

## 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 表 1 项目基本情况 .....            | 1  |
| 表 2 放射源 .....               | 13 |
| 表 3 非密封放射性物质 .....          | 14 |
| 表 4 射线装置 .....              | 15 |
| 表 5 废弃物（重点是放射性废弃物） .....    | 16 |
| 表 6 评价依据 .....              | 17 |
| 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 .....          | 38 |
| 表 11 环境影响分析.....            | 52 |
| 图 11-2 3 间加速器室估算点位示意图 ..... | 58 |
| 表 12 辐射安全管理 .....           | 81 |
| 表 13 结论与建议 .....            | 85 |
| 表 14 审 批 .....              | 87 |

表 1 项目基本情况

|             |  |  |  |                       |              |  |
|-------------|--|--|--|-----------------------|--------------|--|
| 建设项目名称      | 通州院区新建放射治疗中心项目   |  |  |                       |              |  |
| 建设单位        | 北京大学人民医院（北京大学第二临床医学院）  |  |  |                       |              |  |
| 法人代表        | 王俊   | 联系人                                    | 陈丽   | 联系电话                  | 010-88325503 |  |
| 注册地址        | 北京市西城区西直门南大街 11 号  |  |  |                       |              |  |
| 项目建设地点      | 北京市通州区南凤西一路39号行政科研楼一层南侧  |  |  |                       |              |  |
| 立项审批部门      | 无  |  | 批准文号   | 无                     |              |  |
| 建设项目总投资(万元) | 10000  | 项目环保投资(万元)                             | 500  | 投资比例(环保投资/总投资)        | 5%           |  |
| 项目性质        | <input checked="" type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改建 <input type="checkbox"/> 扩建 <input type="checkbox"/> 其它 |  |  | 占地面积(m <sup>2</sup> ) | 120          |  |
| 应用类型        | 放射源  | <input type="checkbox"/> 销售            | <input type="checkbox"/> I类 <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类                  |                       |              |  |
|             |  | <input checked="" type="checkbox"/> 使用 | <input type="checkbox"/> I类（医疗使用） <input type="checkbox"/> II类 <input checked="" type="checkbox"/> III类 <input type="checkbox"/> IV类 <input type="checkbox"/> V类 |                       |              |  |
|             | 非密封放射性物质   | <input type="checkbox"/> 生产            | <input type="checkbox"/> 制备 PET 用放射性药物   |                       |              |  |
|             |  | <input type="checkbox"/> 销售            | /  |                       |              |  |
|             |  | <input type="checkbox"/> 使用            | <input type="checkbox"/> 乙 <input type="checkbox"/> 丙  |                       |              |  |
|             | 射线装置   | <input type="checkbox"/> 生产            | <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类   |                       |              |  |
|             |  | <input type="checkbox"/> 销售            | <input type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类   |                       |              |  |
|             |  | <input checked="" type="checkbox"/> 使用 | <input checked="" type="checkbox"/> II类 <input type="checkbox"/> III类  |                       |              |  |
|             | 其他   |  |  |                       |              |  |

## 1.1 单位概况

北京大学人民医院（北京大学第二临床医学院）（以下简称“北大人民医院”或“医院”）创建于 1918 年，是中国人自行筹资建设和管理的第一家综合性西医医院，最初命名为“北京中央医院”，中国现代医学先驱伍连德博士任首任院长。北京大学人民医院的发展历程，是中国医学进步的见证。经过 100 年的发展现已发展成为集医疗、教学、科研为一体的现代化综合性三级甲等医院。

目前，医院正式员工总数 2553 人，中国工程院院士 3 名，编制床位 1700 张（开放床位 1700 余张），设有 40 个临床科室、17 个医技科室和 25 个职能部门。

北京大学人民医院以国家级优势学科为先导,以打造专用应急救援保障空为切入点,同时与北京市红十字会空中救援中心签署了创伤患者空中转运合作协议,建立北京大学人民医院通州院区,通州院区将成为重要的创伤急救中心,可以高效率、快速度地解决通州东南部及周边河北省地区交通事故等创伤患者的抢救工作。通州院区建设采取分期进驻的方式,扎实稳妥开展工作,最终将通州院区建成学科全面、功能合理、具有一定规模和医疗、教学、科研职能兼备的综合医院。通州院区所属土地、地上建筑属原北京市通州区卫生和计划生育委员会所有,人民医院已与原北京市通州区卫生和计划生育委员会签订合作协议,将通州院区土地和地上建筑无偿供人民医院使用。2021年5月起,通州院区已逐步投入运营。

北大人民医院为已取得《辐射安全许可证》单位。

## 1.2 核技术利用及辐射安全管理现状

### 1.2.1 核技术利用现状情况

北京大学人民医院已取得了辐射安全许可证(京环辐证[B0062],有效期至2026年5月6日,许可的种类和范围是:使用III类、V类放射源,使用II类、III类射线装置,乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。北大人民医院已许可射线装置使用情况见表1-1。医院已许可使用的非密封放射性物质见表1-2,已许可使用的放射源见表1-3。

表1-1 已许可射线装置使用情况

| 序号 | 名称         | 类别(类) | 数量(台) | 活动种类 |
|----|------------|-------|-------|------|
| 1  | 模拟定位机      | III   | 1     | 使用   |
| 2  | 乳腺X射线机     | III   | 1     | 使用   |
| 3  | 牙科X射线机     | III   | 3     | 使用   |
| 4  | 医用电子直线加速器  | II    | 1     | 使用   |
| 5  | SPECT/CT   | III   | 1     | 使用   |
| 6  | 移动式C型臂     | III   | 9     | 使用   |
| 7  | 数字减影血管造影装置 | II    | 7     | 使用   |
| 8  | 医用X射线CT机   | III   | 7     | 使用   |
| 9  | 加强体外冲击碎石机  | III   | 1     | 使用   |

|    |               |     |    |    |
|----|---------------|-----|----|----|
| 10 | PET/CT        | III | 1  | 使用 |
| 11 | 移动式 X 射线机     | III | 13 | 使用 |
| 12 | 骨密度仪          | III | 1  | 使用 |
| 13 | 放射诊断用普通 X 射线机 | III | 13 | 使用 |
| 合计 |               | /   | 59 | /  |

表 1-2 已许可使用的非密封放射性物质

| 工作场所名称             | 等级<br>(类别) | 核素名称     | 日等效最大操作量<br>(Bq) | 年最大用量<br>(Bq) |
|--------------------|------------|----------|------------------|---------------|
| 新院核医学科             | 乙          | I-123    | 1.48E+6          | 3.7E+10       |
|                    |            | Tl-201   | 7.4E+6           | 1.85E+11      |
|                    |            | F-18     | 1.11E+8          | 3.15E+12      |
|                    |            | In-111   | 1.48E+6          | 3.7E+9        |
|                    |            | Sm-153   | 1.48E+7          | 3.7E+10       |
|                    |            | Ga-67    | 1.48E+7          | 3.7E+10       |
|                    |            | P-32     | 7.4E+5           | 1.85E+9       |
|                    |            | H-3      | 2.22E+4          | 5.55E+8       |
|                    |            | Tc-99m   | 3.7E+8           | 9.25E+12      |
|                    |            | Sr-89    | 2.96E+7          | 7.4E+10       |
| 新院核医学科<br>PET/CT 室 | 乙          | I-131    | 6.68E+7          | 1.67E+11      |
|                    |            | F-18     | 7.4E+7           | 1.48E+12      |
| 新院核医学科放免<br>室      | 丙          | I-125    | 4.44E+6          | 1.11E+10      |
| 新院手术室              | 乙          | I-125 粒子 | 1.85E+7          | 5.55E+10      |

表 1-3 已许可使用的放射源

| 序号 | 核素     | 类别  | 总活度 (Bq) /活度 (Bq) ×枚数 | 活动种类 |
|----|--------|-----|-----------------------|------|
| 1  | Ir-192 | III | 3.7E+11Bq×1           | 使用   |
| 2  | Ge-68  | V   | 4.7E+7Bq×1            | 使用   |
| 3  | Ru-106 | V   | 3.7E+6Bq×6            | 使用   |

## 1.2.2 近几年履行环保审批情况

北大人民医院近五年以来环评项目落实情况见表 1-4。

表 1-4 建设项目竣工验收落实情况

| 序号 | 环评批复文号       | 项目名称              | 类别 | 竣工验收文号 | 备注             |
|----|--------------|-------------------|----|--------|----------------|
| 1  | 京环审[2019]50号 | 使用II类射线装置项目       | II | /      | 2020年6月已完成自主验收 |
| 2  | 京环审[2022]51号 | 通州院区使用II类射线装置项目   | II | /      | 2023年6月已完成自主验收 |
| 3  | 京环审[2022]94号 | 通州院区新增使用II类射线装置项目 | II | /      | 2023年6月已完成自主验收 |
| 4  | 京环审[2023]44号 | 通州院区新建核医学科项目      | /  | /      | 正在建设中          |
| 5  | 京环审[2023]54号 | 新增使用1台医用电子直线加速器项目 | II | /      | 正在建设中          |

### 1.2.3 辐射安全管理情况

#### 1.2.3.1 辐射管理机构基本情况

为了加强辐射安全和防护管理工作，促进同位素和射线装置的安全使用，北大人民医院专门成立了辐射防护领导小组，由院长王俊担任组长，副院长张俊、放射科主任洪楠、核医学科主任王茜担任副组长，医务处、消化内科、骨创伤科、血管外科、放疗科、保卫处、医学装备处等部门的相关人员担任组员，并指定医务处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 辐射防护领导小组成员名单

| 职位  | 姓名  | 职务或职称 | 专业   | 工作部门 | 专/兼职 |
|-----|-----|-------|------|------|------|
| 组长  | 王俊  | 院长    | 胸外科学 | 胸外科  | 兼职   |
| 副组长 | 王建六 | 副院长   | 妇产科  | 妇产科  | 兼职   |
|     | 洪楠  | 副院长   | 医学影像 | 放射科  | 兼职   |
|     | 王茜  | 主任    | 医学影像 | 核医学科 | 兼职   |
| 组员  | 张海燕 | 主任    | 护理学  | 护理部  | 兼职   |
|     | 王晶桐 | 处长    | 内科学  | 医务处  | 兼职   |
|     | 王智峰 | 主任    | 内科学  | 消化内科 | 兼职   |
|     | 冯艺  | 科主任   | 麻醉学  | 麻醉科  | 兼职   |
|     | 程琳  | 副处长   | 外科学  | 医务处  | 兼职   |
|     | 吴晓舟 | 护士长   | 护理   | 手术室  | 兼职   |

|  |     |       |      |          |    |
|--|-----|-------|------|----------|----|
|  | 张小明 | 科主任   | 外科学  | 血管外科     | 兼职 |
|  | 张鹏  | 处长    | /    | 保卫处      | 兼职 |
|  | 李培  | 处长    | /    | 基建处      | 兼职 |
|  | 陈亚林 | 科主任   | 医学影像 | 放疗科      | 兼职 |
|  | 张贺  | 处长    | /    | 医学装备处    | 兼职 |
|  | 姜冠潮 | 处长    | 外科学  | 人事处      | 兼职 |
|  | 刘健  | 科主任   | 内科学  | 心内科      | 兼职 |
|  | 赵明威 | 科主任   | 眼科学  | 眼科       | 兼职 |
|  | 高承志 | 科主任   | 口腔学  | 口腔科      | 兼职 |
|  | 高杰  | 科主任   | 外科学  | 肝胆外科     | 兼职 |
|  | 翟莹  | 护师    | 护理   | 介入诊疗中心   | 兼职 |
|  | 张殿英 | 科主任   | /    | 招采中心     | 兼职 |
|  | 周钧  | 副主任   | /    | 白塔寺综合办公室 | 兼职 |
|  | 陈丽  | 助理研究员 | 管理学  | 医务处      | 专职 |

### 1.2.3.2 制定规章制度及落实情况

北大人民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、辐射防护和安全保卫制度、辐射工作人员个人剂量监测和职业健康管理制度、射线装置台账管理制度、辐射监测方案、辐射工作场所及射线装置检修维护制度、放射性废物管理制度和辐射安全事故应急预案等，并严格按照规章制度执行。

### 1.2.3.3 工作人员考核情况

北大人民医院制定了辐射工作人员培训考核计划。目前，医院从事辐射相关工作人员分批参加了辐射安全和防护培训，并通过了考核取得合格证书。

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

#### 1.2.3.4 个人剂量监测情况

北大人民医院现有的个人剂量监测工作已委托北京市疾病预防控制中心承担，监测频度为每3个月检测一次。北大人民医院目前辐射工作人员个人剂量计均佩戴在锁骨对应的领口处。医院2022年度个人剂量监测结果表明，全部324名人员中最大个人年度剂量为2.57mSv，均低于约束值5mSv。开展个人剂量检测的人员，包含新引进辐射工作人员、进修人员等，部分进修人员、新增辐射工作人员的工作时间较短，出现了不到四个季度的个人剂量检测结果的情况。

医院今后将继续加强个人受照剂量监测工作，如果某位辐射工作人员的单季度个人剂量监测结果高于年剂量约束值的1/4，将对其受照原因进行调查，结果由本人签字后存档；必要时将采取调离工作岗位或控制从事辐射工作时间等措施，保障辐射工作人员的健康。

#### 1.2.3.5 工作场所及辐射环境监测情况

北大人民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，检测报告齐全，检测结果均满足相关标准要求。根据2023年6月浙江建安检测研究院有限公司对新院区放疗科加速器室1的检测结果可知（检测条件：8MV X射线，剂量率6Gy/min，照射野：40cm×40cm），加速器机房外各检测点X射线剂量当量值均低于探测下限值0.13μSv/h。

**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、手套箱台面、注射窗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，医院已配备的辐射监测仪器，详细清单见表 1-6。

表 1-6 医院现有辐射防护监测仪器清单

| 序号 | 仪器名称     | 型 号        | 检定证号           | 检定有效期至          | 使用场所 | 数 量 |
|----|----------|------------|----------------|-----------------|------|-----|
| 1  | 活度计      | CRC-25R    | DD18J-DA010003 | 2024 年 5 月 24 日 | 核医学科 | 1   |
| 2  | 活度计      | CRC-15R    | DD18J-DA010002 | 2024 年 5 月 24 日 | 核医学科 | 1   |
| 3  | 辐射仪      | JB4000     | DD19J-CA000014 | 2024 年 2 月 1 日  | 核医学科 | 1   |
| 4  | 表面污染仪    | Inspector  | DD19J-DB000008 | 2024 年 2 月 6 日  | 核医学科 | 1   |
| 5  | 表面污染仪    | Inspector+ | DD19J-DB000003 | 2024 年 2 月 6 日  | 核医学科 | 1   |
| 6  | 表面污染仪    | JB4100     | DD19J-DB000004 | 2024 年 2 月 6 日  | 核医学科 | 1   |
| 7  | 电离室巡检仪   | 451P       | DD19J-CA000015 | 2024 年 2 月 1 日  | 放疗科  | 1   |
| 8  | 剂量仪      | 2572/1B    | DYjs2019-0087  | 2024 年 3 月 25 日 | 放疗科  | 1   |
| 9  | 固定式剂量报警仪 | BJY-1      | /              | /               | 放疗科  | 1   |
| 10 | 个人剂量报警仪  | ECOTEST    | /              | /               | 放疗科  | 10  |

#### 1.2.3.6 辐射事故应急管理情况

北大人民医院依据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，制定了关于本单位辐射项目的辐射事故（件）应急预案，以保证本单位一旦发生辐射意外事件时，能迅速采取必要和有效的应急响应行动，妥善处理放射事故，保护工作人员和公众的健康与安全，同时在预案中进一步明确规定本单位有关意外辐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，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报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康部门报告。2022 年 2 月 24 日，北大人民医院在新院区核医学科开展了核医学场所事故应急演练，

此次演练的目的是规范医院核医学科和相关部门工作人员应对突发放射性场所外来人员入侵、放射性药物被盗的应急处理程序并强化处理能力，将放射性药物突发事件后果降低到最小程度，最大限度地保障辐射工作人员与公众的安全，维护正常和谐的放射性核素诊疗及秩序。做到辐射事故的早发现，及时报告，快速处理，建立快速反应机制。通过此次应急演练，提高了医护人员的应急处理能力和自我防护意识，达到预期效果。

#### **1.2.3.7 放射性废物的管理情况**

北大人民医院按照《北京市生态环境局办公室关于加强医疗机构核医学放射性废物管理的通知》要求，对放射性废物进行管理：将放射性固体废物分类收集于专用的废物桶内，在废物衰变间内暂存。A类固体废物暂存时间超过30天、B类固体废物暂存时间超过10倍最长半衰期且不少于30天（含I-131废物暂存180天）后，使用经检定或校准合格的检测仪器对废物表面污染和辐射剂量率水平进行监测，辐射剂量率监测为所处环境本底水平，且 $\alpha$ 、 $\beta$ 表面污染水平分别小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 和 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，可对废物解控作为医疗废物处置，并详细记录“放射性固体废物暂存、处置管理台账”，内容包括放射性固体废物分类、废物所含核素名称、重量（kg）、废物暂存起始日期、废物暂存截止日期、表面污染自测结果、辐射剂量率自测结果、是/否符合解控要求、废物处置日期、废物处置操作人员、部门负责人审核、废物去向，每一袋放射性固体废物填写一行记录。

北大人民医院新院区核医学科现有衰变池为推流式衰变池，总体积为 $20\text{m}^3$ ，设有4级池，每级 $5\text{m}^3$ 。2022年度委托核工业北京化工冶金研究院分析测试中心对衰变池废水进行了检测，监测结果显示，Tc-99m、F-18和I-131均低于探测下限（Tc-99m探测下限为 $1.5\text{mBq}/\text{L}$ ，F-18探测下限为 $7.2\text{mBq}/\text{L}$ ，I-131探测下限为 $2.3\text{mBq}/\text{L}$ ）；总 $\alpha$ 低于探测下限 $0.04\text{Bq}/\text{L}$ （远低于 $1\text{Bq}/\text{L}$ 的排放限值），总 $\beta$ 为 $1.1\text{Bq}/\text{L}$ （远低于 $10\text{Bq}/\text{L}$ 的排放限值）。

#### **1.2.3.8 其他情况**

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

### 1.3 本项目情况

#### 1.3.1 本项目背景

为深入落实京津冀医疗卫生协同发展要求，进一步疏解北京市中心城区医疗资源，并满足北京城市副中心建设需要，北大人民医院已在通州区南凤西路 39 号建设北大人民医院通州院区。

北大人民医院放疗科创建于 1988 年，创立之初从建楼、置办设备开始，一直依托医院的大三甲医院平台，联合各个强大的肿瘤学科，组建多个多学科诊疗（MDT）团队，为患者提供优质医疗服务。北大人民医院拟在通州院区行政科研楼一层新建通州院区放射治疗中心，通州区乃至京津冀地区广大百姓将会得到优质的肿瘤治疗服务，此举措为疏解北京非首都功能做出了突出贡献，是推动京津冀协同发展的重大战略举措，同时推动核医学科实验科研有重要意义。

#### 1.3.2 本项目环境影响评价内容

北大人民医院拟对通州院区行政科研楼一层的多功能厅进行改建，建设成通州院区放射治疗中心，拟设置 3 个加速器机房、1 个后装治疗室和配套模拟定位 CT、检查室等。放射治疗中心配套的模拟定位机将另行备案，本项目主要包括：

(1) 新建 3 间加速器机房（加速器室 1、2、3），在加速器室 1 新增 1 台 Elekta Harmony Pro 型医用电子直线加速器，厂家为医科达（北京）医疗器械有限公司，设备 X 射线最大能量 10MV，电子束最大能量 15MeV，另外 2 间加速器机房型号待定（其中加速器室 2 X 射线最大能量 10MV，电子束最大能量 18MeV；加速器室 3 X 射线最大能量 6MV，电子束最大能量 15MeV）。

(2) 新建 1 间后装治疗室，新增使用 1 台近距离治疗后装机（内含 1 枚 Ir-192 放射源，活度  $3.7E+11Bq$ ）。

本项目辐射源情况见表1-7。

表 1-7 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  | 加速器室1 | Elekta Infinity医用电子直线加速器 | 10MV X射线: 6Gy/min (等中心1m处)；10MV FFF模式下X射线: 22Gy/min；15MeV: 6Gy/min；最大照射野40cm×40cm；CBCT: | 医科达（北京）医疗器械有限公司 | II类 |

|   |       |          |   |    |      |
|---|-------|----------|---|----|------|
|   |       |          | 150kV/500mA   |    |      |
| 2 | 加速器室2 | 待定       | 10MV X射线: 6Gy/min (等中心1m处)；10MV FFF模式下X射线: 24Gy/min；18MeV: 6Gy/min；最大照射野40cm×40cm；CBCT: 150kV/630mA | 待定 | II类  |
| 3 | 加速器室3 | 待定       | 10MV X射线: 6Gy/min (等中心1m处)；6MV FFF模式下X射线: 14Gy/min；15MeV: 6Gy/min；最大照射野40cm×40cm；CBCT: 150kV/630mA  | 待定 | II类  |
| 4 | 后装治疗室 | 近距离治疗后装机 | Ir-192, 3.7E+11Bq (10Ci)  | 待定 | III类 |

### 1.3.4 目的和任务的由来

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》和《建设项目环境影响评价分类管理名录》相关规定，本项目应当进行环境影响评价，编制环境影响报告表，报生态环境主管部门审批。

根据生态环境部《建设项目环境影响报告书(表)编制监督管理办法》(2019年生态环境部令第9号)要求，北京辐环科技有限公司符合第九条第一款规定，无该条第三款所列情形，不属于该条第二款所列单位。公司有专职环评工程师，有能力开展环境影响评价工作。受医院的委托，评价机构环评人员在现场踏勘、收集资料的基础上，对该项目建设和运行对环境的辐射影响进行了分析评价，并编制了环境影响报告表。评价主要考虑医用直线加速器在使用过程中，对周围环境的辐射影响，对职业人员和公众的辐射影响。

### 1.3.5 项目建设正当性和必要性

2012年1月通州区卫健委在通州区漷县镇漷县村设置“通州区第四区域医疗中心”(即通州区中西医结合医院新院区)，工程项目于2014年8月奠基(未完成建设)，但随后通州区中西医结合医院因内部原因无法承接，未能建成通州区中西医结合医院新院区(此后与通州区中西医结合医院无关)。2016年9月通州区卫健委与北京大学人民医院商洽并签署合作意向，通州区卫健委完成院区的建筑工程、具备使用条件后(不包括工作人员)，完全交由人民医院进行管理，于该址成立北京大学人民医院通州院区(原通州区第四区域医疗中心)。

通州院区是人民医院的直属院区，由人民医院本部垂直管理。通州院区门诊急诊各类先进设备设施药品齐全，拟设 800 张病床和功能齐全的手术室与重症监护中心。随着肿瘤病患的日益增加，为了满足通州地区肿瘤患者的就医需求，医院拟对通州院区行政科研楼一层的多功能厅进行改建，建设成通州院区放射治疗中心，放射治疗中心的建设可以提高医院对疾病的诊治能力，医用加速器适应症广泛，可用于头颈、胸腔、腹腔、盆腔、四肢等部位的原发或继发肿瘤，以及手术后残留的术后或手术前的术前治疗等。直线加速器设备运行不产生放射性“三废”，对周围环境的辐射影响也很小，对职业人员、公众移机环境带来的不利影响，远低于其使用对社会带来的利益，故该核技术应用项目具有正当性和必要性。

### 1.3.6 开展新项目的技术能力

根据建设单位提供的资料，本项目建成后放射治疗中心工作人员配置情况与《放射诊疗管理规定》、《北京市乙类大型医用设备配置准入标准》符合情况详见表 1-8。

表 1-8 工作人员配置情况

| 岗位  | 加速器首次配置   | 加速器每年治疗 1500 名患者人员要求 | 通州院区 3 台加速器预计配备人数 | 通州院区后装机预计配备人数 | 合计  | 备注                           |
|-----|---|----------------------|-------------------|---------------|-----|------------------------------|
| 医师  | 1名拥有副高级或以上本专业技术职务任职资格，且具有5年或以上放射治疗专业临床工作经验的放疗医师 | 至少6名                 | 6 名               | 1 名           | 7 名 | 本项目建成后，根据实际投入运行设备情况配备相应工作人员。 |
| 物理师 | 至少1名拥有中级或以上本专业技术职务任职资格，或者具有5年或以上医学物理工作经验的物理师    | 至少4名                 | 4 名               | 1名            | 5名  |                              |
| 技师  | 至少2名具有2年或以上放疗工作经验的技师                            | 至少10名                | 10 名              | 2名            | 12名 |                              |

|        |      |      |    |   |    |  |
|--------|------|------|----|---|----|--|
| 护<br>士 | 至少1名 | 至少1名 | 1名 | / | 1名 |  |
|--------|------|------|----|---|----|--|

本项目建成后，放射治疗中心拟新增 25 名辐射工作人员，能够满足 3 台加速器和 1 台后装机的工作需求。医院将根据实际投入运行设备情况，配备满足要求的工作人员。

