m^3$	/	暂存于衰变池内	暂存于衰变池内衰变 30 天以上，可接解控排放至医院污水处理站
		^{131}I	/			/		暂存于衰变池内衰变 180 天以上，可接解控排放至医院污水处理站
含有液态放射性药物分装时挥发的微量气溶胶	气体	^{99m}Tc、^{18}F、^{68}Ga 等	/	微量	微量	微量	不暂存	在手套箱中操作，经手套箱管道内及屋顶排放口活性炭装置过滤后排放
DSA 手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物	固体	/	/	约 10kg	约 120kg	/	暂存在机房内的废物桶	手术结束后集中收集，作为医疗废物由医院统一委托有资质单位进行处置
臭氧和氮氧化物	气体	/	/	/	微量	微量	不暂存	通过排风系统排入外环境，臭氧在常温条件下可自动分解为氧气

废活性炭	固体	^{131}I 等	/	/	/	/	更换后暂存在放射性废物暂存间内	存放超过 180 天以上，达到清洁解控水平后，由医院统一作为医疗废物处理
退役的 ^{192}Ir 放射源	固体	^{192}Ir	使用约 180 天更换一次，退役时活度约为 $6.9\times10^{10}Bq$	/	/	/	不暂存	放射源厂家回收
退役的 ^{68}Ge 放射源	固体	^{68}Ge	/	/	/	/	不暂存	交城市放射性废物库
回旋加速器产生的有靶废料等			/	/	/	/	不暂存	交有资质单位收贮
医用电子直线加速器退役废靶	固体	中子活化产物	约 10 年更换一次	/	/	/	不暂存	交有资质单位收贮
退役的 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器	固体	^{68}Ge-^{68}Ga	约一年更换一次	/	/	/	不暂存	交有资质单位收贮

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.含有放射性的废物要注明，其排放浓度、年排放总量分别用比活度（Bq/L 或 Bq/kg 或 Bq/m^3）和活度（Bq）。

表 6 评价依据

法规文件	（1）《中华人民共和国环境保护法》（修订版），1989年12月26日发布施行；2014年4月24日修订，2015年1月1日起施行； （2）《中华人民共和国环境影响评价法》（2018年修正版），2018年12月29日发布施行； （3）《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003年10月1日起实施； （4）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院令第449号，2005年12月1日起施行；2019年修正，国务院令709号，2019年3月2日施行； （5）《建设项目环境保护管理条例》（2017年修订版），国务院令第682号，2017年10月1日发布施行； （6）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部令 第20号，2021年1月4日起施行； （7）《建设项目环境影响评价分类管理名录》（2021版），生态环境部第16号令，自2021年1月1日起施行； （8）《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； （9）《放射源分类办法》，国家环境保护总局公告 2005年 第62号，2005年12月23日起施行； （10）《射线装置分类》，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； （11）《放射性废物安全管理条例》，中华人民共和国国务院令第612号，2012年3月1日起施行； （12）《关于发布<放射性废物分类>的公告》，环境保护部、工业和信息化部、 国防科工局公告 2017年公告第65号公布，自2018年1月1日起施行； （13）《关于建立放射性同位素与射线装置事故分级处理报告制度的通知》国家环保总局，环发[2006]145号，2006年9月26日起施行； （14）《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），2016年3月7日起施行； （15）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》生态环境部公

	告2019年第9号，2019年11月1日起施行； （16）《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； （17）《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； （18）《关于启用环境影响评价信用平台的公告》，生态环境部，公告2019 年第39号，2019年11月1日起启用； （19）《产业结构调整指导目录》（2019年本），2021年修改，国家发展和改革委员会2021年令第49号，2021年12月30日起施行； （20）《江苏省辐射污染防治条例》（2018年修正本），江苏省第十三届人民代表大会常务委员会第二次会议，2018年5月1日起实施； （21）《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》（环环评[2016]150号），2016年10月27日起施行； （22）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》生态环境部公告2019年第57号，2019年12月24日施行； （23）《江苏省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）。
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 核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）； （3）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）； （4）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）； （5）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）； （6）《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）； （7）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）； （8）《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）； （9）《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）； （10）《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）； （11）《职业性外照射个人监测规范》 （GBZ 128-2019）；

	（12）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）； （13）《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分一般原则：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）； （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/T 201.3-2014）； （15）《后装 γ 源近距离治疗质量控制检测规范》（WS 262-2017）； （16）《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）。
其他	（1）环保部辐射安全与防护监督检查技术程序； （2）工程设计图纸及相关技术资料； （3）委托书； （4）放射源、非密封放射性物质及射线装置使用承诺书； （5）一般建设项目的环境影响评价文件批复； （6）医院辐射安全许可证等。

表 7 保护目标与评价标准

评价范围

根据本项目的特点并参照《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）中“核技术利用建设项目环境影响评价报告书的评价范围和保护目标的选取原则：放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目评价范围，甲级取半径 500m 的范围，**乙、丙级取半径 50m 的范围。放射源和射线装置应用项目的评价范围，通常取装置所在场所实体屏蔽物边界外 50m 的范围**”，确定为南京鼓楼医院本次新建放射诊疗项目所在工作场所实体屏蔽墙体外周边 50m 范围内作为评价范围，详见附图 2。

保护目标

医院肿瘤中心项目的 50m 评价范围除东北侧部分位于医院院界外，其余方向均位于医院范围内，其余核技术利用项目 50m 评价范围均位于医院范围内。本项目评价范围内无学校、居民区等环境敏感点，项目运行后的环境保护目标主要为医院辐射工作人员、院区内的其他医护人员、病患及陪同家属和东北侧石佛寺驾校训练场的公众及其他流动公众等，具体详见表 7-1。

表 7-1 本项目评价范围内辐射环境保护目标一览表

保护目标名称			方位	最近距离	规模
肿瘤中心项目	辐射工作人员		控制室	/	26 人
	先进技术楼	其他医护工作人员	肿瘤中心机房四周及上方	约 5m	约 200 人
		患者、患者家属及院内周边公众			约 50 人
	平江大街公众		东北侧	约 25m	流动人员
	石佛寺驾校训练场		东北侧	约 40m	约 20 人
核医学科项目	辐射工作人员		核医学科工作场所	/	24 人
	先进技术楼	其他医护工作人员	核医学科四周、上方及下方	约 5m	约 50 人
		患者、患者家属及院内周边公众			约 100 人
	一期主楼 B	院内公众	西北侧	约 20m	流动人员
	一期门诊医技楼		西侧	约 40m	流动人员
	二期门诊医技楼		西南侧	约 20m	流动人员

杂交手术室项目	辐射工作人员		控制室 DSA 机房	/	12 人
	二期门诊医技楼楼	其他医护工作人员	DSA 机房四周及上下方	约 2m	约 200 人
		患者、患者家属及院内周边公众			4 层建筑约 800 人次
	一期门诊医技楼	院内公众	西北侧	约 40m	流动人员
	一期主楼 B		东北侧	约 35m	流动人员
	先进技术楼		东侧	约 25m	流动人员
DSA 介入中心项目	辐射工作人员		控制室 DSA 机房	/	36 人
	病房楼	其他医护工作人员	DSA 机房四周及上下方	约 2m	约 400 人
		患者、患者家属及院内周边公众			17 层建筑，约 2000 人
	二期门诊医技楼	院内公众	东侧	约 20m	流动人员

评价标准

一、评价标准

1、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）：

工作人员职业照射和公众照射剂量限值

对象	要求
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，20mSv ②任何一年中的有效剂量，50mSv ③眼晶体的年当量剂量，150mSv ④四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，500mSv
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，lmSv； ②特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 lmSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。
剂量约束值通常应在公众照射剂量限值 10%～30%（即 0.1mSv/a～0.3mSv/a）的范围之内。	

辐射工作场所的分区

应把辐射工作场所分为控制区和监督区，以便于辐射防护管理和职业照射控制。

控制区：

注册者和许可证持有者应把需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。

监督区：

注册者和许可证持有者应将下述区域定为监督区：这种区域未被定为控制区，在其中通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价。

2、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）：

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 5mSv/a。

b）公众照射的剂量约束值不超过 0.1mSv/a。

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（$\dot{H}_c$）求得关注点的导出剂量率参考控制水平 $\dot{H}_{c,d}$(μSv/h)：

机房外辐射工作人员：$\dot{H}_c$≤100μSv/周；

机房外非辐射工作人员：$\dot{H}_c$≤5μSv/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 $\dot{H}_{c,max}$(μSv/h)：

人员居留因子 T＞1/2 的场所：$\dot{H}_{c,max}$≤2.5μSv/h；

人员居留因子 T≤1/2 的场所：$\dot{H}_{c,max}$≤10μSv/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 250μSv 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 μSv/h 加以控制（可在相应位置处设置辐射告示牌）。

3、《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）；

4、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）；

5、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.2-2011）；

6、《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）；

7、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）：

4.4.2 剂量约束值

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。

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 30 cm 处的周围剂量当量率小于 2.5μSv/h。

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平，α 表面污染小于 0.08Bq/cm²、β 表面污染小于 0.8Bq/cm² 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。

7.3.1 放射性废液收集

7.3.1.1 核医学工作场所应设置有槽式或推流式放射性废液衰变池或专用容器，收集放射性药物操作间、核素治疗病房、给药后患者卫生间、卫生通过间等场所产生的放射性废液和事故应急时清洗产生的放射性废液。

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），监测结果经审管部门认可后，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 10 Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10Bq/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。

8、《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）：

第 5.2 款 放射防护措施要求

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。

9、《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）：

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、改建和改建项目和技术改造、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。

表 2 X 射线设备机房（照射室）使用面积及单边长度

机房类型	机房内最小有效使用面积，m^2	机房内最小单边长度，m
CT 机（不含头颅移动 CT）	30	4.5
单管头 X 射线设备[b]（含 C 形臂，乳腺 CBCT）	20	3.5

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。

6.2.2 医用诊断 X 射线防护中不同铅当量屏蔽物质厚度的典型值参见附录 C 中表 C.4～表 C.7。

表 3　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
标称 125kV 及以下的摄影机房	2.0	1.0
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	

6.2.3 机房的门和窗关闭时应满足表 3 的要求。

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 2.5 μSv/h；测量时，X 射线设备连续出束时间应大于仪器响应时间；

6.5 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。

表 4 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	

二、辐射环境评价标准限值

1、个人剂量管理限值

①职业照射：根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）、《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）确定本项目职业照射的剂量约束值不超过 5mSv/a。

②公众照射：根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）、

《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）确定本项目公众照射的剂量约束值不超过 0.1 mSv/a。

2、表面污染控制水平

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）附录 B2 表面污染控制水平：“工作场所中的某些设备与用品，经去污使其污染水平降低到表 B11 中所列设备类的控制水平的五十分之一以下时（即 0.8Bq/cm^2），经审管部门或审管部门授权的部门确认同意后，可当作普通物品使用。”

表 B11 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。

3、工作场所内外控制剂量率

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放疗机房周开机治疗时间，估算得到放疗机房外 30cm 处的周围剂量当量率参考控制水平$\dot{H}_c$。

$$\dot{H}_{c,\ d} = H_c/(t \cdot U \cdot T)\cdots\cdots\text{公式 7-1}$$

式中：$\dot{H}_{c,\ d}$—导出剂量率参考控制水平，μSv/h;

H_c—周剂量率参考控制水平 μSv/周；根据 HJ 1198-2021 中 6.1.4 的 a)，机房外辐射工作人员：H_c≤100μSv /周；机房外非辐射工作人员：H_c≤5μSv/周；

t—治疗装置周工作时间，根据医院提供资料，本项目单台医用电子直线加速器放射治疗工作量为 80 人/天，每周工作 5 天，年出束时间约 500h，则本项目医用电子直线加速器和射波刀周治疗照射时间为：t=10h/周；

U—关注位置的方向照射的使用因子；

T—人员在相应关注点驻留的居留因子。

根据公式 7-1 并结合图 11-1 和图 11-2，本项目医用电子直线加速器机房各关注点剂量率参考水平详见表 7-4。

表 7-4 本项目医用电子直线加速器机房和射波刀机房各关注点剂量率参考水平一览表

参考点		T	U	H_c（μSv/周）	t（h）	$\dot{H}_{c,d}$（μSv/h）	$H_{c,max}$（μSv/h）	$\dot{H}_c$（μSv/h）
1#医用电子直线加速器机房	西南墙主屏蔽（a 点）	1/2	1/4	5	10	4.0	10	4.0
	东北墙主屏蔽（b 点）	1/16	1/4	5		32	10	10
	屋顶主屏蔽（l 点）	1/16	1/4	5		32	10	10
	东北墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	西北墙次屏蔽（e 点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	迷路外墙（f 点）	1	1	100		10	2.5	2.5
	迷路外墙（k 点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	防护门（g 点）	1/8	1	5		4.0	10	4.0
2#医用电子直线加速器机房	西南墙主屏蔽（b 点）	1/2	1/4	5	10	4.0	10	4.0
	东北墙主屏蔽（a 点）	1/2	1/4	5		4.0	10	4.0
	屋顶主屏蔽（l 点）	1/16	1/4	5		32	10	10
	西南墙次屏蔽 d_2 点	1/2	1	5		1.0	10	1.0
	屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	西北墙次屏蔽（e 点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	迷路外墙（f 点）	1	1	100		10	2.5	2.5
	迷路外墙（k 点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	防护门（g 点）	1/8	1	5		4.0	10	4.0
3#医用电子直线加速	西南墙主屏蔽（a 点）	1/2	1/4	5	10	4.0	10	4.0
	东北墙主屏蔽（b 点）	1/2	1/4	5		4.0	10	4.0
	屋顶主屏蔽（l 点）	1/16	1/4	5		32	10	10
	东北墙次屏蔽 d_2 点	1/2	1	5		1.0	10	1.0
	屋顶次屏蔽	1/16	1	5		8.0	10	8.0

器机房	（m_1、m_2点）							
	西北墙次屏蔽（e点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	迷路外墙（f点）	1	1	100		10	2.5	2.5
	迷路外墙（k点）	1/16	1	5		8.0	10	8.0
	防护门（g点）	1/8	1	5		4.0	10	4.0
参考点		***T***	***U***	$\dot{H}_c$（μSv/周）	***t***（***h***）	$\dot{H}_{c,d}$（μSv/h）	$H_{c,max}$（μSv/h）	$\dot{H}_c$（μSv/h）
射波刀机房	东南墙（a点）	1	1/20	100	10	200	2.5	2.5
	迷道外墙（b点）	1/16	1/20	5		160	10	10
	西南墙（c点）	1/2	1/20	5		20	10	10
	西北墙（d点）	1/16	1/20	5		160	10	10
	东北墙（e点）	1/2	1/20	5		20	10	10
	屋顶（l点）	1/16	1/20	5		160	10	10
	防护门（g点）	1/8	1/20	5		80	10	10

注：$\dot{H}_c$为$H_{c,max}$与导出的剂量率参考控制水平$\dot{H}_{c,d}$二者中选择较小者；

本项目$H_{c,max}$取HJ 1198-2021中6.1.4给出关注点最高剂量率参考水平$H_{c,max}$≤2.5μSv/h（人员居留因子＞1/2场所）和$H_{c,max}$≤10μSv/h（人员居留因子≤1/2场所）。

同理，根据公式7-1并结合图11-3，根据建设单位提供资料，每年有1500人次的门诊量，治疗出束时间大约为10分钟/人次，后装机预计年工作时间为250h，周工作时间约为5h；本项目后装治疗机机房各关注点剂量率参考水平详见表7-5。

表7-5 后装治疗机机房各关注点剂量率参考水平一览表

参考点	***T***	***U***	$\dot{H}_c$（μSv/周）	***t***（***h***）	$\dot{H}_{c,d}$（μSv/h）	$H_{c,max}$（μSv/h）	$\dot{H}_c$（μSv/h）
东南墙外（a点）	1	1	100	5	20	2.5	2.5
西南墙外（b点）	1/4	1	5		4.0	10	4.0
西北墙外（c点）	1/16	1	5		16	10	10
东北墙外（d点）	1/2	1	5		2.0	10	2.0
顶部（l点）	1/16	1	5		16	10	10
防护门（g点）	1/8	1	5		8.0	10	8.0

注：$\dot{H}_c$为$H_{c,max}$与导出的剂量率参考控制水平$\dot{H}_{c,d}$二者中选择较小者；

本项目$H_{c,max}$取HJ 1198-2021中6.1.4给出关注点最高剂量率参考水平$H_{c,max}$≤2.5μSv/h（人员居留因子＞1/2场所）和$H_{c,max}$≤10μSv/h（人员居留因子≤1/2场所）。

本项目定位CT机房和DSA机房等射线装置机房边界周围剂量率控制水平参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）和《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）等相关标准要求， DSA机房和定位CT机房墙体、门、窗表面外30cm处、顶棚上方距地面1m处、下方距楼下地面1.7m处的周围剂量当量率应不大于2.5 μSv/h。

根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021），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。

回旋加速器机房距屏蔽体外表面 0.3 m 处的周围剂量当量率控制目标值应不大于 2.5 μSv/h。

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。

4、其他

核医学科内通风橱或手套箱的排风装置设计风速不小于 0.5m/s。

三、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）》，李德平、潘自强主编。

3、《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。

江苏省环境天然γ射线（空气吸收）剂量率调查结果（单位：nGy/h）

\	**道路剂量率**	**室内剂量率**
测值范围	18.1~102.3	50.7~129.4
均值	47.1	89.2
标准差（s）	12.3	14.0

根据上表，本报告取江苏省道路、室内 γ 辐射（空气吸收）剂量率中的“均值±3 倍标 准差”为其评价参考范围，即道路 γ 辐射（空气吸收）剂量率参考范围取（47.1±36.9）nGy/h， 室内 γ 辐射（空气吸收）剂量率参考范围取（89.2±42）nGy/h。

表 8 环境质量和辐射现状

环境质量和辐射现状

一、项目地理和场所位置

南京鼓楼医院本部位于江苏省南京市鼓楼区中山路 321 号，江北院区位于南京市浦口区浦珠中路 359 号，江北院区东南侧为浦五路东段，西南侧为石佛大街，西北侧为江北大道，北侧为平江大街及石佛寺驾校训练场。

本次新建放射诊疗项目分别位于医院拟建的先进技术楼、二期门诊医技楼和病房楼 C 内。先进技术楼位于院区中北部，其东南侧预留用地，西南侧为二期门诊医技楼，西北侧为一期病房楼 B，东北侧为院内空地；门诊医技楼位于院区中部，其东南侧为院内道路，西南侧为病房楼 C，西北侧为院内道路及一期门诊医技楼，东北侧为预留用地（花园）及先进技术楼；病房楼 C 位于院区东南角，其东南侧为院内绿化用地，西南侧为住院入口及院内道路，西北侧为门诊主入口及院内绿化用地，东北侧为门诊医技楼。

本项目肿瘤中心位于先进技术楼负一层北部，3 座医用电子直线加速器机房呈南北向并排布置，3 座机房东南侧均为控制室及水冷机房等，3#机房西南侧为射波刀机房，3 做机房西北侧均为汽车停车位，1#机房东北侧为汽车坡道，上方均为室外地面，下方为土层。射波刀机房东南侧为控制室及水冷机房，西南侧为后装治疗机机房及其控制室，西北侧为汽车停车位，东北侧为 3#直线加速器机房，上方为室外地面，下方为土层。后装治疗机机房东南侧为控制室，西南侧为输液室，西北侧为汽车停车位，东北侧为射波刀机房，上方为室外地面，下方为土层。2 座定位 CT 机房位于肿瘤中心东南角，机房东南侧为过道，西南侧为控制廊，西北侧为模具室，东北侧为病人等候区，上方为会议室及肿瘤中心门厅，下方为土层。

本项目核医学科-回旋加速器制药区位于先进技术楼负一层，其中东南侧为设备间及回旋加速器控制室，西南侧为人防工程的非机动车坡道等，西北侧为人防停车位等，东北侧为缓冲间及空调机房等，上方为 PET/MRI 机房及阅片室等，下方为土层。

核医学科-影像中心东南侧为阅片室及示教/会议室，西南侧为控制廊等，西北侧为室外绿地，东北侧为会议室、肿瘤中心门厅和电梯厅等，上方为核医学科-核素治疗中心，下方为肿瘤中心候诊大厅、定位 CT 室及回旋加速器制药区等。

核医学科-核素治疗中心东南侧为实验室（预留），西南侧为护士站及缓冲间，西

北侧为室外，东北侧为楼梯间，上方为屋顶（人员不可达），下方为核医学科-影像中心。

南京鼓楼医院江北院区本次新建的2座杂交手术室位于二期门诊医技楼三层手术中心，2座机房东南侧为缓冲过道，5#杂交手术室西南侧为4#骨科手术室，西北侧为污物走道，6#杂交手术室东北侧为污物走道，2座机房上方为手术机房及屋顶花园，下方为彩超诊室。

南京鼓楼医院江北院区本次新建的6座DSA机房均位于病房楼C四层DSA介入中心，6座DSA机房东南侧均为污物走廊，6#机房西南侧为操作间及设备间，6座机房西北侧均为过道，1#机房东北侧为污物走廊，上方为心内科病房，下方为ICU病房。

本项目周围50m范围除东北侧涉及院外道路和石佛寺驾校训练场外，其余方向均位于医院范围内，环境保护目标主要是本项目辐射工作人员及院内外其他公众。

本次新建项目拟建址周围环境现状见图8-1至图8-4。



图8-1 拟建址东南侧



图8-2 拟建址西南侧



图8-3 拟建址西北侧



图8-4 拟建址内部

二、辐射环境现状评价

根据《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）和《辐射环境监测技术

规范》（HJ 61-2021）相关方法和要求，在进行环境现场调查时，于本次项目拟建址及周围环境进行布点，测量辐射剂量率、表面污染水平及中子剂量当量率现状。监测结果见表 8-1，监测点位示意图见图 8-5。监测报告见附件 4。

（一）监测单位：南京瑞森辐射技术有限公司

（二）检测仪器：

1、辐射剂量率：

FH40G+FHZ672E-10 型 X-γ 剂量率仪（设备编号：NJRS-103，检定有效期：2022 年 01 月 15 日～2023 年 01 月 14 日），检定单位：江苏省计量科学研究院，检定证书编号：Y2022-0001788

能量范围：40keV～4.4MeV

剂量率范围：1nSv/h～100μSv/h

2、表面污染水平：

检测仪器：CoMo 170 型 α、β 表面污染测量仪（设备编号：NJRS-129，检定有效期：2022 年 4 月 10 日～2023 年 4 月 9 日，检定单位：江苏省计量科学研究院，检定证书编号：检定字第 202204002138 号）

测量范围：0cps～20000cps

3、中子剂量当量率：

FH40G+FHT762 型中子周围剂量当量率仪（设备编号：NJRS-022，检测有效期：2022 年 4 月 1 日~2023 年 3 月 31 日），检定单位：中国计量科学研究院，检定证书编号：DLjs2022-00700

能量范围：0.025eV～5GeV

剂量率范围：1nSv/h～100mSv/h

（三）检测日期及条件：

监测日期：2022 年 11 月 10 日

天气：晴

温度：23℃　　湿度：57%RH

监测布点：参照《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）中的方法布设监测点，根据本次新建项目拟建址及其周围环境现状，监测点位的选取覆盖新建项目拟建区域及周围 50m 公众人员区域。根据上述布点原则与方法，本项目监测点位布置如图 8-5

所示。

质量控制：本项目监测单位南京瑞森辐射技术有限公司已通过计量认证（证书编号：221020340350，检测资质见附件 5），具备有相应的检测资质和检测能力，监测按照南京瑞森辐射技术有限公司《质量管理手册》和《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：监测人员均经过考核并持有合格证书，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检验，监测报告实行三级审核。

（四）评价方法：

参照江苏省天然γ辐射剂量水平调查结果，评价项目周围的辐射环境质量。

（五）检测结果：

表 8-1 新建放射诊疗项目拟建址及周围γ辐射剂量率检测结果

测点编号	测点描述	测量结果（nGy/h）	备注
1	放射诊疗项目拟建址东南侧	85	室外
2	放射诊疗项目拟建址东南侧	72	室外
3	放射诊疗项目拟建址西南侧	63	室外
4	放射诊疗项目拟建址西南侧	62	室外
5	放射诊疗项目拟建址西北侧	97	室外
6	放射诊疗项目拟建址东北侧	73	室外
7	放射诊疗项目拟建址院外石佛寺驾校训练场	69	室外
8	放射诊疗项目拟建址院外石佛寺驾校训练场	95	室外

注：测量结果已扣除宇宙射线响应值。

表 8-2 新建放射诊疗项目拟建址及周围表面污染水平检测结果

测点编号	点位描述	测量结果(Bq/cm²)	备注
1	放射诊疗项目拟建址东南侧	＜0.03	/
2	放射诊疗项目拟建址东南侧	＜0.03	/
3	放射诊疗项目拟建址西南侧	＜0.03	/
4	放射诊疗项目拟建址西南侧	＜0.03	/
5	放射诊疗项目拟建址西北侧	＜0.03	/
6	放射诊疗项目拟建址东北侧	＜0.03	/
7	放射诊疗项目拟建址院外石佛寺驾校训练场	＜0.03	/
8	放射诊疗项目拟建址院外石佛寺驾校训练场	＜0.03	/

注：表面β放射性污染水平探测下限（LLD）为 0.03Bq/cm²。

表 8-3 新建放射诊疗项目拟建址及周围中子剂量当量率检测结果

测点编号	点位描述	测量结果(μSv/h)	备注
1	放射诊疗项目拟建址东南侧	< LLD	/
2	放射诊疗项目拟建址东南侧	< LLD	/

3	放射诊疗项目拟建址西南侧	< LLD	/
4	放射诊疗项目拟建址西南侧	< LLD	/
5	放射诊疗项目拟建址西北侧	< LLD	/
6	放射诊疗项目拟建址东北侧	< LLD	/
7	放射诊疗项目拟建址院外石佛寺驾校训练场	< LLD	/
8	放射诊疗项目拟建址院外石佛寺驾校训练场	< LLD	/

注：仪器探测下限（LLD）为 1nSv/h。

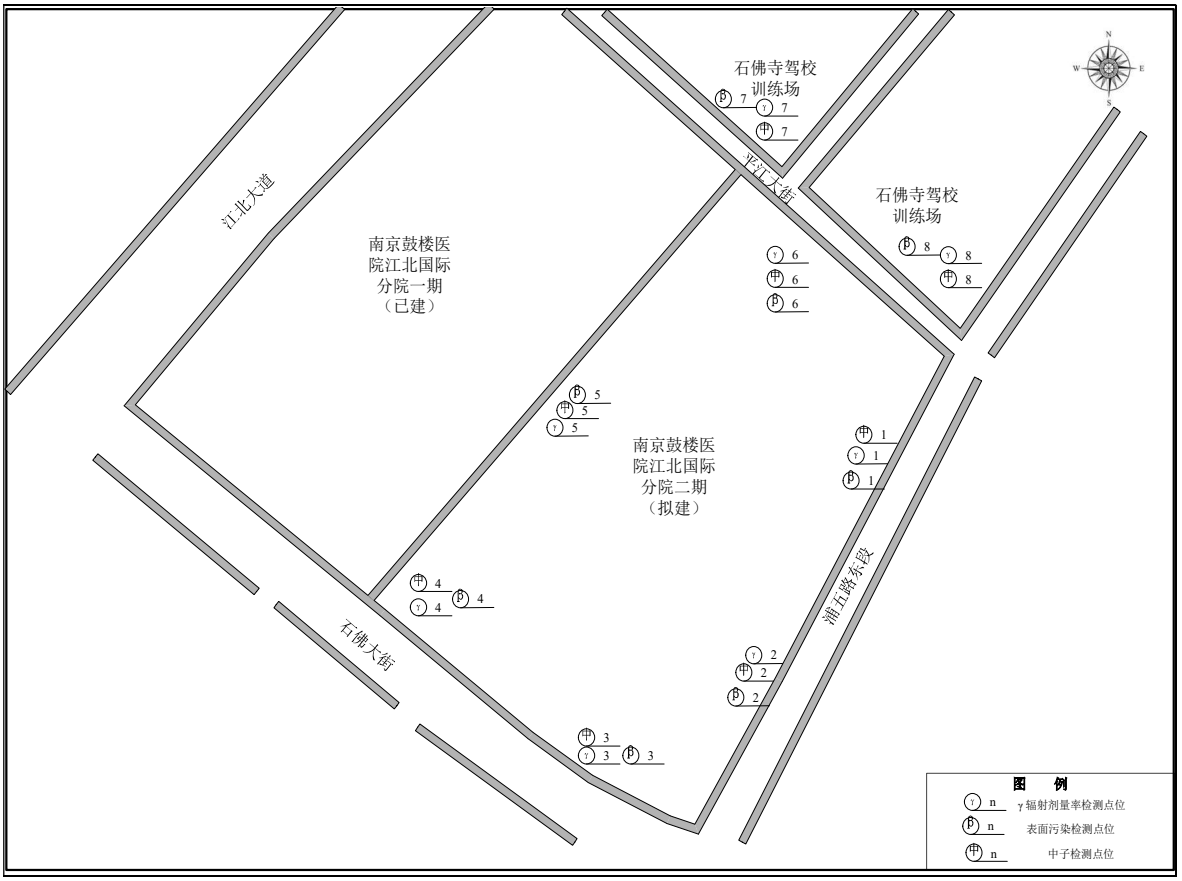


图 8-5 监测点位示意图

由表 8-1~表 8-3 监测结果可知，南京鼓楼医院本次新建放射诊疗项目拟建址周围环境贯穿辐射剂量率在 62nGy/h～97nGy/h 之间，位于江苏省环境天然 γ 辐射水平涨落区间，属正常本底水平。南京鼓楼医院新建放射诊疗项目拟建址及其周围表面 β 放射性污染测量结果为＜0.03Bq/cm^2。项目拟建位置周围中子剂量当量率在均＜0.001μSv/h，属于正常水平。

表 9 项目工程分析与源项

工程设备与工艺分析

一、工程设备

南京鼓楼医院拟在江北院区先进技术楼负一层肿瘤中心新建 3 座医用电子直线加速器机房，并配备 3 台医用电子直线加速器（X 射线最大能量为 15MV，属II类射线装置）；拟于肿瘤中心新建 1 座射波刀机房，并配备 1 台射波刀（X 射线最大能量为 6MV，属II类射线装置）；拟于肿瘤中心新建 1 座后装治疗机机房，并配备 1 台后装治疗机（内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，为III类放射源）均用于肿瘤的放射治疗，同时配套建设 2 座定位 CT 机房，配备 2 台定位 CT，属III类射线装置。

拟于先进技术楼负一层回旋加速器制药区新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，使用 1 台自屏蔽式回旋加速器（型号为 GE PETtrace 840 最大束流能量为 16.5MeV，最大束流强度为 60μA，属II类射线装置）生产制备放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O。

拟于先进技术楼一层核医学科-影像中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga 开展 PET/CT（属III类射线装置）和 PET/MRI 显像诊断，放射性同位素 ^{68}Ga 由医院使用锗镓发生器（由有资质单位供应）自行淋洗所得，使用 3 枚 ^{68}Ge 放射源（属V类放射源）对 PET/CT 和 PET/MRI 进行校准；使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT（属III类射线装置）显像诊断；使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲状腺吸碘率测定和甲亢治疗项目，使用放射性同位素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 开展骨转移治疗项目。

拟于先进技术楼二层核医学科-核素治疗中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲癌治疗项目。

同时，拟于二期门诊医技楼三层手术中心新建 2 座杂交手术室，并各配备 1 台 DSA。拟于病房楼 C 四层 DSA 介入中心新建 6 座 DSA 机房，并各配备 1 台 DSA，均属II类射线装置，共计新增 8 台 DSA 均用于开展介入诊断项目。

（一）肿瘤中心项目

1、医用电子直线加速器项目

南京鼓楼医院拟于先进技术楼负一层肿瘤中心建设 3 座医用电子直线加速器机房，各配备 1 台医用电子直线加速器（型号：未定，X 射线最大能量为 15MV，电子

线能量为≤22MeV），用于肿瘤的放射治疗，常见的医用电子直线加速器外观图见图9-1。医院本次拟购置的医用电子直线加速器设备参数详见表9-1。



图9-1 常见医用电子直线加速器外观

表9-1 本项目拟配备的医用电子直线加速器技术参数一览表

型号	未定
位置	肿瘤中心（先进技术楼负一层）
主要技术指标	X射线能量（MV）：6、10、15 电子线能量（MeV）：≤22
射线最大出射角	28°（等中心点每侧14°）
源轴距SAD	1m
等中心点至机房地坪的高度	1.3m
距靶1m处X辐射剂量率	15MV时：最大6Gy·m^2/min 10MV时：最大24Gy·m^2/min
最大照射野大小	40cm×40cm
机架旋转	360°
靶材料	钨合金

医用电子直线加速器是产生高能X射线和电子束的装置，为远距离治疗机。主要由机架组件、辐射头、水冷系统、速调管、真空系统、充气系统、高压脉冲调制器、栅控电子枪电源、控制柜及操作盒、运控机箱、整机动力配电及低压电源、整机联锁保护电路等组成。从电子枪发出的同步电子束注入已建立高梯度的驻波或行波加速场中加速，在加速管末端，电子束加速到所需能量后经过漂移管进入270°偏转磁场。在偏转磁场中，电子束偏转270°后由水平入射变为垂直出射，并同时完成聚集和消除能谱色差形成直径2mm左右的平行束流，经过引出窗到达移动靶件处。移动靶件具有不同工位，可根据治疗需要使电子束轰击合金靶产生X辐射或直接穿透初级散射箔产生电子辐射。典型医用电子直线加速器基本结构示意图见图9-2。

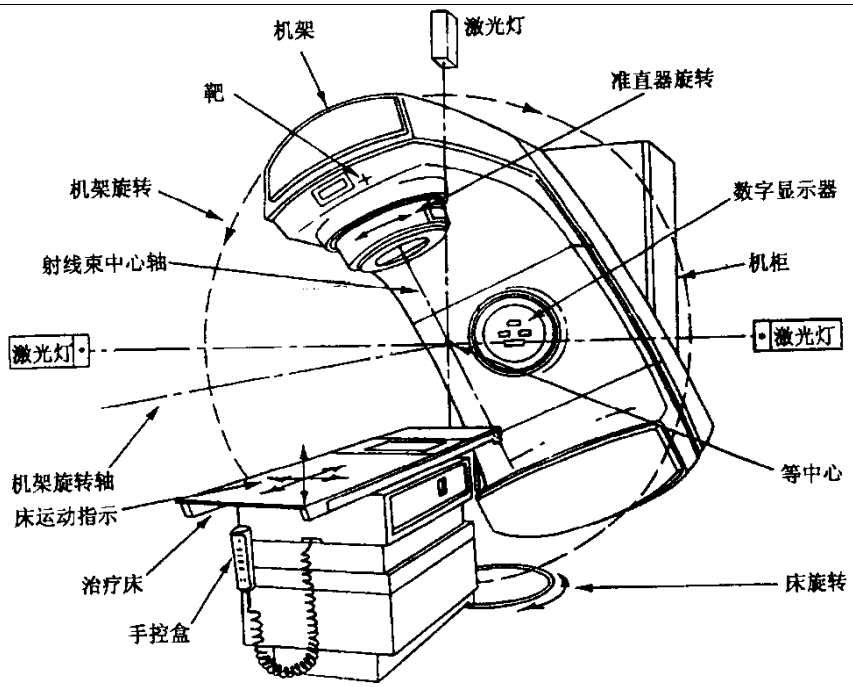


图 9-2 典型医用电子直线加速器基本结构示意图

2、射波刀项目

南京鼓楼医院拟于先进技术楼负一层肿瘤中心建设 1 座射波刀机房，配备 1 台射波刀（型号：未定，X 射线最大能量为 6MV），用于肿瘤的放射治疗，常见的射波刀外观图见图 9-3。



图 9-3 常见的射波刀外观图

射波刀包括以下部分：

（1）直线加速器（Linear Accelerator）：射波刀使用一个紧凑型、能产生 6MV 的 X 射线轻型直线加速器，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 Xsight 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。患者治疗前，先作 CT 或 MRI 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，肿瘤随着患者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。呼吸追踪是让患者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。医院拟引进的射波刀其主要技术参数见表 9-2。

表 9-2 本项目射波刀技术参数情况一览表

项目名称	技术参数*
型号	型号未定
位置	先进技术楼负一层肿瘤中心射波刀机房
主要技术指标	X 射线：≤6MV
源轴距 SAD	0.8m
等中心点至机房地坪的高度	0.921m
距靶 0.8m 处 X 辐射剂量率	≤10Gy/min
最大照射野大小	最大照射野直径Φ6cm 或 11.5cm×11cm
靶材料	钨合金
用途	放射治疗

注：本项目射波刀型号未定，参数为建设单位招标意向及主流供货商的常用参数，实际采购设备的源强参数不大于表列源强参数。

3、后装治疗机项目

南京鼓楼医院拟于先进技术楼负一层肿瘤放疗中心新建 1 座后装治疗机机房，配备 1 台后装治疗机，内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，用于腔内、组织间等肿瘤的放射治疗。后装治疗机即近距离后装治疗机，是使用放射性核素产生的射束治疗肿瘤的设备。它的功能是近距离放射治疗，后装治疗机的结构组成为：施源主机、放射源、控制系统、监视系统、附属安全设备和施源器、治疗床。常见的后装治疗机外观图见图 9-4。



图 9-4 常见后装治疗机外观图

4、定位 CT 项目

南京鼓楼医院拟于先进技术楼负一层肿瘤中心新建 2 座定位 CT 机房，配备 2 台定位 CT（型号未定，管电压≤150kV，管电流≤1500mA），用于模拟定位。常见的定位 CT 外观见图 9-5。



图 9-5 常见的定位 CT 外观

定位 CT 是肿瘤放射治疗过程中用到的重要设备之一，在放射治疗中担负着模拟定位、等中心（位置）验证等重要工作，是整个放射治疗中重要的一环，实际上是一台特殊的 X 射线机。

定位 CT 的机架旋转、机头转动、限束器开闭、距离指示、照射野指示、治疗床各部分运动，都与医用电子直线加速器一样，因此它能准确地模拟医用电子直线加速器的一切机械运动。并通过定位 CT 的 X 线影像系统准确定出肿瘤的照射位置、照射面积、肿瘤深度、等中心位置等几何参数，以及机架旋转、机头旋转角度、源瘤距、源皮距、限束器开度、升床高度等机械参数，为治疗摆位提供了有力的依据，确保放射治疗的正确实施。

本项目拟配备的定位 CT 机主要技术参数见表 9-3。

表 9-3 本项目定位 CT 技术参数情况一览表

项目名称	技术参数
型号	型号未定
位置	先进技术楼负一层肿瘤中心定位 CT 机房
额定管电压	≤150kV
额定管电流	≤1500mA

（二）核医学科项目

南京鼓楼医院拟于先进技术楼负一层回旋加速器制药区新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，使用 1 台自屏蔽式回旋加速器（型号为 GE PETtrace 840，最大束流能量为 16.5MeV，最大束流强度为 60μA，属II类射线装置）生产制备放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O。

拟于先进技术楼一层核医学科-影像中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga 开展 PET/CT（属III类射线装置）和 PET/MRI 显像诊断，放射性同位素 ^{68}Ga 由医院使用锗镓发生器自行淋洗所得，使用 3 枚 ^{68}Ge 放射源（属V类放射源）对 PET/CT 和 PET/MRI 进行校准；使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT（属III类射线装置）显像诊断；使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲状腺吸碘率测定和甲亢治疗项目，使用放射性同位素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 开展骨转移治疗项目。

拟于先进技术楼二层核医学科-核素治疗中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲癌治疗项目。

1、回旋加速器制药项目

回旋加速器是用于生产制备 ^{18}F、^{11}C、^{15}O 和 ^{13}N 等放射性同位素供医院核医学科使用。本次拟配备的回旋加速器型号

，属于II类射线装置。常见的回旋加速器外观图如图 9-6 所示。

回旋加速器一般由磁场系统、射频系统、真空系统、离子源系统、束流提取系统、诊断系统、靶系统和冷却系统等组成，各系统的主要作用如下：

磁场系统：由上下磁轭、线路极片、磁场线圈、磁场电源等组成，其作用就是提供偏转力使束流维持在上下磁极之间中心平面的准环形轨迹上。磁场线圈使束流在上下磁极之间加速。磁场非匀场，而是采用深谷设计，对束流粒子在加速的中心层面提供了强聚焦力，引导粒子返回中心层面，产生高的束流引出效率。

射频系统：包括监测与控制元件、频率合成器、中级放大器、RF 电源振幅器、共轴透射线、耦合网络和 D 型盒结构等，其作用就是对 D 型盒提供一交替的高电压电势，并将能量转至 H^-离子。随着束流加速得到能量，其轨道半径逐渐增加，这种轨迹被称为准螺旋形。当束流到达提取半径时，其能量也将达到预定能量。正常工作时，射频频率自动受 RF 控制元件调整以维持 D 型盒结构的共振。

真空系统：包括真空室、排气泵、仪表和控制元件等。真空仪表和控制元件用于监测并显示真空室的压力以及在系统出现故障时对仪器起到保护作用。真空室需要连续不断地抽气以排除来源于离子源及真空室内表面的气体。

离子源系统：包括离子源、ARC 源、偏向电源与氢气流量控制器等。离子源产生

H^-离子，在正常操作中不需要进行调试或干预性操作。离子源存在电势差，用于电离氢气形成等离子浓聚体。进入离子源的氢气流量由电子质流控制器调控以与变化的离子源和加速器运行条件相匹配。等离子体的电源（或 ARC）由电流调节的开关型电源提供，在正常运行时，控制系统调节离子源的 ARC 电流以维持期望的靶电流。

束流提取系统：包括一个或者两个束流提取器。其作用就是当 H^-通过碳提取膜时，剥离其与氢核结合松散的两个电子，从而使束流由负电性变成正电性。

靶系统：是完成特定核反应而产生正电子核素的装置，一般包括靶体、准直器、靶膜、管路阀门等。靶材料包括液态、气态和固态靶三种类型。气态靶（制备 ^{11}C）是由气瓶间通过管道自动输送到加速器，更换气体罐的操作是在气瓶间完成。对于液态靶（制备 ^{18}F、^{15}O、^{13}N），需要工作人员定期进入加速器机房添加靶水。

冷却系统：从不同系统中将热量带出，带出的热量在二级冷却系统中进行热交换，并将热量传送到初级冷却系统。

表 9-4 医院新增回旋加速器情况一览表

射线装置							
序号	**射线装置名称**	**装置型号**	**最大能量（MeV）**	**额定电流（mA）/剂量率（Gy/h）**	**射线装置类别**	**活动种类**	**备注**
1	回旋加速器				II	使用	拟购

2、PET/CT 诊断项目

PET/CT 是将 PET 与 CT 融为一体，由 PET 提供病灶详尽的功能与代谢等分子信息，而 CT 提供病灶的精确解剖定位。PET 系统的主要部件包括机架、环形探测器、符合电路、检查床及工作站等。探测系统是整个正电子发射显像系统中的主要部分，它采用的块状探测结构有利于消除散射、提高计数率。CT 主要有扫描部分、计算机系统、图像显示和存储系统组成，其中扫描部分由 X 线管、探测器和扫描架组成。PET/CT 结构示意图见图 9-7。

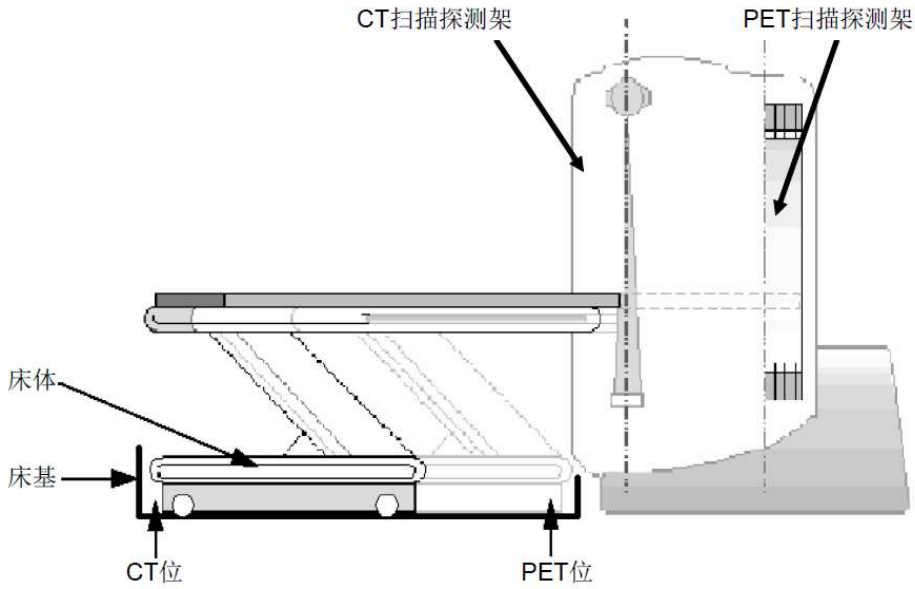


图 9-7 PET/CT 结构示意图

本项目拟新增的 1 台 PET/CT 主要设备技术参数见表 9-5。

表 9-5 核医学科-影像中心 PET/CT 主要设备技术参数

项目名称	技术参数*
型号	型号未定
位置	一层核医学科-影像中心 PET/CT 机房
额定管电压	≤140kV
额定管电流	≤1000mA
X 射线球管固有滤过	不低于 2.5mmAl
X 射线球管到等中心距离	≥60cm
泄露辐射	≤0.8mGy/h
用途	显像

注：*设备技术参数根据建设单位招标意向及主流供货商的常用参数确定，实际采购设备的源强参数不大于表列源强参数。

3、SPECT/CT 诊断项目

SPECT/CT 的基本结构分 3 部分，即旋转探头装置、电子线路、数据处理和图像重建的计算机系统。SPECT/CT 将功能显像的 SPECT 与解剖显像的 CT 图像有机融合，提高信噪比，在获取衰减校正后的核医学影像同时与同机 CT 图像融合，实现 SPECT 的高敏感性优势及 CT 的解剖准确性优势互补，既可显示病变的血液及功能改变，又可显示其解剖学影像，有效提高病灶的检出能力和定位能力，提高疾病诊断的准确率从而大大提高了诊断的效能。常见的 SPECT/CT 外观图见图 9-8。



