核技术利用建设项目

东南大学附属中大医院
新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目
环境影响报告表

（公示版）

东南大学附属中大医院

2023 年 8 月

生态环境部监制

表 1　项目基本情况

<table>
<tr><td colspan="2">建设项目名称</td><td colspan="6">东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设单位</td><td colspan="6">东南大学附属中大医院</td></tr>
<tr><td colspan="2">法人代表</td><td></td><td>联系人</td><td></td><td>联系电话</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">注册地址</td><td colspan="6">江苏省南京市鼓楼区丁家桥 87 号</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目建设地点</td><td colspan="6">江苏省南京市鼓楼区丁家桥 87 号该医院内</td></tr>
<tr><td colspan="2">立项审批部门</td><td colspan="2">/</td><td>批准文号</td><td colspan="3">/</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设项目总投资（万元）</td><td></td><td>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></td></tr>
<tr><td colspan="2">项目性质</td><td colspan="3">☑新建 ☐改建 ☐扩建 ☐其他</td><td>占地面积（m^2）</td><td>/</td></tr>
<tr><td rowspan="8">应用类型</td><td rowspan="2">放射源</td><td>☐销售</td><td colspan="5">☐Ⅰ类 ☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类 ☐Ⅳ类 ☐Ⅴ类</td></tr>
<tr><td>☐使用</td><td colspan="5">☐Ⅰ类（医疗使用） ☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类 ☐Ⅳ类 ☐Ⅴ类</td></tr>
<tr><td rowspan="3">非密封放射性物质</td><td>☐生产</td><td colspan="5">☐制备 PET 用放射性药物</td></tr>
<tr><td>☐销售</td><td colspan="5">/</td></tr>
<tr><td>☑使用</td><td colspan="5">☑乙　☑丙</td></tr>
<tr><td rowspan="3">射线装置</td><td>☐生产</td><td colspan="5">☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类</td></tr>
<tr><td>☐销售</td><td colspan="5">☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类</td></tr>
<tr><td>☐使用</td><td colspan="5">☐Ⅱ类 ☐Ⅲ类</td></tr>
<tr><td>其他</td><td colspan="6">/</td></tr>
</table>

项目概述：

一、建设单位基本情况、项目建设规模及由来

东南大学附属中大医院始建于 1935 年，为一所集医疗、教学、科研为一体的大型综合性教学医院。

为了更好地为患者服务，提高医院的医疗质量，根据规划，东南大学附属中大医院拟对位于南京市鼓楼区丁家桥 87 号院区内 6 号楼（裙楼）一层进行改造，于 6 号

楼（裙楼）一层西部区域建设 1 座 PET/MR 机房及相关辅助用房，配备 1 台 PET/MR（uPMR 790 型），使用 ^{18}F、^{68}Ga 放射性核素，开展核素显像诊断，为丙级非密封放射性物质工作场所；于 6 号楼（裙楼）一层东部区域建设 1 处放药实验室，使用 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等 8 种放射性核素（除 ^{68}Ga 核素外，其余核素均向专业供应商订购），开展小动物实验，向有资质的药物供货商采购 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行淋洗 ^{68}Ga 核素，标记合成后供 PET/MR 诊断项目和放药实验室小动物实验使用，为乙级非密封放射性物质工作场所。

为保护环境和公众利益，防止辐射污染，根据《中华人民共和国环境影响评价法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《建设项目环境保护管理条例》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法律法规的规定，东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目需进行环境影响评价。受东南大学附属中大医院的委托，南京瑞森辐射技术有限公司承担了该单位新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目的环境影响评价工作（见附件 1）。依照《建设项目环境影响评价分类管理名录》（生态环境部令 第 16 号，2021 年版），本项目为新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目，属于“172 核技术利用建设项目”中的“乙级、丙级非密封放射性物质工作场所”项目，确定为编制环境影响报告表。我公司通过资料调研、项目工程分析、现场勘察及现场监测等工作的基础上，编制了该项目环境影响报告表。该医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目情况见表 1-1：

表 1-1 新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目情况一览表

非密封放射性物质

序号	工作场所等级	核素名称	日等效最大操作量（Bq）	工作场所名称	活动种类	环评情况	备注
1	丙级	^{18}F	5.18E+06	东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层 PET/MR 工作场所	使用	本次环评	/
2		^{68}Ga	1.85E+06		使用	本次环评	/
1	乙级	^{18}F	3.70E+05	东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层 放药实验室	使用	本次环评	/
2		^{64}Cu	3.70E+05		使用	本次环评	/
3		^{67}Ga	3.70E+06		使用	本次环评	/
4		^{68}Ga	1.85E+07		使用	本次环评	/
5		^{68}Ge（^{68}Ga）	1.85E+06		使用	本次环评	/
6		^{99m}Tc	3.70E+05		使用	本次环评	/

7		^{111}In	3.70E+06		使用	本次环评	/
8		^{131}I	7.40E+06		使用	本次环评	/
9		^{90}Y	1.48E+07		使用	本次环评	/

二、项目选址情况

东南大学附属中大医院位于南京市鼓楼区丁家桥87号，医院东侧为东南大学（丁家桥校区）体育场、丁家桥小区，南侧为童家巷，西侧为金川河，北侧为东南大学（丁家桥校区）公卫楼。本次新建PET/MR诊断和放药实验室项目位于东南大学附属中大医院6号楼（裙楼）一层，6号楼（裙楼）东侧为丁家桥和丁家桥小区，南侧为6号楼、院内道路、7号楼及8号楼，西侧为院内道路和配电站，北侧为院内道路和5号楼。本项目地理位置示意见附图1，东南大学附属中大医院周围环境示意图及总平面图见附图2。

本次新建PET/MR诊断和放药实验室项目工作场所东侧为院界围墙，南侧为新风机房、天井、净化机房及MRI机房控制室，西侧为室内走廊和保安室，北侧为院内道路，上方为消化内镜中心，下方为土层。本项目工作场所拟建址位于建筑物底层的一端，并与非放射性工作场所有明确的分界隔离，不毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，周围无环境制约因素，项目选址合理。东南大学附属中大医院6号楼（裙楼）一层新建PET/MR诊断和放药实验室项目平面布置及周围环境示意图见附图3，二层平面布置及周围环境示意图见附图5。

本次新建PET/MR诊断和放药实验室项目周围50m评价范围内，东侧为丁家桥和丁家桥小区（最近约22m），南侧为6号楼（毗邻）、院内道路、7号楼（最近约28m）及8号楼（最近约31m），西侧为院内道路和配电站（最近约38m），北侧为院内道路和5号楼（最近约6m）。项目运行后的环境保护目标主要为本项目辐射工作人员、医院内的其他医护人员、病患及陪同家属、院外丁家桥和丁家桥小区处其他公众等。

本项目评价范围内不涉及国家公园、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74号）、《江苏省生态空间管控区域规划》（苏政发〔2020〕1号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域；根据现场监测和环境影响预测，项目建设满足环境质量底线要求，不会造成区域环境质量下降；本项目对资源消耗极少，不涉及违背生态环境

准入清单的问题；本项目的建设符合江苏省“三线一单”生态环境分区管控要求。本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系图见附图9。

三、原有核技术利用项目许可情况

东南大学附属中大医院现持有江苏省生态环境厅核发的辐射安全许可证（苏环辐证[00088]），有效期至：2027年2月4日，许可种类和范围为“使用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、丙级非密封放射性物质工作场所”。医院辐射安全许可证正副本见附件3，原有核技术利用项目情况见附件4。

医院已开展的核技术利用项目均已履行环保手续，无环保遗留问题。

四、实践正当性分析

本项目的运行，可为患者提供放射诊断服务，并可提高当地医疗卫生水平，小动物实验可获得更为准确的生物体代谢信息，探索实验性药物在小型动物模型中的作用机制和过程，深入开展相关疾病致病机理的临床前期研究，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，本项目的建设和运行对受照个人或社会所带来的利益能够弥补其可能引起的辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（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
/	/	/	/	/	/	/	/	/

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 $T_{1/2}$=109.7min	使用	5.18E+09	5.18E+06	1.30E+12	放射诊断	注射，很简单操作	东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层 PET/MR 工作场所	按需订购，当天送达、当天用完，暂存于项目工作场所高活室手套箱内
2	^{68}Ga	液态/低毒 $T_{1/2}$=68.3min	使用	1.85E+09	1.85E+06	4.63E+11	放射诊断	注射，很简单操作		
3	^{18}F	液态/低毒 $T_{1/2}$=109.7min	使用	3.70E+07	3.70E+05	7.40E+08	动物实验	分装、标记，简单操作	东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层 放药实验室	按需订购，当天送达、当天用完，暂存于项目工作场所高活室手套箱内
4	^{64}Cu	液态/低毒 $T_{1/2}$=12.7h	使用	3.70E+07	3.70E+05	7.40E+08	动物实验	分装、标记，简单操作		
5	^{67}Ga	液态/中毒 $T_{1/2}$=3.26d	使用	3.70E+07	3.70E+06	7.40E+08	动物实验	分装、标记，简单操作		

6	^{68}Ga	液态/低毒 $T_{1/2}$=68.3min	使用	1.85E+09	1.85E+07	4.63E+11	放射诊断、动物实验	淋洗、分装、标记，简单操作		
7	^{68}Ge（^{68}Ga）	液态/中毒 $T_{1/2}$=270.8d	使用	1.85E+09	1.85E+06	4.63E+11	制备 ^{68}Ga	源的贮存		
8	^{99m}Tc	液态/低毒 $T_{1/2}$=6.02h	使用	3.70E+07	3.70E+05	7.40E+08	动物实验	分装、标记，简单操作		
9	^{111}In	液态/中毒 $T_{1/2}$=2.80d	使用	3.70E+07	3.70E+06	7.40E+08	动物实验	分装、标记，简单操作		
10	^{131}I	液态/中毒 $T_{1/2}$=8.02d	使用	7.40E+07	7.40E+06	1.48E+09	动物实验	分装、标记，简单操作		
11	^{90}Y	液态/中毒 $T_{1/2}$=2.67d	使用	1.48E+08	1.48E+07	2.96E+09	动物实验	分装，简单操作		
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

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

表 4　射线装置

（一）加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

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
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

（二）X 射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

序号	名称	类别	数量	型号	最大管电压（kV）	最大管电流（mA）	用途	工作场所	备注
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

（三）中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

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

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
体内含有放射性核素的患者排泄物及工作场所清洗废水等	液态	^{18}F、^{68}Ga	/	微量	微量	/	流入衰变系统中。	暂存时间超过 30 天，可直接解控排放至医院污水处理站。
残留的微量放射性试剂；体内含有放射性核素的实验小动物的血液、排泄物（尿液）等；工作场所清洗废水	液态	^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y	/	微量	微量	总β不大于 10 Bq/L、碘-131 的放射性活度浓度不大于 10 Bq/L	放药实验室项目产生的微量放射性试剂、实验小动物的血液等废液采用滤纸或药棉擦拭，排泄物被小动物饲养区的木屑吸收，存放于放废间放射性废物铅桶。 工作场所清洗废水流入衰变系统中。	放药实验室项目产生的部分废液（残留的微量放射性试剂；体内含有放射性核素的实验小动物的血液、排泄物（尿液）等）转移至固体废物中，作为放射性固体废物进行处理。 工作场所的清洗废水含 ^{131}I 核素，在衰变系统中衰变超过 180 天、经检测合格后，排放至医院污水处理系统作为医疗废水处理。

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、^{68}Ga	/	约 4.2kg	约 50kg	^{18}F≤1×10^{1}Bq/g、^{64}Cu、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I≤1×10^{2}Bq/g、^{90}Y≤1×10^{3}Bq/g	存放于放射性废物铅桶与废物间。	暂存超过 30 天，经检测合格后，由医院统一作为医疗废物处理。
沾有放射性核素的一次性注射器、手套、滤纸等；沾有残留的微量放射性试剂、体内含有放射性核素的实验小动物的血液、排泄物（尿液）等的擦拭滤纸、药棉、纸巾等		^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y	/	约 2.7kg	约 32kg		存放于放射性废物铅桶与放废间。	所含核素半衰期小于 24h（^{18}F、^{64}Cu、^{68}Ga、^{99m}Tc）的放射性固体废物暂存时间超过 30 天、所含核素半衰期大于 24h（^{67}Ga、^{111}In、^{90}Y）的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的 10 倍、含 ^{131}I 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天，经检测合格后，统一作为医疗废物处理，其中小动物尸体（含组织）交由有资质单位无害化处理。
沾有放射性核素的小动物尸体（含组织）及混合了小动物排泄物的填料等			/	约 2.3kg	约 28kg		存放于动物尸体暂存间内冰箱中。	
PET/MR 诊断项目工作场所通风系统中置换下的含放射性核素的废活性炭		^{18}F、^{68}Ga	/	/	约 400kg		存放于废物间内衰变。	暂存在废物间，暂存超过 30 天，经检测合格后，作为医疗废物处理。

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
放药实验室工作场所通风系统中置换下的含放射性核素的废活性炭		^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y	/	/	约 400kg		存放于放废间内衰变。	暂存在放废间，暂存超过 180 天，经检测合格后，作为医疗废物处理。
退役 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器	固体	^{68}Ge、^{68}Ga	/	/	约 250 柱	/	暂存于放药实验室高活室内。	由供货商回收处理。
液态放射性药物操作时挥发的微量气溶胶	气态	^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y	/	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。
臭氧、氮氧化物	气态	/	/	少量	少量	/	不暂存	通过排风系统排入外环境，臭氧在常温下约 50 分钟可自行分解为氧气，对环境影响较小。
/	/	/	/	/	/	/	/	/

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），中华人民共和国主席令第9号，2015年1月1日起实施； （2）《中华人民共和国环境影响评价法》（2018年修正版），中华人民共和国主席令 第二十四号，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》，中华人民共和国主席令 第六号，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年修改，国务院令 第709号，2019年3月2日施行； （5）《建设项目环境保护管理条例》（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》（2021年修正本），生态环境部部令 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年版），生态环境部令第16号，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）《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； （10）《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第2号公告，2018年5月1日起实施； （11）《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10月25日发布； （12）《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10月25日发布； （13）《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日发布；

	（14）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部部令 第9号，2019年11月1日起施行； （15）《关于药物实验动物尸体是否纳入危险废物管理的复函》，（原）环境保护部土壤环境管理司，土壤函[2018]6号，2018年2月26日发布； （16）《实验动物管理条例》，中华人民共和国国家科学技术委员会，1988年令第2号，1988年11月14日发布，2017年3月1日第三次修订； （17）《省政府关于印发江苏省国家级生态保护红线规划的通知》，苏政发〔2018〕74号，2018年6月9日发布； （18）《省生态环境厅关于进一步做好建设项目环境影响报告书（表）编制单位监管工作的通知》，苏环办〔2021〕187号，2021年5月28日发布； （19）《省政府关于印发江苏省生态空间管控区域规划的通知》，苏政发〔2020〕1号，2020年1月8日发布； （20）《江苏省政府关于印发江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知》，苏政发〔2020〕49号，2020年6月21日发布； （21）《江苏省辐射事故应急预案》（2020年修订版），苏政办函〔2020〕26号，2020年2月19日发布。
技术标准	（1）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）； （2）《电离辐射监测质量保证通用要求》（GB 8999-2021）； （3）《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）； （4）《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》（GB 27742-2011）； （5）《表面污染测定 第1部分：β发射体（$E_{\beta max}$＞0.15MeV）和α发射体》（GB/T 14056.1-2008）； （6）《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1-2016）； （7）《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）； （8）《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）； （9）《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）； （10）《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）；

	（11）《职业性外照射个人监测规范》（GBZ 128-2019）； （12）《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）。
其他	**附图：** （1）东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目地理位置示意图； （2）东南大学附属中大医院总平面及周围环境示意图； （3）6 号楼（裙楼）一层新建 PET/MR 项目工作场所区域划分及患者、医护人员流动路线示意图； （4）6 号楼（裙楼）一层新建放药实验室项目工作场所区域划分及人流、物流路线示意图； （5）东南大学附属中大医院 6 号楼二层平面布置示意图； （6）6 号楼（裙楼）一层新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所排风管道布设示意图； （7）6 号楼屋顶新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目通风管道排风口布设示意图； （8）6 号楼（裙楼）一层新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所排水管道布设示意图； （9）本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系示意图。 **附件：** （1）项目委托书； （2）放射性同位素使用承诺书； （3）辐射安全许可证正副本； （4）原有核技术利用项目基本情况一览表； （5）本项目辐射环境现状监测报告。

表 7　保护目标与评价标准

评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）中“放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目的评价范围，甲级取半径 500m 的范围，乙、丙级取半径 50m 的范围”的规定，结合本项目的特点，确定本项目评价范围为本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所实体屏蔽墙体边界外周围 50m 范围内区域，评价范围详见附图 2。

保护目标

本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目周围 50m 评价范围内，东侧为丁家桥和丁家桥小区（最近约 22m），南侧为 6 号楼（毗邻）、院内道路、7 号楼（最近约 28m）及 8 号楼（最近约 31m），西侧为院内道路和配电站（最近约 38m），北侧为院内道路和 5 号楼（最近约 6m）。项目运行后的环境保护目标主要为本项目辐射工作人员、医院内的其他医护人员、病患及陪同家属、院外丁家桥和丁家桥小区处其他公众等。详见表 7-1。

表 7-1 本项目保护目标一览表

环境保护目标		方位	距本项目最近距离	保护对象类别	人口规模
东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层新建 PET/MR 诊断项目辐射工作人员		本项目工作场所内	紧临	辐射工作人员	约 6 人
东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层新建放药实验室项目辐射工作人员					约 2 人
东南大学附属中大医院	6 号楼	南侧、西侧及上方	毗邻	公众	约 500 名医务人员，其余为流动人员
	7 号楼	南侧	约 28m	公众	约 900 名医务人员，120 张床位，其余为流动人员
	8 号楼	南侧	约 31m	公众	约 400 名医务人员，其余为流动人员

	5 号楼	北侧	约 6m	公众	约 700 名医务人员，200 张床位，其余为流动人员
丁家桥小区		东侧	约 31m	公众	20 号、22 号、24 号、26 号楼，约 150 人

本项目评价范围内不涉及国家公园、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74 号）、《江苏省生态空间管控区域规划》（苏政发〔2020〕1 号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域。根据《江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案》（苏政发〔2020〕49 号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省内优先保护单元；根据现场监测和环境影响预测，项目建设满足环境质量底线要求，不会造成区域环境质量下降；本项目对资源消耗极少，不涉及违背生态环境准入清单的问题；本项目的建设符合江苏省“三线一单”生态环境分区管控要求。本项目与江苏省生态空间保护区域位置关系图见附图 9。

评价标准

一、《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	应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值： 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； ③眼晶体的年当量剂量，15mSv； ④皮肤的年当量剂量，50mSv。
剂量约束值通常应在公众照射剂量限值 10%~30%（即 0.1mSv/a~0.3 mSv/a）的范围之内。	

