

核医学病房建设中的辐射防护体系构建与实践

赵保尊

郓城县人民医院 山东郓城 274700

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18524

[摘要] 核医学病房是放射性药物诊疗的核心场所,其辐射防护体系的科学性直接关系到医护人员、患者和公众的健康安全。本文根据核医学诊疗技术的发展趋势,从防护体系的核心框架入手,提出“源头管控-过程阻断-末端监测”三维防护理念,重点阐述选址规划、屏蔽设计、流程优化、智能监测等环节的实践要点。采用新型屏蔽材料应用、AI智能辐射监测系统等的新技术来创建全链条、精细化的辐射防护体系。实践证明该体系可以有效地降低辐射暴露的风险,提高病房的运行安全性,给核医学病房的标准化建设提供理论支持和实践参考。

[关键词] 核医学病房; 辐射防护; 体系构建; 智能监测; 屏蔽设计

引言:

随着精准医疗理念的深入,核医学诊疗技术因为具有诊断和治疗的双重功能,在肿瘤、心血管疾病等领域的使用也越来越广泛。核医学病房是放射性药物使用、患者留观的特殊场所,辐射源种类多、暴露场景复杂,辐射防护水平成了制约诊疗质量提升的重要因素。目前传统辐射防护模式存在着设计碎片化、监测滞后性、管理粗放化等问题,不能满足新型核医学技术的应用需求。因此,建立系统化、智能化、全流程的辐射防护体系,就成为核医学病房建设的主要任务。本文以病房建设全周期为出发点,探究辐射防护体系的构建逻辑与实践路径,试图弥补传统防护体系的不足,给核医学诊疗安全水平的提高提供新的解决办法。

一、核医学病房辐射防护体系的构建逻辑与核心框架

1.1 构建逻辑:基于风险分级的全周期防护理念

核医学病房的辐射风险主要来自于放射性药物的制备、给药、患者代谢和废弃物排放的全过程,各个环节的辐射强度、影响范围存在较大的差别。因此辐射防护体系的建立要遵循风险分级、精准防控、全周期覆盖的基本逻辑,以辐射防护最优化(ALARA)原则为指导,结合病房建设的规划、设计、施工、运营等各个阶段,确定各个阶段的防护重点和技术要求。规划阶段重点做辐射环境本底调查和风险预评估,

给选址、布局设计提供依据;设计阶段重点做屏蔽防护和流程优化,从源头降低辐射泄漏风险;施工阶段重点做材料质量管控和施工工艺监督,保证防护设施达标;运营阶段建立动态监测和应急响应机制,实现风险的实时管控。全周期防护理念冲破了传统“重设计,轻运营”的局限,创建起“事前预防,事中控制,事后处置”的闭环防护逻辑。

1.2 核心框架:“源头管控-过程阻断-末端监测”三维体系

根据以上构建逻辑,本文提出源头管控、过程阻断、末端监测三维辐射防护体系,各个维度互相支撑、互相配合,实现辐射风险全链条防控。源头管控维度主要是放射性药物的全流程管理及病房布局的改善,从药物制备、储存、转运等环节入手,对病房的功能分区进行优化,从源头上降低辐射源的扩散风险;过程阻断维度以屏蔽防护为主,结合个人防护和操作规范,形成物理屏蔽和人为管控双重防线,阻断辐射的传播途径;末端监测维度依靠智能监测技术,对环境辐射、个人剂量、废弃物辐射水平实施实时监测并进行数据溯源,给防护效果评价和风险预警赋予数据支撑。三维体系包含辐射产生、传播、影响的全部链条,又考虑到了技术防护和管理防护两个方面,形成了系统的防护体系。

二、核医学病房辐射防护体系的关键构建环节与技术创新

2.1 源头管控:基于功能分区的布局优化与药物管理

病房布局优化属于源头管控的关键部分,它的主要目的就是经由合理划分功能区域,缩减辐射源同非辐射区域的交叉污染。根据核医学诊疗流程,将病房分为放射性药物制备区、给药区、患者留观区、检查区、废弃物处理区、医护人员办公区等功能区,各个区域分别设置独立的通风系统和通道,实现人流、物流、信息流的隔离。放射性药物制备区、给药区属于高辐射风险区域,应设在病房的下风向,远离办公区、居民区,增加与相邻区域的安全距离。在布局设计中使用BIM(建筑信息模型)技术,用三维建模模拟不同的布局方案下辐射扩散路径,优化功能区域的空间布局,保证各个区域的辐射水平符合GB 18871-2002电离辐射防护与辐射源安全基本标准。

