

湖北省医用加速器的屏蔽防护

谢 华, 范辉堂, 房晓光

中图分类号: R142 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2006)04-0430-03

【摘要】 目的 了解分析湖北省医用加速屏蔽防护情况, 为以后的防护工作提供参考。方法 对湖北省各台医用加速器的屏蔽厚度及防护效果进行调查、检测和分析。结果 湖北省各医用加速器的防护效果均符合国家标准的要求, 屏蔽厚度有较大差别。结论 部分机房的屏蔽厚度偏厚, 建议对现行防护体系进行修订, 并加强加速器建设项目管理, 提高相关机构和人员的能力水平。

【关键词】 医用加速器; 屏蔽; 防护

放射治疗已成为恶性肿瘤治疗中的主要手段之一, 随着放射设备的改进和对放射物理特性的了解, 加上放射生物学、肿瘤学以及其他学科发展的促进, 使放射肿瘤学不断发展。放射治疗在肿瘤治疗中的地位愈加重要。60%~70%的肿瘤病人在病程的不同时期需接受放射治疗^[1]。而医用电子直线加速器因其体积小、重量轻、维护简便, 现代放射治疗最主要的使用最多的装置。因此一般人们提到医用加速器实际上就是指医用电子直线加速器。医用直线加速器已不仅成为医用加速器而且成为整个放射治疗装置的代表。在中国目前, 医用加速器基本上都是指医用电子直线加速器^[2]。利用医用加速器进行放射治疗工作, 作为一项正当的并已经采纳的实践, 应该考虑如何最好地利用资源来降低对个人和公众的辐射危险。应使加速器的防护最优化, 使得在考虑了经济和社会因素之后中, 个人受照剂量的大小、受照射的人数以及受照射的可能性均保持在可以合理达到的尽量低水平。经对湖北省在用加速器的屏蔽防护情况进行调查, 为医用直线加速器的屏蔽防护最优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 调查范围 湖北省境内除除军队系统外的所有在用的加速器。全省目前在用的共有 40 台医用加速器, 除一台用于 PET 中核素生产的回旋加速器外, 其余的医用加速器都是医用直线加速器。本研究仅限于 39 台医用直线加速器的放射防护。

1.2 调查项目及指标 各加速器机房屏蔽防护厚度, 包括主防护墙和副防护墙的混凝土屏蔽防护厚度、各加速器机房防护门所含铅的厚度。各加速器机房的屏蔽防护效果, 包括主防护墙、副防护墙和防护门外的空气比释动能率。

1.3 资料来源 对湖北省所有在用加速器进行现场调查与检测。各加速器机房的防护屏蔽情况, 以查阅建设资料为主, 辅

以现场测量; 加速器的防护效果, 依据进行现场检测结果。主要检测设备为 451P-DE-SI 巡测仪(编号: 6299, 经湖北省计量测试研究所检定)。

2 结果与分析

2.1 加速器屏蔽防护材料 医用直线加速器的设在加速器机房内, 产生的射线由机房的四面墙体和机房顶完全包围, 不致射线外泄, 四面墙体和机房顶多数是采用混凝土建成, 机房留有迷道及迷道口的防护门供医务人员和病患出入, 防护门均以铅为防护材料。由于机房均设于建筑物的底层, 机房的下部可视为有无穷厚的防护屏蔽体。加速器的防护屏蔽体分为主防护和副防护, 主防护对应的是加速器可能直接照射的方位, 包括机房两面防护墙体的中间部分和机房顶的中间部分, 三处主防护呈“∩”形。相应的, 副防护对应的是加速器不可能直接照射的方位。因 E2 号加速器机房是由钴-60 治疗机房改建而成的, 是在原有混凝土屏蔽的基础上, 另加了一定厚度的铅来屏蔽射线的, 我省其余的加速器面房均采用混凝土进行屏蔽。射线在物质中是呈指数衰减的, 对能量不同的 X 射线来说, 其在物质中的衰减系数会有有所差别, 一般规律是: 能量越高, 衰减同样程度射线所需要的屏蔽体越厚, 但也有例外的特殊情况。在放射防护领域, 常采用屏蔽材料对辐射的十倍衰减厚度 TVT (Tenth-Value-Thickness) 来表达屏蔽厚度, 十倍衰减厚度表示将入射的 X 射线光子数减少到 1/10 的物质层厚度。比如, 对标准混凝土(密度为 2.35t/m^3)而言, 6MeV 的 X 射线的 TVT 为 340 mm, 15MeV 的 X 射线的 TVT 为 410 mm; 对铅(密度为 11.3t/m^3)而言, 6MeV 的 X 射线的 TVT 为 51 mm, 15MeV 的 X 射线的 TVT 为 55 mm^[3]。为便于比较, 文中各类屏蔽墙的防护厚度均以 TVT 的个数表达。

