核技术利用建设项目

放疗科使用加速器项目
环境影响报告表

中国医学科学院肿瘤医院

2020 年 **12** 月

环境保护部监制

核技术利用项目

放疗科使用加速器项目
环境影响报告表

建设单位名称：中国医学科学院肿瘤医院

建设单位法人代表（签名或签章）：

通讯地址：北京市朝阳区潘家园南里 17 号

邮政编码：100021　　联系人：杨一博

电子邮箱：yiwuchu8500@sina.com

联系电话：87788020

目 录

表 1　项目概况 1
表 2　放射源 14
表 3　非密封放射性物质 15
表 4　射线装置 16
表 5　废弃物（重点是放射性废弃物） 17
表 6　评价依据 18
表 7　保护目标与评价标准 20
表 8　环境质量和辐射现状 25
表 9　项目工程分析与源项 28
表 10　辐射安全与防护 35
表 11　环境影响分析 50
表 12　辐射安全管理 79
表 13　结论与建议 82
表 14　审 批 84

表 1　项目概况

<table>
<tr><td colspan="2">建设项目名称</td><td colspan="7">放疗科使用加速器项目</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设单位</td><td colspan="7">中国医学科学院肿瘤医院</td></tr>
<tr><td colspan="2">法人代表</td><td>赫捷</td><td>联系人</td><td>杨一博</td><td>联系电话</td><td colspan="2">010-87788020</td></tr>
<tr><td colspan="2">注册地址</td><td colspan="7">北京市朝阳区潘家园南里 17 号</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目建设地点</td><td colspan="7">北京市朝阳区潘家园南里 17 号放疗楼加速器 1 室、加速器 3 室、加速器 8 室和加速器 10 室</td></tr>
<tr><td colspan="2">立项审批部门</td><td colspan="2">无</td><td>批准文号</td><td colspan="3">无</td></tr>
<tr><td colspan="2">建设项目总投资（万元）</td><td>7000</td><td>项目环保投资（万</td><td>700</td><td>投资比例（环保投资/总投资）</td><td colspan="2">10%</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目性质</td><td colspan="3">□新建 ☑改建 □扩建 □其它</td><td>占地面积（m^2）</td><td colspan="2">280</td></tr>
<tr><td rowspan="10">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></td><td colspan="5"></td></tr>
</table>

1.1 单位概况

中国医学科学院肿瘤医院（以下简称“医科院肿瘤医院”或“医院”）始建于 1958 年，1963 年增设肿瘤研究所，1996 年医院通过三级甲等医院评审。医院是建国后建立的第一家肿瘤专科医院，全国肿瘤专业人才的重要教育基地，也是国家药品监督管理局国家药品临床研究基地。医院集肿瘤医疗、科研、教学为一体，全方面进行肿瘤疾病预防、诊断和治疗研究。设计床位 1598 张；年门诊量 84 万余人次，年出院量 5 万余人次，年手术量 2 万台次。在岗职工 1600 余人，其中高级职称者 250 余人，中国科学院院士 3 人，中国工程院院士 4 人，

医科院名医 3 名，享受政府特殊津贴 73 人。

医院现设肿瘤内科、肿瘤外科、放疗科等 15 个临床科室及 9 个医技科室，拥有电子直线加速器、回旋加速器、PET-CT、数字减影血管造影等先进的诊断治疗仪器设备，万元以上设备 2000 余台。具有放射治疗、外科、内科以及介入治疗、生物治疗等多种肿瘤治疗手段，在肺癌、肝癌、胰腺癌、大肠癌、乳腺癌、宫颈癌、食管癌以及头颈部肿瘤、恶性淋巴瘤等方面的诊治水平位于国内前列，在肿瘤基础研究领域已达到国际先进水平。

医科院肿瘤医院为已取得《辐射安全许可证》的核技术利用单位。

1.2 核技术利用及辐射安全管理现状

1.2.1 核技术利用现状

医科院肿瘤医院已取得了北京市生态环境局颁发的《辐射安全许可证》（京环辐证[E0168]，有效期至 2022 年 1 月 21 日），许可的种类和范围是：使用III、V类放射源，使用II类、III类射线装置，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所，见附件 1。涉源部门：影像诊断科、介入治疗科、放疗科、手术室、核医学科、PET-CT 中心等。

医院现有医用直线加速器 7 台，回旋加速器 1 台，PET-CT 2 台，CT2 台，DSA1 台，模拟定位机 2 台，医用诊断 X 线机 12 台，后装治疗机 1 台。

许可使用密封放射源 5 枚，包括III类放射源 2 枚、V类放射源 3 枚。目前在用放射源 4 枚：1 枚后装治疗用 Ir-192 放射源（III类），3 枚校准用 Ge-68 放射源（V类）。

医院许可使用 Tc-99m 等 16 种核素，使用场所为核医学科、PET-CT 中心、手术室第 17 手术间，目前使用的有 Tc-99m、F-18、Sr-89、I-125、I-131。医院自 2016 年起开始自己制备 F-18 核素显像药物，仅供本院 PET-CT 中心使用。医院在放射性同位素转让工作中严格依法履行各项行政审批手续，严格按照许可规定的种类和活度范围购买和使用放射性同位素。

医科院肿瘤医院已许可射线装置使用情况见表 1-1。

表 1-1　医科院肿瘤医院已许可射线装置使用情况

名称	类别	数量	工作场所名称
医用诊断 X 线机	III	12	影像诊断科、手术室

回旋加速器	II	1	核医学科
CT 模拟机	III	1	放疗科
数字式血管造影机（DSA）	II	1	介入治疗科
计算机断层扫描仪（CT）	III	2	核医学科
医用直线加速器	II	9	放疗科
PET-CT	III	2	PET-CT 中心
模拟定位机	III	1	放疗科
合计		29	

医科院肿瘤医院已许可的非密封放射性同位素使用情况见表 1-2。

表 1-2　医科院肿瘤医院已许可非密封放射性同位素使用情况

序号	工作场所名称	等级	核素名称	日等效最大操作量（Bq）	年最大操作量（Bq）	备注
1	核医学科	乙级	I-131	5.92E+09	1.85E+12	
2			In-111	1.85E+07	1.85E+09	
3			Sr-89	2.96E+08	1.85E+10	
4			Ra-223	7.40E+07	2.25E+08	
5			Sm-153	1.11E+09	1.11E+11	
6			H-3	7.70E+04	3.90E+06	
7			P-32	8.82E+05	1.62E+08	
8			Ga-67	7.40E+07	5.50E+09	
9			I-125	1.85E+04	1.85E+06	
10			Re-188	2.96E+08	1.11E+10	
11			Tc-99m	4.44E+08	1.11E+13	
12	PET-CT 中心	乙级	N-13	3.70E+08	2.00E+13	
13			F-18	3.70E+08	9.25E+13	
14			C-11	3.70E+08	2.00E+13	
15			O-15	3.70E+08	2.00E+13	

16	第 17 手术间	丙级	I-125	2.00E+07	2.96E+11	

医科院肿瘤医院已许可的放射源使用情况见表 1-3。

表 1-3　医科院肿瘤医院已许可放射源使用情况

序号	核素	类别	活度（Bq）	（枚数）
1	Ir-192	III	3.7E+11	2
2	Ge-68	V	5.55E+7	1
3	Ge-68	V	1.85E+7	1
4	Ge-68	V	3.5E+7	1

1.2.2 近几年履行环保审批情况

医科院肿瘤医院近年来一共有 4 个辐射环评项目，除了 1 个未实施和 1 个正在办理自行验收外，其他 2 个已办理了相关手续，具体落实情况见表 1-4。

表 1-4　建设项目竣工验收落实情况

序号	评批环复文号	项目名称	类别	竣工验收文号	备注
1	京环审[2008]190 号	使用回旋加速器装置变更项目	报告表	京环验[2016]154 号	已验收
2	京环审[2012]212 号	新增 TOMO 放疗系统、搬迁后装治疗机	报告表	京环验[2016]145 号	已验收
3	京环审[2014]45 号	临床试用 Ra-223 放射性药物	报告表	/	未实施*
4	京环审[2014]90 号	更新加速器及扩建核医学科工作场所	报告表	/	自行验收

备注：*该项目与北京协和医院、北京安贞医院、北京友谊医院、北京朝阳医院一起申报，因其他医院入组病例总数已够，没有在医科院肿瘤医院实施。

1.2.3 辐射安全管理现状

1.2.3.1 辐射管理机构

为了加强对辐射安全和防护管理工作，促进同位素和射线装置合法的使用，医科院肿瘤医院专门成立了辐射防护领导小组，由放疗科主任担任组长，放疗科副主任、核医学科主任担任副组长，医务处、保卫处、核医学科、放疗

科、介入科、保健室、基建处、医学影像科、总务处等各部门的相关人员担任组员，并指定医务处杨一博专职负责辐射安全管理工作，辐射防护领导小组成员名单见表 1-5。

表 1-5　医科院肿瘤医院辐射防护领导小组成员名单

职位	姓名	性别	职务或职称	工作部门	专/兼职
组长	高树庚	男	主任委员、主任医师	设备处、放疗科	兼职
副组长	戴建荣	男	副主任委员、研究员	设备处、放疗科	兼职
副组长	郑　容	女	副主任委员、主任医师	核医学科、PET-CT 中心	兼职
组员	杨　剑	男	副主任委员、助理研究员	医务处	兼职
组员	耿建华	女	研究员	核医学科	兼职
组员	刘宗义	男	主管技师	介入科	兼职
组员	孙　源	男	工程师	基建处	兼职
组员	吴　宁	女	主任医师	PET-CT 中心	兼职
组员	吴晓明	女	主任医师	保健室	兼职
组员	罗德红	男	主任医师	影像诊断科	兼职
组员	符贵山	男	主管技师	放疗科	兼职
组员	田　源	男	秘书，物理师	放疗科	兼职
组员	黄曼妮	女	主任医师	妇科	兼职
组员	张国庆	男	主任科员	保卫处	兼职
组员	宋俊峰	男	主管技师	影像诊断科	兼职
组员	程　勇	男	副处长	总务处	兼职
组员	杨一博	男	助理研究员	医务处	专职

1.2.3.2 规章制度建设及落实

医科院肿瘤医院结合医院实际情况，已制定一套相对完善的管理制度和操作规程，包括辐射防护领导小组及岗位职责、放射性同位素与射线装置操作规程、辐射工作人员考核计划、辐射工作场所安全和防护管理制度、设备检修维护制度、辐射工作人员个人剂量监测制度、工作场所和环境辐射水平监测方案、台帐管理制度、放射性废物管理制度、辐射事故应急制度以及回旋加速器相关制度等，并严格按照规章制度执行。

医院每年均依据相关法律法规对辐射工作的安全和防护状况进行年度评估，编写并向生态环境部门上报了年度评估报告。

1.2.3.3 工作人员考核

医院规定所有辐射工作人员，在上岗前将取得辐射安全与防护考试合格证，并制定有辐射工作人员考核计划，2016 年 6 月 30，医院现有的 144 名射线装置和放射性同位素操作人员及辐射安全管理人员均接受了生态环境部门认可培训机构组织的辐射安全初训和复训，全部取得培训合格证书。由于受到疫情的影响，医院于 2020 年已分批次参加了生态环境部国家核技术利用辐射安全与防护培训平台报名并通过考核。

另外 2020 年医院还分别组织放疗、影像、核医学等放射工作科室的专家举办面向本院职工的辐射安全防护知识继续教育培训。

1.2.3.4 个人剂量监测

医科院肿瘤医院现有辐射相关工作人员的个人剂量监测工作已委托北京贝特莱博瑞技术检测有限公司承担，监测频度为每 3 个月检测一次。根据医院 2019 年度个人剂量检测结果，参与个人剂量检测的 140 名人员，工作人员年剂量结果为 0.03~0.734mSv，均未超过年剂量管理目标值（5mSv），2019 年度的个人剂量报告见附件 2。

开展个人剂量检测的人员，部分 2019 年新进、外出学习、疫情影响等，所以出现了少于 4 次的个人剂量检测结果的情况。

1.2.3.5 工作场所及辐射环境监测

医科院肿瘤医院已制定辐射工作场所监测制度和自行监测记录档案，监测方案内容含有工作场所辐射水平监测和环境辐射水平监测，监测方案中包括实施部门、监测项目、点位及频次等，并妥善保存，接受生态环境行政主管部门的监督检查。监测记录记载监测数据、测量条件、测量方法和仪器、测量时间和测量人员等信息，监测记录随本单位辐射安全和防护年度评估报告一并提交北京市生态环境局。

工作场所辐射水平监测：医院每年委托有 CMA 资质的单位对医院已有的辐射场所防护和机器性能检测一次，且北京市卫生健康委员会每年都要对医院的《放射诊疗许可证》校验一次，校验时医院必须提供当年的检测合格报告，

通过现场查验检测报告齐全，检测结果均满足相关标准要求。

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

医院现有的监测方案基本能够满足现有场所使用要求，本次拟改造后的加速器机房，将纳入医院放射工作场所的监测范围，一并按照现有的频度开展。医院已配备的辐射监测仪器，详细清单见表 1-6。

表 1-6　医院现配有辐射监测仪器清单

序号	仪器名称	型　号	购置日期	仪器状态	数量	备　注
1	环境剂量检测仪	RM2108	2010 年	正常使用	2	核医学楼
2	多功能剂量监测仪	Inspector	2016 年、2010 年	正常使用	4	核医学楼
3	手足污染检测仪	RM-7510	2010 年	正常使用	1	核医学楼
4	场所固定式 X、γ 射线报警仪	SB-1Z	2012 年~2014 年	正常使用	9	放疗大厅
5	辐射巡检仪	451P	2009 年、2016 年	正常使用	2	放疗科
6	个人剂量报警仪	FJ3500	2014 年	正常使用	15	放疗大厅、影像诊断科
7	在线监测 γ 辐射剂量当量率仪	SB-IXγ	2011 年	正常使用	1	核医学楼
8	个人报警剂量仪	RAD-60	2010 年	正常使用	10	核医学楼
9	固定式环境剂量监测报警仪	8 探头	2016 年	正常使用	1	核医学楼
10	多用途表面污染测量仪	14-C	2006 年	正常使用	1	核医学楼

1.2.3.6 辐射事故应急管理

医科院肿瘤医院依据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，制定了关于本单位辐射项

目的《医科院肿瘤医院辐射事故应急制度》，以保证医院一旦发生辐射意外事件时，即能迅速采取必要和有效的应急响应行动，妥善处理放射事故，保护工作人员和公众的健康与安全，同时在预案中进一步明确规定本单位有关意外放射事件处理的组织机构及其职责、事故报告、信息发布和应急处理程序等内容。发生辐射事故时，医院应当立即启动本单位的辐射事故应急方案，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。2019 年 11 月医院辐射安全领导小组组织核医学科、放疗科等相关科室人员参加了每年一度的辐射事件应急预案演练。

1.2.3.7 放射性废物的管理情况

医科院肿瘤医院按照《北京市生态环境局办公室关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》（京环办[2018]13 号）对放射性废物进行管理。放射性固体废物分类收集于专用的废物库内，暂存时间分别超过 30 天、10 倍最长半衰期，对表面污染和辐射剂量率水平自行监测无异常后做为医疗废物处置。医院最近于 2020 年 9 月 22 日按照要求对废物库内暂存时间满足要求的固体废物进行了清洁解控，并进行了详细解控记录，主要为含有 Tc-99m、I-131 共 2 种核素的放射性固废，质量约为 6.5kg。

医科院肿瘤医院于 2020 年 10 月委托中国原子能科学研究院对衰变池出水口废水进行了检测，监测结果显示，I-131 活度浓度为 1.39±0.21Bq/L，低于 10^5Bq/L 的排放限值，解控记录和废水监测报告详见附件 3。

1.3 本项目情况

1.3.1 项目背景和由来

医院放射治疗作为临床诊治的重点学科之一，在肿瘤疾病的治疗中发挥了很大的技术优势。全科拥有病床近 300 张，每日治疗病人约 1000 人。拥有完善的放疗质控管理和严格的质控监测体系，每年放射治疗 12 万人次。放疗中心是国家放射肿瘤学重点学科点和中国协和医科大学硕士、博士学位授权点，承担多项国际、国家和北京市的科研课题。医院率先在国内开展立体定向放疗(SRS,SBRT)、自适应放疗(ART)、术中放疗(IORT)、调强放疗(IMRT)、旋转容积调强（VMAT)、近距离放疗、全身放疗等。医院现有 9 个放射治疗机房和 2

个模拟机房，医院现有放射治疗设备应用情况见表 1-7 所示。放疗科现状平面布局示意图见图 1-1 所示。

表 1-7　医院现有放射治疗应用情况

序号	工作场所	型号	应用情况	备注
1	加速器1室	Primus	暂停使用	本项目更新设备
2	加速器2室	Precise	2003.10启用	
3	加速器3室	BJ-6B-400	已报废	本项目更新设备
4	加速器4室	Varian Novalis	2016.02 启用	
5	加速器5室	Varian Unique	2016.02 启用	
6	加速器6室	Varian Clinac600CD	2006.12启用	
7	加速器8 室	Varian Clinac 600CD	设备老化，暂停使用	本项目更新设备
8	TOMO 机房（加速器9室）	HiART H-0000-0003	2015.04 启用	
9	后装治疗1 室	核通micro Selectron-HDR	2015.04 启用	

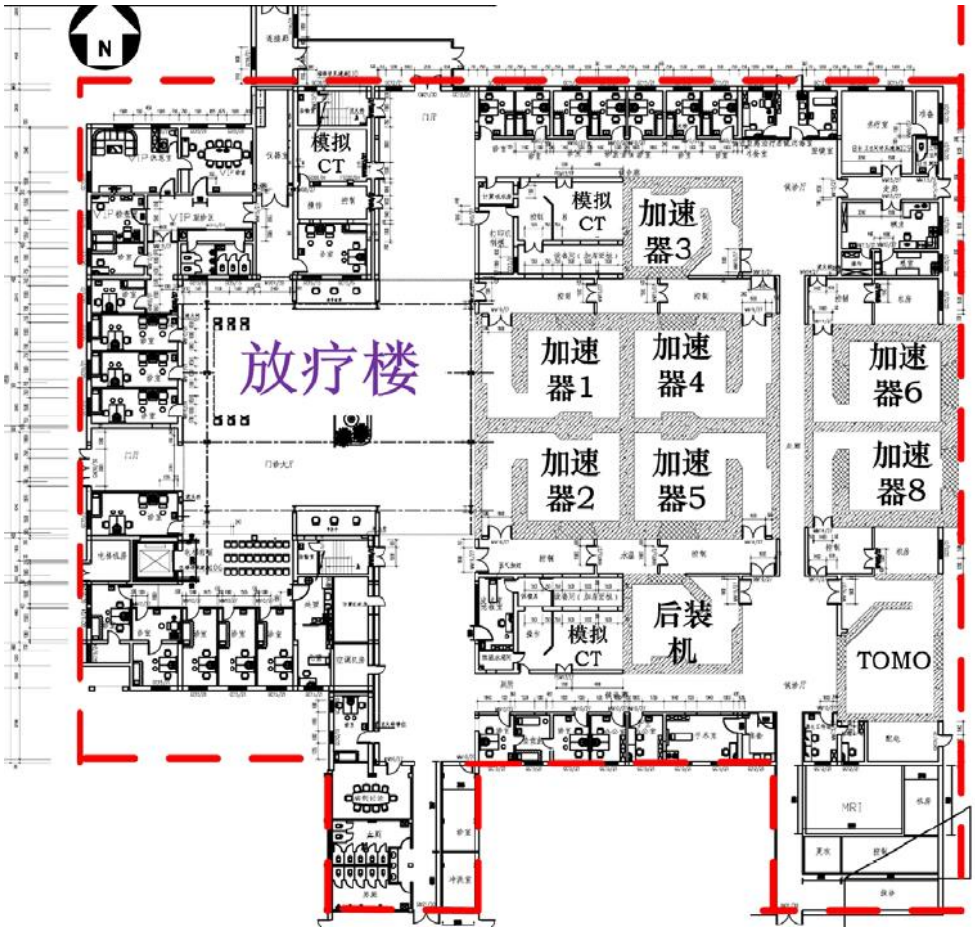


图 **1-1**　放疗科现状平面布局示意图

随着放射诊疗技术的发展，医院临床肿瘤放射治疗需求越来越大，医院现有的部分放射治疗设备因运行老化已不能满足临床诊疗要求，故医院拟更新 3 台放射治疗设备，并对早年建设的机房（加速器 1 室、3 室和 8 室）依照现行标准进行屏蔽防护改善。目前，国际上已研制出核磁加速器，该设备采用磁共振引导直线加速器，将高场超导核磁共振和先进直线加速器完美融合，治疗效果突出。医院拟将原放疗科西南角的部分办公用房改建为核磁加速器治疗机房，安装 1 台 Elekta Unity 型核磁加速器，供临床使用，该 Elekta Unity 型核磁加速器已取得国家药品监督管理局医疗器械注册证（见附件 4）。

本项目启用后，放疗科将使用共计 9 台医用直线加速器（含 1 台 TOMO 和 1 台核磁加速器）。本项目涉及的加速器 1 室位于放疗大厅的中部西侧，加速器 3 室位于放疗大厅的中部北侧，加速器 8 室位于放疗大厅的东南部，核磁加速器位于放疗大厅的西南角，见图 1-2 所示。

图1-2　本项目完成后放疗科一层平面布局图

1.3.2 项目内容

（1）将加速器 1 室原有的 1 台 Primus 型加速器（医科达公司产，10MV，600cGy/min）报废，更新为 1 台 Elekta Infinity 型医用电子直线加速器（医科达公司产，6MV，600cGy/min）。

（2）将加速器 3 室原有的 1 台 BJ-6B-400 型加速器（北京医疗器械研究所产，6MV，600cGy/min）报废，更新为 1 台 Elekta Synergy 型医用电子直线加速器（医科达公司产，6MV，600cGy/min）。

（3）将加速器 8 室原有的 1 台 Clinac 600CD 型加速器（瓦里安公司产，6MV，600cGy/min）报废，更新为 1 台 Elekta Versa HD 型医用电子直线加速器（医科达公司产，6MV，FFF：1400cGy/min）。

（4）对放疗楼内西南侧医疗用房进行改造，新建加速器10室（核磁加速器

室），新增使用1台医科达Elekta Unity型核磁加速器（7MV，500cGy/min）。

本项目启用后的医用电子直线加速器情况表见表1-8。

表 1-8　本项目使用的射线装置情况表

序号	工作场所	型号及名称	参数	厂家	类别
1	加速器1室	Elekta Infinity型医用电子直线加速器	6MV X射线/600cGy/min（1m处）；130kV/500mA	医科达公司	II类
2	加速器3室	Elekta Synergy型医用电子直线加速器	6MV X射线/600cGy/min（1m处）；130kV/500mA	医科达公司	
3	加速器8室	Elekta Versa HD型医用电子直线加速器	6MV X射线/1400cGy/min（1m处）；130kV/500mA	医科达公司	
4	加速器10室（核磁加速器室）	Elekta Unity 型核磁加速器	7MV，500cGy/min（1.435m处）	医科达公司	

1.3.3 开展本项目的技术能力

（1）辐射工作人员配备

医科院肿瘤医院自上世纪 80 年代已正式开展放射治疗工作，目前已形成了成熟的放射工作技术与人员队伍。放疗科现有辐射工作人员 93 人，其中物理师 22 名，技师 67 名、后装医师 2 名和护士 2 名，其中 36 名辐射工作人员已重新取得考核合格证，相关辐射工作人员岗位及培训情况见附件 5。

本项目完成后，辐射工作人员从现有辐射人员中调配。物理师由科室统一调配使用。设备的技师相对固定。每台设备拟固定配备 5-6 名技师，现有的 67 名技师能够满足 11 台放射治疗设备的配置需要。实际运行时，科室将并根据放射治疗的工作负荷情况，对人员配备进行适当调配，保证每台加速器运行所需的技术力量满足运行需要。