## （2）检测仪器配备情况

本项目启用后，通州院区放射治疗中心拟新配置 1 台便携式 X- $\gamma$  剂量率仪、4 台固定式剂量报警仪和 8 台个人剂量报警仪。

表 2 放射源

| 序号 | 核素名称   | 总活度 (Bq) /<br>活度 (Bq) ×枚数 | 类别  | 活动种类 | 用途   | 使用场所            | 贮存方式与地点  | 备注 |
|----|--------|---------------------------|-----|------|------|-----------------|----------|----|
| 1  | Ir-192 | 3.7E+11Bq×1枚              | III | 使用   | 放射治疗 | 通州院区放射治疗中心后装治疗室 | 后装机设备内贮存 | 新增 |
|    |        |                           |     |      |      |                 |          |    |
|    |        |                           |     |      |      |                 |          |    |
|    |        |                           |     |      |      |                 |          |    |
|    |        |                           |     |      |      |                 |          |    |

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

表3 非密封放射性物质

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

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 | 1  | Elekta Infinity | 电子   | 10MV (X线)<br>15MeV (电子束) | 10MV 常规模式: 6Gy/min、<br>10MVFFF 模式: 22Gy/min;<br>电子线: 6Gy/min | 放射治疗 | 通州院区行政科研楼放射治疗中心加速器室1  | 新增 |
| 2  | 医用电子直线加速器 | II | 1  | 待定              | 电子   | 10MV (X线)<br>18MeV (电子束) | 10MV 常规模式: 6Gy/min、<br>10MVFFF 模式: 24Gy/min;<br>电子线: 6Gy/min | 放射治疗 | 通州院区行政科研楼放射治疗中心加速器室 2 | 新增 |
| 3  | 医用电子直线加速器 | II | 1  | 待定              | 电子   | 10MV (X线)<br>15MeV (电子束) | 10MV 常规模式: 6Gy/min、<br>6MVFFF 模式: 14Gy/min; 电子线: 6Gy/min     | 放射治疗 | 通州院区行政科研楼放射治疗中心加速器室 3 | 新增 |

(二) X 射线机, 包括工业探伤、医用诊断和治疗、分析等用途

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

(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 ( $\mu$ A) | 中子强度 (n/s) | 用途 | 工作场所 | 氚靶情况    |      |    | 备注 |
|----|----|----|----|----|------------|------------------|------------|----|------|---------|------|----|----|
|    |    |    |    |    |            |                  |            |    |      | 活度 (Bq) | 贮存方式 | 数量 |    |
| 无  |    |    |    |    |            |                  |            |    |      |         |      |    |    |

表 5 废弃物（重点是放射性废弃物）

| 名称                                    | 状态 | 核素名称 | 活度 | 月排放量 | 年排放总量 | 排放口浓度 | 暂存情况 | 最终去向          |
|---------------------------------------|----|------|----|------|-------|-------|------|---------------|
| 有害气体O <sub>3</sub> 、NO <sub>x</sub> 等 | 气体 | /    |    |      | 22.8g |       | 直接排放 | 经通风系统直接排入环境大气 |
|                                       |    |      |    |      |       |       |      |               |
|                                       |    |      |    |      |       |       |      |               |
|                                       |    |      |    |      |       |       |      |               |

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<sup>3</sup>；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<sup>3</sup>）和活度（Bq）。

表 6 评价依据

|      |  |
|------|--|
| 法规文件 | <p>(1) 《中华人民共和国环境保护法》，主席令第九号，2015 年 1 月 1 日起实施。</p> <p>(2) 《中华人民共和国环境影响评价法》，主席令第二十四号，2018 年 12 月 29 日修订并实施。</p> <p>(3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，主席令第六号，2003 年 10 月 1 日起实施。</p> <p>(4) 《建设项目环境保护管理条例》，国务院令第 682 号修订，2017 年 6 月 21 日公布，2017 年 10 月 1 日起实施。</p> <p>(5) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院令第 709 号第二次修订，2019 年 3 月 2 日第二次修订版公布并实施。</p> <p>(6) 《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》，生态环境部令第 16 号，2020 年 11 月 30 日公布，2021 年 1 月 1 日起实施。</p> <p>(7) 《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》，生态环境部令第 9 号，2019 年 9 月 20 日公布，2019 年 11 月 1 日起施行。</p> <p>(8) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，生态环境部令第 20 号修订，2021 年 1 月 4 日公布并实施。</p> <p>(9) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》，原环境保护部第 18 号令，2011 年 4 月 18 日公布，2011 年 5 月 1 日起实施。</p> <p>(10) 《关于发布&lt;射线装置分类&gt;的公告》，原环境保护部、国家卫生计生委公告第 66 号，2017 年 12 月 5 日。</p> <p>(11) 《关于发布&lt;建设项目竣工环境保护验收暂行办法&gt;的公告》，国环规环评[2017]4 号，2017 年 11 月 20 日。</p> <p>(12) 《北京市环境保护局办公室关于做好辐射类建设项目竣工环境保护验收工作的通知》，京环办[2018]24 号，2018 年 1 月 25 日。</p> <p>(13) 《北京市城乡规划条例》，京人常[2021]61 号，2021 年 9 月 24 日。</p> <p>(14) 《北京市辐射工作场所辐射环境自行监测办法（试行）》，原北京</p> |
|------|--|

|      |   |
|------|---|
|      | <p>市环境保护局文件, 京环发〔2011〕347号。</p> <p>(15) 《辐射安全与防护监督检查技术程序》, 生态环境部, 2020年2月。</p> <p>(16) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》生态环境部公告2019年第57号, 2019年12月24日。</p> <p>(17) 《关于进一步优化辐射安全考核的公告》生态环境部公告2021年第9号, 2021年3月11日。</p> <p>(18) 《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》, 原国家环保总局, 环发〔2006〕145号。</p> <p>(19) 《放射诊疗管理规定》, 中华人民共和国卫生部令第46号, 2006年3月1日起实施。</p>   |
| 技术标准 | <p>(1) 《辐射环境保护管理导则—核技术利用建设项目环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016), 环境保护部。</p> <p>(2) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)。</p> <p>(3) 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》(GB9706.5-2008)。</p> <p>(4) 《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021)。</p> <p>(5) 《放射治疗放射防护要求》(GBZ121-2020)。</p> <p>(6) 《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)。</p> <p>(7) 《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)。</p> <p>(8) 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第3部分: <math>\gamma</math>射线源放射治疗机房》(GBZ/T201.3-2014)。</p> <p>(9) 《密封放射源及密封<math>\gamma</math>放射源容器的卫生防护标准》(GBZ114-2006)。</p> <p>(10) 《工作场所有害因素职业接触限值第1部分: 化学有害因素》(GBZ2.1-2019)。</p> |

|    |  |
|----|--|
|    | <p>(11) 《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ2.2-2018)。</p> <p>(12) 《环境 <math>\gamma</math> 辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-2021)。</p> <p>(13) 《辐射环境监测技术规范》(HJ61-2021)。</p> <p>(14) 《环境空气质量标准》(GB3095-2012)。</p> <p>(15) 《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》(GA1002-2012)。</p>  |
| 其他 | <p>(1) 原国家环境保护局监督管理司,《中国环境天然放射性水平》,1995 年 8 月;</p> <p>(2) NCRP Report No.151: Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities, 2005;</p> <p>(3) 辐射安全手册, 科学出版社, 2011 年;</p> <p>(4) 北大人民医院提供的与本项目相关的申请和技术资料, 2023.8。</p> |

表 7 保护目标与评价标准

## 7.1 评价范围

### 7.1.1 评价内容

本项目为在通州院区新建放射治疗中心并新增使用 3 台直线加速器和 1 台后装机放疗装置及其配套的治疗机房。

### 7.1.2 关注问题

(1) 使用的放射治疗装置辐射防护屏蔽设计是否满足国家相关标准的要求。

(2) 辐射安全管理情况及污染防治措施是否满足国家法律法规及相关标准的要求。

### 7.1.3 评价因子

本项目的环境影响评价因子为 X 射线、臭氧和氮氧化物等。

### 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加速器机房实体屏蔽外周界向外围扩展 50m 的区域。本项目评价范围示意图见图 7-1 所示，本项目相关场所控制区周围 50m 范围内，无学校、居民楼等敏感目标，周围 50m 区域都在医院内部。

## 7.2 保护目标

本项目新建放射治疗中心位于通州院区西北角的行政科研楼一层南侧，所在区域为单层建筑，单层建筑层高 8.75m (后装治疗室部分建筑层高 5.7m)，无地下室。三个加速器室位于放射治疗中心南侧，由西至东分别为加速器室 1、加速器室 2 和加速器室 3，后装治疗室位于东南侧。加速器室 1 东侧为加速器室 2，南侧为楼外绿地，西侧为楼外通道，北侧为水冷机房 1 和加速器控制室 1；加速器室 2 东侧为加速器室 3，南侧为楼外绿地，西侧为加速器室 1，北侧为水冷机房 2 和加速器控制室 2；加速器室 3 东侧为水冷机房 3 和加速器控制室 3，南侧为楼外绿地，西侧为加速器室 2，北侧为模拟定位 CT 室及控制室、卫生间等；后装治疗室东侧和南侧为楼外绿地，西侧为候诊区和后装机操作间，

北侧为配电室。3间加速器机房和后装治疗室所在建筑室顶为屋面（非上人屋面），加速器室顶、后装治疗室室顶与屋面楼板间设有管道，无地下室。评价范围50m范围内均为医院内部。根据项目特点及周围毗邻关系，确定主要环境保护目标主要为评价范围内工作人员，以及场所周围活动的公众人员。本项目将采取有效的辐射防护与安全管理措施，确保放射治疗中心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。本项目评价范围见图7-1所示，项目边界周围50m范围内保护目标相关情况见表7-1所示。

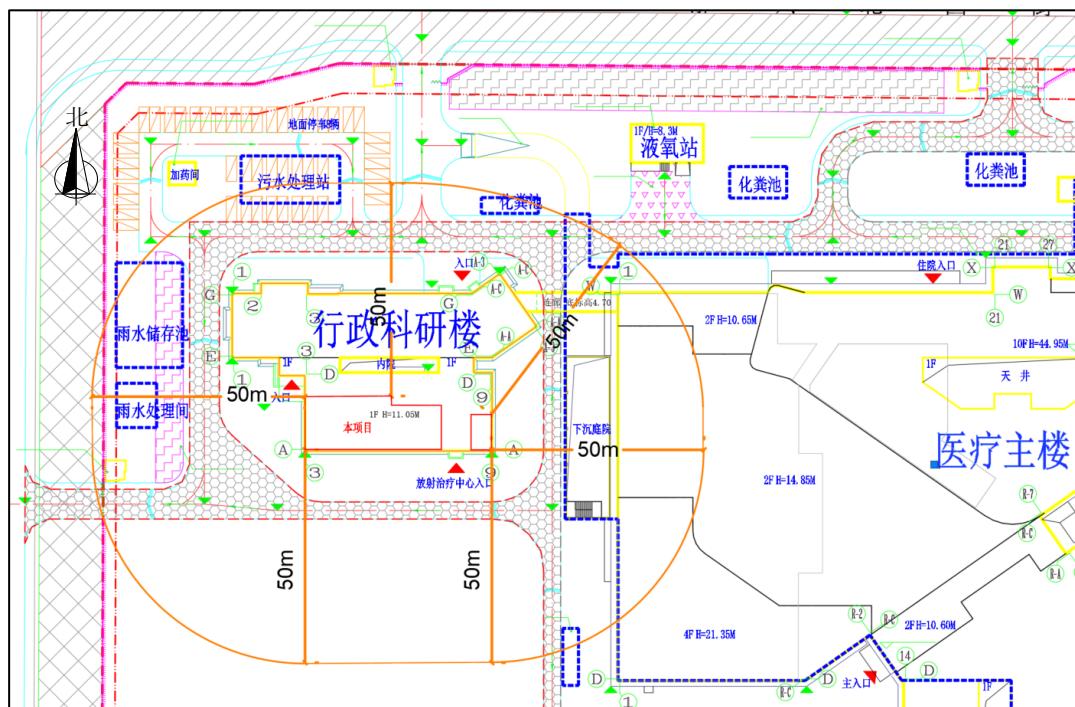


图7-1 本项目评价范围示意图

表7-1 周围50m范围内的保护目标

| 保护目标         | 方位    | 最近距离<br>(m) | 常停留<br>人数 | 备注   |
|--------------|-------|-------------|-----------|--|
| 工作人员         | 北侧/东侧 | 紧邻          | 26        | 加速器控制室1、加速器控制室2、加速器控制室3、后装治疗室控制室、模拟定位CT控制室 |
| 医院其他公工作人员    | 东侧    | 30~50       | 100       | 医疗主楼相关科室                                   |
| 公众           | 南侧    | 紧邻          | /         | 楼外绿地                                       |
| 医院其他公工作人员、公众 | 西侧    | 35~44       | /         | 雨水处理间                                      |
| 医院其他公工作人员、公众 | 北侧    | 0~8         | 8         | 放射治疗中心模拟定位CT室及控制室、诊室、候诊区等                  |

|                  |    |       |     |  |
|------------------|----|-------|-----|--|
| 医院其他公工作人<br>员、公众 | 北侧 | 9~25  | 100 | 行政科研楼主楼部分，楼<br>上六层建筑，其中一层为<br>食堂，二层为科研行政楼<br>办公室等，三层、四层为<br>职工宿舍，五层、六层为<br>实验室，地下一层为厨房<br>用房 |
| 医院其他公工作人<br>员、公众 | 北侧 | 40~50 | /   | 污水处理站、停车位等   |

放射治疗中心所在行政科研楼一层的平面布局图见图 7-2 所示，楼上平面布局图见图 7-3。

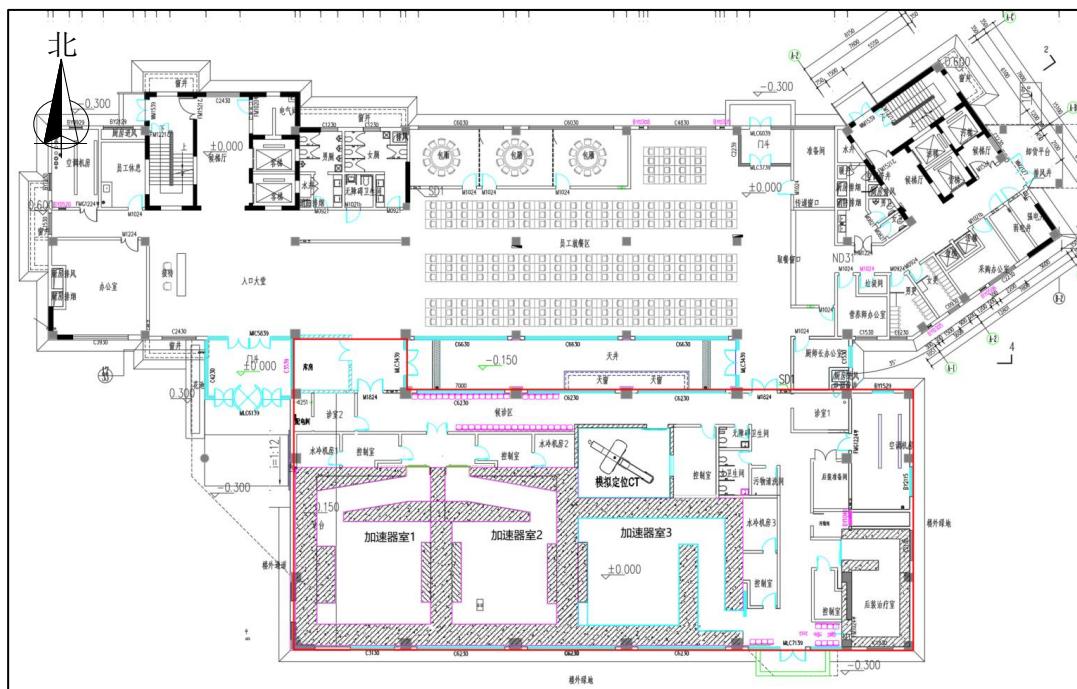


图 7-2 行政科研楼一层平面布局图

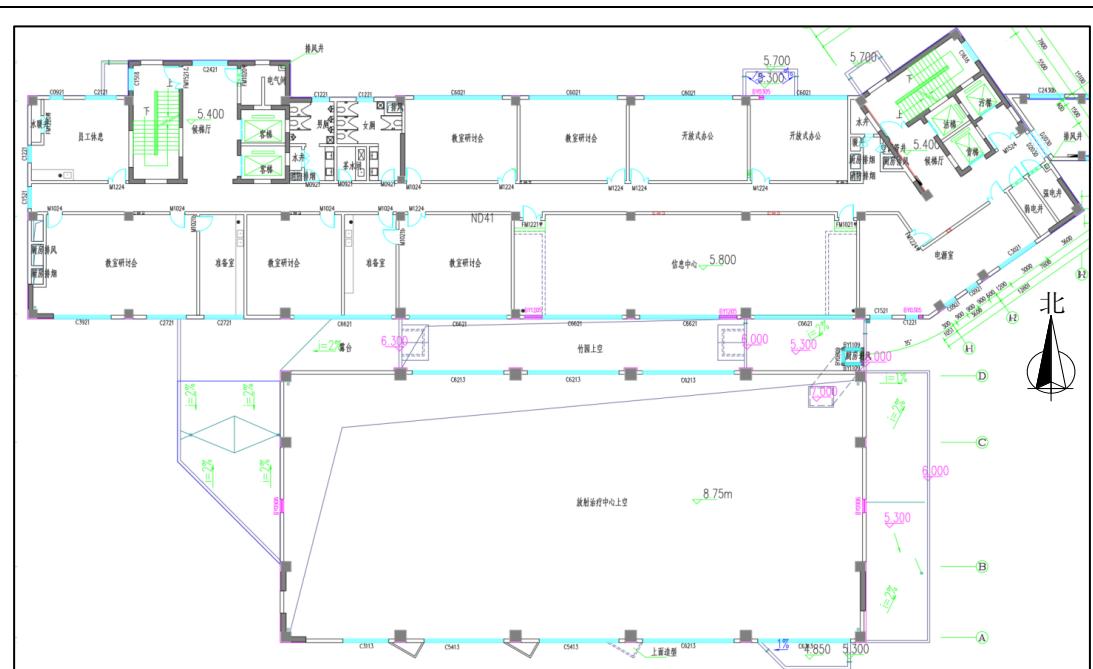


图 7-3 行政科研楼二层平面布局图



图 7-4 行政科研楼三层平面布局图

### 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<br>四肢或皮肤的当量剂量 500mSv/a | 眼晶体的当量剂量 15mSv/a<br>皮肤的当量剂量 50mSv/a          |

GB18871-2002 规定了剂量约束值: 对于职业照射, 剂量约束是一种与源相关的个人剂量值, 用于限制最优化过程所考虑的选择范围。对于公众照射, 剂量约束是公众成员从一个受控源的计划运行中接受的年剂量的上界。

### 7.3.2 剂量约束值

职业照射, 本项目辐射工作人员取 2mSv/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

对于本项目, 要求在满足上述年剂量约束值的同时, 参照《放射治疗辐射安全与防护要求》(HJ1198-2021), 本项目加速器室控制区边界外 30cm 处的辐射剂量率应不大于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

### 7.3.4 非放射性控制值

#### (1) 室内空气质量

根据 GBZ2.1-2019, 工作场所空气中  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_2$  的浓度限值分别为  $0.3\text{mg}/\text{m}^3$  和  $5\text{mg}/\text{m}^3$ 。

#### (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  $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_2$  的 1 小时平均浓度  $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 。

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

北大人民医院通州院区位于通州区南凤西一路 39 号，通州院区东侧临漷城西二路，南侧临漷马路，西侧临漷城西一路，北侧临漷兴北四街。医院地理位置见图 8-1。



图 8-1 北大人民医院通州院区地理位置示意图

### 8.1.2 场所位置

本项目新建放射治疗中心位于通州院区西北角的行政科研楼一层南侧，所在区域为单层建筑。三个加速器室位于放射治疗中心南侧，由西至东分别为加速器室 1、加速器室 2 和加速器室 3，后装治疗室位于东南侧。加速器室 1 东侧为加速器室 2，南侧为楼外绿地，西侧为楼外通道，北侧为水冷机房 1 和加速器控制室 1；加速器室 2 东侧为加速器室 3，南侧为楼外绿地，西侧为加速器室 1，北侧为水冷机房 2 和加速器控制室 2；加速器室 3 东侧为水冷机房 3 和加速器控制室 3，南侧为楼外绿地，西侧为加速器室 2，北侧为模拟定位 CT 室及控制室、卫生间等；后装治疗室东侧和南侧为楼外绿地，西侧为候诊区和后装机操作间，北侧为配电室。3 间加速器机房和后装治疗室所在建筑室顶为屋面（非上人屋面），加速器室顶、后装治疗室室顶与屋面楼板间设有管道，无地下室。

## 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、 $\gamma$  辐射剂量率水平监测。

### (3) 监测对象及点位布设

监测对象: 本次监测针对拟建放射治疗中心进行环境辐射现状监测。

监测点位: 本次监测对拟建放射治疗中心所在区域及周边进行环境地表  $\gamma$  辐射剂量率监测, 监测点位布设见图 8-2。

### (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- $\gamma$  射线剂量率监测仪器参数与监测规范**

|       |   |
|-------|---|
| 仪器名称  | 环境剂量率仪  |
| 型号/编号 | GH-102A /20170404   |
| 检定证书  | 中国计量科学研究院<br>(检定证书编号: DLjl2023-01431)<br>有效期: 2023 年 2 月 9 日~2024 年 2 月 8 日 |
| 监测规范  | HJ 1157-2021 《环境 $\gamma$ 辐射剂量率测量技术规范》                                      |

### (5) 监测方法

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

### (6) 现状监测结果及评价

2023 年 8 月 16 日, 由深圳市瑞达检测技术有限公司对项目地及周围环境辐射水平进行了检测, 评价区  $\gamma$  剂量率的监测布点及监测数据见表 8-2 和图 8-1。

**表 8-2 拟建放射治疗中心及周围辐射环境水平监测结果**

| 编号 | 检测位置   | 检测结果 $\mu\text{Gy/h}$ |      |
|----|--------|-----------------------|------|
|    |        | 平均值                   | 标准差  |
| 1  | 多功能厅中心 | 0.10                  | 0.02 |

|   |        |      |      |
|---|--------|------|------|
| 2 | 现有空调机房 | 0.09 | 0.02 |
| 3 | 现有储藏间  | 0.10 | 0.01 |
| 4 | 现有声空室  | 0.11 | 0.01 |
| 5 | 多功能厅南侧 | 0.08 | 0.01 |
| 6 | 多功能厅西侧 | 0.10 | 0.01 |
| 7 | 多功能厅北侧 | 0.11 | 0.01 |
| 8 | 天井     | 0.08 | 0.01 |
| 9 | 食堂     | 0.10 | 0.01 |

注：检测结果含宇宙射线响应值。

根据《北京市环境天然贯穿辐射水平调查研究》（北京市环境保护科学研究所）2015 版资料，北京市天然辐射水平范围为 60~123nGy/h（室外，含宇宙射线）和 69.8~182nGy/h（室内，含宇宙射线）。由表 8-2 中检测结果可知，拟改造辐射工作场所及周围的 X-γ 辐射剂量率为 0.08~0.11μGy/h，为北京市的天然本底范围之内，未发现有异常高值。