1.2 非密封源工作场所的分级

级　别	日等效最大操作量/Bq
甲	$>4\times10^9$
乙	2×10^7~4×10^9
丙	豁免活度值以上~2×10^7

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。

二、《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）；

三、《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）：

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

5.1.2 核医学工作场所平面布局设计应遵循如下原则：

a）使工作场所的外照射水平和污染发生的概率达到尽可能小；

b）保持影像设备工作场所内较低辐射水平以避免对影像质量的干扰；

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

d）在分装和给药室的出口处应设计卫生通过间，进行污染检测。

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

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

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

四、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）：

6.1 屏蔽要求

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。

6.2 场所安全措施要求

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

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

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

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

6.3 密闭和通风要求

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

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

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

7.2 固体放射性废物的管理

7.2.3 固体放射性废物处理

7.2.3.1 固体放射性废物暂存时间满足下列要求的，经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平，α表面污染小于 0.08Bq/cm^2、β表面污染小于 0.8Bq/cm^2 的，可对废物清洁解控并作为医疗废物处理：

a）所含核素半衰期小于 24 小时的放射性固体废物暂存时间超过 30 天；

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

c）含碘-131 核素的放射性固体废物暂存超过 180 天。

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

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

7.3 液态放射性废物的管理

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

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。

8.2 工作场所监测

8.2.2 核医学工作场所辐射监测点位、内容和频次应包括但不限于表 1 的内容。

表 1 核医学工作场所辐射监测关注点位

监测内容	监测点位	监测频次
辐射水平	控制区和监督区所有工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的装置/设备的表面	不少于 1 次/月
表面放射性污染	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，核素治疗场所的设施、墙壁和地面等，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、皮肤暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等。	每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）

五、项目剂量约束值

综合考虑《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）及《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）等评价标准要求，本项目剂量约束值为：职业人员年有效剂量不超过 5mSv，公众年有效剂量不超 0.1mSv。

非密封放射性物质工作场所控制区边界、机房屏蔽体外 30cm 处剂量率目标控制

值为 2.5μSv/h，距非密封放射性物质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；放射性药物分装的箱体等设备设有屏蔽结构，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，放射性药物分装的箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25μSv/h；非密封放射性物质工作场所的放射性表面污染控制水平要求见表 7-1。

表 7-1 非密封放射性物质工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型		α放射性物质（Bq/cm²）		β放射性物质（Bq/cm²）
		极毒性	其他	
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	4	4×10	4×10
	监督区	4×10^{-1}	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4×10^{-1}	4×10^{-1}	4
	监督区			
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10^{-2}	4×10^{-2}	4×10^{-1}

六、参考资料：

（一）《辐射防护导论》，方杰主编。

（二）《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辐射水平（单位：nGy/h）

	原野	道路	室内
测值范围	33.1~72.6	18.1~102.3	50.7~129.4
均值	50.4	47.1	89.2
标准差（s）	7.0	12.3	14.0
（均值±3s）*	50.4±21.0	47.1±36.9	89.2±42.0

注：*测量值已扣除宇宙射线响应值，评价时采用“均值±3s”作为辐射现状评价的参考数值。

表 8　环境质量和辐射现状

环境质量和辐射现状

一、项目位置、布局和周边环境

东南大学附属中大医院拟对 6 号楼（裙楼）一层进行改造，新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目。东南大学附属中大医院位于南京市鼓楼区丁家桥 87 号，医院东侧为东南大学（丁家桥校区）体育场、丁家桥小区，南侧为童家巷，西侧为金川河，北侧为东南大学（丁家桥校区）公卫楼。本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目位于东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层，6 号楼（裙楼）东侧为丁家桥和丁家桥小区，南侧为 6 号楼、院内道路、7 号楼及 8 号楼，西侧为院内道路和配电站，北侧为院内道路和 5 号楼。

本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目位于东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层，项目工作场所东侧为院界围墙，南侧为新风机房、天井、净化机房及 MRI 机房控制室，西侧为室内走廊和保安室，北侧为院内道路，上方为消化内镜中心，下方为土层。

本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目周围 50m 评价范围内，东侧为丁家桥和丁家桥小区（最近约 22m），南侧为 6 号楼（毗邻）、院内道路、7 号楼（最近约 28m）及 8 号楼（最近约 31m），西侧为院内道路和配电站（最近约 38m），北侧为院内道路和 5 号楼（最近约 6m）。本项目小动物 PET/CT 项目拟建址周边环境见图 8-1 至图 8-6。



图 8-1　项目拟建址



图 8-2　项目拟建址东侧



图 8-3 项目拟建址南侧



图 8-4 项目拟建址西侧



图 8-5 项目拟建址北侧



图 8-6 项目拟建址上方

二、辐射环境现状调查

根据《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）、《辐射环境监测技术规范》（HJ 61-2021）及《表面污染测定 第 1 部分：β发射体（$E_{\beta max}$＞0.15MeV）和α发射体》（GB/T 14056.1-2008）相关方法和要求，在进行环境现场调查时，于本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目拟建址周围进行布点，测量γ辐射剂量率及β表面污染水平。监测结果见表 8-1 至表 8-2，监测点位示意图见图 8-7 至图 8-8。

监测单位：南京瑞森辐射技术有限公司

监测项目：γ辐射剂量率、β表面污染水平

监测日期：2023 年 5 月 9 日

天气：晴

温度：23℃

湿度：26%RH

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

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）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，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。

数据记录及处理：γ辐射空气吸收剂量率监测每个点位读取 10 个数据，读取间隔不小于 10s，并待计数稳定后读取数值。每组数据计算每个点位的平均值并计算方差。本项目空气比释动能和周围剂量当量的换算系数参照《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021），使用 ^{137}Cs 作为检定/校准参考辐射源，换算系数取 1.20Sv/Gy。β表面污染水平按照《表面污染测定 第 1 部分：β发射体（$E_{\beta max}$＞0.15MeV）和α发射体》（GB/T 14056.1-2008）中的要求进行，每组读 6 个数据，取算术平均值计算结果。

评价方法：参照江苏省环境天然γ辐射剂量水平调查结果，评价项目周围的辐射环境质量。

（一）γ辐射剂量率

检测仪器：FH40G+FHZ672E-10 型 X-γ辐射监测仪（设备编号：NJRS-103，检定有效期：2022 年 12 月 19 日～2023 年 12 月 18 日，检定单位：江苏省计量科学研究院，检定证书编号：Y2022-0122228）

能量范围：40keV~4.4MeV

测量范围：1nSv/h～100μSv/h

表 8-1 新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目拟建址周围γ辐射水平

测点编号	测点描述	测量结果（nGy/h）
1	新建 PET/MR 诊断项目拟建址北部（室内）	91.6
2	新建 PET/MR 诊断项目拟建址中部（室内）	85.6
3	新建 PET/MR 诊断项目拟建址南部（室内）	87.5
4	新建放药实验室项目拟建址北部（室内）	82.3
5	新建放药实验室项目拟建址中部（室内）	80.5

6	新建放药实验室项目拟建址南部（室内）	104
7	项目拟建址上方消化内镜中心（室内）	77.6
8	项目拟建址东侧丁家桥（道路）	70.1
9	项目拟建址南侧室内道路（室内）	83.2
10	项目拟建址西侧室内道路（室内）	76.6
11	项目拟建址北侧院内道路（道路，5 号楼南侧）	67.6
12	项目拟建址南侧 8 号楼北侧（道路）	75.3
13	项目拟建址南侧 7 号楼北侧（道路）	74.1
14	项目拟建址西侧衰变池上方（道路）	155
15	院区东侧丁家桥小区门口（道路）	72.5

注：上表数据已扣除检测仪器宇宙射线响应值。

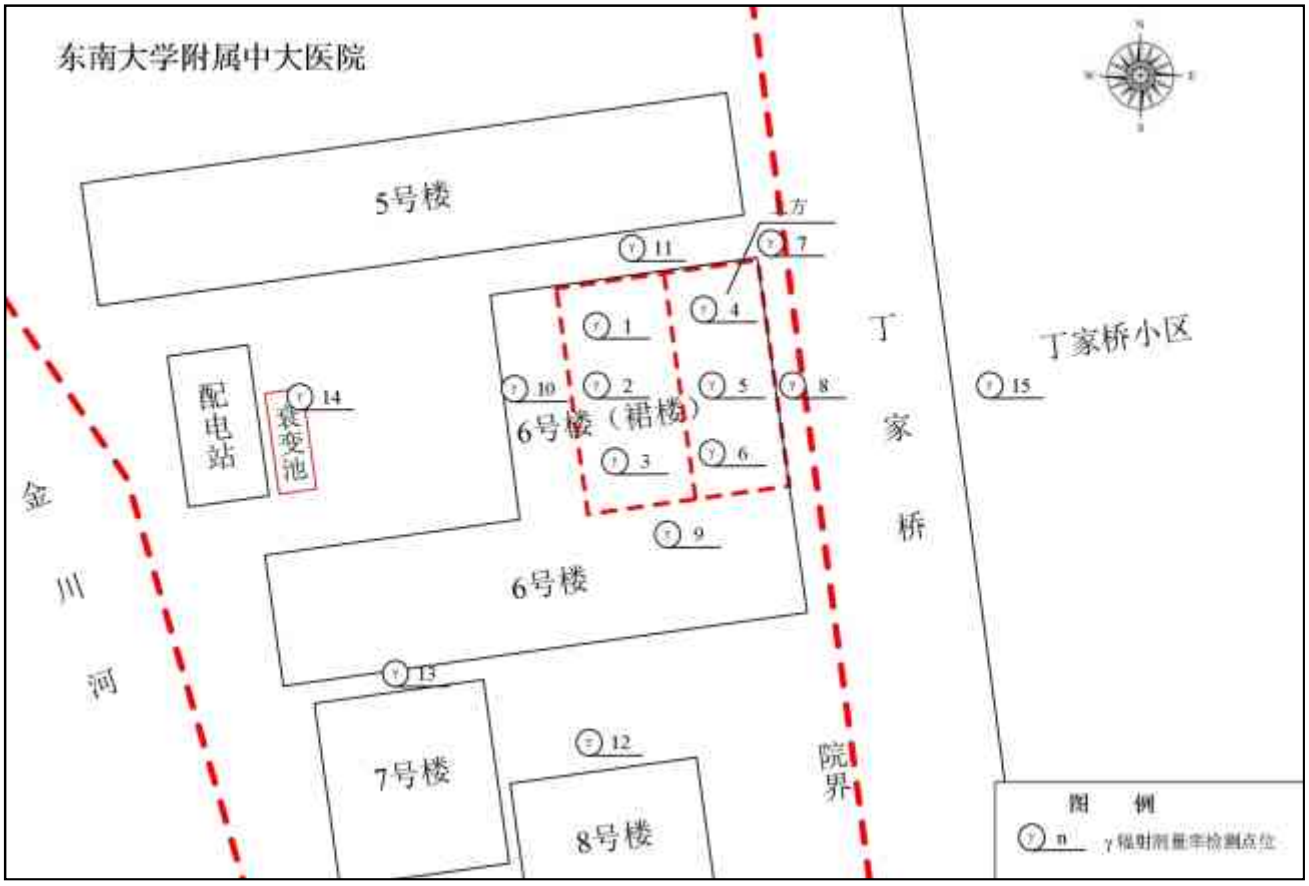


图 8-7 新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目拟建址周围γ辐射剂量率监测点位示意图

由表 8-1 监测结果可知，东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目拟建址周围环境天然γ辐射剂量率在 64.1nGy/h～112nGy/h 之间，位于江苏省环境天然γ辐射水平涨落区间，属江苏省道路、建筑物室内γ辐射（空气吸收）剂量率本底水平，衰变池上方 X-γ 辐射剂量率为 168nGy/h。

（二）β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：2023 年 3 月 27 日～2024 年 3 月 26 日，检定单位：江苏省计量科学研究院，检定证书编号：Y2023-0042629）

测量范围：0cps～20000cps



图 8-8 新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目周围β表面污染水平监测点位示意图

表 8-2 新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目拟建址周围β表面污染水平

测点编号	测点描述	测量结果（Bq/cm²）
1	新建 PET/MR 诊断项目拟建址北部地面	<0.06
2	新建 PET/MR 诊断项目拟建址中部地面	<0.06
3	新建 PET/MR 诊断项目拟建址南部地面	<0.06
4	新建放药实验室项目拟建址北部地面	<0.06
5	新建放药实验室项目拟建址中部地面	<0.06
6	新建放药实验室项目拟建址南部地面	<0.06
7	衰变池表面	0.22

注：仪器探测下限（LLD）为 0.06Bq/cm²。

由表 8-2 监测结果可知，东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目拟建址及其周围β表面污染水平为＜0.06Bq/cm^2，衰变池表面的β表面污染水平为 0.22Bq/cm^2。

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

东南大学附属中大医院拟对位于南京市鼓楼区丁家桥 87 号院区内 6 号楼（裙楼）一层进行改造，于西部区域建设 1 座 PET/MR 机房及相关辅助用房，配备 1 台 PET/MR（uPMR 790 型，可直接使用 ^{18}F 核素进行校准，无需另外配备校准源），使用 ^{18}F、^{68}Ga 放射性核素，开展核素显像诊断，为丙级非密封放射性物质工作场所；于东部区域建设 1 处放药实验室，使用 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等 8 种放射性核素，开展小动物实验，向有资质的药物供货商采购 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行淋洗 ^{68}Ga 核素，标记合成后供 PET/MR 诊断项目和放药实验室小动物实验使用，为乙级非密封放射性物质工作场所。

PET/MR 是将 PET 与 MR 联合在一起组成的大型功能代谢与分子影像诊断设备，扫描过程中 PET 对进入体内的正电子核素进行扫描并显像，可获得代谢显像，而 MR 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 MR 影像。PET/MR 属于核磁类装置。常见的 PET/MR 外观图见图 9-1。



图 9-1　本项目 uPMR 790 型 PET/MR 外观图

本项目的运行，可为患者提供放射诊断服务，并可提高当地医疗卫生水平，小动物实验可获得更为准确的生物体代谢信息，探索实验性药物在小型动物模型中的作用

机制和过程，深入开展相关疾病致病机理的临床前期研究，具有良好的社会效益和经济效益。

二、工作原理及工作流程

（一）新建 PET/MR 诊断项目

1、工作原理

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

PET/MR（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 MR（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 MR 高分辨率的检查功能，使其不但具有完整的、先进的 MR 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 MR 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。

2、工作流程

本次新建 PET/MR 诊断项目拟购置 1 台 PET/MR，使用 ^{18}F、^{68}Ga 核素用于开展核素显像诊断。本项目使用的 ^{18}F 核素由医院向专业供应商订购，^{68}Ga 核素于放药实验室淋洗合成后，直接送至 PET/MR 工作场所高活室。医院根据患者预约情况提前订购相关药物。

^{18}F、^{68}Ga 药物到货时为装入铅罐内的整罐药液，医护人员从铅罐中取出 ^{18}F、^{68}Ga

药物，放入高活室手套箱内，按患者所需活度进行分装，^{18}F 核素显像诊断项目日最大门诊量为 7 人，单人单次最大用药量为 5mCi（1.85E+08Bq），考虑到放射性药物的衰变，每天分上下午两批次进行送药，每批次送药量最大为 2.96E+09Bq（按照最大用药量的 4 倍备药），放置于 40mmPb 的铅罐内。^{68}Ga 核素显像诊断项目日最大门诊量为 3 人，单人单次最大用药量为 5mCi（1.85E+08Bq），考虑到放射性药物的衰变，由放药实验室制备好的药物，送药量一般为 40mCi~50mCi（1.48E+09Bq~1.85E+09Bq）。

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患者注射。注射完毕后，废弃注射器放入专用废物铅桶内。医院拟为新建 PET/MR 诊断项目配备 2 名护士（轮岗），负责核素分装、注射。

患者根据注入的正电子药物特性，在注射后候诊室内静坐或静躺候诊（等待约 40min），待药物代谢至靶器官，进入 PET/MR 机房，经医护人员摆位（每次约 1min）后，接受 PET/MR 的扫描，每次扫描约 20~40 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。医院拟为新建 PET/MR 诊断项目配备 2 名医师及 2 名技师（轮岗），负责操作 PET/MR 及辅助患者摆位。新建 PET/MR 诊断项目工作流程及产污环节分析见图 9-2。

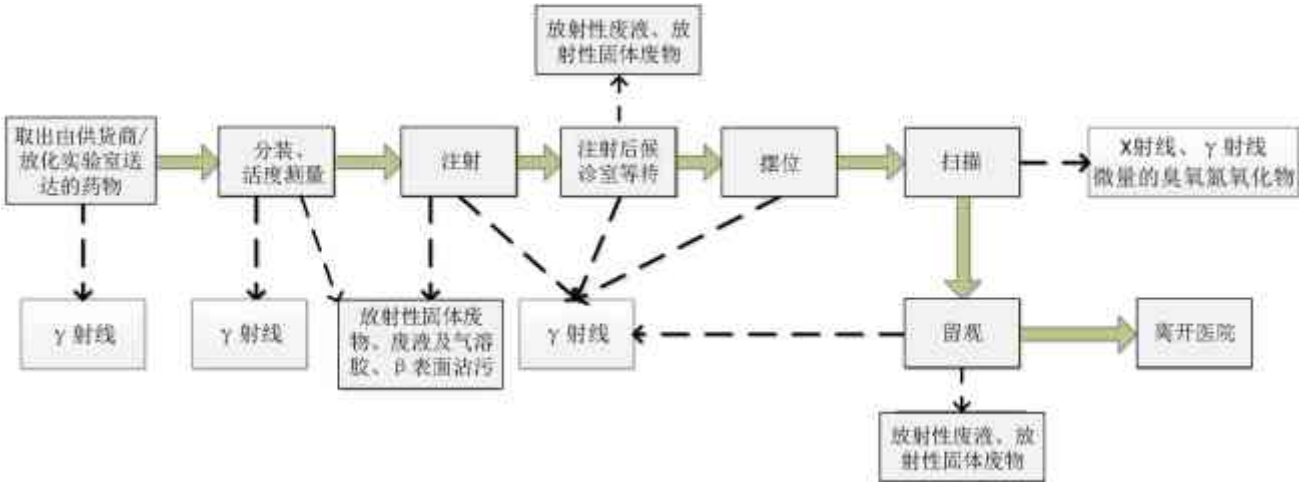


图 9-2 新建 PET/MR 诊断项目工作流程及产污环节分析示意图

（二）新建放药实验室项目

1、工作原理

新建放药实验室项目主要利用放射性同位素来标记药物，通过标记的药物参与动物体内新陈代谢以获得动物体内某一正常组织或病灶在某一时刻的血流灌注、糖/氨基酸/核酸/氧代谢或受体（标记过的药物）的分布及其活性状况等功能信息。这些信息主要通过对动物进行解剖、检测得到。有时为了解药物治疗效果的，会将注射了药物

的动物饲养一段时间，直接进行观察记录，饲养时间根据实际需要一般不超过 2 天。

另外，医院拟于放药实验室高活室内使用 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器淋洗制备 ^{68}Ga 核素，标记合成放射性药物供 PET/MR 诊断项目和本场所小动物实验使用。