（2）检测仪器配备情况

本项目拟新配备4台固定式剂量率仪，每个机房1台，每台配备1套探头，用于4个机房的剂量监测；每个机房新增配备2台个人剂量报警仪，用于2人一组的操作人员使用；使用现有的1台便携式巡测仪，用于4个加速器机房的定期辐射巡测。

1.3.4 项目选址与周围环境

医科院肿瘤医院位于北京市朝阳区潘家园南里 17 号，西邻东南二环路，其地理位置见附图 1 所示，放疗楼位于医院院区内的中西部，东侧为院内通道，南侧为实验楼和科研楼；西侧为院内空地（停车场），北侧为门诊楼和诊断楼，医院建筑布局情况见附图 2 所示。

放疗楼内包括放疗大厅和放疗办公区域，放疗办公区域为 3 层建筑结构，放疗大厅为地面一层建筑，无地下室。所有放射治疗机房均设置于放疗大厅内，本项目位于放疗大厅的加速器 1 室、加速器 3 室、加速器 8 室和加速器 10 室。放疗楼周围 50m 区域都是医院内部。

表 2　放射源

序号	核素名称	总活度（Bq）/ 活度（Bq）×枚数	类别	活动种类	用途	使用场所	贮存方式与地点	备注

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

表 3　非密封放射性物质

序号	核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量（Bq）	日等效最大操作量（Bq）	年最大用量（Bq）	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点

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

表 4　射线装置

（一）加速器：包括医用、工农业、科研、教学等用途的各种类型加速器

序号	名称	类别	数量	型号	加速粒子	最大能量（MeV）	额定电流（mA）/剂量率（Gy/h）	用途	工作场所	备注
1	医用电子直线加速器	II类	1	Elekta Infinity	电子	6MV（X 射线） 15MeV（电子线）	600cGy/min（常规）	放射治疗	放疗科加速器1室	CBCT影像系统：130kV/500mA
2	医用电子直线加速器	II类	1	Elekta Synergy	电子	6MV（X 射线） 18MeV（电子线）	600cGy/min（常规）	放射治疗	放疗科加速器3室	CBCT影像系统：130kV/500mA
3	医用电子直线加速器	II类	1	Elekta Versa HD	电子	6MV（X 射线） 15MeV（电子线）	1400cGy/min（FFF） 600cGy/min（常规）	放射治疗	放疗科加速器8室	CBCT影像系统：130kV/500mA
4	核磁加速器	II类	1	Elekta Unity	电子	7MV（X 射线）	500cGy/min（FFF）	放射治疗	放疗科加速器10室	

（二）X 射线机，包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

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

（三）中子发生器，包括中子管，但不包括放射性中子源

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

表 5　废弃物（重点是放射性废弃物）

名称	状态	核素名称	活度	月排放量	年排放总量	排放口浓度	暂存情况	最终去向
无								

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》，2015 年 1 月 1 日。 （2）《中华人民共和国环境影响评价法》，2018 年 12 月 29 日。 （3）《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月 1 日。 （4）《建设项目环境保护管理条例》，2017 年 10 月 1 日。 （5）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，2019 年 3 月 2 日。 （6）《建设项目环境影响评价分类管理名录》，2018 年 4 月 28 日。 （7）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，2019 年 8 月 22 日。 （8）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，2011 年 4 月 18 日。 （9）《关于发布＜射线装置分类＞的公告》，2017 年 12 月 5 日。 （10）《关于发布＜建设项目竣工环境保护验收暂行办法＞的公告》，国环规环评[2017]4 号，2017 年 11 月 20 日。 （11）《北京市环保局办公室关于做好辐射类建设项目竣工环境保护验收工作的通知》，京环办[2018]24 号，2018 年 1 月 25 日。 （12）《北京市禁止违法建设若干规定》，北京市政府第 228 号令，2011 年 4 月 1 日。 （13）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部令第 9 号，2019 年 11 月 1 日。 （14）《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》，京环发[2011]347 号，2012 年 1 月 1 日。
技术标准	（1）《辐射环境保护管理导则－核技术利用建设项目　环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016），环境保护部。 （2）《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002） （3）《医用电气设备第 2 部分：能量为 1MeV 至 50MeV 电子加速器安全专用要求》（GB 9706.5-2008） （4）《电子加速器放射治疗放射防护要求》（GBZ 126-2011） （5）《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） （6） 《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） （7） 《工作场所有害因素职业接触限值 化学有害因素》（GBZ 2.1-2019） （8） 《环境地表γ辐射剂量率测定规范》（GB/T14583-93） （9） 《辐射环境监测技术规范》（HJ/T61-2001）
其他	（1）NCRP Report No.151：Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities，2005； （2）NCRP Report No.144：Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities，2003； （3）IAEA SAFETY REPORTS SERIES No.47: Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities，2006； （4）《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020） （5）医科院肿瘤医院提供的与本项目相关的申请和技术资料，2020.9。

表 7　保护目标与评价标准

7.1 评价范围

7.1.1 评价内容

本项目为使用医用电子加速器。

7.1.2 关注问题

（1）加速器机房辐射屏蔽是否满足国家相关标准的要求。

（2）辐射安全管理情况及污染防治措施是否满足相关法规及标准要求。

7.1.3 评价因子

本项目的环境影响评价因子为 X 射线。

7.1.4 评价范围

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

7.2 保护目标

放疗楼东侧为院内道路和绿化区，南侧为科研楼、核医学楼、实验楼，西侧院内空地（停车场），北侧为院内道路、门诊楼和诊断楼，放疗楼 50m 范围均为医院内部。本项目评价范围和放疗楼周围 50m 范围内主要保护目标见图 7-1 和表 7-1。

图 7-1　本项目评价范围示意图

表 7-1　放疗楼周围 50m 范围内的保护目标

放疗楼	保护目标	方位	距离(m)	长居留人数
	住院楼	南侧	25~50	200

	核医学楼、科研楼	西南侧	5~50	150
	门诊楼和诊断楼	北侧	0~50	200
	住院楼	东南侧	40~50	150

本项目所含 4 台医院电子加速器分别位于放疗楼东侧放疗大厅的东、南、西、北侧。机房东侧为楼外院内道路，北侧候诊廊、诊室，西侧为大厅，南侧为放疗科相关场所，之外为院内道路，机房正上方楼顶无人区，无地下室，因此本保护目标为周围场所的公众，以及放疗科的工作人员。本项目将采取有效的辐射防护与安全管理措施，确保放疗科运营所致工作人员和周围公众的年受照射剂量低于本报告提出的剂量约束值。放疗楼 4 个加速器室所处位置一层平面布局图见图 7-2 所示，4 个加速器室周围环境情况见表 7-2。

图 7-2　放疗楼一层平面布局图

表 7-2　本项目加速器室周围相邻环境情况

工作场所	周围环境	方位	长居留人数
加速器1室	加速器 4 室	东	2
	加速器2室	南	2
	大厅、诊室等区域	西	20
	控制室、设备间	北	4
	楼上无人区	上	/
	西侧诊室上方计划室、办公室等	斜上方	50
	正下方土层	下	/
加速器3室	控制室	东	2
	加速器4室控制室、设备间	南	4
	模拟机房、控制室、设备间	西	4
	候诊廊、诊室	北	6
	楼上无人区	上	/
	正下方土层	下	/
加速器8室	楼外院内道路、绿化区	东	2
	控制室、设备间	南	2
	走廊、加速器 5 室控制室	西	2
	加速器 6 室及控制室	北	2
	楼上无人区	上	/
	正下方土层	下	/
加速器 10 室	通道，之外为楼外绿化区	东	1
	消防通道	南	1
	院内通道	西	1
	控制室	北	2
	楼上无人区	上	/
	正下方土层	下	/

7.3 评价标准

7.3.1 基本剂量限值

电离辐射防护与辐射源安全基本标准（GB18871-2002）规定的剂量限值列于表 7-3。

表 7-3　工作人员职业照射和公众照射剂量限值（GB18871-2002）

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

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

7.3.2 剂量约束值

职业照射，本项目辐射工作人员取 5mSv/a 作为剂量约束值；公众照射，本项目取 0.1mSv/a 作为剂量约束值。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况，医科院肿瘤医院应该进行调查并报生态环境部门备案。

7.3.3 剂量率控制水平

对于医用电子直线加速器，要求在满足上述年剂量约束值的同时，参照《电子加速器放射治疗放射防护要求》（GBZ 126-2011）和《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007），剂量率控制值为：加速器机房墙外和防护门外 30cm 处辐射剂量率不大于 2.5μSv/h。

参照《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）和《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分：电子直线加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.2-2011），对于偶然到达的机房顶外的人员的照射，按照年剂量 250μSv 加以控制；对于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 30cm 处的剂量率参考控制水平可按 100μSv/h 加以控制。本项目加速器顶是不需要人员到达并只有借助工具（双门双锁）才能进入，本项目加速器顶采用 0.1mSv/a 剂量约束值来控制。

7.3.4 非放射性控制值

（1）室内空气质量

根据《工作场所有害因素职业接触限值-化学有害因素》（GBZ2.1-2019），

工作场所空气中 O_3 和 NO_2 的浓度限值分别为 0.3mg/m^3 和 5mg/m^3。

（2）环境空气质量

臭氧和氮氧化物的环境空气质量浓度限值执行 GB3095-2012《环境空气质量标准》中的二级浓度限值，臭氧的 1 小时平均浓度 0.2mg/m^3，NO_2 的 1 小时平均浓度 0.2mg/m^3。

表 8　环境质量和辐射现状

8.1 项目地理和场所位置

8.1.1 地理位置

医科院肿瘤医院位于北京市朝阳区潘家园南里 17 号，西邻东南二环路，南邻华威南路，地理位置见附图 1 所示。

8.1.2 场所位置

本项目所在放疗楼位于医院院区内的中西部，放疗楼东侧为院内通道，南侧为实验楼和科研楼；西侧为院内空地（停车场），北侧为门诊楼和诊断楼，医院建筑布局情况见附图 2 所示。放疗楼内包括放疗大厅和放疗办公区域，西侧的放疗办公区域为 3 层建筑结构，放疗大厅为地面一层建筑，无地下室。

本项目位于放疗大厅的加速器 1 室、加速器 3 室、加速器 8 室和加速器 10 室，分别位于放疗大厅的东、南、西、北侧，放疗楼一层的平面布局图见附图 3 所示。4 间加速器室的平剖面图见附图 4~附图 7 所示。

8.2 辐射环境现状监测

（1）监测目的

掌握该项目辐射工作场所的辐射环境质量现状水平，为评价提供基础数据。

（2）监测内容

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

（3）监测点位

选取放疗楼周围位点进行监测。

（4）监测仪器与规范

监测仪器的参数与规范见表 8-1。

表 8-1　X-γ 射线剂量率监测仪器参数与监测规范

仪器名称	辐射检测仪
型号/编号	AT1121/44091

生产厂家	白俄罗斯 ATOMTEX
能量响应	15keV～10MeV 不超过对 ^{137}Cs，γ 辐射响应的±30%
量程	X-γ：50nSv/h~10Sv/h
检定证书	中国计量科学研究院 （检定证书编号：DLjl2020-03115） 有效期：2020 年 5 月 20 日～2021 年 5 月 19 日
监测规范	《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》（GB/T14583-93） 《辐射环境监测技术规范》（HJ/T61-2001）

（5）现状监测结果及评价

2020 年 10 月 24 日评价单位对项目地及周围环境辐射水平进行了检测，评价区 γ 辐射水平调查结果见表 8-2，本底监测点位示意图见图 8-1。

表 8-2　本项目放疗楼周围辐射环境水平监测结果

点位序号	**测　点　描　述**	**辐射剂量率（μSv/h）**	**备注**
1	放疗楼东北侧院内道路	0.10	
2	放疗楼东南侧院内道路	0.11	
3	核磁加速器室东侧绿化区	0.11	
4	核磁加速器室西侧院内道路	0.10	
5	放疗楼西侧院内道路	0.11	
6	放疗楼北侧院内道路	0.11	
7	实验楼南侧	0.12	
8	核医学楼北侧道路	0.11	
9	医院西门口	0.11	
北京市范围[1]		42.3～151.6nGy/h	

注：检测结果含宇宙射线响应值；[1]：辐射安全手册，2011.11。

由表 8-2 中检测结果可知，放疗楼周围的 X-γ 辐射剂量率为 0.10~0.12μSv/h，为北京市的天然本底范围之内，未发现有异常高值。

图8-1　本底监测点位示意图

表 9　项目工程分析与源项

9.1 医用电子直线加速器

9.1.1 工作原理

电子直线加速器是产生高能电子束的装置，为远距离放射性治疗机。电子枪发射电子，在由磁控管或速调管为功率源的加速管中加速，当达到所需能量时，经散射箔和准直器得到治疗电子束。在 X 射线工作时，电子束射到金属靶上产生轫致辐射（X 射线），经准直得到治疗 X 射线。加速器放射治疗的工作方式为：以一个或几个治疗野定向照射，获得计划所需的治疗剂量。典型医用直线加速器见图 9-1。

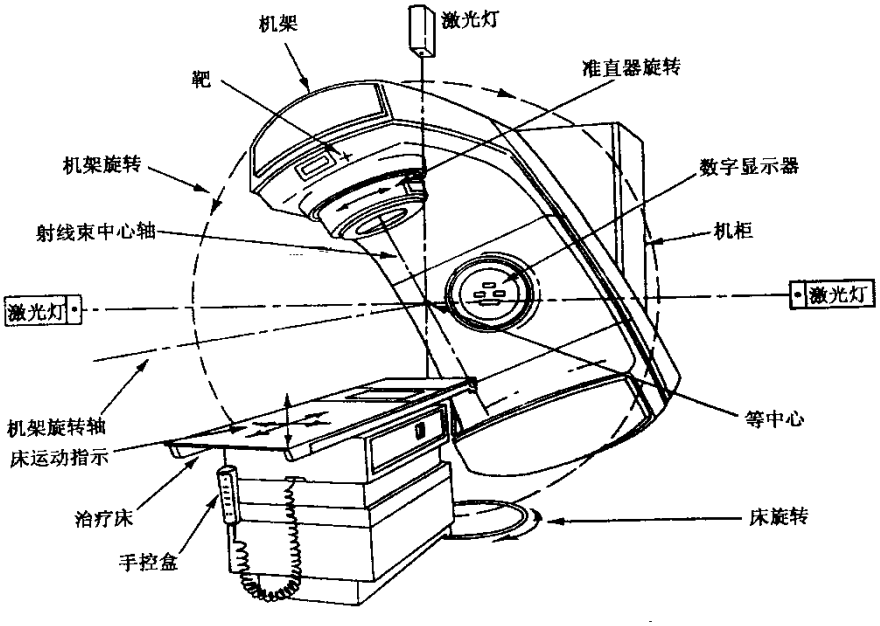


图 9-1　电子直线加速器示意图

医用电子直线加速器通常是以磁控管为微波功率源的直线加速器，它的结构单元为：加速管、电子枪、微波系统、调制器、束流传输系统及准直系统、真空系统、恒温水冷系统和控制保护系统。电子枪产生的电子由微波加速波导管加速后进入偏转磁场，所形成的电子束由电子窗口射出，通过 2cm 左右的空气射到金属钨靶，产生大量高能 X 射线，经初级准直器和均整器形成剂量均匀的 X 射线束，再通过监测电离室和次级准直器限束，最后到达患者病灶实现治疗目的。医用电子直线加速器内部结构见图 9-2。

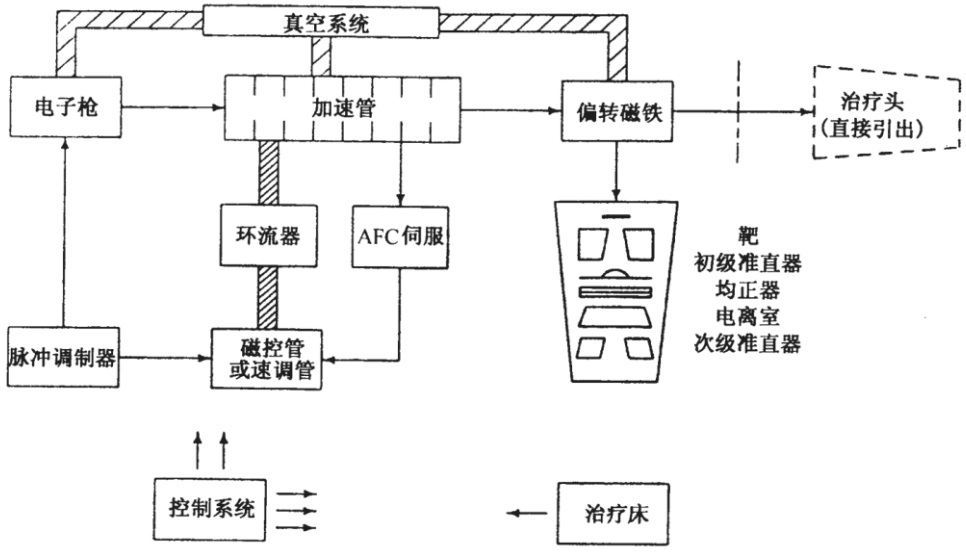


图 9-2　典型医用电子直线加速器内部结构图

9.1.2 工作流程

1、治疗流程

（1）接收病人：对病人进行登记，进行临床检查，经医生诊断和治疗正当性判定后，根据肿瘤分期、分型确定治疗方针，与放疗科预约登记，确定模拟定位治疗的时间。

（2）制模：为方便患者治疗定位，用热塑体模在相应治疗部位按照病人身体轮廓进行塑形；

（3）模拟定位：使用模拟定位机对患者的肿瘤进行定位检查，确定肿瘤的具体位置和形状，工作人员隔室操作；

（4）勾画靶区 TPS 制定治疗计划：勾画病变靶区和正常器官，根据患者瘤体的类型、部位和大小等初步确定照射剂量和照射时间，并进一步制定相应的 VMAT 等治疗计划；

（5）治疗计划确认：再次确认靶区剂量，核实正常器官、热点和冷点是否在允许的范围之内，加速器是否有相应的转床、碰床等机械限值，移床等坐标设置是否正确；

（6）病人摆位：摆位前认真查对病人信息、照射条件及摆位要求，调整治疗床高度，严格按照摆位要求实施摆位；摆位结束，摆位人员等非患者均离开治疗室，关闭防护门；

（7）实施治疗：根据放疗计划，运用有关技术实施精确照射；

（8）结束治疗：病人离开治疗室，摆位人员进行下一个患者摆位准备。

医用电子直线加速器放射治疗工作流程见图 9-3。

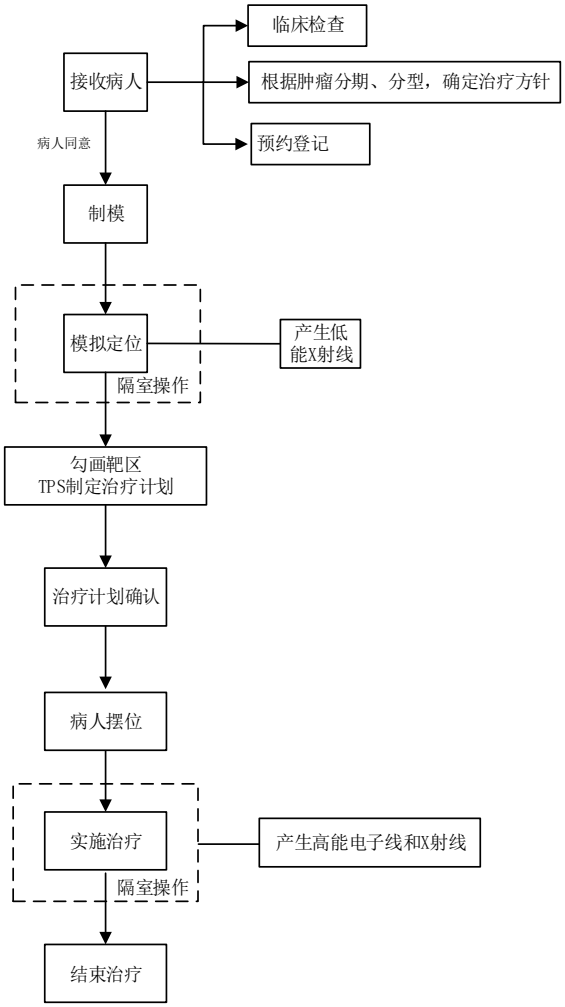


图 9-3　医用电子直线加速器放射治疗工作流程

2、使用规划

（1）工作负荷：根据目前加班治疗的工作实际，按最大工作负荷 100 人次/天进行评价（核磁加速器 80 人次）。每人次“上床、摆位、照射、下床”平均时间约 6-8 分钟，全天完成 100 人次治疗，所需时间约 10h-13h。

（2）出束时间：既开展常规放射治疗，也开展 IMRT 等适形调强放射治疗，患者比例约为 1：9，根据医院提供资料，每台加速器预期每天最多治疗 100 人次（核磁加速器 80 人次），500 人次/周（核磁加速器 400 人次/周）。保守假设放射治疗在 400cGy/min 平均照射条件下，平均每人待照射区照射 2Gy，用时 0.5min，加速器日治疗 100 人时出束时间为 50min/d，年总照射时间 208h/a；适形调强放射治疗（IMRT）与普通放疗相比给予患者的吸收剂量是相同的，

但等中心处照射野会明显小，使用 VMAT 技术适形调强治疗时，调强因子取 3（常规调强 IMRT 因子取 5）。

（3）利用因子：对于常规治疗，机头 90°、270°和 180°（朝上）出束时间各占年工作量 10%；机头向下（0°）出束时间占年工作量 70%。考虑调强治疗的使用，将机头为 90°、270°和 180°（朝上）出束时间的占比提高至 15%，机头向下（0°）出束时间占年工作量的 55%。以此保守估算周围公众受照剂量。

9.1.3 设备技术指标

本项目拟配的 3 台加速器性能参数见表 9-1。

表 9-1 电子直线加速器性能参数

使用场所	加速器 1 室	加速器 3 室	加速器 8 室
型号及名称	Elekta Infinity型加速器	Elekta Synergy型 加速器	Elekta Versa HD型 加速器
X 射线	a）最大6MV X射线 b)最大剂量率600cGy/min c）最大射野尺寸40×40cm（SAD=100cm） d） 射野泄露率X线：≤0.1% e）XVI(CBCT）：40kV－130kV	a）最大6MV X射线 b）最大剂量率600cGy/min c）最大射野尺寸40×40cm（SAD=100cm） d）射野泄露率X线：≤0.1% e）XVI(CBCT）：40kV－130kV	a）最大6MV X射线 b）最大剂量率600cGy/min（常规）；1400cGy/min(FFF）。 c）最大射野尺寸40×40cm（SAD=100cm） d） 射野泄露率X 线：≤0.1% e）XVI(CBCT）：40kV－130kV
电子线	1）电子线能量 4,6,8,10,12,15MeV，6 档； 2） 最大输出剂量率600cGy/min。	1）电子线能量 6,9,12,15,18MeV，5 档； 2） 最大输出剂量率600cGy/min。	1）电子线能量 4,6,8,10,12,15MeV，6 档； 2） 最大输出剂量率600cGy/min。

9.1.4 污染源描述

电子直线加速器运行时电子轰击靶物质生产韧致辐射（X 射线）。本项目加速器最大输出 X 射线辐射剂量率为 600cGy/min（FFF：1400cGy/min）。有用线束外泄漏辐射剂量为有用线束的 0.1%，X 射线照射至墙壁和患者身体将产生散射辐射。加速器运行产生的 X 射线贯穿辐射、泄露辐射和散射辐射进入外环境，对环境有一定的影响。

本项目拟使用的电子直线加速器最高输出的是 6MV 的 X 射线和 18MeV 的电子束，在照射野处剂量相同时，电子束使用时的平均电子束流约为 X 射线的 10^{-3}，且电子束使用时无重靶和有限束集光筒联锁，产生的韧致辐射会很小，约为使用 X 射线束时剂量的 10^{-6}，根据《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 1 部分：一般原则》（GBZ/T201.1-2007）和《电子加速器放射治疗放射防护要求》（GBZ126-2011），本项目 X 射线能量低于 10MV 的加速器，故无需考虑中子辐射及中子俘获 γ 射线。