图 9-8 常见 SPECT/CT 外观图

本项目拟新增的 1 台 SPECT/CT 主要设备技术参数见表 9-6。

表 9-6 核医学科 SPECT/CT 主要设备技术参数

项目名称	技术参数*
型号	型号未定
位置	一层核医学科-影像中心 SPECT/CT 机房
额定管电压	≤140kV
额定管电流	≤1000mA
X 射线球管固有滤过	不低于 2.5mmAl
X 射线球管到等中心距离	≥60cm
泄露辐射	≤0.8mGy/h
用途	显像

注：*设备技术参数根据建设单位招标意向及主流供货商的常用参数确定，实际采购设备的源强参数不大于表列源强参数。

（三）介入诊断与治疗项目

南京鼓楼医院拟于二期门诊医技楼三层手术中心新建 2 座杂交手术室，并各配备 1 台 DSA，拟于病房楼 C 四层 DSA 介入中心新建 6 座 DSA 机房，并各配备 1 台 DSA，均属II类射线装置，共计新增 8 台 DSA 均用于开展介入诊断与治疗项目。

DSA 因其整体结构像大写的“C”，因此也称作 C 型臂 X 光机，DSA 由 X 线发生装置（包括 X 射线球管及其附件、高压发生器、X 射线控制器等）和图像检测系统（包括光栅、影像增强管、光学系统、线束支架、检查床、输出系统等）组成。常见的 DSA 外观图见图 9-9。



图 9-9 常见 DSA 外观图

本项目拟新增的 DSA 主要设备技术参数见表 9-7，配套设备配置情况见表 9-8。

表 9-7 本项目 DSA 主要设备技术参数

指　标	技术参数*
型　号	型号未定
额定管电压	≤125kV（单管头）
额定管电流	≤1000mA
滤过	固有过滤 0.5mmCu+其他附加过滤
照射野	最小照射野：8cm×8cm；平板探测器范围：30cm×38cm

注：*设备技术参数根据建设单位招标意向及主流供货商的常用参数确定，实际采购设备的源强参数不大于表列源强参数且“总滤过条件”相应的滤过效果不低于表中的“滤过条件”。

表 9-8 本项目每台 DSA 配套设备一览表

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

二、工作原理及工作流程

（一）医用电子直线加速器项目

1、工作原理

放疗是癌症三大治疗手段之一。是用各种不同能量的射线照射肿瘤，以抑制和杀灭癌细胞的一种治疗方法。放疗可单独使用，也可与手术、化疗等配合，作为综合治疗的一部分，以提高癌症的治愈率。放疗的基本目的是努力提高放疗的治疗增益比，即最大限度地将放射线的剂量集中到病变（靶区）内，而使周围的正常组织和器官少受或免受不必要的照射。

医用电子直线加速器是实现放疗的最常见设备之一，医用电子直线加速器是利用具

有一定能量的高能电子与大功率微波的微波电场相互作用，从而获得更高的能量。这时电子的速度增加不大，主要是质量不断变大。电子直接引出，可作电子线治疗，电子打击重金属靶，产生韧致辐射发射 X 射线，作 X 线治疗。

当医用电子直线加速器加上高压后，即产生多种类型的辐射，可大致分为瞬时辐射和剩余辐射。瞬时辐射是指被加速的电子束、以及其与靶材料相互作用产生的高能 X 射线，此外，依据《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/T 201.2-2011），当电子束打靶能量＞10MeV 时，其韧致辐射产生的高能 X 射线能量还将与直线加速器的高 Z 重金属靶材产生（γ、n）反应，产生中子。医用电子直线加速器产生的高能电子束、高能 X 射线和中子，可能会对工作人员和公众产生辐射危害。

剩余辐射是指由于中子活化使加速器及周围环境产生短寿命的感生放射性核素，包括固态感生放射性和气态感生放射性。医用电子直线加速器中产生的感生放射性从物理机制上可分为直接和间接两个过程。直接过程为韧致辐射光子与加速器部件发生的光核反应；间接过程则主要为光核反应所释放的光中子与加速器部件发生的中子俘获反应，即中子活化。由中子活化产生的放射性核素大多为丰中子核素，其衰变方式多为 β^-衰变。一般停机数小时后，感生放射性即可达到可忽略的水平。医用电子直线加速器系统示意图见图 9-10。

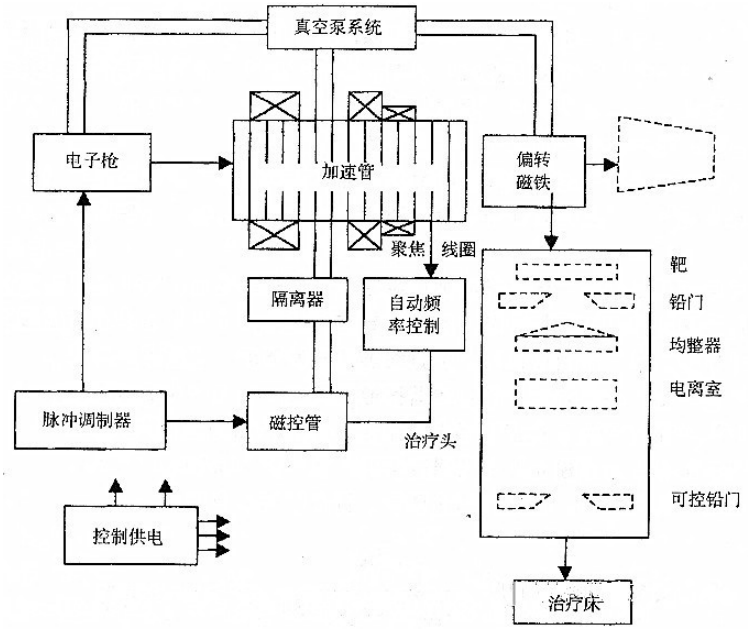


图 9-10 医用电子直线加速器系统示意图

2、工作流程

1）进行定位：先通过定位 CT（属III类射线装置）对病变部位进行详细检查，然

后确定照射的方向、角度和视野大小，拍片定位。

2）制订治疗计划：根据患者所患疾病的性质、部位和大小确定照射剂量和照射时间。

3）固定患者体位：在利用医用电子直线加速器进行治疗时需对患者进行定位，标记，调整照射角度及射野。

4）技师离开治疗室，进入控制室，根据 TPS 计划进行出束治疗；

5）治疗结束后，关机，打开治疗室防护门，患者离开治疗室。

医用电子直线加速器放疗流程及产污环节如图 9-11 所示。

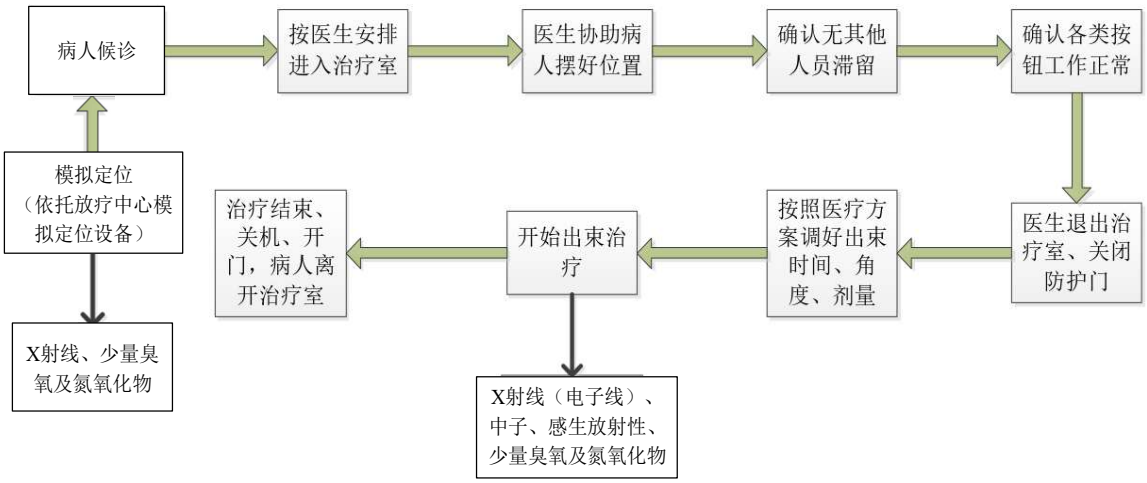


图 9-11 医用电子直线加速器放疗流程及产污环节示意图

（二）射波刀项目

1、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治疗装置，集影像引导系统和高准确性的治疗于一身，将一个 6MVX 射线的轻型电子直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。射波刀是全球唯一整合最先进的机器人技术和智能影像实时监控、追踪系统的放射治疗系统，尤其擅长对颅内肿瘤进行立体定向放射治疗、对运动器官进行追踪治疗。

2、工作流程及产污环节

①患者预约：当病人被确诊需要进行射波刀放射治疗后，主治医生对患者进行预约登记并向其告知可能受到辐射危害；

②进行定位：预约病人首先通过定位 CT 进行肿瘤定位，确定肿瘤的精确定位；

③制订治疗计划：根据患者所患疾病的性质、部位和大小确定照射剂量和照射时

间。

④靶区定位：患者平卧并固定在治疗床上，医务人员退出机房，关闭好防护门。影像引导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。

⑤启动治疗：确认完毕，且机房内联锁条件建立后，工作人员在控制室内开机照射治疗，治疗时工作人员隔室操作。

⑥照射完毕后，工作人员协助病人离开机房。

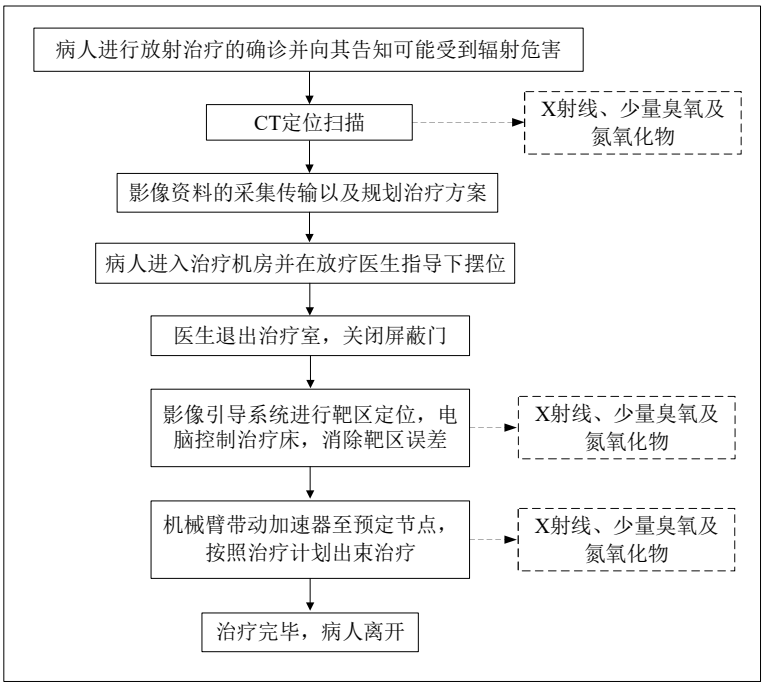


图 9-12 本项目射波刀治疗流程及产污环节示意图

（三）后装治疗机项目

1、工作原理

后装治疗是放射治疗的一种方法，所谓后装就是预先在患者需要治疗的部位正确地放置施源器，然后采用自动或手动控制，将贮源器内放射源输入施源器内实施治疗的技术。后装治疗属近距离放疗，治疗时依照临床要求，使γ放射源在人体自然腔、管道或组织间驻留而达到预定的剂量及其分布的治疗手段，后装治疗具有治疗距离短、局部剂量高、周边剂量迅速跌落的特点，主要治疗不同部位的肿瘤以及手术难以切净，而周围又有重要脏器限制外照射剂量的患者，如胰腺、胆管、膀胱癌、直肠癌及头颈部恶性肿瘤等。

2、工作流程及产污环节

后装治疗机治疗流程为：

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

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

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

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

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

⑥照射完毕后，放射源返回后装治疗机贮源装置，技术人员协助病人离开机房，为下次照射做准备。

本项目后装治疗机贮源装置安装在机房内，驱动装置安装在控制室内，在对病人进行治疗时由辐射工作人员在控制室隔室遥控操作进行。

本项目后装治疗机治疗流程及产污环节见图 9-13。

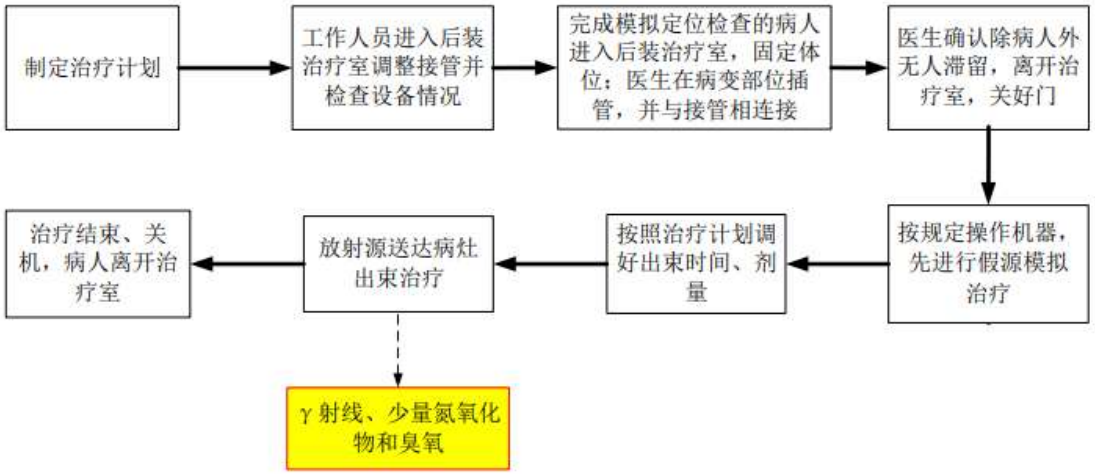


图 9-13 后装治疗机工作流程及产污环节示意图

（四）定位 CT 项目

1、工作原理

定位 CT 是肿瘤放射治疗过程中用到的重要设备之一，在放射治疗中担负着模拟定位、等中心（位置）验证等重要工作，是整个放射治疗中重要的一环，实际上是一台特殊的 X 射线机。

定位 CT 等 X 射线诊断装置主要由 X 射线管和高压电源组成。X 射线管由安装在

真空玻璃壳中的阴极和阳极组成，阴极是钨制灯丝，它装在聚焦杯中，当灯丝通电加热时，电子就“蒸发”出来，而聚焦杯使这些电子聚集成束，直接向嵌在金属阳极中的 靶体射击。靶体一般采用高原子序数的难熔金属制成。高电压加在 X 射线管的两极之间，使电子在射到靶体之前被加速达到很高的速度，这些高速电子到达靶面为靶所突然阻挡从而产生 X 射线。X 射线管基本结构如图 9-14 所示。

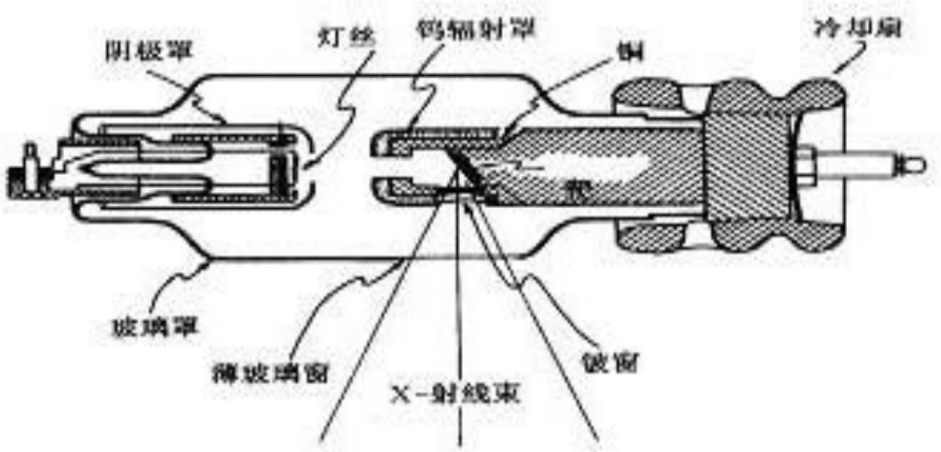


图 9-14　X 射线管基本结构示意图

定位 CT 的机架旋转、机头转动、限束器开闭、距离指示、照射野指示、治疗床各部分运动，都与放射治疗机一样，因此它能准确地模拟放射治疗机的一切机械运动。并通过定位 CT 的 X 线影像系统准确定出肿瘤的照射位置、照射面积、肿瘤深度、等中心位置等几何参数，以及机架旋转、机头旋转角度、源瘤距、源皮距、限束器开度、升床高度等机械参数，为治疗摆位提供了有力的依据，确保放射治疗的正确实施。

2、工作流程

患者经医生诊断后，预约登记诊断时间。受检者按约定时间在候诊区准备和等候。受检者进入机房在医务人员的指导下正确摆位。摆位完成后，除患者外，无关人员退出机房。工作人员检查无误后，即开启定位 CT 进行拍片/模拟定位。检查结束后，受检者离开机房。定位 CT 诊断流程及产污环节见图 9-15。

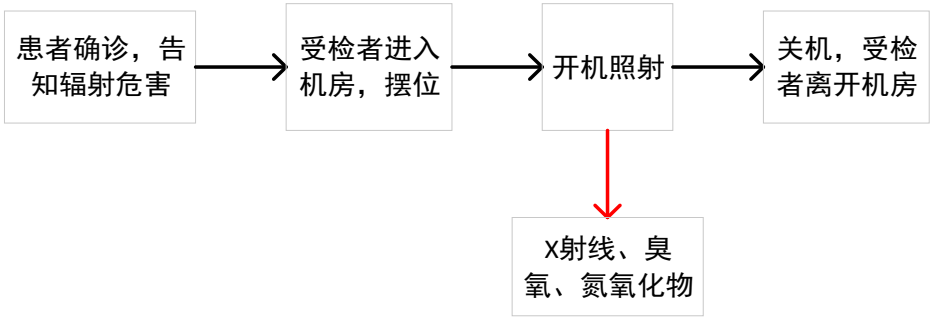


图 9-15 定位 CT 工作流程及产污环节示意图

（五）核医学科项目

1、回旋加速器生产制备放射性同位素项目

（1）工作原理-回旋加速器部分

回旋加速器通过电流和磁场使带电粒子得到加速轰击靶核后引起的核反应生产放射性核素。在回旋加速器中心部位的离子源（Ion Source）经高压电弧放电而使气体电离发射出粒子束流，该粒子束流在称为 Dees 的半圆形电极盒（简称“D 型盒”）中运动。D 型盒与高频振荡电源相联为加速粒子提供交变的电场。在磁场和电场的作用下被加速的粒子在近似于螺旋的轨道中运动飞行。带电粒子经多次加速后，圆周轨道直径达到最大而接近 Dees 的边缘并具有最大的能量，在该点粒子经过束流提取系统的剥离碳膜。被加速的负粒子在通过碳膜期间被脱去二个电子，变成带正电的阳离子，此时，在磁场中粒子的运行轨道是逆时针方向偏转，直接将具有最大能量的带电粒子从真空室引出，通过调整提取膜的位置使引出的束流引导进入所确定的同位素生产靶系统，以一定的初始速度轰击靶体内填充的物质引发核反应。根据靶物质的不同，该系统在离子加速打靶后可完成临床上所需要的 ^{18}F、^{11}C 等放射性同位素。其中 ^{18}F 是目前临床使用标记示踪剂最多的正电子放射性核素。其基本原理如下图 9-16。

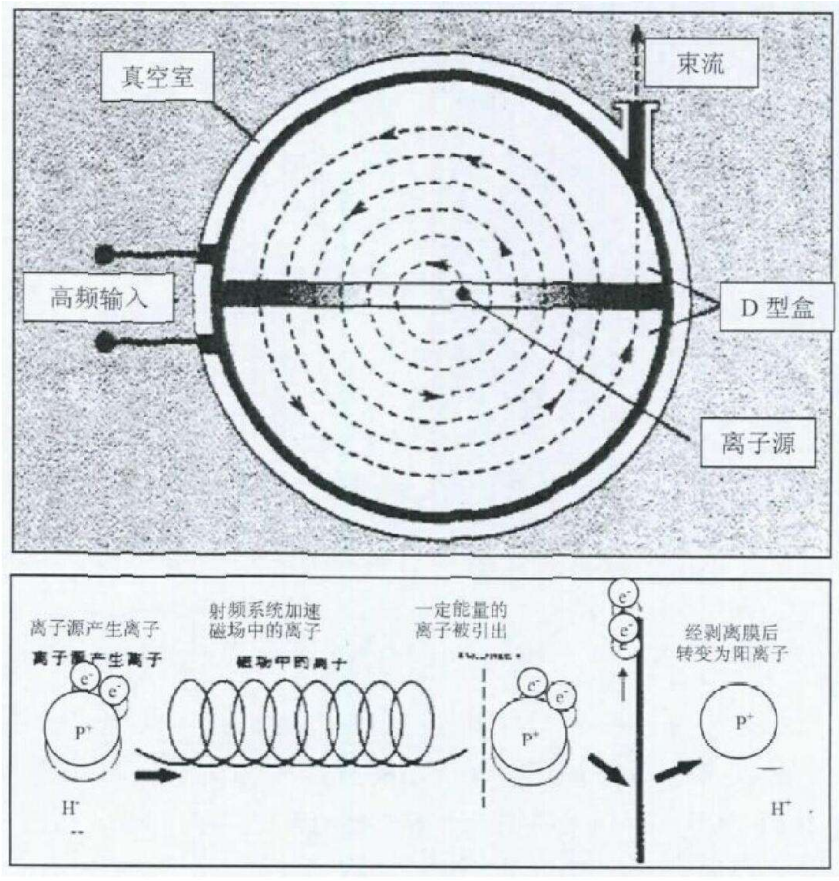


图 9-16 医用回旋加速器工作原理简图

（2）工作原理-化学合成系统部分

该系统包括合成分装模块以及相应的仪器设备，用于合成和分装核素的药物。回旋加速器打靶产生的放射性核素由屏蔽输送管道直接输送到合成热室内的合成分装模块中，由自动合成装置进行药物合成。化学合成系统是在计算机控制下自动化地完成药物的合成。

本项目拟使用的回旋加速器，是一套完整的全自动的，带有自屏蔽的正电子药物生产系统，　　。

回旋加速器可完成临床上所需要的 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O 等放射性同位素。其中 ^{18}F 是目前临床使用标记示踪剂最多的正电子放射性核素。以生产 ^{18}F-FDG 为例进行工作流程介绍。

①药物制备

医院提前一天根据患者预定的药物数量，向回旋加速器室预定安排第二天的放射性药物生产量。回旋加速器运行期间，工作人员不进入加速器室内，仅在加速器控制室内操作。回旋加速器在每次正式制备放射性同位素前均进行预处理。用 ^{16}O-H_2O 先清洗靶并用纯氦吹干药物传递管道，然后注入靶物质，以一定的束流轰击一定时间（视所需制备量而定）后，将制备的核素通过专用防护管道系统，在氦气推动下输送至合成热室的药物合成器内。其中 ^{18}F 制备核反应如下，生产采用液体靶。

$$P + {}^{18}O \rightarrow n + {}^{18}F$$

生产前对回旋加速器进行调试，根据需要生产的放射性核素种类设置相应参数。回旋加速器运行期间，工作人员不进入回旋加速器室内，仅在控制室操作。核素生产时间为平均为 2.5h/次。

产污环节：回旋加速器在生产核素的同时伴随产生大量中子，成为瞬时辐射源，由于高能带电粒子直接轰击加速器有关部件导致有关原件被活化从而产生中子活化产物，中子在慢化吸收过程中产生高能射线和放射性废物，另外回旋加速器长期运行会产生废靶。加速器室内的空气受中子照射后生成放射性活化气体，主要有 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{41}Ar 等感生放射性物质，以及回旋加速器在开机时会产生少量的非放射性有害气体，主要是臭氧和氮氧化物。

②药物合成、分装

回旋加速器机房的核素离子生产完成后，通过氦气吹扫，通过专门的防护管道系

统传输到合成热室内的相应模块箱中。

核素在洁净合成模块中合成过程中，无需人员干预，核素药品在洁净合成模块的合成均采用计算机程序自动控制。

核素药品在洁净合成模块合成完成后，进入同一模块箱的药物分装模块。药物分装过程也采用计算机全自动控制，无需人工干预，药物在自动分装模块中将根据预先设计的程序，经高效除菌过滤膜过滤被收集在安瓿瓶中。自动掉入专用的铅防护罐中，罐子的盖子为卡扣盖子，不易松动。合成过程均采用计算机程序全自动控制，无需人工干预。

产污环节：药物合成、分装过程中核素衰变发出β^+射线以及因发生正电子湮灭而产生的γ射线；合成分装模块内药物的挥发产生含放射性核素的废气。

③药物质控

药物生产完成后，工作人员进入合成热室将合成分装模块内装有少量质检用药物的铅罐取出，经传递窗送至外包间，再由外包间工作人员通过传递窗送至质控室进行质量检验，质控室设通风橱，工作人员在通风橱内将待检药物注射器吸取微量抽检样品，检验药物的pH值和性状，经检验满足《药品管理法》和《放射性药品管理办法》等相关法律法规要求后，方开展后续工作。

产污环节：药物质控过程中核素衰变发出β^+射线以及因发生正电子湮灭而产生的γ射线；操作过程中，可能会引起工作台、设备、墙壁、地面、工作服、手套等产生放射性沾污，造成放射性表面污染；发生药品泄露后医务人员去污、应急洗消、场所清洗时可能产生少量放射性废水；手套箱药物的挥发产生含放射性核素的废气；作业产生废棉签、口罩、手套等放射性固废。

④运输

PET药物制备完成后，工作人员进入合成热室将合成分装模块内装有药物的铅罐取出，诊断药物经药物专用电梯送至一层影像中心工作场所的手套箱内暂存。本项目回旋加速器生产出的放射性药物仅供医院自己使用，不对外销售。

⑤工艺流程汇总

以上整个过程（打靶、合成、分装）为计算机全自动控制，工作人员不参与操作，只是监控整个过程的执行情况；质控环节由工作人员在手套箱内操作。

因此，回旋加速器项目污染因子主要是：γ射线、中子、活化气体、β表面污染、

放射性废水、放射性废气以及放射性固废、O_3和NO_X。

（3）工作流程及产污环节

结合工作原理，回旋加速器生产制备放射性药物的流程及产污环节如下图所示：

图 9-17 放射性药品的生产、合成、分装、质检流程图

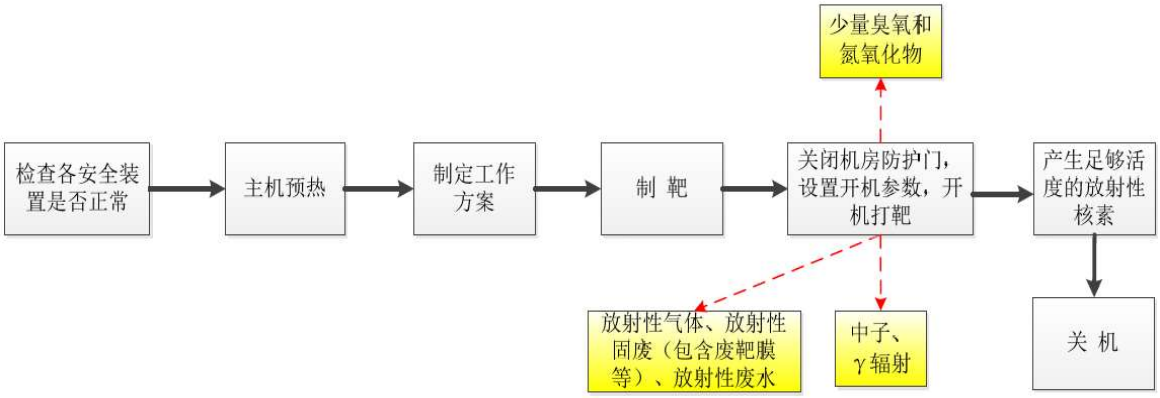


图 9-18 回旋加速器生产放射性同位素产污环节示意图

2、使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga 开展 PET/CT 和 PET/MRI 显像检查项目

（1）PET/CT 的工作原理

核医学的体内诊断是将放射性核素及其标记物注射到人体内后，由于机体功能和代谢变化，因而可以通过放射性核素及其标记物在体内分布和代谢来反映人体内的病理或生理变化。放射性核素进入人体后，特定的放射性核素按照自身的规律发生衰变，在此过程中发射一定能量的γ 射线，采用特殊的探测装置可以在人体外探测到体内放射性核素的分布，就能准确的观察到体内的病理或生理变化过程，为医学研究与临床诊断提供可靠信息。

PET 的成像技术是利用带正电子的放射性核素注入人体内产生的湮没辐射 γ 光子构成影像。正电子只能瞬态存在，很快与组织中的负电子结合湮没辐射产生两个能量相等、方向相反的γ 光子。正电子放射性核素可构成人体各部位的任何影像，包括平面影像、动态影像、断层影像及全身影像。湮没辐射产生的γ 光子互成 180°，提供了很好的空间定位。正电子成像一般不需要机械准直器而采用电子准直，大大提高了探测灵敏度，改善了空间分辨率。正电子断层显像主要用于心血管疾病、脑及神经疾病和肿瘤的诊断，对肿瘤的良、恶性鉴别诊断、分期、化疗和放疗后疗效观察及判断肿瘤病灶转移与复发均有重要价值。近年来，为获得清晰的成像，又发展了与 X 射线 CT 融合的 PET/CT。常见的 PET/CT 外观图见图 9-19。



图 9-19 常见的 PET/CT 外观图

（2）PET/MRI 的工作原理

PET/MRI（Positron Emission Tomography and Magnetic Resonance Imaging），全称正电子发射断层与磁共振成像技术，是在 PET（Positron Emission Tomography）和 MRI（Magnetic Resonance Imaging）的基础上发展起来的新设备，该设备将两大医学影像高端检查手段一体化设计，同时具有 PET 功能代谢显像和 MRI 高分辨率的检查功能，使其不但具有完整的、先进的 MRI 功能，而且能够实现 PET 的所有功能。可实现优势互补。同时获取全身 PET 和 MRI 数据，缩短检查时间，是医学成像领域的巨大飞跃，为诊断和了解疾病开启了新大门。

PET/MRI 扫描过程中 PET 对进入体内的正电子核素进行扫描并显像，可获得代谢显像，而 MRI 可对 PET 图像做放射性的衰减校正，提供解剖学和组织学特征，两者结合可以看到组织功能和新陈代谢，提供比传统成像方式更优质的影像结果。系统还可以分别收集 PET 和 MRI 影像。PET/MRI 属于核磁类装置。常见的 PET/MRI 外观图见图 9-20。



图 9-20 常见 PET/MRI 外观图

本项目拟使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga ，配合新增的 PET/CT 和 PET/MRI 进行诊断治疗。

当某种放射性核素或其标记物（^{18}F 等）通过注射等方式进入体内后，依其化学及生物学特性不同，随血流等进入某些特定的组织器官，参与或模仿某些生命物质在人体内的病理生理、引流代谢的过程。由于正常组织和病变组织在这个过程中的差异，使其聚集这种放射性核素或其标记物的能力发生了变化。利用 PET 来探测这种放射性核素发射的 γ 射线在体内的分布状态并还原成图像，其影像不仅可以显示脏器和病变的位置、形态、大小等解剖结构，更重要的是可以显示脏器的功能、代谢情况，提供有关脏器的血流、功能、代谢和引流等方面定性的和定量的信息。而血流、功能和代谢的异常，常是疾病的早期变化，出现在形态结构发生改变之前。因此，PET 放射性核素显像有助于疾病的早期诊断。

（3）锗镓发生器淋洗工作原理

本项目 ^{68}Ga-^{68}Ge 发生器一般从国内公司定期采购，其自带铅屏蔽套，供货商发货至医院。由工作人员接收后，暂时存放于储源室内。本项目拟购的 ^{68}Ga-^{68}Ge 发生器最大规格为 50mCi/柱，单柱发生器一般使用约 1 年后退役；退役的发生器暂存于放射性废物库内，由供货商统一定期回收。^{68}Ge-^{68}Ga 发生器的结构示意及外观见图 9-21。



图 9-21 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器外观图

本项目显像诊断使用的 ^{68}Ga 由锗镓发生器淋洗而成，该发生器属于裂变色层发生

器，基本部件是钼酸锆柱/活化氧化铝柱、淋洗系统和用于保护工作人员的辐射屏蔽套。^{68}Ga 由活化氧化铝柱内 ^{68}Ge 不断裂变产生，并被活化氧化铝柱吸附，当加入适当的淋洗剂时，^{68}Ga 便以 $^{68}GaO^{4-}$的形式被淋洗出来，整个过程称为“挤奶”。为了使用方便，一套发生器除基本部件外，常附加子体核素溶液接收瓶（即负压瓶）和一定量的淋洗剂（生理盐水）。由于母体核素的不断衰变就不断地产生子体核素，因而核素发生器可以反复淋洗制得子体核素。

（4）^{68}Ga 制备工作流程

本项目放射性同位素 ^{68}Ga 由工作人员通过发生器自行进行制备，其制备、注射和显像流程如下：

A：将生理盐水瓶插入发生器的双针，一分钟后整体拔下外有防护罐的负压瓶，即制得淋洗液，制得的淋洗液贮存于外有防护罐的负压瓶之中。通常整个淋洗过程约需两分钟。

B：测量活度：测量活度在手套箱内进行，由负责注射的工作人员完成，手套箱内配置有用于活度测量的活度计，工作人员用注射器吸取少量淋洗液，测量其放射性活度，得出该瓶淋洗液的比活度，同时可测量淋洗液的纯度。

C：标记：标记 ^{68}Ga 在手套箱内进行，工作人员同测量活度的人员为同一人，用于标记的冻干药盒在标记操作前经完整性检查后传递至手套箱内。用注射器将已测量好活度的淋洗液迅速转移至冻干药盒，并充分摇匀，稀释到预设体积。

D：给药试验、测定：注射护士手持带铅套的注射器，在注射铅玻璃屏的屏蔽下为病人注射，病人注射完药物后进入注射后候诊室内观察等待，等待结束后注射病人进入 PET/CT 或 PET/MRI 机房进行显像诊断，诊断结束后病人进入留观室休息一定时间后可直接离开。

（5）PET 诊断工作流程、产污环节及污染因子

PET 诊断具体工作流程如下：

1）接收患者，开具 PET 诊断单并告知患者诊断过程存在辐射危害；

2）医生根据病情确定使用核素的类别和剂量；

3）病人通过注射将放射性药物摄入。在药品摄入过程中存在 γ 射线污染，同时会产生放射性废水、固废(注射器、棉球、药品盒)；

4）病人注射药品后通过仪器进行器官显像和病情检查。此过程病人带有 γ 射线。

PET 系统诊断工艺流程及产污位置图如图 9-22 所示。

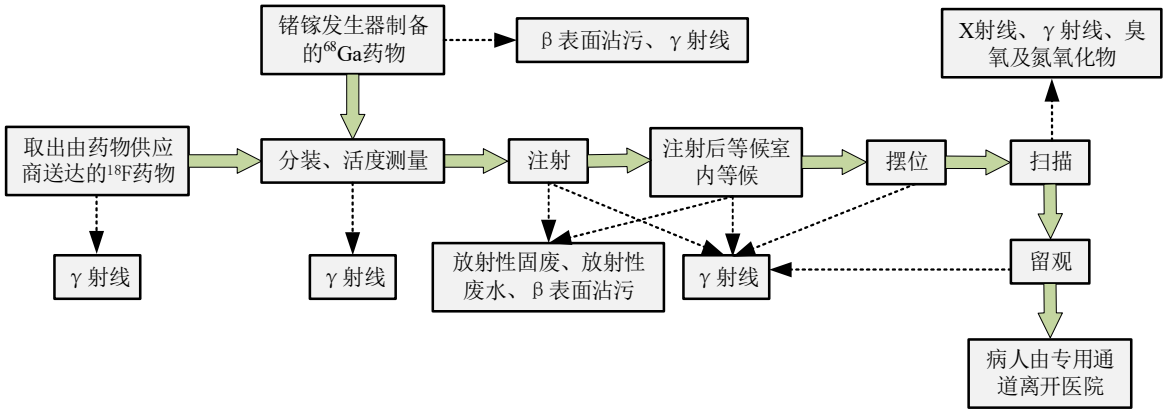


图 9-22 本项目核医学诊断流程及产污环节示意图

因此，用 ^{18}F 等核素标记 PET 显像主要环境影响为分装、注射对工作人员产生的外照射；分装、注射过程对工作台面、地面等造成的表面污染；操作过程产生的放射性固体废物，如使用放射性药物的注射器、注射针头、可能沾染放射性药物的试管、棉签、手套、口罩、污染擦拭或清洗物等放射性固体废物；操作过程产生的放射性废水，如洗涤废水、注射放射性药物患者的排泄物，PET/CT 扫描时产生的 X 射线。

3、使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT 显像诊断项目

（1）工作原理

SPECT/CT 即单光子发射计算机断层扫描。它将发射单光子的核素药物如 ^{99m}Tc 引入生物体，其经代谢后在脏器内外或病变部位和正常组织之间形成放射性浓度差异，这些差异通过计算机处理成 ECT 图像，为肿瘤的诊治提供多方位信息。γ 照相机探头的每个灵敏点探测沿一条投影线（Ray）进来的 γ 光子，其测量值代表人体在该投影线上的放射性之和。在同一条直线上的灵敏点可探测人体一个断层上的放射性药物，它们的输出称作该断层的一维投影（Projection）。各条投影线都垂直于探测器并互相平行，称之为平行束，探测器的法线与 X 轴的交角 θ 称为观测角（View）。γ 照相机是二维探测器，安装了平行孔准直器后，可以同时获取多个断层的平行束投影，这就是平片。平片表现不出投影线上各点的前后关系。要想知道生物体在纵深方向上的结构，就需要从不同角度进行观测。可以证明，知道了某个断层在所有观测角的一维投影，就能计算出该断层的图像。从投影求解断层图像的过程称作重建（Reconstruction）。这种断层成像术离不开计算机，所以称作计算机断层成像术（Computered Tomography，CT）。CT 设备的主要功能是获取投影数据和重建断层图像。

SPECT/CT 是将 SPECT 和 CT 这两种设备安装在同一个机架上，两种显像技术的

定位坐标系统相互校准，在两次扫描期间患者处于同一个检查床上且保持体位不变，可防止因患者移位产生的误差，在一定程度上也解决了时间配准的问题。通过SPECT/CT图像融合技术，可以将SPECT灵敏反映体内组织器官生理、生化和功能的变化与CT提供的精确的解剖结构信息相结合，真正实现了功能、代谢、生化影像与解剖结构影像的实时融合，为临床提供了更加全面、客观、准确的诊断依据。不仅如此，CT提供的图像数据还可用于SPECT的衰减校正，有效提高SPECT的图像质量。

本项目SPECT/CT主要使用含放射性同位素^{99m}Tc的药物进行显像。^{99m}Tc为纯γ光子发射体，几乎可用于人体各重要脏器的形态和功能显像，是显像检查中最常用的放射性核素。目前全世界应用的显像药物中，^{99m}Tc及其标记的化合物占80%以上，广泛用于心、脑、肾、骨、肺等多种脏器疾患的显像检查。

（2）工作流程

医院核医学科SPECT诊断项目^{99m}Tc放射性药物购自专业供货商，其操作流程如下：医院根据患者预约情况，确定当天所使用的药物剂量，向专业供应商订购，供应商根据医院预约的时间和用量定时将药物送达核医学科分装室，医院指定专人负责药物的接收和登记，并暂存到分装标记室专用手套箱内，当天用完。^{99m}Tc到货时为装入铅罐内的整罐药液，需要由医护人员按患者所需活度进行分装。

少量患者需提前在运动负荷室运动，待患者心律达到一定速率后再至注射室窗口前注射药物。医护人员在手套箱内根据患者用药情况将药物分装至带铅套的注射器内，测定活度，经校对无误后，在注射铅玻璃屏的屏蔽下为患者注射。注射完毕后，废弃注射器放入专用废物铅桶内。每次分装过程中近距离接触^{99m}Tc药物的时间保守按2min、注射过程按1min估算，医院拟为核医学科SPECT诊断项目配备2名护士，负责核素分装及注射。

患者根据注入的^{99m}Tc药物特性，在给药后候诊室内静坐约20~30min，待药物代谢至靶器官，进入SPECT/CT机房，经医护人员摆位（每次约1min）后，接受SPECT/CT的扫描，每次扫描约10~20分钟。扫描完成后，患者在留观室留观一段时间后，若无其他情况，从患者专用通道离开。核医学科SPECT诊断项目工作流程及产污环节分析见图9-23。

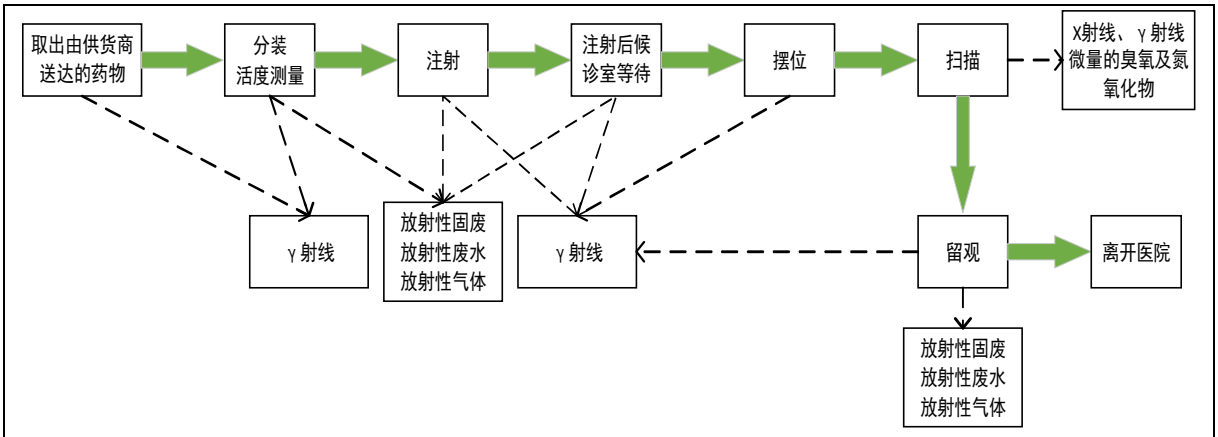


图 9-23 核医学科 SPECT 诊断项目工作流程及产污环节分析示意图

4、^{89}Sr 和 ^{153}Sm 治疗骨转移项目

（1）工作原理

常见的恶性肿瘤中乳腺癌、肺癌和前列腺癌等常发生骨转移。它们发生骨转移时，肿瘤细胞释放破骨细胞激活因子，后者刺激破骨细胞对骨质的吸收，导致骨溶解破坏的发生。同时，肿瘤细胞能分泌一些致病介质，如前列腺素、乳酸等，导致顽固性疼痛。

目前，骨转移癌引起的疼痛一般利用放射性药物治疗，如 $^{89}SrCl_2$ 注射液。^{89}Sr 和 ^{153}Sm 是一种亲骨性放射性核素，进入体内后同钙一样参加骨矿物质的代谢过程，静脉给药后，恶性肿瘤骨转移病灶内的摄取率大于正常骨组织的 2~25 倍，并滞留在癌灶中，发射出 β 射线，利用其辐射效应杀伤癌细胞，缩小病灶，起到良好的镇痛作用。

（2）工艺流程及产污环节

医院根据与病人预约情况提前向药物供货商订 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 注射液，由药物供货商负责将药物运输至储源室内，患者先在护士站登记并提前如厕，然后医生通知患者进入注射室，按配送的药物直接给每个病人注射，不用稀释分装。^{89}Sr 和 ^{153}Sm 注射液按需订购暂存手套箱中。

该院预计使用 ^{89}Sr 病例每天最多 2 例，预计每名患者所使用 ^{89}Sr 的活度不超过 $1.48\times10^{8}Bq$（4mCi），患者用药后进行一定时间的观察，如无异常情况，患者随即就可以离开医院。该院预计使用 ^{153}Sm 病例每天最多 2 例，预计每名患者所使用 ^{153}Sm 的活度不超过 $1.48\times10^{9}Bq$（40mCi），患者用药后进行一定时间的观察，如无异常情况，患者随即就可以离开医院。^{89}Sr 和 ^{153}Sm 治疗流程及产污环节见图 9-24。

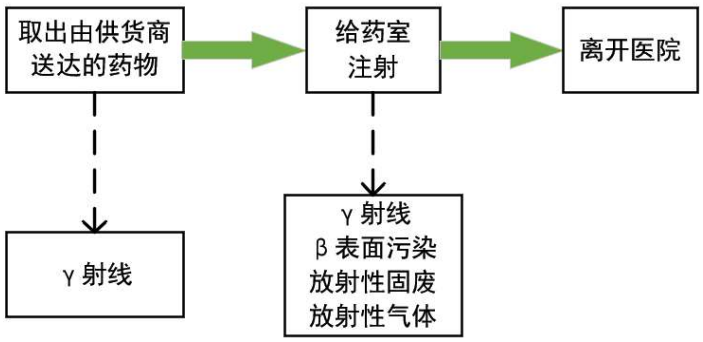


图 9-24 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 治疗骨转移项目工作流程及产污环节分析示意图