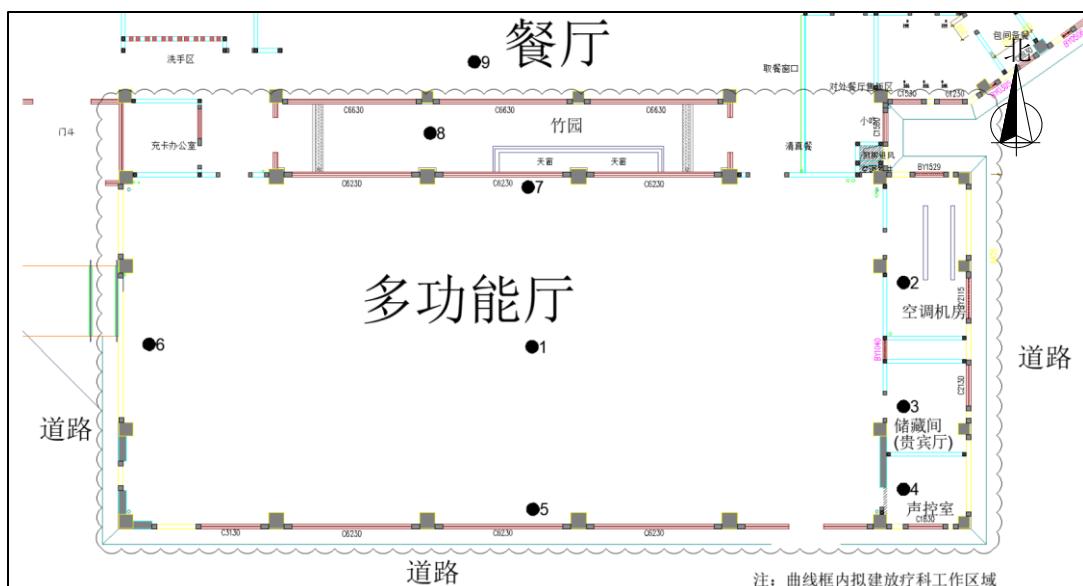


图 8-2 拟建放射治疗中心及周围辐射环境水平监测点位图

表 9 项目工程分析与源项

## 9.1 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。

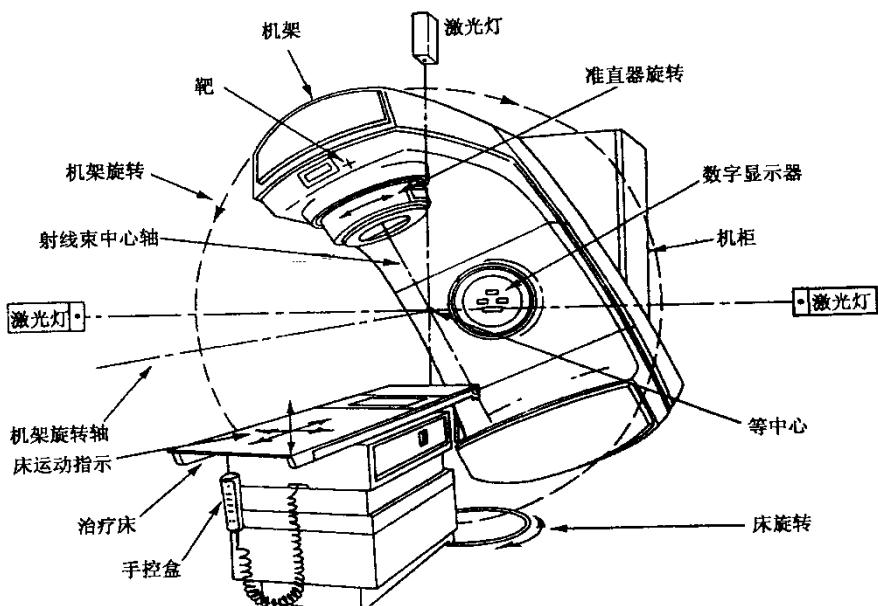


图 9-1 电子直线加速器示意图

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。

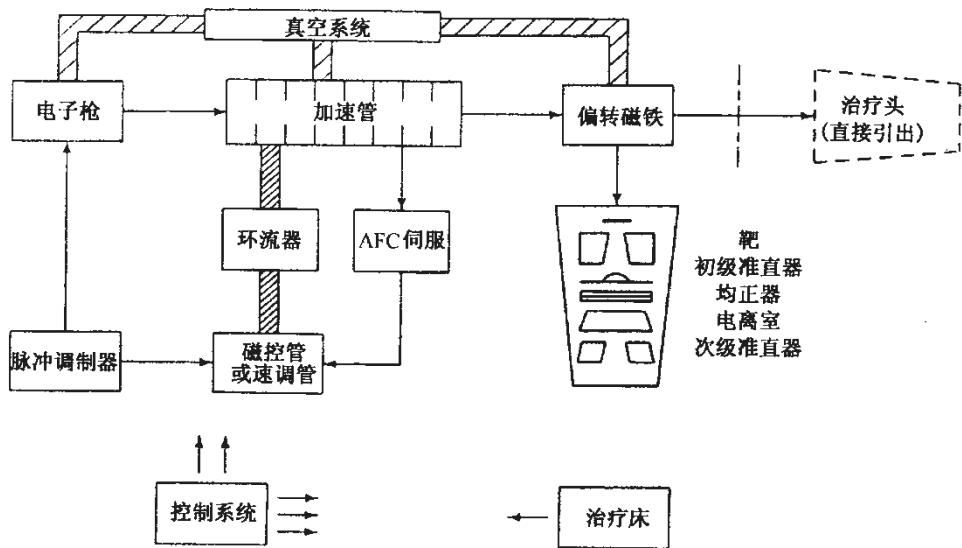


图 9-2 典型医用电子直线加速器内部结构图

### 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，与放射治疗中心预约登记，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常规放疗、适形放疗及调强放疗的治疗计划；
- (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。

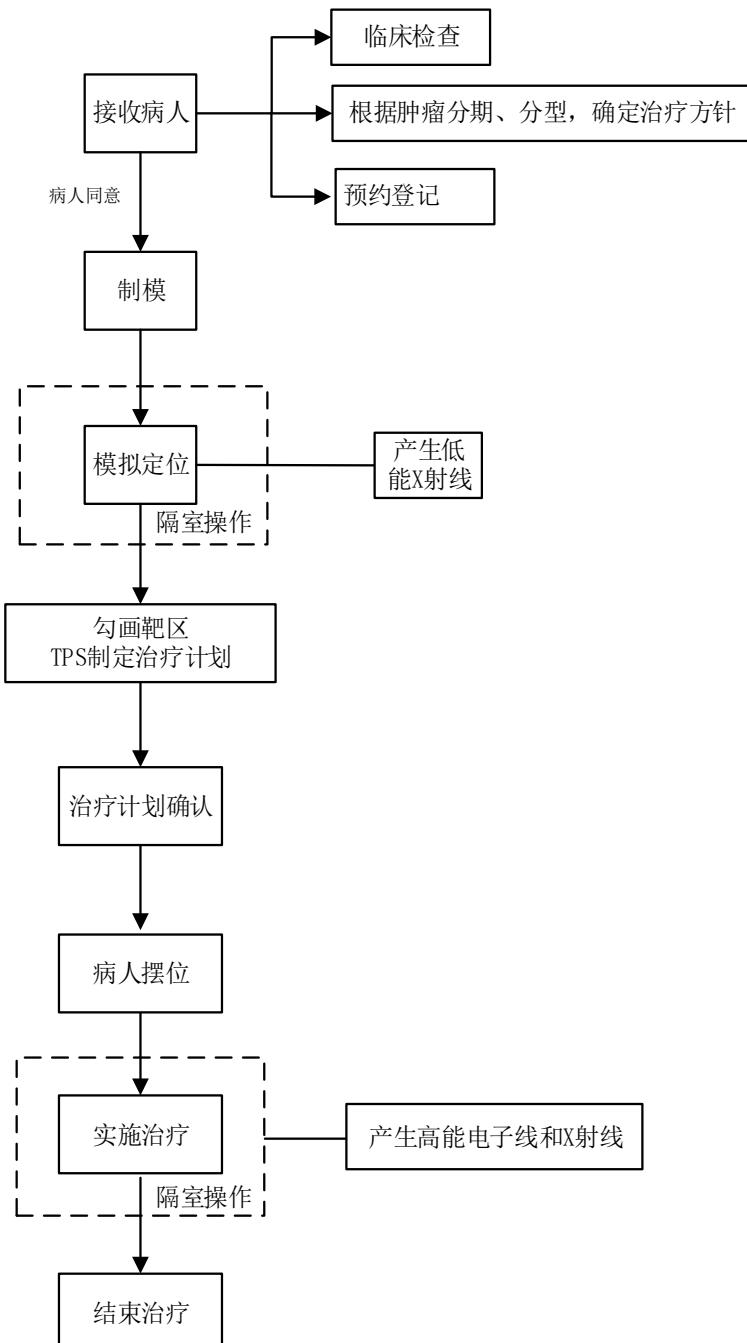


图 9-3 医用电子直线加速器放射治疗工作流程

## 2、使用规划

- (1) 工作量：每台直线加速器按最大工作负荷 60 人次/天进行评价。每人次“上床、摆位、照射、下床”平均时间约 6-8 分钟，全天完成 60 人次治疗，

所需时间约 6h-8h。

(2) 出束时间：既开展常规放射治疗，也开展 IMRT、VMAT 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 60 人次，300 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，每台加速器日治疗 60 人时出束时间为 30min/d，年总照射时间 125h/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) 使用因子：各个方向治疗照射的使用因子保守取  $U=0.25$ 。

### 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

| 序号 | 指标                   | 技术参数  |   |  |
|----|----------------------|---|---|--|
|    |                      | 加速器室 1  | 加速器室 2  | 加速器室 3   |
| 1  | 型号及名称                | Elekta Infinity 医用电子直线加速器                               | 电子直线加速器（型号待定）   | 电子直线加速器（型号待定）  |
| 2  | 射线种类                 | X 射线、电子线  | X 射线、电子线  | X 射线、电子线   |
| 3  | 能量分档                 | X 射线：最高能量为 10MV   | X 射线：最高能量为 10MV   | X 射线：最高能量为 10MV  |
| 4  |                      | 电子线：电子线最高能量为 15MeV                                      | 电子线：电子线最高能量为 18MeV                                      | 电子线：电子线最高能量为 15MeV                                     |
| 5  | 等中心剂量率               | X 射线为 6Gy/min<br>(10MV 常规模式)； 22Gy/min<br>(10MV FFF 模式) | X 射线为 6Gy/min<br>(10MV 常规模式)； 24Gy/min<br>(10MV FFF 模式) | X 射线为 6Gy/min<br>(10MV 常规模式)； 14Gy/min<br>(6MV FFF 模式) |
| 6  |                      | 电子线为 6Gy/min  | 电子线为 6Gy/min  | 电子线为 6Gy/min   |
| 7  | 等中心处最大照射野<br>(主射束夹角) | 400mm×400mm<br>(28°×28°)                                | 400mm×400mm<br>(28°×28°)                                | 400mm×400mm<br>(28°×28°)                               |
| 8  | 泄漏率                  | 小于等中心处吸收剂量的 0.1%  | 小于等中心处吸收剂量的 0.1%  | 小于等中心处吸收剂量的 0.1%                                       |
| 9  | 靶到等中心点距离             | 1.0m  | 1.0m  | 1.0m   |

### 9.1.4 污染源项描述

#### 9.1.4.1 主要的放射性污染物

电子直线加速器运行时电子轰击靶物质生产轫致辐射（X 射线）。本项目加速器常规最大输出 X 射线辐射剂量率为 600cGy/min（FFF：2400cGy/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 10MV 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，产生的轫致辐射会很小，约为使用 X 射线束时剂量的  $10^{-6}$ ，因此，加速器电子治疗时的机房防护要求，低于 X 射线治疗时的防护；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《放射治疗放射防护要求》（GBZ 121-2020），本项目 X 射线能量不高于 10MV 的加速器，故无需考虑中子辐射及中子俘获  $\gamma$  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。

#### 9.1.4.2 污染途径

##### 1、正常工况时的污染途径

(1) 直线加速器产生的轫致辐射 X 射线，成像系统运行时也产生 X 射线，但其能量要远低于治疗束。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<sub>3</sub> 和氮氧化合物等有害气体。

##### 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 后装机

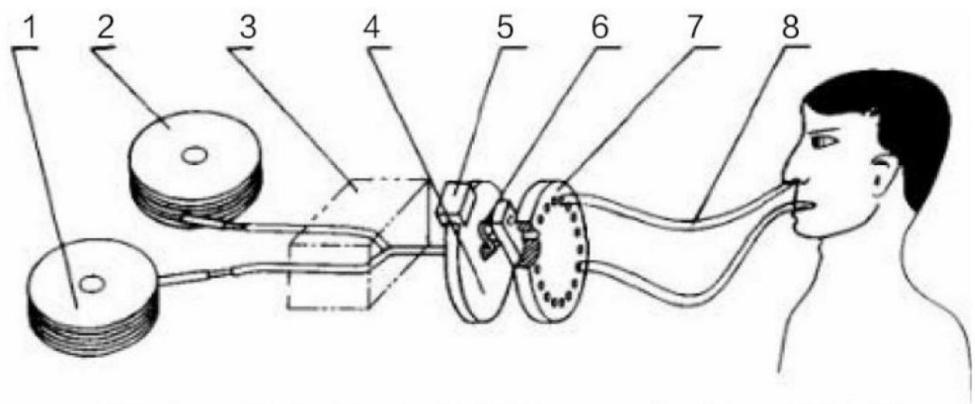
### 9.2.1 工作原理

后装治疗机即近距离放射治疗机，是新一代肿瘤治疗设备，可进行后装放射治疗。后装放射治疗是指把不带放射源的治疗容器置于治疗部位，由电脑遥控步进电机将放射源送入容器进行放射治疗，如此可避免放置治疗容器过程中医务人员因放射受伤。可以将放射源准确安全地输送到患者需要治疗的部位进行放射治疗。由于放置位置准确、距病体组织近等优点，在治疗妇科、鼻咽、食道、支气管、直肠、膀胱、乳腺及胰腺等肿瘤中，取得了明显的临床治疗效果。

后装机由治疗计划系统、控制系统和后装机三部分组成。治疗计划系统通过数字化仪将患者的影像进行正交、半正交和交角的影像重建，通过运算可显示出优化治疗、三维储存显示剂量分布以及解剖结构，系统可以自动修正源衰变，根据源位、病灶大小和形态，计算出等剂量分布曲线。后装机的作用是将放射源准确、安全、定时地放置到人体病变部位。放射源安放在真源轮钢丝绳的最前端，所载的放射源约为 $0.9\times7$  mm的圆柱体，使用时将塑料导管插入人体各需要治疗的部位，后装机最多可放置18条塑料管，设置18个治疗部位，多数情况下为3~4个治疗部位。一般后装机装有两个相同的绕有钢丝绳的轮，一个是真源轮，一个是假源轮，两个轮的结构和大小相同，在真源轮上放有放射源。两个轮分别由两个步进电机驱动，同时还各装有一个直流电机，用于必要时做快回抽的操作。某款后装机外观图见图9-3，后装机结构分解见图9-4。



图 9-3 某款后装机外观图



1. 假源轮 2. 真源轮 3. 安全区 4. 换路器 5. 编码器  
6. 换路导管 7. 接管盘 8. 前导管

图 9-4 后装机结构分解示意图

## 9.2.2 工作流程

### 1、工作方式及操作流程

- (1) 病人经医生诊断、治疗正当性判断后，确定需要治疗的患者与放射治疗中心预约登记，以确定模拟定位和治疗时间。
- (2) 预约病人首先通过CT、超声等设备上进行肿瘤定位，确定肿瘤的具体位置和形状，确定治疗中心。定位操作过程类似于X射线影像诊断，工作人员隔室操作。

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

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

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

(6) 照射完毕后, 技术人员协助病人离开机房, 为下次照射做准备。

## 2、使用规划

(1) 工作量: 后装治疗机每天最高工作量能达到约 20 人次/日, 每周接诊两天。每人次平均检查时间约 15 分钟, 全天完成 20 人次治疗, 所需时间约 5h。

(2) 出束时间: 每名患者治疗出束时间保守取 10min/人次, 本项目按 20 人次/天进行评价, 则日治疗照射时间 200min/d, 周照射时间 400min/周 (6.7h/周), 年总照射时间 335h/a。

(3) 利用因子: 各个方向治疗照射的使用因子取 U=1。

### 9.2.3 设备技术指标

本项目拟配的 1 台后装治疗机主要技术参数见表 9-2。

表 9-2 后装治疗机主要技术参数

| 序号 | 项目              | 参数指标                          |
|----|-----------------|-------------------------------|
| 1  | 辐射源种类           | Ir-192 丝状源                    |
| 2  | 拟最大装源活度         | 370GBq (10Ci)                 |
| 3  | 放射源衰变方式 (分支比%)  | $\beta^-$ (95.13%)、EC (4.87%) |
| 4  | 辐射类型            | $\gamma$ 射线                   |
| 5  | $\gamma$ 射线能量均值 | 0.37MeV                       |
| 6  | 半衰期             | 74.0 天                        |
| 7  | 空气比释动能率常数       | 0.111 $\mu$ Gy/MBq·h          |

### 9.2.4 污染源项描述

#### 9.2.4.1 主要的放射性污染物

后装治疗是一种近距离治疗方式, 该项目拟使用的核素是 Ir-192。最大装

源活度  $3.7 \times 10^{11} \text{Bq}$ 。Ir-192 的半衰期为 74.0d,  $\gamma$  射线能量为 0.317MeV(83%)、0.468MeV (48%) 和 0.604meV (8%) 。

设备辐射防护性能:《后装  $\gamma$  源近距离治疗质量控制检测规范》(WS262-2017) 要求储源器最大装载活度时, 距储源器表面 5cm 吸收剂量率不得大于  $50 \mu\text{Sv}/\text{h}$ , 距离储源器 100cm 处的球面上, 任何一点的泄漏辐射不得大于  $5 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

#### 9.1.4.2 污染途径

##### 1、正常工况的污染途径

正常运行时的主要环境影响是电离辐射和退役放射源。

在非治疗状态下, Ir-192 源封装在后装机的储源器内, 容器周围辐射水平较低, 对周围环境影响很小。治疗状态下, Ir-192 离开储源器, 按裸源考虑, 机房内空气比释动能率较高, 漏射  $\gamma$  射线对治疗室周围环境将产生辐射影响。密封源退役时会产生废放射源。

##### 2、非正常情况的污染途径

(1) 后装机操作系统发生故障, 到达预置治疗时间, 放射源无法自动收回, 导致患者受超剂量照射;

(2) 运行情况下意外断电, 且设备不间断电源系统故障无法启动, 致放射源不能复位。该事故工况发生时, 依照应急预案, 人工摇转应急回源手柄退源。

(3) 运行过程中发生卡源或源脱落故障。该事故工况发生时, 依照应急预案, 立即停止辐照工作, 人工摇转应急回源手柄退源, 或进入辐射场所排除故障。之后及时通知厂家维修。

(4) 因设备检修或更换放射源期间, 将密封源贮源器拆卸下来, 由于保管不善, 可能会发生密封源丢失或被盗事故, 可能产生较严重的辐射照射。

(5) 治疗期间安全联锁系统出现故障时, 人员意外进入治疗室并停留, 将受到过量照射的情况。

(6) 放射源意外破损时, 导致治疗装置、机房甚至人员受到放射性污染。

#### 9.3 后装机放射源的倒装和运输

后装机使用过程中每年更换 2-3 次 Ir-192 放射源，医院将委托持有放射源销售资质的公司购买放射源，并由销售公司委托具有放射源运输资质的公司进行放射源运输。医院配合放射源进场工作，在医院接受放射源，并安排适当的场地暂存。后装机倒装放射源工作由设备厂家的维修工程师完成。鉴于以上分析，医院工作人员在放射源的倒装和运输环节仅做一些安全性的辅助工作，本次评价无需进一步分析。

表 10 辐射安全与防护

## 10.1 项目安全设施

### 10.1.1 选址与布局

北大人民医院拟对通州院区行政科研楼一层的多功能厅进行改建，建设成通州院区放射治疗中心，拟设置 3 个加速器机房、1 个后装治疗室和配套模拟定位 CT、检查室等。放射治疗中心平面布局见图 10-1。

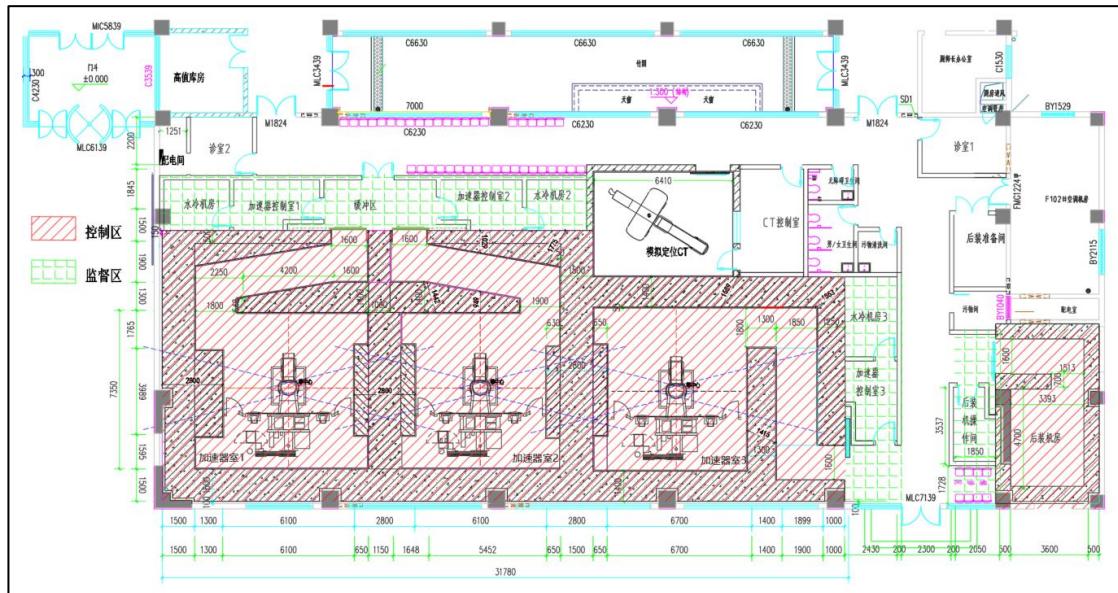


图 10-1 通州院区放射治疗中心平面布局图

三个加速器室位于放射治疗中心南侧，由西至东分别为加速器室 1、加速器室 2 和加速器室 3，后装治疗室位于东南侧。加速器室 1 东侧为加速器室 2，南侧为楼外绿地，西侧为楼外通道，北侧为水冷机房 1 和加速器控制室 1；加速器室 2 东侧为加速器室 3，南侧为楼外绿地，西侧为加速器室 1，北侧为水冷机房 2 和加速器控制室 2；加速器室 3 东侧为水冷机房 3 和加速器控制室 3，南侧为楼外绿地，西侧为加速器室 2，北侧为模拟定位 CT 室及控制室、卫生间等；后装治疗室东侧和南侧为楼外绿地，西侧为候诊区和后装机操作间，北侧为配电室。3 间加速器机房和后装治疗室所在建筑室顶为屋面（非上人屋面），加速器室顶、后装治疗室室顶与屋面楼板间设有管道，无地下室。四间治疗室均设有迷道，采用直形迷道形式。三间加速器室的东墙、西墙、地面和房顶拟设为主束方向，机房四周无敏感人员长期居留。

选址充分考虑了周围场所的防护与安全，以及患者就诊和临床应用的便利性，对公众影响较小。

### 10.1.2 机房屏蔽设计

表 10-1 机房屏蔽设计情况一览表

| 序号 | 场所名称   | 机房面积 (m <sup>2</sup> ) | 屏蔽墙体方向 | 屏蔽材料及厚度   |
|----|--------|------------------------|--------|---|
| 1  | 加速器室 1 | 66.1<br>(不含迷路)         | 东墙     | 主屏蔽区: 280cm 砷, 次屏蔽部分: 150cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 420cm)       |
|    |        |                        | 南墙     | 150cm 砷   |
|    |        |                        | 西墙     | 主屏蔽区: 280cm 砷, 次屏蔽部分: 150cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 399cm)       |
|    |        |                        | 北墙     | 迷路内墙: 64.8cm~140cm 砷; 迷路外墙: 60cm~164cm 砷              |
|    |        |                        | 顶      | 主屏蔽部分 290cm 砷, 次屏蔽部分: 150cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 402cm)       |
|    |        |                        | 防护门    | 12mm 铅  |
| 2  | 加速器室 2 | 62.7<br>(不含迷路)         | 东墙     | 主屏蔽区: 280cm 砷, 次屏蔽部分: 150cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 410cm)       |
|    |        |                        | 南墙     | 150cm 砷   |
|    |        |                        | 西墙     | 主屏蔽区: 280cm 砷, 次屏蔽部分: 150cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 399cm)       |
|    |        |                        | 北墙     | 迷路内墙: 62.9cm~140cm 砷; 迷路外墙: 60cm~167cm 砷              |
|    |        |                        | 顶      | 主屏蔽部分 290cm 砷, 次屏蔽部分: 150cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 402cm)       |
|    |        |                        | 防护门    | 12mm 铅  |
| 3  | 加速器室 3 | 69.4<br>(不含迷路)         | 东墙     | 主屏蔽区: 255cm 砷, 次屏蔽部分: 125cm~130cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 450cm) |
|    |        |                        | 南墙     | 140cm 砷   |
|    |        |                        | 西墙     | 主屏蔽区: 280cm 砷, 次屏蔽部分: 150cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 410cm)       |
|    |        |                        | 北墙     | 迷路内墙: 62.9cm~140cm 砷; 迷路外墙: 60cm~167cm 砷              |
|    |        |                        | 顶      | 主屏蔽部分 270cm 砷, 次屏蔽部分: 140cm 砷 (主屏蔽区设计宽度: 392cm)       |
|    |        |                        | 防护门    | 12mm 铅  |
| 4  | 后装治疗室  | 23.2<br>(不含迷路)         | 东墙     | 70cm 砷  |
|    |        |                        | 南墙     | 70cm 砷  |
|    |        |                        | 西墙     | 70cm 砷  |
|    |        |                        | 北墙     | 迷路内墙: 70cm 砷<br>迷路外墙: 70cm 砷                          |
|    |        |                        | 顶      | 70cm 砷  |
|    |        |                        | 防护门    | 10mm 铅  |

注：依据建设单位提供资料，砼（混凝土）密度  $2.35 \text{ t/m}^3$ ；铅板的密度为  $11.4\text{g/cm}^3$ 。

### 10.1.3 辐射安全与防护措施

#### 10.1.3.1 加速器拟采取的辐射安全与防护措施

(1) 三间加速器机房（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  $30\text{cm}$  处辐射剂量率不大于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，辐射工作人员和公众的受照剂量满足剂量约束要求。

(2) 辐射工作场所实行分区管理：三间加速器机房为控制区，控制室、设备间、缓冲间为监督区，分区图见图 10-1。

(3) 在加速器室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) 三间机房拟安装电视监控（每间加速器室拟装 5 个摄像头）、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) 三间加速器室电动防护门拟设置防夹人功能，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。