因此，本项目主要污染因子为直线加速器在开机期间 X 射线，其次为臭氧和氮氧化物等。X 射线辐射只有在加速器运行时产生，停机后就消失。加速器运行产生的 X 射线、贯穿机房的屏蔽设施进入外环境。

（1）**正常工况时的污染途径**

1）直线加速器产生的韧致辐射 X 射线，这些射线经透射、漏射和散射，对工作场所及其周围环境产生辐射影响。

2）空气在加速器 X 射线的强辐射下，吸收能量并通过电离作用产生 O_3 和氮氧化合物等有害气体。

3）微波　电子直线加速器上使用磁控管等微波组件，在它们处于工作状态时人员有可能受到来自这些组件开口处泄漏的微波危害。

（2）**事故工况下的污染途径**

发生的事故工况主要有以下两种情况：

1）门机联锁失效，工作人员误入加速器室，受到额外的照射。

2）射线装置正常工况下，门机联锁失效，铅防护门未完全关闭的情况下射线装置就能出束，致使 X 射线泄漏到加速器室外面，给周围活动的人员造成额外的照射。

9.2 核磁加速器

9.2.1 核磁加速器技术

核磁加速器为磁共振引导直线加速器，将高场超导核磁共振和先进直线加速器完美融合。治疗过程中，磁共振将进行实时成像，清晰地显示软组织，实时引导肿瘤治疗。肿瘤及周围正常组织的位置和运动变化都在医生的掌握之中，射线照射更加精准，病人生存率大幅提升。

实施磁共振影像引导下，由于肿瘤目标清晰确定，射线照射范围比传统放疗显著减小，正常组织受到更少的剂量损害，加上磁共振影像引导分辨率高，无辐射，放疗副反应降低。生存率提高的同时，病人生活质量也得到有效提升。

9.2.2 核磁加速器组成及主要技术参数

这个系统需要 3 个分离的电力系统：一个供给直线加速器部分，一个供给核磁共振部分，一个给辅助伺服系统。除此之外，这个系统还需要两个分离的冷水供给循环系统：分别给直线加速器和核磁共振部分。本项目核磁加速器外观图见图 9-4，核磁加速器结构示意图见图 9-5。

图 9-4　核磁加速器外观图

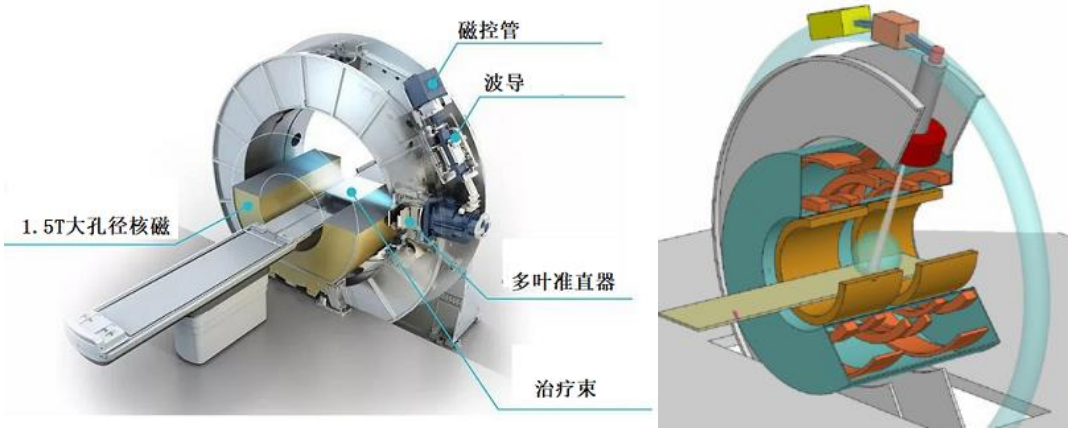


图9-5　　核磁加速器结构示意图

表 9-2　核磁加速器技术指标

指 标	技术参数
型号及名称	Elekta Unity 型核磁加速器
射线种类、能量	治疗束：X 射线，7MV；
等中心剂量率	500cGy/min
等中心处最大照射野	571.4mm×220mm
泄漏率	主束≤0.5%（圆柱形机架表面处，系统有阻挡器）； 二次泄漏辐射≤0.1%（系统前后表面）。
靶到等中心点距离	1.435m
等中心点位置	治疗室地上 1.05m
自屏蔽措施	系统有阻挡器，无主束直接照射问题。

9.2.3 核磁加速器治疗工作流程

① 根据临床适应症决定行核磁加速器治疗；② 对病人进行体位固定，获取病灶医学影像；③ 制订治疗计划；④ 实施放射治疗。每人单次治疗剂量约 2Gy/次。

9.2.4 主要的放射性污染和污染途径

该治疗系统配备电子直线加速器和 MR 图像成像系统。电子直线加速器运行时高速电子轰击靶物质生产韧致辐射（X 射线）。设备输出 X 射线能量为 7MV，靶区辐射剂量率为 500cGy/min。射线照至墙壁、设备和患者身体将产生散射辐射。X 射线贯穿机房的屏蔽材料进入外环境。

9.2.5 事故工况下的污染途径

（1）加速器发生控制系统故障或辐照参数设置错误，使得患者受到超剂量照射。

（2）机房门机联锁装置故障，设备运行出束时人员误入机房受到辐射照射。

9.2.6 其它污染分析

空气在射线的强辐射下，吸收能量并通过电离作用产生 O_3 和 NO_x 等有害气体。

另外加速器 10 室室内还设计了磁场铜屏蔽设施，其内容不属于本次环评评价范围。

表 10　辐射安全与防护

10.1 机房布局与屏蔽设计

10.1.1 选址与布局

本项目在位于地面一层建筑的放疗大厅内（无地下室），本项目加速器 1 室、加速器 3 室、加速器 8 室和加速器 10 室位于放疗楼东侧放疗大厅的东、南、西、北侧，放疗大厅的平面布局见图 10-1。

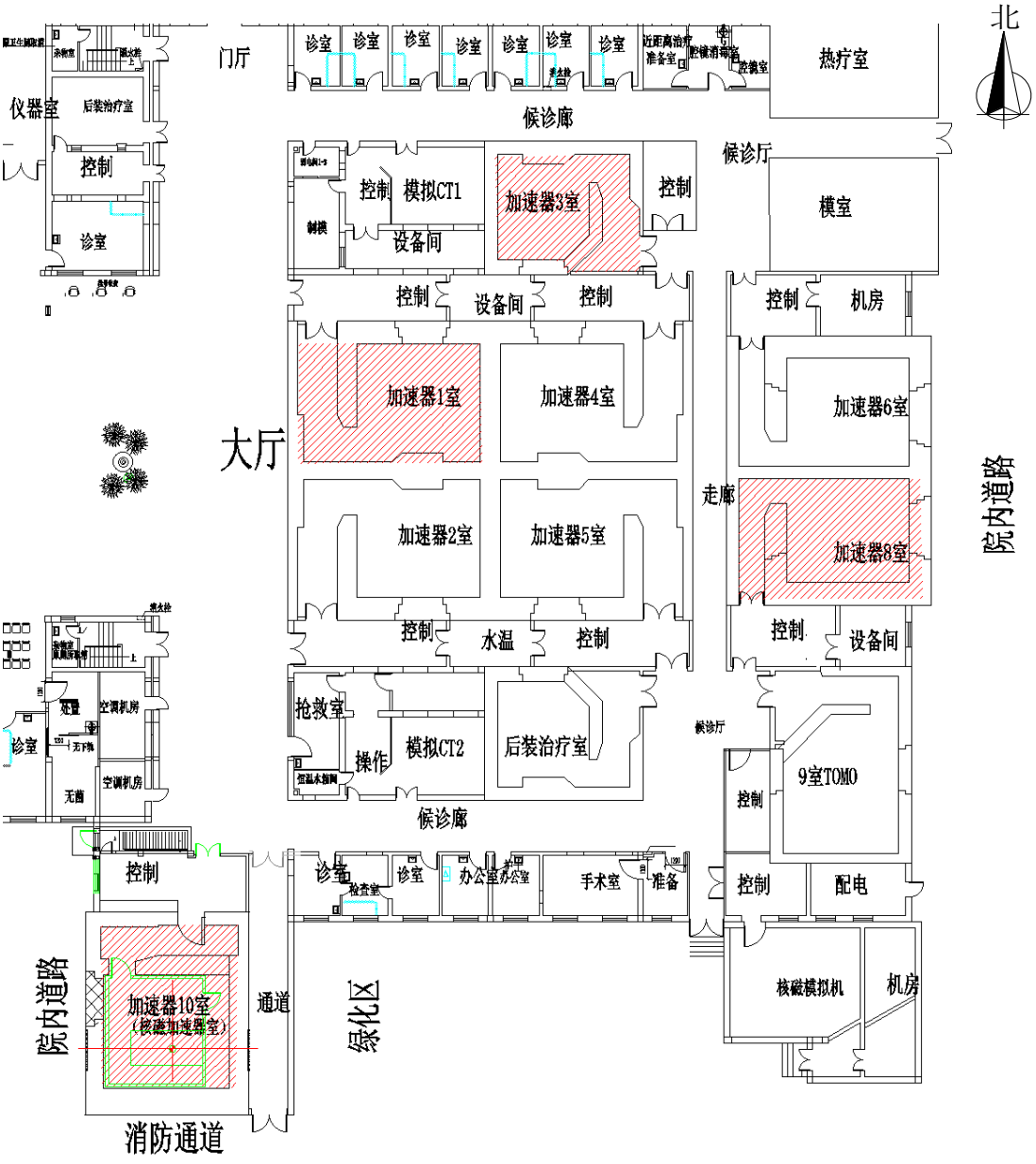


图 10-1　放疗大厅平面布局图

10.1.2 机房屏蔽设计

本项目拟对现有加速器 1 室、加速器 3 室、加速器 8 室主体结构密度不低于 2.35t/m^3 混凝土（或者 3.5t/m^3 重晶石混凝土，简称砼或重砼）浇筑基础上进

行改造，相关位置增加砼、重砼、不锈钢和铅砖，并更换新的防护门；新建加速器 10 室。4 间加速器室屏蔽设计方案见表 10-1~表 10-4，屏蔽方案的平剖面设计分别见图 10-2~图 10-5 所示。

表 10-1　加速器 1 室屏蔽设计情况一览表

加速器1室（机房室内面积69.25m^2,室内净高度4.0m）			
屏蔽建筑	**原屏蔽材料及厚度**	**改造设计方案**	**改造后屏蔽厚度**
北侧主束墙	135cm重砼+5.5cm钢板（局部钢板东侧26cm+西侧26cm）	主束新增12cm钢板	135cm重砼+17.5cm钢板(钢板东侧26cm+西侧26cm）
北侧非主束墙	135cm砼	两侧新增3cm钢板	135cm砼+3cm钢板
南侧主束墙	220cm砼+9.6cm钢板(局部钢板东侧22.5cm+西侧15.5cm）	东侧新增13cm钢板,宽度50cm,西侧新增8cm钢板,宽度50cm.	220cm砼+9.6cm钢板(东侧最厚35.5cm,西测最厚23.5cm）
南侧非主束墙	110cm砼+3cm钢板	增加4cm钢板	110cm砼+7cm钢板
东侧墙	120cm砼+3cm钢板	无	120cm砼+3cm钢板
西侧迷道内墙	120cm砼	无	120cm砼
西侧迷道外墙南侧	100cm砼+9.5cm钢板	无	100cm砼+9.5cm钢板
西侧迷道外墙北侧	60cm砼	无	60cm砼
顶板主束区	140cm砼	增加16cm钢板	140cm砼+16cm钢板
顶板非主束区	75cm砼	增加12cm钢板	75cm砼+12cm钢板
防护门	更换新的防护门	/	内、外侧3mm钢板，内部采用14mm铅

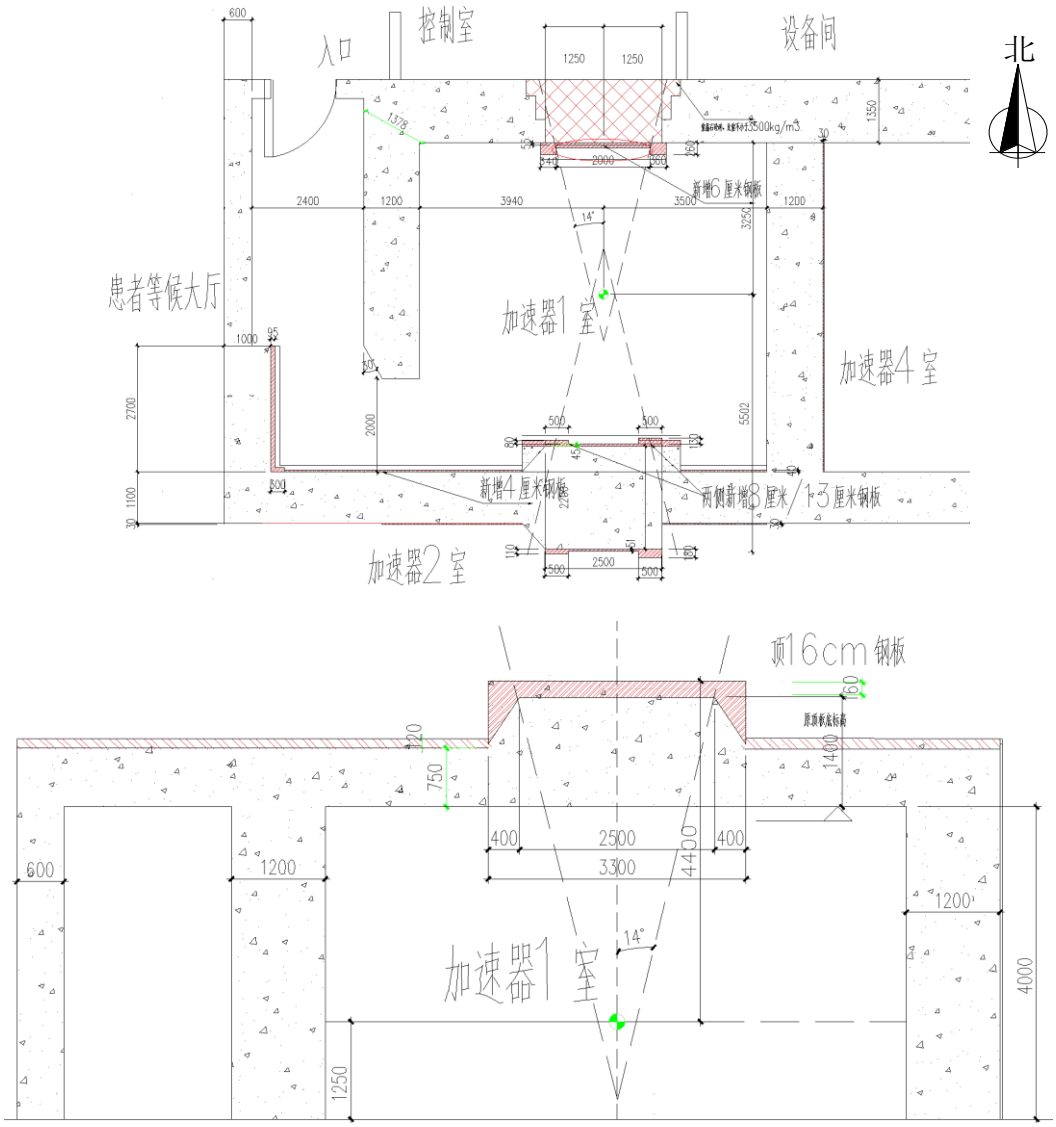
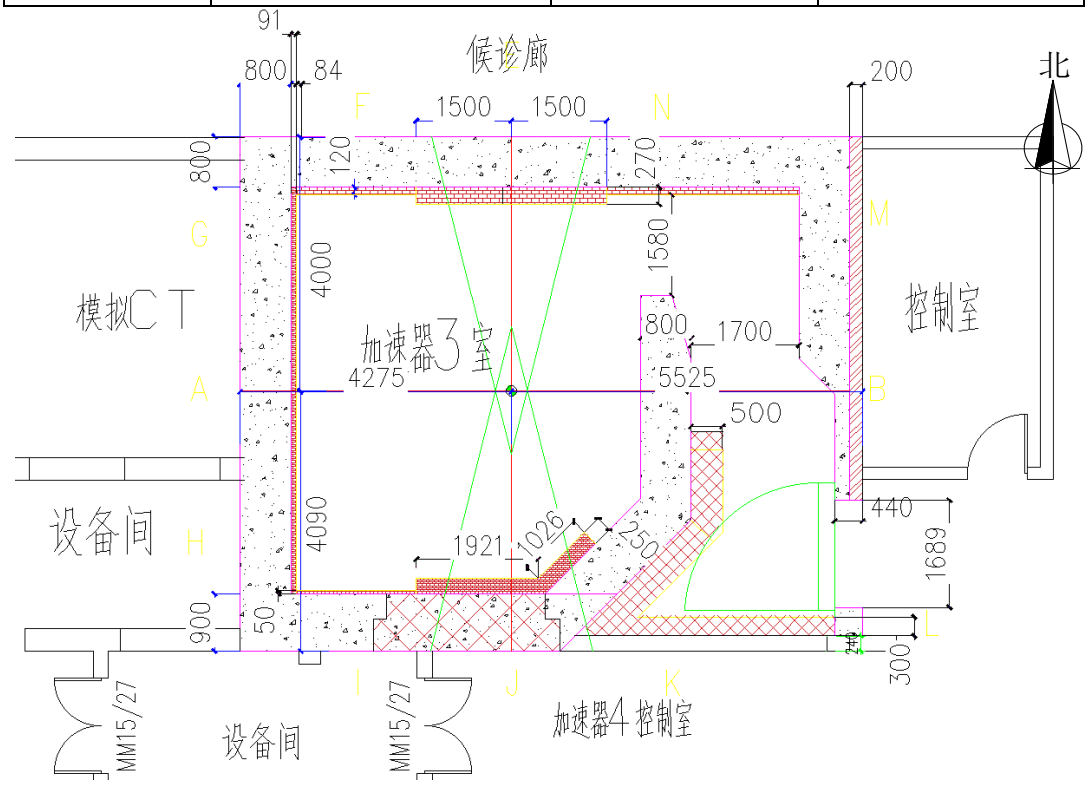


图 10-2　加速器 1 室平剖面图

表 10-2　加速器 3 室屏蔽设计情况一览表

加速器3室（机房室内面积45m^2,室内净高度3.8m）			
屏蔽建筑	**原屏蔽材料及厚度**	**改造设计方案**	**改造后屏蔽厚度**
北侧主束区	80cm砼	机房内侧增加27cm铅砖（宽度300cm）	80cm砼+27cm铅砖
北侧非主束	80cm砼	12cm铅砖	80cm砼+12cm铅砖
南侧主束区	90cm重砼(西侧）	增加25cm铅砖	90cm重砼+25cm铅砖
南侧主束区	80cm砼（东侧）	增加25cm铅砖	80cm砼+25cm铅砖
南侧非主束区	90cm砼(西侧）	5cm铅砖（西侧）	90cm砼+5cm铅砖

东侧迷道外墙（南端）	24cm砼	20cm钢板	24cm砼+20cm钢板
东侧迷道外墙（北段）	80cm砼	20cm钢板	80cm砼+20cm钢板
西侧	80cm砼	9.1cm铅砖	80cm砼+9.1cm铅砖
迷路内墙北段	80cm砼	—	80cm砼
迷路内墙南端	80cm砼	50cm重砼	80cm砼+50cm重砼
南侧隔断墙	24cm砖墙	30cm重砼	24cm砖墙+30cm重砼
顶板主束区	50cm砼	180cm砼(宽度4.2m）	50cm砼+180cm砼
顶板非主束区	50cm砼	89cm砼	50cm砼+89cm砼
防护门	更换新的防护门	/	内、外侧3mm钢板，内部采用14mm铅



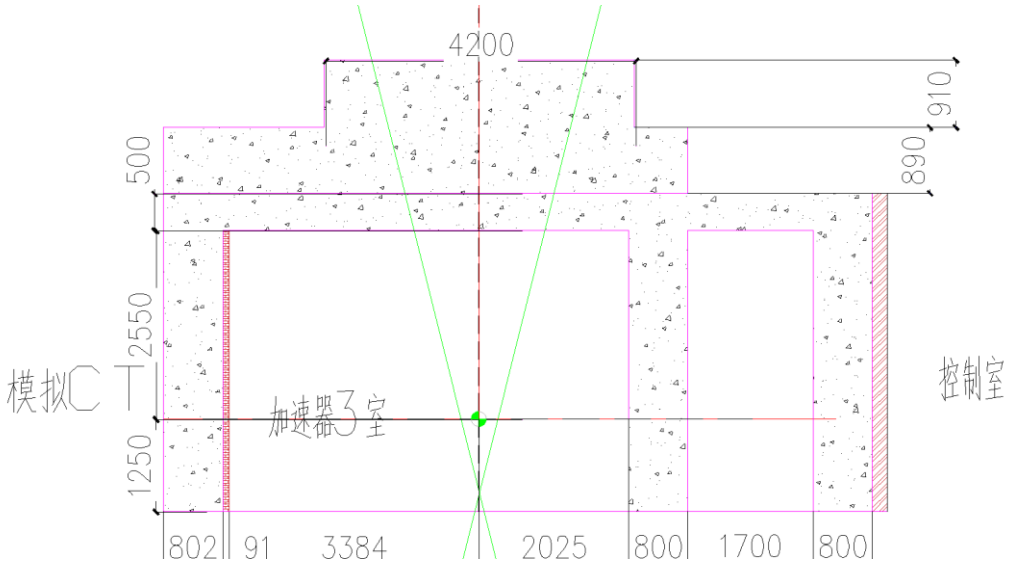


图 10-3　加速器 3 室平剖面图

表 10-3　加速器 8 室屏蔽设计情况一览表

加速器8室（机房室内面积58.9m²,室内净高度4.8m）			
屏蔽建筑	**原屏蔽材料及厚度**	**改造设计方案**	**改造后屏蔽厚度**
北墙中段	10cm钢板+73cm砼	增加15cm钢板	73cm砼+25cm钢板
南墙	140cm砼	无	140cm砼
东墙主束区	135cm重砼	增加55cm砼	135cm重砼+55cm砼
东墙非主束区	135cm砼	无	135cm砼
西墙迷道外墙北段(内口处）	75cm砼	增加26cm铅砖	75cm砼+26cm铅砖
西墙非主束区（南侧）	210cm砼	无	210cm砼
西墙主束区	210cm砼	增加5cm钢板	210cm砼+5cm钢板
西墙迷路内墙	135cm砼	无	135cm砼
顶板主束区	50cm砼	增加150cm砼	200cm砼
顶板非主束区	50cm砼	增加72cm砼	122cm砼
防护门	更换新的防护门	/	内、外侧3mm钢板，内部采用18mm铅