5、^{131}I 甲状腺吸碘功能测定（甲功测定）项目

（1）工作原理

甲状腺吸 ^{131}I 功能试验是了解甲状腺碘代谢的常用方法。甲状腺具有摄取和浓聚碘的能力，碘参与甲状腺激素合成、分泌的全过程。在空腹条件下，口服放射性 ^{131}I 后，经胃肠吸收并随血流进入甲状腺，并迅速被甲状腺滤泡上皮细胞摄取，其摄取的量与速度与甲状腺的功能密切相关。因此，利用甲状腺功能测定仪获得不同时间的甲状腺摄碘率，以此来评价甲状腺的功能状态。

（2）工作流程、产污环节及污染因子

医院根据与病人预约情况提前向药物供货商订购放射性同位素 ^{131}I，由药物供货商负责药物运输至储源室，医生通知患者进入服药室，按配送的药物直接给每个病人口服。

该院预计甲状腺吸碘功能测定病例每天最多 20 例，预计每名患者所使用 ^{131}I 的活度不超过 $3.7\times10^{5}Bq$（10μCi），患者用药后进行一定时间的观察，如无异常情况，患者当天就可以离开医院。甲状腺吸碘功能测定流程及产污环节见图 9-25。

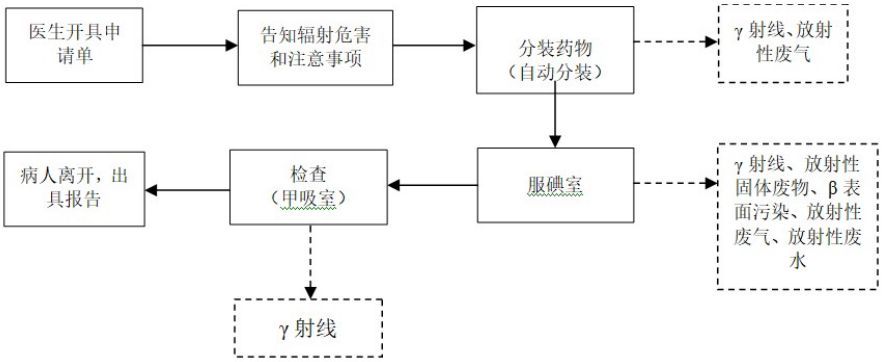


图 9-25 ^{131}I 甲状腺吸碘功能测定项目工作流程及产污环节分析示意图

6、^{131}I 甲亢治疗项目

（1）工作原理

甲状腺具有高度选择性摄取 ^{131}I 的能力，功能亢进的甲状腺组织摄取量将更多，

可高达血浆的几百倍，且在甲状腺内停留的时间较长，有效半衰期可达 3.5～5.5 天。在患者服用 ^{131}I 后，90%以上的 ^{131}I 都会聚集到患者的甲状腺，其余的 ^{131}I 随代谢排出体外。^{131}I 衰变为 ^{131}Xe 时放射出 95%的 β 射线，该射线能量低，在甲状腺内的平均射程仅有 0.5mm，一般不会造成甲状腺周围组织例如甲状旁腺、喉返神经等的辐射损伤。因此，^{131}I 治疗可使部分甲状腺组织受到 β 射线的集中照射，使部分甲状腺细胞发炎症、萎缩、直至功能丧失，从而减少甲状腺激素的分泌，使亢进的功能恢复正常，达到治疗的目的。

（2）工作流程、产污环节及污染因子

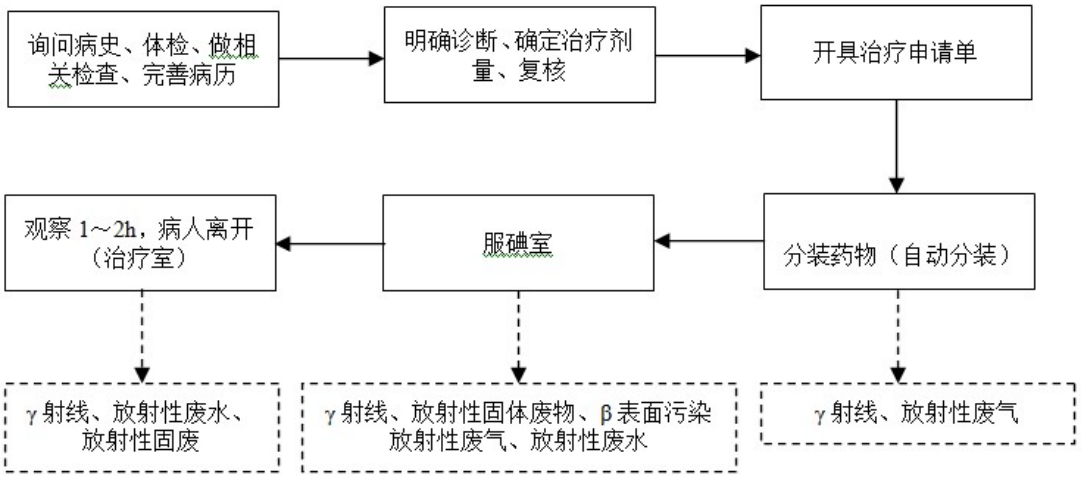


图 9-26 ^{131}I 甲亢治疗项目工作流程及产污环节分析示意图

7、^{131}I 甲癌治疗项目

（1）工作原理

放射性核素 ^{131}I 可以高度选择性聚集在分化型甲状腺癌及转移灶，^{131}I 衰变时发射出的射程很短的 β 射线和能量跃迁时发出的 γ 射线，从而对病变组织进行内照射治疗，在局部产生足够的电离辐射生物学效应，达到抑制或破坏病变组织的目的，而邻近的正常组织的吸收剂量很低，从而达到治疗目的。

（2）工作流程、产污环节及污染因子

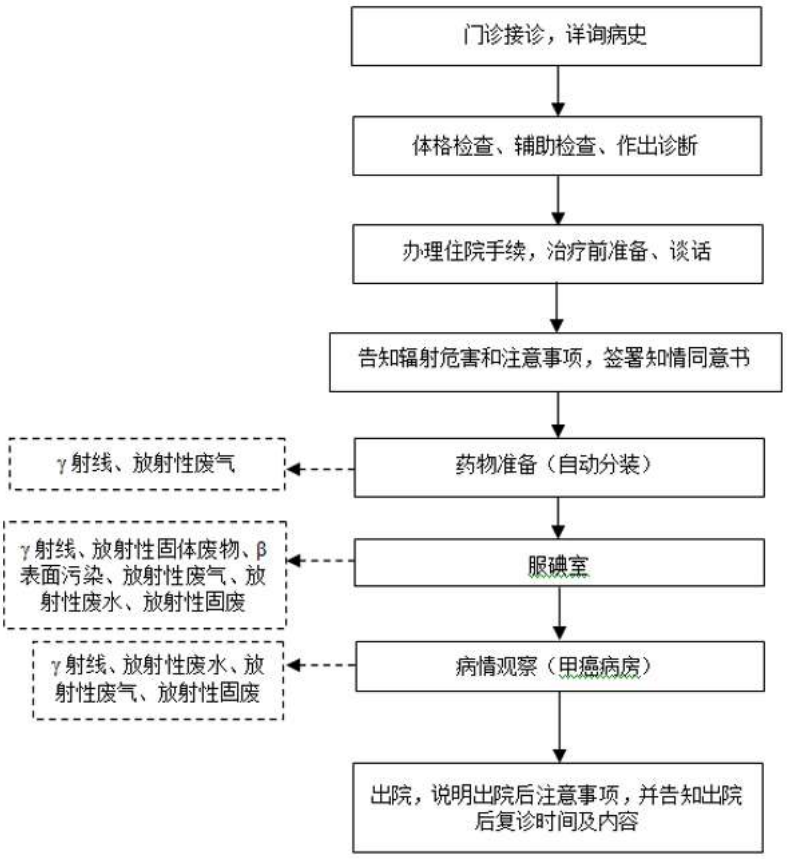


图 9-27 ^{131}I 甲癌治疗项目工作流程及产污环节分析示意图

（六）介入诊断与治疗项目

1、工作原理

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 9-28。

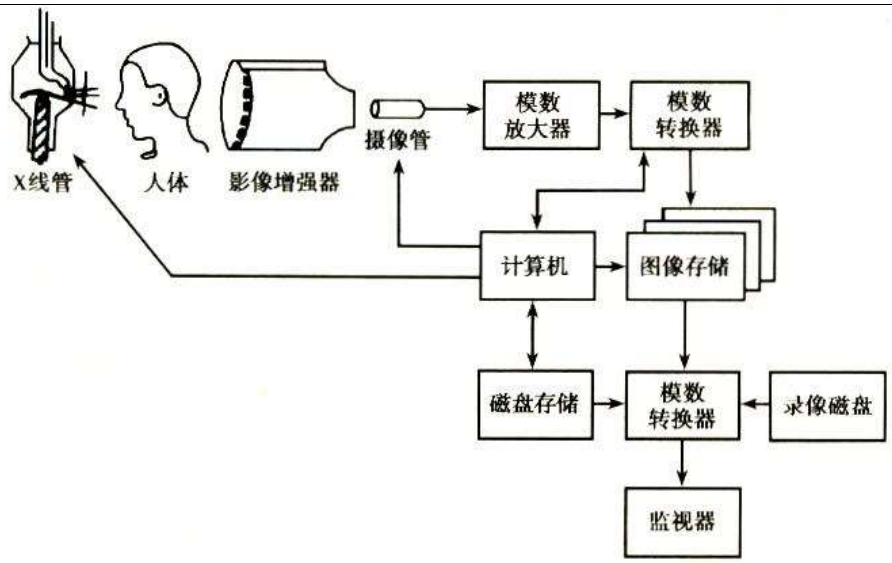


图 9-28　DSA 系统结构图

DSA 是引导介入放射治疗的重要医学影像设备，通过置入体内的各种导管（约 1.5-2 毫米粗）的体外操作和独特的处理方法，对体内病变进行治疗。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、鼻管、心脏等），以及某些特定部位，对许多疾病实施局限性治疗。

2、工作流程

患者在进行 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。本项目 DSA 在进行曝光时分为两种情况：

第一种情况：血管减影检查。操作人员采取隔室操作的方式（即操作医师在控制室内对患者进行曝光），医生通过铅玻璃观察窗和操作台观察机房内患者情况，并通过对讲系统与患者交流。

第二种情况：引导介入治疗。患者需要进行介入手术治疗时，为更清楚的了解患者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帘后身着铅服、铅眼镜在机房内对患者进行直接的介入手术操作。

本项目采用先进的数字显影技术，电脑成像，不使用显（定）影液，不产生废显影液、废定影液和废胶片。注入的造影剂不含放射性。设备运行过程中产生的污染物

主要为 X 射线、少量臭氧和氮氧化物以及手术过程中产生的医疗废物。DSA 项目工作流程及产污环节如图 9-29。

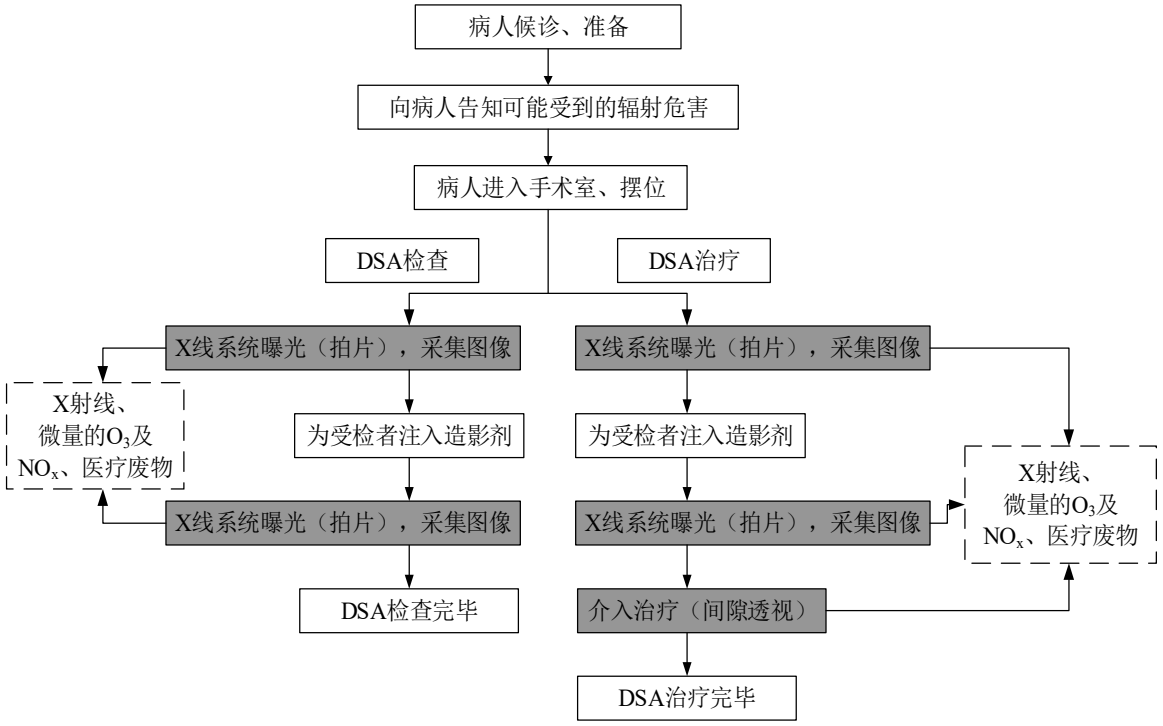


图 9-29　DSA 项目工作流程及产污环节示意图

三、核医学科项目人流和物流的路径规划

本项目非密封放射性物质工作场所位于先进技术楼负一层、一层和二层，结合本项目的工艺流程，本次新建的核医学科项目人流、物流路径规划具体如下：

（一）核医学科-回旋加速器制药区

1、工作人员路径：

回旋加速器的操作工作人员经负一层的医护电梯向西南方向进入回旋加速器控制室，在控制室设定回旋加速器相关运行参数等，运行前进入回旋加速器机房巡检，巡检结束后，然后开机运行，运行结束后原路返回。

制药区的工作人员经西北侧的卫生通过间经一更、二更和缓冲进入净化走廊，进入正电子药物合成分装室，在分装室取出由回旋加速器生产制备的正电子药物。工作人员将需要进行质量控制室的放射性药物经正电子药物合成分装室的铅传递窗传递至质控实验室，工作人员进入质控实验室完成质控操作后，再经净化走廊缓冲间、二更和一更离开药物制备区。

2、工作场所生产制备的药物运送路径：

本项目所使用的正电子药物由医院本期建设的回旋加速器自行生产制备所得，回

旋加速器经打靶产生正电子药物，经预埋的药物传输通道进入正电子药物合成分装室的合成热室内，再经合成模块自动合成生成 ^{18}F-FDG 等放射性药物，生产出的放射性药物经预设的独立管道进入分装热室，经自动分装仪分装成预设的容量及活度，并暂存至铅罐内。暂存于铅罐内的正电子药物由工作人员转移至成品室，经药物传送电梯传送至一层核医学科-影像中心，再经工作人员转移至 PET 注射室的手套箱暂存供患者使用。

3、放射性废物运送路径：

本项目产生的放射性废物主要是质控期间产生的少量的固体废物，会先暂存在质控实验室的铅废物桶内，随后转移至工作场所的废物间内暂存。

（二）核医学科-影像中心

1、工作人员路径：

（1）影像技师

核医学科影像中心的技师通过医生通道直接进入控制廊，在控制廊完成对设备的操作后原路返回。

（2）给患者施药工作人员

工作场所的医护人员由医护通道经卫生通过间进入注射室，在手套箱内完成分装活度测量等操作，最后在注射窗口给患者施药。该路径上卫生间内配置有表面污染监测设备，设置有感应式洗手池和淋浴设施，注射室内产生的固体废弃物暂存于废物桶内，随后转移至核医学科的废物间内。

2、患者路径：

（1）核素治疗患者

甲状腺吸碘率测定的患者和甲亢治疗的患者经东北侧的缓冲间至服药窗口服药，甲状腺测定患者因其用量很少，在服完药后原路返回。甲亢治疗患者在服药窗口服完药后在留观室留观片刻后经东南侧的缓冲间离开工作场所。

（2）显像患者路径

患者按预约日期首先到一层护士站，随后在护士站登记，登记后的患者通过缓冲间进入诊断区域，首先到达注射室，在注射室注射窗口注射放射性药物后，向西南侧行进，进入注射后等候区休息等待，一般等待大约 10～20min，再进入 PET/CT 机房、SPECT/CT 机房或 PET/MRI 机房进行显像检查，检查完毕后在留观室休息约 10min 后

离开。该路径上，患者入口和患者出口处均设置为单向门禁，仅允许患者单向通行。该诊断区域内设有专用卫生间，患者在专用卫生间内如厕，不随意走动，诊断期间，各自根据叫号系统提示到相应的位置进行诊断检查。

3、工作场所拟使用的药物运送路径：

本项目所使用的正电子药物由负一层回旋加速器制备所得，经药物传送电梯传送至一层，再经工作人员转移至 PET 注射室的手套箱内暂存；其余放射性药物会提前向有资质的供应商提前预定，供货单位会在病人就诊前将放射性药物通过东北侧的缓冲间将药物暂存于服药室或 SPECT 注射室的手套箱内。

4、放射性废物运送路径：

本项目产生的放射性废物会先暂存在注射室的铅废物桶内，随后转移至工作场所西侧的废物间内暂存。

（三）核医学科-核素治疗中心

1、工作人员路径：

工作场所的医护人员由医护通道经缓冲间进入全自动分装室，在自动分装仪上完成药物装填等操作，离开该区域在给药控制室控制自动分装仪。该路径上卫生间内配置有表面污染监测设备，设置有感应式洗手池和淋浴设施。

2、患者路径：

患者按预约日期首先到二层入院接诊室，随后经缓冲间进入治疗区域，首先到达服碘室，在服碘室口服放射性药物后，进入各自住院病房接受住院治疗，一般住院 3~5 天后经出口缓冲间离开。该路径上，患者入口和患者出口处均设置为单向门禁，仅允许患者单向通行。该治疗区域内设有专用卫生间，患者在专用卫生间内如厕，不随意走动，住院期间，各自根据叫号系统提示到取餐处取餐就餐。

3、工作场所拟使用的药物运送路径：

本项目所使用的放射性药物会提前向有资质的供应商提前预定，供货单位会在病人就诊前将放射性药物通过卫生通过间将药物暂存于全自动分装仪内。

4、放射性废物运送路径：

本项目产生的放射性废物会先暂存在各治疗室的铅废物桶内，随后转移至工作场所东北侧的固体废物间内暂存，患者出院后将使用过的污染被服暂存于污染被服间暂存至 180d 后再转移至洗衣房内进行清洗。

本次新建的工作场所病人、医护人员等流动路线见图 9-30，图 9-31，图 9-32。

本次新建非密封放射性物质工作场所项目相关配套布局能够保证各项工作程序沿着相关房间单向开展，最大限度的减少了人员的流动性，有助于实施工作程序；医护人员与病患有各自独立的通道，本次乙级非密封放射性物质工作场所布局满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中关于核医学工作场所的要求。

图 9-30 本项目核医学科-回旋加速器制药区人流及物流路径示意图

图 9-31 本项目核医学科-影像中心人流及物流路径示意图

图 9-32 本项目核医学科-核素治疗中心人流及物流路径示意图

污染源项描述

一、医用电子直线加速器及射波刀项目

（一）放射性污染

1、X 射线外照射

医用电子直线加速器和射波刀以 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，轰击到钨金靶上，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。

该院拟新增的 3 台医用电子直线加速器 X 射线最大能量为 15MV，15MV 时，1m 处 X 射线最高输出剂量率为 6Gy/min，10MV 时，1m 处 X 射线最高输出剂量率为 24Gy/min；新增的射波刀 X 射线最大能量为 6MV，6MV 时 0.8m 处最高输出剂量率为 10Gy/min。由于 X 射线的贯穿能力极强，将对工作人员、公众及周围环境辐射造成辐射污染。

本项目医用电子直线加速器机房和射波刀机房均位于先进技术楼负一层，不存在天空反射和侧散射。

2、电子束

当医用电子直线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患者。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。

该院拟新增的 3 台医用直线加速器电子线最大能量为 22MeV，1m 处电子线最高输出剂量率为 10Gy/min。医用电子直线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，在医用电子直线加速器电子束治疗时间时，电子线对周围环境辐射影响小于 X 射线治疗，可忽略对外环境的影响。

3、中子

当医用电子直线加速器的 X 射线能量大于 10MV 时，光子与医用电子直线加速器的靶、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直线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、固体废物

本项目医用电子直线加速器和射波刀工作过程不产生固体废物；工作人员工作中会产生少量的生活垃圾和办公垃圾。

医用电子加速器靶物质（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。

5、感生放射性

当入射电子加速电压大于 10MV，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器加速电子的能量、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 2.1min 和 7.3s，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。

因此，本项目医用电子直线加速器开机期间，产生的 X 射线和中子为主要辐射环境污染因素。射波刀开机期间，产生的 X 射线为主要辐射环境污染因素。

（二）非放射性污染

1、废气：医用电子直线加速器和射波刀在工作状态时，会使治疗室内的空气产生电离，产生臭氧和氮氧化物。

2、废水：主要是工作人员产生的生活污水。

3、固体废物：主要是工作人员产生的生活垃圾。

二、后装治疗机项目

（一）放射性污染

后装治疗机未使用时，放射源处于屏蔽位，少量的γ射线会穿透屏蔽体，对进入治疗机房治疗室的人员及室外公众等产生照射。

后装机在治疗过程中，机房治疗室内来自放射源的直射、散射和漏射γ射线会穿透屏蔽墙及防护门，对治疗机房治疗室外的工作人员和公众产生外照射影响。

^{192}Ir 放射源使用到一定年限后产生退役的放射源，可能会对周围环境产生一定的危害。

本项目后装治疗机内配备有一枚 ^{192}Ir 放射源，最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，^{192}Ir 放射源特性见表 9-9，衰变纲图见图 9-33。

表 9-9 ^{192}Ir 放射性核素特性

核素名称	半衰期	衰变类型及分支比（%）	主要α、β辐射能量（keV）与绝对强度（%）	主要γ、X 射线能量（keV）与绝对强度（%）	空气比释动能率常数（$Gy\cdot m^2\cdot Bq^{-1}\cdot h^{-1}$）
^{192}Ir	74.0d	β^-（95.13） ε（4.87）	538.3（41.43） 675.1（48.0） 258.7（5.6）	316.5（82.75） 468.1（47.81） 308.5（29.68） 296.0（28.72） 604.4（8.2）	1.11×10^{-13}

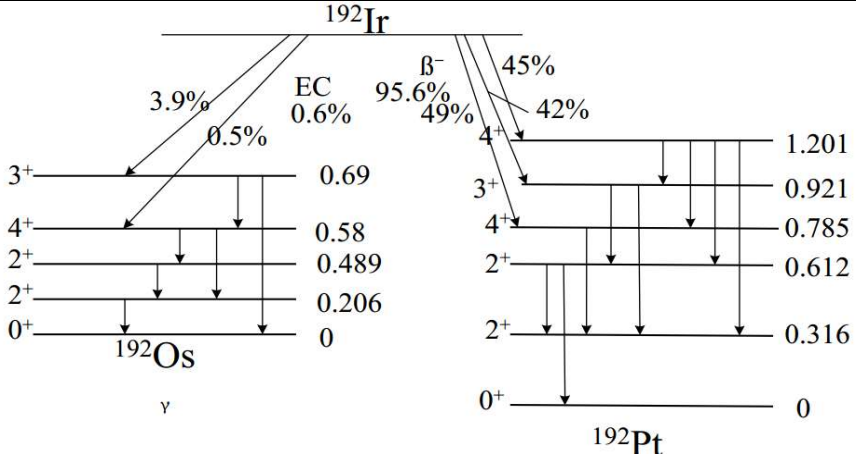


图 9-33 ^{192}Ir 衰变纲图

（二）非放射性污染

1、废气：后装机治疗过程中发射的γ射线，会使治疗机房治疗室内的空气产生电离，产生臭氧和氮氧化物。

2、废水：主要是工作人员产生的生活污水。

3、固体废物：主要是工作人员产生的生活垃圾。

三、定位 CT 项目

（一）放射性污染

本项目定位 CT 采用先进的数字成像技术，不使用显影液、定影液和胶片，因此不会产生废显影液、废定影液和废胶片。

定位 CT 在工作状态下会发出 X 射线，拟配置的 2 台定位 CT 最大管电压≤150kV、最大管电流≤1500mA，产生的 X 射线会对患者和医务人员有一定的附加辐射剂量。

（二）非放射性污染

1、废气：定位 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。

2、废水：主要是工作人员产生的生活污水。

3、固体废物：工作人员产生的生活垃圾。

四、核医学科项目

南京鼓楼医院拟于先进技术楼负一层核医学科-回旋加速器制药区新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内建设 1 座回旋加速器机房并配备 1 台自屏蔽式回旋加速器（ ）用于生产制备放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O。

拟于先进技术楼一层核医学科-影像中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga 开展 PET/CT（属III类射线装置）和 PET/MRI 显像诊断，放射性同位素 ^{68}Ga 由医院使用锗镓发生器自行淋洗所得；使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT（属III类射线装置）显像诊断；使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲状腺吸碘率测定和甲亢治疗项目，使用放射性同位素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 开展骨转移治疗项目。

拟于先进技术楼二层核医学科-核素治疗中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲癌治疗项目。

本次拟新增辐射项目见表 9-10~表 9-13。

表 9-10 南京鼓楼医院江北院区核医学科-回旋加速器制药区核素使用情况一览表

非密封放射性物质（回旋加速器制药区）

序号	工作场所名称	核素	日最大操作量（Bq）	年最大用量（Bq）	活动种类
1	放射性药物生产制备部分	^{18}F	1.11×10^{10}	2.78×10^{12}	生产使用
2		^{11}C	7.4×10^{8}	1.85×10^{11}	生产使用
3		^{13}N	7.4×10^{8}	1.85×10^{11}	生产使用
4		^{15}O	7.4×10^{8}	1.85×10^{11}	生产使用

表 9-11 南京鼓楼医院江北院区核医学科-影像中心核素使用情况一览表

非密封放射性物质（影像中心）

序号	核素	单个病人最大用量（mCi/人•次）	日最大病人量（人）	日最大操作量（Bq）	年工作天数	年最大病人量（人）	年总用量（Bq）
1	^{99m}Tc	20	30	2.22×10^{10}	250d	7500	5.55×10^{12}
2	^{18}F	10	30	1.11×10^{10}	250d	7500	2.78×10^{12}
3	^{11}C	10	2	7.4×10^{8}	250d	500	1.85×10^{11}
4	^{13}N	10	2	7.4×10^{8}	250d	500	1.85×10^{11}
5	^{15}O	10	2	7.4×10^{8}	250d	500	1.85×10^{11}
6	^{89}Sr	4	2 人/周	2.96×10^{8}	50 周	100	1.48×10^{10}
7	^{153}Sm	40	2 人/周	2.96×10^{9}	50 周	100	1.48×10^{11}
8	^{68}Ga	10	5	1.85×10^{9}	250d	1250	4.62×10^{11}
9	^{68}Ga-^{68}Ge	生产制备 ^{68}Ga					1.85×10^{9}
10	^{131}I	0.01 甲吸	20	7.40×10^{6}	250d	500	1.85×10^{9}
		10 甲亢	20	7.40×10^{9}	250d	500	1.85×10^{12}

表 9-12 南京鼓楼医院江北院区核医学科-核素治疗中心核素使用情况一览表

非密封放射性物质（核素治疗中心）

序号	核素	单个病人最大用量（mCi/人•次）	日最大病人量（人）	日最大操作量（Bq）	年工作天数	年最大病人量（人）	年总用量（Bq）
1	^{131}I	150	5	2.78×10^{10}	50 周	250	1.39×10^{12}

表 9-13 南京鼓楼医院核医学科射线装置使用情况一览表

射线装置

序号	射线装置名称	装置型号	最大管电压	最大管电流	射线装置类别	活动种类	备注
1	回旋加速器				II	使用	拟购
2	PET/CT	未定	140kV	1000mA	III	使用	拟购
3	SPECT/CT	未定	140kV	1000mA	III	使用	拟购

参照《关于明确核技术利用辐射安全监管有关事项的通知》（环办辐射函[2016]430 号）中：

1.有相对独立、明确的监督区和控制区划分；

2.工艺流程连续完整；

3.有相对独立的辐射防护措施的特点，工作场所人流及物流具有自己的独立通道，不与其他楼层交叉等条件。

根据医院本次新建的工作场所平面布局及周边环境可知，南京鼓楼医院本次新建的三处核医学工作场所均符合以上三个条件。因此，南京鼓楼医院本次新建项目应作为三个独立的非密封放射性物质工作场所，场所具有独立的监督区、控制区划分。

根据医院提供的预估工况分别核算其放射性核素日最大操作量和年总用量。根据《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）附录 A 表 A.1 及表 A.2，得到该核素的毒性组别及操作方式，根据核素的日最大操作量，经过毒性组别及操作方式的双重修正，得到整个非密封放射性物质工作场所的日等效操作量，判断其工作场所等级。

放射性核素的日等效操作量等于放射性核素的实际日操作量（Bq）与该核素毒性组别修正因子的积除以与操作方式有关的修正因子所得的商。放射性核素的毒性组别修正因子及操作方式有关的修正因子分别见表 9-14 和表 9-15。

表 9-14 核医学常用放射性核素毒性组别修正因子

毒性组别	常用核素名称	毒性组别修正因子
高毒	^{90}Sr	1
中毒	^{22}Na、^{32}P、^{63}Ni、^{67}Ga、^{89}Sr、^{90}Y、^{99}Mo、^{111}In、^{125}I、^{131}I、^{153}Sm	0.1
低毒	^{3}H、^{11}C、^{11}CO、$^{11}CO_2$、^{14}CO、$^{14}CO_2$、^{18}F、^{51}Cr、^{99m}Tc、^{111m}In、^{123}I、^{127}Xe、^{133}Xe、^{201}Tl	0.01

表 9-15 核医学常见放射性核素状态与操作方式修正因子

活动类型	核素及状态	操作方式界定	操作方式修正因子
发生器淋洗	母体（液态）	贮存	100
	子体（液态）	简单操作	1
医疗机构使用	^{18}F、^{99m}Tc（液态）	很简单操作	10
	^{125}I 籽源（固态）	很简单操作	100
放射性药品生产	分装、标记（液体）	简单操作	1
	分装、标记（固体）	简单操作	10
核素治疗	^{131}I（液态）	简单操作	1

南京鼓楼医院本次新建核医学科项目使用的非密封放射性物质日最大用量及年总用量见表 9-10~表 9-12，其日等效最大操作量核算见表 9-16、表 9-17 和表 9-18。

表 9-16 本项目使用的放射性核素日等效最大操作量核算（核医学科-回旋加速器制药区）

核素	日最大操作量（Bq）	毒性组别修正因子	操作方式修正因子	日等效最大操作量（Bq）
^{18}F	1.11×10^{10}	低毒 0.01	液态、简单操作 1	1.11×10^{8}
^{11}C	7.4×10^{8}	低毒 0.01	液态、简单操作 1	7.4×10^{6}

^{13}N	7.4×10^{8}	低毒 0.01	液态、简单操作 1	7.4×10^{6}
^{15}O	7.4×10^{8}	低毒 0.01	液态、简单操作 1	7.4×10^{6}
合计				1.33×10^{8}

表 9-17 本项目使用的放射性核素日等效最大操作量核算（核医学科-影像中心）

核素	日最大操作量（Bq）	毒性组别 修正因子	操作方式 修正因子	日等效最大操作量（Bq）
^{99m}Tc	2.22×10^{10}	低毒 0.01	液态、很简单操作 10	2.22×10^{7}
^{18}F	1.11×10^{10}	低毒 0.01	液态、很简单操作 10	1.11×10^{7}
^{11}C	7.4×10^{8}	低毒 0.01	液态、很简单操作 10	7.4×10^{5}
^{13}N	7.4×10^{8}	低毒 0.01	液态、很简单操作 10	7.4×10^{5}
^{15}O	7.4×10^{8}	低毒 0.01	液态、很简单操作 10	7.4×10^{5}
^{89}Sr	2.96×10^{8}	中毒 0.1	液态、很简单操作 10	2.96×10^{6}
^{153}Sm	2.96×10^{9}	中毒 0.1	液态、很简单操作 10	2.96×10^{7}
^{68}Ga	1.85×10^{9}	低毒 0.01	液态、简单操作 1	1.85×10^{7}
^{68}Ga-^{68}Ge	1.85×10^{9}	中毒 0.1	液态、源的贮存 100	1.85×10^{6}
^{131}I	7.40×10^{6}	中毒 0.1	液态、简单操作 1	7.40×10^{5}
	7.40×10^{9}	中毒 0.1	液态、简单操作 1	7.40×10^{8}
合计				8.30×10^{8}

注：本项目影像中心使用的放射性同位素 ^{11}C、^{13}N、^{15}O 与 ^{18}F 均来自回旋加速器自行生产所得，其物理特性基本一致，参照 HJ1188-2021 附录 A 中“医疗机构使用”类，均按照“很简单操作”进行日等效操作量进行核算；放射性同位素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 在使用过程中为针剂注射，无开放页面，参照 HJ1188-2021 附录 A 中“医疗机构使用”类，保守按照“很简单操作”进行日等效操作量进行核算；放射性同位素 ^{68}Ga 参照 HJ1188-2021 附录 A 中“发生器淋洗”的“子体（液态）”为简单操作进行日等效操作量进行核算。

表 9-18 本项目使用的放射性核素日等效最大操作量核算（核医学科-核素治疗中心）

核素	日最大操作量（Bq）	毒性组别 修正因子	操作方式 修正因子	日等效最大操作量（Bq）
^{131}I 甲癌	2.78×10^{10}	中毒 0.1	液态、简单操作 1	2.78×10^{9}

注：本项目核素治疗中心的日等效最大操作量仅考虑本期最大操作量进行核算，未考虑备用。

根据表 9-16~表 9-18 的计算结果可知南京鼓楼医院本次新建的核医学科-回旋加速器制药区工作场所日等效最大操作量为 1.13×10^{8}Bq，属于（2×10^{7}~4×10^{9}）Bq 的范围，确定南京鼓楼医院本次新建的核医学科-回旋加速器制药区为乙级非密封放射性物质工作场所；本次新建的核医学科-影像中心工作场所日等效最大操作量为 8.30×10^{8}Bq，属于（2×10^{7}~4×10^{9}）Bq 的范围，确定南京鼓楼医院本次新建的核医学科-影像中心为乙级非密封放射性物质工作场所；本次新建的核医学科-核素治疗中心工作场所日等效最大操作量为 2.78×10^{9}Bq，属于（2×10^{7}~4×10^{9}）Bq 的范围，确定南京鼓楼医院本次新建的核医学科-核素治疗中心为乙级非密封放射性物质工作场所。

南京鼓楼医院本次新建的3处工作场所主要产生以下放射性污染：

1、核医学科-回旋加速器制药区

（1）放射性污染

在回旋加速器区主要的环境影响为制备核素、化学分离与合成、质量控制、药物分装过程中对工作人员产生外照射；质量控制、药物分装过程中对工作台面、地面等造成的表面污染；生产过程产生的含放射性的滤膜、靶材料等；操作过程产生的放射性固体废物，如使用可能沾染放射性药物的手套、口罩、污染擦拭或清洗物等放射性固体废物；操作过程产生的放射性废水，如洗涤废水。

回旋加速器营运过程中产生的电离辐射主要为γ射线和中子，此外尚有质子、β+等。在^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O的生产中，除产生电离辐射（β+、γ）之外，还可能产生含^{11}C、^{13}N、^{15}O和^{41}Ar的废气、废液和固体废物，此外尚有少量的活化气体，下面分别叙述：

①贯穿辐射

回旋加速器运行时产生的贯穿辐射有中子、γ射线，产生的初级伽玛射线大约是中子产生剂量的1%。在进行化学合成时和分装时产生γ射线。产生部位见表9-19。

表9-19 回旋加速器运行贯穿辐射发生位置

序号	发生位置	产生放射的主要原因	粒子类型
1	靶	生产放射性同位素的核反应	中子，γ
2	射束光闸	射束调整过程中粒子束撞击射束光闸产生的核反应	中子，γ
3	挡板缝隙	加速粒子撞击挡板缝隙产生的核反应	中子，γ
4	锡箔剥离器	加速粒子通过锡箔剥离器产生的核反应	中子，γ
5	真空室	加速粒子在真空室内撞击残气	中子，γ
6	化学合成热室	输送管道、药物合成、制取、药量分装和质量检验时	γ

以上中子和γ射线具有较强的穿透力，如果对其屏蔽不好则可以穿过屏蔽墙、防护门和屋顶对工作人员和公众会产生一定辐射危害。

一般上午8点钟要对患者用药，所以回旋加速器通常运行（打靶）是在上午6点前完成，打靶后药物合成和分装共需约2小时。

②活化气体

加速器机房中的空气受中子照射后生成放射性活化气体，主要核素有^{11}C，^{13}N，^{15}O和^{41}Ar，它们的半衰期在7.3s～1.83h，只要有相应的通风管道就可以避免机房内活化气体的存在。

③放射性废物

i 含放射性核素的气溶胶：在放射性药物制取、质检、分装时，部分未被高效过滤器净化的含 ^{18}F 等的气溶胶经通风管道排入大气，会对环境产生污染；

ii 放射性液体废物：放射性药物制取工艺流程中加入的反应介质乙腈溶液和乙醚洗涤液，在同位素交换反应和洗涤完成后，每天产生约 120ml 放射性废液，由热室专用瓶自动收集，热室在当天运行结束后只能等到第二天才能打开，废液在热室贮存。

加速器冷却水被活化将产生的感生放射性核素主要是 ^{15}O、^{16}N，半衰期分别是 2.1min 和 7.3s，一般采取放置一段时间其活度可衰减到可忽略的水平。该项目回旋加速器采用密封循环水冷却方式，在正常运转状况下，不外排。

iii 放射性固体废物：有靶废料，即有靶窗、废弃的离子源灯丝等，一年产生约 400g，为感生放射性废物；放射性药物制取时产生放射性残留物如硅胶、树脂、氧化铝、碳柱、滤膜和废活性炭等，每年产生约 150kg；操作药物时主要产生的手套、口罩和清洁时用过的抹布、拖布等，年产生量约 20kg，废物中主要核素为 ^{18}F 等短寿命放射性核素。所有以上放射性废物均采取衰变存贮方式。

表 9-20 药品合成过程污染因素和产污环节

序号	产污环节	污染因素						
		贯穿辐射		表面污染	放射性固体废物	放射性液体废物	放射性气体废物	其它有害气体
		n	γ					
正常工况	药品合成		√	√	废手套、口罩、吸水纸以及废包装瓶等。	剩余药液、冲洗及工作人员沐浴废水	^{11}C、^{13}N、^{18}F、^{15}O气溶胶	
	药品质控检验		√	√	不合格药物			
	药品分装		√	√	废包装材料			
	退役		√	√	含感生放射加速器部件和其它场地清污废物			
事故工况	安全联锁失效	√	√					O_3
	突然断电扩散泵回流		√				^{11}C、^{13}N、^{18}F、^{15}O气溶胶	
	通风系统故障		√				^{11}C、^{13}N、^{18}F、^{15}O气溶胶	
	熔靶和靶水吸附事故		√				/	
	反应器倾翻或破裂		√	√			^{11}C、^{13}N、^{18}F、^{15}O气溶胶	

（2）非放射性污染源

机房内空气被电离产生少量的臭氧（O_3），它对人的呼吸系统、眼睛和粘膜有伤害。高浓度的臭氧还可以使易燃材料的活性增强，降低臭氧浓度的主要措施是加速器机房要有良好的通风系统。

2、核医学科-影像中心和核医学科-核素治疗中心

（1）电离辐射

医院拟在 PET/CT 机房内新增使用 1 台 PET/CT（最大管电压 140kV、最大管电流 1000mA），拟 SPECT/CT 机房内新增使用 1 台 SPECT/CT（最大管电压 140kV、最大管电流 1000mA）均用于核素诊断，均属于III类射线装置。

PET/CT 和 SPECT/CT 扫描时产生的 X 射线、放射性药物在取药、分装、注射、注射后候诊、扫描等操作过程中产生的γ射线。以上射线会造成医务人员和公众的外照射。

PET/CT 和 SPECT/CT 显像检查用放射性核素在取药、分装、注射、注射后候诊、扫描等操作过程中产生的β射线和γ射线等，以上射线会造成医务人员和公众的外照射；在进行 ^{99m}Tc 放射性核素操作过程中，引起操作台面、设备、墙壁、地面、工作服、手套等放射性沾污。本项目所使用的放射性核素特性见表 9-21。

表 9-21 放射性核素特性一览表

核素名称	半衰期	衰变类型及分支比（%）	主要α、β辐射能量（keV）与绝对强度（%）	主要γ、X 射线能量（keV）与绝对强度（%）	周围剂量率当量率常数（裸源）① （μSv·m²/MBq·h）
^{99m}Tc	6.02h	IT(100)	-	140.511(88.5)	0.0303
^{89}Sr	50.53d	β^-	0.5846	-	-
^{153}Sm	46.5h	β^-	0.881	0.042，0.047，0.103	0.072
^{18}F	109.8min	β^+，EC	0.63（+）	0.511	0.143
^{11}C	20min	β^+，EC	0.96（+）	0.511	0.148
^{13}N	10min	β^+，EC	1.19（+）	0.511	0.148
^{15}O	2min	β^+，EC	1.72（+）	0.511	0.148
^{68}Ga	68.3min	β^+，EC	1.9（+）	0.511	0.134
^{68}Ge	288d	EC（100）	-	0.0011，0.009225，0.009252，0.0103	-

注：①该数据来源于《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）。

2、放射性表面污染

医生在对含有放射性同位素的各种操作中，会引起工作台、工作服和手套等产生放射性沾污，造成小面积的放射性表面污染。

3、放射性废气

本项目使用的在带有通风装置的手套箱或自动分装仪内进行分装，产生少量的放射性气溶胶。

4、放射性废水

体内含有放射性核素的病人排泄物；工作场所清洗废水等。

5、放射性固体废物

放射性同位素操作过程中产生的如注射器、一次性手套、棉签、滤纸等带微量放射性同位素的医疗固体废弃物和更换下来的废活性炭，污染途径为操作过程中及收集固废过程中和贮存衰变时对医务人员产生的外照射。

6、非放射性三废

本项目废气为电离辐射产生的 O_3、NO_X 等废气；本项目废水为工作人员产生少量的生活污水；本项目的固体废物，主要为工作人员产生的生活垃圾以及医疗废物。

五、介入诊断与治疗项目

（一）放射性污染

DSA 在工作状态下会发出 X 射线，拟配置的 DSA 最大管电压≤125kV、最大管电流≤1000mA，其主要用作血管造影检查及配合介入治疗，由于在荧光影像与视频影像之间有影像增强器，从而降低了造影所需的 X 射线能量，再加上一次血管造影检查需要时间很短，因此血管造影检查的辐射影响较小。而介入放射需要长时间的透视和大量的摄片，对患者和医务人员有一定的附加辐射剂量。

DSA 产生的 X 射线是随机器的开、关而产生和消失，其穿透能力与 X 射线管的管电压和出口滤过有关。在开机出束期间，X 射线是主要污染因子。辐射场中的 X 射线包括有用线束（主束）、漏射线和散射线。由于射线能量较低，不必考虑感生放射性问题。

1、有用线束

本项目 DSA 的有用线束投射方向为由下至上。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（60～80）kV/（5～20）mA，拍片模式的工况为（60～80）kV/（100～500）mA。

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 中查取。本项目 DSA 过滤装置采用束光器自带 0.5mmCu 过滤器+附加过滤器，本项目保守按照过滤材料为 0.5mmCu 滤片进行剂量预测，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。

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 1mGy/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 第一部分：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》（GB 9706.12-1997）中 29.204.3 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、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。

工作负荷：根据医院提供的资料，杂交手术室和介入中心 DSA 的工作负荷情况见表 9-22 和表 9-23。

表 9-22 杂交手术室单台 DSA 工作负荷

	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	
透视	心脏介入	50 台	约 15min	约 12.5h	合计约 56h
	神经介入	50 台	约 20min	约 16.7h	
	综合介入	80 台	约 20min	约 26.6h	
	手术类别	年开展工作量	单台手术最大采集时间	年采集时间	
拍片	心脏介入	50 台	约 1min	约 0.83h	合计约 4.33h
	神经介入	50 台	约 1min	约 0.83h	
	综合介入	80 台	约 2min	约 2.67h	

总　计				约 61h	

表 9-23　DSA 介入中心单台 DSA 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	60 台	约 15min	约 15h	合计约 68.3h
	神经介入	60 台	约 20min	约 20h	
	综合介入	100 台	约 20min	约 33.3h	
拍片	手术类别	年开展工作量	单台手术最大采集时间	年采集时间	
	心脏介入	60 台	约 1min	约 1h	合计约 5.33h
	神经介入	60 台	约 1min	约 1h	
	综合介入	100 台	约 2min	约 3.33h	
总　计				约 74h	

医院拟为介入诊断与治疗项目配备 48 名（每个机房配备 6 名）辐射工作人员，辐射工作人员年工作 250 天。

（二）非放射性污染

1、废气：DSA 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。

2、废水：主要是工作人员产生的生活污水。

3、固体废物：DSA 手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物；工作人员产生的生活垃圾。

表 10 辐射安全与防护

项目安全措施

一、工作区域布局管理

（一）工作场所布局合理性

1、肿瘤中心

本项目的肿瘤中心设置于医院拟建的先进技术楼负一层，医用电子直线加速器机房、射波刀机房和后装治疗机机房均位于本栋建筑的底层。医用电子直线加速器机房、射波刀机房、后装治疗机机房和定位 CT 机房的控制室均位于治疗室的一侧，均为隔室操作，减少了对职业人员的照射。肿瘤中心平面布局详见附图 3。且该栋建筑为先进技术楼，主要开设肿瘤中心和核医学科，避开了医院的儿科病房、产房和门诊等特殊人群区域或人员密集区域，或人员流动性大的商业活动区域。满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中关于选址与布局的规定。