放射性药物全流程精细化管理是源头管控的又一重要内容,直接决定辐射源扩散风险防控的效果。因此要建立包含RFID射频识别技术的药物制备、储存、转运、使用、回收全流程追溯体系,实现药物全生命周期可追溯、可管控。储存环节使用带有智能温控、湿度调节、权限分级管理的专用储存柜,用指纹或者密码验证授权开启,实时记录存取人员、时间、剂量信息,从根本上防止药物丢失、误取、错用;转运环节使用符合防护标准的铅屏蔽转运箱,箱内配备微型辐射剂量监测模块,规划独立封闭的专用转运通道,避免与医护、患者通道交叉,实时同步转运过程中的辐射水平数据,保证异常时可以快速处置;给药环节推广应用自动化精准给药设备,通过机械臂完成药物抽取和注射,最大限度减少医护人员与放射性药物的直接接触,显著降低个人剂量暴露风险。另外,创建以患者体重、病情分期、诊疗方案为基础的放射性药物使用量动态评价体系,依照核医学诊疗指南精确计算给药剂量,既保证诊疗效果又防止由于药物用量过大造成的辐射风险增加^[1]。

2.2 过程阻断:新型屏蔽材料应用与个性化屏蔽设计

屏蔽防护是过程阻断的主要技术手段,屏蔽防护的效果直接影响辐射泄漏风险的高低。传统的屏蔽材料以铅为主,但是铅存在重量大、环保性差等缺点,不能满足现代核医学

病房的建设要求。

根据辐射源的特性进行个性化的防护设计,可以提高防护的效果。不同的核医学诊疗项目所用的放射性药物种类不同,其辐射能量、半衰期也不同,对屏蔽材料的要求也不同。因此在屏蔽设计之前,需要根据病房开展的诊疗项目来确定辐射源的主要参数,用蒙特卡洛模拟的方法计算出各个区域所需要的屏蔽厚度和材料种类。对于使用¹³¹I治疗的病房,由于¹³¹I的 γ 射线能量较低,可以采用钨基复合材料作为屏蔽材料,厚度控制在5mm就可以满足防护要求;对于使用^{99m}Tc进行诊断的区域,由于辐射强度较低,可以采用铅硼聚乙烯复合材料,厚度控制在3mm即可。个性化的屏蔽设计既可以保证防护效果,又可以避免过度防护造成的建设成本增加^[2]。

2.3 末端监测:智能监测系统的构建与应用

末端监测是评估辐射防护效果、实现辐射风险提前预警的关键环节,监测的及时性和全面性直接决定了防护体系的闭环管控效能。传统的辐射监测模式大多采用人工定期巡检、定点采样检测的方式,存在监测周期长、数据滞后性明显的问题,不能实现对病房角落、转运通道等重要区域的全面监测,容易产生辐射防护盲区。本文根据目前的现状,创建出基于AI技术的智能辐射监测系统,将高灵敏度的探测技术同物联网传输技术融合起来,从而对病房环境辐射剂量、医护人员个人剂量、放射性废弃物辐射水平等各方面进行全方位、实时动态的监测。该系统主要由分布式环境辐射监测终端、可穿戴个人剂量监测终端、废弃物专用监测终端、云端数据管理平台组成,各个终端之间采用5G物联网技术实现监测数据的毫秒级实时传输和多端共享,给防护效果评价和风险精准预警提供坚实的数据支撑。

环境辐射监测终端使用高灵敏度的闪烁体探测器,可以实现 γ 射线、 β 射线的同步监测,布置在药物制备区、患者留观区、通道口等重要位置。终端实时采集辐射剂量率数据,用AI算法分析数据,当剂量率超过预设阈值时,系统就发出声光报警,将报警信息推送给医护人员的移动终端。个人剂