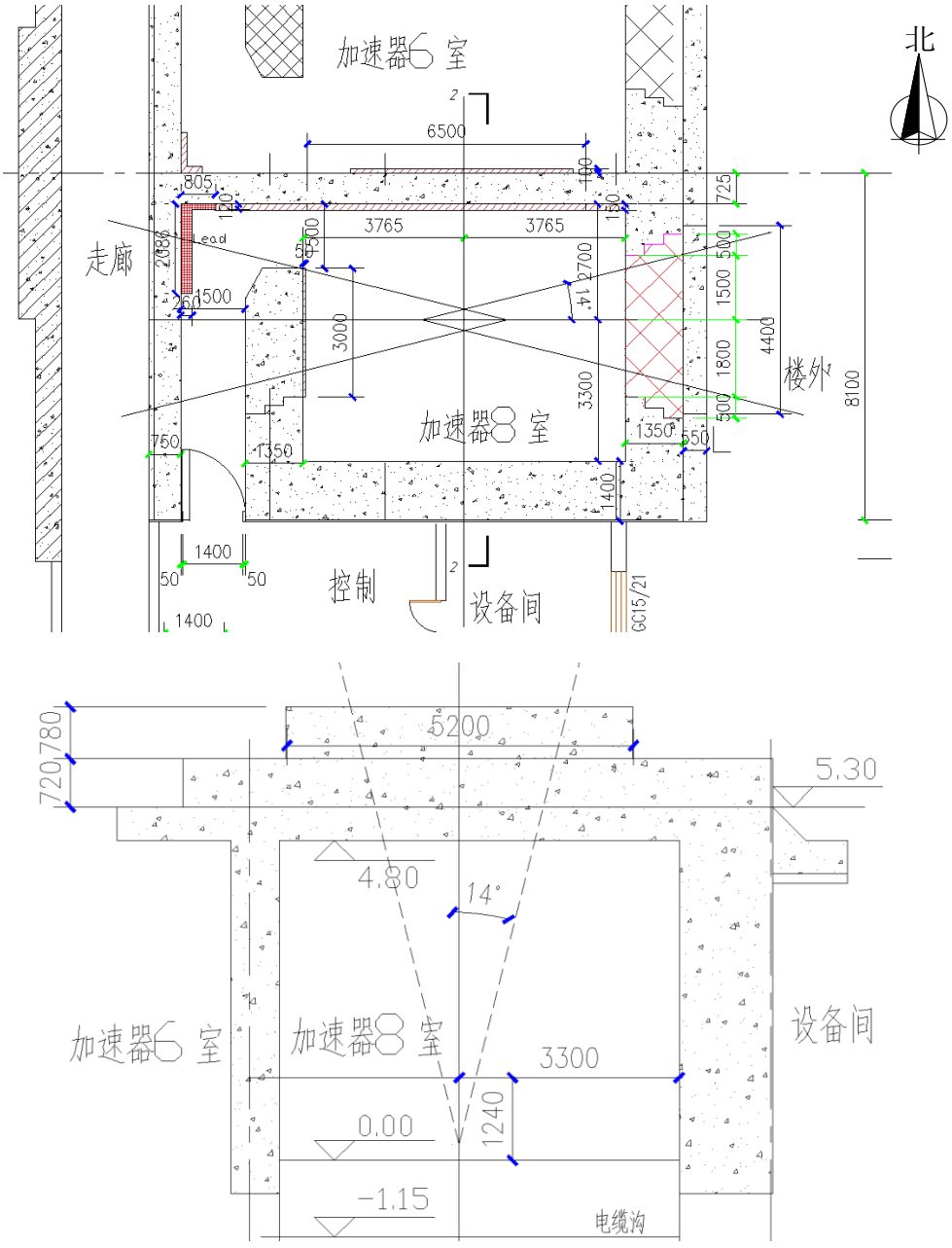
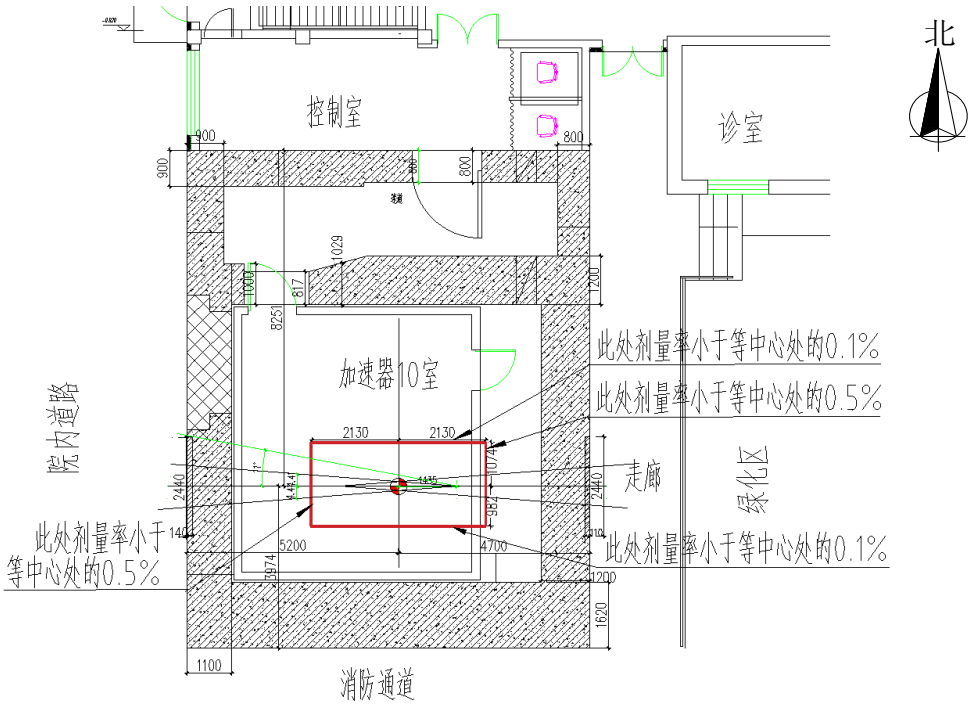


图 10-4　加速器 8 室平剖面图

表 10-4　加速器 10 室屏蔽设计情况一览表

加速器10室（机房室内面积51.7m²,室内净高度4.5m）	
屏蔽建筑	**屏蔽材料及厚度**
东墙主束区	109cm重砼+11cm铅砖（宽度244cm）
东墙非主束	120cm重砼
西墙主束区	96cm重砼+14cm铅砖（宽度244cm）
西墙非主束（南段）	110cm重砼

西墙非主束（北段）	110cm重砼
南墙	162cm重砼
北墙迷道内墙	120cm重砼
北墙迷道外墙（东段）	80cm重砼
北墙迷道外墙（西段）	90cm重砼
顶板主束区	200cm重砼（宽度200cm）
顶板非主束区	160cm重砼
防护门	内、外侧3mm钢板，内部采用18mm铅



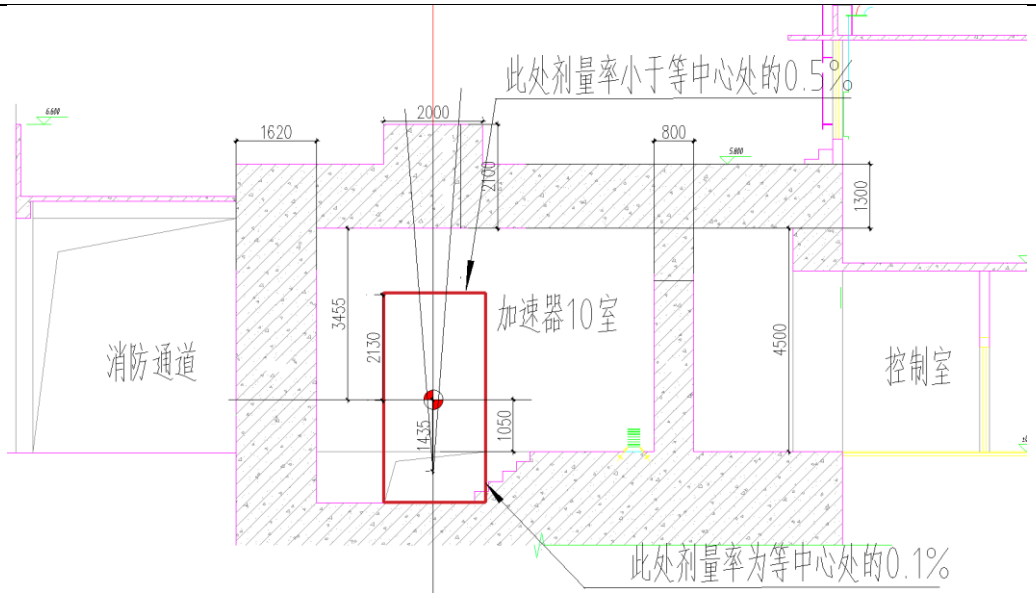


图 10-5　加速器 10 室（核磁加速器室）平剖面图

10.1.2 辐射防护措施

（1）加速器机房(包括防护门）采用实体屏蔽措施，能够保证机房周围墙体和防护门外 30cm 处辐射剂量率不大于 2.5μSv/h，辐射工作人员和公众的受照剂量满足剂量约束要求。

（2）加速器放射工作场所实行分区管理：加速器机房为控制区，控制室和配套设备间为监督区。

（3）在加速器防护门外拟设立电离辐射警告标志和中文警示说明。安装工作状态指示灯，并和设备出束关联。

（4）拟安装电视监控、对讲系统，在治疗过程中能够观察病人状况，此外，也可以观察治疗室是否有人员滞留。

（5）辐射工作人员进入加速器机房将佩戴个人剂量计。

（6）每个加速器室电动防护门具有防夹人功能，拟安装红外光幕装置，可有效防止人员被挤压，停电时能够手动开启，使病人安全转移，4 间加速器机房门均为单向电动平开门。

（7）治疗系统采用数字密码或者专用钥匙启动，由专人操作设备。

（8）设置门机安全联锁：只有当防护门关闭，设备才能出束；反之，如果照射过程中防护门打开，系统将自动停止出束。

（9）紧急停机按钮：紧急停机按钮安装在控制室的操作台上（1 个）、加速器设备上（2 个）、加速器治疗室的墙壁上（至少 2 个）和迷道内 1 个，并有

明显的标志，当遇到意外情况，可随时按动急停开关，切断设备高压，停止出束。紧急停止开关必须采用手动方式才能复位。

（10）门控按钮设置：在控制室墙上拟安装开关门按钮，在防护门内侧迷道墙壁上安装开门按钮（无关门按钮）。

（11）加速器室内拟安装通风换气系统。换气次数不低于 4 次/h。送风口设置在机房顶部，排风口设置在机房墙体下侧 30cm 处。

（12）机房内安装固定式辐射剂量监测报警仪器（探头拟安装在主束区旁墙上），用于监测机房内的辐射水平并帮助辐射工作人员判断设备的工作状态。每个加速器场所分别配置 2 台个人剂量报警仪。

（13）排风管道由迷道并在防护门上方采用“Z”方式穿出机房。线缆采用“U”型方式穿过屏蔽墙。

（14）其他要求：治疗室安装应急照明装置，设火灾自动报警装置等。

（15）本项目加速器顶是不需要人员到达并设有双门双锁才能进入，且医务处和放疗科各存放一个门的钥匙，只有两个门都打开才能进入加速器顶。

加速器联锁和警示系统的设计见图 10-6 所示，4 间加速器机房联锁和安全措施等布置见图 10-7。

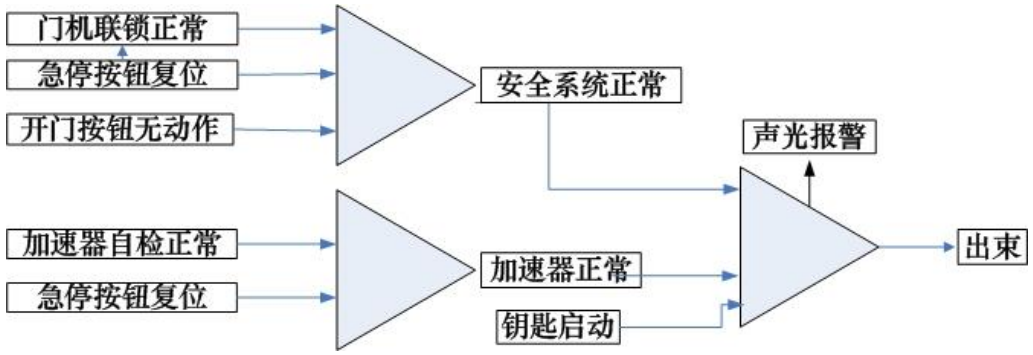
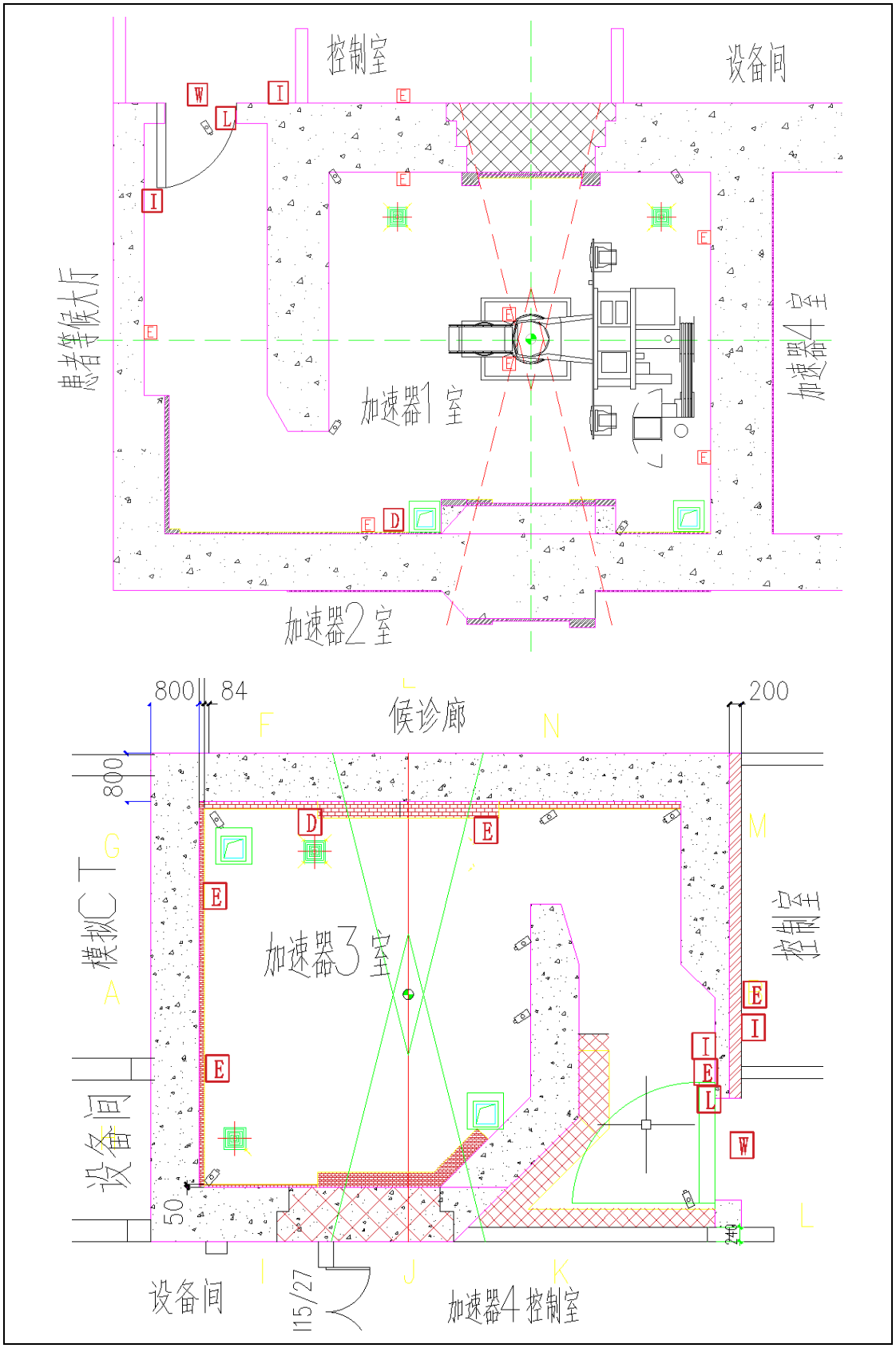


图 10-6　加速器机房联锁系统逻辑图


控制室
设备间
患者等候大厅
加速器1室
加速器4室
加速器2室
800
84
候诊廊
200
800
模拟CT
加速器3室
设备间
50
115/27
设备间
加速器4控制室

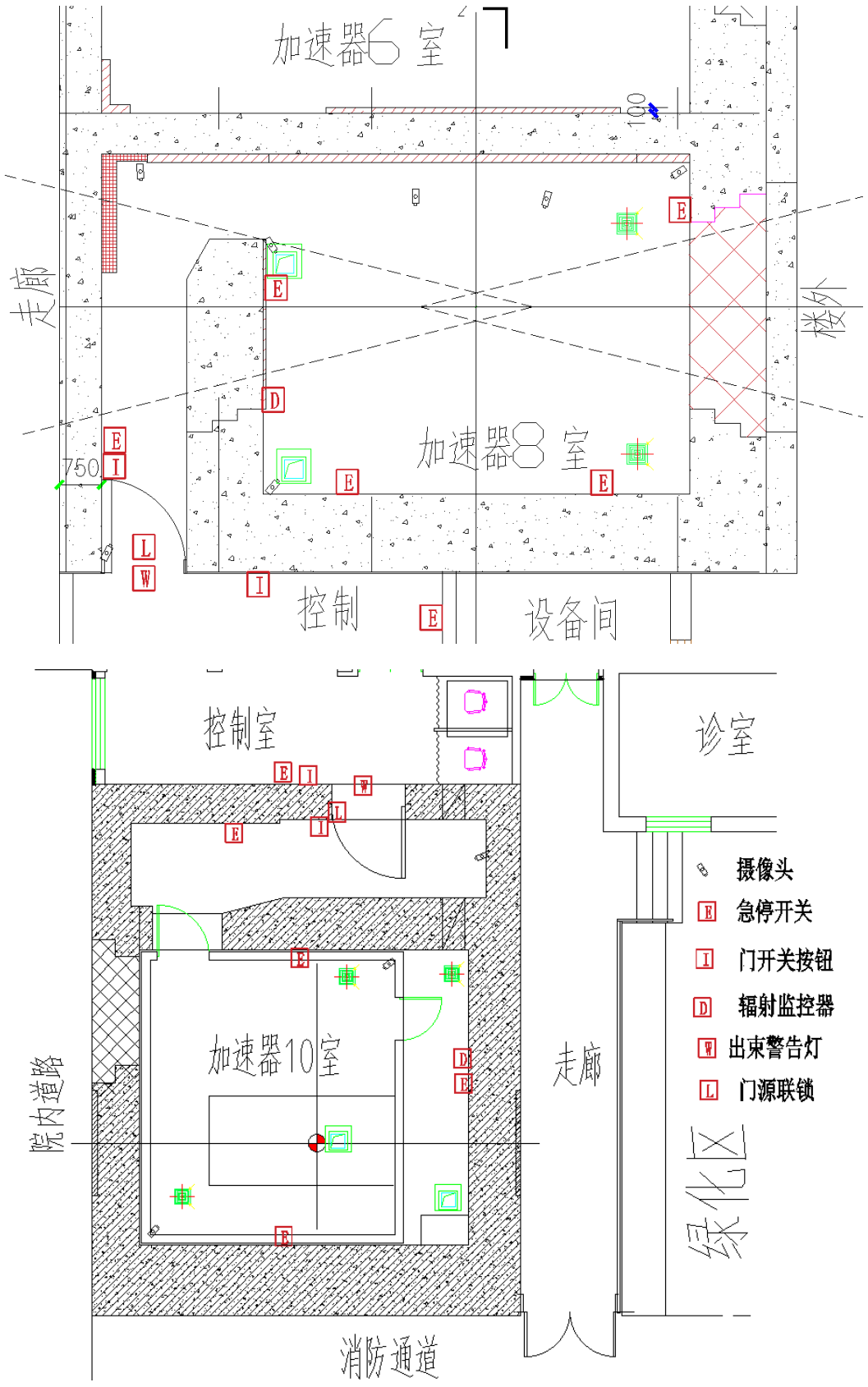


图 10-7　加速器机房联锁和安全措施布置图

10.1.3 工作场所安全防护设施管理

工作场所安全与防护设施设计要求见表 10-5。

表 10-5　加速器室辐射安全防护设施设计要求

序号	项目	检查内容	是否拟设置	备注
1*	A 控制台及安全联锁	防止非工作人员操作的锁定开关	√	钥匙和密码
2*		控制台有紧急停机按钮	√	每个控制台1个
3*		视频监控与对讲系统	√	每个机房1套
4*		治疗室门与高压联锁	√	门机高压联锁
5*	B 警示装置	入口电离辐射警告标志	√	门上设有电离辐射警示标志
6*		入口有加速器工作状态显示	√	工作状态指示灯
7*		工作场所分区及标识	√	地面不同颜色分为控制区和监督区
8*	C 治疗室紧急设施	屏蔽门内开门按钮	√	迷道门内侧
9		治疗室门防夹人装置	√	具有防夹功能和停电手动开启功能
10*		紧急照明或独立通道照明系统	√	应急照明
11*		治疗室内有紧急停机按钮	√	每间加速器室墙上至少 2 个紧急停机按钮
12*		治疗床有紧急停机按钮	√	治疗床2个，机架上1个
13	D 监测设备	治疗室内固定式剂量报警仪	√	1台，型号待定
14*		便携式辐射监测仪器仪表	√	与现有场所共用1台
15*		个人剂量报警仪	√	2台/每个场所，型号待定
16*		个人剂量计	√	每人1个
17*	E 其它	个人辐射防护用品	√	/
18		通风系统	√	每间机房屋顶设风机1台

注：加*的项目是重点项，有“设计建造”的划√，没有的划×，不适用的划/。

10.1.4 法规符合情况

依据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》规定，现对医科院肿瘤医院从事本项目辐射活动能力评价列于表 10-6 和表 10-7。

10.1.4.1 对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求的满足情况

表 10-6 汇总列出了本项目对照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》对使用放射性同位素和射线装置单位承诺的对应检查情况。

表 10-6　项目执行“安全许可管理办法”要求对照表

序号	环保部 3 号令要求	本单位落实情况	是否符合要求
1	应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	已成立辐射防护领导小组，并在该机构设有本科以上学历的专职管理人员。	符合
2	从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。	放疗科现有辐射工作人员 93 人，其中物理师 22 名，技师 67 名、本项目本项目启用后，每台设备拟固定配备 5-6 名技师，现有的 67 名技师能够满足 11 台放射治疗设备的配置需要，由于受到疫情的影响，医院于 2020 年已分批次参加了辐射防护与安全知识考核，其中 36 名辐射工作人员已重新取得考核合格证。	符合
3	使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体防卫要求的放射源暂存库或设备。	本项目不涉及放射性同位素。	符合
4	放射性同位素与射线装置使用场所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射要求的安全措施。	已制定相应的操作规程，防护门外拟设置电离辐射警告标志，拟安装工作状态指示灯；拟安装急停按钮、巡检按钮、监控对讲等安全防护设施。	近期符合
5	配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量监测报警、辐射监测等仪器。	辐射工作人员配备个人剂量计，拟配置 8 台个人剂量报警仪和 4 套固定式剂量监测报警仪。	近期符合
6	有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	拟完善现有的规章制度、操作规程、岗位职责及辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训计划、监测方案等。	近期符合
7	有完善的辐射事故应急措施。	在现有事故应急措施上，根据新建项目的需要，拟制定更为完善的辐射事故应急处	近期符合

		理预案。	

10.1.4.2 对《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求的满足情况

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》对使用射线装置和放射性同位素的单位提出了具体条件，本项目具备的条件与安全和防护管理办法要求的对照检查如表 10-7 所示。

表 10-7　项目执行“安全和防护管理办法”要求对照表

序号	安全和防护管理办法要求	本单位落实情况	是否符合要求
1	第五条 生产、销售、使用、贮存放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定设置明显的放射性标志，其出口处应当按照国家有关安全和防护标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全联锁、报警装置或者工作信号。	在机房门外拟设有出束工作状态指示灯，防护门外贴有电离辐射警告标志，设置安全和防护设施以及必要的防护安全联锁、报警装置等。	近期符合
2	第七条 放射性同位素和被放射性污染的物品应当单独存放，不得与易燃、易爆、腐蚀性物品等一起存放，并指定专人负责保管。	本项目不涉及放射性同位素。	符合
3	第九条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。	委托有辐射水平监测资质单位每年对辐射工作场所及其周围环境进行1次监测。	符合
4	第十二条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当对本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年1月31日前向发证机关提交上一年度的评估报告。	承诺每年1月31日前向生态环境部门提交年度评估报告。	符合
5	第十七条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲，对直接从事生产、销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗。	放疗科现有辐射工作人员93人，其中物理师22名，技师67名、本项目本项目启用后，每台设备拟固定配备5-6名技师，现有的67名技师能够满足11台放射治疗设备的配置需要，由于受到疫情的影响，医院于2020年已分批次参加了辐射防护与安全	符合