2.2 加速器屏蔽厚度以及防护效果 湖北省内的医用直线加速器共 39 台, 将其编号为 E1-E39, 其中, E1-E20 为进口加速器, E21-E39 为国产加速器。防护效果以对应点的空气比释动能率表达。湖北省医用直线加速器防护厚度与防护效果见表 1。

作者单位: 湖北省卫生厅卫生监督局, 湖北 武汉 430079

作者简介: 谢华(1970~), 男, 副主任技师, 从事放射卫生防护与管理工作。

参考文献:

- [1] 杨明理. 核工业铀矿冶系统职业外照射个人剂量监测[J]. 全国外照射个人剂量监测技术与管理研讨会会议论文集汇编.
- [2] 张良安, 高吉增, 潘自强. 全国职业照射基本状况分析[J]. 全国外照射个人剂量监测技术与管理研讨会会议论文集汇编.
- [3] 李琼, 陈祖云, 房晓光. 核电站反应堆在役检修人员个人剂量监测[J]. 中国辐射卫生, 2000, 9(2): 85.
- [4] 胡爱英. 我国个人剂量监测状况与质量管理[J]. 外照射个人剂量监测技术与管理研讨会会议论文集汇编.
- [5] GB18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].

(收稿日期: 2006-05-16)

4 小结

4 年来对我省承担核动力运行维护的 494 人进行了职业照射个人剂量监测, 其年人均有效剂量为 1.64 mSv , 该结果在核工业各个系统中属中间水平, 但高于全国平均水平 (1.10 mSv)^[4]。根据现场工作情况登记表和个人剂量监测结果分析, 在现场工作时间越长, 距离越近, 剂量水平也随之增高。由于核动力运行维护工作不是全年都进行, 全年最长工作时间不会超过 5 个月, 2004 年最高年有效剂量平均达 6.89 mSv , 也没有人达 10 mSv 的, 因此不会有人超过年有效剂量限值 (20 mSv , 5 a 平均)^[5]。