2、核医学科

本项目核医学科位于医院拟建的先进技术楼负一层、一层和二层，医院综合考虑将回旋加速器制药区设置于负一层，该处人员稀少，避开了人流量大的门诊等区域，且制备完成的放射性药物可通过药物传送梯直达一层影像中心，减少了因药物运输对工作人员的剂量叠加影响。一层影像中心设置有甲状腺吸碘率测定检测和甲亢治疗项目，该些项目均属门诊检查治疗项目，检查治疗时间短，用药量少，与二层核素治疗中心分开可避免该类患者减少不必要的照射。

综上，本次新建的 3 处工作场所相对独立，新增的非密封放射性物质工作场所避开了医院的产科、儿科、食堂等部门，且新增的工作场所出入口避开了人流量较大的门诊大厅、收费处等人群稠密区域，避免了对公众不必要的照射。满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中关于选址与布局的规定。

3、介入诊断与治疗项目

本项目 DSA 配套独立用房，房间由射线装置机房和控制室组成。DSA 机房控制室与诊断机房分开单独布置，区域划分明确，项目布局合理。

综上，本项目辐射工作场所根据工作要求且有利于辐射防护和环境保护进行布局，功能分区明确，既能有机联系，又不互相干扰，且最大限度避开了人流量较大的门诊区或其它人流活动区；在设计阶段，辐射工作场所进行了合理的优化布局，同时

兼顾了病人就诊的方便性。

（二）两区划分

1、分区原则

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）要求，将本项目辐射工作场所分为控制区和监督区，以便于辐射防护管理和职业照射控制。

控制区—把需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域定为控制区，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。

监督区—通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域。

根据《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的规定：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。开展术中放射治疗室，术中放射治疗室应确定为临时控制区。

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）。

根据《核医学辐射安全与防护要求》（HJ 1188-2021）的规定：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。

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。

2、控制区与监督区的划分

（1）肿瘤中心

本次环评根据控制区和监督区的定义，结合项目辐射防护和环境情况特点进行辐射防护分区划分。医院拟将医用电子直线加速器机房（含迷道）、射波刀机房（含迷道）、后装治疗机机房（含迷道）和定位 CT 机房等划分为控制区，该区域涉及射线

装置的操作，属《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）及其他法律法规定义的控制区，进行了专门的屏蔽防护设计；其余房间如：各控制室、水冷机房和辅助机房等属《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）及其他法律法规定义的监督区。

（2）核医学科

本次环评根据控制区和监督区的定义，结合项目辐射防护和环境情况特点进行辐射防护分区划分。医院拟将涉及射线装置及放射性同位素的操作的回旋加速器机房、药物合成分装室、质控间、储源室、注射室、废物间、注射后候诊室、抢救室、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/MRI 机房、留观室、衰变池等区域划为控制区，以上区域进行了专门的屏蔽防护设计；其余房间如：控制室、卫生通过间等属《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）及其他法律法规定义的监督区。

（3）介入诊断与治疗项目

本项目拟将 DSA 所在机房作为辐射防护控制区，与机房相邻的控制室及设备间划为监督区，在机房入口处粘贴有电离辐射警告标志。本项目辐射防护分区的划分符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中关于辐射工作场所的分区规定。

本项目控制区和监督区划分情况见表 10-1，并在图 10-1~图 10-5 上进行了标识。

表 10-1 项目控制区和监督区划分情况

科室名称	控制区	监督区
肿瘤中心	医用电子直线加速器机房（含迷道）、射波刀机房（含迷道）、后装治疗机机房（含迷道）、定位 CT 机房	各控制室、控制廊和水冷机房等
核医学科	回旋加速器机房、正电子药物合成分装室、质控室	控制室、卫生通过间、缓冲间、净化走廊、设备间、成品室、药物运送室等
	源库、药梯、PET 注射室、SPECT 注射室、服药室、放射性废物间、运动平板室、甲功能测定室、甲亢留观室、注射后候诊室、抢救室、PET/CT 机房、PET/MRI 机房、SPECT/CT 机房、留观室、清洁间、校准源库、衰变池（位置见附图 2）等	控制廊、卫生通过间、缓冲间、设备间和检查更衣室等
	甲癌治疗室 1~5、抢救室、取餐间、污染被服间、避难间、服药室、全自动分装仪室、衰变池等	卫生通过间、自动分装仪控制室、库房、缓冲间等
介入诊断与治疗项目	杂交手术室	控制室、设备间
	DSA1~6 室	操作间、设备间

图 10-1 肿瘤中心和核医学科-回旋加速器制药区“两区”划分示意图

图 10-2 核医学科-影像中心“两区”划分示意图

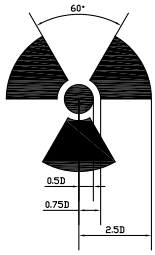
图 10-3 核医学科-核素治疗中心“两区”划分示意图

图 10-4 门诊医技楼杂交手术室 DSA 机房“两区”划分示意图

图 10-5 病房楼 DSA 介入中心 DSA 机房“两区”划分示意图

1）控制区的防护手段与安全措施：

①控制区的进出口及其他适当位置处设立醒目的警告标志（如图 10-6）。



a.电离辐射标志



b.当心电离辐射警告标志

图 10-6 电离辐射标志和电离辐射警告标志

②制定辐射防护与安全管理措施，包括适用于控制区的规则和程序；

③运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可制度）和实体屏障（包括门锁）限制进出控制区；

④在淋浴/更衣室备有个人防护用品、工作服、污染监测仪和被污染防护衣具的贮存柜；

⑤定期审查控制区的实际状况，以确保是否有必要改变该区的防护手段、安全措施或该区的边界。

2）监督区防护手段与安全措施

①以黄线警示监督区的边界；

②在监督区的入口处的适当地点设立表明监督区的标牌；

③定期检查该区的条件，以确定是否需要采取防护措施和做出安全规定，或是否需要更改监督区的边界。

二、辐射安全及防护措施

（一）机房屏蔽措施

1、医用电子直线加速器项目

南京鼓楼医院江北院区医用直线加速器机房和射波刀机房位于先进技术楼负一层肿瘤中心，机房整体采用混凝土浇筑，设置“L”形迷道，迷道口设铅防护门。医用直线加速器机房和射波刀机房具体屏蔽设计参数见表 10-2，屏蔽设计图详见附图 12。

表 10-2 医用电子直线加速器机房和射波刀机房防护屏蔽设计一览表

类别	屏蔽防护设计		屏蔽设计参数（厚度及材质）	主屏蔽宽度
医用电子直线加速器 1#机房	东南墙	迷道外墙	60~140cm 厚混凝土	/
		迷道内墙	60~150cm 厚混凝土	/
	西南墙	主屏蔽	300cm 厚混凝土	520cm
		次屏蔽	170cm 厚混凝土	/

	西北墙	次屏蔽	160cm 厚混凝土	/
	东北墙	主屏蔽	300cm 厚混凝土	420cm
		次屏蔽	160cm 厚混凝土	/
	屋顶	主屏蔽	300cm 厚混凝土	360cm
		次屏蔽	170cm 厚混凝土	/
	防护门		15mm 铅板+15cm 厚含硼聚乙烯	
医用电子直线加速器 2#机房	东南墙	迷道外墙	60~140cm 厚混凝土	/
		迷道内墙	60~150cm 厚混凝土	/
	西南墙	主屏蔽	300cm 厚混凝土	520cm
		次屏蔽	170cm 厚混凝土	/
	西北墙	次屏蔽	160cm 厚混凝土	/
	东北墙	主屏蔽	300cm 厚混凝土	520cm
		次屏蔽	170cm 厚混凝土	/
	屋顶	主屏蔽	300cm 厚混凝土	360cm
		次屏蔽	170cm 厚混凝土	/
	防护门		15mm 铅板+15cm 厚含硼聚乙烯	
医用电子直线加速器 3#机房	东南墙	迷道外墙	60~140cm 厚混凝土	/
		迷道内墙	60~150cm 厚混凝土	/
	西南墙	主屏蔽	320cm 厚混凝土	420cm
		次屏蔽	255cm 厚混凝土	/
	西北墙	次屏蔽	160cm 厚混凝土	/
	东北墙	主屏蔽	300cm 厚混凝土	520cm
		次屏蔽	170cm 厚混凝土	/
	屋顶	主屏蔽	300cm 厚混凝土	360cm
		次屏蔽	170cm 厚混凝土	/
	防护门		15mm 铅板+15cm 厚含硼聚乙烯	
射波刀机房	东南墙	迷道外墙	30~140cm 厚混凝土	/
		迷道内墙	90~210cm 厚混凝土	/
	西南墙		250cm 厚混凝土	/
	西北墙		240cm 厚混凝土	/
	东北墙	主屏蔽	320cm 厚混凝土	420cm
		次屏蔽	255cm 厚混凝土	/
	屋顶		250cm 厚混凝土	/
	防护门		12mm 铅板	

注：本项目拟使用的混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，铅板的密度不低于 11.3g/cm^3。

2、后装治疗机项目

南京鼓楼医院江北院区后装治疗机机房位于先进技术楼负一层肿瘤中心，机房整体采用混凝土浇筑，设置直迷道，迷道口设铅防护门。后装治疗机机房具体屏蔽设计参数见表 10-3，屏蔽设计图详见附图 12。

表 10-3　后装治疗机机房防护屏蔽设计一览表

类别	屏蔽防护设计		屏蔽设计参数（厚度及材质）
后装治疗机机房	东南墙		70cm 厚混凝土
	西南墙	迷道内墙	60cm 厚混凝土
		迷道外墙	70cm 厚混凝土
	西北墙		70cm 厚混凝土
	东北墙		250cm 厚混凝土
	屋顶		80cm 厚混凝土
	防护门		12mm 厚铅板

注：本项目拟使用的混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，铅板的密度不低于 11.3g/cm^3。

3、定位 CT 项目

南京鼓楼医院江北院区定位 CT 机房位于先进技术楼负一层肿瘤中心，机房主体采用实心混凝土砖墙砌筑，设有铅防护门和铅玻璃观察窗。具体屏蔽参数见表 10-4。

表 10-4 定位 CT 机房防护屏蔽设计一览表

类别	屏蔽防护设计	屏蔽设计参数（厚度及材质）
定位 CT 机房	四周墙体	240mm 厚实心混凝土砖墙
	屋顶	300mm 厚混凝土
	防护门	3mm 厚铅板
	观察窗	12mm 厚铅玻璃（3.0mmPb）

注：本项目拟使用的混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，混凝土砖密度不低于 2.5g/cm^3，铅板的密度不低于 11.3g/cm^3。

3、核医学科项目

南京鼓楼医院江北院区核医学位于先进技术楼负一层、一层和二层，工作场所主体采用钢筋混凝土、实心混凝土砖墙砌筑，设有铅防护门和铅玻璃观察窗。工作场所具体屏蔽设计参数见表 10-5~表 10-7。

表 10-5　核医学科负一层回旋加速器制药区防护屏蔽设计一览表

类别	区域	屏蔽设计参数（厚度及材质）
回旋加速器机房	四面墙体	500mm 厚混凝土
	屋顶	600mm 厚混凝土
	防护门	15mm 铅当量铅板+250mm 含硼聚乙烯
正电子药物合成室	四面墙体	东、南墙为 500mm 厚混凝土 西、北墙为 300mm 混凝土
	屋顶	300mm 厚混凝土
	防护门	6mmPb
	合成热室	正面 60mmPb，侧面 50mmPb（3 个）
	分装热室	正面 70mmPb，侧面 60mmPb（1 个）
	传递窗	20mmPb
全检质控室	四面墙体	东、西和北墙为 200mm 实心混凝土砖

（含阴阳对照间和无菌检测间）		南墙为 300mm 混凝土
	屋顶	300mm 混凝土
	防护门	2mmPb
	通风橱	20mmPb
其他房间	四面墙体	200mm 厚实心混凝土砖
	屋顶	300mm 厚混凝土
	防护门	3mmPb

注：本项目拟使用的混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，混凝土砖的密度不低于 2.5 g/cm^3，铅板的密度不低于 11.3g/cm^3。

表 10-6　核医学科-影像中心防护屏蔽设计一览表

名称	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
注射室（含废物间）	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
	注射窗	20mmPb
	注射器铅套	10mmPb
	手套箱	75mmPb（^{18}F 用），40mmPb（^{99m}Tc 用）
源库	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
放射性废物暂存间	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
运动平板室	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
服药室	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
	手套箱	40mmPb（^{131}I 用）
甲亢留观室	四面墙体	西南墙为 24cm 厚实心混凝土砖墙，其余为 30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
SPECT 注射后	四面墙体	东南墙为 24cm 厚实心混凝土砖墙，其余为 30cm 厚混凝土

等候室 1	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
SPECT 注射后等候室 2	四面墙体	东南墙和东北墙为 24cm 厚实心混凝土砖墙，其余为 30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 3mmPb 铅防护门
SPECT/CT 机房	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 5mmPb 铅防护门
	观察窗	5mmPb
	铅屏风	2mmPb
PET/CT 注射后等候室 1~3；PET/MRI 注射后等候室 1~3	四面墙体	东北墙为 30cm 厚混凝土，其余为 24cm 厚实心混凝土砖墙
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 8mmPb 铅防护门
PET/CT 注射后等候室 4、5	四面墙体	西南墙为 30cm 厚混凝土，其余为 24cm 厚实心混凝土砖墙
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 8mmPb 铅防护门
抢救室	四面墙体	东南墙和西南墙为 30cm 厚混凝土，其余为 24cm 厚实心混凝土砖墙
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 8mmPb 铅防护门
PET/CT 机房 PET/MRI 机房	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 8mmPb 铅防护门
	观察窗	12mmPb
留观室	四面墙体	东北墙为 30cm 厚混凝土，其余为 24cm 厚实心混凝土砖墙
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 8mmPb 铅防护门
其他	核医学入口缓冲间防护门为 8mmPb，出口为 8mmPb	
	放射性废物暂存间、储源间防护门为 5mmPb	

注：本项目拟使用的混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，铅板的密度不低于 11.3g/cm^3。

表 10-7　核医学科-核素治疗中心防护屏蔽设计一览表

名称	屏蔽体	主要屏蔽材料及厚度
服药室及全自动分装仪室	四面墙体	30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 10mmPb 铅防护门
	自动分装仪	40mmPb
甲癌治疗室	四面墙体	区域内墙体为 24cm 厚实心混凝土砖墙，外墙为 30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 15mmPb 铅防护门
抢救室及避难间	四面墙体	区域内墙体为 24cm 厚实心混凝土砖墙，外墙为 30cm 厚混凝土
	顶棚	30cm 厚混凝土
	地面	30cm 厚混凝土
	防护门	防护门为 10mmPb 铅防护门
其他	核医学入口缓冲间防护门为 12mmPb，出口为 12mmPb	
	放射性废物暂存间四周墙体为 30cm 厚混凝土	

注：本项目拟使用的混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，铅板的密度不低于 11.3g/cm^3。

4、杂交手术室和 DSA 介入中心项目

表 10-7　杂交手术室和 DSA 介入中心各机房防护屏蔽设计一览表

类别	屏蔽防护设计	屏蔽设计参数（厚度及材质）
杂交手术室、DSA 介入中心	四周墙体	240mm 实心混凝土砖墙
	屋顶	250mm 厚混凝土
	地面	250mm 厚混凝土
	防护门	内衬 3mmPb 铅板
	观察窗	12mm 厚铅玻璃（3.0mmPb）

注：本项目拟使用的混凝土密度不低于 2.35g/cm^3，混凝土砖密度不低于 2.5g/cm^3，铅板的密度不低于 11.3g/cm^3。

（二）辐射安全和防护措施

1、医用电子直线加速器和射波刀项目

（1）当心电离辐射警告标志和工作状态指示灯

本项目 3 座医用电子直线加速器机房和射波刀机房入口处防护门上方拟设置工作状态指示灯，防护门上粘贴有当心电离辐射警告标志和防止无关人员逗留误入等提示语。

（2）视频监控系统及语音对讲系统

本项目医用电子直线加速器机房和射波刀机房拟设计安装视频监控系统和双向交流对讲装置，可实时观察机房内的动态。

（3）固定式报警仪

在医用电子直线加速器机房和射波刀机房墙上安装固定式剂量报警装置（带剂量显示功能），探头安装在机房迷道内墙上（靠近防护门），只要迷道内的剂量超过预设的剂量阈值，就会报警提示人员不能进入机房，以防人员误入。

（4）门机联锁装置

除医用电子直线加速器和射波刀自身所带的安全联锁外，机房拟设置门-机联锁，只有在机房门关闭时加速器才能出束进行治疗，出束状态下防护门打开加速器会立即停止出束。

（5）紧急开门装置

医用电子直线加速器机房和射波刀机房拟设置从室内开启治疗机房门的紧急装置。同时，防护门拟设有防挤压功能。

（6）急停按钮

在医用电子直线加速器机房和射波刀机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧、防护门内迷路入口处、控制室控制台及设备壳体上均拟设置急停按钮，以避免医用电子直线加速器机房和射波刀机房内人员尚未完全清空的情况下开机，产生误照射。

（7）其他安全装置

①医用电子直线加速器或射波刀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。

②医用电子直线加速器机房和射波刀机房电缆线穿墙方式拟采用“U”型穿墙管道（见附图 12），电缆沟不会破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

③防护门搭接方式：机房防护门设计制作时，除要考虑足够的防护厚度外，拟考虑防护门与周围墙壁及地面的重叠搭接，以防止门缝处射线泄漏。本项目医用电子直线加速器机房门与墙之间的间隙小于 1cm，门与墙之间间隙与搭接比值小于 1/10，可有效防止门缝处射线泄漏。

④本项目医用电子直线加速器机房和射波刀机房拟设计有通风装置，治疗室内拟采用机械进、出风，通风换气频率为不低于 4 次/h。医用电子直线加速器机房进出风管道避开主射线方向，射线经多次散射后，进出风管道进出口处辐射剂量将在控制范

围内。

本项目医用电子直线加速器机房和射波刀机房的辐射安全设施位置示意图详见图 10-7。

2、后装治疗机项目

（1）当心电离辐射警告标志和工作状态指示灯

本项目后装治疗机机房入口处防护门上方拟设置工作状态指示灯，防护门上粘贴有当心电离辐射警告标志和防止无关人员逗留误入等提示语。

（2）视频监控系统及语音对讲系统

本项目后装治疗机机房拟设计安装视频监控系统和双向交流对讲装置，可实时观察机房内的动态。

（3）固定式报警仪

在后装治疗机机房墙上安装固定式剂量报警装置（带剂量显示功能），探头安装在机房迷道内墙上（靠近防护门），只要迷道内的剂量超过预设的剂量阈值，就会报警提示人员不能进入机房，以防人员误入。

（4）门机联锁装置

除后装治疗机自身所带的安全联锁外，机房拟设置门-机联锁，只有在机房门关闭时后装机才能出源进行治疗，出源状态下防护门打开后装治疗机会立即紧急回源。

（5）紧急开门装置

后装治疗机机房拟设置从室内开启治疗机房门的紧急装置。同时，防护门拟设有防挤压功能。

（6）急停按钮

在后装治疗机机房内不同方向的墙面、入口门内旁侧、防护门内迷路入口处、控制室控制台及设备壳体上均拟设置急停按钮，以避免后装治疗机机房内人员尚未完全清空的情况下开机，产生误照射。

（7）断电自动回源装置

本项目后装治疗机设计有断电自动回源装置。治疗过程中或者出源状态下，后装治疗机断电，后装治疗机会启动应急电源，后装治疗机会立即紧急回源。

（8）其他安全装置

①后装治疗室内拟配备合适的应急贮源容器和长柄镊子等应急工具。

②后装治疗机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。

③后装治疗机机房电缆线穿墙方式拟采用“U”型穿墙管道（见附图 12），电缆沟不会破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

④防护门搭接方式：机房防护门设计制作时，除要考虑足够的防护厚度外，拟考虑防护门与周围墙壁及地面的重叠搭接，以防止门缝处射线泄漏。本项目后装治疗机机房门与墙之间的间隙小于 1cm，门与墙之间间隙与搭接比值小于 1/10，可有效防止门缝处射线泄漏。

⑤本项目后装治疗机机房拟设计有通风装置，治疗室内拟采用机械进、出风，通风换气频率为不低于 4 次/h。

⑥设备购置于正规厂家，满足质检要求。后装治疗机工作贮源器内装载最大容许活度的放射源时，应满足《后装 γ 源近距离治疗质量控制检测规范》（WS 262-2017）中的相关要求：距离贮源器表面 5cm 处的任何位置，因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 50μSv/h，距离贮源器表面 100cm 处的球面上，任何一点因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 5μSv/h。

本项目后装治疗机机房的辐射安全设施位置示意图详见图 10-7。

3、定位 CT 项目

（1）电离辐射警告标志

定位 CT 机房入口处拟设置有“当心电离辐射”警告标志和中文警示说明。

（2）工作状态指示灯

定位 CT 机房患者入口防护门上方拟设置工作状态指示灯，灯箱上拟设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，并与机房防护门有效关联。

（3）闭门装置

平开机房门拟设有自动闭门装置，推拉式机房门拟设有曝光时关闭机房门的管理措施，防护门关闭的情况下，设备才能出束照射。

（4）急停按钮

在定位 CT 机房控制室设置 1 个急停按钮，在出现紧急情况下，按下急停按钮，即可停止 X 射线系统出束。

（5）观察窗

定位 CT 机房控制室侧墙体上设置有观察窗，可有效观察到患者和受检者状态。

（6）防护用品

医院拟为患者配备的个人防护用品主要有铅橡胶性腺防护围裙、铅橡胶颈套等，防护用品防护能力均不低于 0.5mm 铅当量。

图 10-7 医用电子加速器机房、射波刀机房和后装治疗机机房辐射安全设施位置示意图

4、核医学科-回旋加速器制药区项目

（1）回旋加速器室安全设施

门机联锁及延时开门：回旋加速器机房的防护门与回旋加速器的高压设置联锁，当防护门未关闭到位时，回旋加速器无法开启高压出束；当回旋加速器工作过程中误操作打开防护门时，回旋加速器立即停止出束。同时防护门拟设置有延时开门装置，回旋加速器停机后，需等待一段时间防护门才可以打开。

急停开关：回旋加速器机房进出口、控制台操作台合适位置上各设置 1 个急停开关，人员滞留在机房内时就可以按下开关，实现回旋加速器停止出束；

紧急开门装置：回旋加速器机房入口门内侧，靠近防护门处设置 1 个紧急开门装置，当人员被关在机房内紧急情况下按下开关，可实现防护门从内部打开，同时回旋加速器停止出束；

固定式剂量报警仪装置：回旋加速器机房防护门内设置固定式剂量率仪监测探头。

声光报警装置和工作状态指示灯：回旋加速器机房防护门外设置红黄绿三色工作指示灯信号，用于提示机房内设备的运行状态。红灯亮表示回旋加速器正在出束工作；黄灯亮表示回旋加速器已停机，机房屏蔽门处于打开状态，非职业工作人员禁止入内；绿灯亮表示回旋加速器已停机，机房屏蔽门处于关闭状态；辐射报警灯与回旋加速器准备出束状态联锁，准备出束时发出警示并伴有蜂鸣声；

电离辐射警告标志：回旋加速器工作场所入口醒目位置设置电离辐射警告标志；

视频监控：回旋加速器机房内拟安装视频监控，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；

清场措施：回旋加速器开机运行前，工作人员进入机房巡视，确认机房内无人员滞留后关闭机房防护门，然后通过操作台的监控器再次确认机房内无人员滞留后，方可开机运行。

图 10-8 回旋加速器加速器机房辐射安全设施位置示意图

（2）正电子药物合成室安全设施

电离辐射警告标志：正电子药物合成室入口醒目位置设置电离辐射警告标志；

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

固定式剂量报警仪装置：正电子药物合成室所在房间内安装固定式剂量率仪，当探测到剂量率超过设置阈值时，则有声光报警，人员马上撤离。

视频监控：拟安装视频监控系统，便于辐射工作人员观察操作场所内及周边的情况。

（3）全检质控室工作场所安全设施

电离辐射警告标志：全检质控室入口醒目位置设置电离辐射警告标志；

固定式剂量报警仪装置：全检质控室所设置固定式剂量率仪，当探测到剂量率超过设置阈值时，则质控室内声光报警，人员马上撤离。

5、核医学科其他项目

（1）电离辐射警告标志

医院拟将核医学科划分为控制区和监督区，在控制区入口处（SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、给药室、注射室、废物间、注射后候诊区、抢救室、留观室和甲癌治疗室等）均拟设置有符合规范的电离辐射警告标志；

（2）工作状态指示灯、闭门装置

SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房防护门门口上方拟设置工作状态指示灯，且工作状态指示灯与机房相通的门设置联锁装置，用于提示机房内设备的运行状态；机房门设置闭门装置。

（3）语音对讲、监控装置

医院拟在 SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、注射室、注射后候诊室和甲癌治疗室等与控制室内设置双向语音对讲装置和监控系统，且 SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房控制台处安装有观察窗，在诊断过程中医务人员可以及时观察病人情况和与病人交流，保证诊断质量和防止意外情况的发生。

（4）对控制区内带药病人的监督管理

医院拟做好本项目控制区的监督管理工作，防止无关人员入内；拟在控制区出入口设置单向门禁系统，实现“入口只进不出，出口只出不进”的单向路线；加强对控制区内注射放射性药物病人的监督管理，避免其给药后随意走动；同时应告知检查完成后病人离开路线，防止其对公众造成不必要照射。

（5）“两区”内安全防护措施规定

工作人员离开工作室前洗手和做表面污染监测，如其污染水平超过规定限值，应采取去污措施。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。

（6）工作人员防护用品

医院拟为本项目工作人员配备的辐射防护装置及个人防护用品主要有铅橡胶围

裙、铅橡胶围脖、铅橡胶帽子、铅防护眼镜、剂量报警仪、个人剂量计等。

（7）表面污染检测

医院拟在核医学出口缓冲间内安装表面污染仪，用于患者就诊后的表面污染水平检测。

6、介入诊断项目

（1）电离辐射警告标志

DSA 机房各入口处拟设置有“当心电离辐射”警告标志和中文警示说明。

（2）工作状态指示灯及门灯联动装置

DSA 机房患者入口防护门上方拟设置工作状态指示灯，灯箱上拟设置如“射线有害、灯亮勿入”的可视警示语句，且工作状态指示灯和与机房相通的门能有效联动，防护门关闭的情况下，工作状态指示灯才亮。平开机房门应设有自动闭门装置，推拉式机房门应设有曝光时关闭机房门的管理措施。电动推拉门宜设置防夹装置。

（3）急停按钮

DSA 控制室设置 1 个急停按钮，DSA 机房内的治疗床边操作面板自带 1 个急停按钮，各按钮分别与 X 射线系统连接，在出现紧急情况下，按下急停按钮，即可停止 X 射线系统出束。

（4）观察窗及对讲装置

DSA 控制室墙体上设置有观察窗，可有效观察到患者和受检者状态防护门开闭情况。DSA 机房控制室拟设置对讲装置，方便机房外工作人员与患者交流。

（5）个人防护用品

医院拟为本次扩建的 DSA 项目工作人员配备的辐射防护装置及个人防护用品主要有铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套、剂量报警仪、个人剂量计等，医院拟购置的各类防护用品除介入防护手套防护能力不低于 0.025mm 铅当量外，其余防护用品防护能力均不低于 0.5mm 铅当量。本项目 DSA 设备自带铅防护吊帘、床侧防护帘等辅助防护设施。

（6）人员监护

根据《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）“5.3 佩戴 5.3.2”中要求“对于如介入放射学、核医学放射药物分装与注射等全身受照不均匀的工作情况，应在铅围裙外锁骨对应的领口位置佩戴剂量计”和“5.3 佩戴 5.3.3”中 “对于 5.3.2 所

述工作的情况，建议采用双剂量计监测方法（在铅围裙内躯干上再佩戴另一个剂量计），且宜在身体可能受到较大照射的部位佩戴局部”剂量计（如头箍剂量计、腕部剂量计、指环剂量计等）”。

本项目辐射工作人员均应配备有个人剂量计（每名介入治疗医生需配备2套个人剂量计），并要求在上班期间必须佩戴。医院定期（每季度一次）将个人剂量计送有资质单位进行检测，定期安排其在有相应资质医院体检，检测结果存入个人剂量档案。

（7）规章制度

完善并落实射线装置相关的安全使用制度、管理制度，从事辐射工作的医务人员均须参加放射工作的培训与辐射安全培训考核。医务人员在操作过程中遵守以上制度，严格按操作程序，避免发生事故。

（8）其他辐射安全措施

介入治疗需要长时间的透视和大量的摄片，对患者和医务人员来说辐射剂量较高，因此在评估介入放射治疗的效应和操作时，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治疗的防护工作：

（1）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。

（2）一般说来，降低患者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，以减少患者和介入人员的剂量。

（3）所有在介入治疗手术室内的工作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。

（4）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。

（5）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，比如脉冲透视、优化滤线器、除滤线栅、图像处理、低剂量透视等方法。

（6）加强DSA设备的质量保证工作，设备的球管与发生器、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。

（7）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橡胶围裙、机器自带的铅防护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（铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜及介入防护手套等）外，应着重考虑 DSA 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。本项目DSA设备自带床侧防护帘、铅防护吊帘及铅悬挂防护屏，以上组合屏蔽防护措施的设置，能够有效降低介入手术医务人员的吸收剂量。

三、监测仪器和防护用品

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，开展放射诊疗的单位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，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。

表 10-8 个人防护用品和辅助防护设置配置符合性

项目	分项		《放射诊断放射防护要求》（GBZ130-2020）要求	本项目拟采取措施
定位CT项目	工作人员	个人防护用品	/	/
		辅助防护设施	/	/
	受检者	个人防护用品	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	1件铅方巾、1件铅橡胶颈套
		辅助防护设施	可调节防护窗口的立位防护屏 选配：固定特殊受检者体位的各种设备	1扇立位防护屏
DSA项目	工作人员	个人防护用品	铅橡胶围裙、铅橡胶颈套、铅防护眼镜、介入防护手套 选配：铅橡胶帽子	16件铅橡胶围裙、16件铅橡胶颈套、16顶铅橡胶帽子、16副铅防护眼镜、8副介入防护手套
		辅助防护设施	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	铅防护吊帘、床侧防护帘
	受检者	个人防护用品	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	2件铅橡胶围脖、2顶铅橡胶帽子、2件铅方巾
		辅助防护设施	/	/
项目	**分项**		**《核医学放射防护要求》**	**本项目拟采取措施**

			（GBZ120-2020）要求	
普通核医学和SPECT场所	工作人员	必备	铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖	6件铅橡胶衣、6副铅防护眼镜
		选备	铅橡胶帽、铅玻璃眼镜	
	患者或受检者		/	/
正电子放射性药物和^{131}I的场所	工作人员	必备	放射性污染防护服	若干套放射性污染防护服
		选备	/	
	患者或受检者		/	/

南京鼓楼医院拟为本项目配备辐射巡测仪1台、固定式剂量监测报警装置8套、表面沾污仪2台及个人剂量报警仪40台（每座机房2台）。医院拟为辐射工作人员配备铅橡胶围裙、铅橡胶围脖、铅橡胶帽子、铅防护眼镜（不低于0.5mm铅当量）及介入防护手套（不低于0.025mm铅当量）等个人防护用品（具体配备情况见表10-8）。辐射工作人员工作时将佩带个人剂量计，以监测累积受照情况。医院拟定期组织辐射工作人员进行健康体检，并将按相关要求建立辐射工作人员个人剂量监测档案和职业健康监护档案。

四、工作制度及人员配置

工作制度：本项目辐射工作人员年工作天数为250天，实行8小时工作制。

人员配置：本项目拟配置辐射工作人员约98人，均为医院新聘辐射工作人员，配置至本项目后，不从事其他辐射工作。

表10-9 本项目人员配置情况

项目类型	本次建设项目	
肿瘤中心	医用电子直线加速器项目	拟配备放疗医师2名
		拟配备本科学历的物理师3名
		拟配备放射技师6名，维修工程师1名
	射波刀项目	拟配备放疗医师1名
		拟配备本科学历的物理师1名
		拟配备放射技师2名，维修工程师1名
	后装治疗机项目	拟配备放疗医师1名
		拟配备本科学历的物理师1名
		拟配备放射技师2名，维修工程师1名
	模拟定位机项目	医学影像学专业技术人员2名
		拟配备放射技师2名
核医学科	护士10名	
	核医学影像学专业技术人员6名	
	核医学医生8名	

介入诊断项目	二层杂交手术室	技师 4 名，介入医生 4 名，护士 4 名
	四层介入中心 DSA 机房	技师 12 名，介入医生 12 名，护士 12 名

后期随着工作量的不断增加，医院也计划持续引进技术熟练的介入科、核医学科和肿瘤科医生、技师及护士，医院应做好辐射工作人员管理工作。

五、环保投资

为了保证本项目安全持续开展，根据相关要求，医院将投入一定资金建设必要的环保设施，配备相应的监测仪器和防护用品，本项目环保投资估算见表 10-10。

表 10-10 环保设施及投资估算一览表

项目		规定的措施	数量	金额（万元）
医用电子直线加速器项目	场所设施	四周墙体+迷道+屋顶防护	/	
		铅防护门	3 樘	
		通风系统	3 套	
	控制台及安全联锁	视频监控及对讲装置	3 套	
		治疗室门与高压联锁	3 套	
	警示装置	入口当心电离辐射警告标识	3 套	
		入口有加速器工作状态显示	3 套	
		工作场所分区及标识	3 套	
	治疗室紧急设施	屏蔽门内开门按钮	3 套	
		治疗室门防夹人装置	3 套	
		紧急照明或独立通道照明系统	3 套	
		治疗室内急停按钮	3 套	
	监测设备	固定式报警仪	3 套	
		便携式辐射巡测仪	1 个	
		个人剂量报警仪	6 个	
		中子辐射剂量率仪	1 个	
		个人剂量计	若干	
射波刀项目	场所设施	四周墙体+迷道+屋顶防护	/	
		铅防护门	1 樘	
		通风系统	1 套	
	控制台及安全联锁	视频监控及对讲装置	1 套	
		治疗室门与高压联锁	1 套	
	警示装置	入口当心电离辐射警告标识	1 套	
		入口有加速器工作状态显示	1 套	
		工作场所分区及标识	1 套	
	治疗室紧急设施	屏蔽门内开门按钮	1 套	
		治疗室门防夹人装置	1 套	
		紧急照明或独立通道照明系统	1 套	
		治疗室内急停按钮	1 套	
	监测设备	固定式报警仪	1 套	

		便携式辐射巡测仪	共用	
		个人剂量报警仪	2 个	
		个人剂量计	若干	
后装治疗机项目	场所设施	四周墙体+迷道+屋顶屏蔽	/	
		铅防护门	1 樘	
	联锁装置	视频监控及对讲装置	1 套	
		门机联锁装置	1 套	
		音响提示	1 套	
	警示设施	入口当心电离辐射警告标识	1 套	
		防护门上方工作状态指示灯	1 套	
	急停装置	紧急开门按钮	1 套	
		治疗室内急停按钮	1 套	
	监测设备	固定式报警仪	1 套	
		便携式辐射巡测仪	共用	
		个人剂量报警仪	2 个	
		个人剂量计	若干	
定位 CT 项目	场所设施	四周墙体+屋顶屏蔽	/	
		铅防护门	4 樘	
		观察窗	2 个	
	警示设施	出入口处电离辐射警告标志	2 套	
		工作状态显示	2 套	
	监测仪器	便携式辐射巡测仪	共用	
		个人剂量报警仪	4 个	
		个人剂量计	若干	
核医学科项目	场所设施	四周墙体+屋顶屏蔽	/	
		出入口缓冲间		
		铅防护门		
		观察窗	3 套	
		负压工作场所	3 个	
		病人专用卫生间	若干	
		衰变池	2 套	
		放射性废物暂存间	/	
		视频监控与对讲系统	2 套	
		出入口处电离辐射警告标志	若干	
		工作状态显示	4 套	
		进出口单向门禁	若干	
	监测设备	个人剂量报警仪	10 个	
		个人剂量计	若干	
		固定式报警仪	3 套	
		便携式辐射巡测仪	共用	

		表面污染水平检测仪	2 个	
DSA 项目	场所设施	四周墙体+屋顶屏蔽	/	
		铅防护门	24 樘	
		观察窗	8 个	
	警示设施	出入口处电离辐射警告标志	8 套	
		工作状态显示	8 套	
	监测仪器	便携式辐射巡测仪	共用	
		个人剂量报警仪	16 个	
		个人剂量计	若干	

本项目总投资　　万元，环保投资约　　万元，占总投资的　　。今后医院在核技术利用项目实践中，应根据国家发布的法规内容，结合医院实际情况对环保设施做补充，使之更能满足实际需要。同时医院应定期对环保设施、监测仪器等进行检查、维护。

三废的治理

一、肿瘤中心

（一）医用电子直线加速器项目

1、废水治理

本项目医用电子直线加速器冷却系统采用蒸馏水，内循环使用不外排，不会产生废水。本项目工作人员产生生活污水依托医院拟建的污水处理站处理。

2、废气治理

为了减少废气对人员产生的影响，3 座医用电子直线加速器机房均设置有独立的通排风系统。根据设计院提供的设计方案，本项目 3 座医用电子直线加速器机房有效容积均约为 468m^3，3 座机房的排风风量拟设计不低于 2500m^3/h，则每小时的换气次数约为 5.34 次，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“换气次数不少于 4 次/h”的要求。

本项目 3 座医用电子直线加速器机房均采用机械进排风，进风管道从加速器机房迷道入口防护门上方穿过进入加速器机房，进风管道采用“S”型管道，机房进风口位于机房顶部共 2 处，排风口位于机房距离地面约 30cm 处。排风管道沿迷道上方穿过迷道外墙，同样采用“S”型管道，室内气体由通排风系统经高效排风过滤器统一抽排至肿瘤中心东北侧的排风机房再由楼顶排放。此处排风口位于建筑物屋顶，周围扩散条件良好，排风口位置附近无门、窗或人流较大的过道等位置。通排风管道走向

示意图见图 10-8。

3、固体废物处理措施

本项目医用电子直线加速器工作过程不产生固体废物。

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。医院应将更换的废靶件交有资质单位收贮。

（二）射波刀项目

1、废水治理

本项目射波刀冷却系统采用蒸馏水，内循环使用不外排，不会产生废水。本项目工作人员产生生活污水依托医院拟建的污水处理站处理。

2、废气治理

为了减少废气对人员产生的影响，射波刀机房设置有独立的通排风系统。根据设计院提供的设计方案，本项目射波刀机房有效容积约为 362m^3，机房的排风风量拟设计不低于 2800m^3/h，则每小时的换气次数约为 7.73 次，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“换气次数不少于 4 次/h”的要求。

本项目射波刀机房采用机械进排风，进风管道从射波刀机房迷道入口防护门上方穿过进入射波刀机房，进风管道采用“S”型管道，机房进风口位于机房东北侧顶部共 2 处，排风口位于机房西南侧距离地面约 30cm 处。排风管道沿迷道上方穿过迷道外墙，同样采用“S”型管道，室内气体由通排风系统经高效排风过滤器统一抽排至肿瘤中心东北的排风机房再由楼顶排放。此处排风口位于建筑物屋顶，周围扩散条件良好，排风口位置附近无门、窗或人流较大的过道等位置。通排风管道走向示意图见图 10-8。

3、固体废物处理措施

本项目射波刀工作过程不产生固体废物。

（三）后装治疗机项目

1、废水治理

本项目工作人员和患者产生生活污水依托医院拟建的污水处理站处理。

2、废气治理

为了减少废气对人员产生的影响，后装治疗机机房设置有独立的通排风系统。根

据设计院提供的设计方案，本项目后装治疗机机房有效容积约为 114m^3，机房的排风风量拟设计不低于 600m^3/h，则每小时的换气次数约为 5.26 次，满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）中“换气次数不少于 4 次/h”的要求。

本项目后装治疗机采用机械进排风，进风管道从机房迷道入口防护门上方穿过进入后装治疗机机房，进风管道采用“S”型管道，机房进风口位于机房东南角顶部共 1 处，排风口位于机房西北侧距离地面约 30cm 处。排风管道沿迷道上方穿过迷道外墙，同样采用“S”型管道，室内气体由通排风系统经高效排风过滤器统一抽排至肿瘤中心东北侧的排风机房再由楼顶排放。此处排风口位于建筑物屋顶，周围扩散条件良好，排风口位置附近无门、窗或人流较大的过道等位置。通排风管道走向示意图见图 10-8。

3、固体废物处理措施

本项目后装治疗机拟使用 ^{192}Ir 放射源，随着核素的自然衰变，^{192}Ir 放射源的活度不断降低，当 ^{192}Ir 放射源使用到一定年限后，会产生退役的 ^{192}Ir 放射源，退役 ^{192}Ir 放射源由原厂家回收处置。

（四）定位 CT 项目

1、废气治理

定位 CT 在开机出束期间，产生的 X 射线与空气中的氧气相互作用产生少量的臭氧(O_3)。

本项目定位 CT 机房设有通排风系统，其内通风口设置在机房距离地面约 0.3m 处，室内气体由通排风系统统一抽排至其所在建筑楼顶排放。

产生的臭氧通过换气系统排入环境大气后，经自然分解扩散，对环境产生影响较小。从保护患者、医护人员的健康安全角度考虑，本项目辐射场所能保持较好的通风，其通风系统进、排风口位置的设置合理。通排风管道走向示意图见图 10-8。

2、固体废物

本项目肿瘤科工作人员产生的生活垃圾不属于医疗废物，集中暂存于院区内拟建的生活垃圾暂存间，由环卫部门定期统一收集、清运至垃圾处理厂处置。

同时，医院拟设有医疗废物暂存间，产生的医疗废物在此集中暂存，交由有资质单位进行统一收集、清运和处置。

3、废水

医院拟建污水处理站一座，生活污水经污水处理站处理达到《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466－2005）中的表 2 预处理标准后排入市政污水管网进入城市污水处理厂处理。医院污水处理站设计处理能力能够满足本项目生活污水及医疗废水产生量和排放量的排放需求。

图 10-8 肿瘤中心通排风管道走向示意图

二、核医学科

本项目运行期产生的主要放射性“三废”为工作场所生产，使用非密封性同位素过程中产生的含放射性固废、放射性废水和放射性废气，核医学拟采取以下“三废”防治措施。

（一）放射性废气

1、核医学科-回旋加速器制药区

本项目核医学科-回旋加速器制药区工作场所排风管道分为 3 支，其中 1 支单独连接正电子药物合成热室内设置的手套箱，第 2 支单独连接回旋加速器机房，第 3 支单独连接回旋加速器制药区其余用房。放射性药物的各项操作均在正电子药物合成热室内手套箱进行，手套箱由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（风速应不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的手套箱排风口处风速不得低于 0.5m/s。场所内的通排风系统需保证非密封放射性物质工作为负压工作场所。

该工作场所产生的废气经由 3 根排风管道排至先进技术楼楼顶，在工作场所排风管道末端均配置高效排风过滤器+活性炭吸附装置二级处理设施。

工作场所各排风管道必须密封良好，不与先进技术楼其他排风管道相通，过滤器及活性炭需定期更换，更换后的活性炭经贮存 30 天后作为医疗废物处置。

2、核医学科-影像中心

本项目核医学科-影像中心工作场所排风管道分为 3 支，其中 1 支单独连接手套箱，放射性药物的各项操作均在手套箱内进行，手套箱由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（风速应不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的手套箱排风口处风速不得低于 0.5m/s；第 2 支单独连接储源室（用于存放校准源用），其余排风管连接各注射后候诊区、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/MRI 机房和留观室等。场所内的通排风系统需保证非密封放射性物质工作为负压工作场所。

工作场所产生的废气经由 3 根排风管道排至先进技术楼楼顶，在工作场所排风管道末端均配置高效排风过滤器+活性炭吸附装置二级处理设施。

工作场所各排风管道必须密封良好，不与先进技术楼其他排风管道相通，过滤器及活性炭需定期更换，更换后的活性炭经贮存 30 天后作为医疗废物处置。

3、核医学科-核素治疗中心

本项目核医学科-核素治疗中心工作场所排风管道分为 2 支，其中 1 支单独连接全自动分装仪，放射性药物的各项操作均在全自动分装仪内进行，全自动分装仪由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（风速应不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的全自动分装仪排风口处风速不得低于 0.5m/s；其余排风管连接各甲癌病房等。场所内的通排风系统需保证非密封放射性物质工作为负压工作场所。

工作场所产生的废气经由 2 根排风管道排至先进技术楼楼顶，在工作场所排风管道末端均配置高效排风过滤器+活性炭吸附装置二级处理设施。

工作场所各排风管道必须密封良好，不与先进技术楼其他排风管道相通，过滤器及活性炭需定期更换，更换后的活性炭经贮存 180 天后作为医疗废物处置。

核医学科各工作场所通排风管道走向示意图见图 10-9~图 10-11。

图 10-9 核医学科-回旋加速器制药区通排风管道走向示意图

图 10-10 核医学科-影像中心通排风管道走向示意图

图 10-11 核医学科-核素治疗中心通排风管道走向示意图

（二）放射性废水

本项目工作场所产生的含放射性废水包括：工作人员操作过程手部受到微量污染的清洗废水，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水，以及患者冲洗排便用水。

工作场所产生的放射性废水通过预埋好的管道排至医院拟建的 2 组衰变池系统（位于先进技术楼东侧空地，地下结构）内，放射性废水先排至集水坑再通过污水提升泵排至放射性废水衰变系统（见图 10-12 和图 10-13，排水管道走向示意图详见附图 13 和附图 14），待放射性废水暂存时间规定时间后通过管道排至医院污水处理站处理达标后排入市政管网。

本项目核医学科拟设计 2 组衰变池，其中核医学科-影像中心（不含甲吸和甲亢）和回旋加速器制药区产生的放射性废水排至第 1 组衰变池系统，该系统包括 4 个衰变小池和配套设备，单个衰变小池有效容积约为 39m^3，衰变池系统总容积约为 156m^3。