		知识考核，其中36名辐射工作人员已重新取得考核合格证。	
6	第二十三条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测；发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。	为所有从事放射性工作的人员配备个人剂量计，并委托有资质单位进行个人剂量监测（每季度1 次）。	符合
7	第二十四条 生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，不具备个人剂量监测能力的，应当委托具备条件的机构进行个人剂量监测。	委托有资质单位对辐射工作人员进行个人剂量监测。	符合

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

10.2 三废的治理

根据《电子加速器放射治疗放射防护要求》（GBZ126-2011）等相关标准要求，X 射线大于 10MV 的加速器，才需考虑中子辐射及中子俘获 γ 射线等活化影响，本项目使用的加速器最大 X 射线为 7MV，故本项目不考虑放射性三废的影响。

表 11　环境影响分析

11.1 建设期环境影响

该项目施工活动对环境的影响主要是机房建设过程中产生的噪声、粉尘以及振动等，为了不影响周围环境，在机房建设过程中，将采取一些降噪、防尘措施。如在施工现场设置隔离带、设立声障，这样既可有效的减少扬尘的污染，又可降低噪声；合理安排施工时间，对振动较大的施工，尽量安排在下班或节假日进行。本项目是在已有的厂房内建设混凝土屏蔽机房，工程量小，基本不影响周围其他单位的正常工作。

11.2 运行期环境影响

本项目工程建设施工和设备安装过程不产生放射性污染，本次评价主要关注设备投入运行后的环境影响。

11.2.1 加速器参数和使用规划

（1）4 间加速器室的建设内容

1）将加速器 1 室原有的 1 台 Primus 型加速器（医科达公司产，10MV，600cGy/min）报废，更新为 1 台 Elekta Infinity 型医用电子直线加速器（医科达公司产，6MV，600cGy/min）。

2）将加速器 3 室原有的 1 台 BJ-6B-400 型加速器（北京医疗器械研究所产，6MV，600cGy/min）报废，更新为 1 台 Elekta Synergy 型医用电子直线加速器（医科达公司产，6MV，600cGy/min）。

3）将加速器 8 室原有的 1 台 Clinac 600CD 型加速器（瓦里安公司产，6MV，600cGy/min）报废，更新为 1 台 Elekta Versa HD 型医用电子直线加速器（医科达公司产，6MV，FFF：1400cGy/min）。

4）对放疗楼内西南侧医疗用房进行改造，新建加速器 10 室（核磁加速器室），新增使用 1 台医科达 Elekta Unity 型核磁加速器（7MV，500cGy/min）。

（2）机房所在位置

4 间加速器室位于放疗楼的东侧，毗邻关系见表 11-1 所示，机房楼下为土层，楼上是无人值守的平台，无人停留（设有双门双锁才能进入），加速器机房布局见附图 3 所示。

表 11-1　4 间加速器室的毗邻关系表

场所	东侧	南侧	西侧	北侧	室顶	地下
加速器 1 室	加速器 4 室	加速器 2 室	大厅	控制室、设备间	无建筑	无建筑
加速器 3 室	3 室控制室	4 室控制室、设备间	CT 模拟机室	候诊走廊	无建筑	无建筑
加速器 8 室	院内道路	8 室控制室、设备间	走廊	加速器 6 室	无建筑	无建筑
加速器 10 室	院内绿化区	消防通道	院内道路	控制室、候诊区	无建筑	无建筑

（3）设备参数

4 间加速器室拟使用的医用电子直线加速器技术指标如表 11-2 所示。

表 11-2　拟使用直线加速器技术指标一览表

场所	型号	最大能量	X 线能量和最大输出剂量率	SSD	照射野	机架旋转范围	泄漏率
加速器 1 室	Elekta Infinity	15MeV	6MV：600cGy/min	100cm	最大照射野 40cm×40cm	360°	≤0.1%
加速器 3 室	Elekta Synergy	18MeV	6MV：600cGy/min	100cm	最大照射野 40cm×40cm	360°	≤0.1%
加速器 8 室	Elekta Versa HD	15MeV	6MV：600cGy/min；（FFF：1400cGy/min）	100cm	最大照射野 40cm×40cm	360°	≤0.1%
加速器 10 室	Elekta Unity	/	7MV FFF：500cGy/min	143.5cm	最大照射野 57.4cm×22cm	360°	原射线穿射率：0.5%；机头漏射线率：0.1%

（4）使用规划

1）出束时间：既开展常规放射治疗，也开展 IMRT 等调强放射治疗，患者比例约为 1：9，根据医院提供资料，每台加速器预期每天最多治疗 100 人次（核磁加速器 80 人次），500 人次/周（核磁加速器 400 人次/周）。常规放射治疗在平均的 400cGy/min 照射条件下，平均每人待照射区照射 2Gy，用时 0.5min，加速器日治疗 100 人时出束时间为 50min/d，年总照射时间 208h/a；适形调强放射治疗（IMRT）等调强放射治疗与普通放疗相比给予患者的吸收剂量是相同的，但等中心处照射野会明显小，使用 VMAT 技术适形调强治疗时，调强因子取 3（常规调强 IMRT 因子取 5），本项目 4 台加速器不同射线束的出束时间见表 11-3。

表 11-3　放射治疗出束时间

射线束	照射时间（h）							
	天总出束时间				年总照射时间			
	1 室	3 室	8 室	10 室	1 室	3 室	8 室	10 室
有用束、散射辐射	0.83	0.83	0.83	0.67	208	208	208	166
泄漏辐射	2.49	2.49	2.49	1.99	624	1040	624	498

备注：本项目剂量水平是按最大值进行估算的，对应的出束时间低于表 11-3 的值。

2）利用因子：对于常规治疗，机头 90°、270°和 180°(朝上）出束时间各占年工作量 10%；机头向下（0°）出束时间占年工作量 70%。考虑调强治疗的使用，将机头为 90°、270°和 180°（朝上）出束时间的占比提高至 15%，机头向下（0°）出束时间占年工作量的 55%。以此保守估算周围公众受照剂量。

11.2.2 辐射环境影响评价方法

（1）加速器机房剂量率和年附加剂量：采用 NCRP151、GBZ/T 201.2-2011 进行剂量率估算。具体做法：依据其屏蔽设计估算模式，以等中心点的剂量率替代周工作负荷，转化为辐射剂量率水平估算，最终导出机房周围辐射剂量率水平，再根据加速器出束时间、使用因子、居留因子等估算辐射工作人员和公众的附加剂量。根据 NCRP151 报告，以 6MV/7MV X 射线为屏蔽对象，不考虑中子以及感生放射性。

（2）各屏蔽墙防护的主要对象：

有用束能直接投射到的区域：考虑穿过自屏蔽铅板的有用束和进入该区的泄漏辐射；

与有用束投射区域连接的区域：考虑泄漏辐射和有用束模体散射辐射；

其他区：考虑泄漏辐射（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 附录 D.2 的相关要求，可忽略患者散射辐射）。

11.2.3 加速器的屏蔽估算

（1）主屏蔽墙宽度安全性分析：

加速器 1 室、3 室和 8 室加速器有用束最大张角为 28°（核磁加速器最大张角不大于 8.8°），根据公式 11-1 可估算出主束所需的宽度。

$$d=2[（SAD+R）\times\tan\theta°+0.3] \quad （11\text{-}1）$$

式中：*d*—机房有用束主屏蔽区的宽度，m；*SAD*—源轴距，取 1m/1.435m；θ—治疗束的最大半张角（相对束中的轴线），本项目 1 室、3 室和 8 室加速器取 14°，核磁加速器取 4.4°；*R*—等中心点至与主屏蔽墙相连接的次屏蔽墙内表面或到外凸式主屏蔽墙外表面顶部的距离，m。

加速器机房屏蔽结构设计平剖面见图 11-1~图 11-4，根据公式 11-1 估算结果见表 11-4，本项目加速器机房各主束区屏蔽宽度都满足要求。

表11-4　各主束屏蔽区宽度计算结果

位置	R（m）	所需最小宽度（m）	现有宽度（m）	结论
1 室北墙主束区	3.22	1.35（半宽度）	1.35（半宽度）	满足
1 室南墙主束区	3.2	2.69	3.4	满足
1 室顶主束区	4.4	3.29	3.3	满足
3 室北墙主束区	3.08	2.63	3.0	满足
3 室南墙主束区	3.14	1.33（半宽度）	1.5（半宽度）	满足
3 室顶主束区	4.85	3.52	4.2	满足
8 室东墙主束区	5.11	1.83（半宽度）	2.0（半宽度）	满足
8 室顶主束区	5.56	3.87	5.2	满足
10 室东墙主束区	4.7	1.54	2.44	满足
10 室西墙主束区	5.2	1.62	2.44	满足
10 室顶主束区	5.55	1.67	2.0	满足

（2）辐射源项：以 6MV/7MV X 射线为屏蔽对象，不需考虑中子及感生放射性问题；设备带有 kV 级的影像定位引导设备，对周围环境辐射影响远小于 6MV/7MV X 射线，因此，本项目机房只考虑 6MV/7MV X 射线的屏蔽问题。

（3）屏蔽估算中的安全余量

在所选用的屏蔽估算与评价方法中，包含着一定的安全因素。例如：工作负荷、居留因子、治疗装置的实际辐射防护相关剂量指标严于国家标准；使用辐射源的实际工作条件低于额定条件；人员实际驻留位置不局限于治疗机房外表面 30cm 的估算位置，以及估算的量值和有效剂量之间不进行量值转换系数

修正等。

11.2.4 机房外剂量率估算

（1）加速器室周围辐射水平的估算

1）主束贯穿辐射对加速器室周围环境剂量率的贡献

主屏蔽墙利用下列公式对初级辐射进行屏蔽估算

$$H = H_0 \times B_{pri} / R^2 \qquad (11\text{-}2)$$

$$B_{pri} = 10^{-\left[1+\frac{t-TVL_1}{TVL_e}\right]} \qquad (11\text{-}3)$$

式中： H_0－6MV X 射线有用束距靶 1m 等中心处的最大剂量率为 3.6×10^8μGy/h（加速器 8 室：8.4×10^8μGy/h）；

B_{pri}－主屏蔽墙厚度对应的衰减因子；

R－参考点至靶点的距离；

TVL_e、TVL_1－平衡什值层和第一什值层厚度，单位 cm；详见表 11-5。

根据 NCRP 151 报告，其中核磁加速器是最高 X 射线为 7MV FFF，什值层根据 6MV-25MV 现有数据拟合。6MV/7MV X 射线在混凝土和铅板中的 TVL 值见表 11-5。

表 11-5　6MV/7MV X 射线束在混凝土和铅中的 *TVL* 值

射线束		初级束		泄漏辐射		30° 人体散射
十分之一衰减厚度		TVL_1	$TVLe$	TVL_1	$TVLe$	TVL
混凝土厚度，cm	6MV	37	33	34	29	26
	7MV	38	35	34	31	31（15°，FFF）
铅，cm（6MV）		5.7	5.7	5.7	5.7	4.4
钢，cm（6MV）		10	10	10	10	7.7

2）次束贯穿辐射对加速器室周围环境剂量率的贡献

初级辐射束不能直接到达该屏蔽墙，屏蔽估算时，与主束区直接相连的次屏蔽区考虑泄漏辐射和主射线束方向的散射辐射，其他区域仅考虑泄漏辐射。

次屏蔽墙的散射辐射利用下列公式进行屏蔽估算：

$$H_{ps} = \frac{H_0 B_{ps} \alpha \frac{F}{400}}{(d_{sca} \times d_{sec})^2} \qquad (11\text{-}4)$$

$$B_{ps} = 10^{-\frac{t}{TVL_{sca}}} \quad (11\text{-}5)$$

式中：H_{ps}－距散射体 d_{sec}m 处的辐射剂量率；

H_0－有用束距靶 1m 的等中心处的 X 射线最大剂量率为 3.6×10^8μGy/h（加速器 1 室和加速器 8 室：8.4×10^8μGy/h）；

B_{ps}－次屏蔽墙厚度对应的衰减因子；

α－6MVX 射线 30° 方向散射体表对初级辐射束的散射比取 2.77×10^{-3}；

F－被照射物体等中心 1m 处照射野面积，取 40×40cm²；

t－次屏蔽墙的屏蔽厚度，cm；

TVL_{sca}－什值层厚度，cm，详见表 11-5。

次屏蔽墙泄漏辐射利用下列公式进行屏蔽估算：

$$H_L = \frac{H_0 B_L}{1000 d_L^{\ 2}} \quad (11\text{-}6)$$

$$B_L = 10^{-\left[1+\frac{t-TVL_1}{TVL_e}\right]} \quad (11\text{-}7)$$

式中：H_L－距靶点 d_L m 处的辐射剂量率；

H_0－有用束距靶 1m 的等中心处的 X 射线最大剂量率为 3.6×10^8μGy/h（加速器 1 室和加速器 8 室：8.4×10^8μGy/h）；

B_L－次屏蔽墙厚度对应的衰减因子；

TVL_e、TVL_1－平衡什值层和第一什值层厚度，单位 cm；详见表 11-5。

3）加速器室屏蔽核算结果

a）医院电子加速器

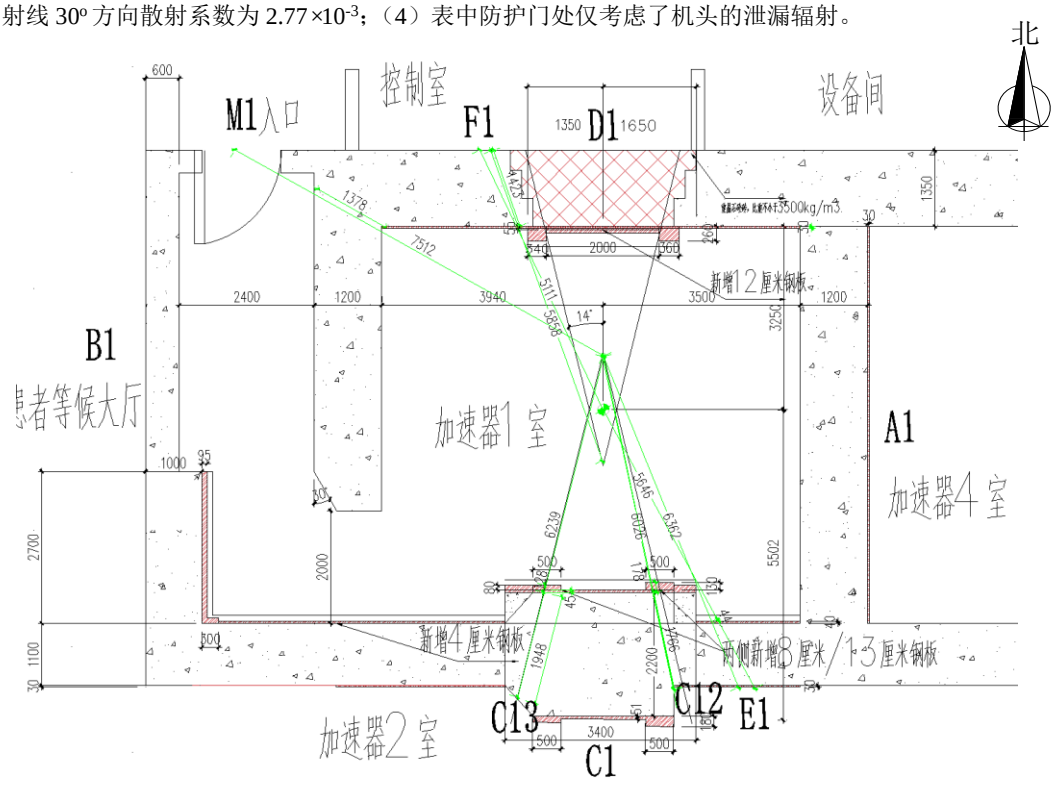
在防护墙外辐射剂量水平估算中，泄漏辐射因子为 1×10^{-3}，6MV X 射线在混凝土、铅板、钢板中的 *TVL* 值见表 11-5。根据 NCRP 151 报告，加速器 1 室、加速器 3 室和加速器 8 室外关注点剂量率估算结果见表 11-6~表 11-8，3 间加速器室平剖面图及剂量评估点见图 11-1~图 11-3。

表 11-6　加速器 1 室外关注点剂量率估算结果

位置	距离（m）	射线束	辐射屏蔽		剂量率（μGy /h）		位置描述
			厚度，cm	衰减因子	屏蔽前	屏蔽后	
A1	5.0	次束（漏射）	120（砼）+3（钢板）	5.43E-5	1.44E+4	7.80E-1	加速器 4 室
B1	8.4	次束（漏射）	180（砼）	9.24E-7	5.10E+3	4.71E-3	等候大厅

C1	6.8	主束	220（砼）+9.6（钢板）	3.12E-8	7.80E+6	2.43E-1	加速器 2 室
C12	6.3	主束	17.8（钢板）+176（砼）	7.70E-8	9.09E+6	6.99E-1	加速器 2 室
C13	6.5	主束	12.8（钢板）+195（砼）	6.47E-8	8.53E+6	5.53E-1	加速器 2 室
D1	5.9	主束	17.5（钢板）+135（重砼）	1.44E-8	1.03E+7	1.49E-1	控制室
E1	6.7	次束（漏射）	121（砼）+7.7（钢板）	1.70E-5	8.01E+3	1.36E-1	加速器 2 室
	5.9	次束（散射）	121（砼）+7.7（钢板）	1.57E-6	5.61E+4	8.87E-2	
F1	6.2	次束（漏射）	142（砼）+3.1（钢板）	9.24E-6	9.39E+3	8.66E-2	控制室
	5.3	次束（散射）	142（砼）+3.1（钢板）	1.40E-6	6.99E+4	9.77E-2	
M1	7.8	次束（漏射）	138（砼）+1.4（铅板）	1.47E5	5.91E+3	8.70E-2	防护门外
H1	5.7	主束	140（砼）+16（钢板）	1.90E-6	1.11E+7	2.10E+1	楼顶无人区
I1	5.2	次束（漏射）	80.1（砼）+12.8（钢板）	1.35E-4	1.33E+4	1.80	楼顶无人区
	4.3	次束（散射）	82.2（砼）+13.3（钢板）	3.03E-6	2.16E+5	6.56E-01	
I11	4.3	次束（漏射）	82.8（砼）+13.3（钢板）	9.75E-5	1.95E+4	1.89	楼顶无人区

注：（1）混凝土（砼）的密度取为 2.35 t/m^3，重砼的密度不低于 3.5t/m^3；计算屏蔽衰减因子时将重砼折算成等效砼厚度；（2）6MV X 射线有用束距靶 1m 的等中心处的最大剂量率为 360 **Gy** /h；（3）6MV X 射线 30^o 方向散射系数为 2.77×10^{-3}；（4）表中防护门处仅考虑了机头的泄漏辐射。



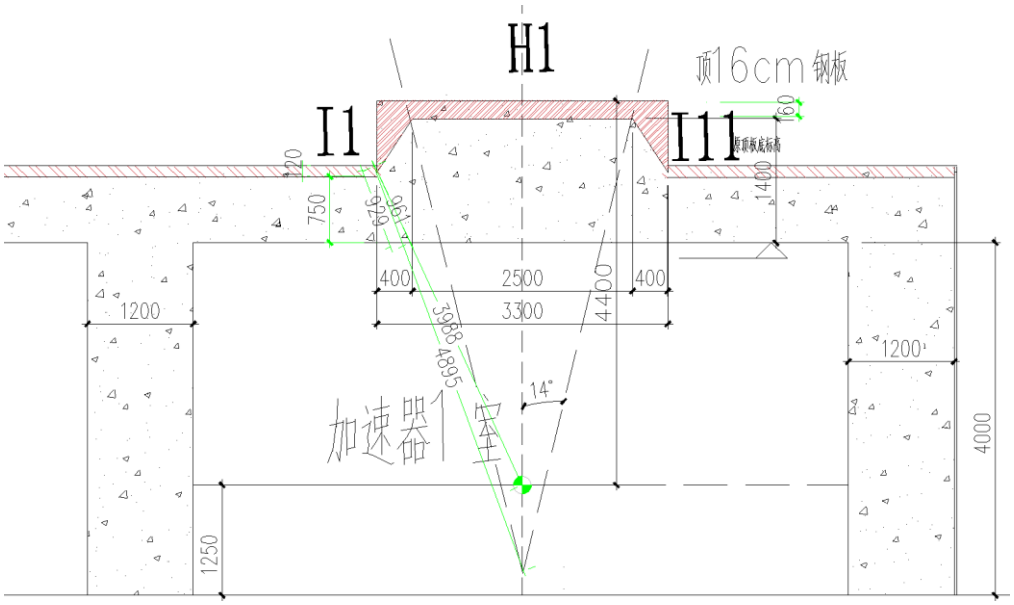


图 11-1　加速器 1 室平剖面图及剂量评估点

表 11-7　加速器 3 室外关注点剂量率估算结果

位置	距离（m）	射线束	辐射屏蔽		剂量率（μGy /h）		位置描述
			厚度，cm	衰减因子	屏蔽前	屏蔽后	
A3	5.8	次束（漏射）	104（砼）+20（钢板）	3.86E-6	1.07E+4	4.13E-2	控制室
A31	6.1	次束（漏射）	83.0（砼）+20.9（钢板）	2.09E-5	9.67E+3	2.02E-1	控制室
B3	4.6	次束（漏射）	9.1（铅砖）+80（砼）	6.57E-5	1.74+4	1.12	模拟 CT 室
C3	4.4	主束	25（铅砖）+90（重砼）	3.58E-9	1.86E+7	6.65E-2	加速器 4 控制室
C31	6.3	主束	29.5（铅砖）+96.3（砼）+25.2 砖	2.51E-9	9.07E+6	2.28E-2	加速器 4 控制室
D3	5.3	主束	27（铅砖）+80（砼）	6.90E-8	1.28E+7	8.84E-1	候诊廊
E3	5.9	次束（漏射）	5.7（铅砖）+100（砼）	5.30E-5	1.03E+4	5.48E-1	设备间
	5.1	次束（散射）	6.0（铅砖）+106（砼）	2.21E-6	7.53E+4	1.66E-1	
F3	6.2	次束（漏射）	13.3（铅砖）+84.8（砼）	8.22E-6	9.37E+3	7.70E-2	候诊廊
	5.3	次束（散射）	13.3（铅砖）+84.8（砼）	1.73E-7	6.98E+4	1.21E-2	
M3	6.2	次束（漏射）	84.2（砼）+53.2（重砼）+1.4（铅板）	2.02E-6	9.37E+3	1.90E-2	防护门外
H3	6.2	主束	240（砼）	7.05E-8	9.37E+6	6.61E-1	楼顶无人区

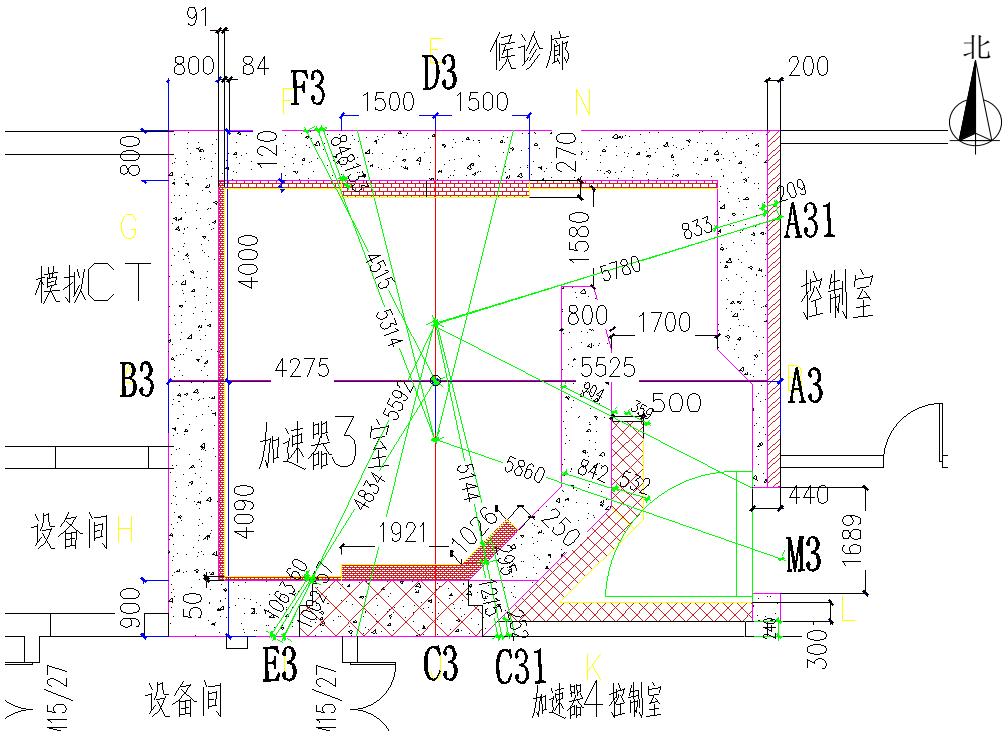
I3	5.7	次束（漏射）	150（砼）	1.00E-5	1.11E+4	1.11E-1	楼顶无人区
	4.8	次束（散射）	158（砼）	8.38E-7	8.50E+4	7.12E-2	