(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：每间加速器室的紧急停机按钮安装在控制室的操作台上（1 个）、控制室墙上（1 个）、加速器设备上（2 个）、加速器治疗室的墙壁上（5 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。紧急停机按钮必须采用手动方式才能复位。

(10) 门控按钮设置：在每间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紧急开门按钮（无关门按钮）。

(11) 加速器室内都拟安装通风换气系统。换气次数不低于 4 次/h。其中进风口拟设距地高度约为  $3\text{m}$ ；排风口拟设置距地  $30\text{cm}$ ；进风管道和排风管道均拟由机房门上方采用“Z”方式穿出机房。加速器室与设备间的线缆都采用“U”型方式穿过屏蔽墙。

(12) 3 间机房内安装固定式辐射剂量监测报警仪器（探头拟安装在迷路墙上），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。放射治疗中心拟新配 1 台便携式辐射监测仪及每个治疗场所分别配置 2 台个人剂量报警仪。

(13) 其他要求: 3 间治疗室安装应急照明装置, 设火灾自动报警装置等。

加速器室联锁和警示系统的设计见图 10-2, 3 间加速器室联锁和安全措施等布置见图 10-3 所示, 排风、送风管道剖面图见图 10-4, 电缆沟布置及穿墙节点图见图 10-5。加速器室工作场所安全与防护设施设计要求见表 10-2。

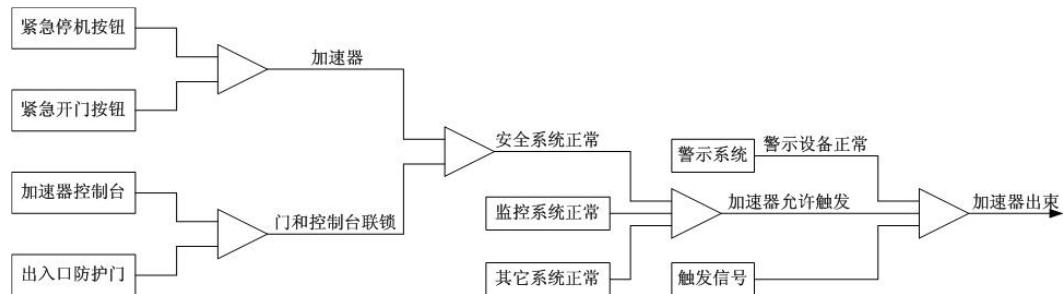


图 10-2 加速器室联锁系统逻辑图

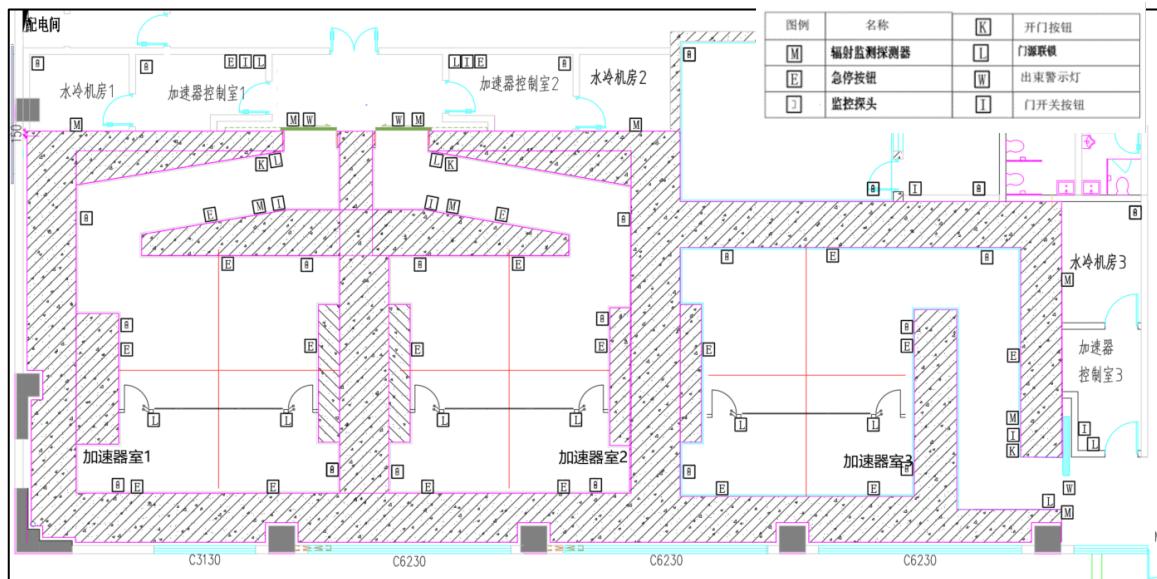
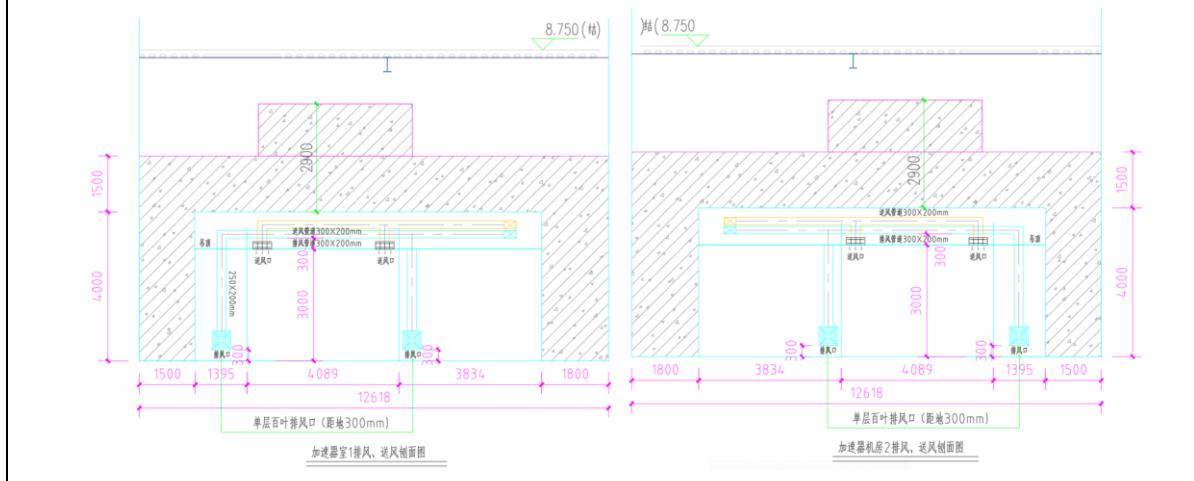


图 10-3 3 间加速器室联锁和安全措施布置图



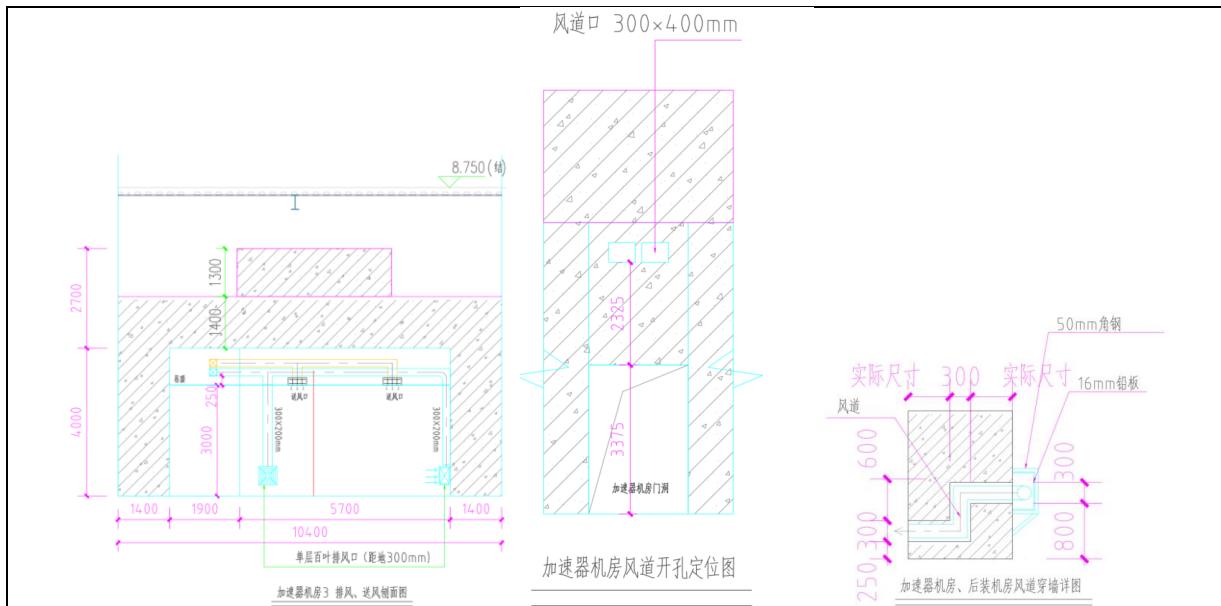


图 10-4 3 间加速器室排风、送风管道剖面图

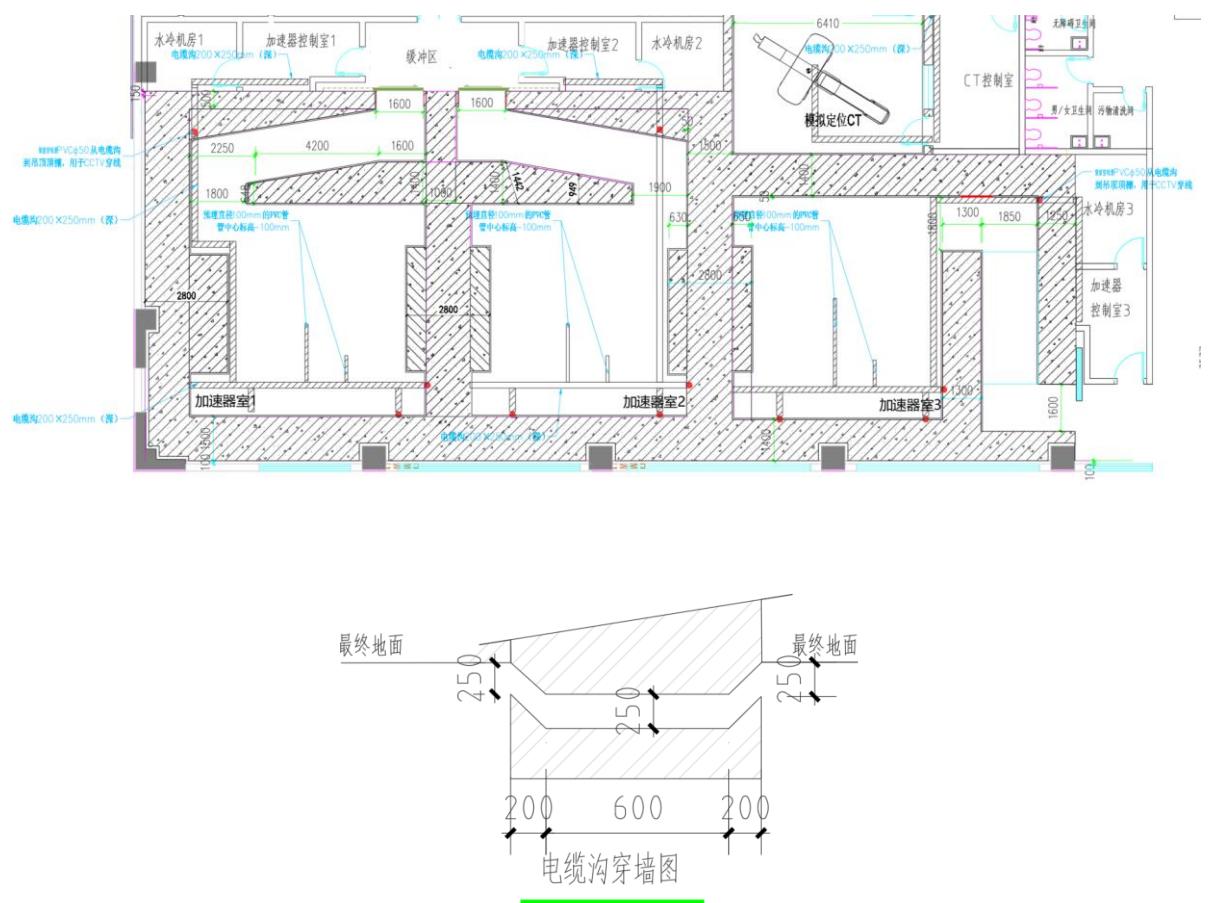


图 10-5 3 间加速器室电缆沟布置及穿墙节点图

表 10-2 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<br>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<br>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<br>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5个紧急停机按钮 |
| 12* |               | 治疗床有紧急停机按钮     | √     | 治疗床2个              |
| 13  |               | 治疗室内固定式剂量报警仪   | √     | 每个机房1台, 型号待定       |
| 14* | D<br>监测设备     | 便携式辐射监测仪器仪表    | √     | 新配1台               |
| 15* |               | 个人剂量报警仪        | √     | 每个场所2台, 型号待定       |
| 16* |               | 个人剂量计          | √     | 每人1个               |
| 17* |               | 个人辐射防护用品       | √     | /                  |
| 18  | E<br>其它       | 通风系统           | √     | 拟设有单独的排风系统         |

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/。

### 10.1.3.2 后装治疗室拟采取的辐射安全与防护措施

(1) 使用专用机房，机房建筑采取可靠的实体屏蔽，安装辐射屏蔽门，采用隔室遥控操作方式。能够保证机房周围墙体外、屋顶和防护门外30cm处辐射剂量率不大于2.5 $\mu$ Sv/h，工作人员和公众的受照剂量满足剂量约束要求。

(2) 后装机放射工作场所实行分区管理：将后装治疗室划分为控制区，控制室为

监督区，分区图见图 10-1。

(3) 在后装治疗室防护门外粘贴电离辐射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) 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) 工作人员进入机房将佩戴个人剂量计，并携带个人剂量报警仪。

(6) 电动防护门具有防夹人功能，停电时能够手动开启，使病人安全转移。

(7) 治疗系统由控制台钥匙或者密码控制。

(8) 设置门源安全联锁：只有当防护门关闭，设备才能出源；反之，如果照射过程中防护门打开，系统将自动回源。

(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）、后装机设备上（1个）、后装机机房的墙壁上（1个）、迷道的墙壁上（1个），并有明显的标志。当按动急停开关，设备自动回源。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：在防护门内侧迷道墙壁上安装开门按钮，在控制室内设开、关门按钮。

(11) 治疗室内安装通风换气系统。换气次数不低于 4 次/h。后装治疗室拟设置 1 个进风口和 1 个排风口，其中进风口拟设置于治疗室吊顶东南角，距地高度约为 3m；排风口拟设置于治疗室西北角，距地 30cm，呈对角线布置。进风管道和排风管道拟由机房门上方采用“Z”方式穿出治疗室。后装治疗室与设备间的线缆都采用“U”型方式穿过屏蔽墙。

(12) 治疗室内拟安装固定式辐射剂量监测报警仪器，用于监测机房内的辐射水平并帮助工作人员判断设备的工作状态，当发生卡源或源脱落时能及时给出报警，同时防止病人将源带出治疗室。

(13) 设备具有模拟源（假源），采用假源探路、真源治疗的双重驱动系统，假源可自动穿过施源器检查所有联接点并对可能产生打结或过度弯曲的部位报警，防止因输源通路不畅造成卡源事故。

(14) 配备 UPS 不间断电源。当在治疗过程中发生停电情况，UPS 自动供电能使放射源退回到安全位置，并留存病人的治疗记录。

(15) 设备安全联锁和自动回源系统等故障检查和保护系统。施源器未插入机头的

卡盘内，不能出源；施源器未锁紧，不能出源。

(16) 设备机头内有应急回源手柄，当退源用的电机失灵时，可采用应急回源手柄退源。

(17) 治疗室内拟配合适的贮源容器、长柄镊子等应急设备。

(18) 按照《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》(GA1002-2012) 要求，在治疗室拟安装视频监控和入侵报警装置等防范设施，满足公安安保要求后投入使用。

(19) 放射源的更换过程由专门的程序控制，工作人员隔室操作，整个过程放射源对操作人员绝无暴露。

(20) 退役的放射源由放射源供方收回。

后装机联锁和警示系统的设计见图 10-6 所示，联锁和安全措施等布置见图 10-7 所示，排风、送风管道剖面图见图 10-8，电缆沟布置及穿墙节点图见图 10-9。后装治疗工作场所安全与防护设施设计要求见表 10-3。

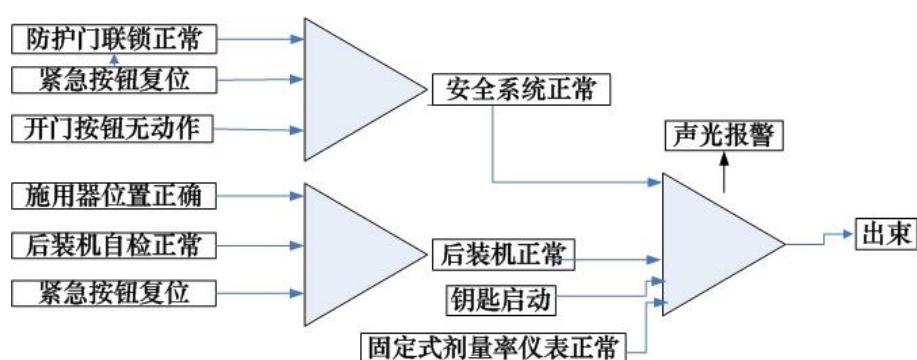


图 10-6 后装机安全联锁和警示系统逻辑图

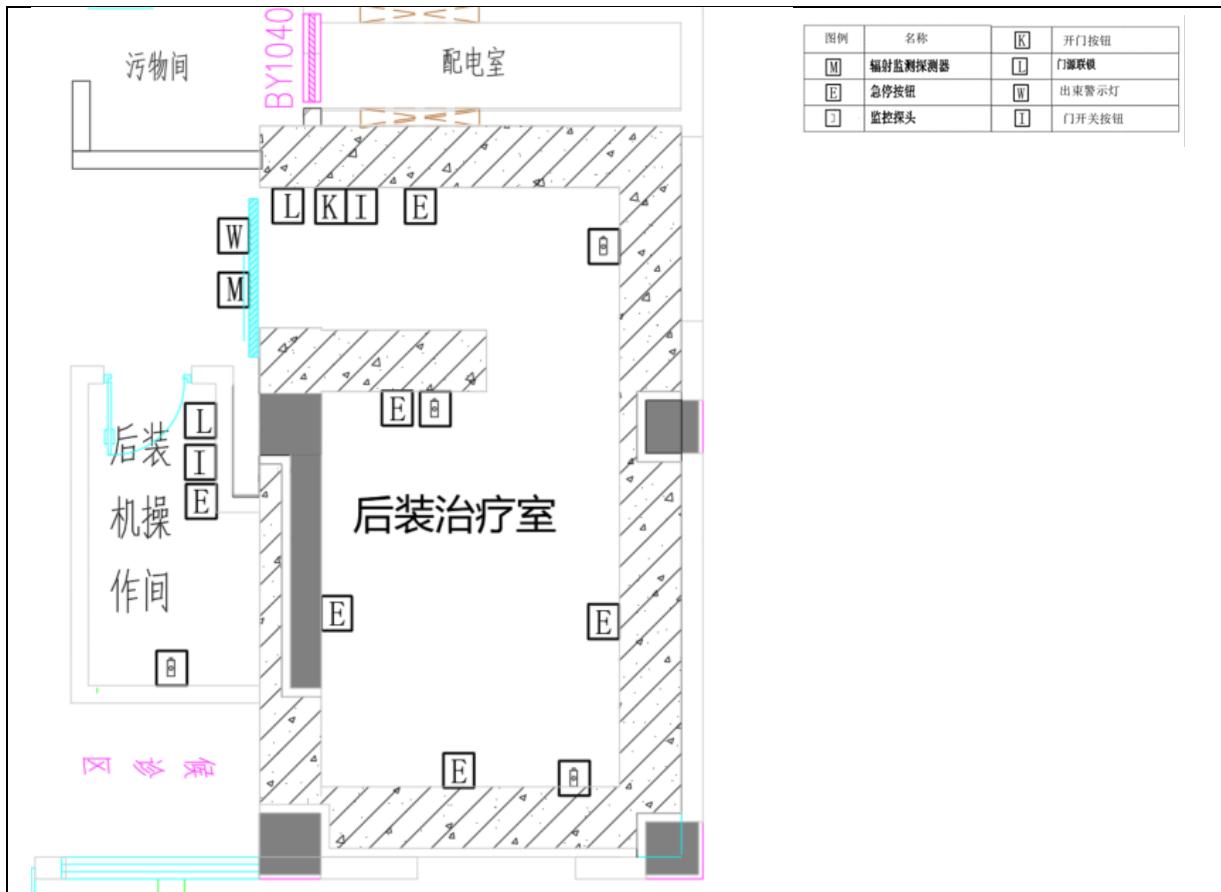


图 10-7 后装治疗室联锁和安全措施布置图图

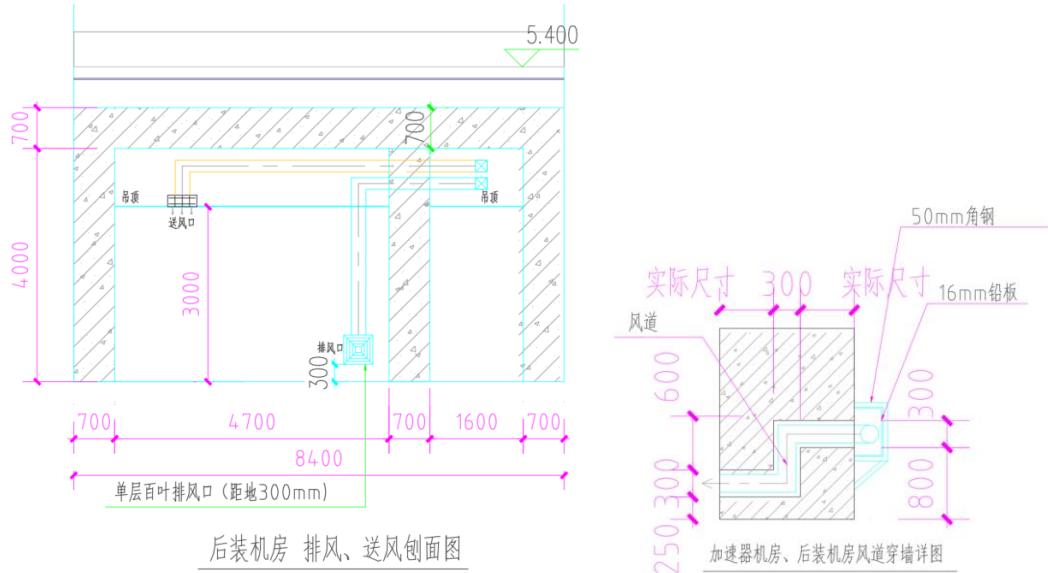


图 10-8 后装治疗室排风、送风管道剖面图

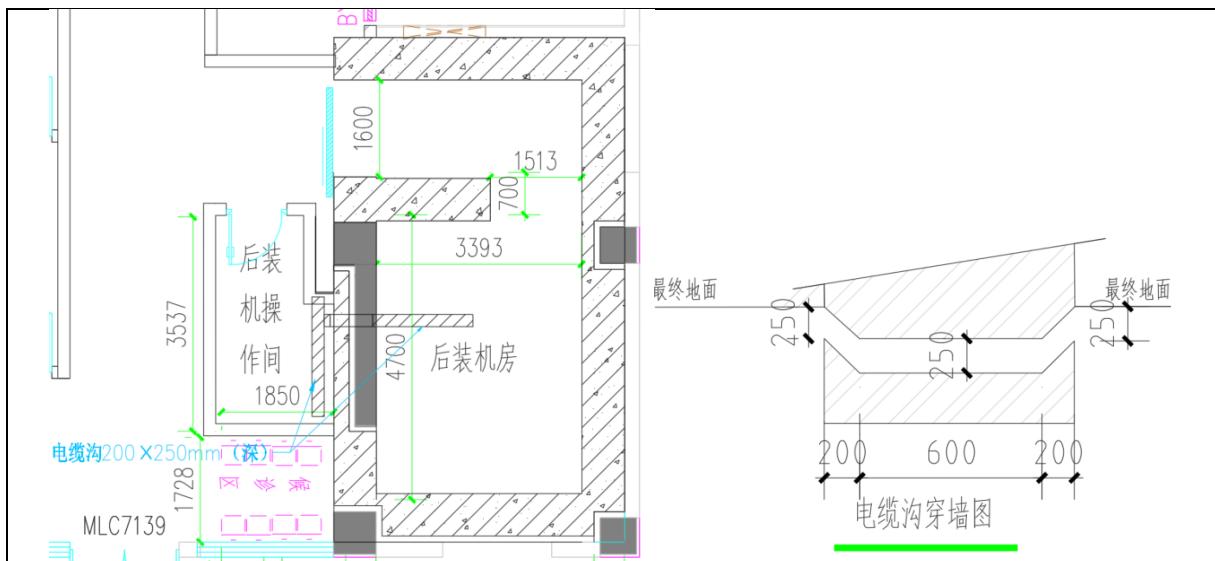


图 10-9 后装治疗室电缆沟布置及穿墙节点图

表 10-3 后装机机房安全与防护设施设计要求

| 序号  | 项目              | 检查内容                | 设计<br>建造 | 备注                 |
|-----|-----------------|---------------------|----------|--------------------|
| 1*  | A<br>装置安全<br>设施 | 防止非工作人员操作的锁定开关      | √        | 钥匙或密码              |
| 2*  |                 | 施源器与源联锁             | √        | 设备配备               |
| 3*  |                 | 管道遇堵自动回源            | √        | 设备配备               |
| 4*  |                 | 仿真源模拟运行             | √        | 设备配备               |
| 5*  |                 | 主机外表面电离辐射警示标志       | √        | 标准电离辐射警告标志         |
| 6*  |                 | 控制台显示放射源位置          | √        | 指示灯显示              |
| 7*  |                 | 控制台紧急停止照射按钮         | √        | 1 个                |
| 8*  |                 | 停电或意外中断照射时自动回源装置    | √        | 设备配备               |
| 9*  |                 | 手动回源措施              | √        | 设备配备               |
| 10* | B<br>场所安全<br>设施 | 治疗室迷道出入口处固定式辐射水平监测仪 | √        | 治疗室迷路墙上拟设置固定剂量报警仪  |
| 11* |                 | 治疗室有迷道              | √        | 设有迷道               |
| 12* |                 | 治疗室门与出源联锁           | √        | 门源联锁               |
| 13* |                 | 应急开关 (放射源返回储源器)     | √        | 设备配备               |
| 14* |                 | 治疗室电视监控对讲装置         | √        | 后装治疗室内拟安装影像监控和对讲装置 |
| 15* |                 | 入口处电离辐射警示标志         | √        | 标准电离辐射警告标志         |
| 16* |                 | 入口处源工作状态显示          | √        | 指示灯                |

|     |            |                         |   |                              |
|-----|------------|-------------------------|---|------------------------------|
| 17* |            | 停电或意外中断照射时声光报警          | √ | 指示灯                          |
| 18* |            | 通风设施                    | √ | 不低于 4 次/h                    |
| 19  |            | 火灾报警仪                   | √ | 屋顶火灾报警器                      |
| 20* |            | 个人剂量计                   | √ | 每名工作人员 1 个                   |
| 21* |            | 工作人员进入治疗室携带个人剂量报警仪      | √ | 拟配 2 台个人剂量报警仪                |
| 22* |            | 治疗室内配有合适的储源容器、长柄镊子等应急设备 | √ | 后装治疗室拟配备储源容器、长柄镊子等设备，用于拿取放射源 |
| 23* |            | 治疗室内张贴应急处置流程            | √ | 拟配备张贴流程图                     |
| 24  | C<br>放射源贮存 | 后装源暂存场所                 | × | 不设置暂存场所                      |
| 25  |            | 双人双“锁”                  | × |                              |
| 26  |            | 防盗门窗                    | × |                              |