核医学科-核素治疗中心（含甲吸和甲亢）产生的放射性废水排至第 2 组衰变池系统，该系统包括 2 个降解池和 4 个衰变小池和配套设备，单个衰变小池有效容积约为 215m^3，衰变池系统总容积约为 860m^3。

图 10-12 本项目核医学科使用的放射性废水衰变池系统示意图（立面图）

图 10-13 本项目核医学科使用的放射性废水衰变池系统示意图（平面图）

医院拟建的放射性废水衰变系统通过专门管路收集放射性废水，采用间歇式衰变的处理方式设计。放射性废水衰变系统利用一台人机界面全面监控放射性废水的水量及阀门状态等信息，可掌控放射性废水的流向，避免出现放射性废水的意外排放以及不可追溯的事故。同时，衰变池出水末端设置有采样孔，便于排放前的取样。

1、处理措施

本项目工作场所放射性废水将排入拟建的放射性废水衰变系统，该衰变池系统均共设 4 个相同体积的放射性废水衰变槽体，放射性废水衰变系统采用并联排放运行。

2、衰变池的运行原理

核医学科产生的放射性废水先进入降解池进行初级沉淀后或直接排入第一个衰变池中，待第一个衰变池的废水装满后关闭第一个衰变池的进水阀门，打开第二个衰变池的进水阀门，核医学科的放射性废水通过降解池或直接排入第二衰变池内，此时第一个衰变池不外排放射性废水，待第二个衰变池的废水装满后，关闭第二个衰变池的进水阀门，打开第三个衰变池的进水阀门，此时核医学科的放射性废水通过降解池或直接进入第三个衰变池内，待第三个衰变池即将装满后，关闭第三个衰变池的进水阀门，打开第四个衰变池的进水阀门，此时核医学科的放射性废水通过降解池或直接进入第四个衰变池内，待第四个衰变池即将装满前，此时打开第一个衰变池的排水阀门，以此类推，最终将放射性废水排至医院污水处理站。4 个衰变池以此往复运行。

3、衰变池容量可行性分析

工作场所放射性废水主要来源是工作台面、地面去污时产生的放射性废水，工作人员操作过程中手部受到微量污染的清洁废水，患者冲洗排便废水。

患者产生的废水量：参考《建筑给排水设计规范》（GB 50015-2019）表 6.2.2 的医生生活用水量定额，同时根据该建设项目预期日检查人数，则本项目废水产生情况见表 10-9 和表 10-10：

表 10-9 南京鼓楼医院核医学科-影像中心及回旋加速器制药区废水产生情况一览表

序号	用水类别	单人单次废水量	日诊疗人数	日产生废水量
1	使用 ^{99m}Tc 患者	6L	30 人次	180L
2	使用 ^{18}F 患者	6L	30 人次	180L
3	使用 ^{11}C 患者	6L	2 人次	12L
4	使用 ^{13}N 患者	6L	2 人次	12L
5	使用 ^{15}O 患者	6L	2 人次	12L
6	使用 ^{68}Ga 患者	6L	5 人次	30L
7	工作人员	20L	4 人次	80L
8	场所清洗废水	200L/日（含回旋加速器制药区）		200L
合计				706L（约 0.71m^3）

注：因使用放射性核素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 治疗骨转移的患者，在就诊前会提前如厕，注射相对应的放射性药物后随即离开工作场所，不在工作场所停留，故均不考虑其产生的放射性废水对衰变池容积的影响。

表 10-10 南京鼓楼医院核医学科-核素治疗中心及一层甲吸甲亢患者废水产生情况一览表

序号	用水类别	单人单日废水量	日诊疗人数	日产生废水量
1	使用 ^{131}I 患者（甲癌）	150L/天	5 人次	750L
2	使用 ^{131}I 患者	6L	20 人次	120L
3	工作人员	20L	4 人次	80L
4	场所清洗废水	150L/日		150L
合计				1100L（约 1.1m^3）

根据衰变池排水的排水方式，待最后一个衰变池装满时，才排放第一个衰变池的废水。核医学科-影像中心日产生放射性废水约 0.71m^3，3 个衰变池的容积为 117m^3，即装满 3 个池子需要约 164d 大于《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中规定的 30d 的要求，故本项目核医学科-影像中心的衰变池的容积可满足废水处理的要求。

核医学科-核素治疗中心日产生放射性废水约 1.1m^3，3 个衰变池的容积为 645m^3，即装满 3 个池子需要约 586d 大于《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中规定的 180d 的要求，故本项目核医学科西区的衰变池的容积可满足废水处理的要求。

医院规定：

（1）规定患者诊疗期间使用专用厕所，不得使用其他厕所。

（2）专用厕所应具备使病人排泄物迅速全部冲洗入池的条件，而且随时保持便池周围清洁。

（三）放射性固废

1、本项目产生的放射性废物主要为：工作人员操作过程产生的一次性卫生用品、垫料等（约 0.2kg/d），以及定期更换下的废高效过滤器滤芯及废活性炭等。工作场所拟将上述放射性固体废物（废活性炭除外）采用专用塑料包装袋专门收集，包装袋要标明收贮时间、种类及数量等内容，按序封闭暂存于放射性衰变桶（10mm 铅当量）内，最后转移至废物间内，让放射性物质自行衰变，经检测符合排放标准后，按照医疗废物交由有资质单位进行处置。更换下来的废活性炭暂存在废物间内，待其暂存满 180d 后作为医疗废物处置。

医院应做到：

①放射性废物应收集在具有防护外层和电离辐射标志的固体废物桶中，固体废物桶应避开辐射工作人员和经常走动的地方，装满后的废物袋应密封，不破漏；放射性废物每袋重量不超过 20kg。

②存放废物的容器必须安全可靠，并在铅废物桶的显著位置处标有废物类型、核素种类、比活度范围和存放的日期等说明。

③放射性废物的收集、暂存和处置应满足《放射性废物安全管理条例》（国务院令第 612 号）的相关规定。

（1）放射性废物应收集在具有防护外层和电离辐射标志的固体废物桶中，固体废物桶应避开辐射工作人员和经常走动的地方，装满后的废物袋应密封，不破漏，并及时转至放射性废物储存室内，并放入专用容器中贮存。

（2）在放射性废物储存室出入口设电离辐射标志，存放废物的容器必须安全可靠；并在废物桶的显著位置处标有废物类型、核素种类、比活度范围和存放的日期等说明。

（3）放射性废物的收集、暂存和处置应满足《放射性废物安全管理条例》（国务院令第 612 号）的相关规定。

2、本项目 PET/CT 和 PET/MRI 拟使用校准源，随着核素的自然衰变，校准源的活度不断降低，当校准源使用到一定年限后，会产生退役的校准源，校准源交由城市放射性废物库处理。

（四）非放射性污染防治措施

本项目运行期间产生的非放射性污染物主要是噪声、生活污水、生活垃圾。具体治理措施如下：

（1）生活污水和生活垃圾处理措施

本项目工作人员工作中会产生少量的生活污水、生活垃圾和办公垃圾，候诊病人候诊过程中产生少量的生活污水和生活垃圾，依托医院已有的污水处理系统和生活垃圾收集系统进行处理。

（2）废气处理措施

本项目工作过程中放射性同位素产生的γ射线会使空气电离产生少量的臭氧(O_3)和氮氧化物(NO_X)，少量臭氧和氮氧化物可通过动力排风装置排出，臭氧 50 分钟后自动分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

三、介入诊断与治疗项目

1、废气：DSA 机房内的空气在 X 射线作用下分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，通过动力排风装置排入大气。

2、废水：工作人员和部分患者产生的普通生活污水，由院内污水处理站统一处理。

3、固体废物：工作人员产生的生活垃圾，分类收集后，将交由城市环卫部门处理。

本项目 DSA 手术过程中产生的棉签、纱布、手套、器具等医疗废物暂存在机房内的废物桶，手术结束后集中收集，作为医疗废物由医院统一委托有资质单位进行处置。

表 11 环境影响分析

建设阶段对环境的影响

本项目各机房及工作场所建设属于整个南京鼓楼医院江北院区二期基础建设的部分工程，施工期阶段环境影响已于江北院区二期建设项目的环境影响报告书中进行了详细描述，建设时将产生施工噪声、扬尘，同时会产生一定的废水、废气和建筑垃圾等。

建设施工时对环境会产生如下影响：

1、大气：本项目在建设施工期需进行的挖掘地基、打桩、混凝土浇筑等作业，各种施工将产生地面扬尘，另外机械和运输车辆作业时排放废气和扬尘，但这些方面的影响仅局限在施工现场附近区域。针对上述大气污染采取以下措施：

①及时清扫施工场地，并保持施工场地一定的湿度；

②车辆在运输建筑材料时尽量采取遮盖、密闭措施，以减少沿途抛洒；

③施工路面保持清洁、湿润，减少地面扬尘。

2、噪声：整个建筑施工阶段，如打桩机、混凝土搅拌机、卷扬机及载重车辆等在运行中都将产生不同程度的噪声，对周围环境造成一定的影响。在施工时需严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523-2011）的要求，尽量使用噪声低的先进设备，同时严禁夜间进行强噪声作业，如需连续施工，在夜间施工而产生环境噪声污染时，按《中华人民共和国噪声污染防治法》的规定，需取得当地人民政府或有关主管部门的证明，并公告附近居民。

3、固体废物：项目施工期间，会产生一定量以建筑垃圾为主的固体废弃物，委托有有资质的单位清运，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。在施工阶段，将合理安排施工计划，先行修建临时化粪池，施工人员生活污水排入临时化粪池，及时清理。

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内局部区域，对周围环境影响较小。

运行阶段对环境的影响

一、辐射环境影响分析

（一）医用电子直线加速器项目

南京鼓楼医院拟在江北院区先进技术楼负一层肿瘤中心新建3座医用电子直线加速器机房，并配备3台医用电子直线加速器，型号未定，其X射线能量均≤15MV；电子线能量均≤22MeV；射线最大出射角：28°；1m处输出剂量率：15MV时最高剂量率为6Gy/min，10MV时最高剂量率为24Gy/min。

医院本次新建的3座医用电子直线加速器机房呈并排布置，防护一致，但1#机房面积最小，故选取1#医用电子直线加速器机房进行辐射影响分析。

根据《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/T 201.2-2011）的要求，在本项目医用电子直线加速器机房外设定关注点。从保守角度出发，在医用电子直线加速器机房设计的尺寸厚度基础上，假定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。

本项目1#医用电子直线加速器机房的关注点设定如图11-1。

图11-1-1 医用电子直线加速器机房关注点布置图（剖面图）

图 11-1-2 医用电子直线加速器机房关注点布置图（平面图）

1、有用线束主屏蔽区宽度核算

使用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 1 部分：一般原则》（GBZ/T 201.1-2007）的相关公式计算有用线束主屏蔽区的宽度。

$$Y_p = 2[(a + SAD) \cdot tan\theta + 0.3]$$……公式 11-1

式中，Y_p——机房有用束主屏蔽区的宽度，m；

SAD——源轴距，m；

θ——治疗束的最大张角（相对束中的轴线）；

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。

根据图 11-1，将各参数代入公式 11-1 得出本项目的主屏蔽宽度核算结果并评价如下表：

表 11-1 主屏蔽区域宽度设计评价表

参数	取值		
	西南墙主屏蔽	东北墙主屏蔽	屋顶主屏蔽
a（m）	7.50	5.90	3.90
SAD（m）	1	1	1
θ（°）	14	14	14
计算宽度 Y_p（m）	4.84	4.04	3.04
实际宽度（m）	5.20	4.20	3.60
评价	满足	满足	满足

2、医用电子直线加速器对关注点产生的剂量估算（当 X 射线最大能量为 15MV，1m 处输出剂量率为 6Gy/min 时）

（1）主屏蔽区屏蔽效果预测（*a* 点、*b* 点和 *l* 点）

射线路径（射线类型）：$O_2 \rightarrow a$（主射线），$O_1 \rightarrow b$（主射线），$O_3 \rightarrow l$（主射线）。

使用 GBZ/T 201.2-2011 的相关公式计算有用线束主屏蔽核算，在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先计算有效厚度 Xe（cm），估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B，再计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率。

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta$$ ……公式 11-2

式中：*X*—设计屏蔽厚度，cm；

θ—斜射角。

$$B = 10^{-(X_e+TVL-TVL_1)/TVL}\cdots\cdots\text{公式 11-3}$$

式中，TVL_1（cm）和 TVL（cm）为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度，当未指明 TVL_1 时，TVL_1=TVL。可根据加速器 X 射线能量查 GBZ/T 201.2-2011 的附录 B 表 B.1。

本项目中，a 点、b 点、l 点相应厚度主屏蔽的 B 值核算见表 11-2。

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \cdot f \cdot B/R^2\cdots\cdots\text{公式 11-4}$$

式中，$\dot{H}_0$——加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶（以下简称靶）1m 处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h，本项目为 3.6×10^{8}μSv·m^2/h；

R——靶点至参考点的距离，m，本项目参考点为相应屏蔽体外 30cm；

f——对有用线束为 1，对泄漏辐射为泄漏辐射比率，0.1%。

将各参数代入模式计算，得到相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率$\dot{H}$（μSv/h），辐射剂量率计算参数和计算结果见表 11-2。

表 11-2 主屏蔽区外参考点辐射剂量率计算参数和计算结果

参数	西南墙主屏蔽（*a* 点）	东北墙主屏蔽（*b* 点）	屋顶主屏蔽（*l* 点）*
X（cm）	300 砼	300 砼	300 砼
X_e（cm）	300 砼	300 砼	300 砼
TVL（cm）	41	41	41
TVL_1（cm）	44	44	44
B	5.70×10^{-8}	5.70×10^{-8}	5.70×10^{-8}
R（m）	8.80	8.80	7.20
$\dot{H}_0$（μSv·m^2/h）	3.6×10^8	3.6×10^8	3.6×10^8
f	1	1	1
$\dot{H}$（μSv/h）	0.265	0.265	0.396
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平	2.5	10	10
评价结果	满足	满足	满足

注：*考虑地面混凝土层的屏蔽效果，但不考虑土层的屏蔽能力，关注点取室外地面。

（2）侧屏蔽墙和迷道外墙屏蔽效果预测（*f* 点，*e* 点和 *k* 点）

射线路径（射线类型）：$O\rightarrow f$（泄漏射线），$O\rightarrow e$（泄漏射线），$O_2\rightarrow k$（泄漏射线）。

泄漏辐射：估算方法类似主屏蔽区。TVL_1 和 TVL 为 GBZ/T 201.2-2011 附录 B 表 B.1 的泄漏辐射。f 点、e 点和 k 点辐射剂量率计算参数和计算结果见表 11-3。

表 11-3 侧屏蔽墙和迷道外墙泄漏射线辐射率计算参数和计算结果

参数	东南侧屏蔽墙（f 点）	西北侧屏蔽墙（e 点）	迷道外墙（k 点）
X（cm）	228.3 砼	160 砼	140 砼
X_e（cm）	228.3 砼	160 砼	149.7 砼
TVL（cm）	33	33	33
TVL_1（cm）	36	36	36
B	1.49×10^{-7}	1.75×10^{-5}	3.58×10^{-5}
R（m）	8.50	5.50	9.09
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.6×10^{8}	3.6×10^{8}	3.6×10^{8}
f	0.001	0.001	0.001
$\dot{H}$（μSv/h）	0.001	0.208	0.156
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平	2.5	8.0	8.0
评价结果	满足	满足	满足

注：X_e 由图纸中直接测量所得。

（3）与主屏蔽区相连的次屏蔽区的屏蔽效果预测（d_1 点、d_2 点及 m_1 点、m_2 点）

A：射线路径（射线类型）：$O_1\rightarrow O\rightarrow d_1$（散射射线），$O_1\rightarrow O\rightarrow d_2$（散射射线），$O_3\rightarrow O\rightarrow m_1$（散射射线），$O_3\rightarrow O\rightarrow m_2$（散射射线）。

$O\rightarrow d_1$（泄漏射线），$O\rightarrow d_2$（泄漏射 线），$O\rightarrow m_1$（泄漏射线），$O\rightarrow m_2$（泄漏射线）。 对于位置 d_1 点、d_2 点和 m_1 点、m_2 点，考虑泄漏辐射和散射辐射复合作用。

B：泄漏辐射计算

泄漏辐射屏蔽，估算方法类似主屏蔽区。f=0.001（泄漏辐射比率，根据《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/T 201.2-2011），加速器的泄漏辐射比率通常取 10^{-3}），TVL_1 和 TVL 保守取附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值。

C：散射辐射屏蔽计算

在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先计算或直接在结构图中量出该屏蔽墙的有效厚度 X_e（cm），估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B_s（其中患者散射辐射在混凝土中的什值层，查表 B.4 知，对于 15MV 射线，当散射角 30°时，患者散射辐射在混凝土中什值层为 31cm），再按照公式 11-5 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）。

$$\dot{H}=\frac{\dot{H}_0\cdot\alpha_{ph}\cdot(F/400)}{R_s^2}\cdot B\cdots\cdots\text{公式 11-5}$$

式中：$\dot{H}_0$：加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶（以下简称靶）1m

处的常用最高剂量率，μSv·m²/h，本项目为 3.6×10⁸μSv·m²/h；

α_{ph}：患者 400cm² 面积上垂直入射 X 射线散射至距其 1m（关注点方向）处的剂量比例，又称 400cm² 面积上的散射因子。

F：治疗装置有用线束在等中心处的最大治疗野面积，cm²，本项目为 40cm×40cm=1600cm²。

R_s：患者（位于等中心点）至关注点的距离，m。

叠加次屏蔽墙外泄漏辐射与患者一次散射辐射的瞬时剂量率值，将其与本项目确定的剂量率参考控制水平$\dot{H}_C$相比，判断机房屏蔽设计是否满足标准要求，计算结果见表 11-4。

表 11-4 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值

参数		东北墙次屏蔽（d_1 点、d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1 点、m_2 点）
X（cm）		160 砼	170 砼
Xe（cm）		176.5 砼	206.7 砼
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		3.6×10⁸	3.6×10⁸
泄漏辐射	TVL_1（cm）	36	36
	TVL（cm）	33	33
	B	5.51×10⁻⁶	6.68×10⁻⁷
	R（m）	8.60	7.54
	f	0.001	0.001
	$\dot{H}_l$（μSv/h）	0.027	0.004
散射辐射	TVL_1（cm）	31	31
	TVL（cm）	31	31
	R_s（m）	8.60	7.54
	α_{ph}	3.18×10⁻³	3.18×10⁻³
	B	2.02×10⁻⁶	2.14×10⁻⁷
	F	1600	1600
	$\dot{H}_s$（μSv/h）	0.125	0.017
$\dot{H}$泄漏辐射和散射辐射的复合作用（μSv/h）		0.152	0.021
$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）		8.0	8.0
评价		满足	满足

（4）迷道内墙屏蔽设计核算（g 点）

A：射线路径（射线类型）：$O_1 \rightarrow g$（泄漏射线）。

B：计算模式及参数选择：

g 点泄漏辐射剂量核算方法同 f 点。

O_1 至 g 点的距离 R=8.54m， 取泄漏因子 f=0.001， TVL_1 和 TVL 为附录 B 表 B.1 的泄漏辐射值，分别为 TVL_1=36cm，TVL=33cm。

C：预测计算结果

表 11-5 穿过迷道内墙在 g 点的泄露辐射剂量率估算值

参数	机房入口处（g 点）
X（cm）	150 砼
X_e（cm）	156.1 砼
TVL_1	36
TVL	33
B	2.29×10^{-5}
R（m）	8.54
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.6×10^{8}
f	0.001
$\dot{H}$（μSv/h）	0.113
$\dot{H}_c$（剂量率参考控制水平）	0.5μSv/h
评价	满足

注：X_e 由图纸中直接测量所得。

（5）机房入口防护门屏蔽核算

本项目配置的医用电子直线加速器 X 射线最大为 15MV，且有用线束不向迷道照射，根据 GBZ/T 201.2-2011，对于＞10MV 的医用电子直线加速器机房迷道散射辐射需要估算下列各项：

① 总中子注量 Φ_B

迷道的中子散射路径为“$o\rightarrow B\rightarrow P\rightarrow g$”。$B$ 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。在 B 点的总中子注量 Φ_B 按照公式 11-6 计算。

$$\Phi_B=\frac{Q_n}{4\pi d_1^2}+\frac{5.4Q_n}{2\pi S}+\frac{1.26\ n}{2\pi S}\cdots\cdots\text{公式 11-6}$$

式中三项分别是加速器机头外的杂散中子、杂散中子在治疗室内壁的散射中子及所形成的热中子。

式中：Φ_B—等中心处 1Gy 治疗照射时 B 处的总中子注量，（中子数/m²）/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，根据 NCRP No.151 中表 B.9 中列出的参数，本项目 Q_n 取 1.22×10^{12}（中子数/m²）/Gy；

d_1—等中心点 o 至 B 点的距离，m；

S—治疗机房的总内表面积（m²），包括四壁墙、顶面和底面，不包括迷路内各面积。上式用于铅屏蔽加速器机头。对于钨屏蔽的加速器机头，公式 11-6 的第一

项和第二项均乘以衰减因子 0.85。

在 B 点的总中子注量 Φ_B 计算结果见表 11-6。

表 11-6 总中子注量核算值

参数	取值
Q_n（中子数/Gy）	1.22×10^{12}
d_1（m）	6.22
S（m^2）	393.85
Φ_B（（中子数/m^2）/Gy）	5.79×10^{9}

② 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）处无防护门时的中子俘获 γ 射线的剂量率$\dot{H}_\gamma$（μSv/h）按公式 11-7 计算。

$$\dot{H}_\gamma = 6.9\times10^{-16}\cdot\Phi_B\cdot10^{-d_2/TVD}\cdot\dot{H}_0\cdots\cdots\text{公式 11-7}$$

式中：6.9×10^{-16}—该方法中的经验因子，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；

d_2—B 点至机房入口（g）点的距离，m；

TVD—将 γ 辐射剂量减至其十分之一的距离（称为什值距离），对于 15MV 加速器为 3.9m；

$\dot{H}_0$—等中心点处治疗 X 射线剂量率，本项目为 3.6×10^{8}μSv·m^2/h。

对于二阶迷路，公式 11-7 中以二阶迷路 d_{2a} 和 d_{2b} 之和代替 d_2，并且$\dot{H}_\gamma$为公式 11-7 的 1/3。

机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的中子俘获 γ 射线的剂量率$\dot{H}_\gamma$计算结果见表 11-7。

表 11-7 机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的中子俘获 γ 射线的剂量率核算值

参数	取值
Φ_B（（中子数/m^2）/Gy）	5.79×10^{9}
d_{2a}（m）	6.97
d_{2b}（m）	1.96
TVD（m）	3.9
$\dot{H}_\gamma$（μSv/h）	2.46

③ 机房入口的中子剂量率$\dot{H}_n$

机房内的中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的剂量率 $\dot{H}_n$（μSv/h）按公式 11-8 计算。

$$\dot{H}_n = 2.4\times10^{-15}\cdot\Phi_B\cdot\sqrt{\frac{S_0}{S_1}}\cdot\left[1.64\times10^{-(d_2/1.9)}+10^{-(d_2/T_n)}\right]\cdot\dot{H}_0\cdots\cdots\text{公式 11-8}$$

式中：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；

S_1—迷路横截面积，m^2；

d_2—B 点至机房入口（g）点的距离，m；

T_n—迷路中能量相对高的中子剂量组分公式 11-8 方括号中的第二项衰减至十分之一行经的距离（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 按公式 11-9 计算：

$$T_n = 2.06\sqrt{S_1}\cdots\cdots\text{公式 11-9}$$

机房内的中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的剂量率$\dot{H}_n$计算结果见表 11-8。

表 11-8 中子经迷路散射后在机房入口门外 30cm（g）处无防护门时的剂量率核算值

参数	取值
Φ_B（（中子数/m^2）/Gy）	5.79×10^9
S_0（m^2）	24.4
S_1（m^2）	11.3
d_{2a}（m）	6.45
d_{2b}（m）	2.06
T_n（m）	6.92
$\dot{H}_n$（μSv/h）	377.8

④入口防护门屏蔽

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%）聚乙烯板屏蔽。

本项目防护门屏蔽设计为含硼（5%）聚乙烯板 150mm，铅板 15mm，门外表面包裹有一定厚度的结构钢板。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$\dot{H}$（μSv/h）按公式 11-10 计算。

$$\dot{H} = \dot{H}_\gamma \cdot 10^{-(X_\gamma/TV\ \gamma)} + \dot{H}_n \cdot 10^{-(X_n/TV\ n)} + \dot{H}_{og} \cdot B_{og}\cdots\cdots\text{公式 11-10}$$

式中：B_{og}—防护门对$\dot{H}_{og}$的屏蔽透射因子，在$\dot{H}_{og}$相对 g 处的总剂量率较小时，可以忽略$\dot{H}_{og} \cdot B_{og}$项。

本项目中，$\dot{H}_{og}$为 0.113μSv/h，$\dot{H}_\gamma$为 2.46μSv/h，$\dot{H}_n$为 377.8μSv/h，$\dot{H}_{og}$相对 g 处的总剂量率较小，可以忽略$\dot{H}_{og} \cdot B_{og}$项。

入口处中子和中子俘获γ射线的能量均不是单一能量，TVL_γ和 TVL_n参见附录 C。因本项目中子屏蔽层为 150mm 含硼（5%）聚乙烯板，根据 GBZ/T 201.2 中附录 C 知，

对于入口处平均能量为 0.1MeV 的中子，含硼（5%）聚乙烯板 TVL_n 为 45mm；对于入口处中子俘获 γ 射线，GBZ/T 201.2 中附录 C 认为平均能量为 3.6MeV，铅的 TVL_γ 取值 31mm。防护门外的辐射剂量率计算结果见表 11-9。

表 11-9 防护门外的辐射剂量率核算值

参数	取值
$\dot{H}_\gamma$（μSv/h）	2.46
X_γ（mm）	15
TVL_γ（mm）	31
$\dot{H}_n$（μSv/h）	377.8
X_n（mm）	150
TVL_n（mm）	45
$\dot{H}$（μSv/h）	0.983
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平	4.0
评价	满足

3、医用电子直线加速器对关注点产生的剂量估算（X 射线能量为 10MV 时）

因本项目拟配备的医用电子直线加速器以 10MV，输出剂量率为 24Gy/min 运行时，剂量率大于 15MV 时的剂量率，从保守角度考虑以同样的方法计算机房周边各关注点处的辐射剂量率，最终选取两种情形下较大值作为机房关注点的理论估算值。

计算方法及公式与前文一致，不在赘述，具体计算结果如下：

（1）主屏蔽墙体屏蔽效果预测（*a* 点、*b* 点和 *l* 点）

表 11-10 主屏蔽区外参考点辐射剂量率计算参数和计算结果

参数	西南墙主屏蔽（*a* 点）	东北墙主屏蔽（*b* 点）	屋顶主屏蔽（*l* 点）*
X（cm）	300 砼	300 砼	300 砼
X_e（cm）	300 砼	300 砼	300 砼
TVL（cm）	37	37	37
TVL_1（cm）	41	41	41
B	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
R（m）	8.80	8.80	7.20
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	1.44×10^{9}	1.44×10^{9}	1.44×10^{9}
f	1	1	1
$\dot{H}$（μSv/h）	0.186	0.186	0.278
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平	2.5	10	10
评价结果	满足	满足	满足

（2）侧屏蔽墙和迷道外墙屏蔽效果预测（*f* 点，*e* 点和 *k* 点）

表 11-11 侧屏蔽墙和迷道外墙泄漏射线辐射率计算参数和计算结果

参数	东南侧屏蔽墙（*f* 点）	西北侧屏蔽墙（*e* 点）	迷道外墙（*k* 点）
X（cm）	228.3 砼	160 砼	140 砼
X_e（cm）	228.3 砼	160 砼	149.7 砼

TVL（cm）	31	31	31
TVL_1（cm）	35	35	35
B	5.82×10^{-8}	9.28×10^{-6}	2.00×10^{-5}
R（m）	8.50	5.50	9.09
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	1.44×10^{9}	1.44×10^{9}	1.44×10^{9}
f	0.001	0.001	0.001
$\dot{H}$（μSv/h）	0.001	0.442	0.348
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平	2.5	8.0	8.0
评价结果	满足	满足	满足

（3）与主屏蔽区相连的次屏蔽区的屏蔽效果预测（d_1 点、d_2 点及 m_1 点、m_2 点）

表 11-12 与主屏蔽相连的次屏蔽外参考点辐射剂量率核算值

参数		东北墙次屏蔽（d_1 点、d_2 点）	屋顶次屏蔽（m_1 点、m_2 点）
X（cm）		160 砼	170 砼
Xe（cm）		176.5 砼	206.7 砼
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）		1.44×10^{9}	1.44×10^{9}
泄漏辐射	TVL_1（cm）	35	35
	TVL（cm）	31	31
	B	2.72×10^{-6}	2.88×10^{-7}
	R（m）	8.60	7.54
	f	0.001	0.001
	$\dot{H}_l$（μSv/h）	0.053	0.007
散射辐射	TVL_1（cm）	28	28
	TVL（cm）	28	28
	R_s（m）	8.60	7.54
	α_{ph}	3.18×10^{-3}	3.18×10^{-3}
	B	4.95×10^{-7}	4.12×10^{-8}
	F	1600	1600
	$\dot{H}_s$（μSv/h）	0.123	0.013
$\dot{H}$泄漏辐射和散射辐射的复合作用（μSv/h）		0.176	0.020
$\dot{H}_c$（μSv/h）（剂量率参考控制水平）		8.0	8.0
评价		满足	满足

（4）迷道内墙屏蔽设计核算（*g* 点）

表 11-13 穿过迷路内墙在 g 点的泄露辐射剂量率估算值

参数	机房入口处（*g* 点）
X（cm）	150 砼
X_e（cm）	156.1 砼
TVL_1	35
TVL	31

B	1.24×10^{-5}
R（m）	8.54
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	1.44×10^{9}
f	0.001
$\dot{H}$（μSv/h）	0.245
$\dot{H}_c$（剂量率参考控制水平）	0.5μSv/h
评价	满足

（5）机房入口防护门屏蔽核算

①射线路径（射线类型）：$O_1\rightarrow O\rightarrow i_1\rightarrow i_2\rightarrow g$（散射射线）。

②计算模式及参数选择：

g 点处的散射辐射剂量率按照公式 11-11 计算，g 点辐射剂量率计算参数和计算结果见表 11-14。

$$H_S=\frac{\alpha_{ph}\cdot(\frac{F}{400})}{R_1^2}\cdot\frac{\alpha_2\cdot A_2}{R_2^2}\cdot\frac{\alpha_3\cdot A_3}{R_3^2}\dot{H}_0 \quad \cdots\cdots\text{公式 11-11}$$

式中，$\dot{H}_0$、α_{ph}、F 意义同前文；

α_2—砼墙入射的患者散射辐射的散射因子，本项目 e 处的入射角取 45^0，散射角取 0º，具体取值见 GBZ/T 201.2-2011 附录表 B.6，通常使用其 0.5MeV 栏内的值；

α_3—砼墙入射的患者散射辐射的散射因子；

A_2—i_1 处的散射面积，m^2；

A_3—i_2 处的散射面积，m^2；

R_1—等中心点到 i_1 之间的距离（由 CAD 图纸上读出），m；

R_2—i_1 到 i_2 之间的距离（由 CAD 图纸上读出），m；

R_3—i_2 到 g 之间的距离（由 CAD 图纸上读出），m。

表 11-14　g 处的散射辐射剂量率计算参数和计算结果

参数	g 点
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	1.44×10^{9}
α_{ph}	2.8×10^{-3}
F	1600 cm^2
α_2	22.0×10^{-3}
α_3	36.0×10^{-3}
R_1	7.52m
R_2	11.35m
R_3	2.41
A_2	28.8m^2
A_3	12.5m^2
g 点剂量率（估算值）	108.6μSv/h

入口门外的总辐射剂量率按公式 11-12 计算，入口门外辐射量率计算参数和计算结果见表 11-15。

$$\dot{H} = \dot{H}_s \cdot 10^{-\left(\frac{X}{TVL}\right)} + \dot{H}_{og} \cdots\cdots \text{公式 11-12}$$

式中：$\dot{H}_s$—是 g 处的散射辐射剂量率，$\dot{H}_{og}$是 g 处的泄漏辐射剂量率；

X—防护门铅屏蔽厚度，cm；

TVL—辐射在铅中的什值层，cm，取 0.5cm

表 11-15 入口门外的总辐射剂量率计算参数和计算结果

参数		g 点
$\dot{H}_s$		108.6μSv/h
X		15mm 铅
TVL		5mm
$\dot{H}_{og}$		0.245μSv/h
入口门外关注点总辐射剂量 $\dot{H}$	估算值	0.353μSv/h
	控制值	4.0μSv/h
	评价结果	满足

4、预测计算结果汇总及评价

综上所述，1#医用电子直线加速器机房各关注点处理论估算结果汇总见表 11-16。

表 11-16 1#医用电子直线加速器机房墙、顶、门外理论估算结果汇总

参考点	剂量率估算值（μSv/h）			剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
	15MV 时	10MV 时	最终取值		
西南墙主屏蔽（*a* 点）	0.265	0.186	0.265	2.5	满足
东北墙主屏蔽（*b* 点）	0.265	0.186	0.265	10	满足
屋顶主屏蔽（*l* 点）	0.396	0.278	0.396	10	满足
东南墙侧屏蔽（*f* 点）	0.001	0.001	0.001	2.5	满足
西北墙侧屏蔽（*e* 点）	0.208	0.442	0.442	8.0	满足
东北墙次屏蔽（d_1、d_2 点）	0.152	0.176	0.176	8.0	满足
屋顶次屏蔽（m_1、m_2 点）	0.021	0.020	0.021	8.0	满足
迷路外墙（*k* 点）	0.156	0.348	0.348	8.0	满足
迷路入口防护门（*g* 点）	0.983	0.353	0.983	4.0	满足

由于本项目 3 座机房呈并排布置，机房防护一致，且 1#机房尺寸最小，因此可以推断本次新建的 3 座医用电子直线加速器机房屏蔽设计均能够满足《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的限值要求。

5、辐射工作人员及周边公众的年有效剂量估算

参考点人员的年有效剂量由《辐射防护导论》给出的公式进行估算。

$$D_{Eff} = \dot{H} \cdot t \cdot T \cdot U \cdots\cdots \text{公式 11-13}$$

上式中：D_{Eff}—参考点人员有效剂量（Sv）；

$\dot{H}$—参考点的辐射剂量率（Sv/h）；

t—参考点处受照时间（h）；

T—居留因子，全部居留 T=1，部分居留 T=1/4，偶尔居留 T=1/16；

U—使用因子。

将表 11-16 中 1#医用电子直线加速器机房外各典型参考点处的辐射剂量率估算值代入公式 11-13，根据医院预测的诊疗需要，本项目 1#医用直线加速器机房投入使用后，预计年工作 250d，则单台医用电子直线加速器年出束运行时间约 500h，考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，其他机房以此类推，计算结果列于表 11-17。

表 11-17 医用电子直线加速器机房周围人员年有效剂量

机房	参考点所在场所	居留因子	使用因子	剂量率估算值（μSv/h）	年有效剂量（mSv/a）	目标管理值（mSv/a）	结论
1#医用电子直线加速器机房	东南侧控制室	1	1	0.001	0.001	5.0	满足
	西北侧停车位	1/16	1/4	0.442	0.003	0.10	满足
	东北侧汽车坡道	1/16	1/4	0.265	0.002	0.10	满足
	顶部室外地面	1/16	1/4	0.396	0.003	0.10	满足
	机房入口处	1/8	1	0.371	0.023	0.10	满足
2#医用电子直线加速器机房	东南侧控制室	1	1	0.001	0.001	5.0	满足
	西北侧停车位	1/16	1/4	0.442	0.003	0.10	满足
	顶部室外地面	1/16	1/4	0.396	0.003	0.10	满足
	机房入口处	1/8	1	0.371	0.023	0.10	满足
3#医用电子直线加速器机房	东南侧控制室	1	1	0.001	0.001	5.0	满足
	西北侧停车位	1/16	1/4	0.442	0.003	0.10	满足
	顶部室外地面	1/16	1/4	0.396	0.003	0.10	满足
	机房入口处	1/8	1	0.371	0.023	0.10	满足

6、对院内外保护目标的环境影响分析

由于项目四周环境保护目标距机房墙体相对较远（远大于表面 0.3m），故本项目敏感点处公众所受的辐射剂量将小于表 11-18 中的理论计算值。

表 11-18 本项目对保护目标的影响分析

位置	参考点位	居留因子	最近距离（m）	照射类型	年剂量（mSv/a）	结论
东北侧石佛寺驾校训练场	*l*	1	40	公众照射	0.010	满足

由表 11-18 可知，医院医用电子直线加速器机房周边环境保护目标处的公众所受年最大剂量均低于 0.1mSv/a 的评价约束值。

7、感生放射性辐射环境影响分析

医用直线加速器运行过程中靶中产生的高能光子可以与靶、准直器和限束系统中的金属材料的原子核发生各种核反应产生感生放射性，感生放射性水平取决于加速器电子的能量、束流强度、靶物质及运行时间等多种因素。感生放射性核素的活度和半衰期的范围都很宽，但大多数放射性核素的半衰期比较短，停机 5-10min 就可减弱到初始值的一半，因此放射性有效的防护措施之一就是等其自然衰变。

医用直线加速器运行期间，由于机房有足够的屏蔽，由部件产生的感生放射性不会对机房外的环境产生辐射污染。但每次治疗结束后，辐射工作人员需进入治疗室引导治疗后患者离开并对下一位患者进行摆位。往往由于放射治疗患者较多，辐射工作人员一般在医用直线加速器停机后 2min 左右就进入治疗室内，此时大部分感生放射性核素未能充分衰变。本项目使用 15MV 能量进行出束治疗的日就诊人数每台设备保守取 10 人/天，平均每位患者摆位时间为 1min，一年 250 个工作日，保守采用《医用电子直线加速器质量控制检测规范》（WS 674-2020）标准规定限值最大值（距离外壳表面 1m 处≤20μSv/h）进行估算，辐射工作人员在摆位时受到的年有效剂量为 0.84mSv。

8、电子线辐射环境影响分析

本项目医用直线加速器在运行过程中产生的电离辐射包括有：电子、X 射线。

由于电子在物质中的射程是有限的，屏蔽比较容易，只要所选择的物质厚度大于带电粒子在该物质的射程，就可以将其完全吸收。根据《辐射防护手册 第三分册》（原子能出版社），其在 Z 较高的物质中的射程可用如下经验公式估算：

$$R = \frac{1}{2}E_{max}$$……公式 11-14

$$d = \frac{R}{\rho}$$……公式 11-15

其中：R——最大射程，单位 g/cm^2；

E_{max}——电子的最大能量，单位 MeV，本项目医用电子直线加速器最大电子能量为 20MeV；

ρ——材料的密度，单位 g/cm^3；

d——防护厚度，单位 cm。

根据上述公式，可计算得出电子在混凝土中射程为 4.68cm，加速器机房墙体最小屏蔽厚度为 150cm，所以本项目加速器机房设计结构和屏蔽厚度足以屏蔽电子线，因此加速器在运行中电子线对周围辐射环境影响很少。

根据上述结果分析知，医院医用电子直线加速器投入运行后，医用电子直线加速器机房辐射工作人员有效剂量 0.841mSv，周围公众年有效剂量最高为 0.023mSv，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（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）。

（二）射波刀项目

根据建设单位提供的资料,拟于先进技术楼负一层肿瘤中心新建 1 座射波刀机房，配备 1 台射波刀，型号未定，主要参数为：X 射线能量：≤6MV；靶至等中心的距离为 80cm，等中心点处输出剂量率：≤10Gy/min。

本项目射波刀是将小型加速器固定安装在机器人前臂，加速器在机器人臂的带动下可由空间任何方向以准直束线精确定位照射，故本项目在进行射波刀机房屏蔽设计核算时，根据《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/T 201.2-2011）中“D.3.3.1 各面均按有用线束（U＜0.05）考虑机房屏蔽”进行屏蔽计算。

因此，本报告从保守角度出发，在射波刀机房设计的尺寸厚度基础上，假定射波刀最大功率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关注点设定如图 11-2。

图 11-2 射波刀机房关注点布置图

1、辐射防护效果预测

（1）有用线束屏蔽设计核算

①射线路径（射线类型）：*o*→*a*（主射线），*o*→*b*（主射线），*o*→*c*（主射线），*o*→*d*（主射线），*o*→*e*（主射线），*o*→*l*（主射线），*o*→*g*（主射线）。

②计算模式及参数选择

使用《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/T 201.2-2011）的相关公式进行有用线束屏蔽设计核算，在给定的屏蔽物质厚度 X（cm）时，首先按照公式 11-2 计算有效厚度 X_e（cm），按照公式 11-3 估算屏蔽物质的屏蔽透射因子 B，再按照公式 11-4 计算相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率（μSv/h）。

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta \cdots\cdots \text{公式 11-2}$$

式中：X—设计屏蔽厚度，cm；

θ—斜射角。

$$B = 10^{-(X_e+TVL-TVL_1)/TVL} \cdots\cdots \text{公式 11-3}$$

式中，TVL_1（cm）和 TVL（cm）为辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度和平衡什值层厚度，当未指明 TVL_1 时，TVL_1=TVL。对应 6MV 的 X 射线能量，查 GBZ/T 201.2-2011 的附录 B 表 B.1 的有用束值，混凝土 TVL_1 为 37cm，TVL 为 33cm。

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \cdots\cdots \text{公式 11-4}$$

式中：$\dot{H}_0$—加速器有用线束中心轴上距产生治疗 X 射线束的靶（以下简称靶）1m 处的常用最高剂量率，μSv·m^2/h，本项目为 3.84×10^{8}μSv·m^2/h；

R—靶点至参考点的距离，m，本项目参考点均为相应墙外 30cm；

f—对有用线束为 1。

③预测计算结果汇总及评价

本项目射波刀外各关注点处的辐射剂量率预测结果见表 11-19，其中 X_e、R 的取值由 CAD 图纸上读取。

表 11-19 射波刀机房外关注点处辐射剂量率核算值

参数	*a* 点	*b* 点	*c* 点	*d* 点	*e* 点	*l* 点	*g* 点
X（cm）	260 砼	250 砼	250 砼	240 砼	320 砼	250 砼	210 砼
X_e（cm）	260 砼	291.5 砼	250 砼	240 砼	320 砼	250 砼	236.1 砼
TVL_1（cm）	37						
TVL（cm）	33						
B	1.75×10^{-8}	1.94×10^{-9}	3.51×10^{-8}	7.06×10^{-8}	2.66×10^{-10}	3.51×10^{-8}	9.26×10^{-8}
R（m）	8.80	11.2	8.15	6.80	8.85	6.30	9.55
$\dot{H}_0$	3.84×10^{8}μSv·m^2/h						
f	1						
$\dot{H}$（μSv/h）	0.087	0.006	0.203	0.586	0.001	0.340	0.390
$\dot{H}_c$	2.5	10	10	10	10	10	0.5

（μSv/h）剂量率参考控制水平							
评价	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

（2）机房入口防护门屏蔽设计核算（*g* 点）

本项目射波刀机房入口设有“L”型迷路，迷路口用 12mmPb 防护当量的防护门屏蔽散射至迷路入口处的散射线。

根据 GBZ/T 201.2-2011，入口 *g* 点处的散射辐射剂量率$\dot{H}_S$按公式 11-11 计算。

$$H_S = \frac{\alpha_{ph}\cdot(\frac{F}{400})}{R_1^2}\cdot\frac{\alpha_2\cdot A_2}{R_2^2}\cdot\frac{\alpha_3\cdot A_3}{R_3^2}\dot{H}_0 \quad \cdots\cdots\text{公式 11-11}$$

式中，$\dot{H}_0$、α_{ph}、F 意义同前文；

α_2—砼墙入射的患者散射辐射的散射因子，本项目 *e* 处的入射角取 45^0，散射角取 0^o，具体取值见 GBZ/T 201.2-2011 附录表 B.6，通常使用其 0.5MeV 栏内的值；

α_3—砼墙入射的患者散射辐射的散射因子；

A_2—i_1 处的散射面积，m^2；

A_3—i_2 处的散射面积，m^2；

R_1—等中心点到 i_1 之间的距离（由 CAD 图纸上读出），m；

R_2—i_1 到 i_2 之间的距离（由 CAD 图纸上读出），m；

R_3—i_2 到 *g* 之间的距离（由 CAD 图纸上读出），m。

表 11-20 迷路入口处的散射辐射剂量率核算值

参数	*g* 点
$\dot{H}_0$（μSv·m²/h）	3.84×10^8
α_{ph}	1.39×10^{-3}
F	$126.5cm^2$
α_2	22.0×10^{-3}
α_3	36.0×10^{-3}
R_1	6.84
R_2	10.4
R_3	2.10
A_2	9.24
A_3	9.34
g 点剂量率（估算值）	0.517μSv/h

在给定防护门的铅屏蔽厚度 X（cm）时，防护门外 *g* 点处的辐射剂量率$\dot{H}$（μSv/h）按公式 11-15 计算，预测结果见表 11-25。

$$\dot{H} = \dot{H}_s\cdot10^{-(X/TVL)} + \dot{H}_{og}\cdots\cdots\text{公式 11-12}$$

式中：$\dot{H}_{og}$—g 处的泄漏辐射剂量率，μSv/h；

$\dot{H}_s$—g 处的散射辐射剂量率，μSv/h；

TVL—辐射在铅中的什值层，cm。

表 11-21 迷路入口防护门外的辐射剂量率核算值

参数	机房入口防护门外（*g* 点）
$\dot{H}_{og}$（μSv/h）	0.390
$\dot{H}_s$（μSv/h）	0.517
X（cm）	1.2（铅）
TVL（cm）	0.5（铅）
$\dot{H}$（μSv/h）防护门外的辐射剂量率	0.392
$\dot{H}_c$（μSv/h）剂量率参考控制水平	10
评价	满足