注：（1）混凝土（砼）的密度取为 2.35 t/m^3，重砼的密度不低于 3.5t/m^3；计算屏蔽衰减因子时将重砼折算成等效砼厚度；

（2）6MV X 射线有用束距靶 1m 的等中心处的最大剂量率为 360**Gy** /h；

（3）6MV X 射线 30^o 方向散射系数为 2.77×10^{-3}；

（4）表中防护门处仅考虑了机头的泄漏辐射。



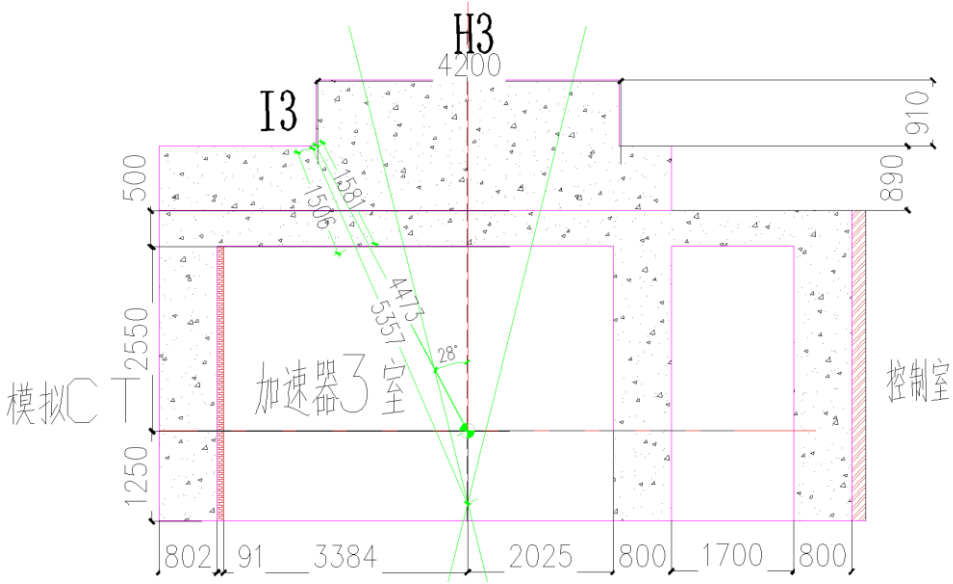


图 11-2　　加速器 3 室平剖面图及剂量评估点

表 11-8　加速器 8 室外关注点剂量率估算结果

位置	距离（m）	射线束	辐射屏蔽		剂量率（μGy/h）		位置描述
			厚度，cm	衰减因子	屏蔽前	屏蔽后	
A8	7.0	主束	135（重砼）+ 55（砼）	2.31E-8	1.71E+7	3.96E-1	楼外
B8	8.7	主束	210（砼）+5（钢板）	1.44E-8	1.11E+7	1.60E-1	走廊
B81	8.9	主束	26.8（铅砖）+5.1（钢板）+75（砼）	3.28E-8	1.06E+7	3.46E-1	走廊
C8	7.3	次束（漏射）	202（砼）	1.61E-7	1.58E+4	2.54E-3	楼外
	6.5	次束（散射）	202（砼）	1.70E-8	1.08E+5	1.84E-3	
D8	4.7	次束（漏射）	140（砼）	2.21E-5	3.80E+4	8.41E-1	设备间
E8	3.8	次束（漏射）	25（钢板）+72.5（砼）	1.49E-5	5.82E+4	8.65E-1	加速器 6 室
E81	4.1	次束（漏射）	16.6（钢板）+79.9（砼）	3.84E-5	5.00E+4	1.92	加速器 6 室
F8	5.3	次束（漏射）	22.1（钢板）+105.2（砼）	1.45E-6	2.99E+4	4.35E-2	加速器 6 室
	4.6	次束（散射）	18.6（钢板）+91.2（砼）	2.21E-8	3.76E+5	8.32E-3	
M8	8.4	次束（漏射）	161（砼）+1.8（铅板）	2.02E-6	1.19E+4	2.40E-2	防护门外
H8	6.8	主束	200（砼）	1.15E-6	1.82E+7	2.09E+1	楼顶无人区
I8	6.4	次束（漏射）	138.7（砼）	2.45E-5	2.05E+4	5.03E-1	楼顶无人区
	5.8	次束（散射）	133.3（砼）	7.46E-6	1.36E+5	1.01	

注：（1）混凝土（砼）的密度取为 2.35 t/m^3，重砼的密度不低于 3.5t/m^3；计算屏蔽衰减因子时将重砼折算成等效砼厚度；

（2）6MV X 射线有用束距靶 1m 的等中心处的最大剂量率为 840 **Gy** /h；

（3）6MV X 射线 30º 方向散射系数为 2.77×10^{-3}， 53º *TVL* $_{砼}$=22cm、*TVL* $_{钢}$=5.3cm、53º 方向散射系数为 4.82×10^{-3}（内插所得）；

（4）表中防护门处仅考虑了机头的泄漏辐射。

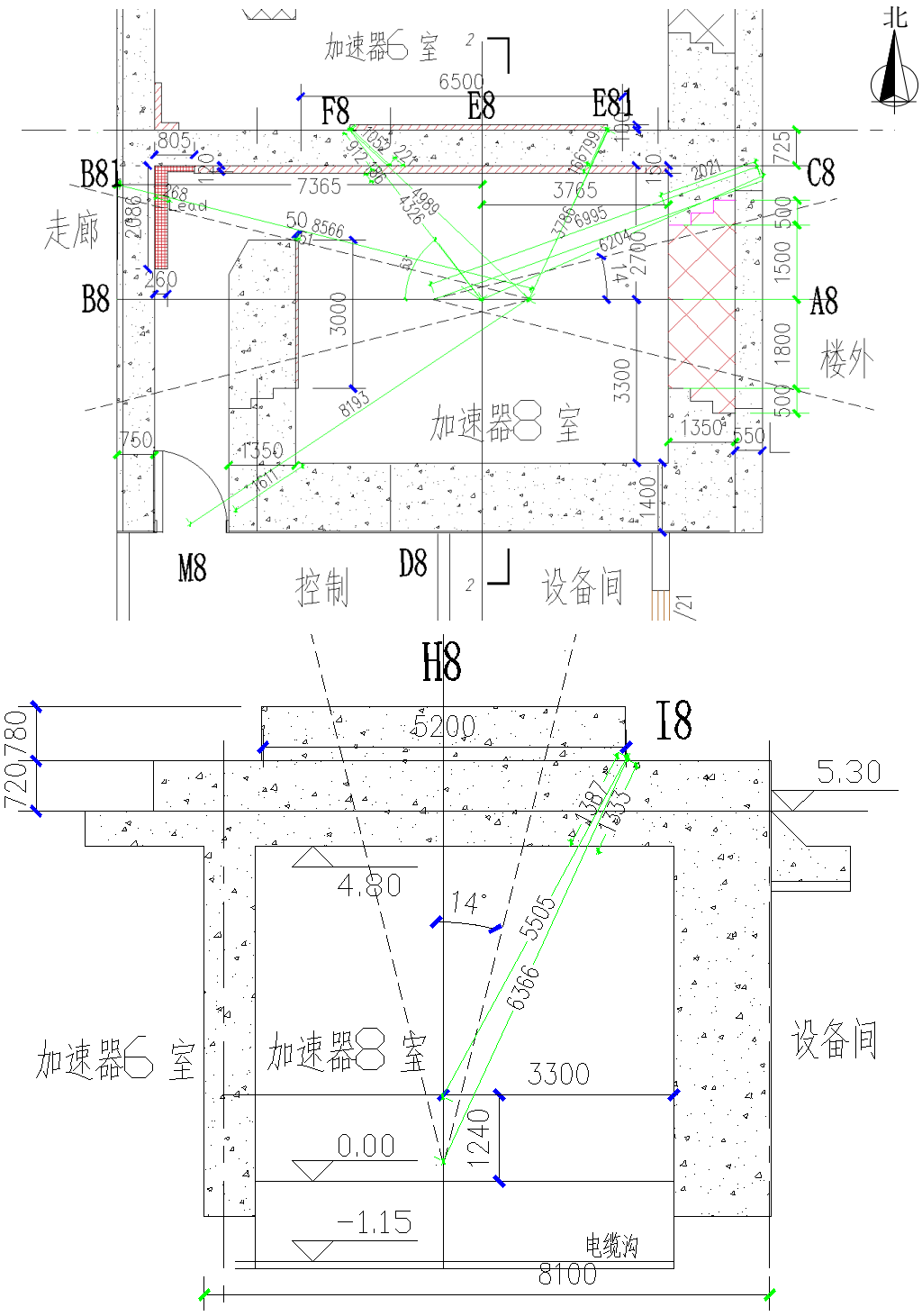


图 11-3　加速器 8 室平剖面图及剂量评估点

b）核磁加速器

核磁加速器运行时主束、泄漏辐射和散射线对机房周围环境可能产生与影响。距靶 1.435m 处的辐射输出剂量率为 500cGy/min （即 300Gy/h），主束能量 7MV，等中心点最大照射野：571.4mm×220mm，主束穿透：圆柱形机架表

面低于 0.5%（系统有阻挡器），二次泄漏辐射：圆柱形机架前后表面低于 0.1%。

厂家给出的主束泄漏辐射和二次泄漏辐射水平分布图，见图 11-4 所示。可见，1）主束区域距离靶点 d 米处的剂量率水平为：$0.5\%\times300\times10^{6}\times(3.565/d)^{2}$；2）次束区域泄漏辐射和散射线按常规加速器估算方法进行估算（1m 处的辐射输出剂量率为 618Gy/h）。3）设备迷道一侧距离靶点 d 米处的泄漏辐射水平为：$0.1\%\times300\times10^{6}\times(1.074/d)^{2}$；设备另一侧距离靶点 d 米处的泄漏辐射水平为：$0.1\%\times300\times10^{6}\times(0.982/d)^{2}$。4） 设备顶部主束区域距离靶点 d 米处的泄漏辐射水平为：$0.5\%\times300\times10^{6}\times(3.565/d)^{2}$。估算结果见表 11-9。

表 11-9　加速器 10 室外关注点剂量率估算结果

位置	距离（m）	射线束	辐射屏蔽		剂量率（μGy/h）	位置描述
			厚度，cm	衰减因子		
A	6.4	主束	109（重砼）+11（铅砖）	2.76E-07	1.28E-01	东墙外走廊（公众）
B	6.9	主束	96（重砼）+14（铅砖）	2.87E-07	1.15E-01	西墙楼外过道（公众）
C	4.3	漏射辐射	162（重砼）	2.10E-08	3.93E-04	南墙楼外消防通道（公众）
D	8.6	漏射辐射	193（重砼）	7.43E-10	3.48E-06	北墙外控制室（工作人员）
E	6.5	次束（漏射）	122（重砼）	1.68E-06	5.56E-02	东墙外走廊（公众）
	5.2	次束（散射）		1.35E-06	4.02E-01	
F	7.0	次束（漏射）	116（重砼）	4.76E-06	6.00E-02	西墙楼外过道（公众）
	5.6	次束（散射）		3.81E-06	9.81E-01	
G	7.9	漏射辐射	192（重砼）	7.43E-10	4.12E-06	东墙外走廊（公众）
H	7.3	主束	210（重砼）	1.14E-09	4.08E-04	机房室顶（无人区）
I	5.3	次束（漏射）	131（重砼）	6.40E-07	9.09E-03	机房室顶（无人区）
	4.6	次束（散射）		5.12E-07	1.53E-01	
M	8.6	漏射辐射	120（重砼）+1.8（铅板）	1.02E-06	4.77E-03	机房门外（工作人员）

注：（1）重砼的密度不低于 3.5t/m^3；计算屏蔽衰减因子时将重砼折算成等效砼厚度；（2））7MV X 射线 15º 方向散射系数为 8.57×10^{-3}（数据拟合）；（3）表中防护门处仅考虑了机头的泄漏辐射。

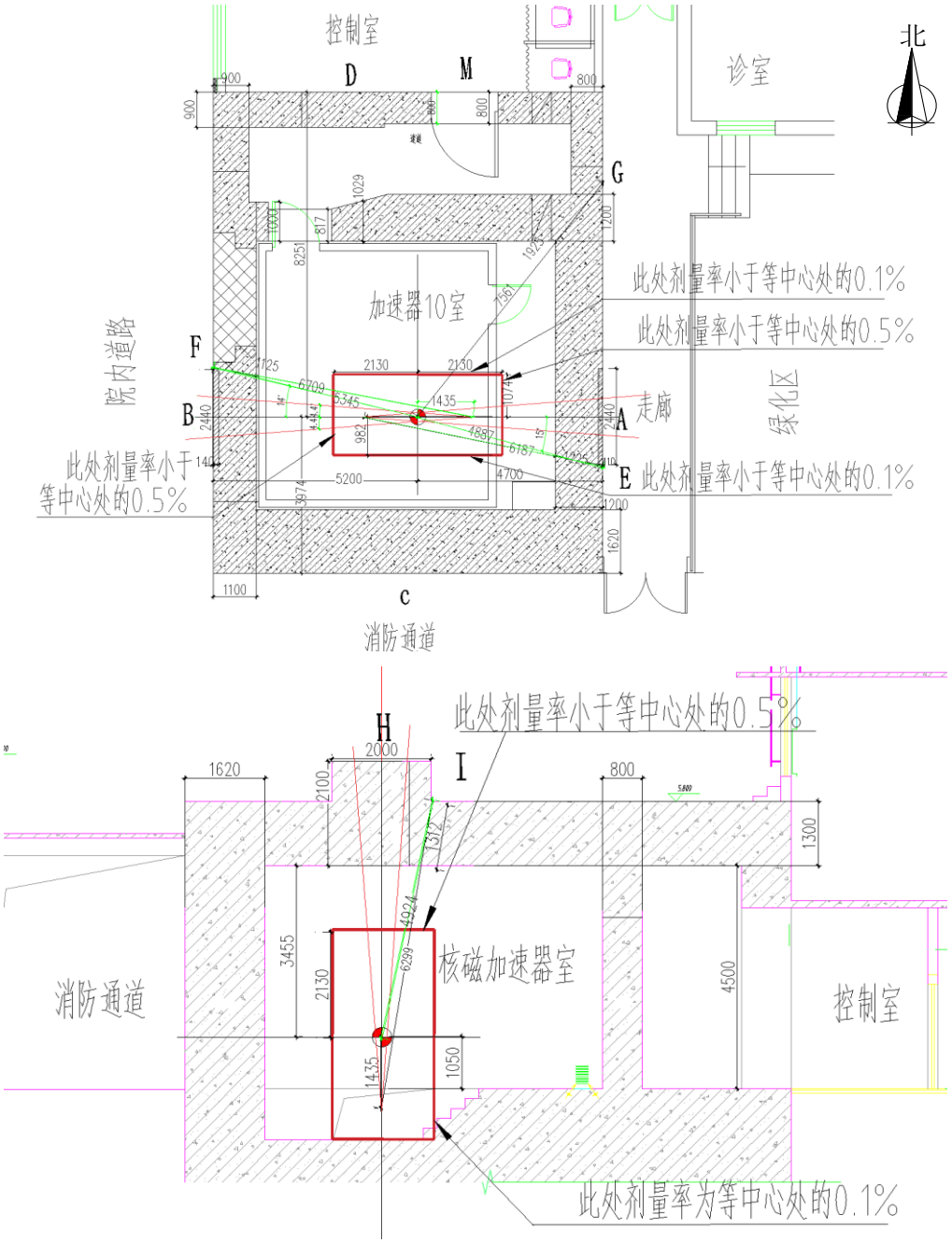


图 11-4　加速器 10 室平剖面图及剂量评估点

（3）防护门外的辐射剂量估算

按照 NCRP No.151 和 IAEA47 号报告，加速器机房入口屏蔽主要考虑患者散射辐射以及来自 X 射线主射线束和泄漏辐射的散射辐射，不需考虑中子及其相关的中子俘获 γ 射线。其中 7MV 核磁加速器在出入口防护门处剂量率的估算中，主要考虑患者散射的二次散射、泄漏辐射一次散射、泄漏辐射穿过迷道内墙的贡献。

具体如下：

a）主束墙表面的二次散射（H_s）；

b）加速器机头泄漏辐射经屏蔽墙的一次散射（H_{Ls}）；

c）散射辐射的二次散射（H_{Ps}）；

d）穿过迷路内墙的泄漏辐射。

1）主束墙表面的二次散射（H_s）剂量率贡献

$$H_S = \frac{H_0}{d_h^{\,2}} \times \frac{\alpha_0 A_0 \alpha_z A_z}{d_r^{\,2} \times d_z^{\,2}} \qquad (11\text{-}8)$$

式中：H_0—距靶 1m 处的辐射剂量率为 3.6×10^8μGy•m²/h（8.4×10^8μGy•m²/h）；

α_0—主束散射面 A_0 的散射系数（系数取值由 NCRP REPORT 151 TableB.8a）；

A_0—等中心 1m 处最大照射野投影在北墙上的面积；

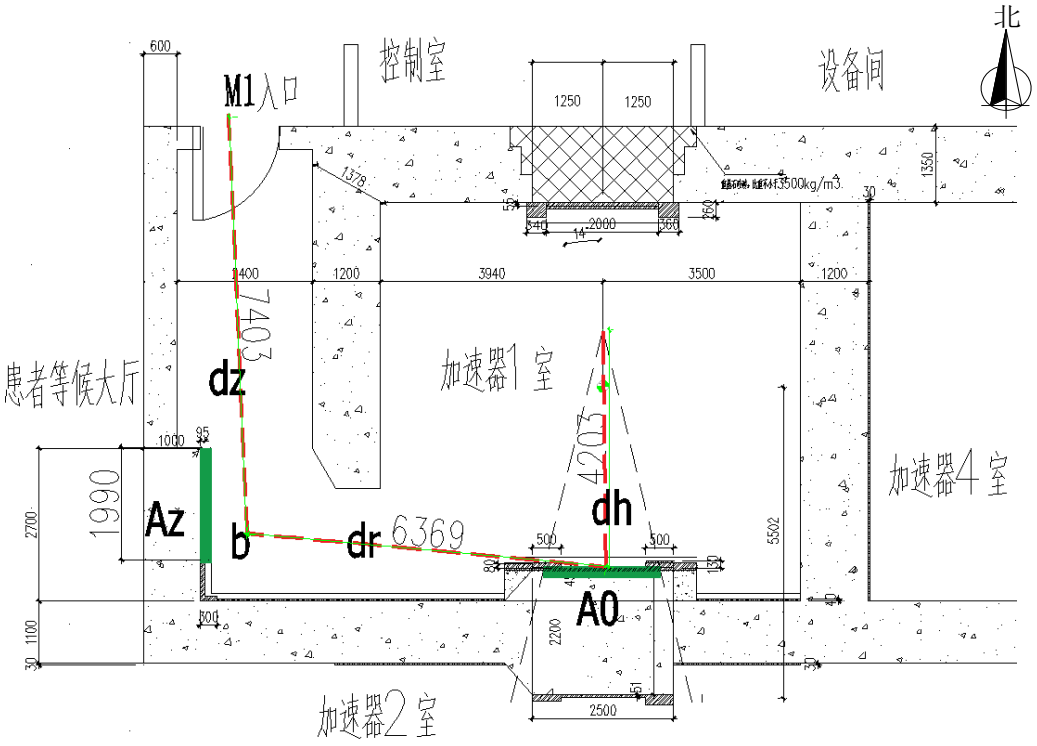
α_z—主束经迷路表面 A_z 第二次反散射的系数（系数取值由 NCRP REPORT 151 TableB.8b，能量为 0.5MeV）；

A_z—主束散射面 A_0 的散射线经过迷路内口发散到迷路外墙内表面的散射面积；

d_h—从靶点至散射面 A_0 的距离，m；

dr—第一次散射面中心点经迷道内口至迷道中线的距离，m；

dz—b 点经迷道中线至防护门外 30cm 入口处的距离，m；



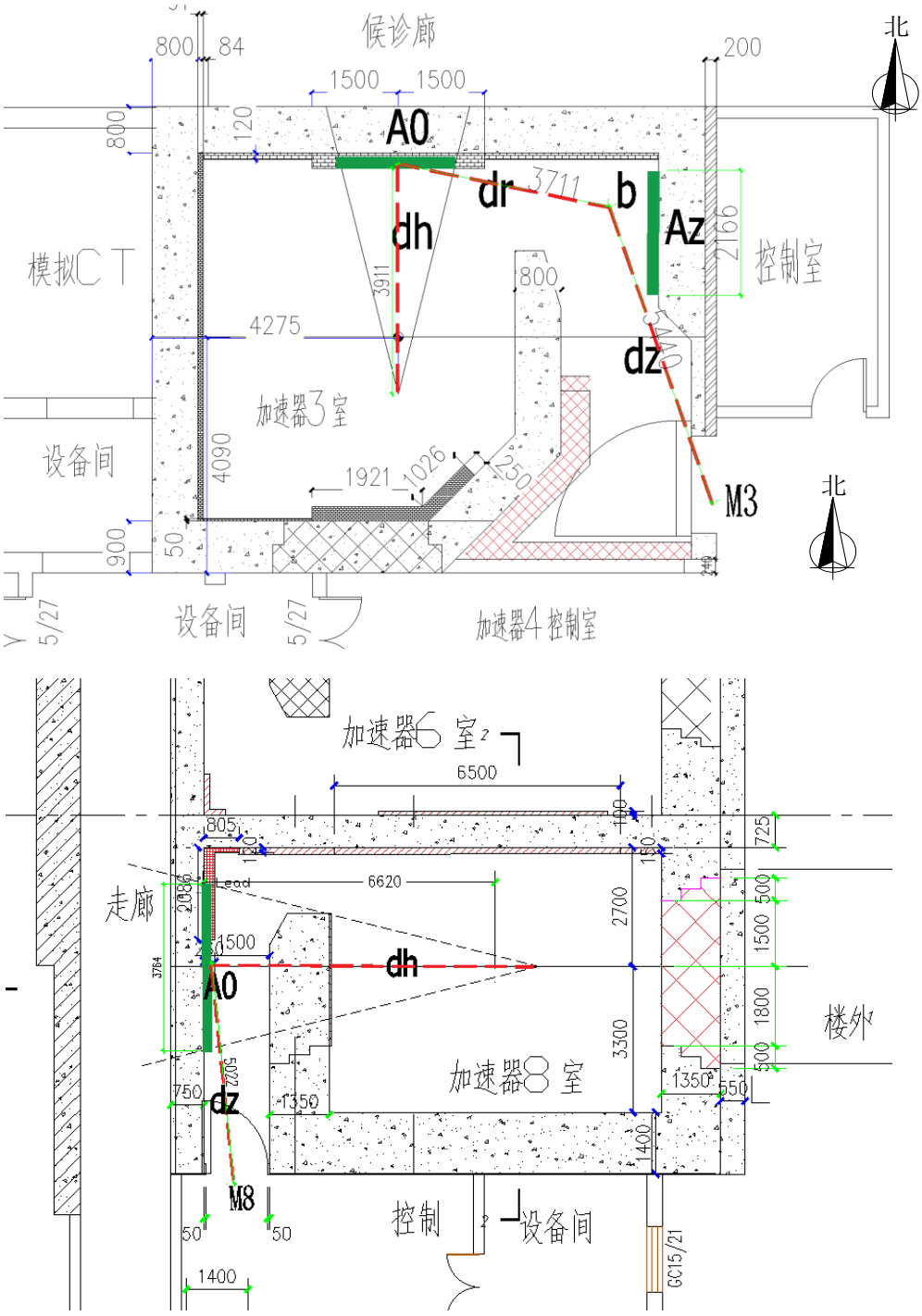


图 11-5　3 间加速器室主束墙面散射平面图

2）加速器机头泄漏辐射经屏蔽墙的一次散射（H_{Ls}）剂量率贡献

$$H_{LS} = \frac{L_f H_0 \alpha_{LS} A_1}{(d_{LS} d_{ZZ})^2} \qquad (11\text{-}9)$$