表 1 湖北省医用直线加速器防护厚度与防护效果							
编号	X 射线能量 (MV)	主防护		副防护		防护门	
		屏蔽厚度 (TVT 数)	空气比释动能率 ($\mu\text{Gy/h}$)	屏蔽厚度 (TVT 数)	空气比释动能率 ($\mu\text{Gy/h}$)	铅厚度 (mm)	空气比释动能率 ($\mu\text{Gy/h}$)
E1	15	5.85	0.15	3.54	0.15	10	0.32
E2	15	6.37	0.19	3.60	0.13	20	0.21
E3	15	5.85	0.10	3.54	0.14	10	2.3
E4	6	7.06	0.10	4.26	0.10	10	0.20
E5	6	6.17	0.08	3.68	0.08	10	0.26
E6	15	5.85	0.17	2.68	0.23	10	0.84
E7	15	6.34	0.96	3.66	0.15	14	1.13
E8	15	5.85	0.11	3.41	0.12	15	0.35
E9	15	5.85	0.11	3.41	0.12	10	1.1
E10	15	6.54	1.2	3.64	0.20	10	1.4
E11	15	7.07	0.53 ¹⁾	3.90	0.18	10	0.29
E12	15	5.85	0.09	3.41	0.20	15	1.2
E13	18	6.34	0.16	2.93	0.16	12	1.2
E14	6	5.88	0.10	2.94	0.19	5	0.19
E15	15	6.09	0.08	2.93	0.20	10	1.2
E16	10	5.64	0.10	2.82	0.17	10	0.48
E17	15	5.85	0.12	3.05	0.14	50	0.22
E18	15	5.85	4.2	3.41	0.18	10	1.4
E19	10	5.64	0.12	2.82	0.12	8	0.40
E20	15	5.36	0.12	4.39	0.23	15	0.23
E21	6	6.18	0.18	3.24	0.12	10	0.12
E22	6	6.47	0.12	3.53	0.09	6	0.08
E23	10	5.38	0.18	2.82	0.13	6	0.20
E24	10	6.15	0.04	3.85	0.15	6	0.46
E25	6	6.18	0.12	3.82	0.24	6	0.76
E26	4	7.27	0.14	3.64	0.13	4	0.91
E27	6	5.58	0.10	2.94	0.14	4	0.91
E28	6	6.47	0.14	3.53	0.16	6	0.23
E29	6	6.47	0.10	3.53	0.19	6	0.26
E30	4	6.18	0.08	3.27	0.17	3	0.77
E31	10	5.90	0.10	3.08	0.16	6	0.26
E32	6	6.47	0.15	3.53	0.16	6	0.24
E33	6	7.06	0.19	3.53	0.16	6	0.40
E34	6	6.47	0.12	3.53	0.10	6	0.10
E35	6	6.47	0.46	3.53	0.15	6	0.30
E36	6	6.47	0.17	3.53	0.08	6	0.12
E37	6	6.18	0.12	3.24	0.08	6	0.12
E38	6	6.47	0.12	3.53	0.16	5	0.18
E39	6	5.88	1.8	4.12	0.15	6	0.30

注:1)该机房建设过程中,防护墙体出现了裂缝,后采取了补救措施。

2.3 主防护 对公众而言,国家标准中的剂量限值是每年不超过 $1\text{mSv}^{[4]}$,按加速器的实际工作情况下最极端的工作安排,按上表中最大值 4.2 计算,考虑加速器每年工作 50 个星期,每星期工作 5 d 每天照 200 个野(这是不可能的,目前,我省加速器工作量最大的几个医院每天工作量也达不到),这 200 个野中朝向该主防护墙的占 $1/4$ (这是比较高的比例,因为加速器大多数是向下照的),每个野的照射时间为 1 min,这样算来,该主防护墙照射的总时间为 208 h,在这种情况下,如果有一个人在

这一年中,每天都在加速器工作的时候站在主防护墙的位置,其年剂量为 0.87mSv ,仍符合剂量限值的要求。上表中的检测值表明各加速器的主防护符合个人剂量限值的要求,所致有关人员的有效剂量将低于标准中的公众的个人剂量限值。表 1 中,各加速器机房的主防护厚度的 TVT 值平均值为 6.18 ± 0.45 。主防护墙外对应点空气比释动能率数值的平均为 $(0.33\pm 0.72)\mu\text{Gy/h}$,按 Grubbs 准则剔除 E18 对应点值 $4.2^{[9]}$,剔除 E18 后,平均值为 0.24 ± 0.35 。E18 对应点的剂量率值为 4.2,明显过高,但其屏蔽防护厚度(TVT 数)仍属适中,现场检测时怀疑其与施工质量有关,可能的情况包括混凝土密度偏低,防护屏蔽体裂缝、空洞等,但无法证实。以加速器机房的主防护厚度的 TVT 值平均值 6.18 为界,大于 6.18 的有 16 个,平均值为 6.61 ± 0.31 ,小于等于 6.18 的有 22 个,平均值为 5.88 ± 0.25 。将表中两组 TVT 值对应的空气比释动能率值(剂量率值)也分为 2 组,进行成组 t 检验,可得 $t=0.9167<t_{0.05,36}=2.028$ 因而不能认为两组剂量率值的差异有显著意义。也就是说,上表中虽然各加速器的防护厚度的 TVT 平均值相差为 0.73,占总厚度的 $11\%\sim 12\%$,对应的混凝土厚度差约 $0.25\sim 0.30\text{m}$,差别较大,但对应的剂量率值却无差别。