2、预测计算结果汇总及评价

本项目射波刀机房外各关注点处的辐射剂量率预测结果见表 11-22。

表 11-22 射波刀机房外关注点处辐射剂量率理论估算结果汇总

参考点	剂量率估算值（μSv/h）	剂量率参考控制水平（μSv/h）	结论
东南墙（*a* 点）	0.087	2.5	满足
南墙（*b* 点）	0.006	10	满足
西南墙（*c* 点）	0.203	10	满足
西北墙（*d* 点）	0.586	10	满足
东北墙（*e* 点）	0.001	10	满足
顶部（*l* 点）	0.340	10	满足
迷路入口防护门（*g* 点）	0.392	10	满足

由表 11-22 可知，本项目射波刀机房屏蔽设计能够满足《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020）和《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ 1198-2021）的要求。

3、保护目标有效剂量评价

本项目射波刀年出束运行时间约 500h，考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，根据公式 11-13 估算公众及辐射工作人员的年有效剂量，计算结果列于表 11-23。

表 11-23 射波刀机房周围人员年有效剂量

参考点	参考点所在场所	居留因子 T*	使用因子 U	剂量率估算值（μSv/h）	人员可达处年有效剂量（mSv/a）	剂量约束值（mSv/a）	结论
东南墙（*a* 点）	控制室	1	1/20	0.087	0.002	5	满足
南墙（*b* 点）	强电间	1/16	1/20	0.006	＜0.01	0.1	满足
西南墙	后装治疗室	1/2	1/20	0.203	0.002	0.1	满足

（*c* 点）							
西北墙（*d* 点）	停车库	1/16	1/20	0.586	0.01	5	满足
东北墙（*e* 点）	直线加速器机房	1/2	1/20	0.001	＜0.01	0.1	满足
顶部（*l* 点）	室外	1/16	1/20	0.340	＜0.01	0.1	满足
迷路入口防护门（*g* 点）		1/8	1	0.392	0.025	0.1	满足

注：居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A。

根据表 11-23 结果分析知，该项目射波刀投入运行后，辐射工作人员年有效剂量最大为 0.02mSv，周围公众年有效剂量＜0.025mSv，均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中对职业人员、公众的剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求（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）。

（三）后装治疗机项目

本项目后装治疗机治疗时，假设放射源全部被输送至施源器，则辐射环境影响预测时保守将其视为点源来预测计算机房治疗室屏蔽防护能力。辐射屏蔽防护及估算点位示意图见图 11-2（预测点位取墙体或者防护门外 30cm 处）。

^{192}Ir 放射源虽有 β、γ 两种辐射，但 β 射线在空气中的射程较短，经放射源的内包鞘和治疗机的相关设施屏蔽后，在环境辐射方面已无影响，故本次环评中重点分析 ^{192}Ir 产生的 γ 射线的环境影响问题。

根据医院提供资料，医院预计每年使用后装治疗机治疗约 1500 例，平均每位患者治疗时间约 10min，年治疗照射时间约 250h/a；医生对患者进行摆位/解除摆位的时间约为 2min/人。

图 11-3 后装治疗机机房关注点布置图

1、后装治疗机房外关注点产生的剂量估算

在给定的屏蔽物质厚度 X（mm）时，相应辐射在屏蔽体外关注点的剂量率$\dot{H}$（μSv/h）依据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）中的公式进行预测计算：

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0 \cdot f}{R^2} \cdot B \cdots\cdots \text{公式 11-4}$$

式中：$\dot{H}_0$—活度为 A 的放射源在距其 1m 处的剂量率，μSv/h；

f—对有用线束为 1；

R—辐射源至关注点的距离，m；

B—辐射屏蔽透射因子。

$$B = 10^{-(X_e + TVL - TVL_1)/TVL} \cdots\cdots \text{公式 11-3}$$

式中：X_e—有效屏蔽厚度，mm；

TVL_1—辐射在屏蔽物质中的第一个什值层厚度，mm；

TVL—辐射在屏蔽物质中的平衡什值层厚度，mm。

$$X_e = X/cos\theta = X \cdot sec\theta \cdots\cdots$$公式 11-2

式中：*X*—屏蔽物厚度，mm；

θ—斜射角，即入射角与物质平面的法线的夹角。

表 11-24 后装机房辐射屏蔽防护效果预测结果

参数	东南墙 *a* 点	西南墙 *b* 点	西北墙 *c* 点	东北墙 *d* 点	顶部 *l* 点	入口 g 点
屏蔽厚度 *X*（mm）	700 砼	700 砼	700 砼	2500 砼	800 砼	700 砼
等效厚度 X_e（mm）	700 砼	700 砼	700 砼	2500 砼	800 砼	700 砼
TVL_1（mm）	砼：152					
TVL（mm）	砼：152					
B	2.48×10^{-5}	1.29×10^{-10}	2.48×10^{-5}	3.57×10^{-17}	5.46×10^{-6}	2.48×10^{-5}
A（MBq）	3.70×10^{5}					
K_r	0.111μSv/h·MBq					
R（m）	2.5	5.7	2.5	4.3	5.0	4.47
f	1					
$\dot{H}_0$（μSv/h）	4.11×10^{4}					
$\dot{H}$（μSv/h）	0.163	0.031	0.163	＜0.001	0.009	0.051*
$\dot{H}_c$（μSv/h）	2.5	2.5	10	2.0	10	8.0
是否满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

注：*仅考虑迷道内墙的屏蔽。

2、后装机房迷路防护门辐射防护设计核算

本项目后装机房入口设有“L”型迷路，迷路口用 10mmPb 防护当量的防护门屏蔽散射至迷路入口处的散射线。

入口 *g* 处的散射辐射剂量采用《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ 射线源 放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）中公式计算：

$$H_s = \frac{A \cdot K_\gamma \cdot S_w \cdot \alpha_w}{R_1^{\,2} \cdot R_2^{\,2}}$$ ……公式 11-16

式中：*A*—放射源的活度，MBq；本项目 ^{192}Ir 放射源活度 *A* 为 3.70×10^{5}MBq；

K_γ—放射源的空气比释动能率常数，在屏蔽计算中以周围剂量当量作为空气比释动能的近似，此时，K_γ 的单位记为 μSv/（h·MBq），查自（GBZ/T 201.3-2014）附录 C；

S_w—迷路内口墙的散射面积，其为辐射源和机房入口共同可视见的墙区面积，m^2；

a_w—散射体的散射因子，本项目取 3.39×10^{-2}；（取值参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）表 C.4。

R_1—辐射源至散射体中心点的距离，m；

R_2—散射体中心点至计算点的距离，m。

表 11-25 后装机房入口 g 点处辐射剂量率计算结果

参数	取值
A 放射源活度（MBq）	3.70×10^5
K_γ 空气比释动能率常数（μSv/（h·MBq））	0.111
S_w（m^2）	19.26
a_w（散射体的散射因子）	3.39×10^{-2}
R_1（m）	2.87
R_2（m）	5.98
$\dot{H}$预测值（μSv/h）	91.03

根据公式 11-25 计算得机房入口前的散射辐射剂量率为 91.03μSv/h，后装机房迷路设有铅当量为 12mm 的防护门，保守取 ^{192}Ir 产生的 γ 射线经过散射后至迷路入口 g 处的能量约为 0.2MeV，铅中的 TVL 值为 5.0mm，因此，经过机房入口防护门的屏蔽后的辐射剂量率可参照下式进行计算，计算结果详见表 11-26：

$$\dot{H} = \dot{H}_s \cdot 10^{-\left(\frac{X}{TVL}\right)} + \dot{H}_{og} \cdots\cdots \text{公式 11-15}$$

式中 $\dot{H}_s$ 是 g 处的散射辐射剂量率，$\dot{H}_{og}$ 是 g 处的泄漏辐射剂量率；

X—防护门铅屏蔽厚度，cm；

TVL—辐射在铅中的什值层，cm，取 5mm

表 11-26 入口门外的总辐射剂量率计算参数和计算结果

参数		g 点
$\dot{H}_s$		91.03μSv/h
X		12mm 铅
TVL		5mm
$\dot{H}_{og}$		0.051μSv/h
入口门外关注点总辐射剂量 $\dot{H}$	估算值	0.413μSv/h
	控制值	8.0μSv/h
	评价结果	满足

3、预测计算结果汇总及评价

综上所述，后装机房墙、顶、门外理论估算结果汇总见表 11-27。

表 11-27 后装机房墙、顶、门外理论估算结果汇总

关注点 参数	东南墙 *a* 点	西南墙 *b* 点	西北墙 *c* 点	东北墙 *d* 点	顶部 *l* 点	防护门 g 点
H（μSv/h）	0.163	0.031	0.163	＜0.001	0.009	0.413
$\dot{H}_c$（μSv/h）	2.5	2.5	10	2.0	10	8.0
结论	满足	满足	满足	满足	满足	满足

本项目后装机房内设有通风装置，采用机械排风方式。本项目后装机房进风管道、排风管道穿墙处采用“S”型设计，管道经防护门上方由迷路到达机房内，射线经几次散射后，通风管道出口处辐射剂量将在控制范围内。电缆沟埋设在地下，电缆线布设采用地下“U”型穿墙管道，未破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

4、保护目标有效剂量评价

后装治疗机周治疗时间约为 5h，年运行时间约 250h，根据各参考点处年受照时间，并考虑周围公众及辐射工作人员的居留因子，则后装治疗机机房外辐射剂量预测结果见表 11-28。

表 11-28 后装治疗机机房外辐射剂量预测结果

参考点	参考点 所在场所	居留 因子*	使用 因子	辐射剂量率 （μSv/h）	年有效剂量 （mSv/a）	目标管理值 （mSv/a）	结论
东南墙 *a* 点	控制室	1	1	0.163	0.041	5.0	满足
西南墙 *b* 点	输液室	1/4	1	0.031	0.002	0.1	满足
西北墙 *c* 点	停车库	1/16	1	0.163	0.003	0.1	满足
东北墙 *d* 点	射波刀机房	1/16	1	＜0.001	＜0.001	0.1	满足
顶部 *l* 点	室外地面	1/16	1	0.009	＜0.001	0.1	满足
迷路入口防护门 *g* 点		1/8	1	0.413	0.013	0.1	满足

注：*居留因子取值见 HJ 1198-2021 附录 A。

根据表 11-28 结果分析知，该后装治疗机投入运行后，后装治疗机机房外辐射剂量率均小于各关注点的剂量率参考控制水平，满足《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 3 部分：γ 射线源放射治疗机房》（GBZ/T 201.3-2014）的要求。

在进行放射治疗前，工作人员需进入机房对患者进行摆位，此时放射源处于贮存状态，工作人员进行摆位时距离设备约 1m，根据《后装 γ 源近距离治疗质量控制检测规范》（WS 262-2017）中的相关要求：距离贮源器表面 100cm 处的球面上，任何一点因泄漏辐射所致周围剂量当量率不大于 5μSv/h，平均每位患者摆位/解除摆位 2min，年门诊量最大 5000 人次，则辐射工作人员摆位过程中年最大有效剂量为 0.834mSv。

根据表 11-28 理论计算结果可知，本项目后装治疗机运行后辐射工作人员最大有效剂量为 0.875（0.834+0.041）mSv/a，周围公众年有效剂量最大值为 0.013mSv，均

能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中剂量限值要求和本项目管理目标剂量约束值要求。

（三）机房门缝、通风系统及电缆沟辐射防护评价

本项目医用电子直线加速器机房、射波刀机房和后装治疗机机房防护门设计制作时，除要考虑足够的防护厚度外，拟考虑防护门与周围墙壁及地面的重叠搭接，以防止门缝处射线泄漏。本项目放疗机房门与墙之间的间隙小于 1cm，防护门与墙之间的搭接不小于 10cm，可有效防止门缝处射线泄漏。

本项目医用电子直线加速器机房、射波刀机房和后装治疗机机房进、排风管道穿墙处均采用倒“S”型设计，管道为方管，进风管道内径为 400mm×400mm，排风管道内径为 400mm×400mm，管道经防护门上方由迷路到达机房内，管道穿迷路上方屏蔽到达机房内，管道系统均避开主射线方向，射线经几次散射后，通风管道出口处辐射剂量将在控制范围内。

电缆沟埋设在地下，电缆线布设采用地下“U”型穿墙管道，穿墙处埋地深度为 400mm，未破坏治疗室墙体的屏蔽效果，能够满足辐射防护要求。

（四）定位 CT 项目

本项目定位 CT 机房实体屏蔽防护设计与《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中 X 射线设备机房屏蔽防护要求对照分析见表 11-29。

表 11-29 模拟定位机机房屏蔽防护设计一览表

参数	设计厚度	铅当量	屏蔽要求	评价
四侧墙体	240mm 厚实心混凝土砖墙	2.8mm	2.5 mmPb	满足
防护门	3mm 铅	3mm		满足
观察窗	3mm 铅当量	3mm		满足
屋顶	250mm 厚混凝土	3mm		满足
机房面积	36.7m^2，单边最短长度 5.4m	机房最小有效使用面积 30m^2，机房内最小单边长 4.5m		满足

由上表对照结果可知，本项目定位 CT 机房实体屏蔽防护满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的要求，机房实体屏蔽设计合理。

（五）叠加影响分析

考虑项目肿瘤中心医用电子直线加速器机房、射波刀机房和后装治疗机机房位置相对较近，则需考虑辐射工作人员和周边公众的剂量叠加影响。医用电子直线加速器机房、射波刀机房和后装治疗机机房西北侧均为停车库，假设所有设备同时运行时其

所受叠加剂量最大，不考虑其他屏蔽的影响进行保守估算，则该处的公众所受年有效剂量为：0.022（0.003×3+0.010+0.003）mSv。

结果汇总

本项目肿瘤中心医用电子直线加速器机房、射波刀机房和后装治疗机机房各关注点处辐射工作人员和周边公众所受年有效剂量最大值见表 11-30。

表 11-30 肿瘤中心辐射工作人员和周边公众年有效剂量情况一览表

位置	医用电子加速器项目	射波刀项目	后装治疗机项目	剂量约束值
辐射工作人员	0.841mSv/a	0.020mSv/a	0.875mSv/a	5mSv/a
公众	0.023mSv/a	0.025mSv/a	0.013mSv/a	0.1mSv/a

综上所述，医院肿瘤中心投入运行后，辐射工作人员和周围公众受到的附加有效剂量均能满足项目 5mSv/a 和 0.1mSv/a 的剂量约束值。

（四）核医学科项目

1、回旋加速器制药区辐射环境影响分析

（1）回旋加速器机房屏蔽效果分析

医院本次新建的核医学科-回旋加速器制药区位于先进技术楼负一层，拟于回旋加速器机房内配备 1 台自屏蔽式回旋加速器（

）用于生产制备放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O。

参考《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）附录 I 中第 I.3 款“自屏蔽回旋加速器机房的屏蔽估算方法”，回旋加速器屏蔽室外的剂量率可采用生产厂家提供的泄露辐射剂量等高线，采用近似方法估算。估算公式如下：

$$\dot{H}_R = \left(\frac{r_0}{R}\right)^2 \cdot \left(\dot{H}_n \times 10^{-x/TVL_n} + \dot{H}_\gamma \times 10^{-x/TVL_\gamma}\right)\cdots\cdots\text{公式 11-17}$$

式中：$\dot{H}_R$——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 ——屏蔽墙外关注点距靶心的距离，单位为米（m）；

$\dot{H}_n$——参考点 r_0 处的中子剂量率，单位为微希沃特每小时（μSv/h），查生产厂家提供的泄露辐射剂量等高线；

X——屏蔽墙厚度，单位为厘米（cm）；

TVL_n——中子射线的十分之一减弱层厚度，单位为厘米（cm）；

$\dot{H}_\gamma$——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），查

生产厂家提供的泄露辐射剂量等高线；

TVL_γ——γ射线的十分之一减弱层厚度，单位为厘米（cm）。对于11MeV回旋加速器泄露辐射γ射线的能量约为8MeV，中子的能量约为5MeV，相应不同屏蔽材料的*TVL*值见表I.3。

表I.3 11MeV回旋加速器泄露辐射不同屏蔽材料的*TVL*值

材料名称	密度（g/cm³）	TVL_γ（8MeV，cm）	TVL_n（5MeV，cm）
混凝土	2.35	38	43
重晶石混凝土	3.2	24	43
铅	11.3	5	47.8
聚乙烯	0.97	80	24
铁	7.85	10	37

注：数据来源自NCRP.Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP Report No.51，Washington，DC，March1977。

再采用方杰主编的《辐射防护导论》中公式计算参考点人员的有效剂量。

$$D_{Eff} = \dot{H} \cdot t \cdot T \cdot U$$……公式11-13

上式中：D_{Eff}—考察点人员有效剂量（Sv）；

$\dot{H}$—考察点的辐射剂量率（μSv/h）；

t—考察点处受放射性核素影响的时间（h）；

T—居留因子，全部居留T=1，部分居留T=1/4，偶尔居留T=1/16；

U—使用因子，U取1；

根据院方提供的参数预测本项目回旋加速器运行过程中室外各关注点的辐射水平，预测点位分布图见图11-4，设备泄漏辐射剂量分布图详见图11-5和图11-6，计算参数详见表11-31，剂量率及累计剂量估算结果见表11-32。

图 11-4 回旋加速器机房屏蔽预测点位分布示意图

图 11-6　　自屏蔽式回旋加速器中子漏射剂量分布示意图

表 11-31 评价点各计算参数

位置		r_0（m）	R（m）	x（cm）	TVL_n（cm）	TVL_γ（cm）
a	东南侧墙外30cm处	2.52	2.36	50	43（砼）	38（砼）
b	西南侧墙外30cm处	3.55	4.31	50	43（砼）	38（砼）
c	西北侧墙外30cm处	2.53	4.24	50	43（砼）	38（砼）
d	东北侧墙外30cm处	2.15	3.79	50	43（砼）	38（砼）
d'	控制室	2.15	6.99	50	43（砼）	38（砼）
e	顶部30cm处	2.30	6.50	60+180土层	43（砼）	38（砼）
g	防护门外30cm处	2.53	4.61	1.5cmPb+25cm聚乙烯	47.8（铅） 24（聚乙烯）	5（铅） 80（聚乙烯）

注：r_0为距机器表面 1 米。

表 11-32 评价点剂量率及累计剂量估算结果

位置		$\dot{H}_n$（μSv/h）	$\dot{H}_\gamma$（μSv/h）	$\dot{H}_R$（μSv/h）
a	东南侧墙外30cm处	19	19	2.137
b	西南侧墙外30cm处	0	8	0.262
c	西北侧墙外30cm处	19	19	0.792
d	东北侧墙外30cm处	19	19	0.716
l	顶部30cm处	8	19	0.139
a'	操作位	19	19	0.001
g	防护门外30cm处	19	19	2.017

由估算结果可知：南京鼓楼医院购置 自屏蔽式回旋加速器正常运行时，机房周边辐射剂量率为（0.001～2.137）μSv/h 之间。

（2）回旋加速器地沟辐射影响分析

加速器专用管道预埋在地沟内，地沟采用混凝土浇筑，深度为 50cm，地沟上方将覆盖 60mm 厚铅砖予以防护。在进行加速器药物地沟的辐射环境影响预测时，采用《辐射防护导论》中线源公式计算参考点处周围剂量当量率：

$$\dot{K}=\frac{2A\Gamma_K}{Lr}\mathrm{tg}^{-1}\frac{L}{2r}\eta\cdots\cdots\text{公式 11-18}$$

式中：$\dot{K}$—比释动能率，Sv/h；

A—总活度，Bq；

Γ_k—周围剂量当量率常数，μSv·m^2/Bq·h；

L—线源长度，m，本项目地沟长度约 4m；

r—线源到考察点的距离，m。

η—透射比

本项目回旋加速器单批次生产量最大的核素为 ^{18}F，单批次生产量为 $3.7\times10^{9}Bq$，经 60mm 厚铅砖屏蔽后，地沟表面 30cm 处辐射剂量率为 0.305μSv/h，小于 2.5μSv/h。

（3）感生放射性的影响分析

当加速器加速粒子能量大于 10MeV 时，机房内会产生感生放射性。加速器感生放射性包括：

加速器冷却水被活化将产生的感生放射性核素主要是 ^{15}O、^{16}N，半衰期分别是 2.1min 和 7.3s，一般采取放置一段时间其活度可衰减到可忽略的水平。放射性固体废物有靶废料，即有靶窗、废弃的离子源灯丝等，为感生放射性废物。在加速器运行时，由于有足够的结构屏蔽，所以有靶废料产生的感生放射性不会对屏蔽体外的工作人员造成危害。但在停机后，工作人员必须等待一段时间后进入。加速器检修时，工作人员必须佩带个人剂量报警仪和巡测仪，穿戴防污染手套、铅衣、铅围裙等防护用品。

（4）药物合成热室辐射剂量率预测

根据医院提供的资料，对合成热室自身的屏蔽防护正面为 60mmPb，其余侧为 50mmPb，分装热室自身的屏蔽防护正面为 70mmPb，其余侧为 60mmPb，热室墙体屏蔽防护为 300mm 厚混凝土。

回旋加速器合成的核素有 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O，各种正电子放射性核素产生的 γ 射线能量、照射量常数接近，但是合成 ^{18}F 放射性药物量相对较多，因此，本报告以 ^{18}F 进行分析评价，防护措施满足对 ^{18}F 的辐射防护要求，即可同时满足对其余核素的辐射辐射防护要求。

按照点源模式进行估算，参考《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）附录 I 中第 1.2 款 ^{99m}Tc 诊断、^{131}I 治疗、PET 等工作场所的屏蔽计算，保守起见，所有核素（如 ^{99m}Tc、^{131}I、^{18}F 等）工作场所的屏蔽，可采用瞬时剂量率计算方法。

$$\dot{H}_P = \frac{A\times\Gamma}{r^2}10^{(-\frac{x}{TVL})}\cdots\cdots\text{公式 11-18}$$

上式中：$\dot{H}_P$—屏蔽体外关注点剂量率（μSv /h）；

A —单个患者或者受检者所用放射源的最大活度（MBq）；

Γ—距源 1m 处的周围剂量当量率常数（μSv • m^2/MBq • h）；

r —放射源到考察点的距离（m）；

x—屏蔽厚度（mm）；

TVL—γ射线的十分之一值层厚度（mm）

由《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）查出铅、混凝土和实心砖对 ^{18}F 什值层见表 11-33。

表 11-33　本项目涉及核素辐射剂量率估算相关参数取值表

核素名称	^{18}F
铅什值层厚度 TVL（ρ=11.3g/cm³）	16.6mm
砼什值层厚度 TVL（ρ=2.35g/cm³）	176mm
实心砖什值层厚度 TVL（ρ=1.65g/cm³）	263mm

本项目按照 ^{18}F 一次生产量（3.7×10^{9}Bq）进行核算估算，结果见表 11-34。

表 11-34 药物合成工作场所周围辐射剂量率一览表

屏蔽体	位置	屏蔽防护设计	距离（m）	周围剂量当量率（μSv/h）
合成热室	外表面 30cm 处	60mmPb	0.3	1.428
	外表面 30cm 处	50mmPb	0.3	5.718
分装热室	外表面 30cm 处	70mmPb	0.3	0.357
	外表面 30cm 处	60mmPb	0.3	1.428
正电子药物合成分装室	东南墙外 30cm 处	70mmPb+300mm 混凝土	3.45	0.0001
	西南墙外 30cm 处	60mmPb+300mm 混凝土	1.75	0.001
	西北墙外 30cm 处	60mmPb+300mm 混凝土	1.55	0.001
	顶棚外 30cm 处	60mmPb+300mm 混凝土	5.65	0.0001
	防护门外 30cm 处	70mmPb+8mmPb	3.45	8.9×10^{-4}

由表 11-34 可知，正常工作状态下，合成热室正面表面 30cm 处的辐射剂量率最大为 1.428μSv/h，侧面表面 30cm 处的辐射剂量率最大为 5.718μSv/h；分装热室正面表面 30cm 处的辐射剂量率最大为 0.357μSv/h，侧面表面 30cm 处的辐射剂量率最大为 1.428μSv/h；满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“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”的剂量限值要求。

正电子药物合成分装室屏蔽墙外 30cm 处辐射剂量率最大为 0.001μSv/h。满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“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”的剂量限值要求。

（5）质控过程辐射剂量率预测

PET 药物制备完成后，工作人员进入热室将分装热室内装有药物的铅罐取出，药物通过药物传递窗送达全检质控室，在全检质控室进行抽样检测，检测完转移至核医学科诊断场所内。每种核素药物每次制备完成后均需要进行质控，每种药物均取 100μCi 药物在通风橱（20mmPb）中进行质控，每次质控时间为 5 分钟，身体与药物的直线距离取 0.3m。

回旋加速器合成的各种正电子放射性核素产生的γ射线能量、照射量常数接近，但是合成 ^{18}F 放射性药物量相对较多，本报告以 ^{18}F 进行分析评价。

表 11-35 质控过程人员位置的剂量率估算结果表

核素	^{18}F
操作量	3.7MBq
距离	0.3m
屏蔽厚度	20mmPb
剂量率（μSv/h）	0.367

（6）工作人员及公众个人剂量估算

①工作负荷及计算参数

回旋加速器制药场所建设后，医院实现 PET 用药自给自足，在制药区完成合成分装、质控后，再送至核医学科诊断场所。制药时，工作人员仅在控制室操作，不进入机房和热室。

工作负荷及计算参数：回旋加速器日生产时间约为 5 小时。PET 药物制备完成后，工作人员进入热室将分装热室内装有药物的铅罐取出，质控药物通过药物传递窗送达质控间，质控取 100μCi 药物在通风橱（20mmPb）中进行质控，每种核素每次质控时间为 5 分钟，身体与药物的直线距离取 0.3m。

②辐射工作人员受照剂量估算

表 11-36 辐射工作人员年有效剂量估算

操作环节	工作负荷	辐射剂量率（μSv/h）	年有效剂量（mSv/a）
回旋控制	日工作 5 小时，年工作 250 天	0.215	0.268
制药	日工作 5 小时，年工作 250 天	0.357	0.446
质控	5min×10 次/天×250 天	0.367	0.076
合计			0.790

综上，回旋加速器核素制备场所假设所有工作均由 1 名辐射工作人员完成，则其年有效剂量最大为 0.790mSv。

③公众受照剂量估算

回旋加速器核素制备场所是相对封闭的区域，张贴有电离辐射警告标志，有严格的“两区”管理制度，除工作人员外，其它人员不得入内，普通公众成员不会到达控制区与监督区，因此，不会受到额外的辐射照射。

2、影像中心辐射环境影响分析

本项目主要污染因子为 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{89}Sr、^{153}Sm 和 ^{131}I 放射性核素在取药、分装、注射、注射后候诊、扫描等操作过程中产生的β、γ 射线及 β 放射性表面污染；PET/CT、SPECT/CT 装置 CT 扫描时产生的 X 射线。

（1）β 射线辐射影响分析

β 射线的穿透性能较差，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：

$$d = \frac{1}{2\rho} E_{\rho max} \cdots\cdots \text{公式 11-19}$$

式中：$E_{\beta max}$—β 射线的能量，MeV；

ρ—物质的密度，g/cm^3。

d—与最大射程对应的防护厚度，cm。

主要计算参数及结果见表 11-37。

表 11-37 与最大射程对应的防护厚度计算参数及结果

核素	E_β(MeV)*	屏蔽材料	ρ 材料密度(g/cm^3)	d 防护厚度（cm）
^{89}Sr	1.492	空气	0.0012	622.9
		有机玻璃	1.18	0.633
		混凝土	2.30	0.325
		铅	11.1	0.067
^{153}Sm	0.881	空气	0.0012	367.08
		有机玻璃	1.18	0.373
		混凝土	2.30	0.192
		铅	11.34	0.039
^{18}F	0.63	铅	11.3	0.03
		混凝土	2.35	0.14
		实心砖	1.65	0.19
^{131}I	0.606	空气	0.0012	252.5
		有机玻璃	1.18	0.257
		混凝土	2.35	0.129
		铅	11.3	0.027

注：*来源 HJ1188-2021。

本项目手套箱均采用铅板及铅玻璃进行防护，工作场所墙体、顶部采用混凝土+铅板，各防护门均采用铅防护门，观察窗均为铅玻璃观察窗进行辐射防护，本项目^{18}F等放射性核素β射线在上述屏蔽材料中射程均极短。在核素操作过程中，在穿戴好防护用品后，基本可以消除β射线对辐射工作人员及周围公众的辐射影响。

但是，β射线可与物质相互作用从而产生韧致辐射，物质的原子序数越高，所产生的韧致辐射越强。

根据《辐射防护导论》（方杰主编）中的公式计算β射线产生的韧致辐射在考察点处空气中的吸收剂量率：

$$\dot{D} = 4.58 \times 10^{-1}\ AZ_e\left(\frac{E_b}{r}\right)^2 \cdot (\mu_{en}/\rho)\cdots\cdots\text{公式 11-20}$$

其中：$\dot{D}$—是屏蔽层中由β粒子产生的韧致辐射在考察点处空气中的吸收剂量率，Gy/h；

A—放射源的活度，Bq；

Z_e—吸收β粒子的屏蔽材料（或靶核）的有效原子序数；

E_b—β粒子的平均能量，MeV；

r—放射源到考察点的距离，m；

μ_{en}/ρ—平均能量为E_b的韧致辐射在空气中的质量能量吸收系数，m^2/kg。

由公式11-20计算其所致剂量率，主要计算参数及计算结果见表11-38。

表11-38 核素产生韧致辐射剂量率

核素	活度(Bq)	有效原子序数	E_b (MeV)	距离(m)	μ_{en}/ρ (m^2/kg)	剂量率（μGy/h）
^{89}Sr	1.48×10^8	6.3（有机玻璃）	0.5818	1	2.955×10^{-3}	0.072
^{153}Sm	1.48×10^9	5.85（有机玻璃）	0.881	1	2.362×10^{-3}	7.27×10^{-5}
		7.36（空气）				9.15×10^{-5}
^{131}I	7.4×10^5（甲功）	5.85（有机玻璃）	0.1916	1	2.642×10^{-3}	＜0.001
		7.36（空气）				＜0.001
	7.4×10^8（甲亢）	5.85（有机玻璃）	0.1916	1	2.642×10^{-3}	0.019
		7.36（空气）				0.024

注：质量能量吸收系数取自《辐射防护导论》方杰主编。

由估算结果可知，距屏蔽层1m处韧致辐射剂量率低于0.072μGy/h，且注射时一般在铅注射窗下给患者施药，经铅玻璃的进一步屏蔽后所致工作人员处辐射剂量率将远低于0.072μGy/h，因此骨转移项目对周围辐射环境影响很少。

综上所述，本项目涉及使用的^{18}F等放射性核素在整个过程中均采取了有效的屏

蔽措施屏蔽 β 射线，同时在整个使用过程中辐射工作人员还穿戴有 0.5mm 铅当量的防护铅服，且周围公众与放射性核素之前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）β 放射性表面污染影响分析

β 放射性表面沾污的影响主要来源于辐射工作人员操作时，放射性物质逸出或飞散在操作台、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，为了使本项目核医学科的β放射性表面污染水平达到 GB 18871-2002 规定的要求，环评要求建设方要做到以下防护措施：

（1）使用、操作放射性同位素的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；

（2）本项目放射性核素操作均在手套箱中进行；

（3）操作 ^{18}F、^{99m}Tc、^{89}Sr 和 ^{153}Sm 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，并铺以吸水性好的材料；

（4）不允许用裸露的手直接接触放射性物质或进行污染物件操作；

（5）放射性操作之后应对工作台、设备、地面及个人防护用品等进行表面污染检查、清洗、去污；

（6）做好就诊患者的管理，特别是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 GB 18871-2002 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，同时辐射工作人员出现手、皮肤、内衣、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射剂量，并根据评估结果采取下一步措施（调整工作或接受治疗等）。

（3）γ 射线辐射影响分析

本项目主要污染因子为 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 等放射性核素在取药、分装、注射、注射后候诊、扫描等操作过程中产生的γ射线。

参考《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）附录 I 中第 1.2 款 ^{99m}Tc 诊断、^{131}I 治疗、PET 等工作场所的屏蔽计算，保守起见，所有核素（如 ^{99m}Tc、^{131}I、^{18}F 等）工作场所的屏蔽，可采用瞬时剂量率计算方法。

$$X = TVL \times \lg(\frac{A \times \Gamma}{\dot{H}_P \times r^2}) \cdots\cdots\cdots\cdots（I.1）$$

式中：X—屏蔽厚度（mm）；

TVL—γ 射线的十分之一值层厚度（mm）；

A —单个患者或者受检者所用放射源的最大活度（MBq）；

Γ —距源 1m 处的周围剂量当量率常数（μSv·m^2/MBq·h）；

$\dot{H}_P$—屏蔽体外关注点剂量率（μSv/h）；

R —放射源到考察点的距离（m）。

由公式 I.1 推导可得：

$$\dot{H}_P = \frac{A \times \Gamma}{r^2} 10^{(-\frac{x}{TVL})} \cdots\cdots 公式\ 11\text{-}18$$

由《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）查出铅、混凝土和实心砖对 ^{99m}Tc 和 ^{18}F 什值层见表 11-39。

表 11-39 本项目涉及核素辐射剂量率估算相关参数取值表

核素名称	^{99m}Tc	^{18}F	^{131}I
铅什值层厚度 TVL（ρ=11.3g/cm^3）	1mm	16.6mm	11mm
砼什值层厚度 TVL（ρ=2.35g/cm^3）	110mm	176mm	170mm
实心砖什值层厚度 TVL（ρ=1.65g/cm^3）	160mm	263mm	240mm

再采用方杰主编的《辐射防护导论》中公式计算参考点人员的有效剂量。

$$D_{Eff} = \dot{H}_P \cdot t \cdot T \cdot U \cdots\cdots 公式\ 11\text{-}15$$

上式中：D_{Eff}—考察点人员有效剂量（Sv）；

$\dot{H}_P$—考察点的空气比释动能率（μSv/h）；

t—考察点处受放射性核素影响的时间（h）；

T—居留因子，全部居留 T=1，部分居留 T=1/4，偶尔居留 T=1/16；

U—使用因子，因放射性核素以点源模式估算，而放射性衰变是持续发生的，U 取 1；

①使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲状腺吸碘率测定及甲亢治疗项目

根据本项目的工程分析可知，甲状腺吸碘率测定的患者在口服药物后进入甲吸室进行相关测定，测定过程按照 5min 估算，测定结束后随即离开工作场所。甲亢患者在口服药物后进行甲亢留观室，留观约 10min，随后离开工作场所，以上过程对影像中心的辐射工作人员及室外公众产生外照射辐射影响。

根据公式 11-4 可估算出项目周围各参考点处的辐射水平，预测结果见表 11-40。

表 11-40 理论估算结果汇总

甲功测定				
关注点		距离（m）	屏蔽材料	剂量率（μSv/h）
服药间（源强：0.37MBq）	东墙外 30cm 处	1.8	370mm 实心砖	＜0.001
	西墙外 30cm 处	1.8	370mm 实心砖	＜0.001
	顶部 30cm 处	4.8	250mm 混凝土	＜0.001
甲吸室（源强：0.37MBq）	东墙外 30cm 处	3.3	370mm 实心砖	＜0.001
	西墙外 30cm 处	3.3	370mm 实心砖	＜0.001
	顶部 30cm 处	4.8	250mm 混凝土	＜0.001

甲亢治疗				
关注点		距离（m）	屏蔽材料	剂量率（μSv/h）
服药间（源强：370MBq）	东墙外 30cm 处	1.8	370mm 实心砖	0.195
	西墙外 30cm 处	1.8	370mm 实心砖	0.195
	顶部 30cm 处	4.8	250mm 混凝土	0.016
甲亢留观室（源强：740MBq）	东墙外 30cm 处	3.2	370mm 实心砖	0.124
	西墙外 30cm 处	3.2	370mm 实心砖	0.124
	顶部 30cm 处	4.8	250mm 混凝土	0.127

由上表估算结果可知，服药间、甲吸室和甲亢留观室关注点剂量率均小于 2.5μSv/h，该区域防护屏蔽能够满足标准要求。

②使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT 显像检查项目

根据本项目的工程分析可知，SPECT/CT 核素诊断项目辐射影响主要包括护士分装、取药和活度测量（保守按照 2min 估算）、药物注射（保守按照 1min 估算）、病人候诊（等候约 20min）和病人扫描（扫描过程约 20min）4 个过程，主要对 SPECT/CT 工作人员及室外公众产生外照射辐射影响。

根据公式 11-18 可估算出项目周围各参考点处的辐射水平，各参考点位置见图 11-7，预测结果见表 11-41。

图 11-7　核医学科使用 ^{99m}Tc 时估算点位示意图

表 11-41 影像中心使用 ^{99m}Tc 时理论估算结果汇总

点位	参考点位置	源强(Bq)	距离（m）	屏蔽材料及厚度	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）	备注
1	手套箱外表面 30cm 处	$600\times3.70\times10^{7}$	0.3	5mmPb	1×10^{-5}	0.075	手套箱为 40mmPb
2	注射位	$20\times3.70\times10^{7}$	0.5	5mmPb	1×10^{-5}	0.001	/
3	注射室西南墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	3.1	30cm 厚混凝土	0.002	0.004	/
4	注射室顶部距地面 1m 处	$20\times3.70\times10^{7}$	5.65	30cm 厚混凝土	0.002	0.001	/
5	运动平板室东南墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	2.3	30cm 厚混凝土	0.002	0.008	/
6	运动平板室防护门外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	2.4	3mmPb	0.001	0.004	/
7	运动平板室东西南墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	2.1	30cm 厚混凝土	0.002	0.010	/
8	运动平板室西北墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	2.3	30cm 厚混凝土	0.002	0.008	/
9	运动平板室防护门外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	2.4	3mmPb	0.001	0.004	/
10	运动平板室顶部距地面 1m 处	$20\times3.70\times10^{7}$	5.65	30cm 厚混凝土	0.002	0.001	假设 5 人候诊
11	SPECT 注射后等候室 1 东南墙外表面 30cm 处	$100\times3.70\times10^{7}$	3.1	24cm 厚混凝土砖墙	0.007	0.077	
12	SPECT 注射后等候室 1 防护门外表面 30cm 处	$100\times3.70\times10^{7}$	4.0	3mmPb	0.001	0.007	
13	SPECT 注射后等候室 1 西南墙外表面 30cm 处	$100\times3.70\times10^{7}$	5.1	30cm 厚混凝土	0.002	0.008	
14	SPECT 注射后等候室 1 西北墙外表面 30cm 处	$100\times3.70\times10^{7}$	3.1	30cm 厚混凝土	0.002	0.022	
15	SPECT 注射后等候室 1 顶部距地面 1m 处	$100\times3.70\times10^{7}$	5.65	30cm 厚混凝土	0.002	0.007	
16	SPECT 注射后等候室 1 下方距地面 1.7m 处	$100\times3.70\times10^{7}$	5.10	30cm 厚混凝土	0.002	0.008	
17	SPECT 注射后等候室 2 东南墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	2.0	24cm 厚混凝土砖墙	0.007	0.037	/
18	SPECT 注射后等候室 2 西南墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	3.1	30cm 厚混凝土	0.002	0.004	/
19	SPECT 注射后等候室 2 西北墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	2.0	30cm 厚混凝土	0.002	0.011	/
20	SPECT 注射后等候室 2 防护门外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	3.1	3mmPb	0.001	0.002	/
21	SPECT 注射后等候室 2 东北墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^{7}$	3.1	24cm 厚混凝土砖墙	0.007	0.015	/
22	SPECT 注射后等候室 2 顶部距地面 1m 处	$20\times3.70\times10^{7}$	5.65	30cm 厚混凝土	0.002	0.001	/

23	SPECT 注射后等候室 2 下方距地面 1.7m 处	$20\times3.70\times10^7$	5.10	30cm 厚混凝土	0.002	0.002	/
24	SPECT/CT 机房东南墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^7$	3.6	30cm 厚混凝土	0.002	0.003	/
25	SPECT/CT 机房西南墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^7$	4.8	30cm 厚混凝土	0.002	0.002	/
26	操作位	$20\times3.70\times10^7$	4.8	5mmPb	＜0.001	＜0.001	/
27	SPECT/CT 机房西北墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^7$	3.6	30cm 厚混凝土	0.002	0.003	/
28	SPECT/CT 机房东北墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^7$	4.8	30cm 厚混凝土	0.002	0.002	/
29	SPECT/CT 机房防护门外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^7$	4.8	5mmPb	＜0.001	＜0.001	/
30	SPECT/CT 机房顶部距地面 1m 处	$20\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.002	0.001	/
31	SPECT/CT 机房下方距地面 1.7m 处	$20\times3.70\times10^7$	5.10	30cm 厚混凝土	0.002	0.002	/
32	摆位/解除摆位	$20\times3.70\times10^7$	0.5	2mmPb	0.010	0.897	2mmPb 铅屏风
33	留观室西北墙外表面 30cm 处	$20\times3.70\times10^7$	2.2	24cm 厚混凝土砖墙	0.007	0.030	/
34	留观室顶部距地面 1m 处	$40\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.002	0.003	假设 2 人同时留观
35	留观室下方距地面 1.7m 处	$40\times3.70\times10^7$	5.1	30cm 厚混凝土	0.002	0.003	
36	留观室防护门外表面 30cm 处	$40\times3.70\times10^7$	2.0	3mmPb	0.001	0.011	

从表 11-41 中的理论估算结果可以看出，由于有 5mm 铅当量手套箱屏蔽，^{99m}Tc 药物取药过程中对取药操作人员的躯干辐射影响较小，但由于需要用手操作，手部剂量较高。^{99m}Tc 药物针剂外设有铅套、同时操作中工作人员穿戴铅防护服，药物操作过程中对注射室内环境辐射影响较小。^{99m}Tc 药物在操作过程中及病人在显像过程中对注射室、候诊区及机房外的环境影响较小，注射室、候诊区及机房的防护设计均能够满足 ^{99m}Tc 核素的辐射防护要求，项目对核医学科周围环境辐射影响较小，均小于 2.5μSv/h；候诊期间由于病人相对集中，医院必须采取分批预约、分批注射、分批候诊的方式，严格按要求控制候诊室内病人的数量，降低对病人及外环境的辐射影响。

②使用放射性同位素 ^{18}F 和 ^{68}Ga 等开展 PET/CT 显像检查项目

本项目使用的 ^{68}Ga 通过锗镓发生器，淋洗、分装于注射室手套箱内，在使用时，操作人员仅需完成插瓶、取瓶、标记等步骤，近距离接触时间较短约 5min，年受照时间约 2500min（5min×2 次×250d）。根据医院提供的资料，锗镓发生器在使用过程中，发生器表面剂量率约 12μSv/（h•GBq），本项目锗镓发生器为 50mCi（1.85×10^{9}Bq），则锗镓发生器表面剂量率约为 22.2μSv/h，手套箱为 75mmPb，操作时辐射工作人员与发生器的距离取 0.5m，则辐射工作人员淋洗药物时所受年有效剂量约为 0.002mSv/a。

由于 ^{68}Ga 等核素特性与 ^{18}F 类似，且本项目使用最多的核素是 ^{18}F，故本报告以使用 ^{18}F 开展 PET/CT 和 PET/MRI 显像作为典型工况来计算工作场所的辐射剂量率是否满足要求。

根据本项目的工程分析可知，PET/CT 和 PET/MRI 核素诊断项目辐射影响主要包括护士分装、取药和活度测量（保守按照 2min 估算）、药物注射（保守按照 1min 估算）、病人候诊（等候约 20min）和病人扫描（扫描过程约 20min）4 个过程，主要对 PET/CT 工作人员及室外公众产生外照射辐射影响。

根据公式 11-18 可估算出项目周围各参考点处的辐射水平，各参考点位置见图 11-8，预测结果见表 11-42。

图 11-8　核医学科使用 ^{18}F 时估算点位示意图

表 11-42 影像中心使用 ^{18}F 理论估算结果汇总

点位	参考点位置	源强(Bq)	距离（m）	屏蔽材料及厚度	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）	备注
1	手套箱外表面 30cm 处	$100\times3.70\times10^7$	0.3	75mmPb	0.0001	0.178	手套箱 75mmPb 铅套 10mmPb 注射窗 50mmPb
2	注射位	$10\times3.70\times10^7$	0.5	60mmPb	0.0002	0.051	
3	注射室西南墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	3.1	30cm 厚混凝土	0.0197	0.109	
4	注射室顶部距地面 1m 处	$10\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.0197	0.033	
5	PET/CT 注射后等候室 1 东南墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	1.8	24cm 厚混凝土砖墙	0.0433	0.707	/
6	PET/CT 注射后等候室 1 防护门外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	4.5	8mmPb	0.3297	0.861	/
7	PET/CT 注射后等候室 1 西南墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	4.4	24cm 厚混凝土砖墙	0.0433	0.118	/
8	PET/CT 注射后等候室 1 西北墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	1.8	24cm 厚混凝土砖墙	0.0433	0.707	/
9	PET/CT 注射后等候室 1 东北墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	3.0	30cm 厚混凝土	0.0197	0.116	/
10	PET/CT 注射后等候室 1 顶部距地面 1m 处	$10\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.0197	0.033	/
11	PET/CT 注射后等候室 1 下方距地面 1.7m 处	$10\times3.70\times10^7$	5.10	30cm 厚混凝土	0.0197	0.040	/
12	PET/CT 注射后等候室 5 东南墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	2.1	24cm 厚混凝土砖墙	0.0433	0.519	/
13	PET/CT 注射后等候室 5 西南墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	3.1	30cm 厚混凝土	0.0197	0.070	/
14	PET/CT 注射后等候室 5 西北墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	2.1	24cm 厚混凝土砖墙	0.0433	0.519	/
15	PET/CT 注射后等候室 5 防护门外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	3.2	8mmPb	0.3297	1.703	/
16	PET/CT 注射后等候室 5 东北墙外表面 30cm 处	$10\times3.70\times10^7$	3.1	24cm 厚混凝土砖墙	0.0433	0.238	/
17	PET/CT 注射后等候室 5 顶部距地面 1m 处	$10\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.0197	0.033	/
18	PET/CT 注射后等候室 5 下方距地面 1.7m 处	$10\times3.70\times10^7$	5.10	30cm 厚混凝土	0.0197	0.040	/
19	PET/CT 机房东南墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	3.6	30cm 厚混凝土	0.0197	0.053	考虑衰变 20min，5mmPb 铅屏风
20	PET/CT 机房西南墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	4.9	30cm 厚混凝土	0.0197	0.029	
21	操作位	$6.57\times3.70\times10^7$	4.9	12mmPb	0.1893	0.274	
22	PET/CT 机房西北墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	3.6	30cm 厚混凝土	0.0197	0.053	