注：加\*的项目是重点项，“检查结果”符合要求的划√，不符合要求的划×，不适用的均划/，不能详尽的在备注中说明。

#### 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，现对北大人民医院通州院区从事本项目辐射活动能力评价列于表 10-4 和表 10-5。

##### 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 10-4 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 10-4 执行《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求对照表

| 序号 | 应具备条件  | 落实情况  | 符合情况  |
|----|--|---|-------|
| 1  | 使用放射性同位素、射线装置的单位，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作。 | 医院设立了辐射安全防护管理小组，全面负责医院的辐射防护监督和管理工作，下设专职人员具体处理各项事务，各相关部门内部职责明确。                            | 符合    |
| 2  | 从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。   | 医院规定所有辐射工作人员，在上岗前将参加辐射安全与防护考核。<br>北大人民医院通州院区放射治疗中心拟新增 25 名辐射工作人员，所有辐射工作人员上岗前须通过辐射安全与防护考核。 | 落实后符合 |

|   |   |  |       |
|---|---|--|-------|
| 3 | 使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源贮存库或设备。                      | 本项目不涉及使用放射性同位素。  | /     |
| 4 | 放射性同位素与射线本项目不涉及使用放射性同位素置，应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。    | 本项目拟在各治疗室门口显著位置处设置电离辐射警告标识和中文警示说明，在机房门口设置工作状态指示灯，设置门机联锁系统。   | 落实后符合 |
| 5 | 配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。               | 医院拟为本项目新配置 1 台便携式辐射剂量巡测仪、4 台固定式剂量率仪和 8 台个人剂量报警仪，能够满足现在工作的需要。 | 落实后符合 |
| 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、射线装置使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。 | 拟完善规章制度、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、人员培训考核计划、监测方案等。       | 落实后符合 |
| 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，拟制定更为完善辐射事故应急处理预案。                      | 落实后符合 |

#### 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 10-5 所示。

表 10-5 执行《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求对照表

| 序号 | 安全和防护管理办法要求   | 本单位落实情况   | 是否符合要求 |
|----|---|---|--------|
| 1  | 第五条<br>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。 | 本项目治疗室门口显著位置处设置电离辐射警告标识和中文警示说明，在射线装置机房门口设置工作状态指示灯，设置门机联锁系统。 | 落实后符合  |
| 2  | 第九条<br>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            | 医院将委托有辐射水平监测资质单位每年对辐射工作场所及其周围环境进行1次监测。                      | 符合     |

|   |   |  |       |
|---|---|--|-------|
|   | 委托主管部门认定的环境监测机构进行监测。  |  |       |
| 3 | 第十二条<br>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    |
| 4 | 第十七条<br>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。               | 北大人民医院通州区放射治疗中心拟新增25名辐射工作人员，所有辐射工作人员上岗前须通过辐射安全与防护考核。 | 落实后符合 |
| 5 | 第二十三条<br>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    |
| 6 | 第二十四条<br>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    |

## 10.2 三废的治理

《放射治疗辐射安全与防护要求》（HJ1198-2021）和《放射治疗放射防护要求》（GBZ121-2020）指出，能量大于10MV的X射线放射治疗设备，须考虑中子屏蔽以及感生放射性问题。本项目使用的加速器X射线最大能量为10MV，不考虑放射性活化气体和中子。此外，加速器产生的X射线与空气作用会产生少量的臭氧、氮氧化物等有害气体，经加速器机房内的排风系统，排放到大气环境中。

加速器正常运行时，一般无废靶产生。如果冷却水循环系统出现故障，可能造成靶体散热不畅导致靶被打穿的情况，从而产生废靶。本项目加速器X射线能量仅有10MV，且调试时间较短，故预计废靶活化水平很低，不会超出解控水平，故不会有放射性废物产生。

后装机使用过程中，每年更换2-3次Ir-192放射源，故本项目会产生废旧放射源。

废旧放射源在倒装新源时从设备内导出，直接装入放射源容器内，直接返回供源厂家，不在医院暂存。

## 表 11 环境影响分析

### 11.1 建设或安装过程的环境影响

该项目施工活动对环境的影响主要是治疗室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，对室外环境和周围人群的影响较小，故不再进行详细评价。

### 11.2 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) 机房所在位置

3间加速器室和1间后装治疗室位于放射治疗中心的南侧，毗邻关系见表11-1所示，机房布局见附图3所示。

表 11-1 治疗室毗邻关系表

| 场所     | 东侧              | 南侧   | 西侧         | 北侧              | 室顶 |
|--------|-----------------|------|------------|-----------------|----|
| 加速器室 1 | 加速器室 2          | 楼外绿地 | 楼外通道       | 加速器控制室 1、水冷机房 1 | 屋面 |
| 加速器室 2 | 加速器室 3          | 楼外绿地 | 加速器室 1     | 加速器控制室 2、水冷机房 2 | 屋面 |
| 加速器室 3 | 加速器控制室 3、水冷机房 3 | 楼外绿地 | 加速器室 2     | 模拟定位 CT 室及其控制室  | 屋面 |
| 后装治疗室  | 楼外绿地            | 楼外绿地 | 后装机操作间、候诊区 | 配电室             | 屋面 |

##### (2) 设备参数

拟使用的射线装置和放射源的技术指标如表 11-2 和表 11-3 所示。

表 11-2 拟使用直线加速器技术指标一览表

| 场所     | 型号              | 电子线能量      | 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   |
|--------|-----------------|------------|--------------------------------|-------|-----------------|--------|-------|
| 加速器室 1 | Elekta Infinity | 15MeV (最大) | 10MV: 6Gy/min; (FFF: 22Gy/min) | 100cm | 最大照射野 40cm×40cm | 360°   | ≤0.1% |

|        |    |               |  |       |                    |      |       |
|--------|----|---------------|--|-------|--------------------|------|-------|
| 加速器室 2 | 待定 | 18MeV<br>(最大) | 10MV: 6Gy/min;<br>(FFF:<br>24Gy/min)                                 | 100cm | 最大照射野<br>40cm×40cm | 360° | ≤0.1% |
| 加速器室 3 | 待定 | 15MeV<br>(最大) | 10MV:<br>600cGy/min;<br>6MV:<br>600cGy/min;<br>(FFF:<br>1400cGy/min) | 100cm | 最大照射野<br>40cm×40cm | 360° | ≤0.1% |

表 11-3 后装机设备的技术参数

| 生产厂家<br>和型号 | 放射源种类<br>和活度                   | 半衰期和射线能量  | 储源器泄漏辐射水平   |
|-------------|--------------------------------|---|---|
| 待定          | Ir-192,<br>3.7E+11Bq<br>(10Ci) | 半衰期 74.0d; $\gamma$ 射线<br>平均能量 0.35 MeV。<br>$\gamma$ 剂量率转化系数:<br>0.111 $\mu$ Sv/h.MBq.m <sup>-2</sup> | 储源器最大装载活度时, 距储源器<br>表面 5cm 吸收剂量率不得大于<br>50 $\mu$ Sv/h, 距离储源器 100cm 处的<br>球面上, 任何一点的泄漏辐射不得<br>大于 5 $\mu$ Sv/h。 |

### (3) 使用规划

1) 加速器出束时间: 每台加速器既开展常规放射治疗, 也开展 IMRT、VMAT 等适形调强放射治疗, 患者比例约为 1: 9, 根据医院提供资料和第九章的预测, 加速器日治疗 60 人次时, 出束时间为 30min/d (0.5h/d), 年总照射时间 125h/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); 泄漏辐射年总照射时间为 375h/a。

2) 后装治疗机出束时间: 根据医院提供资料和第九章的预测, 成熟后预计每人最高工作量能达到约 20 人次/日 (每周接诊两天), 每天出束时间为 200min/d (3.33h/d), 年总照射时间 335h/a。

3) 加速器使用因子: 本项目将机头为 0°、90°、270°和 180° (朝上) 出束时间的占比都按 25%, 以此保守估算周围受照剂量。

#### 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。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。

考虑到电子束使用次数有限（工作负荷不足 X 射线的 1%），且电子束出束过程中，电子束与机头、床、人体组织等作用产生轫致辐射的能量和强度均低于电子束撞击钨靶产生的治疗 X 射线的能量和强度，所以，如果机房及其防护门能够满足 X 治疗束的屏蔽防护要求，一定能够满足电子束治疗中产生的轫致辐射的防护要求，故本评价对电子束的环境影响不做具体评价。NCRP151 报告指出，对于 10MVX 射线能量的加速器不需考虑中子辐射影响及其产生的感生放射性问题。

## （2）不同关注点应考虑的辐射

### 1) 加速器机房

主束区：仅考虑有用束的直接照射，忽略进入该区的泄漏辐射和散射辐射；

与主束区直接相连的次屏蔽区：考虑泄漏辐射和主射线束水平方向的散射辐射；

其他区：仅考虑泄漏辐射。

入口门：考虑有用束、患者散射和机头泄漏射线的散射辐射、穿过迷路内墙的泄漏辐射。

治疗装置带有 kV 级的影像定位引导设备，辐射源最大为 150kV/500mA 的 X 射线，对周围环境辐射影响远小于 MV 级的 X 射线，因此，加速器只考虑 6MV/10MV X 射线的屏蔽问题。

### 2) 后装治疗室

后装治疗机房应考虑治疗源  $4\pi$  发射的  $\gamma$  射线（即初级辐射）对墙和室顶的直接照射及其散射辐射在机房入口处的照射。

## 11.2.3 加速器房安全分析

### （1）主屏蔽墙宽度安全性分析：

加速器室有用束最大张角为  $28^\circ$ ，根据公式 11-1 可估算出主束所需的宽度。

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

式中： $d$ —机房有用束主屏蔽区的宽度，m； $SAD$ —源轴距，取 1m； $\theta$ —治疗束的最大半张角（相对束中的轴线），本项目加速器取  $14^\circ$ ； $R$ —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。

三间加速器室屏蔽结构设计平剖面见图 11-2~图 11-5, 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<br>(m) | 所需最小宽度 (m) | 现有宽度 (m) | 结论 |
|--------------|----------|------------|----------|----|
| 加速器室 1 东墙主束区 | 5.85     | 4.02       | 4.20     | 满足 |
| 加速器室 1 西墙主束区 | 3.05     | 2.62       | 3.99     | 满足 |
| 加速器室 1 室顶主束区 | 5.55     | 3.87       | 3.97     | 满足 |
| 加速器室 2 东墙主束区 | 5.88     | 4.03       | 4.10     | 满足 |
| 加速器室 2 西墙主束区 | 5.83     | 4.01       | 4.10     | 满足 |
| 加速器室 2 室顶主束区 | 5.55     | 3.87       | 3.97     | 满足 |
| 加速器室 3 东墙主束区 | 3.30     | 2.74       | 4.50     | 满足 |
| 加速器室 3 西墙主束区 | 6.00     | 4.09       | 4.10     | 满足 |
| 加速器室 3 室顶主束区 | 5.15     | 3.67       | 3.97     | 满足 |

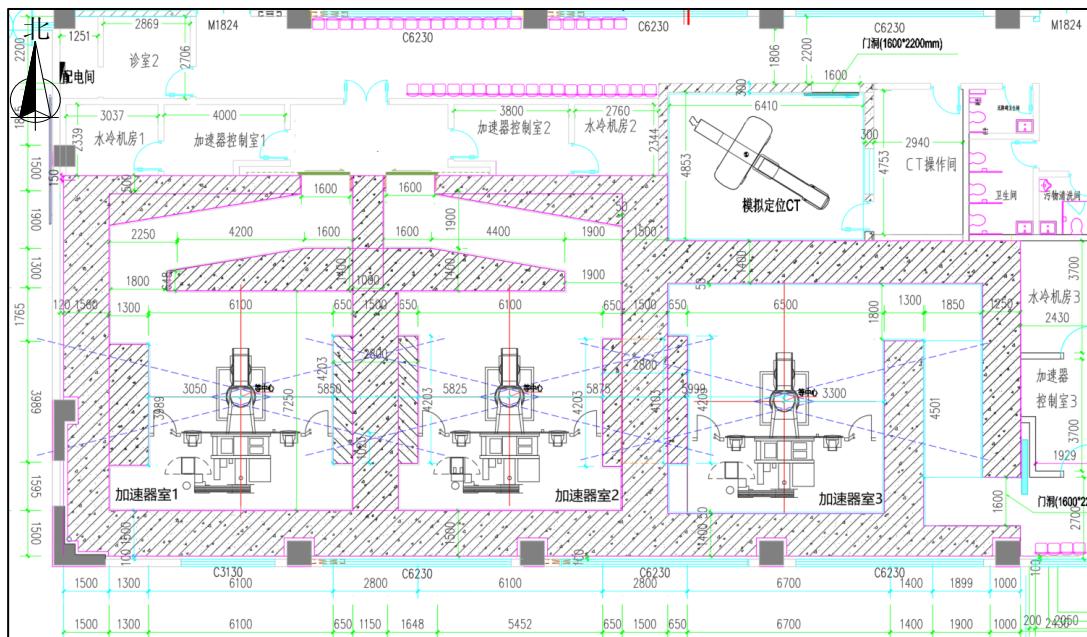


图 11-1 3 间加速器平面布局示意图

## (2) 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) 剂量率估算方法

1) 主束贯穿辐射对机房周围环境的剂量率的估算

主屏蔽墙利用下列公式对初级辐射进行屏蔽估算

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

$$B_{pri} = 10^{-[1 + \frac{t - TVL_e}{TVL_e}]} \quad (11-3)$$

$$H_0 = A \times K_\gamma \quad (11-4)$$

式中： $H_0$ —距靶或源 1m 处的最大剂量率，对放射源采用公式 (11-4) 计算，相关参数见表 11-3；

$A$ —放射源的活度，MBq；

$K_\gamma$ —放射源的空气比释动能率常数（或称  $K_\gamma$  常数），见表 11-5；

$B_{pri}$ —主屏蔽墙厚度对应的衰减因子；

$R$ —参考点至靶点的距离；

$t$ —屏蔽材料的厚度；

$TVL_e$ 、 $TVL_i$ —平衡什值层和第一什值层厚度，单位 cm；详见表 11-6。

表 11-5  $\gamma$  射线源的主要辐射特性参数

| 核素     | 半衰期<br>$T_{1/2}$ | $\gamma$ 射线能量均<br>值 MeV | 空气比释动能率常数<br>$K_\gamma \mu\text{Gy}/(\text{h} \cdot \text{MBq})$ | $TVL, \text{cm}$ |      |
|--------|------------------|-------------------------|--|------------------|------|
|        |                  |                         |  | 铅                | 混凝土  |
| Ir-192 | 74.0d            | 0.37                    | 0.111  | 1.6              | 15.2 |

注：表中数据来源于 IAEA No.47 的表 20 和表 22。

表 11-6 不同能量 X 射线束在砼和铅中的  $TVL$  值

| 射线束        |      | 初级束    |        | 泄漏辐射   |        | $30^\circ$ 人体散射 |
|------------|------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| 十分之一衰减厚度   |      | $TVL1$ | $TVLe$ | $TVL1$ | $TVLe$ | $TVL$           |
| 砼厚度，<br>cm | 6MV  | 37     | 33     | 34     | 29     | 26              |
|            | 10MV | 41     | 37     | 35     | 31     | 28              |

|       |      |     |     |     |     |     |
|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 铅, cm | 6MV  | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 |
|       | 10MV | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 |

## 2) 次束贯穿辐射对加速器室周围环境剂量率的估算

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:

$$H_{PS} = \frac{\alpha H_0 B_{ps} \frac{F}{400}}{d_{sca}^2 \times d_{sec}^2} \quad (11-5)$$

$$B_{ps} = 10^{-t/TVL_{sca}} \quad (11-6)$$

式中:  $H_{ps}$ —距散射体  $d_{sec}$  m 处的辐射剂量率;

$B_{ps}$ —次屏蔽墙厚度对应的衰减因子;

$\alpha$ —散射体表对初级辐射束的散射比 (散射系数);

$F$ —被照射物体等中心处照射野面积, 加速器取  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ ;

$d_{sca}$ —靶至被照射物体的距离, 取 1.0m;

$d_{sec}$ —等中心点至参考点的距离, m;

$TVL_{sca}$ —什值层厚度, cm, 详见表 11-6;

$H_0$ 、 $t$  同公式 (11-2 和 11-3)。

次屏蔽墙泄漏辐射利用下列公式进行屏蔽估算:

$$H_L = \frac{H_0 B_L}{1000 d_L^2} \quad (11-7)$$

$$B_L = 10^{-[1 + \frac{t - TVL_L}{TVL_e}]} \quad (11-8)$$

式中:  $H_L$ —距靶点  $d_L$  m 处的辐射剂量率;

$B_L$ —次屏蔽墙厚度对应的衰减因子;

$d_L$ —参考点至靶点的距离, m;