2、工作流程

新建 PET/MR 诊断项目和放药实验室小动物实验所需的 ^{68}Ga 核素均于放药实验室高活室内由 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器（由有资质的药物供货商提供，最大规格为 50mCi/柱）自行淋洗制备，其制备流程如下：将生理盐水瓶插入发生器的双针，将置入铅罐的负压瓶插入发生器的单针。借助负压瓶的负压，使淋洗溶液淋洗发生器的吸附柱，这时由母体（^{68}Ge）衰变而得到的子体放射性核素（^{68}Ga）即被洗脱入负压瓶中，获得淋洗液。本项目 ^{68}Ga 核素采用全自动标记，辐射工作人员只需将 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器连接反应模块，淋洗液可自动传输至手套箱内的自动化反应模块中，采用计算机全自动控制，无需人员近距离操作。

本项目拟使用 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等 8 种放射性核素，开展小动物实验。除 ^{68}Ga 药物通过 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器在手套箱内自行进行制备外，其余放射性核素均由有资质的药物供货商提供。新建放药实验室项目每次实验只使用 1 种放射性核素，每种核素每年最多开展 20 次实验，故年最大实验次数为 160 次，单次实验最多使用 2~5 只小动物（小鼠或大鼠），^{90}Y 核素单只单次最大用药量为 2mCi（7.40E+07Bq），^{131}I 核素单只单次最大用药量为 1mCi（3.70E+07Bq），其余 6 种核素单只单次最大用药量为 0.2mCi（7.40E+06Bq），每次实验周期为 1~2 天（带药小动物留观不超过 24h）。

东南大学附属中大医院新建放药实验室项目小动物实验工作流程如下：

（1）根据实验情况提前向专业供应商订购放射性药物，放射性药物送达放药实验室高活室，辐射工作人员将放射性药物暂存至手套箱内。本项目每次只进行 1 种放射性核素实验，除 ^{68}Ga 药物由辐射工作人员通过 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行进行制备外，其余核素当天送达、当天用完，无需贮存。

（2）辐射工作人员在高活室手套箱内对药物进行标记，然后分装至一次性注射器内（设有防护套屏蔽），活度测量后，用铅盒将注射器转移至动物实验室。

（3）本项目实验用动物均为小鼠或大鼠，医院根据实验计划，提前向有资质的实验动物生产繁育机构订购，由实验动物供应商负责运送至动物实验室。

三、工作场所路线规划

（一）新建 PET/MR 诊断项目

本次新建PET/MR诊断项目工作场所控制区和监督区内患者及医护人员均具有独立的出入口和流动路线，能够有效防止交叉污染，避免工作人员、公众受到不必要的外照射。该项目工作场所区域划分及患者、医护人员流动路线见附图3。

医护人员路线：1、核素操作人员经卫生通过间进入高活室，工作结束后原路返回；2、PET/MR设备操作人员由走廊到达控制室及机房，工作结束后原路返回。

患者路线：患者由走廊依次经过注射窗口、注射后候诊室、机房、留观室，最后由患者专用出口离开。

药物路线：核素药物由专业供货商由患者专用入口经缓冲区送入高活室，结束后原路返回。医院根据患者预约情况提前订购相关药物，供应商或放药实验室工作人员在患者就诊前将放射性药物送达高活室，避免放射性药物与患者及其他人员发生交叉。

放射性固废路线：本项目固体放射性废物从工作场所各房间收集后，分别标记、分开贮存在废物间中的铅桶内，自然衰变超过30天达到清洁解控水平推荐值后，经卫生通过间送出。

本次新建PET/MR诊断项目相关配套布局能够保证各项工作程序沿着相关房间开展，减少了人员的流动性，有助于实施工作程序；医护人员与患者有各自独立的通道；高活室与检查室分开，注射后候诊室内设置有患者专用卫生间。医院拟采取向患者发放告知单及叫号等措施，避免患者在该项目工作场所内的随意走动，减少患者间的交叉影响而受到额外的辐射影响。医院的丙级非密封放射性物质工作场所布局满足《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中关于临床核医学工作场所的要求以及《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）要求。

（二）新建放药实验室项目

本次新建放药实验室项目为使用动物进行实验，故所有的放射性药物、动物及放射性废弃物均由辐射工作人员进行搬运，辐射工作人员由6号楼（裙楼）西侧门经卫生通过间进入工作场所，放射性药物由6号楼（裙楼）北侧门经走廊、准备间经传递窗送入高活室，放射性废弃物、供PET/MR诊断项目使用的^{68}Ga放射性药物经由6

号楼（裙楼）北侧门送出，实验用小动物由6号楼（裙楼）北侧门经走廊送入动物实验室。该工作场所区域划分及动物、药物的流动路线见附图4。

本次项目工作场所相关配套布局能够保证各项工作程序沿着相关房间开展，减少了人员的流动性，有助于实施工作程序。工作人员离开本项目工作场所前做表面污染监测，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。本项目工作场所布局满足《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）要求。

污染源项描述

一、放射性污染

东南大学附属中大医院拟对院区内6号楼（裙楼）一层进行改造，于西部区域建设1座PET/MR机房及相关辅助用房，配备1台PET/MR（uPMR 790型），使用^{18}F、^{68}Ga放射性核素，开展核素显像诊断；于东部区域建设1处放药实验室，使用^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y等8种放射性核素，开展小动物实验，向有资质的药物供货商采购^{68}Ge-^{68}Ga发生器自行淋洗^{68}Ga核素，标记合成后送PET/MR工作场所使用。本项目使用的放射性核素日最大用量及年总用量见表9-1。

表9-1 新建PET/MR诊断和放药实验室项目使用的放射性核素日使用量及年使用量

新建PET/MR诊断项目	^{18}F	日最大用量	单次使用最大量5mCi×日最高峰7人×4（4倍备药量）=5.18E+09Bq
		年总用量	单次使用最大量5mCi×日最高峰7人×4（4倍备药量）×250工作日=1.30E+12Bq
	^{68}Ga	日最大用量	单日最大送药量50mCi=1.85E+09Bq
		年总用量	单日使用最大量50mCi×250工作日=4.63E+11Bq
新建放药实验室项目	^{18}F	日最大用量	单次使用最大量0.2mCi×日最大5只=3.70E+07Bq
		年总用量	单次使用最大量0.2mCi×日最大5只×20次=7.40E+08Bq
	^{64}Cu	日最大用量	单次使用最大量0.2mCi×日最大5只=3.70E+07Bq
		年总用量	单次使用最大量0.2mCi×日最大5只×20次=7.40E+08Bq
	^{67}Ga	日最大用量	单次使用最大量0.2mCi×日最大5只=3.70E+07Bq
		年总用量	单次使用最大量0.2mCi×日最大5只×20次=7.40E+08Bq
	^{68}Ga	日最大用量	单日淋洗最大量50mCi=1.85E+09Bq

		年总用量	单日使用最大量 50mCi×250 工作日=4.63E+11Bq
	^{68}Ge（^{68}Ga）	日最大用量	单次锗镓发生器购买的规格为 50mCi（1.85E+09Bq）
		年总用量	单次锗镓发生器购买的规格为 50mCi×250 柱/年=4.63E+11Bq
	^{99m}Tc	日最大用量	单次使用最大量 0.2mCi×日最大 5 只=3.70E+07Bq
		年总用量	单次使用最大量 0.2mCi×日最大 5 只×20 次=7.40E+08Bq
	^{111}In	日最大用量	单次使用最大量 0.2mCi×日最大 5 只=3.70E+07Bq
		年总用量	单次使用最大量 0.2mCi×日最大 5 只×20 次=7.40E+08Bq
	^{131}I	日最大用量	单次使用最大量 1mCi×日最大 2 只=7.40E+07Bq
		年总用量	单次使用最大量 1mCi×日最大 2 只×20 次=1.48E+09Bq
	^{90}Y	日最大用量	单次使用最大量 2mCi×日最大 2 只=1.48E+08Bq
		年总用量	单次使用最大量 2mCi×日最大 2 只×20 次=2.96E+09Bq

本项目 PET/MR 显像区、放药实验室工作场所具有《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，人流及物流具有自己的独立通道，不与其他楼层交叉。因此，6 号楼（裙楼）一层 PET/MR 显像区、放药实验室分别为一个独立的非密封放射性物质工作场所。

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、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，并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 9-2 和表 9-3。

表 9-2 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 9-3 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

新建 PET/MR 诊断项目工作场所使用的放射性核素日等效最大操作量核算见表 9-4。

表 9-4 新建 PET/MR 诊断项目使用的放射性核素日等效最大操作量核算

序号	核素	日最大操作量（Bq）	毒性组别修正因子	操作方式与放射源状态修正因子*	日等效最大操作量（Bq）
1	^{18}F	5.18E+09	低毒，0.01	很简单的操作（液体），10	5.18E+06
2	^{68}Ga	1.85E+09	低毒，0.01	很简单的操作（液体），10	1.85E+06
合计					7.03E+06

注：本项目放射性核素的操作方式修正因子参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）附录 A 进行选取。

新建放药实验室项目工作场所使用的放射性核素日等效最大操作量核算见表 9-5。

表 9-5 新建放药实验室项目使用的放射性核素日等效最大操作量核算

序号	核素	日最大操作量（Bq）	毒性组别修正因子	操作方式与放射源状态修正因子 1)	日等效最大操作量（Bq）
1	^{18}F	3.70E+07	低毒，0.01	简单操作（液体），1	3.70E+05
2	^{64}Cu	3.70E+07	低毒，0.01	简单操作（液体），1	3.70E+05
3	^{67}Ga	3.70E+07	中毒，0.1	简单操作（液体），1	3.70E+06
4	^{68}Ga	1.85E+09	低毒，0.01	简单操作（淋洗、分装，液体），1	1.85E+07

5	^{68}Ge（^{68}Ga）	1.85E+09	中毒，0.1	源的贮存（液体），100	1.85E+06
6	^{99m}Tc	3.70E+07	低毒，0.01	简单操作（液体），1	3.70E+05
7	^{111}In	3.70E+07	中毒，0.1	简单操作（液体），1	3.70E+06
8	^{131}I	7.40E+07	中毒，0.1	简单操作（液体），1	7.40E+06
9	^{90}Y	1.48E+08	中毒，0.1	简单操作（液体），1	1.48E+07
合计 2)					5.11E+07

注：1、本项目除 ^{68}Ga 药物通过 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行进行制备、^{90}Y 为外购成品药物，其余均为购买放射性核素，由于需对放射性核素进行分装、标记等操作，故除 ^{68}Ge（^{68}Ga）的操作方式界定为“贮存”，其余核素的操作方式均界定为“简单操作”，其操作方式修正因子参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）附录 A 进行选取；

2、新建放药实验室项目每次实验只使用 1 种放射性核素，考虑到实验前需进行相关准备工作，故该场所的日等效最大操作量保守按所有核素日等效最大操作量相加计算。

根据表 9-4、表 9-5 可知，新建 PET/MR 诊断项目工作场所日等效最大操作量为 7.03E+06Bq，新建放药实验室项目工作场所日等效最大操作量为 5.11E+07Bq。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002），确定新建 PET/MR 诊断项目工作场所为丙级非密封放射性物质工作场所，确定新建放药实验室项目工作场所为乙级非密封放射性物质工作场所。

东南大学附属中大医院新建PET/MR诊断和放药实验室项目主要产生以下放射性污染：

（一）辐射

本项目放射性核素在操作过程中会产生γ射线、β射线，以上射线会造成医务人员和公众的外照射；在进行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，造成β放射性表面污染。本项目拟使用的放射性核素特性见表 9-6。

表 9-6 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射线能量（keV）与绝对强度（%）	主要γ、X 射线能量（keV）与绝对强度（%）	周围剂量当量率常数（裸源）（μSv·m^2/MBq·h）
^{18}F	109.8min	ε（3.27） β^+（96.73）	633.5（96.73）	XL：0.52（0.01795） $\gamma^{\pm}$：511（≤193.46）	0.143
^{64}Cu	12.7h	ε（43.6） β^+（17.4）	653.09（17.4）	1345.77（0.473） $\gamma^{\pm}$：511（≤34.79）	0.029
^{67}Ga	3.26d	ε（100）	—	91.266（3.16） 93.311（39.2）	0.0265

				184.577（21.2） 208.951（2.4） 300.219（16.8） 593.529（4.68） XK_{β}：9.57（6.8） $XK_{\alpha2}$：8.61578（17.0） $XK_{\alpha1}$：8.63886（33.3）	
^{68}Ga	68.3min	ε（10.9） β^{+}（89.1）	1899.1（88.0）	1077.33（3.0） $\gamma^{\pm}$：511（≤178.2）	0.134
^{68}Ge （^{68}Ga）	270.8d	ε（100）	—	—	0.011
^{99m}Tc	6.02h	IT（100）	—	140.511（88.5）	0.0303
^{111}In	2.8047d	ε（100）	—	171.28（90.66） 245.4（94.09）	0.0893
^{131}I	8.02d	β^{-}（100）	247.9（2.1） 333.8（7.27） 606.3（89.9）	80.185（2.62） 284.305（6.14） 364.489（81.7） 636.989（7.17） 722.911（1.77）	0.0595
^{90}Y	2.67d	β^{-}（100）	2284 （99.9885）	—	—

注：数据来源于《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）、《简明放射性同位素应用手册》《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 I）》《发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数（续 II）》。

β射线穿透能力较弱，对周围环境影响很小，其对周围环境的辐射影响较放射性核素可忽略不计。而放射性核素衰变过程中产生的γ射线穿透能力较强，会对工作场所及周围环境产生一定的外照射影响。故本项目主要考虑放射性核素发出的γ射线的辐射影响。

（二）放射性废气

放射性核素在操作过程中，由于空气的流动而“挥发”出的微量放射性废气，被辐射工作人员吸入体内造成的内照射影响。本项目核素操作均在手套箱中进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（通风速率不少于0.5m/s，排放口高于本建筑屋脊），开放液面挥发散逸的放射性同位素经通风系统内活性炭过滤后，从手套箱的通风管道直接抽出，由6号楼屋顶排放；本项目2个非密封放射性物质工作场所分别设置有新风系统及独立的排风系统，工作场所的气流流向遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，能够有效防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

（三）放射性废液

本项目可能产生的放射性废液有：残留的微量放射性试剂；体内含有放射性核素的患者排泄物等；体内含有放射性核素的实验小动物的血液、排泄物等；工作场所的清洗废水。

（四）放射性固体废物

本项目可能产生的放射性固体废物有：放射性核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核素的医疗固体废弃物；含有放射性核素的动物尸体（含组织）；混合了动物排泄物的笼底填料，每日收集后作为放射性固体废物处理；通风管道内更换下来的废活性炭；退役的 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器。污染途径为操作过程中及收集固体废物过程中和贮存衰变时对辐射工作人员产生的外照射。

二、非放射性污染

（一）废气

工作场所内的空气在γ射线作用下，分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体。

（二）废水

主要是辐射工作人员产生的生活污水。

（三）固体废物

主要是辐射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、工作场所布局及分区

东南大学附属中大医院新建PET/MR诊断和放药实验室项目工作场所位于东南大学附属中大医院6号楼（裙楼）一层，项目拟建址东侧为院界围墙，南侧为新风机房、天井、净化机房及MRI机房控制室，西侧为室内走廊和保安室，北侧为院内道路，上方为消化内镜中心，下方为土层。

新建PET/MR诊断和放药实验室项目工作场所拟建址位于建筑物底层的一端，并与非放射性工作场所有明确的分界隔离，不毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，周围无环境制约因素，项目选址合理。

（一）新建 PET/MR 诊断项目

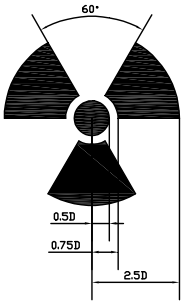
新建PET/MR诊断项目工作场所包括以下主要房间：1座PET/MR机房、控制室、设备间、高活室、注射后候诊室/抢救室、VIP注射后候诊室、留观室、废物间、卫生间、卫生通过间、淋浴间、衰变池等。医院将本项目工作场所进行分区管理，将涉及放射性核素操作及带药患者的主要活动区域划分为控制区，主要有PET/MR机房、设备间、高活室、注射后候诊室/抢救室、VIP注射后候诊室、留观室、废物间、卫生间、衰变池等。将与辐射剂量率较低、与辐射工作密切相关的区域或与控制区相邻的区域设为监督区，主要有设备的控制室、卫生通过间、淋浴间、保安室、走廊等。新建PET/MR诊断项目工作场所平面布置及分区见附图3。

（二）新建放药实验室项目

新建放药实验室项目工作场所包括以下主要房间：高活室、准备间、洁具间、冲淋间、无菌室、放化实验室、阳性对照实验室、动物实验室、动物尸体暂存间、放废间、卫生通过间、淋浴间、库房等。医院将本项目工作场所进行分区管理，将涉及放射性核素操作及带药动物的主要活动区域划分为控制区，主要有高活室、放化实验室、动物实验室、动物尸体暂存间、放废间等。将与辐射剂量率较低、与辐射工作密切相关的区域或与控制区相邻的区域设为监督区，主要有准备间、洁具间、冲淋间、无菌室、阳性对照实验室、卫生通过间、淋浴间、库房等。新建放药实验室项目工作场所平面布置及分区见附图4。

本项目控制区拟采用如下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 10-1）。



（a）电离辐射标志



（b）当心电离辐射警告标志

图 10-1 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。

本项目监督区拟采用如下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。

新建PET/MR诊断和放药实验室项目相关配套布局能够保证各项工作程序沿着相关房间开展，减少了人员的流动性，有助于实施工作程序，满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）、《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）和《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中关于辐射工作场所的分区规定。

二、辐射防护屏蔽设计

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所的屏蔽防护设计方案见表 10-1。

表 10-1 新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所屏蔽设计一览表

工作场所		屏蔽设计参数（厚度及材质）			
		墙体	顶部	防护门	玻璃窗
新建 PET/MR 诊断项目	高活室	240mm 实心砖+8mm 铅当量复合板	空心预制板+20mm 铅板	8mm 铅当量	40mm 铅当量
	注射后候诊室/抢救室、VIP 注射后候诊室、留观室、废物间	240mm 实心砖+8mm 铅当量复合板	空心预制板+20mm 铅板	8mm 铅当量	/
	PET/MR 机房	240mm 实心砖+8mm 铅当量复合板+铜屏蔽层	空心预制板+20mm 铅板+铜屏蔽层	8mm 铅当量	8mm 铅当量
	手套箱为 40mm 铅当量，铅罐为 40mm 铅当量、50mm 铅当量				
新建放药实验室项目	高活室	240mm 实心砖	空心预制板+20mm 铅板	8mm 铅当量	/
	放化实验室、动物实验室	240mm 实心砖	空心预制板+6mm 铅板	2mm 铅当量	/
	动物尸体暂存间、放废间	240mm 实心砖+8mm 铅当量复合板	空心预制板+20mm 铅板	8mm 铅当量	/
	手套箱为 50mm 铅当量，注射窗、防护屏、铅罐均为 10mm 铅当量				