量监测终端是智能手环式设备, 戴在医护人员手腕上, 对医护人员的累积剂量进行实时监测, 当医护人员的累积剂量接近限值时发出报警, 记录医护人员工作轨迹及剂量暴露情况, 给医护人员剂量评价提供数据。废弃物监测终端设置在废弃物处理区, 监测放射性废液、固体废物的辐射水平, 保证废弃物处理达到环保要求。数据管理平台将各个终端采集的数据汇总、分析、存储, 生成辐射监测报告, 给防护体系的优化提供数据支持^[3]。

三、核医学病房辐射防护体系的实践应用与效果评估

3.1 实践案例: 某三级医院核医学病房建设项目

为了检验本文所建立的辐射防护体系的可行性与有效性, 选取某三级医院核医学病房建设项目作为实践案例, 用上述三维防护体系开展病房建设。该病房建筑面积约 800 m², 主要做肿瘤核医学诊断和治疗, 用的放射性药物有 ¹³¹I、^{99m}Tc 等。建设过程中以源头管控、过程阻断、末端监测为三维框架来进行布局优化、屏蔽设计和智能监测系统的布置。

源头管控, 用 BIM 技术优化功能分区布局, 将药物制备区、给药区设于病房北侧下风向, 与医护办公区保持 15m 以上安全距离, 配备专用转运通道和智能药物储存柜; 过程阻断, 根据不同诊疗区域的辐射风险, 采用铅硼聚乙烯、钨基复合材料等新型屏蔽材料, 用蒙特卡洛模拟确定屏蔽厚度, 如患者留观室墙体用 8mm 厚铅硼聚乙烯复合材料, 药物制备区墙体用 10mm 厚钨基复合材料; 末端监测, 部署 12 个环境辐射监测终端、20 个人剂量监测手环及 2 个废弃物监测终端, 构建智能监测数据平台, 实现辐射数据的实时监测与预警。

3.2 效果评估: 辐射水平与运营效率双维度验证

对病房建设完成后辐射水平和运行效率进行监测评价, 检验防护体系的应用效果。辐射水平监测结果表明, 各功能区域的环境辐射剂量率均满足 GB 18871-2002 标准要求, 药物制备区最大辐射剂量率为 0.3 μSv/h, 患者留观区最大辐

射剂量率为 0.1 μSv/h, 医护办公区辐射剂量率小于 0.05 μSv/h, 比传统防护体系下辐射水平降低 40% 以上。医护人员个人累积剂量平均为 0.2mSv/年, 远低于国家规定的 20mSv/年限值, 个人剂量暴露风险明显降低。

运营效率评估结果表明, 智能监测系统的使用使辐射监测效率提高了 60% 以上, 实现了辐射风险的实时预警, 累计避免了 3 起由于操作不规范造成的辐射泄漏隐患。新型屏蔽材料的应用使病房主体结构荷载减少 30%, 建设成本较传统方案降低 15%。放射性药物全流程追溯体系的应用使得药物管理的规范化程度提高, 药物浪费率降低 25%, 运营成本也得到进一步优化。从以上结果可以看出, 本文建立的辐射防护体系可以提高核医学病房的辐射防护水平, 也可以提高运营效率, 有较好的实践价值。

四、结论

核医学病房辐射防护体系的创建是保证诊疗安全的主要任务。本文提出的源头管控、过程阻断、末端监测三维防护体系, 利用 BIM 技术、新型屏蔽材料、智能监测系统等新的技术手段, 对辐射风险实行全链条、精细化的防控。从实践案例中可以发现, 该体系可以降低病房环境辐射水平和医护人员个人剂量暴露风险, 还可以提高运营效率, 具有较好的实践意义。未来依靠加强新型技术的研发应用和标准化建设, 可以进一步完善辐射防护体系, 给核医学诊疗技术的安全发展提供有力的保障。

[参考文献]

- [1] 张悦. 智能机器人在核医学科辐射防护和感染控制方面的应用效果评价[D]. 内蒙古医科大学, 2024.
- [2] 周秀娟, 王桂丽. 核医学科核素治疗病房的辐射防护及管理探析[J]. 临床医药文献电子杂志, 2020, 7(33): 190+192.
- [3] 朱明霞, 崔盈盈. 核医学防护病区的建立与管理[J]. 海南医学, 2020, 31(01): 134-136.