23	PET/CT 机房防护门外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	5.0	8mmPb	0.3297	0.458	
24	PET/CT 机房东北墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	4.9	30cm 厚混凝土	0.0197	0.029	
25	PET/CT 机房顶部距地面 1m 处	$6.57\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.0197	0.022	
26	PET/CT 机房下方距地面 1.7m 处	$6.57\times3.70\times10^7$	5.10	30cm 厚混凝土	0.0197	0.026	
27	摆位/解除摆位	$6.57\times3.70\times10^7$	1	5mmPb	0.4998	17.374	
28	PET/MRI 机房东南墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	5.8	30cm 厚混凝土	0.0197	0.020	
29	PET/MRI 机房西南墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	4.7	30cm 厚混凝土	0.0197	0.031	
30	PET/MRI 机房西北墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	5.8	30cm 厚混凝土	0.0197	0.020	
31	操作位	$6.57\times3.70\times10^7$	5.8	12mmPb	0.1893	0.196	
32	PET/MRI 机房东北墙外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	4.7	30cm 厚混凝土	0.0197	0.031	
33	PET/MRI 机房防护门外表面 30cm 处	$6.57\times3.70\times10^7$	4.7	8mmPb	0.3297	0.519	
34	摆位/解除摆位	$6.57\times3.70\times10^7$	1	5mmPb	0.4998	17.374	
35	PET/MRI 机房顶部距地面 1m 处	$6.57\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.0197	0.022	
36	PET/MRI 机房下方距地面 1.7m 处	$6.57\times3.70\times10^7$	5.10	30cm 厚混凝土	0.0197	0.026	
37	留观室西北墙外表面 30cm 处	$4.32\times3.70\times10^7$	1.8	24cm 厚混凝土砖墙	0.0433	0.305	考虑衰变 40min
38	留观室顶部距地面 1m 处	$4.32\times3.70\times10^7$	5.65	30cm 厚混凝土	0.0197	0.014	
39	留观室下方距地面 1.7m 处	$4.32\times3.70\times10^7$	5.10	30cm 厚混凝土	0.0197	0.017	
40	留观室防护门外表面 30cm 处	$4.32\times3.70\times10^7$	2.0	12mmPb	0.1893	1.082	

从表 11-42 中的理论估算结果可以看出，由于有 75mm 铅当量通风橱屏蔽，^{18}F 药物取药过程中对取药操作人员的躯干辐射影响较小，但由于需要用手操作，手部剂量较高。^{18}F 药物针剂外设有铅套、同时操作中工作人员穿戴铅防护服，药物操作过程中对注射室内环境辐射影响较小。^{18}F 药物在操作过程中及病人在显像过程中对注射室、候诊区及机房外的环境影响较小，注射室、候诊区及机房的防护设计均能够满足 ^{18}F 核素的辐射防护要求，项目对核医学科周围环境辐射影响较小，均小于 2.5μSv/h；候诊期间由于病人相对集中，医院必须采取分批预约、分批注射、分批候诊的方式，严格按要求控制候诊室内病人的数量，降低对病人及外环境的辐射影响。

（4）CT 环境影响分析

本项目按额定管电压 140kV 核算 SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房各屏蔽部位屏蔽材料的等效铅当量厚度。本项目 SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房辐射防护设计及其等效铅当量见表 11-43。

表 11-43 核医学科 SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房辐射防护设计及其等效铅当量一览表

参数		设计厚度[1)]	铅当量[2)]	屏蔽要求	评价
SPECT/CT	墙体	30cm 厚混凝土	3.8mm	CT 机房屏蔽防护铅当量厚度要求：有用线束方向、非有用线束方向铅当量 2.5mm。	满足
	防护门	5.0mm 铅	5.0mm		满足
	观察窗	5.0mm 铅当量	5.0mm		满足
	顶部	30cm 厚混凝土	3.8mm		满足
	地面	30cm 厚混凝土	3.8mm		满足
	面积	37.5m^2，最小单边长度为 5.55m		CT 机房内最小有效新建面积不小于 30m^2，单边长度不小于 4.5m。	满足
PET/CT	墙体	30cm 厚混凝土	3.8mm	CT 机房屏蔽防护铅当量厚度要求：有用线束方向、非有用线束方向铅当量 2.5mm。	满足
	防护门	8mm 铅	8mm		满足
	观察窗	12mm 铅当量	12mm		满足
	顶部	30cm 厚混凝土	3.8mm		满足
	地面	30cm 厚混凝土	3.8mm		满足
	面积	56.4m^2，最小单边长度为 6.8m		CT 机房内最小有效新建面积不小于 30m^2，单边长度不小于 4.5m。	满足

注：1、混凝土密度为 2.35g/cm^3，铅板密度为 11.3g/cm^3；

2、混凝土参照 GBZ 130-2020 中表 C.5 及表 C.6 中等效铅当量厚度数值采用插值法求得。

由上表可知，核医学科 SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房屏蔽防护措施能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的标准要求。

本项目 SPECT/CT 机房和 PET/CT 机房辐射屏蔽主要考虑散射辐射与泄漏辐射的影响。本项目 SPECT/CT 和 PET/CT 设备型号未定，以 CT 模式运行时，其常用最大

管电流约为 200mA、最大管电压为 140kV，根据《辐射防护手册（第一分册）》P448 的能量散射公式计算一次散射能量与初级射线能量的比值，140kV 射线经过一次散射后的射线能量约为 109.9kV，故本项目保守按 120kV 进行计算。

①关注点处散射辐射剂量率计算

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）：

$$H_S = \frac{H_0 \cdot I \cdot a \cdot (s/400) \cdot B_s}{d_0^2 \cdot r^2} \cdot K \quad \cdots\cdots \text{公式 11-19}$$

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），$mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，具体数值可根据 X 射线机管电压、过滤片等条件从《辐射防护导论》附图 3 查取，按本项目 CT 的最大管电压为 140kV、过滤片为 2.5mmAl 的条件从《辐射防护导论》附图 3 查得 H_0 为 $15mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，即 $900000\mu Gy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot h^{-1}$；

I—管电流，mA；本项目 CT 模式下正常使用的最大管电流为 100mA；

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，本项目取值为 0.0018；

S—主束在受照人体上的散射面积，本项目取 $314cm^2$；

d_0—源至受照点的距离，本项目保守取 0.6m；

r—受照体至关注点的距离。

B_s—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见式 11-20：

$$B_s = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\right) e^{\alpha\gamma X} - \frac{\beta}{\alpha}\right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \cdots\cdots \text{公式 11-20}$$

式中：X—铅厚度，本项目机房屏蔽体的铅厚度见表 11-43；

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，具体见表 11-44。

表 11-44 铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

管电压	α	β	γ
140kV（CT）	2.009	3.99	0.342
120kV（CT）	2.246	5.730	0.5470

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2， K 值取 1.60。

②关注点处泄漏辐射剂量率计算

泄漏辐射剂量率$\dot{H}_L$采用下式计算：

$$\dot{H}_L = \frac{H_i \cdot B}{r^2} \cdot K \cdots\cdots \text{公式 11-21}$$

式中：H_i—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 0.8mGy/h。

B—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见式 11-20。

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2，*K* 值取 1.60。

按照公式 11-20 计算屏蔽物质的屏蔽透射因子 *B*，机房外关注点处的辐射剂量率理论估算结果汇总见表 11-45 和表 11-46。

表 11-45 SPECT/CT 机房 CT 出束状态下参考点处及叠加 ^{99m}Tc 放射性药物的辐射剂量率核算值

参考点位	**24#**	**25#**	**26#**	**27#**	**28#**	**29#**	**30#**	**31#**
r（m）	3.6	4.8	4.8	3.6	4.8	4.8	5.65	5.10
B_s	2×10^{-5}	2×10^{-5}	1.3×10^{-6}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}
H_0	900000μGy·m^2·mA^{-1}·h^{-1}							
B	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}	1.9×10^{-6}	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}
H_i	800μGy/h							
剂量率估算值 *H*（μGy/h）	0.858	0.483	0.032	0.858	0.483	0.483	0.348	0.427
^{99m}Tc 致参考点辐射水平（μSv/h）	0.003	0.002	＜0.001	0.003	0.002	＜0.001	0.001	0.002
叠加辐射水平（μSv/h）	0.861	0.485	0.032	0.861	0.485	0.483	0.349	0.429
控制目标值（μSv/h）	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
是否满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

计算结果表明， SPECT/CT 以 CT 模式运行（工况：140kV/100mA）时，叠加放射性药物的辐射影响，机房四周墙体、顶部、地面及防护门处的辐射剂量率为（0.032~0.861）μSv/h，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的要求。

表 11-46 PET/CT 机房 CT 出束状态下参考点处及叠加 ^{18}F 放射性药物的辐射剂量率核算值

参考点位	**19#**	**20#**	**21#**	**22#**	**23#**	**24#**	**25#**	**26#**
r（m）	3.6	4.9	4.9	3.6	5.0	4.9	5.65	5.10
B_s	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.9×10^{-13}	2.0×10^{-5}	1.6×10^{-9}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
H_0	900000μGy·m^2·mA^{-1}·h^{-1}							
B	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}	1.4×10^{-12}	2.3×10^{-5}	4.3×10^{-9}	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.3×10^{-5}

H_i	800μGy/h							
剂量率估算值 H（μGy/h）	0.858	0.463	＜0.001	0.858	＜0.001	0.463	0.348	0.427
^{18}F 致参考点辐射水平（μSv/h）	0.053	0.029	0.274	0.053	0.458	0.029	0.022	0.026
叠加辐射水平（μSv/h）	0.911	0.492	0.274	0.911	0.458	0.492	0.370	0.453
控制目标值（μSv/h）	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
是否满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

计算结果表明， PET/CT 以 CT 模式运行（工况：140kV/100mA）时，叠加放射性药物的辐射影响，机房四周墙体、顶部、地面及防护门处的辐射剂量率为（0.274~0.911）μSv/h，满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中的要求。

（5）保护目标的有效剂量估算

SPECT/CT 使用 ^{99m}Tc 核素诊断过程中，工作人员主要受照射环节为取药、注射过程及病人扫描诊断过程。一般情况下，药物取药过程约 2 分钟，送至注射窗口、注射过程约 1 分钟，扫描过程约 20 分钟。

根据表 11-41 的各关注点处辐射剂量率，结合工作时间，辐射工作人员和公众停留概率，即可得到各关注点处公众及辐射工作人员的年受照剂量，见表 11-47。

表 11-47　使用 ^{99m}Tc 显像扫描时工作场所公众及辐射工作人员年有效剂量估算

点位	关注点位置	关注点辐射水平（μSv/h）	关注对象	居留因子	受照时间（min）	有效剂量（mSv）	目标管理限值（mSv）
1	手套箱外表面 30cm 处	0.075	工作人员	1	取药 2min×30 次×250d	0.019	5.0
2	注射位	0.001	工作人员	1	注射 1min×30 次×250d	＜0.001	5.0
3	注射室西南墙外表面 30cm 处	0.004	公众	1/4	注射 1min×30 次×250d	＜0.001	0.10
4	注射室顶部距地面 1m 处	0.001	公众	1/16	注射 1min×30 次×250d	＜0.001	0.10
10	运动平板室顶部距地面 1m 处	0.001	公众	1/16	运动 10min×30 次×250d	＜0.001	0.10
14	SPECT 注射后等候室 1 西北墙外表面 30cm 处	0.022	公众	1/4	候诊 20min×5 次×250d	0.002	0.10
15	SPECT 注射后等候室 1 顶部距地面 1m 处	0.007	公众	1/16	候诊 20min×5 次×250d	＜0.001	0.10
16	SPECT 注射后等候室 1 下方距地面 1.7m 处	0.008	公众	1/16	候诊 20min×5 次×250d	＜0.001	0.10
18	SPECT 注射后等候室 2 西南墙外表 30cm 处	0.004	公众	1/16	候诊 20min×5 次×250d	＜0.001	0.10
22	SPECT 注射后等候室 2 顶部距地面 1m 处	0.001	公众	1/16	候诊 20min×5 次×250d	＜0.001	0.10
23	SPECT 注射后等候室 2 下方距地面 1.7m 处	0.002	公众	1/16	候诊 20min×5 次×250d	＜0.001	0.10
25	SPECT/CT 机房西南墙外表面 30cm 处	0.002	工作人员	1/4	显像 20min×30 次×250d	0.001	5.0
26	操作位	＜0.001	工作人员	1	显像 20min×30 次×250d	＜0.001	5.0
27	SPECT/CT 机房西北墙外表面 30cm 处	0.003	公众	1/4	显像 20min×30 次×250d	0.002	0.10
30	SPECT/CT 机房顶部距地面 1m 处	0.001	公众	1/16	显像 20min×30 次×250d	＜0.001	0.10
31	SPECT/CT 机房下方距地面 1.7m 处	0.002	公众	1/16	显像 20min×30 次×250d	＜0.001	0.10
32	摆位/解除摆位	0.897	工作人员	1	摆位 1min×30 次×250d	0.112	5.0
34	留观室顶部距地面 1m 处	0.003	公众	1/16	留观 10min×15 次×250d	＜0.001	0.10
35	留观室下方距地面 1.7m 处	0.003	公众	1/16	留观 10min×15 次×250d	＜0.001	0.10
36	留观室防护门外表面 30cm 处	0.011	公众	1/16	留观 10min×15 次×250d	＜0.001	0.10

核医学诊断项目过程中，工作人员主要受照射环节为分装、注射过程及患者扫描诊断过程。一般情况下，分装过程约 2 分钟，送至注射窗口、注射过程约 1 分钟，扫描过程约 20 分钟。预测本项目运行后， SPECT 诊断项目日接诊量最大为 30 人次。本项目 SPECT/CT 以 CT 模式运行的时间较短，平均每名患者约 20s，机房内 CT 出束致公众及辐射工作人员年有效剂量估算见表 11-48。

表 11-48 SPECT/CT 机房内 CT 出束致公众及辐射工作人员年有效剂量估算

点位	参考点位置	CT 致参考点辐射水平（μSv/h）	居留因子	CT 致参考点人员有效剂量（mSv/a）	关注对象	位置
25	SPECT/CT 机房西南墙外表面 30cm 处	0.483	1/4	8.01×10^{-5}	公众	过道
26	操作位	0.032	1	1.34×10^{-5}	工作人员	控制室
27	SPECT/CT 机房西北墙外表面 30cm 处	0.858	1/4	3.56×10^{-6}	工作人员	控制室
30	SPECT/CT 机房顶部距地面 1m 处	0.348	1/16	3.61×10^{-5}	工作人员	控制室
31	SPECT/CT 机房下方距地面 1.7m 处	0.427	1/16	4.43×10^{-6}	公众	设备间

根据上述估算结果，分装过程中人员受到的年有效剂量为 0.019mSv，注射过程中人员受到的年有效剂量为＜0.001mSv，扫描过程中受到的年有效剂量约为 0.112mSv（＜0.001mSv/a<操作位>+1.34×10^{-5}mSv/a<操作位>+0.112mSv/a<摆位>）。辐射工作人员所受年有效剂量最大约为 0.112mSv，能够满足职业人员年有效剂量不超过 5mSv 的限值要求。

根据上述估算结果，核医学诊断项目工作过程中，周围公众（控制区、监督区外）年有效剂量最大为 0.002mSv，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）对公众受照剂量限值要求以及本项目的目标管理值要求（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

PET/CT 使用 ^{18}F 核素诊断过程中，工作人员主要受照射环节为取药、注射过程及病人扫描诊断过程。一般情况下，药物取药过程约 2 分钟，送至注射窗口、注射过程约 1 分钟，扫描过程约 20 分钟。

根据表 11-42 的各关注点处辐射剂量率，结合工作时间，辐射工作人员和公众停留概率，即可得到各关注点处公众及辐射工作人员的年受照剂量，见表 11-49。

表 11-49 使用 ^{18}F 显像扫描时工作场所公众及辐射工作人员年有效剂量估算

点位	关注点位置	辐射水平（μSv/h）	关注对象	居留因子	受照时间（min）	有效剂量（mSv）	目标管理限值（mSv）
1	手套箱外表面 30cm 处	0.178	工作人员	1	取药 2min×30 次×250d	0.045	5.0
2	注射位	0.051	工作人员	1	注射 1min×30 次×250d	0.006	5.0
3	注射室西南墙外表面 30cm 处	0.109	公众	1/4	注射 1min×30 次×250d	0.003	0.10
4	注射室顶部距地面 1m 处	0.033	公众	1/16	注射 1min×30 次×250d	0.001	0.10
9	PET/CT 注射后等候室 1 东北墙外表面 30cm 处	0.116	公众	1/16	候诊 20min×4 次×250d	0.002	0.10
10	PET/CT 注射后等候室 1 顶部距地面 1m 处	0.033	公众	1/16	候诊 20min×4 次×250d	0.001	0.10
11	PET/CT 注射后等候室 1 下方距地面 1.7m 处	0.040	公众	1/16	候诊 20min×4 次×250d	0.001	0.10
13	PET/CT 注射后等候室 5 西南墙外表面 30cm 处	0.070	公众	1/16	候诊 20min×4 次×250d	0.001	0.10
17	PET/CT 注射后等候室 5 顶部距地面 1m 处	0.033	公众	1/16	候诊 20min×4 次×250d	0.001	0.10
18	PET/CT 注射后等候室 5 下方距地面 1.7m 处	0.040	公众	1/16	候诊 20min×4 次×250d	0.001	0.10
19	PET/CT 机房东南墙外表面 30cm 处	0.053	工作人员	1	显像 20min×20 次×250d	0.088	5.0
20	PET/CT 机房西南墙外表面 30cm 处	0.029	工作人员	1/4	显像 20min×20 次×250d	0.012	5.0
21	操作位	0.274	工作人员	1	显像 20min×20 次×250d	0.457	5.0
25	PET/CT 机房顶部距地面 1m 处	0.022	公众	1/16	显像 20min×20 次×250d	0.002	0.10
26	PET/CT 机房下方距地面 1.7m 处	0.026	公众	1/16	显像 20min×20 次×250d	0.003	0.10
27	摆位/解除摆位	17.374	工作人员	1	摆位 1min×20 次×250d	1.448	5.0
28	PET/MRI 机房东南墙外表面 30cm 处	0.020	公众	1/16	显像 20min×10 次×250d	0.001	0.10
29	PET/MRI 机房西南墙外表面 30cm 处	0.031	公众	1/16	显像 20min×10 次×250d	0.002	0.10
30	PET/MRI 机房西北墙外表面 30cm 处	0.020	工作人员	1/4	显像 20min×10 次×250d	0.004	5.0
31	操作位	0.196	工作人员	1	显像 20min×10 次×250d	0.163	5.0
34	摆位/解除摆位	17.374	工作人员	1	摆位 1min×10 次×250d	0.724	5.0
35	PET/MRI 机房顶部距地面 1m 处	0.022	公众	1/16	显像 20min×10 次×250d	0.001	0.10
36	PET/MRI 机房下方距地面 1.7m 处	0.026	公众	1/16	显像 20min×10 次×250d	0.001	0.10

38	留观室顶部距地面 1m 处	0.014	公众	1/16	留观 10min×30 次×250d	0.001	0.10
39	留观室下方距地面 1.7m 处	0.017	公众	1/16	留观 10min×30 次×250d	0.001	0.10
40	留观室防护门外表面 30cm 处	1.082	公众	1/16	留观 10min×30 次×250d	0.085	0.10

核医学诊断项目过程中，工作人员主要受照射环节为分装、注射过程及患者扫描诊断过程。一般情况下，分装过程约 2 分钟，送至注射窗口、注射过程约 1 分钟，扫描过程约 20 分钟。预测本项目运行后， PET 诊断项目日接诊量最大为 20 人次。本项目 PET/CT 以 CT 模式运行的时间较短，平均每名患者约 20s，机房内 CT 出束致公众及辐射工作人员年有效剂量估算见表 11-50。

表 11-50 PET/CT 机房内 CT 出束致公众及辐射工作人员年有效剂量估算

点位	参考点位置	CT 致参考点辐射水平（μSv/h）	居留因子	CT 致参考点人员有效剂量（mSv/a）	关注对象	位置
19	PET/CT 机房东南墙外表面 30cm 处	0.858	1	9.52×10^{-5}	工作人员	控制室
20	PET/CT 机房西南墙外表面 30cm 处	0.463	1/4	1.28×10^{-5}	工作人员	控制室
21	操作位	5.5×10^{-9}	1	1.29×10^{-13}	工作人员	控制室
25	PET/CT 机房顶部距地面 1m 处	0.348	1/16	2.42×10^{-6}	公众	设备间
26	PET/CT 机房下方距地面 1.7m 处	0.427	1/16	2.97×10^{-6}	公众	停车位

根据上述估算结果，分装过程中人员受到的年有效剂量为 0.045mSv，注射过程中人员受到的年有效剂量为 0.006mSv，扫描过程中受到的年有效剂量约为 1.905mSv（＜0.457mSv/a<操作位>+1.29×10^{-13}mSv/a<操作位>+1.448mSv/a<摆位>）。辐射工作人员所受年有效剂量最大约为 1.905mSv，能够满足职业人员年有效剂量不超过 5mSv 的限值要求。

根据上述估算结果，核医学诊断项目工作过程中，周围公众（控制区、监督区外）年有效剂量最大为 0.085mSv，能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）对公众受照剂量限值要求以及本项目的目标管理值要求（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

3、核素治疗中心辐射环境影响分析

参考《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）附录 I 中第 1.2 款 ^{99m}Tc 诊断、^{131}I 治疗、PET 等工作场所的屏蔽计算，保守起见，所有核素（如 ^{99m}Tc、^{131}I、^{18}F 等）工作场所的屏蔽，可采用瞬时剂量率计算方法。

$$X = TVL \times \lg(\frac{A\times\Gamma}{\dot{H}_P\times r^2})\cdots\cdots（I.1）$$

式中：X—屏蔽厚度（mm）；

TVL—γ 射线的十分之一值层厚度（mm）；

A —单个患者或者受检者所用放射源的最大活度（MBq）；

Γ —距源 1m 处的周围剂量当量率常数（μSv·m^2/MBq·h）；

$\dot{H}_P$—屏蔽体外关注点剂量率（μSv/h）；

R —放射源到考察点的距离（m）。

由公式 I.1 推导可得：

$$\dot{H}_P = \frac{A \times \Gamma}{r^2} 10^{(-\frac{x}{TVL})} \cdots\cdots \text{公式 11-18}$$

再采用方杰主编的《辐射防护导论》中公式计算参考点人员的有效剂量。

$$D_{Eff} = \dot{H}_P \cdot t \cdot T \cdot U \cdots\cdots \text{公式 11-15}$$

上式中：D_{Eff}—考察点人员有效剂量（Sv）；

$\dot{H}_P$—考察点的空气比释动能率（μSv/h）；

t—考察点处受放射性核素影响的时间（h）；

T—居留因子，全部居留 T=1，部分居留 T=1/4，偶尔居留 T=1/16；

U—使用因子，因放射性核素以点源模式估算，而放射性衰变是持续发生的，U 取 1；

^{131}I 甲癌病人单人最大用药量为 150×3.7×10^{7}Bq，工作人员在自动分装控制室内进行 ^{131}I 的分装，分装好后工作人员通过语音控制，病人至给药窗口服药，服药后在病房内住院治疗。根据公式 11-18 可估算出项目周围各参考点处的辐射水平，预测结果见表 11-51、11-52，估算点位见图 11-9。

图 11-9　核医学工作场所 ^{131}I 估算点位示意图

表 11-51 无屏蔽状态下 ^{131}I 周围空气比释动能率（μSv/h）

距离(m)	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0
单次注射 ^{131}I 药物 5.55×10^{9}Bq（150mCi）时空气比释动能率	3669	1321	330	82.6	36.7

表 11-52 ^{131}I 甲癌治疗项目工作场所辐射水平估算结果

点位	参考点位置	源强(Bq)	距离（m）	屏蔽材料及厚度	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）	备注
1	服药窗口	$750\times3.70\times10^{7}$	1.8	30cm 混凝土	3.97×10^{-6}	0.002	自动分装仪为 40mmPb
2	自动分装仪室东南墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	1.7	30cm 混凝土	3.97×10^{-6}	＜0.001	
3	自动分装仪室西南墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	2.6	30cm 混凝土	3.97×10^{-6}	＜0.001	
4	医护走廊东南墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	5.8	30cm 混凝土+30cm 混凝土	6.83×10^{-8}	＜0.001	
5	甲癌治疗室东南墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	3	24cm 混凝土砖墙	0.0387	1.422	/
6	甲癌治疗室防护门外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	3	15mm 铅板	0.0433	1.588	/
7	甲癌治疗室 1 西南墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	2.4	30cm 混凝土	0.0172	0.986	/
8	甲癌治疗室 1 东北墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	2.4	24cm 混凝土砖墙	0.0387	2.221	/
9	甲癌治疗室下方距地面 1.7m	$150\times3.70\times10^{7}$	5.1	30cm 混凝土	0.0172	0.218	/
10	出口缓冲间防护门外表面 30cm	$9.38\times3.70\times10^{7}$	2	12mmPb	0.0433	0.223	/
11	远期预留治疗室西南墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	2.4	24cm 混凝土砖墙	0.0387	2.221	/
12	远期预留治疗室西北墙外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	2.4	24cm 混凝土砖墙	0.0387	2.221	/
13	远期预留治疗室防护门外表面 30cm	$150\times3.70\times10^{7}$	3	15mm 铅板	0.0433	1.588	/
14	远期预留治疗室下方距地面 1.7m	$150\times3.70\times10^{7}$	5.1	30cm 混凝土	0.0172	0.986	/

由表 11-51 的数据可以看出，病人服药后 ^{131}I 药物处于无屏蔽状态，其周围辐射影响比较明显，患者用药后对与其近距离接触者将产生明显的辐射影响，因此加强对服药患者管理是非常必要的。

由表 11-52 的数据可以看出，^{131}I 核素治疗病房周围辐射剂量率都小于 2.5μGy/h，其屏蔽设计基本满足要求。

甲癌病人服药后需在病房内住院治疗，对服用 ^{131}I 的甲癌患者，甲状腺切除，^{131}I 进入患者体内后，会随着身体代谢，很快随着尿液、粪便等排出。

患者服药后 ^{131}I 主要经尿液排出，第 1 天后排出 55%，第 2 天后排出 22%，第 3 天后排出 8%，5 天总计排出 85%，病人住院时间约为 1 周。

病人住院期间将对病房外环境产生一定的外照射影响，其中第一天的影响最大。医院应加强住院病人及其陪护人员的管理，禁止病人在病房外随意走动。非特殊情况，应禁止除病人以外的其他人员留在病房内，以避免不必要的照射。

甲癌病房内设计有专用卫生间，冲洗水等通过专用管道排入放射性废水衰变池，满足《核医学辐射安全与防护要求》（HJ 1188-2021）要求。此外，医院应将患者使用后的被服及个人用品作必要的去污处理，并经表面污染监测合格后方可作重新使用。

甲癌病人在住院期间，医院保洁人员不对病房打扫卫生。

根据《分化型甲状腺癌患者的 ^{131}I 有效半衰期》（易艳玲等，原子能科学与技术，Vol44，suppl.10，9）报道，甲癌患者的 ^{131}I 平均有效半衰期为（14.6±6.5）h，本评价取 24h 进行保守估算，据此计算甲癌患者服药后的剂量率。患者服药后，根据表 11-2 的各关注点处辐射剂量率，结合工作时间，辐射工作人员和公众停留概率，即可得到各关注点处公众及辐射工作人员的年受照剂量，见表 11-53。

表 11-53 ^{131}I 甲癌治疗项目工作场所公众及辐射工作人员年有效剂量估算

点位	参考点位置	参考点辐射水平（μSv/h）					参考点处受放射性核素影响的时间	居留因子	参考点人员有效剂量（mSv/a）	关注对象
		第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天				
3	自动分装仪室西南墙外表面 30cm	＜0.001					服药 1min×5 人/周×50 周	1/4	＜0.001	工作人员
4	医护走廊东南墙外表面 30cm	＜0.001						1/4	＜0.001	工作人员
7	甲癌治疗室 1 西南墙外表面 30cm	0.986	0.493	0.246	0.123	0.062	250d×8h*	1/16	0.004**	公众
9	甲癌治疗室下方距地面 1.7m	0.218	0.109	0.055	0.027	0.014		1/16	0.001**	公众
10	出口缓冲间防护门外表面 30cm	0.223					停留 1min×5 人/周×50 周	1/16	＜0.001	公众

注：*：病人为 24 小时住院，但 8 小时工作时间之外此处停留人员很少，故本项目按照 8 小时计算。

**：考虑病人住院期间，随着时间推移，体内放射性核素存在衰减，以每日最大剂量率进行核算。

^{131}I 甲癌治疗过程中，单个病人一般住院 5 天。根据表 11-53 中估算结果，可知，^{131}I 治疗甲癌项目运行后能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）对工作人员及周围公众受照剂量限值要求以及本项目的目标管理值要求（工作人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

4、放射性废气影响分析

（1）核医学科-回旋加速器制药区

本项目核医学科-回旋加速器制药区工作场所排风管道分为 3 支，其中 1 支单独连接正电子药物合成热室内设置的手套箱，第 2 支单独连接回旋加速器机房，第 3 支单独连接回旋加速器制药区其余用房。放射性药物的各项操作均在正电子药物合成热室内手套箱进行，手套箱由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（风速应不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的手套箱排风口处风速不得低于 0.5m/s。场所内的通排风系统需保证非密封放射性物质工作为负压工作场所。

该工作场所产生的废气经由 3 根排风管道排至先进技术楼楼顶，在工作场所排风管道末端均配置高效排风过滤器+活性炭吸附装置二级处理设施。

工作场所各排风管道必须密封良好，不与先进技术楼其他排风管道相通，过滤器及活性炭需定期更换，更换后的活性炭经贮存 30 天后作为医疗废物处置。

（2）核医学科-影像中心

本项目核医学科-影像中心工作场所排风管道分为 3 支，其中 1 支单独连接手套箱，放射性药物的各项操作均在手套箱内进行，手套箱由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（风速应不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的手套箱排风口处风速不得低于 0.5m/s；第 2 支单独连接储源室（用于存放校准源用），其余排风管连接各注射后候诊区、SPECT/CT 机房、PET/CT 机房、PET/MRI 机房和留观室等。

工作场所产生的废气经由 3 根排风管道排至先进技术楼楼顶，在工作场所排风管道末端均配置高效排风过滤器+活性炭吸附装置二级处理设施。

工作场所各排风管道必须密封良好，不与先进技术楼其他排风管道相通，过滤器及活性炭需定期更换，更换后的活性炭经贮存 30 天后作为医疗废物处置。

（3）核医学科-核素治疗中心

本项目核医学科-核素治疗中心工作场所排风管道分为 2 支，其中 1 支单独连接全自动分装仪，放射性药物的各项操作均在全自动分装仪内进行，全自动分装仪由专业厂商提供，根据《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“合成和操作放射性药物所用的通风橱，工作中应有足够风速（风速应不小于 0.5m/s）”要求，医院购买的全自动分装仪排风口处风速不得低于 0.5m/s；其余排风管连接各甲癌病房等。

工作场所产生的废气经由 2 根排风管道排至先进技术楼楼顶，在工作场所排风管道末端均配置高效排风过滤器+活性炭吸附装置二级处理设施。

工作场所各排风管道必须密封良好，不与先进技术楼其他排风管道相通，过滤器及活性炭需定期更换，更换后的活性炭经贮存 180 天后作为医疗废物处置。

5、放射性固废影响分析

（1）核医学科-影像中心

核医学科-影像中心产生的放射性固体废物主要有废弃的注射器、一次性手套、棉签、滤纸等。核医学科注射室、候诊区、留观室等房间均拟设置 1~2 个放射性废物桶（涉及 ^{18}F 等核素用防护厚度应不低于 20mmPb，涉及 ^{99m}Tc 核素用防护厚度不低于 5mmPb），另外，医院在核医学科内设有 1 个放射性废物暂存间。

根据医院对本项目规划的工作量估算每年产生放射性固体废物量，诊断项目日接诊量最大为 80 人次，放射性固体废物产生量按 0.02kg/人次计算，则放射性固体废物产生量为 1.6kg/d（体积约为 4.0m^3/月），核医学科各房间内铅废物箱放置点应避开工作人员与其它人员经常走动的地方，并设置有电离辐射警告标志。

从核医学科各房间收集的含放射性废物应分别标记、分开贮存（标记主要核素类型、收集时间等）后集中到废物库中的铅桶（废物库中设置若干铅桶，防护厚度不低 5mmPb）中暂存，在废物库内自然衰变超过 30 天后，经检测合格后作为医疗废物进行处理。

手套箱通风管道内更换下来的废活性炭，在废物库贮存超过 30 天后，经检测合格后作为医疗废物进行处理。

本项目核医学科的废物库面积约为 3.23m^2，总容积约为 10m^3，该放射性废物库容积能够满足放射性固体废物贮存 30 天的要求。

（2）核医学科-核素治疗中心

核医学科-核素治疗中心产生的放射性固体废物主要有废弃的注射器、一次性手套、棉签、滤纸等。核医学科各治疗室均拟设置1~2个放射性废物桶（防护厚度应不低于10mmPb），另外，医院在核医学科-核素治疗中心内设有1个放射性废物暂存间。

根据医院对本项目规划的工作量估算每年产生放射性固体废物量，放射性固体废物产生量按0.02kg/人次计算，则放射性固体废物产生量为0.1kg/d（体积约为1.5m^3/月），核医学科各房间内铅废物箱放置点应避开工作人员与其它人员经常走动的地方，并设置有电离辐射警告标志。

从核医学科各房间收集的含放射性废物应分别标记、分开贮存（标记主要核素类型、收集时间等）后集中到废物库中的铅桶（废物库中设置若干铅桶，防护厚度不低10mmPb）中暂存，在废物库内自然衰变超过180天后，经检测合格后作为医疗废物进行处理。

手套箱通风管道内更换下来的废活性炭，在废物库贮存超过180天后，经检测合格后作为医疗废物进行处理。

本项目核医学科-核素治疗中心的废物库面积约为6.0m^2，总容积约为18m^3，该放射性废物库容积能够满足放射性固体废物贮存180天的要求。

同时在核素治疗中心出口处还设有污染被服暂存间，用于存放患者使用过的被服，该被服间也能够满足暂存需求。

6、放射性废水影响分析

本项目工作场所产生的含放射性废水包括：工作人员操作过程手部受到微量污染的清洗废水，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水，以及患者冲洗排便用水。

工作场所产生的放射性废水通过衰变池自行衰变后排至医院污水处理站处理达标后排入市政管网。

核医学科放射性废水经专用管道流入衰变系统，裸露管道外采用2mmPb铅皮包覆进行辐射防护，避免含放射性废水流动时造成管道穿行区域的辐射泄漏。

本项目核医学科将使用^{99m}Tc、^{18}F、^{68}Ga和^{131}I等核素，因^{18}F产生的γ射线能量最大，故本报告选用^{18}F放射性核素进行管道外辐射剂量计算。将专用管道中的放射性废水看作线源，，其对周围环境产生的辐射影响按《辐射防护导论》P78公式进行

计算：

$$\dot{K}=\frac{2A\Gamma_K}{Lr}\mathrm{tg}^{-1}\frac{L}{2r}\eta\cdots\cdots$$公式 11-22

式中：$\dot{K}$—比释动能率，Sv/s；

A—总活度，Bq；

Γ_k—周围剂量当量率常数，μSv·m^2/Bq·h；

L—线源长度，m；

r—线源到考察点的距离，m。

表 11-54 核医学科专用管道外剂量估算结果

参数	取值
A 单次排放 ^{18}F 核素活度[1]	3mCi
Γ_k 周围剂量当量率常数（μSv·m^2/Bq·h）	0.143
L	0.5m
r 线源到考察点的距离（m）[2]	0.3
屏蔽材料及厚度（mm）	2mm 铅
参考点处辐射剂量率（μSv/h）	小于 0.001
周围公众受照时间（s）	1s/次×（20 次/天+20 次/天）×250 天
周围公众受照剂量（mSv/a）	小于 0.010

注：1、单次核医学诊断项目患者，排泄物内核素活度排泄比率保守按 30%进行计算，则单次排放 ^{18}F 核素活度为 10mCi×30%=3mCi/次；

2、本项目裸露放射性废水排水管道于地面内铺设，线源到参考点距离 r 保守取 0.3m。

由表 11-54 可知，裸露的放射性废水专用管道外采用 2mmPb 铅皮包覆进行辐射防护，其对周围公众产生的辐射影响较小。

7、校准源影响分析

本项目所使用校准源 ^{68}Ge 为V类放射源，用于对 PET/CT 设备进行图像校准使用，PET/CT 机房的屏蔽墙体及防护门防护厚度均不小于 5mmPb，本项目 ^{68}Ge 校准源对周围的辐射环境影响很小，校准源不使用时贮存在校准源室内，校准源室内拟设置双人双锁及红外报警等措施对放射源进行管理，以确保放射源存放安全。

（五）介入诊断与治疗项目

南京鼓楼医院江北院区本次新建的 2 座杂交手术室位于二层门诊医技楼三层手术中心，新建的 6 座 DSA 机房均位于病房楼 C 四层 DSA 介入中心。拟于杂交手术室和 DSA 机房内各配备 1 台 DSA（型号未定，管电压≤120kV，管电流≤1000mA），用

于医学诊断及介入治疗。

1、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

（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。

（2）本项目 DSA 机房各屏蔽体等效铅当量核算

本项目所有 DSA 的有用线束投射方向均为由下至上，即使旋转机头，向上的散射线和漏射线的辐射影响要小于主束向上的影响，所以本项目保守将 DSA 机房顶部作为有用线束投射方向。由表 10-7 可知，本项目各 DSA 机房使用的屏蔽材料除铅以外，还涉及顶面（有用线束投射方向）的混凝土，机房四侧和地面（非有用线束投射方向）的混凝土或混凝土砖墙及铅玻璃。

本项目依据《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）附录 C 中 C.1.2 按以下方法计算不同屏蔽物质的铅当量，计算公式如下：

a)对给定的铅厚度，依据 NCRP 147 号报告中给出的不同管电压 X 射线辐射在其他屏蔽物质中衰减的 α、β、γ 拟合值按公式 11-23 计算辐射透射因子 B：

$$B=\left[\left(1+\frac{\beta}{\alpha}\right)e^{\alpha\gamma X}-\frac{\beta}{\alpha}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\cdots\cdots\cdots\text{公式 11-23}$$

式中：*B*—给定铅厚度的屏蔽投射因子；

X—铅厚度；

α—铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

β—铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

γ—铅对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数。

b）依据 NCRP 147 号报告中给出的不同管电压 X 射线辐射在其他屏蔽物质中衰减的 α、β、γ 拟合值和 a）中的 B 值，使用公式 11-24 计算出各屏蔽物质的铅当量厚度 X：

$$X=\frac{1}{\alpha\gamma}ln\left(\frac{B^{-\gamma}+\frac{\beta}{\alpha}}{1+\frac{\beta}{\alpha}}\right)\cdots\cdots\cdots\text{公式 11-24}$$

式中：*X*—不同屏蔽物质的铅当量厚度；

B—给定铅厚度的屏蔽投射因子；

α—不同屏蔽物质对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

β—不同屏蔽物质对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数；

γ—不同屏蔽物质对不同管电压 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数。

根据 GBZ 130-2020 表 C.2 查取 125kV 管电压下 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数，由 NCRP147 报告 TABLE A.1、TABLE C.1 查取 70kV 和 80kV 管电压下 X 射线辐射衰减的有关的拟合参数，列于表 11-55：

表 11-55　X 射线辐射衰减的有关的拟合参数

管电压（kV）	屏蔽材料	α	β	γ
125（主束）	铅	2.219	7.923	0.5386
	混凝土	0.03502	0.07113	0.6974
	实心砖	0.02870	0.06700	1.346
80（主束）	铅	4.040	21.69	0.7187
70（散射）	铅	5.369	23.49	0.5883

本项目按最大管电压 125kV （主束）的极端条件核算 DSA 机房各屏蔽部位屏蔽材料的等效铅当量厚度，根据公式 11-1、公式 11-2 计算本项目不同屏蔽物质的铅当量，计算结果如下：

表 11-56 本项目 DSA 机房屏蔽防护铅当量计算结果

屏蔽防护设计	材料及厚度	透射因子 B	等效铅当量（mm）
四周墙体	240mm 混凝土砖墙	4.58×10^{-5}	3.25
顶部及地面	250mm 混凝土	3.22×10^{-5}	3.40

2、DSA 机房屏蔽防护设计合理性分析

本项目各 DSA 机房设计屏蔽情况与《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）中 C 形臂 X 射线设备机房屏蔽防护要求对比见表 11-57。

表 11-57-1 医院各 DSA 机房辐射防护设计一览表

机房名称	屏蔽体	屏蔽设计	换算铅当量 mmPb	防护要求 mmPb	符合性
杂交手术室和 DSA 机房	四面墙体	240mm 混凝土砖墙	3.25	2.0	符合
	顶部	250mm 混凝土	3.40	2.0	
	地面	250mm 混凝土	3.40	2.0	
	防护门	内衬 3mmPb 铅板	3.0	2.0	
	观察窗	3mmPb 铅玻璃	3.0	2.0	

表 11-57-2 医院各 DSA 机房辐射防护设计一览表

机房名称	设计值		标准要求		
	最小单边长度（m）	有效使用面积（m^2）	最小单边长度（m）	有效使用面积（m^2）	符合性
1#杂交手术室	7.72	70.5	3.5	20	符合

2#杂交手术室	7.72	71.6	3.5	20	符合
1#DSA 机房	5.46	56.0	3.5	20	符合
2#DSA 机房	6.28	64.4	3.5	20	符合
3#DSA 机房	6.28	56.9	3.5	20	符合
4#DSA 机房	6.28	56.9	3.5	20	符合
5#DSA 机房	6.28	56.9	3.5	20	符合
6#DSA 机房	6.28	56.9	3.5	20	符合

由表 11-57 可知，本项目各 DSA 机房的屏蔽体的等效铅当量均满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）表 3 关于有用线束方向、非有用线束方向铅当量均不小于 2.0mmPb 的要求，同时机房有效面积和最小单边长度也满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的要求，机房屏蔽设计合理。

3、DSA 机房的辐射影响预测

为了进一步评价屏蔽效果辐射防护效果，采用理论预测的方法进行影响分析。

本项目 8 座 DSA 机房大小设计略有差异，本次选取其中 1 座机房（1#杂交手术室）为例进行防护分析，其余机房屏蔽效果按此方法以此类推。

本报告选取 1#杂交手术室距离屏蔽体外 30cm 最短距离处作为理论计算关注点，预测点选取如下：

1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，缓冲走廊；

2#-东南侧防护门外 30cm 处，缓冲走廊；

3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，骨科手术室；

4#-西北侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走道；

5#-西北侧防护门外 30cm 处，污物走道；

6#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，控制室；

7#-东北侧防护门外 30cm 处，控制室；

8#-机房上方（距顶棚地面 100cm 处），屋顶花园；

9#-机房下方（距楼下地面 170cm 处），彩超室。

共布设 9 个预测点，预测点布设见图 11-5 所示。

图 11-5-1 手术中心 1#杂交手术室预测点布设示意图

图 11-5-1 手术中心 1#杂交手术室预测点布设示意图

本项目 DSA 的运行工况见表 11-58。

表 11-58 本项目 DSA 的辐射影响情况

操作模式	正常运行时最大工况	辐射影响对象
拍片模式	80kV/500mA	机房外公众、控制室操作人员
透视模式	80kV/20mA	机房外公众、控制室操作人员； 机房内介入治疗操作人员

（1）关注点处有用线束辐射剂量率计算

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 10.8）进行推导，得到有用线束在关注点处的辐射剂量率H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）：

$$H = \frac{H_0 \cdot I \cdot B}{d^2} \cdot K \cdots\cdots \text{公式 11-26}$$

式中：H—关注点处有用线束有效剂量率，μSv/h；

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），$mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$；具体数值可根据 X 射线机管电压、过滤片等条件从《辐射防护导论》附图 3 查取，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H_0为 $0.8mGy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1}$，即 $48000\mu Gy \cdot m^2 \cdot mA^{-1} \cdot h^{-1}$；

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

d—关注点至 X 射线源的距离；

B—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见公式 11-23；

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2，对于本项目 DSA 运行时常用最大管电压 80kV，K 值取 1.67。

将手术中心 1#杂交手术室顶面屏蔽体的等效铅厚度 X、有关的拟合参数 α、β、γ 值代入公式 11-23，计算相应的屏蔽透射因子值，列于表 11-59。

表 11-59 DSA 机房顶面屏蔽体透射因子计算结果

关注点位置	屏蔽材料	等效铅当量（mm）	B
8#-上方（屋顶花园）	250mm 混凝土	3.40	8.24×10^{-8}

将前述有关参数代入公式 11-26，计算透视、拍片模式下手术中心 1#杂交手术室上方公众处有用线束辐射剂量率，计算结果见表 11-60。

表 11-60 关注点处有用线束辐射剂量率计算结果

关注点位置	操作模式	H_0（μGy·m²/（mA·h））	I（mA）	B	d（m）	H（μSv/h）
8#-上方（屋顶花园）	透视模式	48000	20	8.24×10^{-8}	5.35	4.61×10^{-3}
	拍片模式	48000	500	8.24×10^{-8}	5.35	0.115