2.4 副防护 表 1 中,各加速器机房的副防护厚度的 TVT 值平均值为 3.43 ± 0.40 。以加速器机房的副防护厚度的 TVT 值平均值 3.43 为界,分为 2 组,大于 3.43 的有 22 个,平均值为 3.70 ± 0.26 ,小于等于 3.43 的有 17 个,平均值为 3.08 ± 0.25 ,将表中对应点空气比释动能率值(剂量率值),进行成组 t 检验,可得 $t=0.1820<t_{0.05,37}=2.026$ 因而不能认为两组剂量率值的差异有显著意义。也就是说,上表中虽然各加速器的防护厚度的 TVT 数平均值差 0.62,占总屏蔽厚度的 $17\%\sim 20\%$,对应的混凝土厚度约为 $0.21\sim 0.25\text{m}$,但对应的剂量率值却无差别。

2.5 防护门 对于 15 MV 及以上的加速器,防护门还应考虑对中子的防护,因各加速器均采用含硼的石蜡或聚乙烯材料进行防护,经检测均未检测出中子泄漏,且这类加速器的总量偏少,难以得出明确的结果,故未进行分析。加速器防护门外也属于公众,是属于比较特殊的公众,他们大多是与受照者或是受照者的陪同人员。加速器机房门均位于一个建筑内部,防护门外会通过走道与候诊处相联,不可能会有公众在此长期停留。加速器防护门外的射线剂量率当然与门的铅厚度有关,防护门中的铅会对门内的射线进行屏蔽,但也与加速器机房的设计有关。加速器防护门内的射线以散射线为主,其能量和剂量率受各种因素的影响会有所变化,应该考虑到,加速器防护门外射线的剂量率,也与防护门内的始剂量率和射线能量有关,在加速器本身的情况类似的情况下,防护门内的初始剂量率与迷道的设计有关,包括迷道内、外墙的厚度、迷道本身的长度、截面积等^[9]。可计算得出,从门外的空气比释动能率与时间考虑,这部分公众所受剂量将会很低,不可能达到公众的年剂量限值或陪同人员的限值。考虑极端情况,在一个病人受照期间,按 4 周计算,其陪伴人员每次都紧靠门停留半天,按 4h 计算,则共停留 80h,以表中测量值中最大值为基础,为 $2.3^{[4]}\mu\text{Gy/h}$,则该陪伴人员共受照剂量约 0.18mGy/h ,低于公众的剂量限值,约为陪护人员剂量限值(5mSv)的 $1/28$,符合标准的要求。对于 15 MV 的加速器,以防护门厚度为 10 mm 的为一组,与其他大于 10 mm 的防护门外的剂量率比较,10 mm 组的剂量率平均值为 $X(8)=1.1063\pm 0.6505$,大于 10 mm 组的剂量率平均值为 $X(6)=0.5567\pm 0.4745$,进行成组 t 检验,可得 $t=1.608<t_{0.05,12}=2.179$ 不能认为两组剂量率值的差异有显著意义,也就说明二者的防护效果并无差别。

2.6 防护效果的总体结果 我省的天然本底外照射剂量水平大多在 0.1 到 $0.2^{[4]}\mu\text{Gy/h}$ 之间,事实上,从对 39 台加速器机房的