$TVL_e$ 、 $TVL_L$ —平衡什值层和第一什值层厚度, 单位 cm; 详见表 11-6。

$H_0$ 、 $t$  同公式 (11-2 和 11-3)。

## (2) 加速器室剂量率估算结果

加速器室外关注点剂量率估算结果见表 11-7, 加速器室平剖面图及剂量评

估点见图 11-2~图 11-5。

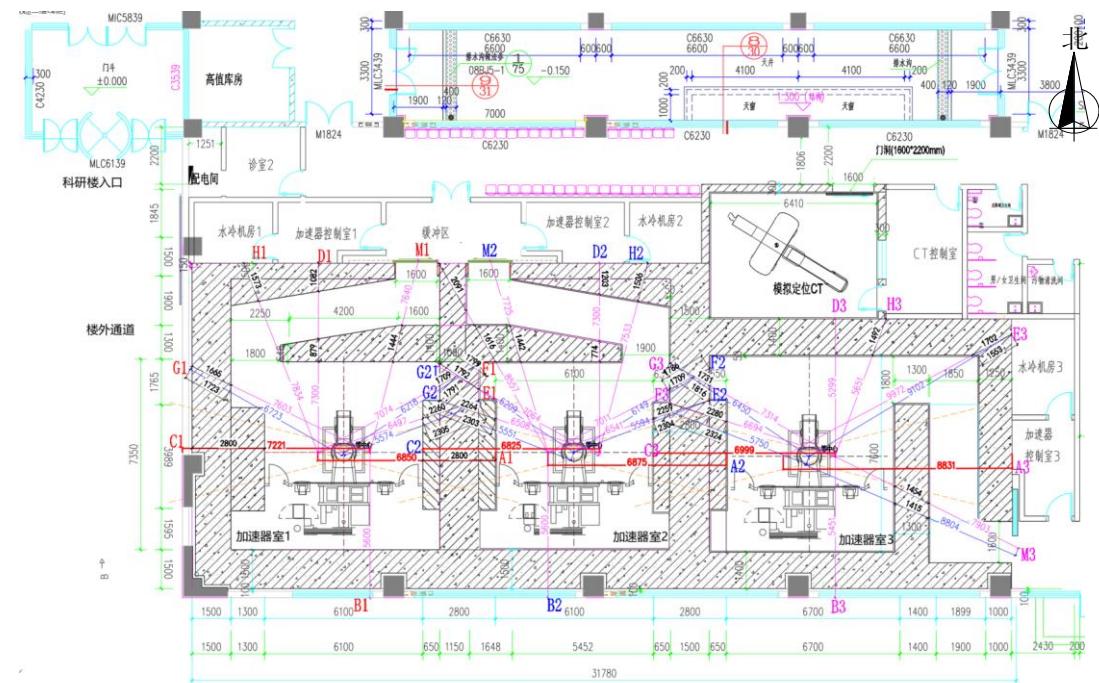


图 11-2 3 间加速器室估算点位示意图

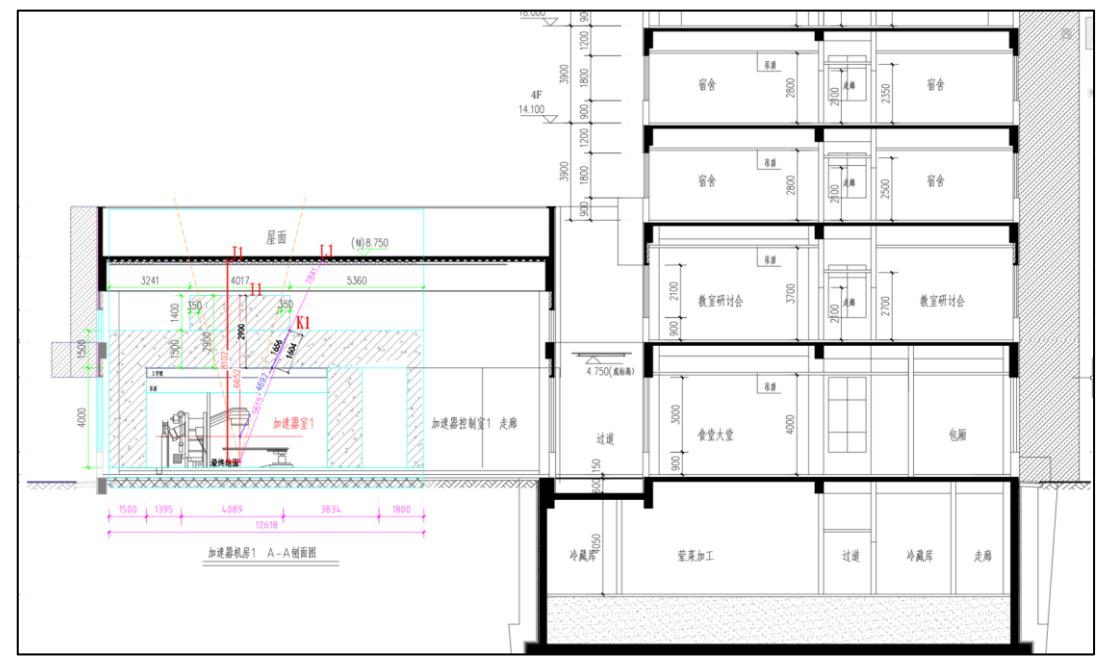


图 11-3 加速器 1 剖面布局示意图

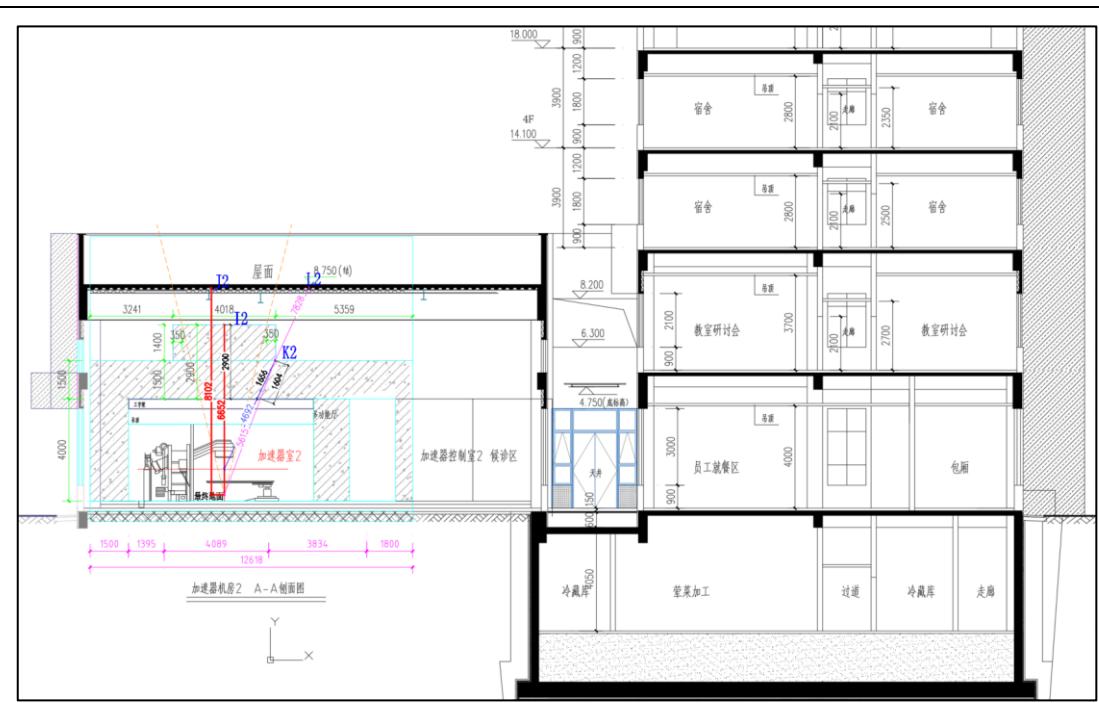


图 11-4 加速器 2 剖面布局示意图

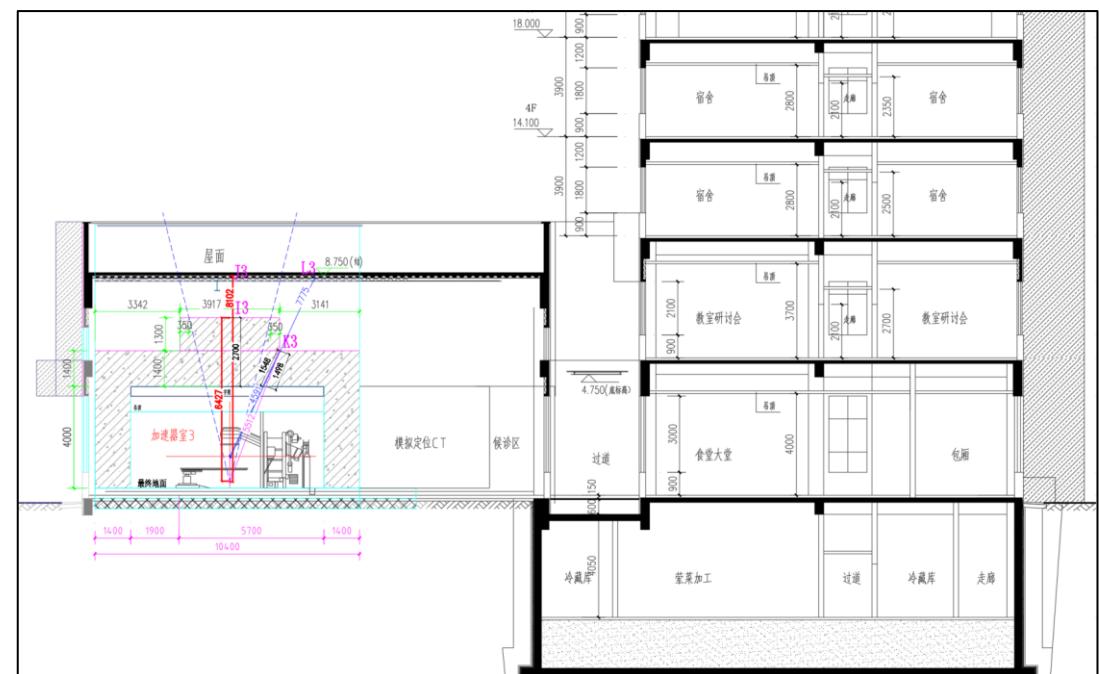


图 11-5 加速器 3 剖面布局示意图

表 11-7 加速器室外关注点剂量率估算结果

|    |     |            |            |          |          |          |            |   |  |
|----|-----|------------|------------|----------|----------|----------|------------|---|--|
| A1 | 7.2 | 主束         | 280<br>(砼) | 3.47E-08 | 2.55E+07 | 8.84E-01 | 东墙加速器室 2   | / |  |
| B1 | 5.9 | 次束<br>(漏射) | 150<br>(砼) | 1.95E-05 | 3.79E+04 | 7.40E-01 | 南墙楼外绿地     |   |  |
| C1 | 7.5 | 主束         | 280<br>(砼) | 3.47E-08 | 2.35E+07 | 8.15E-01 | 西墙楼外通道     |   |  |
| D1 | 7.6 | 次束<br>(漏射) | 196<br>(砼) | 1.23E-06 | 2.29E+04 | 3.08E-02 | 北墙加速器控制室 1 |   |  |
| E1 | 5.9 | 次束<br>(漏射) | 226<br>(砼) | 6.90E-08 | 3.79E+04 | 2.62E-03 | 东墙加速器室 2   |   |  |
|    |     | 次束<br>(散射) |            | 8.48E-09 | 8.78E+05 | 7.45E-03 |            |   |  |
| F1 | 6.5 | 次束<br>(漏射) | 171<br>(砼) | 4.10E-06 | 3.12E+04 | 1.28E-01 | 东墙加速器室 2   |   |  |
|    |     | 次束<br>(散射) |            | 7.81E-07 | 3.97E+05 | 3.11E-01 |            |   |  |
| G1 | 7.0 | 次束<br>(漏射) | 167<br>(砼) | 5.52E-06 | 2.69E+04 | 1.49E-01 | 西墙楼外通道     |   |  |
|    |     | 次束<br>(散射) |            | 1.09E-06 | 3.43E+05 | 3.72E-01 |            |   |  |
| H1 | 8.1 | 次束<br>(漏射) | 157<br>(砼) | 1.16E-05 | 2.01E+04 | 2.33E-01 | 北墙水冷机房 1   |   |  |
| I1 | 7.0 | 主束         | 290<br>(砼) | 1.86E-08 | 2.69E+07 | 5.02E-01 | 加速器室顶      |   |  |
| J1 | 8.4 | 主束         | 290<br>(砼) | 1.86E-08 | 1.87E+07 | 3.49E-01 | 屋面         |   |  |
| K1 | 5.0 | 次束<br>(漏射) | 160<br>(砼) | 9.28E-06 | 5.28E+04 | 4.90E-01 | 加速器室顶      |   |  |
|    |     | 次束<br>(散射) |            | 1.93E-06 | 6.72E+05 | 1.30E+00 |            |   |  |
| L1 | 8.1 | 次束<br>(漏射) | 160<br>(砼) | 9.28E-06 | 2.01E+04 | 1.87E-01 | 屋面         |   |  |
|    |     | 次束<br>(散射) |            | 1.93E-06 | 2.56E+05 | 4.94E-01 |            |   |  |

|                               |     |                |                                    |              |          |          |                |   |
|-------------------------------|-----|----------------|------------------------------------|--------------|----------|----------|----------------|---|
| M1                            | 7.9 | 次束<br>(漏<br>射) | 144<br>(砼)<br>+1.2cm<br>铅(门<br>防护) | 1.88E-<br>05 | 2.12E+04 | 3.97E-01 | 门外缓冲<br>区      |   |
| 加速器室 2 10MV FFF 模式 (24Gy/min) |     |                |                                    |              |          |          |                |   |
| A2                            | 7.2 | 主束             | 280<br>(砼)                         | 3.47E-<br>08 | 2.78E+07 | 9.64E-01 | 东墙加速<br>器室 3   |   |
| B2                            | 5.9 | 次束<br>(漏<br>射) | 150<br>(砼)                         | 1.95E-<br>05 | 4.14E+04 | 8.07E-01 | 南墙楼外<br>绿地     |   |
| C2                            | 7.1 | 主束             | 280<br>(砼)                         | 3.47E-<br>08 | 2.86E+07 | 9.92E-01 | 西墙加速<br>器室 1   |   |
| D2                            | 7.6 | 次束<br>(漏<br>射) | 198<br>(砼)                         | 5.52E-<br>07 | 2.49E+04 | 1.38E-02 | 北墙加速<br>器控制室 2 |   |
| E2                            | 5.9 | 次束<br>(漏<br>射) | 226<br>(砼)                         | 6.90E-<br>08 | 4.14E+04 | 2.85E-03 | 东墙加速<br>器室 3   | / |
|                               |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 8.48E-<br>09 | 9.58E+05 | 8.13E-03 |                |   |
| F2                            | 6.4 | 次束<br>(漏<br>射) | 171<br>(砼)                         | 4.10E-<br>06 | 3.52E+04 | 1.44E-01 | 东墙加速<br>器室 3   |   |
|                               |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 7.81E-<br>07 | 4.47E+05 | 3.49E-01 |                |   |
| G2                            | 5.9 | 次束<br>(漏<br>射) | 226<br>(砼)                         | 6.90E-<br>08 | 4.14E+04 | 2.85E-03 | 西墙加速<br>器室 1   |   |
|                               |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 8.48E-<br>09 | 9.58E+05 | 8.13E-03 |                |   |
| G21                           | 6.5 | 次束<br>(漏<br>射) | 179<br>(砼)                         | 2.26E-<br>06 | 3.41E+04 | 7.72E-02 | 西墙加速<br>器室 1   |   |
|                               |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 4.05E-<br>07 | 4.34E+05 | 1.75E-01 |                |   |
| H2                            | 7.8 | 次束<br>(漏<br>射) | 151<br>(砼)                         | 1.81E-<br>05 | 2.37E+04 | 4.29E-01 | 北墙水冷<br>机房 1   |   |
| I2                            | 7.0 | 主束             | 290<br>(砼)                         | 1.86E-<br>08 | 2.94E+07 | 5.48E-01 | 加速器室<br>顶      |   |
| J2                            | 8.4 | 主束             | 290<br>(砼)                         | 1.86E-<br>08 | 2.04E+07 | 3.80E-01 | 屋面             |   |

|   |     |                |                                     |              |          |          |                 |      |
|---|-----|----------------|-------------------------------------|--------------|----------|----------|-----------------|------|
| K2  | 5.0 | 次束<br>(漏<br>射) | 160<br>(砼)                          | 9.28E-<br>06 | 5.76E+04 | 5.35E-01 | 加速器室<br>顶       |      |
|   |     | 次束<br>(散<br>射) |                                     | 1.93E-<br>06 | 7.33E+05 | 1.41E+00 |                 |      |
| L2  | 8.1 | 次束<br>(漏<br>射) | 160<br>(砼)                          | 9.28E-<br>06 | 2.19E+04 | 2.04E-01 | 屋面              |      |
|   |     | 次束<br>(散<br>射) |                                     | 1.93E-<br>06 | 2.79E+05 | 5.39E-01 |                 |      |
| M1  | 8.9 | 次束<br>(漏<br>射) | 162<br>(砼)<br>+209<br>(砼)           | 1.45E-<br>12 | 1.82E+04 | 2.64E-08 | 加速器室 1<br>门口    |      |
| M2  | 8.0 | 次束<br>(漏<br>射) | 144<br>(砼)<br>+1.2cm<br>铅 (门<br>防护) | 1.88E-<br>05 | 2.25E+04 | 4.22E-01 | 门外缓冲<br>区       |      |
| 加速器室 3 6MV FFF 模式 (14Gy/min) /10MV 常规模式 (6Gy/min) |     |                |                                     |              |          |          |                 |      |
| A3  | 9.1 | 主束             | 255<br>(砼)                          | 2.48E-<br>08 | 1.01E+07 | 2.51E-01 | 东墙加速<br>器控制室 3  | 6MV  |
|   |     |                |                                     | 1.65E-<br>07 | 4.35E+06 | 7.15E-01 |                 | 10MV |
| B3  | 5.8 | 次束<br>(漏<br>射) | 140<br>(砼)                          | 1.00E-<br>05 | 2.50E+04 | 2.50E-01 | 南墙楼外<br>绿地      | 6MV  |
|   |     |                |                                     | 1.95E-<br>05 | 1.07E+04 | 2.09E-01 |                 | 10MV |
| C3  | 7.3 | 主束             | 280<br>(砼)                          | 4.33E-<br>09 | 1.58E+07 | 6.82E-02 | 西墙加速<br>器室 2    | 6MV  |
|   |     |                |                                     | 3.47E-<br>08 | 6.76E+06 | 2.35E-01 |                 | 10MV |
| D3  | 5.6 | 次束<br>(漏<br>射) | 140<br>(砼)                          | 2.21E-<br>05 | 2.68E+04 | 5.93E-01 | 北墙模拟<br>定位 CT 室 | 6MV  |
|   |     |                |                                     | 4.10E-<br>05 | 1.15E+04 | 4.71E-01 |                 | 10MV |
| E3  | 9.4 | 次束<br>(漏<br>射) | 155<br>(砼)                          | 6.72E-<br>06 | 9.51E+03 | 6.39E-02 | 东墙水冷<br>机房 3    | 6MV  |
|   |     |                |                                     | 1.35E-<br>05 | 4.07E+03 | 5.48E-02 |                 | 10MV |
|   |     |                |                                     | 1.09E-<br>06 | 1.05E+05 | 1.15E-01 |                 | 6MV  |
|   |     | 次束<br>(散<br>射) |                                     | 2.91E-<br>06 | 5.18E+04 | 1.51E-01 |                 | 10MV |
| F3  | 6.1 | 次束<br>(漏<br>射) | 228<br>(砼)                          | 2.04E-<br>08 | 2.26E+04 | 4.61E-04 | 西墙加速<br>器室 2    | 6MV  |
|   |     |                |                                     | 5.95E-<br>08 | 9.67E+03 | 5.75E-04 |                 | 10MV |

|    |     |                |                                    |              |          |          |                       |      |  |  |
|----|-----|----------------|------------------------------------|--------------|----------|----------|-----------------------|------|--|--|
|    |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 1.70E-<br>09 | 6.08E+05 | 1.03E-03 |                       | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 7.20E-<br>09 | 2.24E+05 | 1.61E-03 |                       | 10MV |  |  |
| G3 | 6.8 | 次束<br>(漏<br>射) | 173<br>(砼)                         | 1.61E-<br>06 | 1.82E+04 | 2.93E-02 | 西墙加速<br>器室 2          | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 3.53E-<br>06 | 7.79E+03 | 2.75E-02 |                       | 10MV |  |  |
|    |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 2.22E-<br>07 | 2.01E+05 | 4.47E-02 |                       | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 6.63E-<br>07 | 9.90E+04 | 6.52E-02 |                       | 10MV |  |  |
| H3 | 6.0 | 次束<br>(漏<br>射) | 149<br>(砼)                         | 1.08E-<br>05 | 2.33E+04 | 2.53E-01 | 北墙模拟<br>定位 CT 控<br>制室 | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 2.10E-<br>05 | 1.00E+04 | 2.10E-01 |                       | 10MV |  |  |
| I3 | 6.7 | 主束             | 270<br>(砼)                         | 8.70E-<br>09 | 1.93E+07 | 1.63E-01 | 室顶                    | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 6.47E-<br>08 | 8.26E+06 | 5.19E-01 |                       | 10MV |  |  |
| J3 | 8.4 | 主束             | 270<br>(砼)                         | 8.70E-<br>09 | 1.19E+07 | 1.04E-01 | 屋面                    | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 6.47E-<br>08 | 5.10E+06 | 3.30E-01 |                       | 10MV |  |  |
| K3 | 4.9 | 次束<br>(漏<br>射) | 150<br>(砼)                         | 1.00E-<br>05 | 3.50E+04 | 3.50E-01 | 室顶                    | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 1.95E-<br>05 | 1.50E+04 | 2.93E-01 |                       | 10MV |  |  |
|    |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 1.70E-<br>06 | 3.88E+05 | 6.59E-01 |                       | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 4.39E-<br>06 | 1.91E+05 | 8.38E-01 |                       | 10MV |  |  |
| L3 | 8.1 | 次束<br>(漏<br>射) | 150<br>(砼)                         | 1.00E-<br>05 | 1.28E+04 | 1.28E-01 | 屋面                    | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 1.95E-<br>05 | 5.49E+03 | 1.07E-01 |                       | 10MV |  |  |
|    |     | 次束<br>(散<br>射) |                                    | 1.70E-<br>06 | 1.42E+05 | 2.41E-01 |                       | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 4.39E-<br>06 | 6.98E+04 | 3.07E-01 |                       | 10MV |  |  |
| M3 | 8.2 | 次束<br>(漏<br>射) | 145<br>(砼)<br>+1.2cm<br>铅(门<br>防护) | 9.16E-<br>06 | 1.25E+04 | 1.41E-02 | 门外走廊                  | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 1.74E-<br>05 | 5.35E+03 | 9.35E-02 |                       | 10MV |  |  |
|    | 9.1 | 次束<br>(散<br>射) | 142<br>(砼)<br>+1.2cm<br>铅(门<br>防护) | 2.13E-<br>06 | 1.12E+05 | 2.39E-01 |                       | 6MV  |  |  |
|    |     |                |                                    | 5.22E-<br>06 | 5.53E+04 | 2.89E-01 |                       | 10MV |  |  |

注: (1) 普通混凝土(砼)的密度取为  $2.35 \text{ t/m}^3$ , 铅的密度取  $11.4 \text{ t/m}^3$ ; 未考虑加速器所在建筑顶板屏蔽效果; (2) 加速器室 1 10MV X 射线有用束距靶 1m 的等中心处的最大剂量率为  $1.32 \times 10^9 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ; 加速器室 2 10MV X 射线有用束距靶 1m 的等中心处的最大剂量率为  $1.44 \times 10^9 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ; 加速器室 3 6MV

(FFF 模式) X 射线有用束距靶 1m 的等中心处的最大剂量率为  $8.4E+8\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ , 10MV (标准模式) X 射线有用束距靶 1m 的等中心处的最大剂量率为  $3.6E+8\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ ; (3) 10MV X 射线  $30^\circ$  方向散射系数为  $3.18\times10^{-3}$ , 10MV X 射线  $20^\circ$  方向散射系数为  $5.79\times10^{-3}$ , 6MV X 射线  $30^\circ$  方向散射系数为  $2.77\times10^{-3}$ , 6MV X 射线  $20^\circ$  方向散射系数为  $6.73\times10^{-3}$ ; (4) 表中防护门处仅考虑了机头的泄漏辐射; (5) E1、F1、G1、K1、L1、E2、F2、G21、K2、L2、E3、F3、G3、K3、L3 点位屏蔽厚度与距离都取散射和漏射较小值进行评价; (6) 估算点都是距离屏蔽体外表面 30cm 处; (7) 防护门外点位计算时保守按照防护门的厚度计算, 未考虑斜射影响。(8) 加速器室 2 工作时对加速器室 1 门口的剂量率极小, 可不考虑加速器室同时工作时对相邻门口的叠加影响。

### (3) 加速器防护门外的辐射剂量估算

根据 GB/T 201.2-2011, 对于 10MV 加速器机房, 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  $\gamma$  射线。本项目主要考虑主束墙表面的二次散射、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。其中 6MV 的散射因子略高于 10MV, 本项目散射因子取较大值进行估算, 具体如下:

- a) 主束墙表面的二次散射 ( $H_s$ ) / 主束穿过迷道内墙后一次散射 ( $H_s$ );
- 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) 穿过迷道内墙的泄漏辐射。

1) 加速器室 1 和加速器室 2 主束墙表面的二次散射, 加速器室 3 主要考虑主束穿过迷道内墙经过迷道外墙散射后对门外的辐射影响。

#### 加速器室 1 和加速器室 2 主束墙表面的二次散射 ( $H_s$ ) 剂量率估算

$$H_s = \frac{H_0}{d_h^2} \times \frac{a_0 A_0 a_z A_z}{d_r^2 \times d_z^2} \quad (11-9)$$

式中:  $H_0$ —距靶 1m 处的辐射剂量率;

$a_0$ —主束经散射面  $A_0$  的散射系数 (系数取值由 NCRP REPORT 151 TableB.8a);

$A_0$ —等中心 1.0m 处最大照射野投影在主束墙上的面积;

$a_z$ —散射经迷道表面  $A_z$  第二次反散射的系数 (系数取值由 NCRP REPORT 151 TableB.8a, 能量为 0.5MeV);

$A_z$ —散射面  $A_0$  的散射线经过迷道内口发散到迷道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;

$d_r$ —第一次散射面中心点至第二散射面中心点的距离, m;

$d_z$ —第二散射面中心点至防护门外 30cm 入口处的距离, m。

### 加速器室 3 主束穿迷路内墙经过迷路外墙散射 ( $H_s$ ) 剂量率估算

$$H_s = \frac{B_1 H_0}{d_0^2} \times \frac{a_0 A_0}{d_r^2} \quad (11-10)$$

式中:  $H_0$ —距靶 1m 处的辐射剂量率;

$B_L$ —迷路内墙厚度对应的衰减因子;

$a_0$ —主束经散射面  $A_0$  的散射系数 (系数取值由 NCRP REPORT 151 TableB.8a);

$A_0$ —等中心 1.0m 处最大照射野投影在迷路外墙内表面的面积;

$d_0$ —靶点至迷路外墙内表面的距离;

$d_r$ —散射面中线至防护门外入口处 30cm 处的距离。

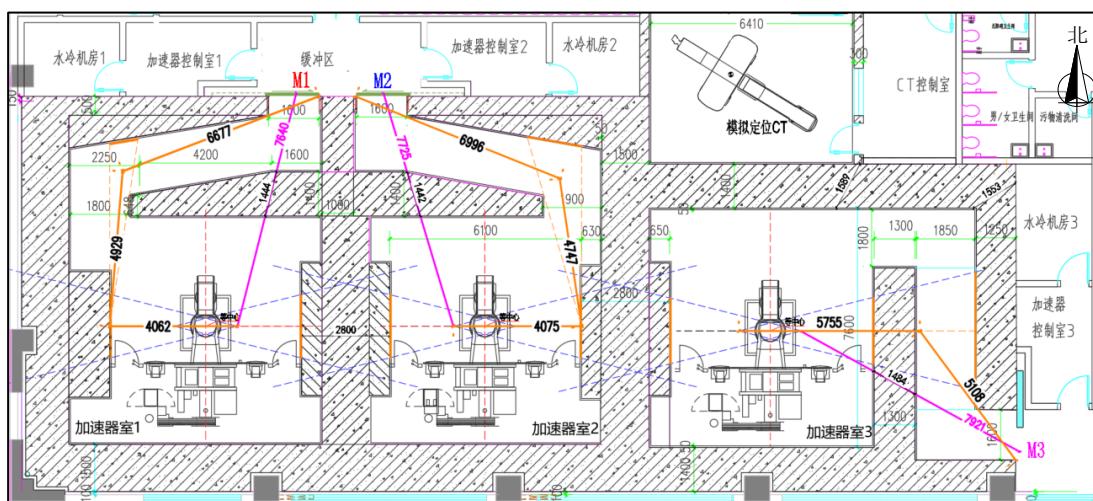


图 11-6 3 间加速器室主束墙面散射平面图

### 2) 加速器机头泄漏辐射经屏蔽墙的一次散射 ( $H_{LS}$ ) 剂量率估算

$$H_{LS} = \frac{L_f H_0 \alpha_{LS} A_1}{d_{LS}^2 \times d_{zz}^2} \quad (11-11)$$

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;

$\alpha_{LS}$ —散射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,  $m^2$ ;

$d_{LS}$ —靶至散射墙迷路中心线的距离, m;