*注：机房层高为 4.5m，参考点取距离顶部地面 100cm 处，DSA 朝上照射时，机头距地面约 40cm，再考虑顶部屏蔽层厚 25cm，故 d 保守取 5.35m。

（2）关注点处散射辐射剂量率计算

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有效剂量率 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）：

$$H_s = \frac{H_0 \cdot I \cdot a \cdot (s/400) \cdot B_s}{d_0^2 \cdot d_s^2} \cdot K \cdots\cdots \text{公式 11-27}$$

式中：H_s—关注点处散射辐射有效剂量率，μSv/h；

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），$mGy\cdot m^2\cdot mA^{-1}\cdot min^{-1}$，本项目取 $48000\mu Gy\cdot m^2\cdot mA^{-1}\cdot h^{-1}$；

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

a—人体对 X 射线的散射照射量与入射照射量之比值，由《辐射防护手册（第一分册）》表 10.1 中查取；

本项目最大常用管电压为 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 90º 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，根据建设单位提供参数，照射野最小为 8cm×8cm=64cm²，最大为 30cm×38cm=1140cm²，考虑手术需要的最大照射面积约为 16cm×16cm，本项目取 256cm²；

d_0—源至受照点的距离，根据设备参数确定，本项目取 d_0 取最小值 0.45m（符合 ICRP 33 号报告第 98 段关于使用固定式 X 线透视检查设备的焦皮距的要求）；

d_s—受照体至关注点的距离。

B_s—屏蔽材料对散射线的透射因子，无量纲，计算公式见式 11-23。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 $E/E_0=1/[1+E_0(1-\cos\theta)/0.511]=1/[1+0.08\times(1-\cos90^\circ)/0.511]=0.865$，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，再根据公式 11-23 进行计算。

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2，按前述 90º 方向一次散射线能量对应的 kV 值为 70kV，*K* 值取 1.60。

将手术中心 1#杂交手术室和机房内介入操作人员防护用品与辅助防护设施的铅当量厚度 *X*、有关的拟合参数 *α*、*β*、*γ* 值代入公式 11-23，计算相应的散射辐射屏蔽透射因子值，列于表 11-61。

表 11-61 手术中心 1#杂交手术室屏蔽体、介入操作人员防护用品屏蔽透射因子计算结果

关注点位置			等效铅当量（mm）	B_s
DSA 机房外	1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，缓冲走廊		3.25	1.51×10^{-9}
	2#-东南侧防护门外 30cm 处，缓冲走廊		3.0	5.80×10^{-9}
	3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，骨科手术室		3.25	1.51×10^{-9}
	4#-西北侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走道		3.25	1.51×10^{-9}
	5#-西北侧防护门外 30cm 处，污物走道		3.0	5.80×10^{-9}
	6#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，控制室		3.25	1.51×10^{-9}
	7#-东北侧防护门外 30cm 处，控制室		3.0	5.80×10^{-9}
	9#-机房下方（距楼下地面 1.7m 处），彩超室		3.4	6.77×10^{-10}
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	2.84×10^{-4}
		铅帘	0.5	5.35×10^{-3}
	第二术者	铅帘+铅衣	0.5+0.5	2.84×10^{-4}
		铅帘	0.5	5.35×10^{-3}

将前述有关参数代入公式 11-27，计算透视模式下手术中心 1#杂交手术室外公众、控制室操作人员、机房内介入操作人员处散射辐射剂量率，计算结果见表 11-62。

表 11-62 关注点处散射辐射剂量率计算结果

关注点位置	操作模式	H_0（μGy·m²/（mA·h））	I（mA）	B_s	d_s（m）	H_s（μSv/h）
1#	透视模式	48000	20	1.51×10^{-9}	5.00	2.35×10^{-7}
	拍片模式		500			5.88×10^{-6}
2#	透视模式	48000	20	5.80×10^{-9}	4.95	9.19×10^{-7}
	拍片模式		500			6.00×10^{-6}
3#	透视模式	48000	20	1.51×10^{-9}	5.50	1.94×10^{-7}
	拍片模式		500			4.86×10^{-6}
4#	透视模式	48000	20	1.51×10^{-9}	4.68	2.69×10^{-7}

		拍片模式		500			6.72×10^{-6}
5#		透视模式	48000	20	5.80×10^{-9}	6.37	5.55×10^{-7}
		拍片模式		500			1.39×10^{-5}
6#		透视模式	48000	20	1.51×10^{-9}	5.63	1.86×10^{-7}
		拍片模式		500			4.64×10^{-6}
7#		透视模式	48000	20	5.80×10^{-9}	6.70	5.02×10^{-7}
		拍片模式		500			1.25×10^{-5}
9#		透视模式	48000	20	6.76×10^{-10}	3.45	2.22×10^{-7}
		拍片模式		500			5.57×10^{-6}
第一术者	铅衣内	透视模式	48000	20	2.84×10^{-4}	0.5	2.75
	铅衣外	透视模式	48000	20	5.35×10^{-3}	0.5	51.9
第二术者	铅衣内	透视模式	48000	20	2.84×10^{-4}	1.0	0.69
	铅衣外	透视模式	48000	20	5.35×10^{-3}	1.0	12.98

（3）关注点处泄漏辐射剂量率计算

泄漏辐射剂量率H_L采用下式计算：

$$H_L = \frac{H_i \cdot B}{r^2} \cdot K$$……公式 11-28

式中：H_L—关注点处泄漏辐射有效剂量率，μSv/h；

H_i—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—机房各屏蔽体的泄漏射线屏蔽透射因子，本项目 DSA 管电压为 80kV（本项目正常运行最大管电压）工况下 DSA 手术间四周屏蔽墙及地面的泄漏射线屏蔽透射因子见表 11-63；

K—有效剂量与空气比释动能转换系数，Sv/Gy，查《用于光子外照射防护的剂量转换系数》（GBZ/T 144-2002）表 B2，对于本项目 DSA 运行时常用最大管电压 80kV，K 值取 1.67。

将有关参数代入公式 11-28，计算手术中心 1#杂交手术室周围关注点处、机房内介入操作人员操作位关注点处的泄漏辐射剂量率，计算结果见表 11-63。

表 11-63 关注点处漏辐射剂量率计算结果

关注点位置	H_i（mGy/h）	r（m）	B	H_L（μSv/h）
1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，缓冲走廊	1	5.00	1.51×10^{-7}	1.01×10^{-5}
2#-东南侧防护门外 30cm 处，缓冲走廊	1	4.95	4.15×10^{-7}	2.83×10^{-5}
3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，骨科手术室	1	5.50	1.51×10^{-7}	8.34×10^{-6}
4#-西北侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走道	1	4.68	1.51×10^{-7}	1.15×10^{-5}
5#-西北侧防护门外 30cm 处，污物走道	1	6.37	4.15×10^{-7}	1.71×10^{-5}

6#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，控制室		1	5.63	1.51×10^{-7}	7.96×10^{-6}
7#-东北侧防护门外 30cm 处，控制室		1	6.70	4.15×10^{-7}	1.54×10^{-5}
9#-机房下方（距楼下地面 1.7m 处），彩超室		1	3.45	8.24×10^{-8}	1.16×10^{-5}
第一术者	铅衣内	1	0.5	1.43×10^{-3}	9.55
	铅衣外	1	0.5	1.37×10^{-2}	91.54
第二术者	铅衣内	1	1.0	1.43×10^{-3}	2.39
	铅衣外	1	1.0	1.37×10^{-2}	22.88

（4）保护目标处预测计算结果汇总

综上所述，手术中心 1#杂交手术室外保护目标处的辐射剂量率理论估算结果汇总见表 11-64。

表 11-64 手术中心 1#杂交手术室外保护目标处辐射剂量率计算统计结果

保护目标位置		操作模式	X 射线辐射剂量率（μSv/h）			
			有用线束	散射线	漏射线	合计
1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，缓冲走廊		透视模式	/	2.35×10^{-7}	1.01×10^{-5}	1.03×10^{-5}
		拍片模式	/	5.88×10^{-6}		1.60×10^{-5}
2#-东南侧防护门外 30cm 处，缓冲走廊		透视模式	/	9.19×10^{-7}	2.83×10^{-5}	2.92×10^{-5}
		拍片模式	/	6.00×10^{-6}		3.43×10^{-5}
3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，骨科手术室		透视模式	/	1.94×10^{-7}	8.34×10^{-6}	8.53×10^{-6}
		拍片模式	/	4.86×10^{-6}		1.32×10^{-5}
4#-西北侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走道		透视模式	/	2.69×10^{-7}	1.15×10^{-5}	1.18×10^{-5}
		拍片模式	/	6.72×10^{-6}		1.82×10^{-5}
5#-西北侧防护门外 30cm 处，污物走道		透视模式	/	5.55×10^{-7}	1.71×10^{-5}	1.76×10^{-5}
		拍片模式	/	1.39×10^{-5}		3.09×10^{-5}
6#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，控制室		透视模式	/	1.86×10^{-7}	7.96×10^{-6}	8.14×10^{-6}
		拍片模式	/	4.64×10^{-6}		1.26×10^{-5}
7#-东北侧防护门外 30cm 处，控制室		透视模式	/	5.02×10^{-7}	1.54×10^{-5}	1.59×10^{-5}
		拍片模式	/	1.25×10^{-5}		2.80×10^{-5}
8#-机房上方（距顶棚地面 100cm 处），屋顶花园		透视模式	4.61×10^{-3}	/	/	4.61×10^{-3}
		拍片模式	0.115	/		0.115
9#-机房下方（距楼下地面 1.7m 处），彩超室		透视模式	/	2.22×10^{-7}	1.16×10^{-5}	1.18×10^{-5}
		拍片模式	/	5.57×10^{-6}		1.71×10^{-5}
第一术者	铅衣内	透视模式	/	2.75	9.55	12.3
	铅衣外	透视模式	/	51.9	91.54	143.4
第二术者	铅衣内	透视模式	/	0.69	2.39	3.1
	铅衣外	透视模式	/	12.97	22.88	35.9

由表 11-64 结果分析知，拍片模式的非有用线束在手术中心 1#杂交手术室外关注点处的辐射剂量率明显大于透视模式；机房外辐射工作人员关注点剂量率最大为 2.80×10^{-5}μSv/h，公众关注点剂量率最大为 0.115μSv/h，出现在顶部，本项目手术中心 1#杂交手术室屏蔽设计能够满足《放射诊断放射防护要求》（GBZ 130-2020）的要求。

4、周围公众及辐射工作人员年有效剂量估算

（1）年有效剂量估算模式

手术中心 1#杂交手术室周围公众、控制室辐射工作人员年有效剂量计算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：

$$H_{Er} = H_r \times T \times t \cdots\cdots \text{公式 11-29}$$

式中：H_{Er}—X 射线外照射年有效剂量，mSv/a；

H_r—关注点处剂量率，μSv/h；

T—居留因子；

t—年照射时间，h。

手术中心 1#杂交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：

$$E = \alpha H_u + \beta H_o \cdots\cdots \text{公式 11-30}$$

式中：α—系数，有甲状腺屏蔽时，取 0.79，无屏蔽时，取 0.84；

H_u—铅围裙内佩戴的个人剂量计测得的 H_p（10），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_p（10），mSv。

（2）年有效剂量估算结果

将有关参数代入公式 11-29，估算手术中心 1#杂交手术室四周公众及控制室辐射工作人员的年附加剂量，见表 11-65。

表 11-65 手术中心 1#杂交手术室四周公众及控制室辐射工作人员的年附加剂量

关注点位置	操作模式	t（h）	T*	辐射剂量率（μSv/h）	年有效剂量 H_{Er}（mSv/a）	
1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，缓冲走廊	透视模式	56	1/4	1.03×10^{-5}	1.45×10^{-7}	1.62×10^{-7}
	拍片模式	4.33		1.60×10^{-5}	1.73×10^{-8}	
2#-东南侧防护门外 30cm 处，缓冲走廊	透视模式	56	1/4	2.92×10^{-5}	4.09×10^{-7}	4.46×10^{-7}
	拍片模式	4.33		3.43×10^{-5}	3.71×10^{-8}	
3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，骨科手术室	透视模式	56	1/2	8.53×10^{-6}	2.39×10^{-7}	2.67×10^{-7}
	拍片模式	4.33		1.32×10^{-5}	2.86×10^{-8}	
4#-西北侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走道	透视模式	56	1/16	1.18×10^{-5}	4.12×10^{-8}	4.62×10^{-8}
	拍片模式	4.33		1.82×10^{-5}	4.93×10^{-9}	
5#-西北侧防护门外 30cm	透视模式	56	1/16	1.76×10^{-5}	6.17×10^{-8}	7.00×10^{-8}

处，污物走道	拍片模式	4.33		3.09×10^{-5}	8.37×10^{-9}	
6#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，控制室	透视模式	56	1	8.14×10^{-6}	4.56×10^{-7}	5.10×10^{-7}
	拍片模式	4.33		1.26×10^{-5}	5.45×10^{-8}	
7#-东北侧防护门外 30cm 处，控制室	透视模式	56	1/4	1.59×10^{-5}	2.23×10^{-7}	2.53×10^{-7}
	拍片模式	4.33		2.80×10^{-5}	3.03×10^{-8}	
8#-机房上方（距顶棚地面 100cm 处），屋顶花园	透视模式	56	1/16	4.61×10^{-3}	2.58×10^{-4}	7.58×10^{-4}
	拍片模式	4.33		0.115	4.99×10^{-4}	
9#-机房下方（距楼下地面 1.7m 处），彩超室	透视模式	56	1/2	1.18×10^{-5}	3.30×10^{-7}	3.67×10^{-7}
	拍片模式	4.33		1.71×10^{-5}	3.71×10^{-8}	

由表 11-65 可知，本项目手术中心 1#杂交手术室四周公众的年附加剂量最大为 7.58×10^{-4}mSv，满足公众项目管理目标 0.1mSv 的要求；控制室辐射工作人员的年附加剂量 5.10×10^{-7}mSv，满足工作人员项目管理目标 5mSv 的要求。

将有关参数代入公式 11-30，计算第一术者、第二术者年有效剂量，结果列于表 11-66。

表 11-66 介入操作人员年有效剂量估算结果

位置	α	β	部位	辐射剂量率（μSv/h）			年照射时间（h）	年有效剂量 E（mSv）
				散射线	漏射线	合计		
第一术者	0.79	0.051	铅衣内	2.75	9.55	12.3	56	0.95
			铅衣外	51.9	91.54	143.5		
第二术者			铅衣内	0.69	2.39	3.1		0.24
			铅衣外	12.98	22.88	35.9		

由表 11-66，手术中心 1#杂交手术室内第一术者操作位的年有效剂量为 0.95mSv，即使由一人承担，不会超过工作人员项目管理目标 5 mSv 的要求；第二术者操作位由 1 人承担，其年有效剂量约为 0.24mSv，手术室内护士保守参考第二术者操作位估算年有效剂量，也不会超过工作人员项目管理目标 5mSv 的要求。

对于介入手术，由于其实际工作中 DSA 透视工况及操作时间的不确定性，辐射工作人员需要依靠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的大小，按照《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）要求进行佩戴，医院应加强对介入手术工作人员的个人剂量监测管理，在日常检测中发现个人剂量异常的，应当对有关人员采取保护措施，并在接到监测报告之日起五日内报告发证的生态环境、卫生健康部门调查处理。介入手术工作人员均按照《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），并充分利用自带的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。

5、其余 DSA 机房理论计算结果

本项目 DSA 介入中心设有 6 间 DSA 机房，1#DSA 机房与 2#DSA 机房平面布置基本一致，选取 1#DSA 机房进行理论计算；3#~6#DSA 机房平面布置一直且机房尺寸一致，故选取 3#DSA 机房进行理论计算。DSA 介入中心各机房屏蔽效果估算可根据上述计算过程进行，具体预测点选取如下：

（1）1#DSA 机房点位选取：

1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走廊，7.2m；

2#-东南侧防护门外 30cm 处，污物走廊，7.38m；

3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，2#DSA 机房，3.22m；

4#-西北侧防护门外 30cm 处，洁净走廊，4.50m；

5#-西北侧观察窗外 30cm 处，操作间，4.12m；

6#-西北侧防护门外 30cm 处，操作间，4.87m；

7#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走廊，3.71m；

8#-上方，心内科病房，5.65m；

9#-下方，ICU 病房，3.50m。

（2）3#DSA 机房点位选取：

1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走廊，6.10m；

2#-东南侧防护门外 30cm 处，污物走廊，6.36m；

3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，4#DSA 机房，4.28m；

4#-西北侧屏蔽墙外 30cm 处，洁净走廊，5.26m；

5#-西北侧防护门外 30cm 处，洁净走廊，5.40m；

6#-东北侧防护门外 30cm 处，操作间，5.47m；

7#-东北侧观察窗外 30cm 处，操作间，4.08m；

8#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，操作间，3.46m；

9#-上方，心内科病房，5.65m；

10#-下方，ICU 病房，3.50m。

预测点布设见图 11-6 所示，计算结果见表 11-67：

图 11-6-1 四层 DSA 介入中心各机房关注点布置示意图

图 11-6-2 四层 DSA 介入中心各机房关注点布置示意图

表 11-67 四层 DSA 介入中心四周公众及控制室辐射工作人员的年附加剂量

关注点位置		操作模式	*T*	辐射剂量率率（μSv/h）	年有效剂量（mSv/a）
1#DSA 机房	1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走廊	透视模式	1/16	4.98×10^{-6}	2.38×10^{-8}
		拍片模式	1/16	7.70×10^{-7}	
	2#-东南侧防护门外 30cm 处，污物走廊	透视模式	1/16	1.31×10^{-5}	6.12×10^{-8}
		拍片模式	1/16	1.54×10^{-5}	
	3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，2#DSA 机房	透视模式	1/2	2.49×10^{-5}	9.53×10^{-7}
		拍片模式	1/2	3.85×10^{-5}	
	4#-西北侧防护门外 30cm 处，洁净走廊	透视模式	1/4	3.53×10^{-5}	6.85×10^{-7}
		拍片模式	1/4	6.20×10^{-5}	
	5#-西北侧观察窗外 30cm 处，操作间	透视模式	1	4.21×10^{-5}	3.27×10^{-6}
		拍片模式	1	7.40×10^{-5}	
	6#-西北侧防护门外 30cm 处，操作间	透视模式	1/4	3.01×10^{-5}	5.85×10^{-7}
		拍片模式	1/4	5.29×10^{-5}	
	7#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走廊	透视模式	1/16	1.87×10^{-5}	8.97×10^{-8}
		拍片模式	1/16	2.90×10^{-5}	
	8#-上方，心内科病房	透视模式	1/2	4.14×10^{-3}	4.17×10^{-4}
		拍片模式	1/2	0.103	
	9#-下方，ICU 病房	透视模式	1	1.14×10^{-5}	8.70×10^{-7}
		拍片模式	1	1.66×10^{-5}	
3#DSA 机房	1#-东南侧屏蔽墙外 30cm 处，污物走廊	透视模式	1/16	6.94×10^{-6}	3.32×10^{-8}
		拍片模式	1/16	1.07×10^{-5}	
	2#-东南侧防护门外 30cm 处，污物走廊	透视模式	1/16	1.77×10^{-5}	8.24×10^{-8}
		拍片模式	1/16	2.08×10^{-5}	
	3#-西南侧屏蔽墙外 30cm 处，4#DSA 机房	透视模式	1/2	1.41×10^{-5}	5.39×10^{-7}
		拍片模式	1/2	2.18×10^{-5}	
	4#-西北侧屏蔽墙外 30cm 处，洁净走廊	透视模式	1/4	9.33×10^{-6}	1.78×10^{-7}

		拍片模式	1/4	1.44×10^{-5}	
	5#-西北侧防护门外 30cm 处，洁净走廊	透视模式	1/4	2.45×10^{-5}	4.76×10^{-7}
		拍片模式	1/4	4.31×10^{-5}	
	6#-东北侧防护门外 30cm 处，操作间	透视模式	1/4	2.39×10^{-5}	4.64×10^{-7}
		拍片模式	1/4	4.20×10^{-5}	
	7#-东北侧观察窗外 30cm 处，操作间	透视模式	1	4.29×10^{-5}	3.34×10^{-6}
		拍片模式	1	7.54×10^{-5}	
	8#-东北侧屏蔽墙外 30cm 处，操作间	透视模式	1/4	2.16×10^{-5}	4.13×10^{-7}
		拍片模式	1/4	3.33×10^{-5}	
	9#-上方，心内科病房	透视模式	1/2	4.14×10^{-3}	4.17×10^{-4}
		拍片模式	1/2	0.103	
	10#-下方，ICU 病房	透视模式	1	1.14×10^{-5}	8.70×10^{-7}
		拍片模式	1	1.66×10^{-5}	

第一术者、第二术者年有效剂量，结果列于表 11-68。

表 11-68 介入操作人员年有效剂量估算结果

位置	α	β	部位	辐射剂量率（μSv/h）			年照射时间（h）	年有效剂量 E（mSv）
				散射线	漏射线	合计		
第一术者	0.79	0.051	铅衣内	2.75	9.55	12.3	68.3	1.16
			铅衣外	51.9	91.54	143.5		
第二术者			铅衣内	0.69	2.39	3.1		0.29
			铅衣外	12.97	22.88	35.9		

6、叠加影响分析

本项目需考虑 1#和 2#杂交手术室控制室内辐射工作人员的叠加影响，2#DSA 机房与 3#DSA 机房辐射工作人员的叠加影响，以及 4#DSA 机房与 5#DSA 机房辐射工作人员的叠加影响。根据上述理论计算结果保守估算，2 座杂交手术室控制室内辐射工作人员叠加后的年有效剂量为 $2\times5.10\times10^{-7}=1.02\times10^{-6}$mSv，DSA 介入中心辐射工作人员叠加后的年有效剂量为 $2\times3.34\times10^{-6}=6.68\times10^{-7}$mSv，均未超过项目剂量约束值 5mSv/a 的要求。

根据上述计算结果可知，本项目各 DSA 机房运行时所致辐射工作人员年有效剂量最大为 1.16mSv，满足工作人员剂量约束值 5mSv 的要求。周围公众年有效剂量最大值为 7.58×10^{-4} mSv，满足公众剂量约束值 0.1mSv 的要求。

综上所述，根据上述理论估算结果，本项目 8 座 DSA 机房在经实体屏蔽后，对 DSA 机房外辐射工作人员和周围公众的环境影响较小，同时在开展介入工作时，在采取有效的辐射防护措施和医院良好的管理情况下，辐射工作人员的年有效剂量可以满足标准限值要求。

二、非辐射环境影响分析

（一）废水处理措施依托可行性分析

工作人员和部分患者产生的普通生活污水，由院内污水处理站统一处理。

（二）固体废物和医疗废物

本项目在运营期工作人员及患者陪同家属会产生少量的生活垃圾。

医院拟建设有垃圾处理站，本项目产生的生活垃圾集中暂存，将由市政环卫部门定期统一收集、清运至垃圾处理厂处置。

且本项目设置有废物间（用于存放放射性废物），工作过程中产生的医疗废物在此暂存，所有放射性废物经衰变后检测符合排放标准后转移至医院医疗废物暂存间，医院产生的医疗废物最终将委托有资质单位进行统一收集、清运和处理。

（三）废气

工作场所内其他区域设有机械排风装置，排风口直接排放到室外，因室内产生的臭氧氮氧化物较少，所以废气对环境几乎没有影响。

事故影响分析

本项目新增的医用电子直线加速器、射波刀、回旋加速器和 DSA 为II类射线装置，定位 CT、PET/CT 和 SPECT/CT 为III类射线装置，后装治疗机使用的是III类放射源，核医学科工作场所均为乙非密封放射性物质工作场所。医院在开展放射治疗和诊断过程中，如果安全管理或防护不当，可能对人员产生误照射。

一、事故风险

（1）医用电子直线加速器、射波刀、后装治疗机、回旋加速器、定位 CT、PET/CT、SPECT/CT、DSA 工作状态下，未按工作流程进行清场，人员误留、误入机房内，导致发生误照射。

（2）医用电子直线加速器机房、射波刀机房、回旋加速器机房、后装治疗机机房、定位 CT 机房、PET/CT、SPECT/CT 机房门机联锁失效，导致防护门无法自动关闭，开机时防护门外工作人员或公众受到误照射。

（3）操作人员违反操作规程或误操作，造成意外超剂量照射。

（4）核医学科药物注射时，注射器排气有可能挤出放射性药物，注射器有损漏以及注射针头没有装牢固，造成放射性药物泼洒或者散逸挥发，产生γ辐射，操作台面

或仪器设备受到放射性污染。

（4）注射药物的患者未按要求停留于控制区，导致公众遭受较大剂量照射。

（5）由于保管或管理工作不到位，导致 ^{99m}Tc 等放射性核素的丢失、被盗，使公众受到误照射。

（6）放射性废水专用管道长期使用老化破裂，或衰变池渗漏，造成核医学科地面受到放射性污染。

二、事故防范措施

上述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和辐射事故应急措施加以防范，将辐射环境风险控制在可以接受的水平。针对在运行过程中可能发生的事故，本次评价提出以下防范措施，尽可能的减小或控制事故的危害和影响，主要体现在以下几个方面：

1、制定医用电子直线加速器、射波刀、后装治疗机、回旋加速器、DSA 及其他射线装置操作规程和安全规章制度，并严格落实操作规程等制度。在放射诊断操作时，至少有 2 名操作人员同时在场，操作人员须按照操作规程进行操作，并做好个人的防护。

2、每月检查辐射安全装置，确保安全联锁装置正常运行；每月对医用电子直线加速器、射波刀、后装治疗机等其他射线装置的安全装置进行维护、保养，对可能引起操作失灵的关键零配件需及时更换。

3、定期对医用电子直线加速器、射波刀、后装治疗机及其他射线装置采取的安全防护措施、设施的安全防护效果进行检测或检查，核实各项管理制度的执行情况，对发现的安全隐患立即进行整改，避免事故的发生。

4、加强控制区和监督区管理，在射线装置及放射源运行期间，加强对监督区公众的管理，限制公众在监督区长期滞留。

5、制定事故应急预案、完善组织、落实经费、准备物资、加强演练、时刻准备应对可能发生的各种事故和突发事件。

6、制定完善的操作规范，对操作人员定期培训，使之熟练操作，严格按照操作规范操作，减少药物撒漏事故的发生。发生撒漏等事故后，应迅速用吸附衬垫吸干溅洒的液体，以防止污染扩散。然后用备用的塑料袋装清洗过程中产生污染物品和湿的药棉、纸巾，从溅洒处移去垫子，用药棉或纸巾擦抹，应注意从污染区的边沿向中心擦

拭，直到擦干污染区。

患者在初期用药后，遇到不良反应引起呕吐造成工作场所的污染，医院工作人员应立即打扫，主要的呕吐物将打扫至控制区专门设置的废物桶内，并作为固体废物处理，暂存于储源室内，地面再用专门的清洁工具清扫，此时会产生少量的放射性废水，清扫废水量较小，且该事件发生率较低，不会造成放射性废水量的显著增加。

撒漏或病人呕吐后造成的地面污染，在清洁后须用表面污染监测仪测量污染区，如果β表面污染大于40Bq/cm^2，该污染区未达到控制标准，应用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，直到该污染区β表面污染小于40Bq/cm^{2}为止。擦拭物收集放到放射性固体废弃物衰变桶中，作为放射性固体废物进行管理。

7、在诊断过程中应注意对被检者的防护，合理使用X射线，实施医疗照射防护最优化的原则，实际操作中可采用“高电压、低电流、重过滤、小视野”的办法，使被检者所受的剂量，达到合理的尽可能的低水平。

8、制定和完善放射性核素安全管理制度，设专人负责，做好核素的领取、使用登记工作，确保放射性药物的安全。注射间设置防盗门及报警装置等设施，做好防火防盗工作。

9、加强对用药患者的管理，在不影响诊断的情况下，限制其服药量，限制患者出院时的放射性药物携带量，并对用药患者提供与他人接触时的辐射防护措施的书面指导，使患者明白并自觉做到短期内不到公众场所活动，并避免与家人近距离密切接触。

10、加强放射性废物的管理，对储存的放射性废物在废物桶外标明放射性废物的类型、核素种类和存放日期的说明，并做好相应的记录。放射性废水和固体废物经足够长的时间衰变后，方可排放或按照普通医疗垃圾处理，并做好监测记录。

11、核医学科个人防护用品主要包括工作服、工作鞋、帽等基本防护用品，以及铅防护衣、防护镜等附加防护用品。工作人员进入监督区必须穿戴放射防护用品，个人计量仪佩戴于铅衣内部左胸前。在进行分装及注射放射性药物时穿铅衣、戴口罩、手套，必要时戴防护眼镜。尽量利用长柄钳、镊子等工具操作，增加与放射性药物的距离。为病人注射放射性药物时，工作人员手部有一定受照量，操作者应使用注射器屏蔽装置。科主任负责个人防护用品使用方法培训及个人防护用品的存放、更新工作。

12、严格按照辐射监测计划进行辐射水平监测，如果监测表明防护墙外辐射水平偏高，应适当增加防护墙厚度。

三、应急措施

假若本项目发生了辐射事故，医院应迅速、有效的采取以下应急措施：

1、一旦发现有其他无关人员误入机房内，操作人员应立即利用最近的紧急停机开关切断设备电源。误入人员应在最短的时间内撤离机房，尽量缩短受照时间。同时，事故第一发现者应及时向医院的放射事件应急处理领导小组及上级领导报告。放射事件应急处理领导小组在接到事故报告后，应以最快的速度组织应急救援工作，迅速封闭事故现场，禁止无关人员进入该区域，严禁任何人擅自移动和取走现场物件（紧急救援需要除外）。

2、对可能受到超剂量照射的人员，尽快安排其接受检查和救治，并在第一时间将事故情况通报当地生态环境主管部门、卫生健康等主管部门。

3、一旦发生放射源或核素药物丢失或被盗，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和防护管理办法》中的有关要求，封闭场所应按规定启动本单位辐射事故应急方案，并及时报告当地生态环境主管部门、公安部门以及卫生健康部门。

4、配备去污清洁用品，发生核素泄漏应控制人员进入。选择合理的去污方法，防止交叉污染。去污时佩戴有效的个人防护用品。一般核素药物为液态，若发生撒漏，可用滤纸擦拭清除，擦拭后的滤纸作为放射性固体废物。然后用温水仔细清洗。为防止污染的扩散，去污程序应先从污染轻的周围渐向污染重的部位。如经反复清洗效果不明显时，可根据放射性核素的化学性质和污染表面的性质，选用有效的去污剂进一步去污。严重污染事故时，应立即通知在场的其他人员，同时迅速标出污染范围，防止其他人员进入污染区。

污染区的人员经采取减少危害和防止污染扩散的必要措施后，要脱去污染的衣服并将其留在污染区，立即离开此区。

事故发生后，应尽快通知防护负责人和主管人员，并立即向有关监督管理部门报告。防护人员应迅速提出全面处理事故的方案，并协助主管人员组织实施。污染区经去污、监测后，经防护人员批准方可重新工作。

5、工作人员佩戴有个人剂量计，每3个月检测一次，可及时监控工作人员所受剂量，如发现超标现象应查明原因，改善防护条件或减少工作时间。

6、人员受到不必要的照射或超计划外照射时，应评估其受照剂量，并进行必要的

医学处理。

按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》第四十二条和原国家环境保护总局环发[2006]145 号文件之规定，发生辐射事故时事故单位应根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》和《江苏省辐射污染防治条例》等要求，发生辐射事故的，立即启动事故应急方案，采取必要防范措施，在事故发生后 1 小时内向所在地生态环境和公安部门报告，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，还应当同时向卫生健康部门报告；对于可能受到大剂量照射的人员，迅速安排医学检查和救治，积极配合政府管理部门做好事故调查和善后工作。

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》的要求，使用III类放射源，使用乙级非密封放射性物质工作场所和使用II类、III类射线装置的单位，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均可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并考核。

南京鼓楼医院已成立专门的辐射安全与环境保护管理机构，并以文件形式明确管理人员职责。医院应根据本次新建放射诊疗项目修订相关文件，明确医院相关辐射项目的管理人员及其职责，将该项目辐射安全管理纳入全院的辐射安全管理工作中。本项目辐射工作人员拟由南京鼓楼医院新聘用，不兼职其它放射工作，肿瘤中心、核医学科、介入诊断与治疗项目拟分别配备 24 名、20 名、32 名辐射工作人员。

根据《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）：“自 2020 年 1 月 1 日起，新从事辐射活动的人员，以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应当通过生态环境部‘核技术利用辐射安全与防护培训平台’（网址：http：//fushe.mee.gov.cn）报名并参加考核。2020 年 1 月 1 日前已取得的原培训合格证书在有效期内继续有效”。本项目新聘的辐射工作人员须在生态环境部“核技术利用辐射安全与防护培训平台”报名参加放射治疗、核医学和医用 X 射线诊断与介入放射学的辐射安全与防护相关知识的学习，并参加考核，考核合格后方可上岗。根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，考核合格的人员，每 5 年接受一次再培训考核。

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》的有关要求，使用放射源和射线装置的单位要“有健全操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案等，并有完善的辐射事故应急措施”。目前南京鼓楼医院已制定相关制度。医院应根据本次新建项目的特点及以下内

容制定并完善相关制度，并落实到实际工作中，严格执行，加强辐射安全管理。

1、操作规程：

明确辐射工作人员的资质条件要求、操作过程中采取的具体防护措施及步骤。重点是：

①提高辐射工作人员对放射性药物操作的熟练程度，尽量减少辐射工作人员与放射性药物的近距离接触时间；

②确保开展辐射工作时所有辐射屏蔽措施均已到位，严格按照规定操作流程操作，防止发生辐射事故；

③从事辐射工作时必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪；

④在工作场所严禁吸烟、进食；

⑤放射性“三废”的处理需严格按照操作规程执行。

2、岗位职责：

明确放射源、射线装置、放射性药品使用工作人员、台帐管理人员、药物注射人员及辐射安全管理人员的岗位责任，并落实到个人，使每一个相关的工作人员明确自己所在岗位具体责任。

3、辐射防护和安全保卫制度：

根据放射源、射线装置及放射性药物操作的具体情况制定相应的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装置及检测仪器，发现问题及时修理或更换，确保辐射安全联锁装置、个人剂量报警仪、环境辐射剂量监测仪和表面沾污仪保持良好工作状态；

②工作人员定期开展个人剂量检测和职业健康监护；

③放射性药物注射后患者应严格限制在控制区内；

④当注射后候诊室内有多位注射放射性药物的患者同时候诊时，建议医院在患者之间采用铅屏风进行隔离，减少患者间的交叉辐射影响。

4、设备维修制度：

明确射线装置和辐射监测设备维修计划、维修的记录和在日常使用过程中维护保养以及发生故障时采取的措施，并做好记录。确保射线检测装置、安全措施（联锁装置、警告标志、工作指示灯、急停按钮）、剂量报警仪等仪器设备保持良好工作状态。

5、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：放射性药物的使用、贮存情况等由专人负责登记、专人形成台帐、每月核对，确保帐物相符。

6、人员培训计划和健康管理制度：

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。根据18号令及《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》，辐射工作人员均可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并通过考核。医院应组织新进辐射工作人员定期参加职业健康体检（不少于1次/2年），并为其建立辐射工作人员职业健康监护档案。

7、监测方案：

明确监测频次和监测项目。监测结果定期上报生态环境行政主管部门。为了确保III类放射源、非密封放射性物质工作场所及II类、III类射线装置的辐射安全，该单位应制定监测方案，重点是：

①明确监测项目和频次；

②辐射工作人员个人剂量监测数据应建立个人剂量档案，依据《江苏省辐射污染防治条例》（2018年修正），在日常检测中发现个人剂量异常的，应当对有关人员采取保护措施，并在接到监测报告之日起五日内报告发证的生态环境、卫生健康部门调查处理；

③对发生放射性药物泼洒的事故处理进行全程监测；

④医院应当按照有关标准、规范的要求定期对工作场所及周围环境进行监测或者委托有资质的机构进行监测，发现异常情况的，应当立即采取措施，并在一小时内向县（市、区）或者设区的市生态环境行政主管部门报告；

⑤委托有资质监测单位对本单位的放射性同位素和射线装置的安全和防护状况进行年度检测，每年1月31日前将年度评估报告上传至全国核技术利用辐射安全申报系统，年度评估发现安全隐患的，应当立即整改。

辐射监测

根据辐射管理要求，南京鼓楼医院拟为本项目配备辐射巡测仪 1 台、固定式剂量监测报警装置 8 套、表面沾污仪 2 台及个人剂量报警仪 40 台，用于辐射防护监测和报警，同时结合本项目实际情况，拟制定如下监测计划：

1、委托有资质的单位定期对项目周围环境 X-γ 辐射剂量率、中子辐射剂量率及核医学科表面污染水平进行监测，周期：1～2 次/年；

2、辐射工作人员配备个人剂量计监测累积剂量，定期（不少于 1 次/季）送有资质机构进行个人剂量监测，建立个人剂量档案；

3、定期使用辐射监测仪器对项目周围辐射环境进行自检，并保留自检记录；

4、所有辐射工作人员上岗前进行职业健康体检，以排除职业禁忌症。开展辐射工作后，定期开展职业健康体检（不少于 1 次/2 年），并建立个人职业健康档案；

5、出现外照射事故，立即采取应急措施，并在 1 小时之内向县（市、区）或者设区的市生态环境行政主管部门报告。

南京鼓楼医院须根据上述监测计划，明确监测频次和监测项目。监测结果定期上报生态环境行政主管部门。

辐射事故应急

按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等相关规定，辐射事故应急方案应明确以下几个方面：

①应急机构和职责分工；

②应急的具体人员和联系电话；

③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；

④辐射事故发生的可能、分级及应急响应措施；

⑤辐射事故调查、报告和处理程序。

对于在医院定期监测或委托监测时发现异常情况时，应根据《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》和《江苏省辐射污染防治条例》等要求，在 1 小时之内向所在地生态环境和公安部门报告，造成或者可能造成人员超剂量照射的还应当同时向卫生健康部门报告。在发生辐射事故时，事故单位应当立即启动本单位的辐射事故应急方案，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地

生态环境部门和公安部门报告，造成或可能造成人员超剂量照射的，同时向当地卫生健康行政部门报告。

表 13 结论与建议

结论

一、项目概况

项目名称：南京鼓楼医院新建放射诊疗项目

建设单位：南京鼓楼医院

建设地点：南京市浦口区浦珠中路 359 号南京鼓楼医院江北医院二期

建设内容与规模：

南京鼓楼医院拟在江北院区先进技术楼负一层肿瘤中心新建 3 座医用电子直线加速器机房，并配备 3 台医用电子直线加速器（X 射线最大能量为 15MV，属II类射线装置）；拟于肿瘤中心新建 1 座射波刀机房，并配备 1 台射波刀（X 射线最大能量为 6MV，属II类射线装置）；拟于肿瘤中心新建 1 座后装治疗机机房，并配备 1 台后装治疗机（内含 1 枚 ^{192}Ir 放射源，单枚最大装源活度为 $3.70\times10^{11}Bq$，为III类放射源）均用于肿瘤的放射治疗，同时配套建设 2 座定位 CT 机房，配备 2 台定位 CT，属III类射线装置。

拟于先进技术楼负一层回旋加速器制药区新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，使用 1 台自屏蔽式回旋加速器（

）生产制备放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N 和 ^{15}O。

拟于先进技术楼一层核医学科-影像中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{18}F、^{11}C、^{13}N、^{15}O 和 ^{68}Ga 开展 PET/CT（属III类射线装置）和 PET/MRI 显像诊断，放射性同位素 ^{68}Ga 由医院使用锗镓发生器自行淋洗所得，使用 3 枚 ^{68}Ge 放射源（属V类放射源）对 PET/CT 和 PET/MRI 进行校准；使用放射性同位素 ^{99m}Tc 开展 SPECT/CT（属III类射线装置）显像诊断；使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲状腺吸碘率测定和甲亢治疗项目，使用放射性同位素 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm 开展骨转移治疗项目。

拟于先进技术楼二层核医学科-核素治疗中心新建 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，于场所内使用放射性同位素 ^{131}I 开展甲癌治疗项目。

同时，拟于二期门诊医技楼三层手术中心新建 2 座杂交手术室，并各配备 1 台 DSA，（属II类射线装置），拟于病房楼 C 四层 DSA 介入中心新建 6 座 DSA 机房，并各配备 1 台 DSA，均属II类射线装置，共计新增 8 台 DSA 均用于开展介入诊断项

目。

二、项目产业政策符合性

本项目为新增医用放射源、医用射线装置及非密封放射性物质工作场所，对照《产业结构调整指导目录（2019 年本）》及其修订（国家发展改革委令 2021 年第 49 号），不属于“限制类”或“淘汰类”项目，符合国家现行的产业政策。

三、实践正当性

南京鼓楼医院新建放射诊疗项目的目的是为了对病人进行医学诊断和治疗。在采取了相应的辐射防护措施后，项目所致的辐射危害可得到有效控制，项目实施的利益大于代价，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）规定的辐射防护“实践的正当性”原则。

四、项目选址及平面布局合理性

本项目为南京鼓楼医院江北国际分院二期建设项目的核技术利用部分，项目用地性质为医疗卫生用地。从周边外环境关系可知，医院周边规划为居民区和市政道路，周边无自然保护区等生态环境保护目标，无大的环境制约因素。

南京鼓楼医院于 2022 年完成了江北国际分院二期建设项目的环境影响报告书，并取得了南京江北新区管理委员会行政审批局关于该项目的批复文件，批复文号为：宁新区管审环建[2022]10 号。项目选址合理性已在相关环评报告中进行了论述，本项目建设地点均位于院区内，不额外新增用地，医院整体布局合理，且拟建的辐射工作场所有良好的实体屏蔽设施和防护措施，产生的辐射通过采取相应的治理措施后对周围环境影响较小，从辐射安全防护角度分析，本项目选址是合理的。

五、区域环境质量现状

根据监测结果，本项目拟建位置周围环境辐射剂量当量率与江苏省天然贯穿辐射水平相当，属于正常本底范围。南京鼓楼医院核医学科拟建址及其周围表面 β 放射性污染测量结果为＜0.03Bq/cm^2。项目拟建位置周围中子剂量当量率在均＜0.001μSv/h，属于正常水平。

六、环境影响分析结论

1、施工期环境影响分析

本项目施工工程量较大，施工周期长，项目施工期的环境影响已在其一般项目环境影响评价文件中进行了分析，随着施工结束后影响即可消除，对周围环境影响较小。

2、营运期正常工况下辐射环境影响

（1）辐射环境影响分析结论

在严格落实环评提出的要求后，本项目所致职业人员年剂量符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)的辐射剂量限值要求，同时也符合本报告提出的照射剂量约束值要求（职业照射 5mSv/a、公众照射 0.1mSv/a）。评价结果表明本项目辐射工作场所的防护性能符合要求。

（2）水环境影响分析

本项目辐射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水以及患者冲洗排便用水。通过独立的废水管道收集来自核医学科中心工作场所的放射性废水，进入医院新建的废水衰变池，进行衰变处理，衰变后的废水排入医疗废水处理站进一步处理后纳入市政污水管网。

（3）固体废物影响分析

本项目产生的放射性废物主要为：工作人员操作过程产生的注射器、棉棒、一次性卫生用品、垫料和更换下的废活性炭。医院拟将上述放射性固体废物采用专用塑料包装袋专门分类收集，按序封闭暂存于废物间的放射性衰变桶内（每袋废物表面剂量率不超过 0.1mSv/h，重量不超过 20kg），让放射性物质自行衰变，经检测符合排放标准后作为普通医疗废物处理。在整个收集、储存、处理过程中，做好台账记录，台账内容应包括：标明收贮时间、种类及数量、储存时间、废物最终处置去向等。

（4）大气环境影响分析

开机出束期间产生的 X、γ 射线等与空气中的氧气相互作用产生少量的臭氧(O_3)。臭氧经空调系统抽取后排放，由于治疗过程中每次曝光时间短，产生的臭氧量较少，且臭氧极不稳定，再经大气稀释自然扩散后，对周围大气环境影响轻微。

项目运行过程可能会产生少量的放射性气溶胶，医院已设置有通排风系统，且设有活性炭过滤装置，产生的少量放射性气溶胶经活性炭过滤后对周围环境影响很小。

2、事故工况下环境影响

经分析，本项目可能发生的辐射事故等级为一般辐射事故。环评认为，针对本项目可能发生的辐射事故，南京鼓楼医院按相关规定和本环评要求对已制定的《放射事件应急预案》进行补充完善后，能够有效控制并消除事故影响。

七、放射源、非密封放射性物质工作场所及射线装置使用与安全管理的综合能力

南京鼓楼医院拥有专业的放射性医护人员和安全管理机构，有符合国家环境保护标准、职业卫生标准和安全防护要求的场所、设施和设备；建立了较完善的辐射安全管理制度、辐射事故应急措施；在补充《辐射安全管理规定》《辐射工作设备操作规程》等相关管理制度并及时更新，认真落实并定期对辐射防护设施进行检查维护的前提下，具有对医用辐射设施的使用和安全管理能力。

八、项目环境可行性结论

综上所述，本项目符合国家产业政策，项目选址及平面布局合理。项目拟采取的辐射防护措施技术可行，措施有效；项目制定的管理制度、事故防范措施及应急方法等能够有效的避免或减少工作人员和公众的辐射危害。在认真落实项目工艺设计及本报告表提出的相应防护对策和措施，严格执行“三同时”制度，严格执行辐射防护的有关规定，辐射工作人员和公众所受照射剂量可满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）规定的剂量限值和本环评提出的剂量管理约束值。放射性“三废”及非辐射环境影响均可满足国家标准的要求。评价认为，从辐射安全与防护以及环境影响角度分析，本项目建设是可行的。

建议和承诺

1、该项目运行中，应严格遵循操作规程，加强对操作人员的培训，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、定期进行辐射工作场所的检查及监测，及时排除事故隐患。

4、医院取得本项目环评批复后，应及时申请辐射安全许可证，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。