防护检测效果来看(见表 2), 除了有 6 台加速器的主防护墙外的剂量明显超过天然本底水平, 其剂量率在 0.46 到 4.2 μ Gy/h 之间, 其他 33 台的检测结果在本底水平内, 副防护墙也是如此, 有 36 台在天然本底水平范围内, 也就是说, 我省医用直线加速器中, 占 85% 的加速器机房基本上未对防护墙外公众的射线环境造成影响。

表 2 防护墙与防护门屏蔽防护检测结果分布

测量点	$\leq 0.2\mu\text{Gy/h}$	$0.2\sim 0.4\mu\text{Gy/h}$	$> 0.4\mu\text{Gy/h}$
主防护墙外	33	0	6
副防护墙外	36	3	0
防护门外	9	15	15

3 讨论

3.1 防护效果与屏蔽防护厚度 现行放射防护体系保护的目的在于防止有害的确定性效应(非随机性效应)的发生, 限制随机性效应的发生率, 使之达到可以接受的水平。对于一项任何伴有辐射的实践来说, 放射防护的基本原则包括实践的正当性、个人剂量的限制和放射防护最优化。利用加速器进行放射治疗以挽救患者的生命, 其正当性已经得到社会和公众的认可; 从防护检测结果来看, 现有加速器对公众的防护效果均能达到基本标准中的有关公众的个人剂量限值的要求, 放射工作人员所受剂量, 无论是从现场的防护检测结果, 还是从工作人员的个人剂量监测结果来看, 均能达到基本标准中的要求, 低于目前的最优化值, 甚至比记录水平还低。而放射防护的最优化是指: 在付出的代价和所得净利益之间的多种方案进行权衡, 求得以最小的代价获得最大的净利益。对我省加速器应用中的放射防护最优化情况还需研究。我省加速器屏蔽主防护厚度 TVT 值为平均值为 6.18 以 6.18 为界分为 2 组, 可发现, TVT 平均值为 6.61 和 5.88 的 2 组屏蔽防护效果没有差别, 说明 TVT 值超过 5.88 并没有达到更好的防护效果, 属于不必要的投入; 同样, 加速器机房的副防护厚度的 TVT 值以平均值 3.43 为界, 虽然各加速器的防护厚度的 TVT 数平均值差 0.62 占总屏蔽厚度的 17%~20%, 对应的混凝土厚度约为 0.21~0.25m, 但对应的剂量率值却无差别, 防护门也是如此。这说明了我省医用直线加速器目前的屏蔽防护至少有一部分是偏厚的。几家进口加速器产商提供的参考文件, 其屏蔽防护厚度普遍比我省加速器的屏蔽厚度小, 比如 Elekta 公司 15MV 加速器机房参考图纸中的主防护为 1900mm 普通混凝土(密度为 2.35 t/m^3), 其对应的 TVT 值仅为 4.63, 副防护厚度为 1100 mm 普通混凝土, 其对应的 TVT 值为 2.68, 而我省的主防护厚度 TVT 值总体平均为 6.18, 副防护厚度 TVT 值总体为 3.43, 从另一个方面说明了我省加速器的屏蔽防护偏厚。

3.2 关于防护体系 加速器的屏蔽厚度偏大现行辐射防护体系有关, 这一防护体系包括三个基本原则: 对于涉及辐射照射的实践, 如果它对受照个体或社会产生的利益不足以抵消它所带来的危害, 则不应当采用(实践的正当性); 人所受的照射应当遵守剂量限值(个人剂量和危害限值); 所有的照射应当在考虑了经济和社会因素后保持在可以合理做到的尽量低的程度(防护的最优化)。现行辐射防护体系对工作人员和公众成员所受剂量的最小化具有很大的贡献, 但这个体系是建立在线性无阈假设的基础上的, 这个假定是 ICRP 根据当时的科学知识, 对随机性将效应作出的一个偏保守的、主要出于管理目的的假定^[7], 因为线性无阈意味着不管剂量多么小辐射总是有害的, 在这种情况下, 已经引起人们的“辐射恐惧”, 除了医疗上受照射的人群外, 普通公众成员和工作人员是不能够直接从照射中