$d_{zz}$ —从散射墙与迷路中心线交点至入口处 30cm 处的距离, m。

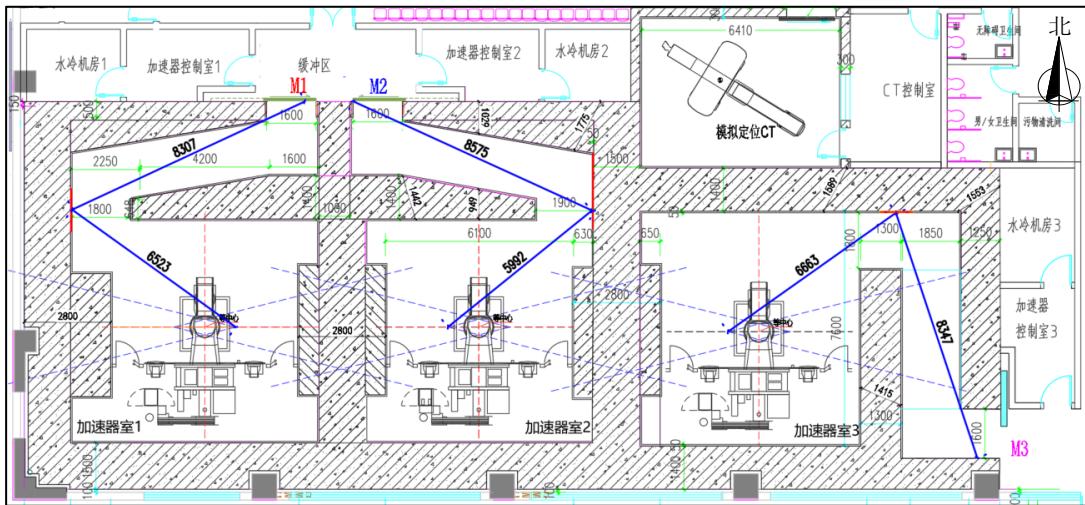


图 11-7 机头漏射线经墙面散射平面图

### 3) 散射辐射的二次散射 ( $H_{Ps}$ ) 剂量率估算

$$H_{PS} = \frac{\alpha(\theta)H_0\left(\frac{F}{400}\right)(\alpha_{PS}A_l)}{(d_{sca} \times d_{sec} \times d_{ZZ})^2} \quad (11-12)$$

式中:  $\alpha(\theta)$ —病人散射线以散射角  $\theta$  进行散射时的散射因子(系数取值查

## NCRP REPORT 151 TableB.4);

$H_0$ —等中心处的辐射剂量率；

$F$ —被照射物体等中心处照射野面积, 取  $1600\text{cm}^2$  ( $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ );

$\alpha_{ps}$ —反射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  $45^\circ$ );

$A_1$ —从门入口处可见墙的面积,  $\text{m}^2$ ;

$d_{sca}$ —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。

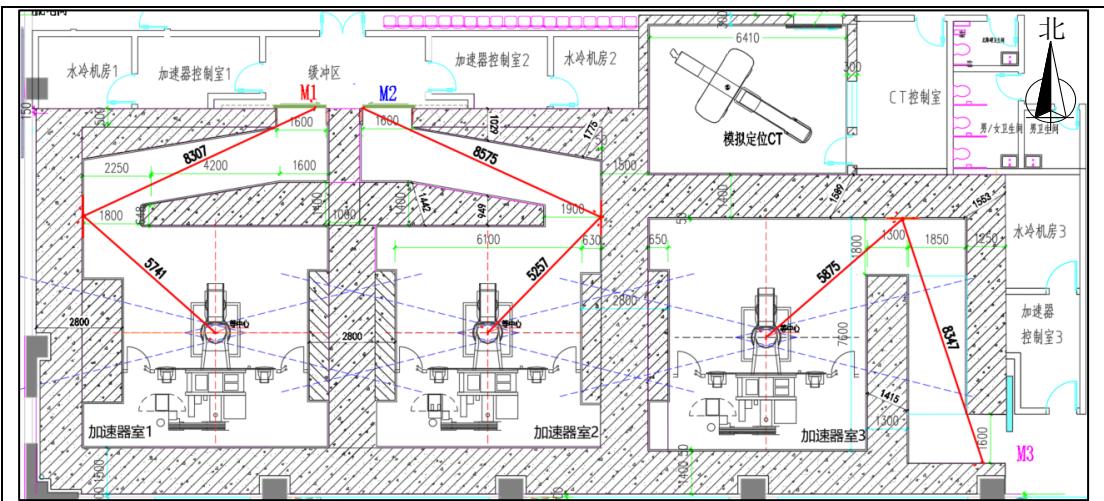


图 11-8 主束通过患者体表散射线经墙面散射平面图

#### 4) 穿过迷路内墙的泄漏辐射剂量率估算

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 11-4 的估算结果。

### 5) 加速器室防护门附近X射线贯穿辐射分析

根据公式11-9~公式11-12和图11-6~图11-8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11-8中。可见,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4.66E-01 $\mu$ Gy/h。

表11-8 迷路入口处剂量率的计算参数及结果

| 参数    | 加速器室1                                | 加速器室2              | 加速器室3              |                   |                   |
|-------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|       | 10MV                                 | 10MV               | 6MV                | 10MV              |                   |
| $H_s$ | $H_0$<br>( $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ) | $1.32 \times 10^9$ | $1.44 \times 10^9$ | $8.4 \times 10^8$ | $3.6 \times 10^8$ |
|       | $d_0$                                | /                  | /                  | 5.76              | 5.76              |
|       | $B_1$                                | /                  | /                  | 1.52E-04          | 3.93E-04          |
|       | $\alpha_0$                           | 2.1E-03            | 2.1E-03            | 2.7E-03           | 2.1E-03           |
|       | $A_0$ ( $\text{m}^2$ )               | 8.0                | 8.0                | 14.8              | 14.8              |
|       | $\alpha_z$                           | 8.0E-03            | 8.0E-03            | /                 | /                 |
|       | $A_z$ ( $\text{m}^2$ )               | 3.63               | 7.00               | /                 | /                 |
|       | $d_h$ (m)                            | 4.06               | 4.08               | /                 | /                 |
|       | $d_r$ (m)                            | 4.93               | 4.75               | 5.41              | 5.41              |

|  |                                       |                    |                    |                   |                   |
|--|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|  | $dz$ (m)                              | 6.98               | 7.30               | /                 | /                 |
|  | $H_s$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )            | <b>3.30E+01</b>    | <b>6.67E+01</b>    | <b>5.25E+00</b>   | <b>4.53E+00</b>   |
| $H_{LS}$   | $H_o$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )            | $1.32 \times 10^9$ | $1.44 \times 10^9$ | $8.4 \times 10^8$ | $3.6 \times 10^8$ |
|  | $L_f$                                 | 0.001              | 0.001              | 0.001             | 0.001             |
|  | $\alpha_{LS}$                         | 5.7E-03            | 5.7E-03            | 7.1E-03           | 5.7E-03           |
|  | $A_I$ ( $\text{m}^2$ )                | 5.60               | 4.56               | 4.28              | 4.28              |
|  | $d_{LS}$ (m)                          | 6.52               | 5.99               | 6.66              | 6.66              |
|  | $d_{zz}$ (m)                          | 8.61               | 8.88               | 8.65              | 8.65              |
|  | $H_{LS}$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )         | <b>1.34E+01</b>    | <b>1.32E+01</b>    | <b>7.69E+00</b>   | <b>2.65E+00</b>   |
|  | $H_o$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )            | $1.32 \times 10^9$ | $1.44 \times 10^9$ | $8.4 \times 10^8$ | $3.6 \times 10^8$ |
| $H_{ps}$   | $\alpha(\theta)$                      | 1.35E-03           | 1.35E-03           | 1.39E-03          | 1.35E-03          |
|  | $F$ ( $\text{cm}^2$ )                 | 1600               | 1600               | 1600              | 1600              |
|  | $\alpha_{ps}$                         | 2.2E-02            | 2.2E-02            | 2.2E-02           | 2.2E-02           |
|  | $A_I$ ( $\text{m}^2$ )                | 5.60               | 4.56               | 4.28              | 4.28              |
|  | $d_{sca}$ (m)                         | 1                  | 1                  | 1                 | 1                 |
|  | $d_{sec}$ (m)                         | 5.74               | 5.26               | 5.88              | 5.88              |
|  | $d_{zz}$ (m)                          | 8.61               | 8.88               | 8.65              | 8.65              |
|  | $H_{ps}$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )         | <b>3.60E+02</b>    | <b>3.58E+02</b>    | <b>1.70E+02</b>   | <b>7.08E+01</b>   |
| $H_{LT}$   | $H_{LT}$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )         | <b>3.97E-01</b>    | <b>4.22E-01</b>    | <b>2.39E-01</b>   | <b>2.89E-01</b>   |
| $H_{ST}$   | $H_{ST}$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )         | /                  | /                  | <b>1.41E-02</b>   | <b>9.35E-02</b>   |
| $H_{Tot-shield}$   | $t_{barrier}$ (mm)                    | 24                 | 24                 | 24                | 24                |
|  | $TVL_{Pb}$ (mm)                       | 6                  | 6                  | 6                 | 6                 |
|  | $H_{Tot-shield}$ ( $\mu\text{Gy/h}$ ) | <b>4.38E-01</b>    | <b>4.66E-01</b>    | <b>2.71E-01</b>   | <b>3.90E-01</b>   |
| 注：参数取自NCRP REPORT No.151和设计资料；防护门为12mm铅门，考虑斜射影响，入射角大于60°防护厚度保守按24mm计算。泄漏散射和病人散射后的X射线较低，约为0.5MeV，在Pb中的TVL为3-6mm，本项目保守取6mm。                        |                                       |                    |                    |                   |                   |
| $H_{Tot-shield} = H_s \times 10^{-t_{barrier}} + H_{LS} \times 10^{-t_{barrier}} + H_{ps} \times 10^{-t_{barrier}} + H_{LT} + H_{ST}$            |                                       |                    |                    |                   |                   |
| 根据加速器室墙外关注点的剂量估算结果可知，机房外关注点（除防护门入口处）的最大辐射剂量率为 $1.41E+00 \mu\text{Gy/h}$ （加速器室 2 室顶），对人员可达处最大辐射剂量率为 $8.15E-01 \mu\text{Gy/h}$ （加速器室 1 西墙外通道），满足本报 |                                       |                    |                    |                   |                   |

告设定的剂量率控制水平  $2.5\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。根据以上防护门外辐射水平估算，加速器室防护门外剂量率为:  $4.66\text{E-}01\mu\text{Gy}/\text{h}$ , 可见所有加速器室防护门外的辐射剂量率也满足低于  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$  的要求。

#### (4) 后装治疗室剂量率估算结果

后装治疗室外关注点剂量率估算结果见表 11-9, 治疗室平剖面图及剂量评估点见图 11-9 和图 11-10。

表 11-9 后装治疗室外关注点剂量率估算结果

| 位置 | 距离<br>(m) | 辐射屏蔽               |          | 剂量率 ( $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ) |          | 位置描述   |
|----|-----------|--------------------|----------|---------------------------------|----------|--------|
|    |           | 屏蔽材质及<br>厚度        | 衰减因子     | 屏蔽前                             | 屏蔽后      |        |
| A4 | 2.2       | 70cm 砖             | 2.48E-05 | 8.47E+03                        | 2.10E-01 | 东墙楼外绿地 |
| B4 | 2.6       | 70cm 砖             | 2.48E-05 | 6.07E+03                        | 1.51E-01 | 南墙楼外绿地 |
| C4 | 2.2       | 70cm 砖             | 2.48E-05 | 8.47E+03                        | 2.10E-01 | 西墙控制室  |
| D4 | 5.0       | 70cm 砖             | 2.48E-05 | 9.20E+02                        | 2.28E-02 | 北墙配电室  |
| E4 | 2.3       | 73.4cm 砖           | 1.45E-05 | 7.75E+03                        | 1.15E-01 | 西墙候诊区  |
| M4 | 3.8       | 88.6cm 砖<br>+1cmPb | 3.52E-07 | 2.84E+03                        | 9.98E-04 | 防护门入口  |
| F4 | 3.8       | 70cm 砖             | 2.48E-05 | 2.84E+03                        | 7.05E-02 | 屋面     |

注: 距后装源 (10Ci) 1m 的剂量率为  $4.1\text{E+}04\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。

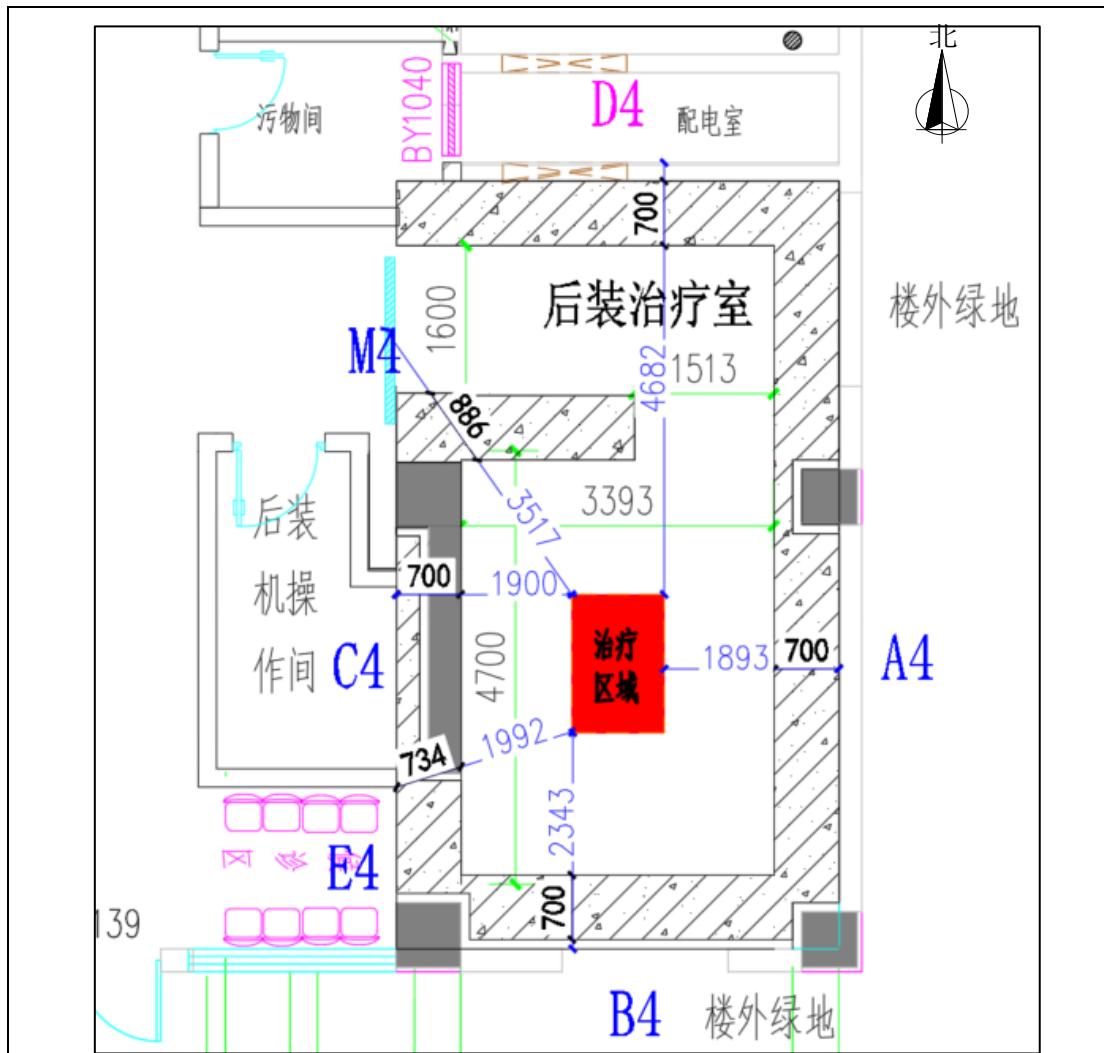


图 11-9 后装治疗室平面图及剂量评估点

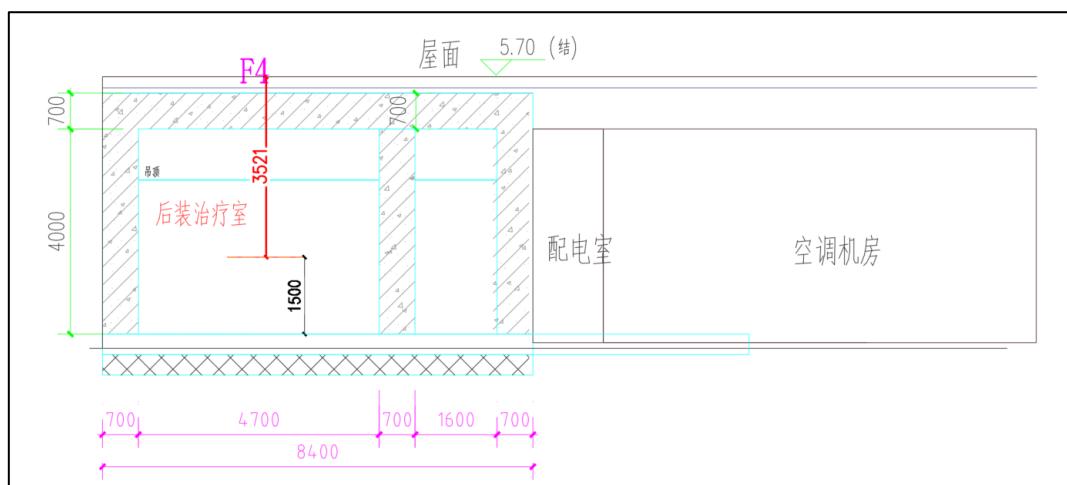


图 11-10 后装治疗室剖面图及剂量评估点

### (5) 后装治疗室防护门外辐射水平

防护门外剂量率水平除了泄漏辐射贡献外,还受到治疗束经迷道的散射贡献。治疗束经过迷道散射对防护门所致的附加剂量率依据公式(11-13)进行估算。

$$H_S = \frac{A \cdot K_\gamma \cdot S_1 \cdot \alpha_1}{R_1^2 \cdot R_2^2} \quad (11-13)$$

式中:  $A$ —放射源活度, 本项目为  $3.7E+5\text{MBq}$ ;

$K_\gamma$ — $1\text{m}$  处放射源的空气比释动能常数, 对 Ir-192 为  $0.111\mu\text{Gy}/\text{h}\cdot\text{MBq}$ ;

$S_1$ — $\gamma$  射线在迷道内口墙的散射面积, 取  $10.16\text{m}^2$  ( $254\text{cm} \times 400\text{cm}$ ) ;

$\alpha_1$ —治疗束一次散射的散射系数,  $3.6E-2$  (系数取值由 NCRP REPORT 151

TableB.8a,  $0.25\text{MeV}$ ,  $45^\circ$  入射,  $0^\circ$  散射);

$R_1$ —放射源到散射面中心点的距离, 取  $3.22\text{m}$ ;

$R_2$ —为迷道内口散射点到防护门外  $30\text{cm}$  处的距离, 取  $4.51\text{m}$ 。

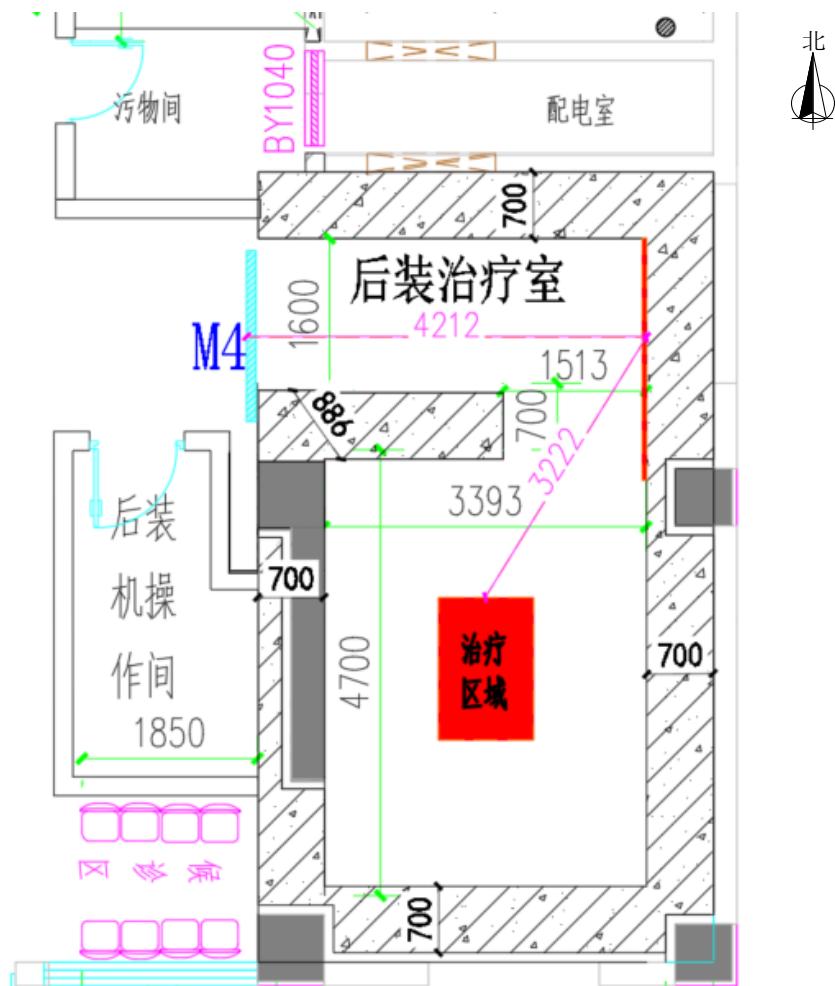


图 11-11 后装治疗室散射路径图

依据公式 (11-13) 计算未经过防护门衰减时的剂量率  $H_S=71.1\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。根

据 GBZ/T201.3-2014, Ir-192 治疗束的散射辐射能量约为 0.2MeV, 其在铅中的 TVL 为 5mm, 经 10mm 铅门屏蔽后, 防护门外辐射剂量率降低至 0.71 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。叠加上射线贯穿迷道内墙和防护门的辐射贡献值为 9.98E-04 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ , 则后装治疗室防护门外的剂量约为 0.71 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。

#### (6) 放射治疗中心治疗室周围剂量率水平

根据 4 间治疗室墙外关注点的剂量估算结果可知, 机房外关注点(除防护门入口和室顶处)的最大辐射剂量率分别为 8.84E-01 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 、9.92E-01 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 、7.15E-01 $\mu\text{Gy}/\text{h}$  和 2.10E-01 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ , 均满足本报告设定的剂量率控制水平 2.5 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。根据以上防护门外辐射水平估算, 4 间治疗室防护门外剂量率分别为: 0.44 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ , 0.47 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ , 0.39 $\mu\text{Gy}/\text{h}$  和 0.71 $\mu\text{Gy}/\text{h}$ , 可见所有治疗室防护门外的辐射剂量率也满足低于 2.5 $\mu\text{Sv}/\text{h}$  的要求。

考虑加速器室的剂量率叠加效应, 主要考虑加速器室 1 和加速器室 2 同时运行时对加速器室 1 门口处的剂量影响, 根据计算, 加速器室 2 对加速器室 1 门口处 M1 的贡献值极小(未叠加加速器室 1 防护门的屏蔽), 因此可以不考虑剂量率的叠加影响。

**评价范围周围的影响:** 根据以上估算, 3 间加速器室和 1 间后装治疗室一层地面的最大附加剂量率为 8.84E-01 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ , 经过距离、墙体、空气的衰减影响, 附加剂量率继续降低, 对周围的辐射影响可以忽略不计。

#### 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 :  $E=D\times t\times T\times U\times K$  (11-14)

式中:  $E$ --年有效剂量,  $\mu\text{Sv}$ ;

$D$ --计算点附加剂量率,  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ;

$t$ --年出束时间,  $\text{h}/\text{a}$ ;

$K$ --有效剂量与吸收剂量换算系数,  $\text{Sv}/\text{Gy}$ , 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, 可预计治疗室周围的工作人员的年附加有效剂量见表 11-10 所示。

表 11-10 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<br>编号 | 场所位置     | T   | U | 年受照时间, t | 剂量率<br>( $\mu\text{Gy/h}$ ) | 年附加有效剂量, $\mu\text{Sv}$ |
|----------------|----------|----------|-----|---|----------|-----------------------------|-------------------------|
| 加速器室 1<br>工作人员 | D1       | 加速器控制室 1 | 1   | 1 | 375h     | 3.08E-02                    | 1.16E+01                |
|                | M1       | 防护门外     | 1/8 | 1 | 375h     | 4.38E-01                    | 2.05E+01                |
| 加速器室 2<br>工作人员 | D2       | 加速器控制室 2 | 1   | 1 | 375h     | 1.38E-02                    | 5.18E+00                |
|                | M2       | 防护门外     | 1/8 | 1 | 375h     | 4.66E-01                    | 2.18E+01                |
| 加速器室 3<br>工作人员 | A3       | 加速器控制室 3 | 1   | 1 | 125h     | 7.15E-01                    | 8.94E+01                |
|                | M3       | 防护门外     | 1/8 | 1 | 375h     | 3.90E-01                    | 1.83E+01                |
| 后装治疗室工作人<br>员  | C4       | 控制室      | 1   | 1 | 335h     | 2.10E-01                    | 7.04E+01                |
|                | M4       | 防护门外     | 1/8 | 1 | 335h     | 7.10E-01                    | 2.97E+01                |

根据上表计算结果可知, 工作人员最大年附加剂量率为  $89.4\mu\text{Sv}$ 。

后装治疗室工作人员机房内操作时, 会受到后装源(贮存位)的泄漏辐射。假设工作人员每次治疗前、后在床旁(距离储源罐 100cm)各操作 1min, 则全年治疗 2000 人次, 在后装机储源罐(>100cm 处)附近的停留时间约 66.7h。《后装  $\gamma$  源近距离治疗质量控制检测规范》(WS 262-2017)要求, 工作贮源器内装载最大容许活度的放射源时, 距离贮源器表面 5cm 处的任何位置, 因泄漏辐射所致周围剂量率当量率不大于  $50\mu\text{Sv/h}$ , 距离贮源器表面 100cm 处的球面上, 任何一点因泄漏辐射所致周围剂量率当量率不大于  $5\mu\text{Sv/h}$ 。本评价保守依照该数值剂量估算, 后装机操作工作人员年最大受照剂量为:  $5\mu\text{Sv/h} \times 66.7\text{h} + 70.4\mu\text{Sv} = 403.9\mu\text{Sv}$ 。