注：铅密度为 11.3g/cm^3，实心砖密度为 1.65g/cm^3。

三、辐射安全和防护措施

（一）电离辐射警告标志

医院拟将新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所划分为控制区和监督区，在控制区、监督区入口处分别设置标明控制区、监督区的标志，在控制区入口处（包括 PET/MR 机房、高活室、注射后候诊室、留观室、放化实验室、动物实验室、放射性废物库、动物尸体暂存间门口）等均拟设置有符合规范的电离辐射警告标志；

（二）工作状态指示灯、闭门装置

PET/MR 机房门口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。

（三）门禁系统

医院拟在所有进入本项目监督区的门设置门禁，只有本项目的辐射工作人员才能进入监督区，防止无关人员入内；加强对控制区内注射放射性药物小动物的监督管理，防止其对公众造成不必要照射。

（四）安全管理措施规定

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所内不得安排与放射性无关的工作；在控制区和监督区内不得进食、饮水、吸烟，也不得进行无关工作及存放无关物件。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。放射性药物和 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器送达后存放于各工作场所高活室手套箱内，高活室设置有门禁系统和红外监控录像设备，放射性药物和 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器的使用、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。满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的相关要求。

（五）工作人员防护用品

医院拟为本项目实验人员配备的辐射防护装置及个人防护用品主要有铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖、剂量报警仪、个人剂量计等。

四、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，开展辐射工作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 10-2 个人防护用品和辅助防护设置配置符合性

项目	分项	参考《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）要求	本项目拟采取措施
新建 PET/MR 诊断项目	工作人员	必备：放射性污染防护服	按需配备
	患者或受检者	/	/
新建放药实验室项目	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 选备：铅橡胶帽、铅玻璃眼镜	铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖

东南大学附属中大医院拟为本项目配备辐射巡测仪 1 台，拟为本项目 2 个非密封放射性物质工作场所分别配备表面沾污仪 1 台和个人剂量报警仪 2 台。医院拟为辐射工作人员配备铅橡胶衣、铅橡胶围裙和放射性污染防护服、铅橡胶围脖等个人防护用

品和注射器屏蔽套、带有屏蔽的容器、托盘、放射性废物桶、手套箱等辅助防护用品。辐射工作人员工作时将佩戴个人剂量计，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。

三废的治理

一、放射性废气

在进行液态放射性药物活度操作过程中，若放射性药物液面处于开放状态，空气中可能挥发微量放射性同位素，污染途径为放射性药物在空气中挥发散逸造成人员吸入的内照射。本次新建 PET/MR 诊断项目工作场所高活室内设有 1 个防护铅当量为 40mmPb 的手套箱、新建放药实验室项目工作场所高活室内设有 3 个防护铅当量为 50mmPb 的手套箱，本项目核素操作均在手套箱中进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s）。为防止放射性液体泄漏或放射性气体及气溶胶逸出，手套箱等密闭设备设计有单独的排风系统，并在密闭设备的顶壁安装活性炭等过滤装置。

医院拟将排风口设在高于本建筑物（6 号楼）屋脊位置，满足《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）、《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“排气口应高于本建筑物屋顶”的要求，能够有效防止放射性废气对周围环境产生的影响，符合放射性工作场所相关要求。同时医院在手套箱管道内及屋顶排放口处设置活性炭过滤吸附装置，对放射性气溶胶进行吸附，降低放射性气溶胶外排浓度，吸附材料应定期更换（一年更换 1~2 次）并作为放射性固体处理。本项目 2 个非密封放射性物质工作场所分别设置有新风系统及独立的排风系统，工作场所的气流流向遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，能够有效防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所排风管道布设示意图见附图 6。

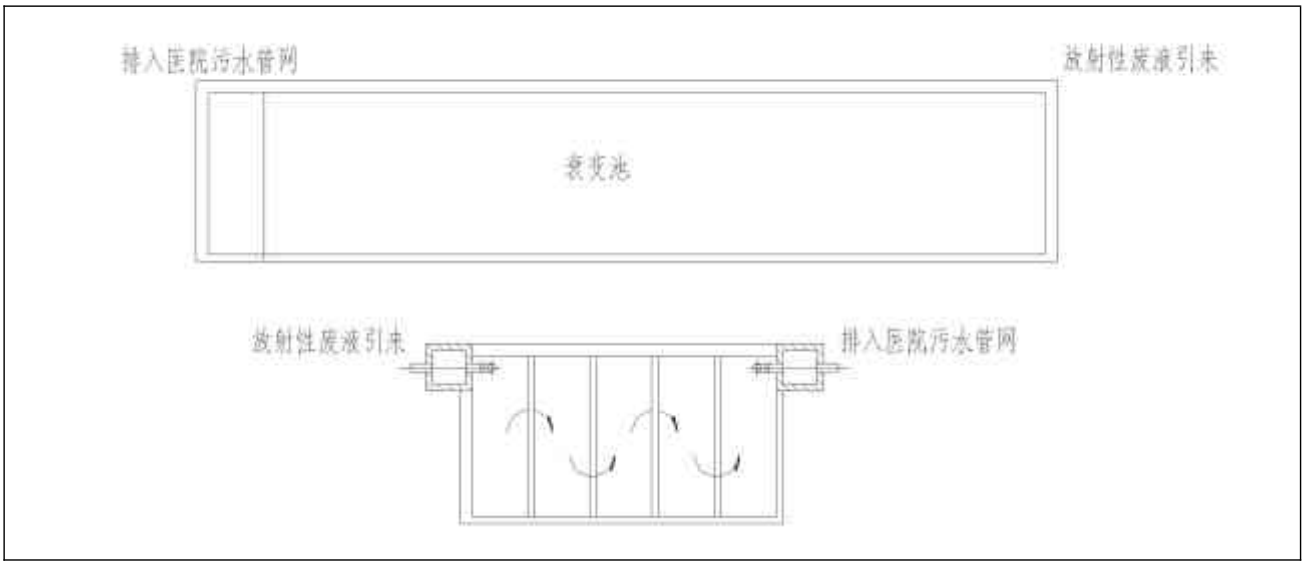
二、放射性废液

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目产生的放射性废液主要包括：残留的微量放射性试剂；体内含有放射性核素的患者排泄物等；体内含有放射性核素的实验小动物的血液、排泄物等；工作场所的清洗废水。

新建 PET/MR 诊断项目高活室、给药后患者专用卫生间等高活区的放射性废水，含有 ^{18}F、^{68}Ga 等放射性核素，由独立下水管道统一集中到 6 号楼西侧地埋式衰变系统中（结构示意图见图 10-2），衰变超过 30 天后可直接解控排放至医院污水处理系统作为医疗废水处理。



（a）平面图



（b）剖面图

图 10-2 衰变系统结构示意图

衰变系统采用推流式衰变池，包含 5 级分隔连续式衰变池，池内设导流墙，单级衰变池体积均为 15m（长）×1.0m（宽）×3.0m（高），有效容积约 40m^3，衰变系统总有效容积约 200m^3。衰变系统采用水泥砂浆砌筑，四周池壁及盖板为 22cm 厚混凝土，内部导流墙及池底为 12cm 厚混凝土，池底和池壁坚固采用耐腐蚀、防渗漏措施。

新建 PET/MR 诊断项目放射性废液经专用管道流入衰变系统，专用管道管径为 100mm，埋地深度为 0.75m，无裸露部分，在管道外采用 0.5mm 铅当量铅皮包覆、上覆 0.75m 厚土层进行辐射防护，避免含放射性废液流动时造成管道穿行区域的辐射泄漏。

新建放药实验室项目实验次数总计为160次/a，单只小动物给药活度一般为0.2~2mCi，因泼洒和用药活度估算不准确产生的残留微量放射性试剂较少，可采用滤纸或药棉进行擦拭；小动物需于给药后不同时间进行解剖检测，故在动物实验室内留观，留观时间不超过24h，动物实验室饲养笼内设有木屑，少部分小动物排泄物排入笼底木屑，笼底采用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，确保其β表面污染＜40Bq/cm^2。解剖过程产生的小动物血液，也采用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭。本项目将部分放射性废液转移至放射性固体废物中，每次实验结束后收集作为放射性固体废物处理。每日工作场所产生的清洗废水含有放射性核素，经专用管道流入衰变系统，专用管道管径为100mm，埋地深度为0.75m，无裸露部分，在管道外采用0.5mm铅当量铅皮包覆、上覆0.75m厚土层进行辐射防护，避免含放射性废液流动时造成管道穿行区域的辐射泄漏。新建PET/MR诊断和放药实验室项目工作场所放射性废液专用管道布设图见附图8。

三、放射性固体废物

新建PET/MR诊断项目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、滤纸等带微量放射性核素的医疗固体废弃物以及通风管道内更换下来的废活性炭，污染途径为操作过程中及收集固体废物过程中和贮存衰变时对辐射工作人员产生的外照射。本项目工作场所高活室、注射后候诊室、留观室等房间内均拟设置1~2个放射性废物桶（防护厚度应不低于20mmPb），从各房间收集的放射性固体废物分别标记、分开贮存（标记主要核素类型、收集时间等）后集中到废物间中的铅桶中暂存，通风管道内更换下来的废活性炭也暂存在废物间内，暂存时间超过30天，经检测合格后，统一作为医疗废物处理进行处理。

新建放药实验室项目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、木屑、通风管道内更换下来的废活性炭等及含有放射性核素的小动物尸体（含组织），污染途径为操作过程中及收集固体废物过程中和贮存衰变时对辐射工作人员产生的外照射。本项目工作场所高活室、动物实验室、放化实验室等房间内均拟设置1~2个放射性废物桶（防护厚度应不低于20mmPb），除小动物尸体需暂存在动物尸体暂存间内冰箱中冷冻进行放置衰变，其余放射性固体废物均存放至放射性废物桶内，分别标记、分开贮存（标记主要核素类型、收集时间等），于放射性废物库内暂存，本项目所含核素半衰期小于24h的放射性固体废物暂存时间超过30天、所

含核素半衰期大于24h的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的10倍、含^{131}I核素的放射性固体废物暂存超过180天，经检测合格后，统一作为医疗废物处理，其中小动物尸体（含组织）交由有资质单位无害化处理。本项目产生的退役^{68}Ge-^{68}Ga发生器拟委托供货商进行回收处理。

四、非放射性“三废”

工作场所内的空气在γ射线作用下，分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，可通过工作场所拟设置的排风系统及新风系统排至室外，臭氧在常温下约50分钟可自行分解为氧气，这部分废气对周围环境影响较小。

辐射工作人员产生的生活污水，将进入医院污水处理系统，处理达标后排入城市污水管网，对周围环境影响较小。

辐射工作人员产生的生活垃圾，收集后，将交由城市环卫部门处理，对周围环境影响较小。

表 11　环境影响分析

建设阶段对环境的影响

本项目机房及工作场所建设属于 6 号楼（裙楼）的部分工程，建设时将进行墙体隔断与内饰装潢，将产生施工噪声、扬尘和建筑垃圾污染，建设施工时对环境会产生如下影响：

一、大气

本项目在建设施工期需进行的墙体隔断等作业，各种施工将产生地面扬尘，另外机械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：及时清扫施工场地，设立围挡，并保持施工场地一定的湿度。

二、噪声

整个建筑施工阶段，如墙体拆除、墙体连接等施工中都将产生不同程度的噪声，对周围环境造成一定的影响。在施工时严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523-2011）的标准，尽量采用噪声低的先进设备，同时严禁夜间进行强噪声作业。

三、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，委托由有资质的单位清运，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。

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医院院区内部，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

东南大学附属中大医院拟对院区内 6 号楼（裙楼）一层进行改造，于西部区域建设 1 座 PET/MR 机房及相关辅助用房，配备 1 台 PET/MR（uPMR 790 型），使用 ^{18}F、^{68}Ga 放射性核素，开展核素显像诊断；于东部区域建设 1 处放药实验室，使用 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等 8 种放射性核素，开展小动物实验，向有资质的药物供货商采购 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行淋洗 ^{68}Ga 核素，标记合成后送 PET/MR 工作

场所使用。

（一）新建 PET/MR 诊断项目

1、β射线辐射影响分析

β射线的穿透性能较差，β粒子在低 Z 物质中的射程，与能量等于β粒子最大能量的单能电子的射程是一样的，可以采用《辐射防护导论》中的公式（4.15）进行计算：

$$d = R/\rho$$ 公式 11-1

式中：*d*—β粒子的最大射程，cm；

R—β粒子在低 Z 物质中的射程，g/cm^2；

ρ—物质的密度，g/cm^3。

本项目拟使用的 ^{18}F、^{68}Ga 放射性核素衰变发出的β射线能量分别为 0.63MeV、1.9MeV，其在低 *Z* 物质中的射程 *R* 可采用《辐射防护导论》中的公式（4.13）进行计算：

$$R = 0.412 \cdot E^{(1.265-0.0954 \cdot \ln E)} \quad (0.01 < E < 2.5MeV)$$ 公式 11-2

式中：*E*—β射线能量，MeV。

根据公式 11-1、公式 11-2，可估算出本项目 ^{18}F、^{68}Ga 核素衰变发出的β射线在不同材料中的射程，预测结果见表 11-1。

表 11-1 β射线在不同材料中的射程

核素名称	*E*（MeV）	*R*（g/cm^2）	屏蔽材料	*ρ*（g/cm^3）	*d*（cm）
^{18}F	0.63	0.23	铅	11.34	0.020
			混凝土	2.35	0.096
			实心砖	1.65	0.136
^{68}Ga	1.9	0.89	铅	11.34	0.079
			混凝土	2.35	0.380
			实心砖	1.65	0.541

本项目手套箱采用铅板及铅玻璃进行防护，工作场所墙体采用实心砖+铅复合板、顶部采用空心预制板+铅板，各防护门均采用铅防护门，观察窗、注射窗均为铅玻璃窗进行辐射防护，本项目 ^{18}F、^{68}Ga 放射性核素β射线在上述屏蔽材料中射程均极短。

综上所述，本项目涉及使用的 ^{18}F、^{68}Ga 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、γ射线辐射影响分析

参考《核医学放射防护要求》（GBZ120-2020）附录 I 中第 1.2 款 ^{99m}Tc 诊断、PET 等工作场所的屏蔽计算，保守起见，所有核素（如 ^{99m}Tc、^{18}F 等）工作场所的屏蔽，可采用瞬时剂量率计算方法。

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

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：

$$\dot{H}_P = \frac{A \times \Gamma}{r^2} 10^{(-\frac{x}{TVL})} \qquad 公式\ 11\text{-}3$$

本次新建 PET/MR 诊断项目使用 ^{18}F、^{68}Ga 核素，单人单次最大用药量均为 5mCi（1.85E+08Bq），其中 ^{18}F 核素显像诊断项目日最大门诊量为 7 人，^{68}Ga 核素显像诊断项目日最大门诊量为 3 人，且 ^{18}F 核素周围剂量当量率较 ^{68}Ga 核素更大，故本项目选取 ^{18}F 核素进行γ射线辐射影响分析计算。

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 11-2。

表 11-2 常用核素屏蔽材料十分之一值层厚度（TVL）

核素	铅（11.3g/cm^3）	砖（1.65g/cm^3）	混凝土（2.35g/cm^3）
^{18}F	16.6mm	263mm	176mm

根据工程分析可知，新建 PET/MR 诊断项目辐射影响主要包括药物分装（含质控的活度测量过程）、注射、扫描等过程，主要对本项目辐射工作人员及室外公众产生外照射辐射影响，根据公式 11-3 可估算出新建 PET/MR 诊断项目周围各参考点处的辐射水平，各参考点位置见图 11-1，预测结果见表 11-3。

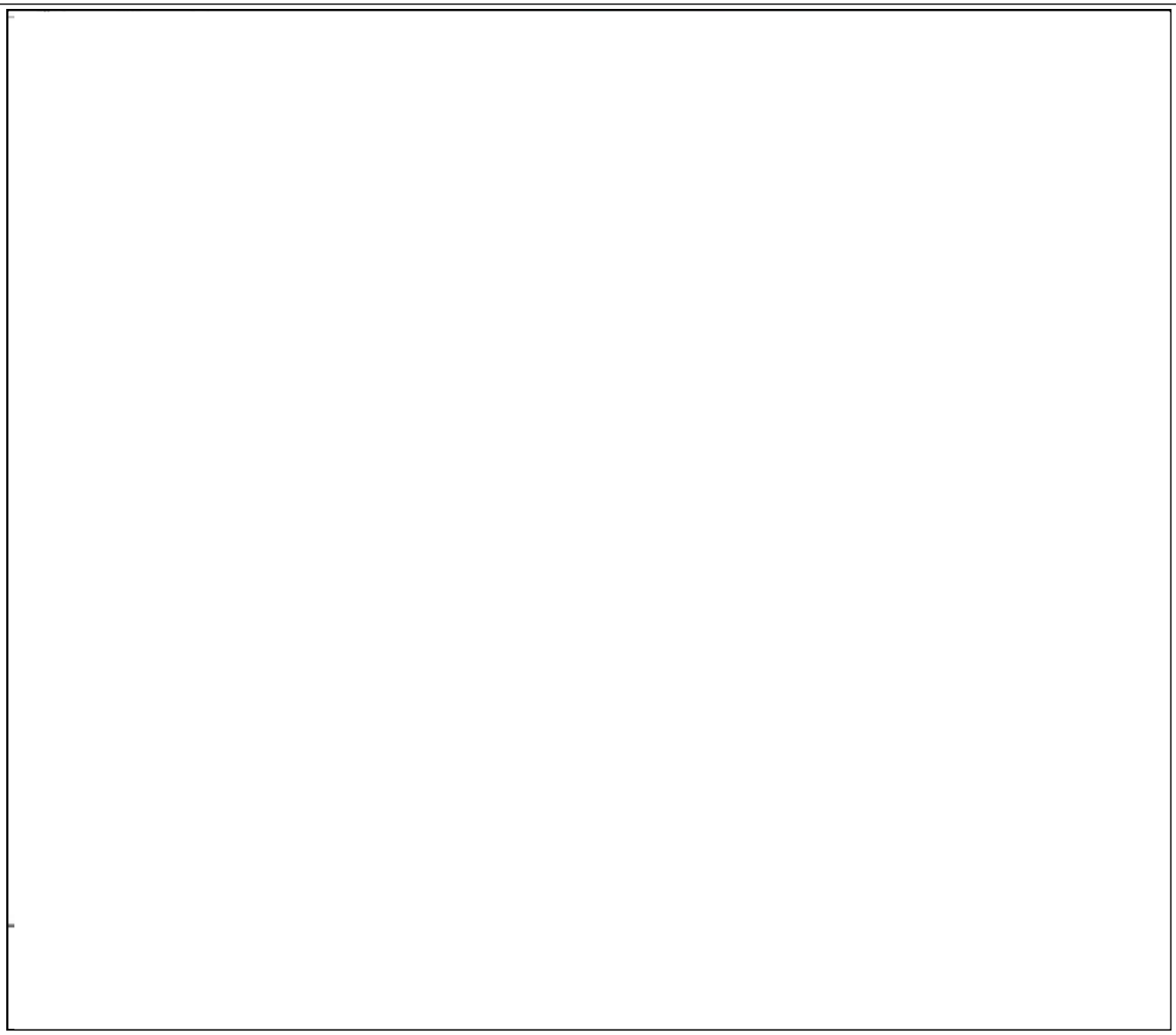


图 11-1 新建 PET/MR 诊断项目估算点位示意图

表 11-3 新建 PET/MR 诊断项目工作场所辐射水平估算结果

点位	参考点位置	源强[1]（Bq）	与源的距离（m）	屏蔽材料及厚度[2]	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）	控制目标值（μSv/h）	备注
1	核素操作工作位	2.96E+09	0.5	40mmPb+40mmPb	1.52E-05	0.026	2.5	铅罐为40mmPb，手套箱为40mmPb
2	注射位	1.85E+08	0.5	40mmPb	0.004	0.412	/	注射窗为40mmPb
3	高活室东墙表面30cm	1.85E+08	1.3	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.631	2.5	/
4	高活室西墙表面30cm	1.85E+08	2.5	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.171	2.5	/
5	高活室北侧防护门表面 30cm	1.85E+08	4.9	8mmPb	0.330	0.363	2.5	/
6	高活室北墙表面30cm	1.85E+08	4.7	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.048	2.5	/