受到直接利益的, 如果连极小的剂量也能引起健康危险的话, 人们当然不会自愿接受任何剂量, 会要求“零剂量”, 相应地, 防护的最优化也就难以实现, 不管辐射设施如何成功, 人们都是永远不会完全满意和放心的, 从而可能造成人们对屏蔽防护的期望值过高, 希望完全不受射线照射, 社会心理使得实践单位过度谨慎, 希望达到零辐射的效果, 社会心理也会影响了审管部门, 最优化的原则也难以在实际工作中确切表达, 可能会使审管部门无止境地要求把剂量水平降得很低, 造成审管部门的过度审管, 而形成社会资源的浪费。另一方面, 由于最优化原则, 也可能使审管部门在审管过程中造成实际防护设置的不公平。已有放射防护体系中应当引入“实际的”阈值或“事实上的安全剂量”概念, 实际的“阈值”可定义为某一剂量水平, 低于此剂量水平就不会诱发可观察到的放射所致的癌症或遗传效应, 而辐射照射应当保持在“实际的”阈值之下, 这种概念有部分国际放射防护组织和专家有所考虑^[8]。在这种概念下, 防护体系应就可能有所改变。

3.3 关于加速器建设项目的管理 坚持加速器建设项目的放射防护设施的设计审查和竣工验收制度, 同时, 加强技术服务机构能力建设, 提高人员水平, 在确保工作人员及公众的防护的同时避免浪费。

职业病防治法于 2002 年开始施行, 其中规定可能产生放射性职业病危害的建设项目的前期预防工作提出了要求。卫生部专门制定了建设项目职业病危害分类管理办法, 与职业病防治法同时施行, 其中把可能产生放射性职业病危害因素的列为严重职业病危害的建设项目, 实行最严格的管理, 要求进行可行性论证阶段职业病危害预评价的卫生审核、竣工验收时的职业病危害控制效果评价及职业病防护设施的卫生验收, 并另外要求应当进行设计阶段的防护设施设计的卫生审查。这种模式确保了加速器机房的屏蔽符合防护要求, 应继续坚持。卫生部现在正在对建设项目职业病危害分类管理办法进行修订, 其中把加速器仍列为严重职业病危害因素, 对加速器建设项目的要求仍未改变。

在实际工作中, 因直线加速器是一种特殊的建筑, 而建筑设计部门对放射防护知识的匮乏, 使得职业卫生技术服务机构往往提前介入建设项目的设计中, 因而, 可以在设计阶段对防护设计进行一些优化, 同时, 技术服务机构作为相应建设项目的放射防护预评价机构, 在建设项目的审查过程中作为审管部门的技术支撑, 对项目的审查结论起着相当重要的作用, 因而, 加强技术服务机构能力建设, 提高人员水平, 可以使加速器的屏蔽防护确保工作人员及公众的防护效果, 同时避免浪费。

参考文献:

[1] 汤钊猷. 现代肿瘤学[M]. 上海: 上海医科大学出版社, 第二版, 2000. 447.
 [2] 顾本广. 医用加速器[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 10—41.
 [3] 章仲侯. 放射卫生学[M]. 北京, 原子能出版社, 1985. 139—150.
 [4] GB18871—2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].
 [5] HJ/T61—2001, 辐射环境监测技术规范[S].
 [6] 陈敬忠, 龚怀宇. 医用电子加速器的防护[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001.
 [7] Dan Benison, Bo Lindell. The Linear Relationship[J]. 辐射防护, 1998, 18(5—6): 337—348
 [8] Masahito KANEKO. 放射防护体系的讨论[J]. 辐射防护通讯, 2005, 25(2), 62—67.

(收稿日期: 2006—04—18)