式中：L_f —距靶 1m 处装置头泄漏辐射率，取 0.1%；

H_0 —距靶 1m 处的辐射剂量率为 3.6×10^8μGy•m²/h（8.4×10^8μGy•m²/h、

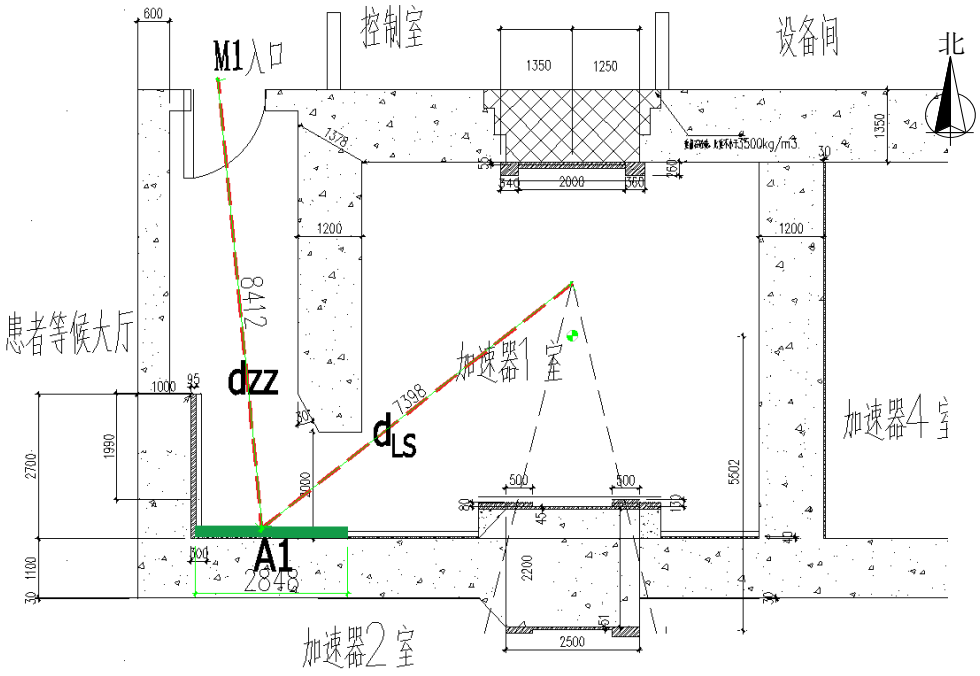
6.18×10^{8}μGy•m^{2}/h）；

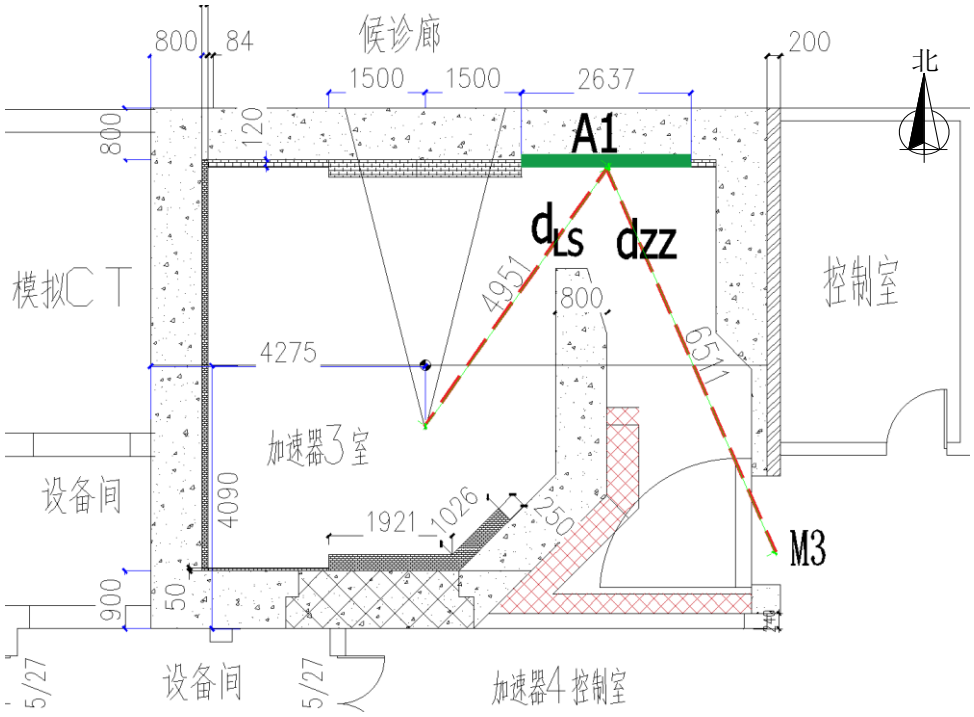
α_{LS}—北墙对机头漏射辐射的反散射系数（系数取值查 NCRP REPORT 151 TableB.8b）；

A_1—从门入口处可见墙的面积，m^2；

d_{LS}—靶至 A1 墙迷路中心线的距离，m；

d_{ZZ}—从 A1 墙与迷路中心线交点至入口处的距离，m。





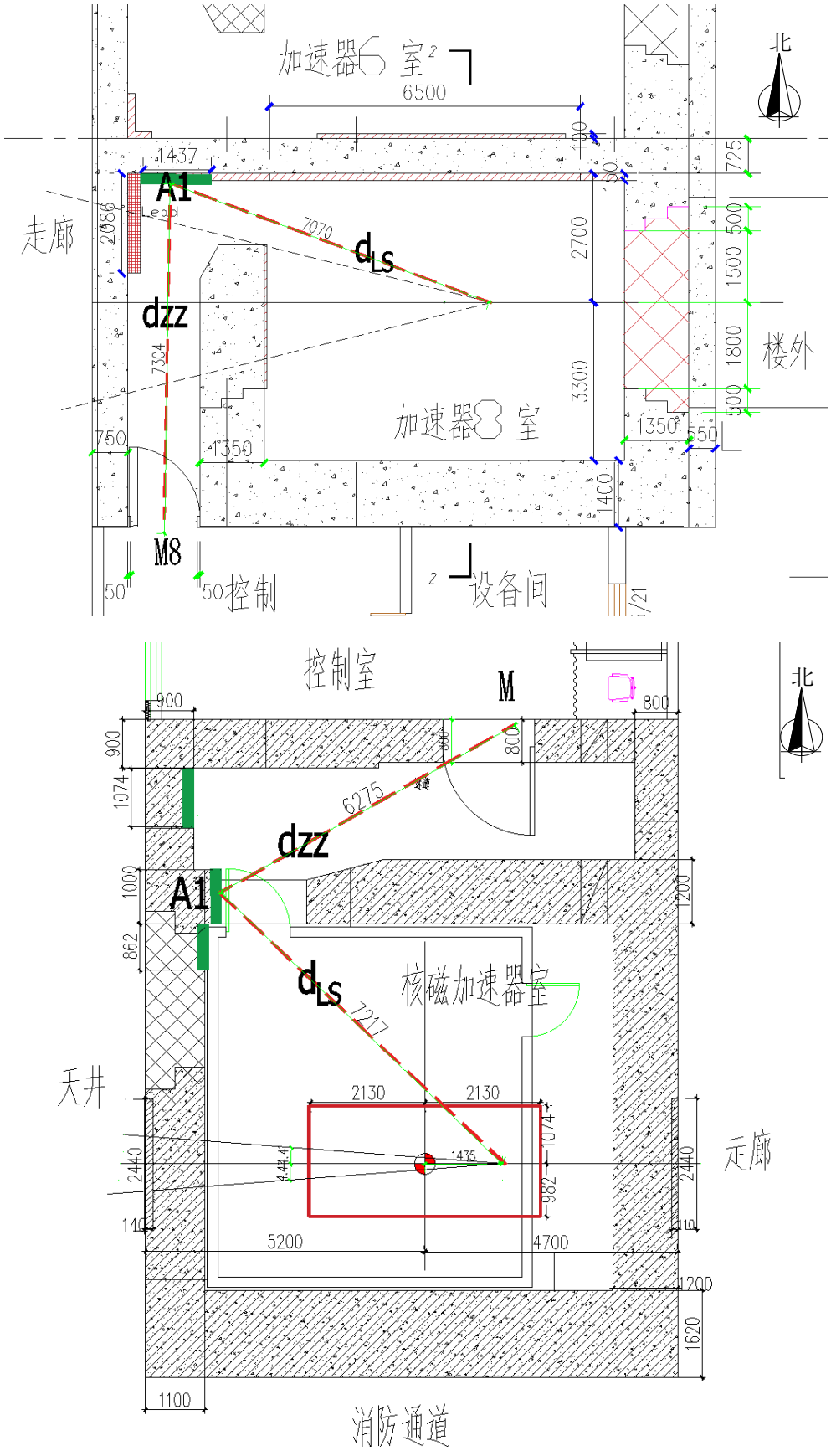


图 11-6　4 间加速器室机头漏射线经墙面散射平面图

3）散射辐射的二次散射（H_{Ps}）剂量率贡献

$$H_{PS} = \frac{\alpha(\theta)H_0(\frac{F}{400})(\alpha_{PS}A_1)}{(d_{sca} \times d_{sec} \times d_{ZZ})^2} \qquad (11\text{-}10)$$

式中：$\alpha(\theta)$—有用束的散射辐射以 θ=45° 的散射角入射到墙面的散射因子（系数取值查 NCRP REPORT 151 TableB.4）；

H_0 —距靶 1m 处（等中心处）的辐射剂量率为 3.6×10^8μGy•m²/h（8.4×10^8μGy•m²/h、3.0×10^8μGy•m²/h）；

F—被照射物体等中心处照射野面积，取 1600cm²（40cm×40cm）、1257cm²；

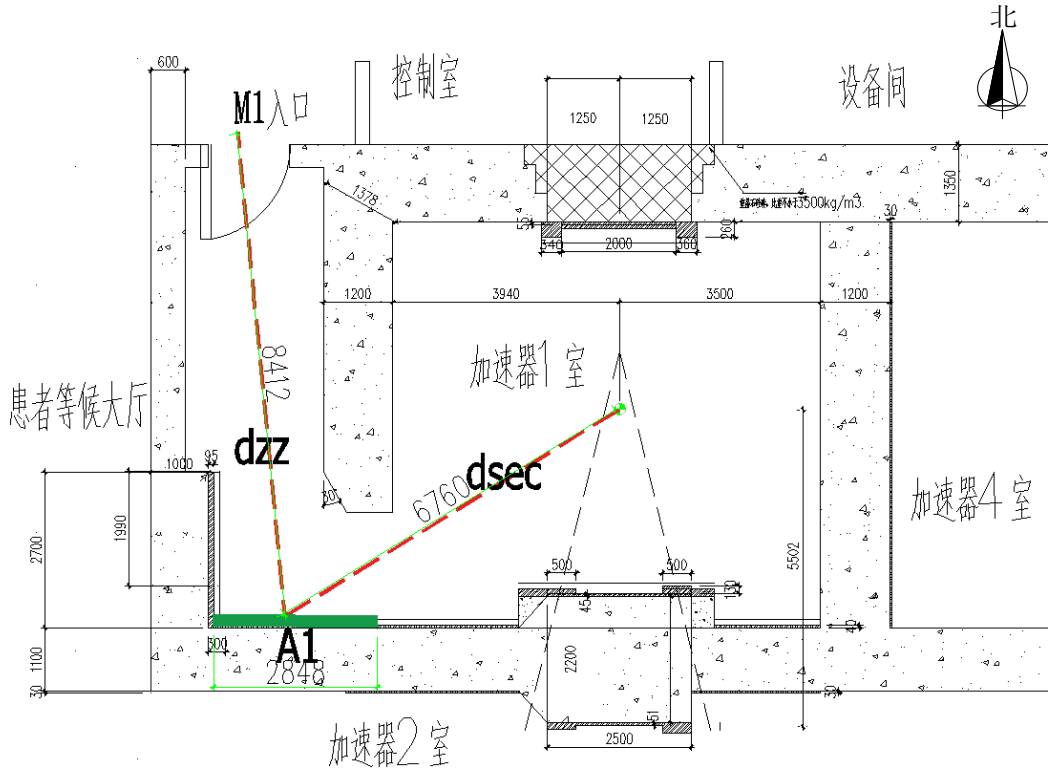
α_{PS}—北墙对散射辐射的反散射系数（取值查 NCRP REPORT 151 TableB.8b，散射能量为 0.5MeV，模体有用束散射辐射的入射角为 45°）；

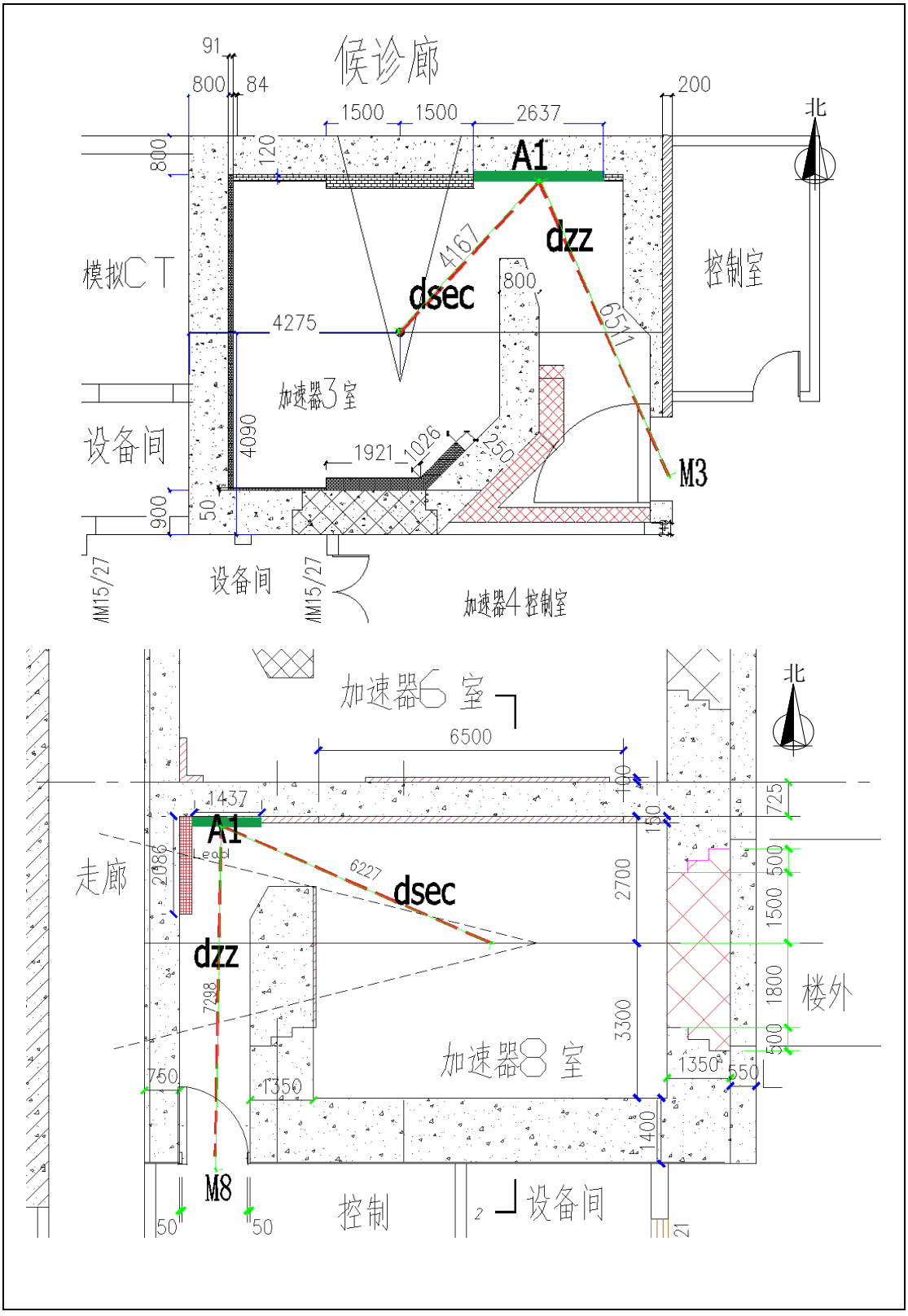
A_1—从门入口处可见墙的面积，m²；

d_{sca}—靶至被照射物体的距离，取 1m；

d_{sec}—等中心点到 A1 墙与迷路中心线交点的距离，m；

d_{ZZ}—从 A1 墙与迷路中心线交点至入口处的距离，m。




候诊廊
91
800
84
1500
1500
2637
200
北
800
120
A1
dzz
4167
dsec
800
模拟CT
控制室
6511
4275
加速器3室
设备间
4090
1921
1026
250
M3
900
50
AM15/27
设备间
AM15/27
加速器4控制室
加速器6室
6500
北
1437
100
150
725
A1
走廊
2086
6227
dsec
2700
500
1500
dzz
7298
1800
楼外
3300
500
加速器8室
750
1350
1350
550
1400
M8
50
50
控制
设备间
21

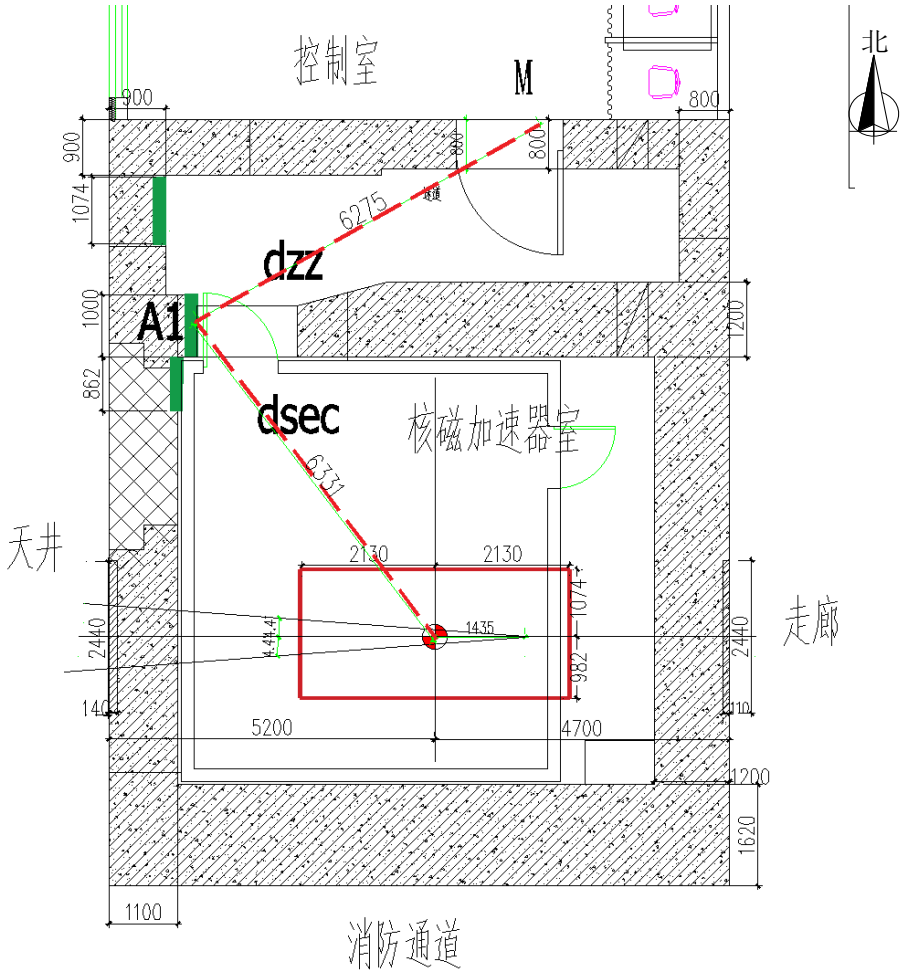


图 11-7　4 间加速器室主束通过患者体表散射线经墙面散射平面图

4）穿过迷路内墙的泄漏辐射剂量率贡献

机头泄漏射线贯穿迷道内墙和防护门后的辐射贡献值见表 11-6~表 11-9 的估算结果。

5）防护门附近X射线贯穿辐射分析

根据公式11-8~公式11-10和图11-5~图11-7中的相关参数，加速器运行时机房迷道入口处X射线辐射剂量率的估算结果汇总列于表11-10中。可见，加速器机房防护门附近X射线辐射主要来自散射线经迷道内口墙壁的二次散射辐射。估算出4间加速器室防护门外散射辐射+泄漏辐射的总剂量率最大值为1.03μGy/h。

表 11-10　4间加速器室迷路入口处剂量率的计算参数及结果

参数		1室	3室	8室	10室
	H_0(μGy/h）	3.6×10^{8}	3.6×10^{8}	8.4×10^{8}	/

Hs	α_0	2.70E-03	2.70E-03	2.70E-03	
	A_0（m^2）	2.82	2.43	9.24	
	α_z	1.80E-03	1.80E-03	3.39E-05（迷路内墙衰减因子）	
	Az（m^2）	11.39	8.25	/	
	d_h（m）	4.2	3.9	7.6	
	dr（m）	6.5	3.7	/	
	dz（m）	7.4	5.4	5.0	
	Hs(μGy/h）	**1.4**	**5.8**	**0.49**（*TLV*取1.5cmPb）	
Hps	H_0(μGy/h）	3.6×10^8	3.6×10^8	8.4×10^8	3.0×10^8
	$\alpha(\theta)$	1.39E-03	1.39E-03	1.39E-03	1.39E-03
	F（cm^2）	1600	1600	1600	1257
	α_{PS}	2.2E-02	2.25E-02	2.2E-02	2.2E-02
	A_1	11.39	10.02	6.89	13.2
	d_{sca}	1	1	1	1.435
	d_{sec}	6.8	4.2	6.2	6.3
	d_{zz}	8.4	6.5	7.3	6.3
	Hps(μGy/h）	**111**	**605**	**346**	**116**
H_{LS}	H_0(μGy/h）	3.6×10^8	3.6×10^8	8.4×10^8	6.18×10^8
	L_f	0.001	0.001	0.001	0.001
	α_{LS}	7.1E-03	7.3E-03	6.4E-03	7.3E-03
	A_1	11.39	10.02	6.89	13.2
	d_{LS}(m）	6.6	5.0	7.1	7.2
	dzz(m）	7.6	6.5	7.3	6.3
	H_{LS}(μGy/h）	**11.6**	**24.9**	**13.6**	**28.9**
H_{LT}	H_{LT}(μGy/h）	**8.70E-02**	**1.90E-02**	**2.40E-02**	**4.77E-03**
$H_{Tot\text{-}shield}$	$t_{barrier}$(mm）	14	14	18	18
	TVL_{pb}（mm）	5	5	5/15	5
	$H_{Tot\text{-}shield}$（μGy/h）	**0.28**	**1.03**	**0.15**	**0.03**
注：参数取自NCRP REPORT No.151和设计资料；					

$$H_{Tot-shield} = Hs \times 10^{-(t/TVL)} + H_{LS} \times 10^{-(t/TVL)} + Hps \times 10^{-(t/TVL)} + H_{LT}$$