7	高活室顶部表面30cm	1.85E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.172	2.5	/
8	注射后候诊室/抢救室东墙表面30cm	1.85E+08	2.0	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.172	2.5	1人候诊，假设候诊时患者位于注射后候诊室/抢救室中间
9	注射后候诊室/抢救室南墙表面30cm	1.85E+08	2.7	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.094	2.5	
10	注射后候诊室/抢救室南侧防护门表面30cm	1.85E+08	3.1	8mmPb	0.330	0.584	2.5	
11	注射后候诊室/抢救室西墙表面30cm	1.85E+08	2.0	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.172	2.5	
12	注射后候诊室/抢救室顶部表面30cm	1.85E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.111	2.5	
13	注射后候诊室/抢救室卫生间东墙表面30cm	1.85E+08	1.5	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.305	2.5	/
14	注射后候诊室/抢救室卫生间西墙表面30cm	1.85E+08	1.5	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.305	2.5	/
15	注射后候诊室/抢救室卫生间北墙表面30cm	1.85E+08	1.7	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.237	2.5	/
16	注射后候诊室/抢救室卫生间顶部表面30cm	1.85E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.111	2.5	/
17	VIP注射后候诊室东墙表面30cm	1.85E+08	2.0	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.172	2.5	1人候诊，假设候诊时患者位于VIP注射后候诊室中间
18	VIP注射后候诊室南墙表面30cm	1.85E+08	2.7	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.094	2.5	
19	VIP注射后候诊室南侧防护门表面30cm	1.85E+08	3.1	8mmPb	0.330	0.584	2.5	
20	VIP注射后候诊室西墙表面30cm	1.85E+08	2.0	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.172	2.5	
21	VIP注射后候诊室顶部表面30cm	1.85E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.111	2.5	
22	VIP注射后候诊室卫生间东墙表面30cm	1.85E+08	1.6	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.268	2.5	/
23	VIP注射后候诊室西墙表面30cm	1.85E+08	1.6	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.268	2.5	/
24	VIP注射后候诊室北墙表面30cm	1.85E+08	1.7	240mm实心砖+8mmPb复合板	0.040	0.237	2.5	/
25	VIP注射后候诊室顶部表面30cm	1.85E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.111	2.5	/

26	PET/MR 机房东墙表面 30cm	1.44E+08	4.9	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.022	2.5	假设扫描时患者位于 PET/MR 机房中间，经 40min 候诊等待，患者体内核素活度为 1.44E+08Bq
27	PET/MR 机房南墙表面 30cm	1.44E+08	3.4	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.046	2.5	
28	PET/MR 机房西墙表面 30cm	1.44E+08	5.3	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.019	2.5	
29	PET/MR 机房观察窗表面 30cm	1.44E+08	4.9	8mmPb	0.330	0.182	2.5	
30	PET/MR 机房西侧防护门表面 30cm	1.44E+08	5.2	8mmPb	0.330	0.161	2.5	
31	PET/MR 机房北墙表面 30cm	1.44E+08	3.8	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.037	2.5	
32	PET/MR 机房北侧防护门表面 30cm	1.44E+08	3.4	8mmPb	0.330	0.377	2.5	
33	PET/MR 机房顶部表面 30cm	1.44E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.086	2.5	
34	摆位工作位	1.44E+08	1.0	/	1.000	13.222	/	/
35	留观室东墙表面 30cm	1.12E+08	1.9	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.178	2.5	1 人留观，经 40min 候诊等待、40min 扫描，患者体内核素活度为 1.12E+08Bq
36	留观室南侧防护门表面 30cm	1.12E+08	4.2	8mmPb	0.330	0.298	2.5	
37	留观室西墙表面 30cm	1.12E+08	1.9	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.178	2.5	
38	留观室北侧防护门表面 30cm	1.12E+08	4.2	8mmPb	0.330	0.298	2.5	
39	留观室顶部表面 30cm	1.12E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.104	2.5	
40	留观室卫生间南墙表面 30cm	1.12E+08	1.7	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.223	2.5	/
41	留观室卫生间西墙表面 30cm	1.12E+08	1.2	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.447	2.5	/
42	留观室卫生间北墙表面 30cm	1.12E+08	1.7	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	0.040	0.223	2.5	/
43	留观室卫生间顶部表面 30cm	1.12E+08	3.1	空心预制板+20mmPb	0.062	0.104	2.5	/

注：1、^{18}F 核素显像诊断项目日最大门诊量为 7 人，考虑到放射性药物的衰变，每天分上下午两批次进行送药，每批次送药量最大为 2.96E+09Bq（按照最大用药量的 4 倍备药）；

2、本项目透射比是根据核素对不同材料的什值层厚度计算得出，铅密度为 11.3g/cm^3，实心砖密度为 1.65g/cm^3。

由表 11-3 的理论估算结果可以看出，由于有 40mm 铅当量手套箱屏蔽，^{18}F 药物

取药、分装过程中对辐射工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。^{18}F 药物在操作过程中及患者在就诊过程中对高活室、给药后候诊室及 PET/MR 机房外的环境影响较小，高活室、给药后候诊室及 PET/MR 机房的防护设计均能够满足 ^{18}F 核素的辐射防护要求。候诊期间由于患者相对集中，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患者的数量，减少对患者与对外环境的辐射影响。

3、周围公众及辐射工作人员年有效剂量估算

新建 PET/MR 诊断项目运行过程中，工作人员主要受照射环节为分装、注射过程及患者摆位、扫描诊断过程。一般情况下，分装过程约 1 分钟，送至注射窗口、注射过程约 1 分钟，扫描过程约 40 分钟。预测本项目运行后，日接诊量最大为 10 人次。根据表 11-3 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辐射工作人员及公众的年受照剂量，见表 11-4。

表 11-4 新建 PET/MR 诊断项目工作场所辐射工作人员及公众年有效剂量估算

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	位置
1	核素操作工作位	0.026	操作 1min×10 次×250 天	1	＜0.01	工作人员	高活室
2	注射位	0.412	注射 1min×10 次×250 天	1	0.02	工作人员	高活室
3	高活室东墙表面 30cm	0.631	休息 40min	1	＜0.01	公众（患者）	注射后候诊室/抢救室
4	高活室西墙表面 30cm	0.171	注射 1min×10 次×250 天	1	0.01	公众	保安室
5	高活室北侧防护门表面 30cm	0.363	注射 1min×10 次×250 天	1/16	＜0.01	工作人员	卫生通过间
6	高活室北墙表面 30cm	0.048	注射 1min×10 次×250 天	1/16	＜0.01	工作人员	淋浴间
7	高活室顶部表面 30cm	0.172	注射 1min×10 次×250 天	1/2	＜0.01	公众	ERCP 机房
8	注射后候诊室/抢救室东墙表面 30cm	0.172	休息 40min	1	＜0.01	公众（患者）	VIP 注射后候诊室卫生间
9	注射后候诊室/抢救室南墙表面 30cm	0.094	驻留 10min	1	＜0.01	公众（患者）	控制区走廊
10	注射后候诊室/抢救室南侧防护门表面 30cm	0.584	驻留 10min	1/5	＜0.01	公众（患者）	控制区走廊
11	注射后候诊室/抢救室西墙表面 30cm	0.172	注射 1min×10 次×250 天	1	0.01	工作人员	高活室

12	注射后候诊室/抢救室顶部表面 30cm	0.111	休息 40min×5 次×250 天	1	0.09	公众	学术办公室
13	注射后候诊室/抢救室卫生间东墙表面 30cm	0.305	驻留 5min	1	＜0.01	公众（患者）	VIP 注射后候诊室卫生间
14	注射后候诊室/抢救室卫生间西墙表面 30cm	0.305	驻留 5min×5 次×250 天	1/16	＜0.01	工作人员	淋浴间
15	注射后候诊室/抢救室卫生间北墙表面 30cm	0.237	驻留 10min	1	＜0.01	公众	室外道路
16	注射后候诊室/抢救室卫生间顶部表面 30cm	0.111	驻留 5min×5 次×250 天	1	0.01	公众	学术办公室
17	VIP 注射后候诊室东墙表面 30cm	0.172	留观 10min	1	＜0.01	公众（患者）	留观室
18	VIP 注射后候诊室南墙表面 30cm	0.094	驻留 10min	1	＜0.01	公众（患者）	控制区走廊
19	VIP 注射后候诊室南侧防护门表面 30cm	0.584	驻留 10min	1/5	＜0.01	公众（患者）	控制区走廊
20	VIP 注射后候诊室西墙表面 30cm	0.172	休息 40min	1	＜0.01	工作人员	注射后候诊室/抢救室
21	VIP 注射后候诊室顶部表面 30cm	0.111	休息 40min×5 次×250 天	1/16	0.01	公众	库房
22	VIP 注射后候诊室卫生间东墙表面 30cm	0.268	驻留 5min	1	＜0.01	公众（患者）	留观室卫生间
23	VIP 注射后候诊室西墙表面 30cm	0.268	驻留 5min	1	＜0.01	公众（患者）	注射后候诊室/抢救室卫生间
24	VIP 注射后候诊室北墙表面 30cm	0.237	驻留 10min	1	＜0.01	公众	室外道路
25	VIP 注射后候诊室顶部表面 30cm	0.111	驻留 5min×5 次×250 天	1	0.01	公众	护士站办公室
26	PET/MR 机房东墙表面 30cm	0.022	检查 40min×10 次×250 天	1/16	＜0.01	公众	设备间
27	PET/MR 机房南墙表面 30cm	0.046	驻留 10min	1	＜0.01	公众	走廊
28	PET/MR 机房西墙表面 30cm	0.019	检查 40min×10 次×250 天	1	0.03	工作人员	控制室
29	PET/MR 机房观察窗表面 30cm	0.182	检查 40min×10 次×250 天	1	0.30	工作人员	控制室
30	PET/MR 机房西侧防护门表面 30cm	0.161	检查 40min×10 次×250 天	1/5	0.05	工作人员	控制室
31	PET/MR 机房北墙表面 30cm	0.037	驻留 10min	1	＜0.01	公众（患者）	缓冲区
32	PET/MR 机房北侧防护门表面 30cm	0.377	驻留 10min	1/5	＜0.01	公众（患者）	控制区走廊
33	PET/MR 机房顶部表面 30cm	0.086	检查 40min×10 次×250 天	1/2	0.07	公众	检查室

34	摆位工作位	13.222	摆位 1min×10 次×250 天	1	0.55	工作人员	PET/MR 机房
35	留观室东墙表面 30cm	0.178	驻留 10min	1	＜0.01	公众	走廊
36	留观室南侧防护门表面 30cm	0.298	驻留 10min	1/5	＜0.01	公众（患者）	控制区走廊
37	留观室西墙表面 30cm	0.178	留观 10min	1	＜0.01	公众（患者）	VIP 注射后候诊室
38	留观室北侧防护门表面 30cm	0.298	驻留 10min	1/5	＜0.01	公众	室外道路
39	留观室顶部表面 30cm	0.104	留观 10min×10 次×250 天	1/16	＜0.01	公众	内镜库
40	留观室卫生间南墙表面 30cm	0.223	驻留 5min	1	＜0.01	公众（患者）	VIP 注射后候诊室
41	留观室卫生间西墙表面 30cm	0.447	驻留 5min	1	＜0.01	公众（患者）	VIP 注射后候诊室卫生间
42	留观室卫生间北墙表面 30cm	0.223	驻留 10min	1	＜0.01	公众	室外道路
43	留观室卫生间顶部表面 30cm	0.104	驻留 5min×10 次×250 天	1	0.02	公众	护士站办公室

根据表 11-4 估算结果，核素操作过程中人员受到的年有效剂量为＜0.01mSv，注射过程中人员受到的年有效剂量为 0.02mSv，摆位过程中人员受到的年有效剂量为 0.55mSv，扫描过程中受到的年有效剂量约为 0.30mSv。医院拟为新建 PET/MR 诊断项目安排 2 名护士（负责淋洗、分装及注射，轮岗）、2 名医师及 2 名技师（负责摆位和操作设备，轮岗）。医院拟合理安排各辐射工作人员工作量，根据理论估算可知，本项目 2 名护士平均年有效剂量为 0.01mSv，2 名医师及 2 名技师平均年有效剂量约为 0.43mSv，能够满足职业人员年有效剂量不超过 5mSv 的限值要求。

根据表 11-4 估算结果，新建 PET/MR 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 0.09mSv（位于注射后候诊室/抢救室上方），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剂量约束值要求（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

（二）新建放药实验室项目

本项目拟使用 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等 8 种放射性核素，开展小动物实验，主要污染因子为放射性核素在操作过程中产生的β、γ射线及β放射性表面污染。新建放药实验室项目拟使用的放射性核素的衰变类型及主要产生的射线种类见表 11-5。

表 11-5 新建放药实验室项目放射性核素衰变类型及主要产生的射线种类情况一览表

核素名称	衰变类型	主要产生的射线种类	估算外照射剂量时，主要考虑的射线种类
^{18}F、^{64}Cu、^{68}Ga	ε、β^+	β射线、β^+衰变经湮灭反应后产生的能量为 0.511MeV 的γ射线	γ射线
^{67}Ga、^{111}In	ε	γ射线	γ射线
^{99m}Tc	IT	γ射线	γ射线
^{131}I	β^-	β射线、γ射线	γ射线
^{90}Y	β^-	β射线	β射线及其所致韧致辐射

注：1、对于正电子核素，β^+衰变湮灭反应十分迅速，且γ射线辐射影响较β射线大，故主要考虑γ射线影响；

2、对于 ^{131}I 核素，产生的β射线所致韧致辐射平均能量小于γ射线平均能量，故主要考虑γ射线影响。

1、β射线及其所致韧致辐射影响分析

根据表 11-5，新建放药实验室项目主要考虑β射线及其所致韧致辐射影响的核素主要为 ^{90}Y 核素。本项目放射性核素 ^{90}Y 日最大操作量为 1.48E+08Bq，单只小动物最大注射量为 7.40E+07Bq。

（1）β射线辐射影响分析

本项目 ^{90}Y 核素衰变发出的β射线能量约为 2.284MeV，其在低 Z 物质中的射程 R 可采用公式 11-1、公式 11-2 进行计算，预测结果见表 11-6。

表 11-6 β射线在不同材料中的射程

核素名称	E（MeV）	R（g/cm^2）	材料	ρ（g/cm^3）	d（cm）
^{90}Y	2.284	1.10	有机玻璃	1.18	0.930
			铅	11.34	0.097
			实心砖	1.65	0.665
			普通玻璃	2.5	0.439
			水	1	1.10
			空气	0.001293	849

由表 11-6 可知，本项目 ^{90}Y 核素衰变发出的β射线在空气中的射程为 849cm，在未屏蔽情况下对周围环境影响较大，通常使用有机玻璃对其进行屏蔽。本项目 ^{90}Y 药物为外购的标记好的药物，其分装操作在 50mmPb 手套箱内进行，给药后动物的留观、

解剖均在有足够厚度的实体屏蔽的房间内进行，且周围公众与放射性核素之前还采取了距离隔离措施，可有效降低β射线的影响。

（2）β射线所致韧致辐射影响分析

β射线与物质相互作用会产生韧致辐射，在进行韧致辐射环境影响预测时，可采用《辐射防护导论》中的公式（4.20）、公式（4.21）进行计算：

$$\dot{D} = 4.58 \times 10^{-14} A \cdot Z_e \cdot \left(\frac{E_b}{r}\right)^2 \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) \qquad \text{公式 11-4}$$

式中：$\dot{D}$—屏蔽层中由β粒子产生的韧致辐射在 r（m）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，由《辐射防护导论》表 4.4 查得；

E_b—韧致辐射的平均能量，MeV，根据《辐射防护导论》“韧致辐射具有连续能谱。在实际屏蔽计算时，可以假定韧致辐射的评价能量 E_b 是入射β粒子的最大能量的 1/3，即$E_b \approx E_{max}/3$”；

r—放射源到考察点的距离，m；

μ_{en}/ρ—平均能量为 E_b 的韧致辐射在屏蔽材料中的质量能量吸收系数，$m^2 \cdot kg^{-1}$，其值可由《辐射防护导论》附表 1 查得。

$$\dot{H}_I = 10^6 \cdot \dot{D} \cdot q \cdot \eta \qquad \text{公式 11-5}$$

式中：$\dot{H}_I$—β射线在屏蔽材料中产生的韧致辐射在 r（m）处剂量当量率，μSv/h；

10^6—单位转换系数；

q—β粒子的品质因子，取 1；

η—透射比，与衰减倍数 K 互为倒数。

在进行韧致辐射预测时做以下保守假设：^{90}Y 在手套箱内操作时，放射源与参考点之间的β射线屏蔽材料取空气，药物注射入小动物体内后，放射源至参考点之间的屏蔽材料取水。参考点位置见图 11-2，β射线所致韧致辐射防护计算参数及预测结果见表 11-7。