## (2) 公众受照剂量估计

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

表 11-11 运行时公众的年附加有效剂量估算结果

| 估算对<br>象     | 位置<br>编号 | 场所位置           | T    | U | 年受照时<br>间, t | 剂量率<br>( $\mu\text{Gy/h}$ ) | 年附加有效剂<br>量, $\mu\text{Sv}$ |
|--------------|----------|----------------|------|---|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 加速器<br>室 1 周 | B1       | 南墙楼外绿地<br>(漏射) | 1/16 | 1 | 375h         | 7.40E-01                    | 1.73E+01                    |

|             |    |                |      |     |      |          |          |
|-------------|----|----------------|------|-----|------|----------|----------|
| 围公众         | C1 | 西墙楼外通道<br>(主束) | 1/8  | 1   | 125h | 8.15E-01 | 1.27E+01 |
|             | J1 | 屋面 (主束)        | 1/40 | 0.1 | 125h | 3.49E-01 | 1.09E-01 |
|             | L1 | 屋面 (散射)        | 1/40 | 0.1 | 375h | 4.94E-01 | 4.63E-01 |
| 加速器室 2 周围公众 | B2 | 南墙楼外绿地<br>(漏射) | 1/16 | 1   | 375h | 8.07E-01 | 4.63E-01 |
|             | J2 | 屋面 (主束)        | 1/40 | 0.1 | 125h | 3.80E-01 | 1.89E+01 |
|             | L2 | 屋面 (散射)        | 1/40 | 0.1 | 375h | 5.39E-01 | 1.19E-01 |
| 加速器室 2 周围公众 | B3 | 南墙楼外绿地<br>(漏射) | 1/16 | 1   | 375h | 2.50E-01 | 5.05E-01 |
|             | J3 | 屋面 (主束)        | 1/40 | 0.1 | 125h | 3.30E-01 | 5.86E+00 |
|             | L3 | 屋面 (散射)        | 1/40 | 0.1 | 375h | 3.07E-01 | 1.03E-01 |
| 后装治疗室周围公众   | A4 | 东墙楼外绿地         | 1/16 | 1   | 335h | 2.10E-01 | 2.88E-01 |
|             | B4 | 南墙楼外绿地         | 1/16 | 1   | 335h | 1.51E-01 | 4.40E+00 |
|             | E4 | 西墙候诊区          | 1/16 | 1   | 335h | 1.15E-01 | 3.16E+00 |
|             | F4 | 屋面             | 1/40 | 1   | 335h | 7.05E-02 | 9.63E-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  $403.9\mu\text{Sv}$ 、 $18.9\mu\text{Sv}$ ，满足年剂量约束值（ $2\text{mSv/a}$ ， $0.1\text{mSv/a}$ ）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至少 2 名技师操作，物理师负责剂量测量与校准、治疗计划的设计与监督实施、辐射安全的监督，医师负责临床检查与诊断，放疗前的工作准备，放射治疗目标的确认和方法的选择，物理室和医生的附加剂量远小于本项目估算结果。因此对本项目辐射工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  $50\text{m}$  评价范围内的公众的年剂量远小于  $18.9\mu\text{Sv}$ （加速器室 2 屋面），低于设定的剂量约束目标值  $0.1\text{mSv/a}$ 。

### 11.2.6 $\text{O}_3$ 和 $\text{NO}_x$ 分析

后装机的  $1\text{m}$  处剂量率远小于加速器，相应的  $\text{O}_3$  也会小很多，本项目只

对加速器进行分析。

### (1) $O_3$ 的产额

本项目电子直线加速器提供 X 射线和电子线两种模式, X 射线最高能量为 10MV, 电子线最高能量为 18MeV。使用电子束模式时, X 射线靶和均整器从电子射线束范围内移去, 产生电子线的电子束流强度比打靶产生临床 X 射线所需的电子束流强度小 2~3 个数量级(《放射肿瘤物理学: 教学手册》IAEA, 2005), 故仅需考虑 X 射线所致  $O_3$  的产额。

#### ① 加速器有用线束的 $O_3$ 产额

$$P = 2.43 \dot{D}_o (1 - \cos \theta) RG \quad (11-15)$$

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·m<sup>2</sup>/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 ( $G=10$ );

$\theta$  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  $4\pi$  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:

$$P = 3.32 \times 10^{-3} \dot{D}_o GV^{1/3} \quad (11-16)$$

式中:  $V$  为加速器机房的体积, m<sup>3</sup>; 其余符号同 (11-15)。

### (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:

$$Q = \frac{P}{V} \bar{T} \quad (11-17)$$

式中:  $V$  为机房的体积, m<sup>3</sup>;

$\bar{T}$  为  $O_3$  的有效清除时间 (h):

$$\bar{T} = \frac{t_V \cdot t_d}{t_V + t_d} \quad (11-18)$$

### (3) 参数与结果

按照《放射治疗放射防护要求》(GBZ 121-2020)，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。 $t_d=0.83h$ ； $t_V=0.25h$ ，按(11-15)计算出 $\bar{T}=0.192h$ 。相关参数与 $O_3$ 浓度计算结果如表11-12所示。

表11-12 加速器室的 $O_3$ 浓度情况表

| 场所名称   | $D_0$<br>( $Gy \cdot m^2/min$ ) | $\theta$ (°) | $R$ (m) | $V$ ( $m^3$ ) | $P$ (mg/h) | $Q$ (mg/ $m^3$ ) |
|--------|---------------------------------|--------------|---------|---------------|------------|------------------|
| 加速器室 1 | 22                              | 14           | 4.05    | 264.6         | 67.3       | 4.9E-02          |
| 加速器室 2 | 24                              | 14           | 4.02    | 250.8         | 72.6       | 5.6E-02          |
| 加速器室 3 | 14                              | 14           | 4.20    | 277.6         | 42.44      | 3.1E-02          |

根据上述估算结果，则臭氧的年总产量约为 $22.8g((67.3+72.6+42.44)mg/h \times 125h/\text{年})$ 。机房 $O_3$ 浓度最大值为 $5.6 \times 10^{-2}mg/m^3$ ，低于浓度限值 $0.3mg/m^3$ 。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。

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

### 11.3.1 加速器事故影响分析

#### (1) 人员误入加速器室并发生误照事故

加速器可能发生的最严重的放射性事故是门机联锁失效，人员误入加速器室而受到意外照射。事故情景假设：在以加速器10MV治疗患者过程中，人员误入机房后到达迷道内口处，发现有病人正在治疗，急速返回。保守假设在迷道内口处停留时间10s，据此估算误入人员的最大受照剂量。

迷道口的剂量贡献为有用束和机头泄漏射线的散射辐射等，根据表11-8数值，可推算出迷道口处(防护门内)的剂量率，见表11-15所示。

表11-13 加速器10MV运行时迷道口内剂量率水平( $\mu Sv/h$ )

| 编号 | 剂量来源             | 加速器室1迷道口内 | 加速器室2迷道口内 | 加速器室3迷道口内 |
|----|------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1  | 主束穿过内墙后迷路外墙的一次散射 | 33.02     | 66.7      | 52.5      |
| 2  | 泄漏辐射经屏蔽墙的一次散射    | 13.4      | 13.2      | 7.69      |

|   |             |          |          |          |
|---|-------------|----------|----------|----------|
| 3 | 散射辐射的二次散射   | 360      | 358      | 170      |
| 4 | 穿过迷路内墙的泄漏辐射 | 3.97E-01 | 4.22E-01 | 2.89E-01 |
|   | 合计          | 407      | 438      | 230      |

保守假设在迷道口内停留 10s, 最大受照剂量约为  $1.2\mu\text{Sv}$ , 对误入人员健康不会造成影响。

该装置设有门机安全联锁系统, 以及在治疗室和迷道内设置有闭路监视系统, 可有效防止该事故发生。此外, 加速器放疗工作人员须佩戴个人剂量报警仪进入治疗室。一旦出现误入情况, 报警仪会提醒工作人员, 立即撤出。

## (2) 其它异常运行事件和防范措施

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) 出束不能停止时: 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) 停电故障: 工作人员采用手动方式打开防护门, 迅速将病人从治疗床上移出, UPS 系统给电脑自动供电, 记录正在治疗病人已经接受的累积治疗剂量。

3) 事故性出束: 工作人员在治疗室内为患者摆位或开展其它准备工作, 控制台处操作人员误开机出束。医护人员进入治疗室, 要保持防护门开启, 由于有门机联锁系统, 加速器无法启动。为防止陪护人员或其他人员误留在加速器机房内受到误照射, 要求加速器在每次出束前, 工作人员必须进机房进行检查, 确认无误后, 方可出束。

4) 维修期间的事故: 加速器维修工程师在检修期间误开机出束。在维修加速器时, 按下急停开关, 或保持防护门开启, 这种情况下, 加速器无法启动。此外, 维修人员携带有个人剂量报警仪, 一旦有紧急情况, 马上按下墙上的急停按钮, 并迅速撤离现场。

5) 工作人员误入: 加速器放疗工作人员须佩戴个人剂量报警仪进入治疗室。一旦出现误入情况, 报警仪会提醒工作人员, 立即撤出。

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。

### 11.3.2 后装机事故影响分析

#### (1) 卡源事故

后装机最严重的事故是卡源事故。

发生卡源时，首先使用后装机提供的紧急回源程序或按钮进行紧急回源处理。后装治疗机的源开关控制系统均配有手动机械复位应急装置。当控制系统出现故障导致自动关源系统失效时，通过手动机械复位机构将使放射源回到储源状态。

如果源卡的过死，紧急回源装置无法回源时，只能采取人工回源处理。此外，如果后装机放射源脱落掉地上，也需人工处置。处理该类事故，需严格按照事故应急处理措施进行操作，工作人员在进入机房前，应穿上铅衣、铅帽、铅围脖，戴上铅眼镜，并佩带个人剂量计及携带辐射巡测仪，进入机房后，应在尽可能短的时间内，将放射源旋回后装机的贮源系统内或者转移至铅罐内。

人员穿戴防护用品进入机房和阻挡物的屏蔽，处理事故时距离一般大于30cm，预计外照射剂量率可以降低一个量级，故完成手动复位或者捡拾放射源应急操作的受照剂量约为 $4.1\text{mSv/h} \times (100\text{cm}/30\text{cm})^2 \times 0.5\text{min} \div 60 = 0.38\text{mSv}$ 。可见，当后装治疗机发生卡源或者脱落事故时，人工操作时受照剂量较小，对操作人员健康影响很小，是安全的。

#### (2) 放射源失控

后装治疗机使用1枚Ir-192源，属于III类放射源，源失控对环境安全的潜在危险较大。医院在使用前会制定有设备安全使用管理制度和操作规程，来全面加强机房安全保卫措施，严防放射源失控。设备定期更换放射源的工作由具有使用III类Ir-192后装机资质的单位承担，废源由供方在倒装新源时顺便回收。

根据原国家环保总局《关于建立放射性同位素与射线装置辐射事故分级处理和报告制度的通知》（环发〔2006〕145号），发生放射源丢失、被盗时，

医院将立即向上级主管部门报告，启动事故应急预案。发生该类事故后，将在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。

### （3）人员误照

发生人员误照后，有关科室应当立即向医院主管部门报告。由医院领导统一指挥，启动应急预案程序，迅速安排受照人员接受医学检查，或者在指定的医疗机构救治，并以书面形式上报生态环境主管部门。

## 11.4 放射源运输、倒装和安全管理

### （1）放射源运输

根据项目实施计划，后装机所需放射源拟由放射源生产厂家提供。医院将委托持有放射源销售资质的公司购买放射源，并由销售公司委托具有放射源运输资质的公司进行放射源运输。医院配合放射源进场工作，在医院接受放射源，并安排适当的场地暂存。

### （2）放射源倒装

后装机放射源倒装工作由设备厂家的维修工程师完成。医院派出工作人员做一些辅助工作。倒装放射源之前，项目单位将与放射源供应商签订密封源购置和返回协议，办理《放射性同位素转让审批表》。倒装过程中，做好现场警戒和准备工作，监测倒源场所的剂量率水平，操作人员佩带个人剂量计和个人剂量报警仪。待放射源倒装完毕，双方办理放射源安全责任转移手续。

在倒装放射源过程中，一旦发生卡源情况，依照拟定的应急计划妥善处置，并严格控制倒源人员的受照剂量。

### （3）放射源安全管理

医院将加强含源设备安全管理，补充制定后装治疗操作规程，全面加强机房安全保卫措施，严防放射源失控。

医院辐射安全事故预案中拟增加放射源丢失被盗事故报告处置的有关规定。

## 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11-14。

表11-14 项目环保验收内容建议表

| 验收内容        | 验收要求   |
|-------------|--|
| 剂量限值        | 根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 和环评报告预测, 公众、职业照射剂量约束值执行 0.1mSv/a 和 2mSv/a。  |
| 剂量当量率       | 各治疗室外 30cm 处周围剂量当量率应不大于 2.5 $\mu$ Sv/h。  |
| 电离辐射标志和中文警示 | 机房防护门口设置放射性警告标志和中文警示说明, 设置工作状态指示灯。   |
| 布局和屏蔽设计     | 辐射工作场所建设和布局与环评报告表描述内容一致。屏蔽墙和防护门的屏蔽能力满足辐射防护的要求。   |
| 辐射安全设施      | 设备由密码或者钥匙启动; 加速器机房辐射安全与防护措施有分区管理、实体屏蔽、放射性警告标识和中文警示说明、工作状态指示灯、急停按钮、门机安全联锁系统、防护门防夹功能、辐射剂量监测和报警系统等, 可有效防止职业和公众受到意外照射。后装机机房还具有安全防护联锁系统和自动回源检测指示等故障检查和保护系统; 设备配套有模拟源与真源双重驱动系统, 还配备有不间断自动供电系统。 |
| 监测仪器        | 通州院区放射治疗中心每间治疗室均配置 1 台固定式剂量率仪 (共计 4 台), 每间机房配置 2 台个人剂量报警仪 (共计 8 台), 通州院区放射治疗中心配套 1 台便携式 X- $\gamma$ 剂量率仪。医院为每位辐射工作人员配备个人剂量计 1 套。   |
| “三废”处置设施    | 制定有退役放射源处理方案。  |
| 规章制度        | 已经制定有各项安全管理制度、操作规程、工作人员考核计划等。辐射安全管理制度和操作规程得到宣贯和落实。   |
| 人员培训        | 辐射工作人员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。  |
| 应急预案        | 辐射事故应急预案符合工作实际, 应急预案明确了的应急处理组织机构及职责、处理原则、信息传递、处理程序和处理技术方案等。配备必要的应急器材、设备。针对使用放射性同位素过程可能存在的风险, 建立应急预案, 落实必要的应急装备。进行过辐射事故 (件) 应急演练。   |

## 表 12 辐射安全管理

### 12.1 辐射安全与环境保护管理机构的设置

#### 12.1.1 辐射安全管理小组

医院设立了辐射防护领导小组，并指定了专人负责辐射安全与环境保护管理工作，现有的人员构成具体情况见表 1-5 所示。辐射防护领导小组的职责：

1. 在医院辐射防护领导小组组长、副组长的领导下，负责本医院辐射安全防护的管理工作。
2. 贯彻执行国家、北京市政府部门有关法律、法规、规章、相关标准及有关规定。负责对本医院相关部门和人员进行法律、法规及相关标准的培训、教育、指导和监督检查等工作。
3. 制定、修订本医院辐射安全防护管理制度及仪器设备操作规程。
4. 制定、修订辐射事故应急预案，配备相应的事故处理物资仪器、工具，一旦发生辐射意外事故或情况，在辐射防护领导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

通州院区放射治疗中心拟新增 25 人，其中医师 7 名，物理师 5 名，技师 12 名、护士 1 名，新增的辐射工作人员将在生态环境部培训平台报名参加并通过辐射安全和防护考核，经过考核合格后持证上岗，单位将定期组织辐射工作人员每 5 年一次的重新考核，考核合格后方可继续从事辐射工作，同时按照国家相关规定进行个人剂量监测和职业健康检查，建立个人剂量档案和职业健康监护档案，并为工作人员保存职业照射记录。

## 12.2 辐射安全管理规章制度

北大人民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》《人员培训考核计划》《监测方案》等。医院将完善加速器操作规程、监测方案等辐射安全管理制度，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

北大人民医院已制订了医院有关辐射工作人员个人剂量监测的管理要求，并将辐射工作人员个人剂量监测工作作为全院辐射监测计划体系的管理目标之一，要求全院辐射工作人员按要求接受个人剂量监测，并建立相应的个人剂量监测档案。

全院辐射工作人员的个人剂量监测工作已委托北京市疾病预防控制中心承担，监测频度为每3个月检测一次。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。

本项目投入使用后，所涉及新增辐射工作人员将办理个人剂量监测。

### 12.3.2 工作场所和辐射环境监测

根据原环保部18令的要求，北大人民医院委托有资质单位每年对工作场所进行1次辐射水平监测。此外，每年使用便携式剂量率仪开展2次自行监测，建立辐射环境监测记录，包括测量位置、测量条件、测量仪器、测量时间、测量人员和剂量率数据等内容。

北大人民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，新增1台便携式X- $\gamma$ 剂量率仪。能够满足通州院区放射治疗中心辐射防护和环境保护的要求。对拟建辐射工作场所进行监测，本项目自行监测方案如下。

- (1) 监测项目：X、 $\gamma$ 剂量率水平
- (2) 检测设备：X- $\gamma$ 辐射剂量率仪
- (3) 检测频次：剂量率水平每年自行检测2次。

本项目涉及工作场所的监测布点：监测点位如图 12-1，主要是加速器机房的周边、楼上、特别是控制室和防护门处，点位及频次设置见表 12-1。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。

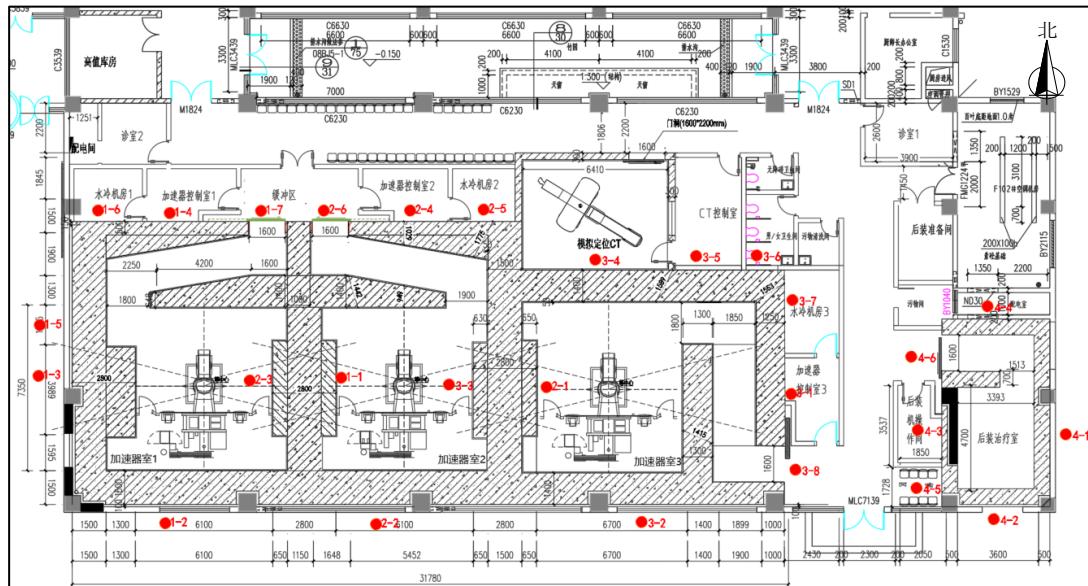


图 12-1 监测点位平面图

表 12-1 各治疗室监测计划

| 场所     | 测点编号 | 位置描述       | 检测频次  |
|--------|------|------------|-------|
| 加速器室 1 | 1-1  | 东墙加速器室 2   | 2 次/年 |
|        | 1-2  | 南墙楼外绿地     | 2 次/年 |
|        | 1-3  | 西墙楼外通道     | 2 次/年 |
|        | 1-4  | 北墙加速器控制室 1 | 2 次/年 |
|        | 1-5  | 西墙次束墙楼外通道  | 2 次/年 |
|        | 1-6  | 北墙水冷机房 1   | 2 次/年 |
|        | 1-7  | 北墙门外缓冲区    | 2 次/年 |
| 加速器室 2 | 2-1  | 东墙加速器室 3   | 2 次/年 |
|        | 2-2  | 南墙楼外绿地     | 2 次/年 |
|        | 2-3  | 西墙加速器室 1   | 2 次/年 |
|        | 2-4  | 北墙加速器控制室 2 | 2 次/年 |
|        | 2-5  | 北墙水冷机房 2   | 2 次/年 |
|        | 2-6  | 北墙门外缓冲区    | 2 次/年 |

|        |     |             |       |
|--------|-----|-------------|-------|
| 加速器室 3 | 3-1 | 东墙加速器控制室 3  | 2 次/年 |
|        | 3-2 | 南墙楼外绿地      | 2 次/年 |
|        | 3-3 | 西墙加速器室 2    | 2 次/年 |
|        | 3-4 | 北墙模拟定位 CT 室 | 2 次/年 |
|        | 3-5 | 北墙 CT 控制室   | 2 次/年 |
|        | 3-6 | 北墙卫生间       | 2 次/年 |
|        | 3-7 | 东墙次束墙水冷机房 3 | 2 次/年 |
|        | 3-8 | 门外走廊        | 2 次/年 |
| 后装治疗室  | 4-1 | 东墙楼外绿地      | 2 次/年 |
|        | 4-2 | 南墙楼外绿地      | 2 次/年 |
|        | 4-3 | 东墙后装机操作间    | 2 次/年 |
|        | 4-4 | 北墙配电室       | 2 次/年 |
|        | 4-5 | 西墙候诊区       | 2 次/年 |
|        | 4-6 | 门外走廊        | 2 次/年 |

## 12.4 辐射事故应急管理

北大人民医院制定了《北京大学人民医院辐射事故应急制度》，依据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的要求，一旦发生辐射事故时，能迅速采取必要和有效的应急响应行动，妥善处理，保护工作人员和公众的健康与安全，同时在应急预案中进一步明确规定处理的组织机构及其职责分工、事故分级、应急措施、报告程序、联系方式等内容，能够满足医院实际辐射工作的需要。

发生辐射事故时，应当立即启动本单位的辐射事故应急方案，采取必要防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生健康行政部门报告。医院将每年至少组织一次应急演练。

### 表 13 结论与建议

#### 13.1 结论

##### 13.1.1 正当性分析

随着肿瘤病患的日益增加,为了满足通州地区肿瘤患者的就医需求,医院拟对通州院区行政科研楼一层的多功能厅进行改建,建设成通州院区放射治疗中心,放射治疗中心的建设可以提高医院对疾病的诊治能力,医用加速器适应症广泛,可用于头颈、胸腔、腹腔、盆腔、四肢等部位的原发或继发肿瘤,以及手术后残留的术后或手术前的术前治疗等。直线加速器设备运行不产生放射性“三废”,对周围环境的辐射影响也很小,对职业人员、公众移机环境带来的不利影响,远低于其使用对社会带来的利益,故该核技术应用项目具有正当性和必要性。

##### 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辐射源项的性能和特点、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) 根据场所周围关注点辐射剂量估算结果可知,本项目运行后,预计工作人员和公众的年有效剂量均低于相应剂量约束值(2mSv、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。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况,单位应该进行调查并报生态环境部门备案。通过对治疗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  $2.5\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。

(2) 本项目运行过程中,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:治疗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、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: 医院设有辐射安全与环境保护管理机构, 负责全院的辐射安全管理和监督工作。医院将根据本次所申请项目种类制定健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、人员培训考核计划、健康体检制度、辐射事故应急预案和设备检修维护制度等, 以满足辐射安全管理的要求。

#### 13.1.4 结论

综上所述, 北大人民医院通州院区新建放射治疗中心项目, 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, 北京大学人民医院承诺:

- (1) 妥善处理群众信访和投诉, 做好公众宣传、解释和沟通工作;
- (2) 严格按照工程设计施工, 保证工程建设质量。
- (3) 严格按照辐射监测方案定期对辐射工作场所和参与辐射工作的工作人员进行监测, 并将监测记录保存留档;
- (4) 项目竣工后按照生态环境主管部门规定的标准和程序, 对配套建设的环境保护设施进行验收, 编制验收报告, 并接受生态环境主管部门的监督检查。
- (5) 在辐射项目运行中决不容许违规操作和弄虚作假等现象发生, 如若发现相关现象接受相关处理。对于辐射工作人员年受照剂量异常情况, 医院进行调查并报生态环境主管部门备案。

表 14 审 批

下一级环保部门预审意见:

公 章

经办人

年 月 日

审批意见:

公 章

经办人

年 月 日