（4）加速器室周围剂量率水平

从上述估算结果可知，加速器正常运行过程中，加速器室四周附加剂量率最大值为1.92μSv/h（加速器8室北墙外加速器6室），满足本项目所设定的机房屏蔽墙体和防护门外30cm处2.5μSv/h 的剂量率控制水平，根据剂量率与距离平方成反比以及评价范围内固有建筑物的屏蔽，则在加速器室墙面周围50m评价范围内的相关场所的剂量率远小于2.5μSv/h。

（5）天空散射辐射估算和侧向散射估算

本项目加速器机房都为单层建筑物，屋顶为无人区，机房西侧有高于机房屋顶的建筑物（放疗科办公场所为三层建筑物，高度约 12m），根据以上估算结果，加速器 1 室楼顶剂量最大，且距办公场所最近，本项目以加速器 1 室来估算对周围环境的天空散射和侧向散射的影响。

1）天空散射辐射估算

估算公式如下：

$$H_s = \frac{2.5 \times 10^{-2} H_1 \Omega^{1.3}}{d_s^2} \qquad (11\text{-}11)$$

式中：H_S—地面的天空散射辐射剂量率，μGy /h；

H_1—机房室顶上方 2m 处的辐射剂量率，μGy/h（12.5μGy/h）；

Ω—源至屋顶（内表面）所张的立体角（以球面度为单位），0.22sr；

d_s—靶至地面估算点的水平距离，m。

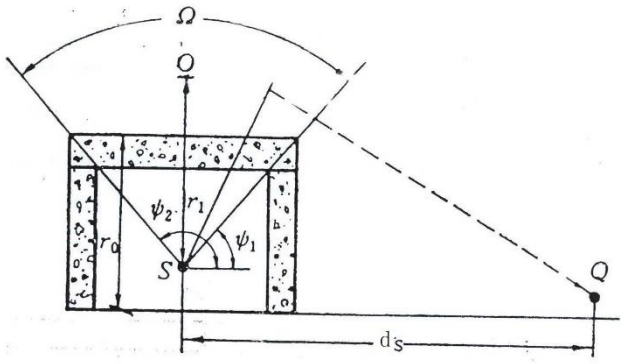


图 11-8　天空散射示意图

可推算出 d_s 约 13m，天空散射辐射最大剂量率小于 3.0E-04μGy/h。

2）侧向散射辐射估算

估算公式如下：

$$H_{ss} = \frac{H_{02} F f(\theta)}{D_R^{\,2} 10^{1+\left[\frac{(d-TVL_1)}{TVL_e}\right]}} \qquad (11\text{-}12)$$

式中：H_{ss}—侧向散射辐射剂量率，μGy/h；

H_{02}—距靶 1m 处的辐射剂量率，μGy/h；

F—距靶 1m 处方形照射野面积，0.16m²

$f(\theta)$—顶层散射光子的角发布函数；

D_R—在屋顶的射束中心点到估算点的距离，m；

d—顶层厚度，140cm 砼+16cm 钢板；

TVL_e、TVL_1—平衡什值层和第一什值层厚度，单位 cm；详见表 11-5。

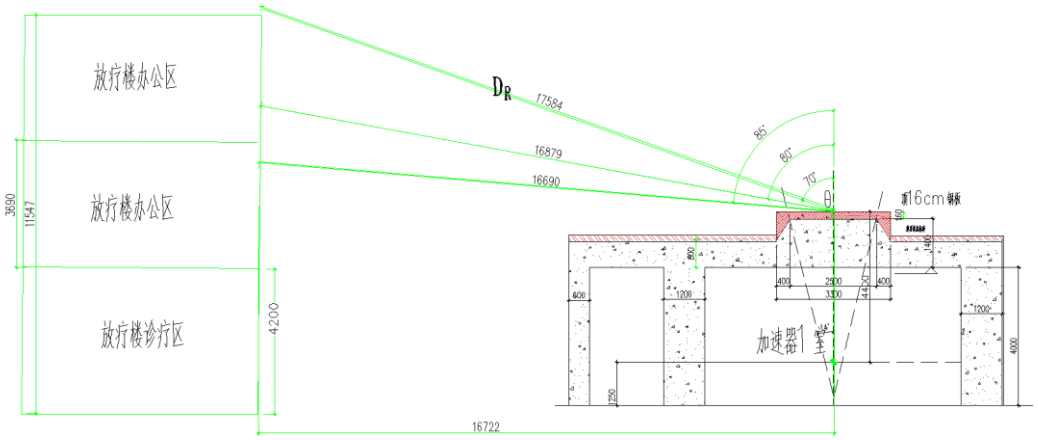


图 11-9　侧向散射示意图

根据公式估算出不同点的侧向散射剂量率如表11-5。

表 11-11　加速器 1 室侧向散射辐射估算结果

θ（°）	70	80	85
$f(\theta)$	0.035	0.014	0.005
D_R （m）	17.6	16.9	16.7
H_{ss}（μGy/h）	1.24E-02	5.36E-03	1.96E-03

根据上述估算结果可知,本项目加速器1室周围天空散射和侧向散射剂量率均小于0.02μGy/h，表明对周围的辐射影响很小。

11.2.5工作人员和公众受照剂量估计

附加年有效剂量计算公式 ：$E=D\times t\times T\times U\times K$　　（11-13）

式中：E--年有效剂量，μSv；

D--计算点附加剂量率，μGy/h；

t--年出束时间，h/a；

K--有效剂量与吸收剂量换算系数，Sv/Gy，本项目取1.0；

T--居留因子；

U –使用因子。

（1）工作人员受照剂量估计

根据以上估算，可预计加速器室周围的工作人员的年附加有效剂量见表11-12 所示。

表 11-12　加速器运行时工作人员的年附加有效剂量估算结果

估算对象	位置编号	场所位置	***T***	**U**	年受照时间，t	剂量率（μGy/h）	年附加有效剂量，μSv
加速器 1 室工作人员	D1	控制室	1	0.15	208h	0.149	4.65
	F1	控制室	1	0.15	208h	0.175	5.46
	M1	防护门外	1/16	1	624 h	0.28	1.09E+1
加速器 3 室工作人员	A31	控制室	1	1	1040h	2.02E-1	2.10E+2
	M3	防护门外	1/16	1	1040h	1.03	6.70E+1
加速器 8 室工作人员	D8	控制室	1	1	624h	8.41E-01	5.25E+2
	M8	防护门外	1/16	1	624h	0.15	5.85
加速器 10 室工作人员	D	控制室	1	1	498h	3.48E-06	1.73E-3
	M	防护门外	1/16	1	498h	0.03	9.34E-1

（2）公众受照剂量最大值估计

根据以上估算，可预计加速器室周围的公众的年附加有效剂量见表 11-13 所示。

表 11-13　加速器运行时公众的年附加有效剂量估算结果

估算对象	位置编号	场所位置	***T***	**U**	年受照时间，t	剂量率（μGy/h）	年附加有效剂量，μSv
加速器 1 室周围公众	B1	西墙外等候大厅	1/16	1	208h	4.71E-3	6.12E-02
	C12	南墙外加速器 2 室	1/16	0.15	208h	6.99E-1	1.36E+00

	H1	楼顶无人区	1/40	0.15	208h	21.0	1.64E+01
	I11	楼顶无人区（漏射）	1/40	1	624h	1.89	2.95E+01
加速器3室周围公众	B3	西墙外模拟CT室	1/16	1	1040h	1.12	7.28E+01
	D3	北墙外候诊廊	1/16	0.15	1040h	8.84E-1	8.62E+00
	H3	楼顶无人区	1/40	0.15	208h	6.61E-1	5.16E-01
加速器8室周围公众	A8	东墙外楼外	1/16	0.15	208h	3.96E-1	7.72E-01
	B81	西墙外走廊	1/16	0.15	208h	3.46E-1	6.75E-01
	E81	北墙外加速器6室	1/16	1	624h	1.92	7.49E+01
	H8	楼顶无人区	1/40	0.15	624h	2.09E+1	4.89E+01
加速器10室周围公众	A	东墙外走廊	1/16	0.15	166h	1.28E-01	1.99E-01
	B	西墙楼外过道	1/16	0.15	166h	1.15E-01	1.79E-01
	C	南墙楼外消防通道	1/16	1	498h	3.93E-04	1.22E-02
	E	东墙外走廊	1/16	0.15	166h	4.58E-01	7.13E-01
	F	西墙楼外过道	1/16	0.15	166h	1.04	1.62E+00
	I	机房室顶（无人区）	1/40	0.15	166h	1.62E-01	1.01E-01

综上所述，本项目对职业人员和公众年附加有效剂量值分别为 525μSv、74.9μSv，满足年剂量约束值（5mSv/a，0.1mSv/a）的要求。

由于医院设备的技师相对固定，每台设备拟固定配备 5-6 名技师，因此对操作人员可不考虑剂量叠加的影响。根据剂量与距离平方成反比以及评价范围内固有建筑物的屏蔽，在加速器机房周围 50m 评价范围内的公众的年剂量远小于 74.9μSv，低于设定的剂量约束目标值 0.1mSv/a。

11.2.6 O_3 和 NO_X 分析

11.2.6.1 概述

空气中的 O_2 和 N_2 分别在 X 射线的作用下，生成自由基，与空气中的 O_2 和 N_2 结合，生成 O_3 和 NO_X，他们是与辐射相关的非辐射危害因素。O_3 的主

要毒性是氧化作用，对粘膜有很强的刺激作用，中毒症状为肺功能下降，呼吸道感染、鼻炎等。

11.2.6.2 O_3 的产额及其在空气中的浓度

（1）O_3 的产额

本项目电子直线加速器只提供 X 射线模式，X 射线最高能量为 7MV，加速器放射治疗的 X 射线为扩展辐射束，依 IAEA188《电子直线加速器工作的辐射安全问题》和《辐射所致臭氧的估算与分析》（中华放射医学与防护杂志 VoL14，2，P101，1994），加速器辐射所致 O_3 的产额估算方法如下：

① 有用线束的 O_3 产额

$$P = 2.43\dot{D}_o(1-\cos\theta)RG \qquad (11\text{-}14)$$

式中：P 为 O_3 产额，mg/h；

$\dot{D}_o$ 为辐射有用束在距靶 1m 处的输出量，Gy·m²/min；

R 为靶到屏蔽物（墙）的距离，m；

G 为空气吸收 100eV 辐射能量产生的 O_3 分子数（G=10）；

θ 为有用束的半张角。

② 泄漏辐射的 O_3 产额

将泄漏辐射看为 4π 方向均匀分布的点源（包括有用束区限定的空间区），并考虑机房壁的散射线使室内的 O_3 产额增加 10%，O_3 的产额 P（mg/h）为：

$$P = 3.32\times10^{-3}\dot{D}_o GV^{1/3} \qquad (11\text{-}15)$$

式中：V 为加速器机房的体积，m³；其余符号同（11-14）。

（2）O_3 的浓度

设：O_3 的有效分解时间为 t_d（常取为 0.83h），机房通风换气周期为平均每次换气需通风 t_V 小时（h）。

机房最高饱和 O_3 浓度（mg/h）为：

$$Q = \frac{P}{V}\bar{T} \qquad (11\text{-}16)$$

式中：V 为机房的体积，m³；

$\bar{T}$ 为 O_3 的有效清除时间（h）：

$$\bar{T} = \frac{t_V \cdot t_d}{t_V + t_d} \qquad (11\text{-}17)$$

（3）参数与结果

① O_3产额

考虑到本项目的最大剂量率、靶点到墙面的距离、主束束角度等参数，O_3产额以加速器8室进行估算，参数如下：$\dot{D}_o$最大值为14Gy·m^2/min；R=4.77m（有用束）；θ=28°；V_8=282m^3。

按照《电子加速器放射治疗放射防护要求》（GBZ126-2011），机房通风换气率应不小于4次/h。该加速器机房的换气率设计不低于4次/h，满足该标准中关于机房内通风的要求。

按（11-14）、（11-15）式估算出O_3产额，P_8＝48.2mg/h。

② O_3浓度

（a）正常通风条件下：

t_d=0.83h；t_V=0.2h，按（11-17）计算出$\bar{T}$=0.161h。

按（11-16）式估算出两个机房空气中的O_3浓度分别为2.8×10^{-2}mg/m^3，远低于浓度限值0.3mg/m^3。

（b）假设没有通风：

以加速器8室为例，没有通风情况下，$\bar{T} = t_d = 0.83h$，V=282m^3，Q=0.14mg/m^3，也低于工作场所空气中O_3浓度限值0.30mg/m^3。

（c）其它几间加速器室O_3浓度

依照以上的估算方法，加速器1室、加速器3室、加速器10室正常情况下O3产额、浓度如表11-14。

表11-14　3间加速器室的O_3浓度情况表

场所	1室	3室	10室
$\dot{D}_o$	6Gy·m^2/min	6Gy·m^2/min	6.18Gy·m^2/min
R	4.1m	3.9m	3.5
θ	28°	28°	8.8°
V	277m^3	171m^3	233m^3

P	17.7mg/h	16.9mg/h	1.6mg/h
O_3浓度	1.0×10^{-2}mg/m^3	1.6×10^{-2}mg/m^3	1.1×10^{-3}mg/m^3

说明臭氧的影响是较轻微的,这样的O_3排放浓度对周围公众的影响可忽略不计。

③ NO_x 分析

在多种氮氧化物（NO_x）中，以 NO_2 为主，其产额约为 O_3 的一半，工作场所中的限值为 O_3 浓度的 16.7 倍，GB3095-2012 中规定的外部环境中 NO_2 的浓度限值与 O_3 相近。可见，NO_x 是安全的。

11.3 异常事件分析与防范建议

在异常和事故状态下，如安全装置失灵、损坏等，人员可能误入正在进行出束的加速器机房内，或者人员误留而出束，此时将会受到 X 射线照射的危害。

（1）照射不能停束：按下专用键盘“停束”键，如果加速器继续出束，则将专用键盘“出束钥匙开关”扳至“禁止”位。如继续出束，则按下控制台“急停”开关。在维修人员确保机器能够正常运行之前，操作人员不得试图再次开机。

（2）事故性出束：工作人员在机房内开展准备工作，控制台处操作人员误开机出束。工作人员进入机房，要保持防护门开启，由于有门机联锁系统，加速器无法启动。为防止其他人员误留在加速器机房内受到误照射，要求加速器在开关防护门后的每次出束前，工作人员必须进入机房进行检查，确认无误后，方可出束。为防止人员误留受到照射，工作人员在每次进入加速器机房时携带个人剂量报警仪；出束前应有声音报警，提示工作人员及时从加速器机房撤出。还有定期维护门机联锁装置，防止人员误入而受照。

（3）人员超剂量照射：一旦怀疑人员可能受到较大剂量照射，应及时送医院进行医学处理。

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，事故单位应当立即启动本单位的辐射事故应急预案，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。

11.4 项目环保验收内容建议

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

表11-15　项目环保验收内容建议表

验收内容	验收要求
剂量限值	根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）和评价报告预测，公众、职业照射剂量约束值执行 0.1mSv/a 和 5mSv/a 要求。加速器机房墙体和防护门外辐射剂量率不大于 2.5μSv/h。
电离辐射标志和中文警示	机房门外设有出束工作状态指示灯，贴有电离辐射警告标志。
布局和屏蔽设计	辐射工作场所建设和布局与环评报告表描述内容一致。机房墙体和防护门的屏蔽能力满足辐射防护的要求。
辐射安全设施	加速器机房设有安全联锁、急停按钮、工作状态指示灯、电离辐射警告标志、监控与对讲设备、紧急开门按钮、通风设施等。
监测仪器	配备至少有 1 台便携式辐射监测仪器和 8 台个人剂量报警仪，加速器机房各配有 1 台固定式剂量报警仪；辐射工作人员进行个人剂量监测，建立健康档案。
规章制度	已经制定有各项安全管理制度、操作规程、工作人员培训计划等。辐射安全管理制度和操作规程得到宣贯和落实。
人员培训	辐射工作人员通过辐射安全与防护考核。
应急预案	辐射事故应急预案符合工作实际，应急预案明确了应急处理组织机构及职责、处理原则、信息传递、处理程序和处理技术方案等。配备必要的应急器材、设备。针对使用射线装置过程中可能存在的风险，建立应急预案，落实必要的应急装备。进行过辐射事故（件）应急演练。

表 12　辐射安全管理

12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

12.1.1 辐射安全管理小组

医科院肿瘤医院已经设置了辐射安全与环境保护管理领导小组作为专门管理机构，并指定了专人负责辐射安全与环境保护管理工作。人员构成具体情况见表 1-5 所示。辐射安全管理小组的职责：

1. 在医科院肿瘤医院辐射安全防护组组长、副组长的领导下，负责医科院肿瘤医院辐射安全防护的管理工作。

2. 贯彻执行国家、北京市政府部门有关法律、法规、规章、相关标准及有关规定。负责对医院相关部门和人员进行法律、法规及相关标准的培训、教育、指导和监督检查等工作。

3. 制定、修订医院辐射安全防护管理制度及仪器设备操作规程。

4. 制定、修订辐射事故应急预案，配备相应的事故处理物资仪器、工具，一旦发生辐射意外事故或情况，在辐射安全防护小组组长的指挥下负责事故现场的应急处理工作。

5. 负责办理辐射安全许可证的申请、登记、换证及年审等工作。

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

7. 对医院从事辐射工作的人员进行条件和岗位能力的考核，组织参加专业体检、培训并取得相应资格证。

8. 组织实施对从事辐射工作人员的剂量监测，做好个人剂量计定期检测工作，对数据进行汇总、登记、分析等工作。做好医院年度评估报告工作，认真总结、持续改进并上报有关部门。

12.1.2 辐射工作人员

本项目启用后，辐射工作人员从现有辐射人员中调配，物理师由科室统一调配使用，设备的技师相对固定。每台设备拟固定配备 5-6 名技师，现有的 67 名技师能够满足 11 台放射治疗设备的配置需要。放疗科现有辐射工作人员 93 人，其中 36 名辐射工作人员已重新取得考核合格证，培训证到期的辐射工作人员将逐步在生态环境部培训平台报名参加并通过辐射安全和防护考核，考核

合格后方可继续从事辐射工作。

12.2 辐射安全管理规章制度

医科院肿瘤医院制定了多项辐射安全管理制度，包括《辐射安全防护保卫制度》、《设备操作规程》、《辐射安全岗位职责》、《设备检修维护制度》、《辐射应急预案》、《人员培训计划》、《辐射工作场所监测制度》、《辐射监测计划》等，并严格按照管理规章制度执行。本项目实施后，医院将进一步修订与本项目有关的岗位职责、操作规程、监测方案、应急预案等辐射安全管理制度，加强辐射安全的管理，确保辐射工作安全受控。

12.3 辐射监测

12.3.1 个人剂量监测

医科院肿瘤医院已制订了辐射工作人员个人剂量监测的管理要求，并将辐射工作人员个人剂量监测工作作为医院辐射监测计划体系的管理目标之一，要求医院辐射工作人员按要求接受个人剂量监测，并建立相应的个人剂量监测档案。医院辐射工作人员的个人剂量监测工作已委托北京贝特莱博瑞技术检测有限公司承担，监测频度为 3 个月一次。医院严格要求辐射工作人员按照规范佩戴个人剂量计，规定在个人剂量计佩戴时间届满一个监测周期时，由专人负责收集剂量计送检更换，医院严格按照国家法规和相关标准进行个人剂量监测和相关的防护管理工作。如发现监测数据异常，将立即暂停其辐射工作，查明原因并妥善解决后方可继续开展辐射工作。

12.3.2 辐射监测仪器配备

医科院肿瘤医院对本项目辐射场所拟新配备 4 台固定式在线辐射监测仪，新增 8 台个人剂量报警仪和继续使用现有的 1 台便携式辐射巡测仪，能够满足医科院肿瘤医院辐射防护和环境保护的要求。

12.3.3 本项目工作场所自行监测方案

医科院肿瘤医院拟对辐射工作场所开展自行监测，方案如下：

（1）监测项目：X 射线剂量率水平

（2）检测设备：便携式辐射巡测仪

（3）检测频次：剂量率水平每年不少于 1 次。

本项目涉及工作场所的监测布点：监测点位如图 11-1、图 11-2、图 11-3、

图 11-4，主要是加速器机房的周边、楼上、特别是控制室和防护门处。测量结果连同测量条件、测量方法和仪器、测量时间等一同记录并妥善保存，并根据标准要求，每年进行一次设备状态检测。

12.4 辐射事故应急管理

医科院肿瘤医院依据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，制定了《辐射应急预案》，包括辐射事故应急管理小组的组成、职责与分工，可能发生的辐射事故与事件类型，事故应急处理和报告程序，应急保障、人员培训和演练，应急装备、器材等内容。医院规定科室每季度组织一次演练，每年至少组织一次全院应急演练。本项目使用的医用直线加速器，已在许可使用的射线装置范围内，不涉及增加核技术应用类别，因此，医院现有的《辐射事故应急预案》能够满足要求。

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

表 13　结论与建议

13.1 结论

13.1.1 正当性分析

医科院肿瘤医院持有辐射安全许可证（京环辐证[E0168]），本项目拟在放疗楼更新/新增使用医用加速器，目的是为了满足医学诊断和治疗工作需要，提高医疗服务水平，满足患者就医需要，具有良好的社会效益和经济效益，其获得的利益远大于辐射效应可能造成的损害，符合辐射实践正当性原则的要求。同时具备了技术、人员和经费等条件。

13.1.2 辐射防护屏蔽能力分析

在设置辐射工作场所时已充分考虑了射线装置性能和特点、周围工作场所的防护与安全，对辐射工作场所选址和布局设计进行了综合考虑，辐射工作场所屏蔽设计原则符合辐射工作场所使用和辐射防护安全的要求。

13.1.3 辐射环境评价

（1）估算结果表明：加速器正常运行后，预计工作人员和公众的年有效剂量均低于相应剂量约束值（5mSv、0.1mSv），符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于“剂量限值”的要求。通过对加速器机房的辐射屏蔽措施分析可知，机房墙体和防护门外周围剂量当量率不超过 2.5μSv/h。

（2）医用电子直线加速器运行过程中，会产生少量的臭氧和氮氧化物，估算结果显示，正常通风情况下，机房内的臭氧浓度为可忽略的水平，经通风系统排放后，浓度将降低 1 个量级，故对周围环境的影响是十分轻微的。

（3）辐射安全与防护措施：加速器机房辐射安全与防护措施有分区管理、实体屏蔽、电离辐射警示标识和中文警示说明、工作状态指示灯、急停按钮、巡检按钮、紧急开门按钮、监控设施、门机安全联锁系统、辐射剂量监测和报警系统等，可有效防止职业人员和公众受到意外照射。

（4）辐射安全防护管理：医科院肿瘤医院设有辐射安全与环境保护管理机构，负责全院的辐射安全管理和监督工作。医院制定有较健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、人员培训考核计划、健康体检制度、设备检修维护制度和辐射事故应急预案等，本项目实施后将补充与本项目有关的岗位职责、操作规程等管理制度，进一步完善辐射事故应急预案并有效执行。

（5）与《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》的规定对照检查，满足要求。

13.1.4 结论

综上所述，医科院肿瘤医院使用医用电子直线加速器，相应的辐射安全制度和辐射防护措施基本可行，在落实项目实施方案和本报告表提出的污染防治措施及建议前提下，其运行对周围环境产生的辐射影响可控，符合环境保护的要求。故从辐射环境保护角度论证，本项目的运行是可行的。

13.2 承诺

为了保护环境，保障人员健康，医科院肿瘤医院承诺：

（1） 遵守有关法律、法规的规定，执行管理制度，落实管理责任。不违规操作和不弄虚作假；

（2） 妥善处理群众信访和投诉，做好公众宣传、解释和沟通工作；

（3） 辐射工作人员全部参加辐射安全与防护考核，考核合格后方可上岗，定期组织，在岗人员参加辐射安全知识继续教育。

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

（5） 项目竣工后，及时自行组织开展竣工环境保护验收。运行期间接受生态环境管理部门的监督检查。

表 14　审 批

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