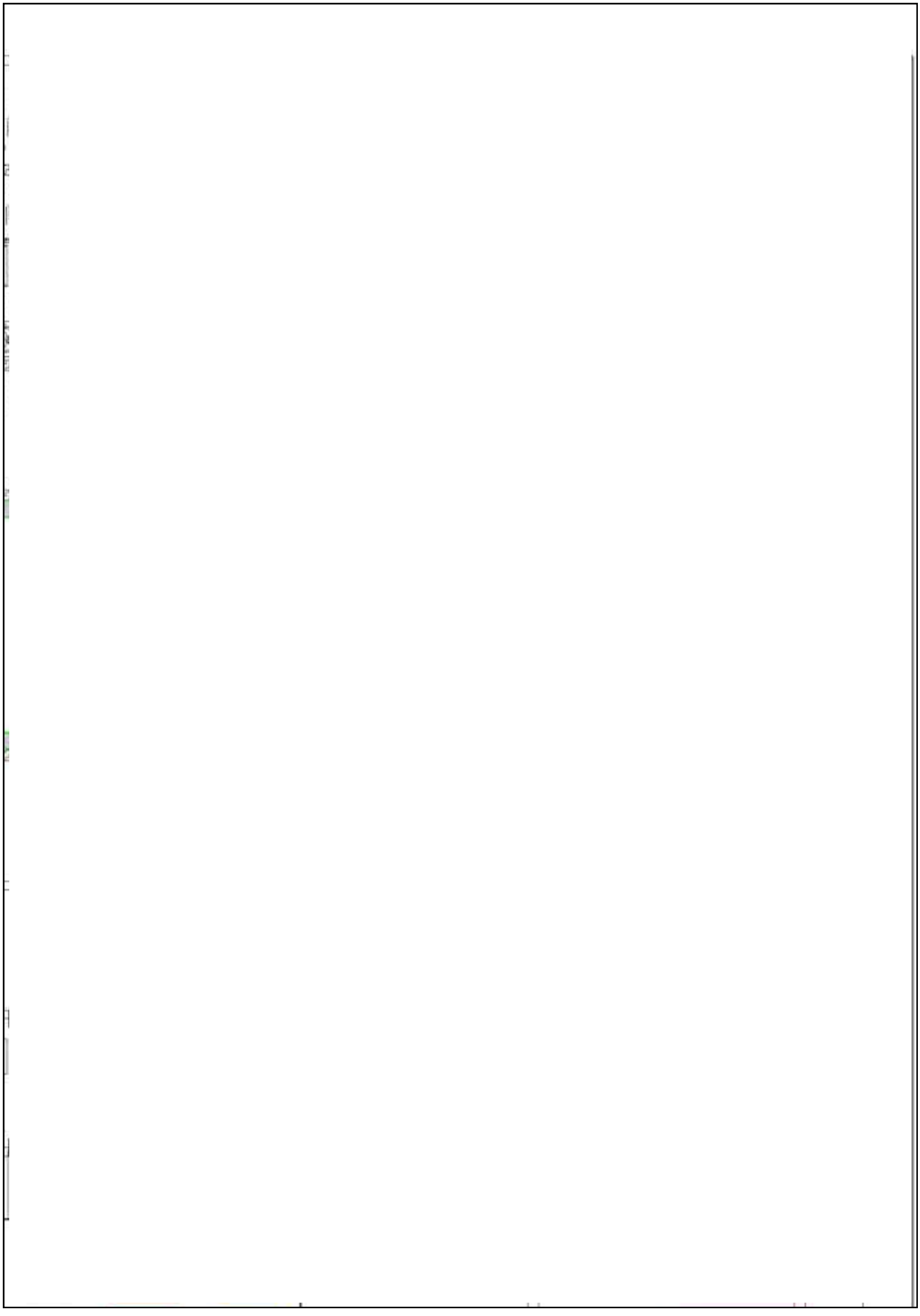


图 11-2 新建放药实验室项目估算点位示意图

表 11-7 韧致辐射在考察点处空气中的吸收剂量率计算参数及结果

点位	参考点位置	源强（Bq）	与源的距离（m）	屏蔽材料及厚度*	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）	控制目标值（μSv/h）	备注
1	手套箱人员操作位	1.48E+08	0.5	50mmPb	0.012	0.004	2.5	手套箱为50mmPb
2	高活室东墙表面30cm	1.48E+08	2.9	50mmPb+240mm 实心砖	0.003	3.40E-05	2.5	/
3	高活室南墙表面30cm	1.48E+08	1.4	50mmPb+240mm 实心砖	0.003	1.46E-04	2.5	/
4	高活室西墙表面30cm	1.48E+08	1.4	50mmPb+240mm 实心砖	0.003	1.46E-04	2.5	/
5	高活室北墙表面30cm	1.48E+08	2.5	50mmPb+240mm 实心砖	0.003	4.57E-05	2.5	/
6	高活室北侧防护门表面 30cm	1.48E+08	2.0	50mmPb+8 mmPb	0.007	1.39E-04	2.5	/
7	高活室顶部表面30cm	1.48E+08	3.1	50mmPb+空心预制板+20mmPb	0.002	2.10E-05	2.5	/
8	药物转运位	1.48E+08	0.5	10mmPb	0.455	0.152	/	铅罐为10mmPb
9	注射位	7.40E+07	0.5	10mmPb	0.455	0.069	/	注射窗为10mmPb
10	动物实验室东墙表面 30cm	7.40E+07	3.0	240mm 实心砖	0.282	0.001	2.5	/
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	7.40E+07	3.8	2mmPb	0.990	0.003	2.5	/
12	动物实验室南墙表面 30cm	7.40E+07	3.4	240mm 实心砖	0.282	9.23E-04	2.5	/
13	动物实验室西墙表面 30cm	7.40E+07	3.0	240mm 实心砖	0.282	0.001	2.5	/
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	7.40E+07	3.5	2mmPb	0.990	0.003	2.5	/
15	动物实验室北墙表面 30cm	7.40E+07	3.4	240mm 实心砖	0.282	9.23E-04	2.5	/
16	动物实验室顶部表面 30cm	7.40E+07	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板	0.645	0.003	2.5	/
17	饲养位	1.48E+08	0.5	10mmPb	0.455	0.138	/	铅屏风为10mmPb
10	动物实验室东墙表面 30cm	1.48E+08	4.4	240mm 实心砖+10mmPb	0.128	5.01E-04	2.5	/
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	1.48E+08	4.5	2mmPb+10 mmPb	0.450	0.002	2.5	/
12	动物实验室南墙表面 30cm	1.48E+08	3.3	240mm 实心砖+10mmPb	0.128	8.91E-04	2.5	/
13	动物实验室西墙表面 30cm	1.48E+08	1.6	240mm 实心砖+10mmPb	0.128	0.004	2.5	/

14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	1.48E+08	3.9	2mmPb+10 mmPb	0.450	0.002	2.5	/
15	动物实验室北墙表面 30cm	1.48E+08	4.3	240mm 实心砖+10mmPb	0.128	5.25E-04	2.5	/
16	动物实验室顶部表面 30cm	1.48E+08	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板 +10mmPb	0.293	0.002	2.5	/
18	带药动物转运位	7.40E+07	0.5	0.5mmPb	1.000	0.152	/	铅橡胶衣为 0.5mmPb
19	解剖位	7.40E+07	0.5	10mmPb	0.455	0.069	/	防护屏为 10mmPb
20	放化实验室东墙表面 30cm	7.40E+07	3.0	240mm 实心砖	0.282	0.001	2.5	/
21	放化实验室南墙表面 30cm	7.40E+07	1.9	240mm 实心砖	0.282	0.003	2.5	/
22	放化实验室西墙表面 30cm	7.40E+07	3.0	240mm 实心砖	0.282	0.001	2.5	/
23	放化实验室西侧防护门表面 30cm	7.40E+07	3.4	2mmPb	0.990	0.003	2.5	/
24	放化实验室北墙表面 30cm	7.40E+07	1.9	240mm 实心砖	0.282	0.003	2.5	/
25	放化实验室顶部表面 30cm	7.40E+07	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板	0.645	0.003	2.5	/

注：根据《辐射防护导论》附表 9 和附表 11，由内插法和外推法可得，0.5mm 铅对应的衰减倍数为 1.00；2mm 铅对应的衰减倍数为 1.01；6mm 铅对应的衰减倍数为 1.55；8mm 铅对应的衰减倍数为 1.82；8mm 铅对应的衰减倍数为 1.82；10mm 铅对应的衰减倍数为 2.20；20mm 铅对应的衰减倍数为 5.03；50mm 铅对应的衰减倍数为 82.5；保守由密度换算，240mm 实心砖约为 168mm 砼，对应的衰减倍数为 3.55。

由表 11-7 的理论估算结果可以看出，由于有 50mm 铅当量手套箱屏蔽，^{90}Y 药物取药、分装过程中对辐射工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。^{90}Y 药物在操作过程中及小动物在留观、解剖过程中对高活室、动物实验室及放化实验室外的环境影响较小，高活室、动物实验室及放化实验室的防护设计均能够满足 ^{90}Y 核素的辐射防护要求。

2、γ射线辐射影响分析

根据表 11-5，新建放药实验室项目主要考虑γ射线辐射影响的核素主要为 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I 共 7 种核素。根据各核素的用量，本项目选取射线能量和周围剂量当量率常数相对较大、使用频率较高的核素 ^{18}F、^{131}I 进行计算。本项目放射性核素 ^{18}F 日最大操作量为 3.70E+07Bq，单只小动物最大注射量为 7.40E+06Bq；放射性核素 ^{131}I 日最大操作量为 7.40E+07Bq，单只小动物最大注射量为

3.70E+07Bq。

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、^{131}I 什值层见表 11-8。

表 11-8 常用核素屏蔽材料十分之一值层厚度（TVL）

核素	铅（11.3g/cm³）	砖（1.65g/cm³）	混凝土（2.35g/cm³）
^{18}F	16.6mm	263mm	176mm
^{131}I	11mm	240mm	170mm

根据工程分析可知，新建放药实验室项目辐射影响主要包括药物标记、分装（含质控的活度测量过程）、注射、解剖等过程，主要对本项目辐射工作人员及室外公众产生外照射辐射影响，根据公式 11-3 可估算出新建放药实验室项目周围各参考点处的辐射水平，各参考点位置见图 11-2，预测结果见表 11-9 至表 11-10。

表 11-9 新建放药实验室项目工作场所辐射水平估算结果（^{18}F）

点位	参考点位置	源强（Bq）	与源的距离（m）	屏蔽材料及厚度*	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）	控制目标值（μSv/h）	备注
1	手套箱人员操作位	3.70E+07	0.5	50mmPb	9.73E-04	0.021	2.5	手套箱为50mmPb
2	高活室东墙表面30cm	3.70E+07	2.9	50mmPb+240mm 实心砖	1.19E-04	7.48E-05	2.5	/
3	高活室南墙表面30cm	3.70E+07	1.4	50mmPb+240mm 实心砖	1.19E-04	3.21E-04	2.5	/
4	高活室西墙表面30cm	3.70E+07	1.4	50mmPb+240mm 实心砖	1.19E-04	3.21E-04	2.5	/
5	高活室北墙表面30cm	3.70E+07	2.5	50mmPb+240mm 实心砖	1.19E-04	1.01E-04	2.5	/
6	高活室北侧防护门表面 30cm	3.70E+07	2.0	50mmPb+8mmPb	3.21E-04	4.24E-04	2.5	/
7	高活室顶部表面30cm	3.70E+07	3.1	50mmPb+空心预制板+20mmPb	6.07E-05	3.34E-05	2.5	/
8	药物转运位	3.70E+07	0.5	10mmPb	0.250	5.287	/	铅罐为10mmPb
9	注射位	7.40E+06	0.5	10mmPb	0.250	1.057	/	注射窗为10mmPb
10	动物实验室东墙表面 30cm	7.40E+06	3.0	240mm 实心砖	0.122	0.014	2.5	/
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	7.40E+06	3.8	2mmPb	0.758	0.056	2.5	/
12	动物实验室南墙表面 30cm	7.40E+06	3.4	240mm 实心砖	0.122	0.011	2.5	/

13	动物实验室西墙表面 30cm	7.40E+06	3.0	240mm 实心砖	0.122	0.014	2.5	/
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	7.40E+06	3.5	2mmPb	0.758	0.065	2.5	/
15	动物实验室北墙表面 30cm	7.40E+06	3.4	240mm 实心砖	0.122	0.011	2.5	/
16	动物实验室顶部表面 30cm	7.40E+06	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板	0.435	0.048	2.5	/
17	饲养位	3.70E+07	0.5	10mmPb	0.250	5.287	/	铅屏风为 10mmPb
10	动物实验室东墙表面 30cm	3.70E+07	4.4	240mm 实心砖+10mmPb	0.031	0.008	2.5	/
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	3.70E+07	4.5	2mmPb+10mmPb	0.189	0.049	2.5	/
12	动物实验室南墙表面 30cm	3.70E+07	3.3	240mm 实心砖+10mmPb	0.031	0.015	2.5	/
13	动物实验室西墙表面 30cm	3.70E+07	1.6	240mm 实心砖+10mmPb	0.031	0.063	2.5	/
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	3.70E+07	3.9	2mmPb+10mmPb	0.189	0.066	2.5	/
15	动物实验室北墙表面 30cm	3.70E+07	4.3	240mm 实心砖+10mmPb	0.031	0.009	2.5	/
16	动物实验室顶部表面 30cm	3.70E+07	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板+10mmPb	0.109	0.060	2.5	/
18	带药动物转运位	7.40E+06	0.5	0.5mmPb	0.933	3.949	/	铅橡胶衣为 0.5mmPb
19	解剖位	7.40E+06	0.5	10mmPb	0.250	1.057	/	防护屏为 10mmPb
20	放化实验室东墙表面 30cm	7.40E+06	3.0	240mm 实心砖	0.122	0.014	2.5	/
21	放化实验室南墙表面 30cm	7.40E+06	1.9	240mm 实心砖	0.122	0.036	2.5	/
22	放化实验室西墙表面 30cm	7.40E+06	3.0	240mm 实心砖	0.122	0.014	2.5	/
23	放化实验室西侧防护门表面 30cm	7.40E+06	3.4	2mmPb	0.758	0.069	2.5	/
24	放化实验室北墙表面 30cm	7.40E+06	1.9	240mm 实心砖	0.122	0.036	2.5	/
25	放化实验室顶部表面 30cm	7.40E+06	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板	1.000	0.110	2.5	/

注：铅密度为 11.3g/cm^3，实心砖密度为 1.65g/cm^3。

表 11-10 新建放药实验室项目工作场所辐射水平估算结果（^{131}I）

点位	参考点位置	源强（Bq）	与源的距离（m）	屏蔽材料及厚度*	透射比	参考点辐射水平（μSv/h）	控制目标值（μSv/h）	备注
1	手套箱人员操作位	7.40E+07	0.5	50mmPb	2.85E-05	0.001	2.5	手套箱为50mmPb
2	高活室东墙表面30cm	7.40E+07	2.9	50mmPb+240mm 实心砖	2.85E-06	1.49E-06	2.5	/
3	高活室南墙表面30cm	7.40E+07	1.4	50mmPb+240mm 实心砖	2.85E-06	6.40E-06	2.5	/
4	高活室西墙表面30cm	7.40E+07	1.4	50mmPb+240mm 实心砖	2.85E-06	6.40E-06	2.5	/
5	高活室北墙表面30cm	7.40E+07	2.5	50mmPb+240mm 实心砖	2.85E-06	2.01E-06	2.5	/
6	高活室北侧防护门表面 30cm	7.40E+07	2.0	50mmPb+8mmPb	5.34E-06	5.87E-06	2.5	/
7	高活室顶部表面30cm	7.40E+07	3.1	50mmPb+空心预制板+20mmPb	4.33E-07	1.98E-07	2.5	/
8	药物转运位	7.40E+07	0.5	10mmPb	0.123	2.171	/	铅罐为10mmPb
9	注射位	3.70E+07	0.5	10mmPb	0.123	1.086	/	注射窗为10mmPb
10	动物实验室东墙表面 30cm	3.70E+07	3.0	240mm 实心砖	0.100	0.024	2.5	/
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	3.70E+07	3.8	2mmPb	0.658	0.100	2.5	/
12	动物实验室南墙表面 30cm	3.70E+07	3.4	240mm 实心砖	0.100	0.019	2.5	/
13	动物实验室西墙表面 30cm	3.70E+07	3.0	240mm 实心砖	0.100	0.024	2.5	/
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	3.70E+07	3.5	2mmPb	0.658	0.118	2.5	/
15	动物实验室北墙表面 30cm	3.70E+07	3.4	240mm 实心砖	0.100	0.019	2.5	/
16	动物实验室顶部表面 30cm	3.70E+07	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板	0.285	0.065	2.5	/
17	饲养位	7.40E+07	0.5	10mmPb	0.123	2.171	/	铅屏风为10mmPb
10	动物实验室东墙表面 30cm	7.40E+07	4.4	240mm 实心砖+10mmPb	0.012	0.003	2.5	/
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	7.40E+07	4.5	2mmPb+10mmPb	0.081	0.018	2.5	/
12	动物实验室南墙表面 30cm	7.40E+07	3.3	240mm 实心砖+10mmPb	0.012	0.005	2.5	/
13	动物实验室西墙表面 30cm	7.40E+07	1.6	240mm 实心砖+10mmPb	0.012	0.021	2.5	/

14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	7.40E+07	3.9	2mmPb+10mmPb	0.081	0.023	2.5	/
15	动物实验室北墙表面 30cm	7.40E+07	4.3	240mm 实心砖+10mmPb	0.012	0.003	2.5	/
16	动物实验室顶部表面 30cm	7.40E+07	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板+10mmPb	0.035	0.016	2.5	/
18	带药动物转运位	3.70E+07	0.5	0.5mmPb	0.901	7.931	/	铅橡胶衣为 0.5mmPb
19	解剖位	3.70E+07	0.5	10mmPb	0.123	1.086	/	防护屏为 10mmPb
20	放化实验室东墙表面 30cm	3.70E+07	3.0	240mm 实心砖	0.100	0.024	2.5	/
21	放化实验室南墙表面 30cm	3.70E+07	1.9	240mm 实心砖	0.100	0.061	2.5	/
22	放化实验室西墙表面 30cm	3.70E+07	3.0	240mm 实心砖	0.100	0.024	2.5	/
23	放化实验室西侧防护门表面 30cm	3.70E+07	3.4	2mmPb	0.658	0.125	2.5	/
24	放化实验室北墙表面 30cm	3.70E+07	1.9	240mm 实心砖	0.100	0.061	2.5	/
25	放化实验室顶部表面 30cm	3.70E+07	3.1	空心预制板+6mmPb 复合板	0.285	0.065	2.5	/

注：铅密度为 11.3g/cm^3，实心砖密度为 1.65g/cm^3。

由表 11-7、表 11-9、表 11-10 的理论估算结果可以看出，由于有 50mm 铅当量手套箱屏蔽，放射性药物取药、分装、标记过程中对辐射工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，药物针剂外设有铅套。放射性药物转运过程中、带药动物留观饲养过程中及转运过程中，由于放射性核素活度较大且辐射工作人员与核素距离较近，辐射工作人员受到的辐射影响较大，辐射工作人员应根据实际情况，熟练操作技能、缩短近距离接触放射性核素的时间并正确使用个人防护用品，以降低其受到的辐射影响。放射性药物在操作过程中及带药动物在留观过程中对高活室、动物实验室及放化实验室外的环境影响较小，高活室、动物实验室及放化实验室的防护设计均能够满足放射性核素的辐射防护要求。

3、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，为了使新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所的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、操作放射性核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）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，医院应暂停开展相关实验，去污染经监测符合标准后方可重新开展实验，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）。

4、周围公众及辐射工作人员年有效剂量估算

新建放药实验室项目运行过程中，工作人员主要受照射环节为标记、分装、注射过程及动物留观、解剖过程。一般情况下，标记、分装过程约 2 分钟，送至动物实验室约 2 分钟，注射过程约 1 分钟，留观过程保守按 24h，动物尸体转运至放化实验室约 1 分钟，解剖检测过程约 5 分钟。本项目每次实验只使用 1 种放射性核素，每种核素每年最多开展 20 次实验，故年最大实验次数为 160 次，单次实验最多使用 2~5 只小动物。根据表 11-7、表 11-9、表 11-10 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辐射工作人员及公众的年受照剂量，见表 11-11 至表 11-13。

表 11-11 新建放药实验室项目工作场所辐射工作人员及公众年有效剂量估算（^{90}Y）

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	位置
1	手套箱人员操作位	0.004	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	高活室
2	高活室东墙表面 30cm	3.40E-05	操作 2min×2 只×20 次	1/16	＜0.01	公众	室外道路
3	高活室南墙表面 30cm	1.46E-04	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	无菌室

4	高活室西墙表面 30cm	1.46E-04	操作 2min×2 只×20 次	1/5	＜0.01	工作人员	室内走廊
5	高活室北墙表面 30cm	4.57E-05	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	准备间
6	高活室北侧防护门表面 30cm	1.39E-04	操作 2min×2 只×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	净化走廊
7	高活室顶部表面 30cm	2.10E-05	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室
8	药物转运位	0.152	转运 2min×20 次	1	＜0.01	工作人员	室内走廊
9	注射位	0.069	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	动物实验室
10	动物实验室东墙表面 30cm	0.001	注射 1min×2 只×20 次	1/16	＜0.01	公众	室外道路
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	0.003	注射 1min×2 只×20 次	/	/	/	动物尸体暂存间
12	动物实验室南墙表面 30cm	0.001	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	MRI 控制室
13	动物实验室西墙表面 30cm	0.001	注射 1min×2 只×20 次	1/16	＜0.01	公众	净化机房
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	0.003	注射 1min×2 只×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	一更
15	动物实验室北墙表面 30cm	0.001	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室
16	动物实验室顶部表面 30cm	0.003	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室
17	饲养位	0.138	喂食 2min×20 次	1	＜0.01	工作人员	动物实验室
10	动物实验室东墙表面 30cm	0.001	留观 24h×20 次	1/16	＜0.01	公众	室外道路
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	0.002	留观 24h×20 次	/	/	/	动物尸体暂存间
12	动物实验室南墙表面 30cm	0.001	工作 8h×20 次	1	＜0.01	公众	MRI 控制室
13	动物实验室西墙表面 30cm	0.004	工作 8h×20 次	1/16	＜0.01	公众	净化机房
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	0.002	工作 8h×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	一更
15	动物实验室北墙表面 30cm	0.001	工作 8h×20 次	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室
16	动物实验室顶部表面 30cm	0.002	工作 8h×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室
18	带药动物转运位	0.152	转运 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	室内走廊
19	解剖位	0.069	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	动物实验室

20	放化实验室东墙表面 30cm	0.001	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	室外道路
21	放化实验室南墙表面 30cm	0.003	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室
22	放化实验室西墙表面 30cm	0.001	解剖 5min×2 只×20 次	1/5	＜0.01	工作人员	室内走廊
23	放化实验室西侧防护门表面 30cm	0.003	解剖 5min×2 只×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	室内走廊
24	放化实验室北墙表面 30cm	0.003	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	无菌室
25	放化实验室顶部表面 30cm	0.003	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室

表 11-12 新建放药实验室项目工作场所辐射工作人员及公众年有效剂量估算（^{18}F）

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	位置
1	手套箱人员操作位	0.021	操作 2min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	工作人员	高活室
2	高活室东墙表面 30cm	7.48E-05	操作 2min×5 只×20 次×6 种	1/16	＜0.01	公众	室外道路
3	高活室南墙表面 30cm	3.21E-04	操作 2min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	工作人员	无菌室
4	高活室西墙表面 30cm	3.21E-04	操作 2min×5 只×20 次×6 种	1/5	＜0.01	工作人员	室内走廊
5	高活室北墙表面 30cm	1.01E-04	操作 2min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	工作人员	准备间
6	高活室北侧防护门表面 30cm	4.24E-04	操作 2min×5 只×20 次×6 种	1/8	＜0.01	工作人员	净化走廊
7	高活室顶部表面 30cm	3.34E-05	操作 2min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	公众	常规检查室
8	药物转运位	5.287	转运 2min×20 次×6 种	1	0.02	工作人员	室内走廊
9	注射位	1.057	注射 1min×5 只×20 次×6 种	1	0.01	工作人员	动物实验室
10	动物实验室东墙表面 30cm	0.014	注射 1min×5 只×20 次×6 种	1/16	＜0.01	公众	室外道路
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	0.056	注射 1min×5 只×20 次×6 种	/	/	/	动物尸体暂存间
12	动物实验室南墙表面 30cm	0.011	注射 1min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	公众	MRI 控制室
13	动物实验室西墙表面 30cm	0.014	注射 1min×5 只×20 次×6 种	1/16	＜0.01	公众	净化机房
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	0.065	注射 1min×5 只×20 次×6 种	1/8	＜0.01	工作人员	一更
15	动物实验室北墙表面 30cm	0.011	注射 1min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室

16	动物实验室顶部表面 30cm	0.048	注射 1min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	公众	常规检查室
17	饲养位	5.287	喂食 2min×20 次×6 种	1	0.02	工作人员	动物实验室
10	动物实验室东墙表面 30cm	0.008	留观 24h×20 次×6 种	1/16	＜0.01	公众	室外道路
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	0.049	留观 24h×20 次×6 种	/	/	/	动物尸体暂存间
12	动物实验室南墙表面 30cm	0.015	工作 8h×20 次×6 种	1	0.01	公众	MRI 控制室
13	动物实验室西墙表面 30cm	0.063	工作 8h×20 次×6 种	1/16	＜0.01	公众	净化机房
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	0.066	工作 8h×20 次×6 种	1/8	0.01	工作人员	一更
15	动物实验室北墙表面 30cm	0.009	工作 8h×20 次×6 种	1	0.01	工作人员	阳性对照实验室
16	动物实验室顶部表面 30cm	0.060	工作 8h×20 次×6 种	1	0.06	公众	常规检查室
18	带药动物转运位	3.949	转运 1min×5 只×20 次×6 种	1	0.04	工作人员	室内走廊
19	解剖位	1.057	解剖 5min×5 只×20 次×6 种	1	0.05	工作人员	动物实验室
20	放化实验室东墙表面 30cm	0.014	解剖 5min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	公众	室外道路
21	放化实验室南墙表面 30cm	0.036	解剖 5min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室
22	放化实验室西墙表面 30cm	0.014	解剖 5min×5 只×20 次×6 种	1/5	＜0.01	工作人员	室内走廊
23	放化实验室西侧防护门表面 30cm	0.069	解剖 5min×5 只×20 次×6 种	1/8	＜0.01	工作人员	室内走廊
24	放化实验室北墙表面 30cm	0.036	解剖 5min×5 只×20 次×6 种	1	＜0.01	工作人员	无菌室
25	放化实验室顶部表面 30cm	0.110	解剖 5min×5 只×20 次×6 种	1	0.01	公众	常规检查室

表 11-13 新建放药实验室项目工作场所辐射工作人员及公众年有效剂量估算（^{131}I）

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	位置
1	手套箱人员操作位	0.001	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	高活室
2	高活室东墙表面 30cm	1.49E-06	操作 2min×2 只×20 次	1/16	＜0.01	公众	室外道路
3	高活室南墙表面 30cm	6.40E-06	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	无菌室
4	高活室西墙表面 30cm	6.40E-06	操作 2min×2 只×20 次	1/5	＜0.01	工作人员	室内走廊

5	高活室北墙表面30cm	2.01E-06	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	准备间
6	高活室北侧防护门表面 30cm	5.87E-06	操作 2min×2 只×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	净化走廊
7	高活室顶部表面30cm	1.98E-07	操作 2min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室
8	药物转运位	2.171	转运 2min×20 次	1	＜0.01	工作人员	室内走廊
9	注射位	1.086	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	动物实验室
10	动物实验室东墙表面 30cm	0.024	注射 1min×2 只×20 次	1/16	＜0.01	公众	室外道路
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	0.100	注射 1min×2 只×20 次	/	/	/	动物尸体暂存间
12	动物实验室南墙表面 30cm	0.019	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	MRI 控制室
13	动物实验室西墙表面 30cm	0.024	注射 1min×2 只×20 次	1/16	＜0.01	公众	净化机房
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	0.118	注射 1min×2 只×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	一更
15	动物实验室北墙表面 30cm	0.019	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室
16	动物实验室顶部表面 30cm	0.065	注射 1min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室
17	饲养位	2.171	喂食 2min×20 次	1	＜0.01	工作人员	动物实验室
10	动物实验室东墙表面 30cm	0.003	留观 24h×20 次	1/16	＜0.01	公众	室外道路
11	动物实验室南侧防护门表面 30cm	0.018	留观 24h×20 次	/	/	/	动物尸体暂存间
12	动物实验室南墙表面 30cm	0.005	工作 8h×20 次	1	＜0.01	公众	MRI 控制室
13	动物实验室西墙表面 30cm	0.021	工作 8h×20 次	1/16	＜0.01	公众	净化机房
14	动物实验室北侧防护门表面 30cm	0.023	工作 8h×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	一更
15	动物实验室北墙表面 30cm	0.003	工作 8h×20 次	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室
16	动物实验室顶部表面 30cm	0.016	工作 8h×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室
18	带药动物转运位	7.931	转运 1min×2 只×20 次	1	0.01	工作人员	室内走廊
19	解剖位	1.086	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	动物实验室
20	放化实验室东墙表面 30cm	0.024	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	室外道路

21	放化实验室南墙表面 30cm	0.061	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	阳性对照实验室
22	放化实验室西墙表面 30cm	0.024	解剖 5min×2 只×20 次	1/5	＜0.01	工作人员	室内走廊
23	放化实验室西侧防护门表面 30cm	0.125	解剖 5min×2 只×20 次	1/8	＜0.01	工作人员	室内走廊
24	放化实验室北墙表面 30cm	0.061	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	工作人员	无菌室
25	放化实验室顶部表面 30cm	0.065	解剖 5min×2 只×20 次	1	＜0.01	公众	常规检查室

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目使用的 ^{68}Ga 核素由医院采购 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器在高活室手套箱内自行淋洗产生，^{68}Ga 核素采用全自动标记，辐射工作人员只需将 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器连接反应模块，淋洗液可自动传输至手套箱内的自动化反应模块中，采用计算机全自动控制，无需人员近距离操作。在使用时，操作人员仅需完成插瓶、取瓶等步骤，近距离接触时间约 2min，年受照时间约 500min（2min×1 次/d×250d）。根据医院提供的资料，^{68}Ge-^{68}Ga 发生器在使用过程中，发生器表面剂量率约 12μSv/（h·GBq），本项目 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器最大规格为 50mCi/柱，则 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器表面剂量率约为 22.2μSv/h，手套箱为 50mmPb，操作时辐射工作人员与 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器的距离取 0.5m，则辐射工作人员插瓶、取瓶时所受年有效剂量＜0.01mSv。新建 PET/MR 诊断项目所需的 ^{68}Ga 放射性药物（40mCi~50mCi）放置于 50mmPb 的铅罐内，由放药实验室辐射工作人员经 6 号楼（裙楼）北侧门送出，按预定时间送至 PET/MR 诊断项目工作场所高活室，送药时辐射工作人员与药物的距离取 0.5m，近距离接触时间约 2min，年受照时间约 500min（2min×1 次/d×250d），则辐射工作人员送药时所受年有效剂量约为 0.01mSv。

根据表 11-11 至表 11-13 估算结果，如果各环节工作均由 1 人完成，标记、分装过程中人员受到的年有效剂量＜0.01mSv（＜0.01mSv+＜0.01mSv+＜0.01mSv），药物转运过程中人员受到的年有效剂量为 0.02mSv（＜0.01mSv+0.02mSv+＜0.01mSv），注射过程中人员受到的年有效剂量为 0.01mSv（＜0.01mSv+0.01mSv+＜0.01mSv），留观过程中受到的年有效剂量约为 0.02mSv（＜0.01mSv+0.02mSv+＜0.01mSv），带药动物转运过程中人员受到的年有效剂量为 0.05mSv（＜0.01mSv+0.04mSv+0.01mSv），解剖过程中人员受到的年有效剂量为 0.05mSv（＜0.01mSv+0.05mSv+＜0.01mSv），^{68}Ga 药物制备和送药过程中人员受到的年有效剂量

为 0.01mSv（＜0.01mSv+0.01mSv）。东南大学附属中大医院拟为本项目安排 2 名辐射工作人员共同负责放药实验室项目工作，医院拟合理安排各辐射工作人员工作量，假设该项目辐射工作人员平分工作量，根据理论估算可知，本项目 2 名辐射工作人员平均年有效剂量为 0.08mSv，能够满足职业人员年有效剂量不超过 5mSv 的限值要求。

根据表 11-11 至表 11-13 估算结果，放药实验室项目工作过程中，周围公众（控制区、监督区外）年有效剂量最大为 0.07mSv（位于动物实验室上方），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剂量约束值要求（公众年有效剂量不超过 0.1mSv）。

（三）保护目标年有效剂量估算

新建PET/MR诊断和放药实验室项目周围50m范围内环境保护目标除本项目辐射工作人员外，主要为院内医护、患者等其他公众和院外丁家桥小区处其他公众等。考虑距离对射线的衰减作用，本项目周围 50m 评价范围内院外敏感目标处辐射剂量率及公众年受照剂量见表 11-14。

表 11-14 项目周围 50m 评价范围内敏感目标处辐射剂量率及公众年有效剂量

环境保护目标	计算模式	距离 R（m）	X（cm）	剂量率估算值（μSv/h）	参考点处受放射性核素影响的时间	居留因子 T	年有效剂量（mSv/a）
丁家桥小区	同新建 PET/MR 诊断项目点位 26	19+22	240mm 实心砖+8mmPb 复合板	3.17E-04	检查 40min×10 次×250 天	1	＜0.01
	同新建放药实验室项目点位 10	7.6+22	240mm 实心砖+10mmPb	1.85E-04	留观 24h×20 次×8 种	1	＜0.01

根据表 11-14 估算结果，项目周围 50m 评价范围内院外敏感目标处公众由于辐射影响的距离平方反比衰减规律以及墙体、楼体结构的屏蔽作用，其最大年附加剂量不超过 0.01mSv，因此本项目周围保护目标的年有效剂量能够满足 0.1mSv 的剂量限值要求。

二、放射性“三废”影响分析

（一）放射性废气

在进行液态放射性药物活度操作过程中，若放射性药物液面处于开放状态，空气中可能挥发微量放射性同位素，污染途径为放射性药物在空气中挥发散逸造成人员吸入的内照射。本项目新建 PET/MR 诊断项目工作场所高活室内设有 1 个防护铅当量为

40mmPb 的手套箱、新建放药实验室项目工作场所高活室内设有 3 个防护铅当量为 50mmPb 的手套箱，本项目核素操作均在手套箱中进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（设计通风速率不少于 0.5m/s，排放口高于本建筑屋脊），满足《核医学放射防护要求》（GBZ 120-2020）中“排气口应高于本建筑物屋顶”的要求，能够有效防止放射性废气对周围环境产生的影响，符合放射性工作场所相关要求。同时医院拟在手套箱管道内及 6 号楼屋顶排放口处设置活性炭过滤吸附装置，对放射性气溶胶进行吸附，降低放射性气溶胶外排浓度，吸附材料应定期更换（一年更换 1~2 次）并作为放射性固体废物处理。本项目 2 个非密封放射性物质工作场所分别设置有新风系统及独立的排风系统，工作场所的气流流向遵循自清洁区向监督区再向控制区的方向设计，能够有效防止放射性气体及气溶胶对工作场所造成交叉污染。

（二）放射性废液

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目产生的放射性废液主要包括：残留的微量放射性试剂；体内含有放射性核素的患者排泄物等；体内含有放射性核素的实验小动物的血液、排泄物等，工作场所的清洗废水。

新建 PET/MR 诊断项目高活室、给药后患者专用卫生间等高活区的放射性废液，含有 ^{18}F、^{68}Ga 等放射性核素；新建放药实验室项目因泼洒和用药活度估算不准确产生的残留微量放射性试剂较少，可采用滤纸或药棉进行擦拭；少部分小动物排泄物排入笼底木屑，笼底采用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，确保其β表面污染＜40Bq/cm^2；解剖过程产生的小动物血液，也采用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭。新建放药实验室项目将部分放射性废液转移至放射性固体废物中，每次实验结束后收集作为放射性固体废物处理。新建放药实验室项目产生的放射性废液主要为工作场所的清洗废水，含有 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等放射性核素，由独立下水管道统一集中到 6 号楼西侧地埋式衰变系统中，衰变超过 180 天、经检测合格后，排放至医院污水处理系统作为医疗废水处理。

新建 PET/MR 诊断项目 ^{18}F 日门诊量最大为 7 人次、^{68}Ga 日门诊量最大为 3 人次，放射性废液产生量按 10L/人次计算，工作场所每天的清洗废水约为 100L；新建放药实验室项目工作场所每天的清洗废水约为 100L，则本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目放射性废液排放量为 300L/d。本项目衰变系统内除了需贮存来自本项目产生的放射性废液外，还需贮存 6 号楼 6 层核医学科原有的放射性废水。核医学科现开展

的项目包括 SPECT/CT、PET/CT 显像诊断，使用 ^{99m}Tc、^{18}F 核素，根据医院提供的资料，SPECT/CT 显像诊断项目日门诊量最大为 20 人次，PET/CT 显像诊断项目日门诊量最大为 10 人次，放射性废液产生量按 10L/人次计算，工作场所每天的清洗废水约为 100L，则核医学科现有放射性废液排放量为 400L/d。故本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目运行后，6 号楼放射性废液排放量为 700L/d（300L/d+400L/d）。本项目衰变系统采用推流式衰变池，包含 5 级分隔连续式衰变池，单级衰变池体积均为 15m（长）×1.0m（宽）×3.0m（高），有效容积约 $40m^3$，衰变系统总有效容积约 $200m^3$。根据放射性废液衰变系统工作原理，放射性废液可在该衰变系统内衰变约 285d，而该衰变系统涉及有 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y、^{99m}Tc 共 9 种核素，其中半衰期最长的核素为 ^{131}I，为 8.02d，故本项目衰变系统能够满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）中“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”的要求。

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目放射性废液经专用管道流入衰变系统，专用管道管径为 100mm，埋地深度为 0.75m，无裸露部分，在管道外采用 0.5mm 铅当量铅皮包覆、上覆 0.75m 厚土层进行辐射防护，避免放射性废液流动时造成管道穿行区域的辐射泄漏。

由于本项目放射性废液中 ^{18}F 核素的能量和使用量较大，故本项目选用 ^{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液看作线源，其对周围环境产生的辐射影响参照《辐射防护导论》（方杰主编）中相关公式进行计算：

$$\dot{K}=\frac{2A\Gamma_K}{Lr}tg^{-1}\frac{L}{2r} \qquad \text{公式 11-6}$$

式中：$\dot{K}$—比释动能率，$Gy\cdot s^{-1}$；

A—总活度，Bq；

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

L—线源长度，m；

r—线源到考察点的距离，m。

表 11-15 本项目放射性废液专用管道外剂量估算结果

参数	取值
单次排放 ^{18}F 核素活度 1)	1.5mCi
	5.55E+07Bq
线源到参考点的距离（m）2)	1.10
参考点处辐射剂量率（无屏蔽，μSv/h）	5.91（100 管径）
屏蔽材料及厚度 3)	0.5mm 铅+75cm 土层
参考点处辐射剂量率（μSv/h）	0.069
周围公众受照时间（s）	1s/次×（7 次/天+3 次/天+1 次/天）×250 天
周围公众受照剂量（mSv/a）	＜0.01

注：1、单次 PET/MR 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 5mCi×30%=1.5mCi/次；

2、线源到参考点的距离=专用管道埋地深度 75cm+管道半径 5cm+参考点致地面的距离 30cm，为 1.10m；

3、管道上覆土层密度约为 1.1g/cm^3，保守按密度折算成实心砖（密度为 1.65g/cm^3），75cm 土层约为 50cm 实心砖。

由表 11-15 可知，放射性废水专用管道外采用 0.5mmPb 铅皮包覆、上覆 0.75m 厚土层进行辐射防护，其对周围公众产生的辐射影响较小。

（三）放射性固体废物

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目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、木屑、活性炭等及含有放射性核素的小动物尸体（含组织），退役的 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器。

根据医院对新建 PET/MR 诊断项目规划的工作量估算每年产生放射性固体废物量，^{18}F 日门诊量最大为 7 人次、^{68}Ga 日门诊量最大为 3 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 0.2kg/d（体积约为 0.05m^3/年），新建 PET/MR 诊断项目工作场所高活室、注射后候诊室、留观室等房间内均拟设置 1~2 个放射性废物桶（防护厚度应不低于 20mmPb），保守假设单次最大操作量的 10%的放射性核素（约 0.5mCi）转移到固体废物中，经屏蔽后，废物桶表面 30cm 处的辐射剂量率最大为 0.660μSv/h，满足小于 2.5μSv/h 的要求。废物桶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。从各房间收集的放射性固

体废物应分别标记、分开贮存（标记主要核素类型、收集时间等）后集中到废物间中的铅桶中暂存，暂存时间超过30天，经检测合格后作为医疗废物进行处理。高活室手套箱通风管道内更换下来的废活性炭（每半年更换1次，单次产生的废活性炭约200kg，体积约为0.4m^3），在废物间内暂存时间超过30天，经检测合格后作为医疗废物进行处理。本项目工作场所的废物间面积约为1.78m^2，总容积约为5.5m^3，废物间内设置一个不锈钢置物架（置物架占地约0.8m^2，共3层，每层约0.4m^3），置物架有效容积为1.2m^3，能够满足放射性固体废物贮存30天的要求。

新建PET/MR诊断项目放射性固体废物本身沾染的放射性核素活度浓度较低，保守假设单日最大操作量的10%的放射性核素（约5mCi）转移到固体废物中，经过20mmPb的放射性废物桶及楼板（空心预制板+20mm铅板）屏蔽后，废物间顶部30cm处的辐射剂量率为0.011μSv/h，满足小于2.5μSv/h的要求；所致该点位的ERCP机房公众年有效剂量最大约为0.01mSv（ERCP机房处公众年工作时间取2000h，居留因子取1/2），满足公众年有效剂量能够满足0.1mSv的剂量限值要求。

三、非放射性“三废”影响分析

（一）废气

工作场所内的空气在γ射线作用下，分解产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，

可通过工作场所拟设置的排风系统及新风系统排至室外，臭氧在常温下约50分钟可自行分解为氧气，对周围环境影响较小。

（二）废水

辐射工作人员产生的生活污水，将进入医院污水处理系统，处理达标后排入城市污水管网，对周围环境影响较小。

（三）固体废物

主要是辐射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，对周围环境影响较小。

事故影响分析

本项目新建PET/MR诊断和放药实验室项目工作场所为乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。医院在开展辐射工作过程中，如果安全管理或防护不当，可能对人员产生误照射。

一、主要事故风险

（一）PET/MR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。

（二）辐射工作人员违反操作规程或误操作，造成意外超剂量照射。

（三）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。

（四）注射药物的患者或小动物未按要求停留于控制区，导致公众遭受较大剂量照射。

（五）PET/MR机房闭门装置失效，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。

（六）由于保管或管理工作不到位，导致放射性药物的丢失、被盗，使公众受到误照射。

二、事故预防措施

针对本项目可能发生的辐射事故，可采取以下的处理措施：

（一）发生误照射（人员误留、误入机房内；辐射工作人员违反操作规程或误操作；机房闭门装置失效，导致防护门无法自动关闭），应立即离开机房。

（二）迅速安排受照人员接受医学检查和救治；

（三）发生非密封放射性物质污染，封闭工作场所，控制人员走动，以避免放射性污染扩散，并进行场所和人员的去污。

（四）加强对带药患者、小动物的监督管理。

（五）对发生事故的射线装置，请有关供货单位或相关检测部门进行检测或维修，分析事故发生的原因，并提出改进意见。

医院应定期对新建PET/MR诊断和放药实验室项目工作场所辐射安全措施进行检查、维护，发现问题及时维修；每次工作前均应检查相应辐射安全装置的有效性，定期对工作场所进行检测。医院还应在平时工作中加强工作人员的辐射防护知识的培训，尽可能避免辐射事故的发生。

医院应根据《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

东南大学附属中大医院拟对东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层进行改造，于西部区域建设 1 座 PET/MR 机房及相关辅助用房，配备 1 台 PET/MR（uPMR 790 型），使用 ^{18}F、^{68}Ga 放射性核素，开展核素显像诊断，为丙级非密封放射性物质工作场所；于东部区域建设 1 处放药实验室，使用 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等 8 种放射性核素，开展小动物实验，向有资质的药物供货商采购 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行淋洗 ^{68}Ga 核素，标记合成后供 PET/MR 诊断项目和放药实验室小动物实验使用，为乙级非密封放射性物质工作场所。根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的要求，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所的单位，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。

东南大学附属中大医院已成立专门的辐射安全与环境保护管理机构，由院长做小组组长，组员覆盖各辐射科室，并以文件形式明确管理人员职责。医院应根据本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目修订相关文件，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东南大学附属中大医院新聘用，不兼职其它放射工作，新进的辐射工作人员须通过生态环境部组织开发的国家核技术利用辐射安全与防护培训平台学习辐射安全和防护专业知识及相关法律法规，参加“核医学”辐射安全与防护考核，合格后方可上岗。

辐射安全管理规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》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”。目前东南大学附属中大医院已制定相关辐射安全与防护管理制度，如《东南大学附属中大医院放射事故应急措施预案》《放射工作人员培训计划》《放射工作人员个人剂量管理制度》《辐射监测方案》《放射性核素使用登记、台账管理制度》《放射性废物管理制度》及不同设备相应的《操作规程》等。医院现有管理制度内容较为全面，基本满足医院从事相关辐射活动辐射安全和防护管理的要求，拟根据新建PET/MR诊断和放药实验室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。

一、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：

（一）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；

（二）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；

（三）从事辐射工作时必须佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪；

（四）在工作场所严禁吸烟、进食；

（五）放射性“三废”的处理需严格按照操作规程执行。

二、岗位职责

明确放射性药物使用工作人员、台帐管理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。

三、辐射防护和安全保卫制度

根据放射性药物的具体情况制定相应的辐射防护和安全保卫制度。重点是：

（一）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；

（二）工作人员定期开展个人剂量检测和职业健康监护；

（三）放射性药物注射后患者、小动物应严格限制在控制区内，降低对周围环境的辐射影响。

四、设备维修制度

明确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。确保安全措施（联锁装置、警示标志、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。

五、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：放射性药物和 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器送达后存放于各工作场所高活室手套箱内，高活室设置有门禁系统和红外监控录像设备，放射性药物和 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器的使用、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。

六、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。

七、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。为了确保非密封放射性物质工作场所的辐射安全，该单位应制定监测方案，重点是：

（一）明确监测项目和频次，应包括但不限于表 12-1 的内容：

表 12-1 新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所辐射监测关注点位

监测内容	监测点位	监测频次
辐射水平	控制区和监督区所有工作人员和公众可能居留的有代表性的点位和存有放射性物质的装置/设备的表面	不少于 1 次/月
表面放射性污染	放射性核素操作台面、设备表面、墙壁和地面，给药后患者候诊室，放射性废物桶和包装袋表面，工作人员的手、批复暴露部分及工作服、手套、鞋、帽等	每次工作结束（出现放射性药物洒落应及时进行监测）

（二）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、卫生和健康

部门调查处理；

（三）对发生放射性药物泼洒的事故处理进行全程监测；

（四）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；

（五）委托有资质监测单位对本单位的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，东南大学附属中大医院拟为本项目配备辐射巡测仪1台，拟为本项目2个非密封放射性物质工作场所分别配备表面沾污仪1台和个人剂量报警仪2台，用于辐射防护监测和报警，同时结合本项目实际情况，已制定如下监测计划：

一、委托有资质的单位定期对项目周围环境X-γ辐射剂量率进行监测，周期：1～2次/年；

二、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；

三、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；

四、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；

五、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。

东南大学附属中大医院已根据上述监测计划，明确监测项目，定期（不少于1次/季）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，每年委托有资质的单位定期对项目周围环境X-γ辐射剂量率进行监测，监测结果上报生态环境行政主管部门。

东南大学附属中大医院已为辐射工作人员配备个人剂量计，组织辐射工作人员进行个人剂量监测（1次/季）和职业健康体检（1次/2年），医院医务处负责全院人员个人剂量的收发和管理，职业健康监护、个人剂量监测档案均存放于医务处。

东南大学附属中大医院每年编写放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告年度评估报告，包括放射性同位素与射线装置台账、辐射安全和防护设施的运行与维护、辐射安全和防护制度及措施的建立和落实、事故和应急以及档案管理等方面的内容，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。

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：

一、应急机构和职责分工；

二、应急的具体人员和联系电话；

三、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；

四、辐射事故发生的可能、分级及应急响应措施；

五、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。

东南大学附属中大医院已经制定了《东南大学附属中大医院放射事故应急措施预案》，该预案已包括成立辐射事故应急处理领导小组、应急预案领导小组的职责、放射性事故应急处理的责任划分、放射性事故应急处理程序和放射性事故的调查等内容。由辐射事故应急处理领导小组组织各相关科室，定期（1次/年）开展应急培训演练，在物资、通讯、技术、人员、经费等准备方面均加以落实。医院开展核技术利用项目至今，未发生辐射事故。

表 13　结论与建议

结论

一、项目概况

根据规划，东南大学附属中大医院拟对东南大学附属中大医院 6 号楼（裙楼）一层进行改造，于西部区域建设 1 座 PET/MR 机房及相关辅助用房，配备 1 台 PET/MR（uPMR 790 型），使用 ^{18}F、^{68}Ga 放射性核素，开展核素显像诊断，为丙级非密封放射性物质工作场所；于东部区域建设 1 处放药实验室，使用 ^{18}F、^{64}Cu、^{67}Ga、^{68}Ga、^{99m}Tc、^{111}In、^{131}I、^{90}Y 等 8 种放射性核素，开展小动物实验，向有资质的药物供货商采购 ^{68}Ge-^{68}Ga 发生器自行淋洗 ^{68}Ga 核素，标记合成后供 PET/MR 诊断项目和放药实验室小动物实验使用，为乙级非密封放射性物质工作场所。

二、项目建设的必要性

本项目的建设，可为患者提供放射诊断服务，并可提高当地医疗卫生水平，小动物实验可获得更为准确的生物体代谢信息，探索实验性药物在小型动物模型中的作用机制和过程，深入开展相关疾病致病机理的临床前期研究。

三、实践正当性

本项目的运行，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，本项目的建设和运行对受照个人或社会所带来的利益能够弥补其可能引起的辐射危害，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）“实践的正当性”的原则。

四、项目产业政策符合性分析

本项目不属于《产业结构调整指导目录（2019 年本）》（2021 年修改）中“限制类”、“淘汰类”项目，项目符合国家产业政策。

五、选址合理性

东南大学附属中大医院位于南京市鼓楼区丁家桥 87 号，医院东侧为东南大学（丁家桥校区）体育场、丁家桥小区，南侧为童家巷，西侧为金川河，北侧为东南大学（丁家桥校区）公卫楼。

本次新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目周围 50m 评价范围内，东侧为丁家桥和丁家桥小区（最近约 22m），南侧为 6 号楼（毗邻）、院内道路、7 号楼（最近约 28m）

及 8 号楼（最近约 31m），西侧为院内道路和配电站（最近约 38m），北侧为院内道路和 5 号楼（最近约 6m）。项目运行后的环境保护目标主要为本项目辐射工作人员、医院内的其他医护人员、病患及陪同家属、院外丁家桥和丁家桥小区处其他公众等。

本项目评价范围内不涉及国家公园、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水水源保护区等环境敏感区。对照《江苏省国家级生态保护红线规划》（苏政发〔2018〕74 号）、《江苏省生态空间管控区域规划》（苏政发〔2020〕1 号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省国家级生态保护红线、江苏省生态空间管控区域。根据《江苏省“三线一单”生态环境分区管控方案》（苏政发〔2020〕49 号），本项目拟建址评价范围内不涉及江苏省内优先保护单元；根据现场监测和环境影响预测，项目建设满足环境质量底线要求，不会造成区域环境质量下降；本项目对资源消耗极少，不涉及违背生态环境准入清单的问题；本项目的建设符合江苏省“三线一单”生态环境分区管控要求。

新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所拟建址位于建筑物底层的一端，并与非放射性工作场所有明确的分界隔离，不毗邻产科、儿科、食堂等部门及人员密集区，周围无环境制约因素，项目选址合理。新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目工作场所划分了控制区及监督区，相关配套布局能够保证各项工作程序沿着相关房间开展，减少了人员的流动性，有助于实施工作程序，避免公众、辐射工作人员受到不必要的外照射，布局合理。

六、辐射环境现状评价

东南大学附属中大医院本次新建PET/MR诊断和放药实验室项目拟建址周围环境辐射剂量率在 64.1nGy/h～112nGy/h 之间，位于江苏省环境天然γ辐射水平涨落区间。

东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目拟建址周围β表面污染水平低于仪器探测下限。

七、环境影响评价

根据理论估算结果，东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目在做好个人防护措施和安全措施的情况下，项目对辐射工作人员及周围的公众产生的年有效剂量均能够满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）中对职业人员和公众受照剂量限值要求以及本项目的剂量约束值要求（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）。

八、“三废”的处理处置

新建PET/MR诊断和放药实验室项目核素操作均在手套箱中进行，手套箱内保持负压且设有排风系统（通风速率不少于0.5m/s，排放口高于本建筑屋脊），管道内及外排放口处设置活性炭过滤吸附装置，能够有效防止放射性废气对周围环境产生的影响；来自新建PET/MR诊断项目高活室、给药后患者专用卫生间等高活区的放射性废水，含有^{18}F、^{68}Ga等放射性核素，由独立下水管道统一集中到6号楼西侧地埋式衰变系统中，衰变超过30天后可直接解控排放至医院污水处理系统作为医疗废水处理；新建放药实验室项目将放射性废液转移至放射性固废中，少部分小动物排泄物排入笼底木屑，笼底采用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，小动物血液、残留微量放射性试剂较少，可采用滤纸或药棉进行擦拭，每次实验结束后收集作为放射性固废处理。项目产生的注射器、一次性手套、棉签、滤纸、木屑、活性炭等及含有放射性核素的小动物尸体等放射性固体废物，除小动物尸体需暂存在冰箱中冷冻进行放置衰变，其余放射性固体废物均存放至放射性废物桶内，分别标记、分开贮存（标记主要核素类型、收集时间等），于放射性废物库内暂存，本项目所含核素半衰期小于24h的放射性固体废物暂存时间超过30天、所含核素半衰期大于24h的放射性固体废物暂存时间超过半衰期的10倍、含^{131}I核素的放射性固体废物暂存超过180天，经检测合格后，统一作为医疗废物处理，其中小动物尸体（含组织）交由有资质单位无害化处理。退役的^{68}Ge-^{68}Ga发生器拟委托供货商进行回收处理。符合辐射环境保护管理要求。

工作场所内的空气在γ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室外，臭氧常温下50分钟可自行分解为氧气，对周围环境影响较小；辐射工作人员产生的生活污水，由医院污水处理站统一处理；辐射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，对周围环境影响较小。

九、主要污染源及拟采取的主要辐射安全防护措施

新建PET/MR诊断和放药实验室项目工作场所控制区出入口拟设置“当心电离辐射”警告标志；拟在所有进入本项目监督区的门设置门禁；PET/MR机房入口处拟设置“当心电离辐射”警告标志和工作状态指示灯。PET/MR机房设置有闭门装置，满足《核医学辐射防护与安全要求》（HJ 1188-2021）的安全管理要求。

十、辐射安全管理评价

东南大学附属中大医院已设立辐射安全与环境保护管理机构，指定专人专职负责辐

射安全与环境保护管理工作，并以医院内部文件形式明确其管理职责。医院拟制定辐射安全管理制度，建议根据本报告的要求，对照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，建立符合本院实际情况的、完善可行的辐射安全管理制度，并在日常工作中落实。

东南大学附属中大医院需为本项目辐射工作人员配置个人剂量计，定期送有资质部门监测个人剂量，建立个人剂量档案；定期进行健康体检，建立个人职业健康监护档案。东南大学附属中大医院还拟为本项目配备辐射巡测仪 1 台，拟为本项目 2 个非密封放射性物质工作场所分别配备表面沾污仪 1 台和个人剂量报警仪 2 台。此外，医院应根据相关标准要求，为本项目工作人员配备足够数量的个人防护用品和辅助防护设施。

综上所述，东南大学附属中大医院新建 PET/MR 诊断和放药实验室项目在落实本报告提出的各项污染防治措施和管理措施后，该医院将具有与其所从事的辐射活动相适应的技术能力和相应的辐射安全防护措施，其运行对周围环境产生的影响能够符合辐射环境保护的要求，从环境保护角度论证，本项目的建设和运行是可行的。

建议和承诺

一、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。

二、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。

三、定期进行辐射工作场所的检查及监测，及时排除事故隐患。

四、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。