

PET/CT 职业照射的剂量估算与分析

彭建亮, 周晓剑, 李雪琴, 王晓涛, 陈栋梁

摘要: [目的] 介绍正电子发射型计算机断层显像(PET)/计算机断层扫描(CT)应用中职业照射剂量估算方法及辐射防护措施, 为评价和技术审评提供参考。[方法] 参照国际原子能机构(IAEA)58号技术文件和美国医学物理学家协会(AAPM)108工作组的报告, 以某医院PET/CT中心为例, 分析辐射源项和工作流程, 细化参数, 分别估算工作人员各操作岗位的年受照剂量, 结合轮岗情况给出年剂量。[结果] 该中心工作人员分装、注射、摆位和控制室操作等岗位的年受照剂量分别为0.06、0.14、7.00、0.36 mSv, 在轮岗情况下年受照剂量约为1.9 mSv, 手部当量剂量为340 mSv。[结论] 工作人员应实行轮岗制度, 加强分装、注射、摆位环节的辐射防护。

关键词: PET/CT; 职业照射; 剂量估算; 辐射防护

Estimation and Analysis of Occupational Radiation Dose from PET/CT PENG Jian-liang, ZHOU Xiao-jian, LI Xue-qin, WANG Xiao-tao, CHEN Dong-liang (Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China). Address correspondence to CHEN Dong-liang, E-mail: chendongliang@chinansc.cn • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract: [Objective] To describe a calculation method to estimate occupational radiation doses from positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) scanners and propose protective measures against radiation, and to provide references for evaluation and technique appraise. [Methods] According to the IAEA (International Atomic Energy Agency) Safety Report Series No.58 and the AAPM (American Association of Physicists in Medicine) Task Group 108 Report, a PET/CT center in a hospital was selected to identify radiation sources, diagnosis processes, and other relevant parameters. The annual exposure dose of staff at each operational location and of rotation staff were estimated. [Results] The annual doses of the staff at operational locations of packing, injection, positioning, and control room in the center were 0.06, 0.14, 7.00, and 0.36 mSv, respectively. The average dose for rotation staff was about 1.9 mSv. The hand equivalent dose was about 340 mSv. [Conclusion] A job rotation system should be implemented to the staff, and radiation protection should be strengthened in locations like packing, injection, and positioning.

Key Words: PET/CT; occupational radiation; dose estimation; radiation protection

根据我国相关法律法规要求, 正电子发射型计算机断层显像(PET)/计算机断层扫描(CT)使用前应当进行环境影响评价和职业危害评价, 在对职业人员造成的影响进行预测和评价时需进行剂量估算, 但在剂量估算中由于使用的方法不相同、参数不一致, 结果常有很大差异^[1-3]。本研究参照国际原子能机构(IAEA)58号技术文件和美国医学物理学家协会(AAPM)108工作组的报告^[4-5], 对某医院PET/CT中心工作人员接受的辐射剂量进行估算, 并分析辐射防护措施, 旨在为评价和审评人员提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

以某医院PET/CT中心为例, 其检查使用的核素为¹⁸F, 平均每天检查10人, 每年工作250d, 每位患者¹⁸F注射量按0.1 mCi/kg

考虑, 一般不超过370 MBq(10 mCi)。患者检查流程如下: 患者在注射¹⁸F药物后, 为了减少骨骼、肌肉吸收对诊断结果的干扰, 注射后在候诊室静候1h; 由于在注射¹⁸F 2h内, 注射量的15%~20%会转移至膀胱, 为提高诊断结果的准确性, 患者在进入检查室前需排空膀胱; 检查通常耗时30 min, 检查后在候诊室等候。药物分装过程在高活室通风橱(屏蔽厚度为40 mmPb)内进行, 每支的分装时间约1 min; 注射时采用注射车(屏蔽厚度为30 mmPb)进行防护, 屏蔽厚度为30 mmPb, 每次注射时间为30 s; 工作人员摆位的平均时长约6 min, 一天共1h; PET/CT检查室的屏蔽厚度为20 cm 砼, 操作位距患者的距离约3 m。

1.2 方法

工作人员的职业照射即在药物分装、注射、摆位和控制室操作等环节中受到药物或注射药物患者的直接照射或贯穿辐射, 分别估算各操作环节所受的年有效剂量, 相加后结合工作人员轮岗情况可确定年有效剂量。分装、注射环节有效剂量估算方法见公式(1), 摆位和控制室操作环节有效剂量估算分别见公式(2)、(3), 分装、注射环节中手部当量剂量估算见公式(4), 上述公式中各参数的涵义、取值或公式列于表1。其中,

DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2014.0090

[作者简介] 彭建亮(1978—), 男, 硕士, 工程师; 研究方向: 辐射安全审评; E-mail: pengjianliang@chinansc.cn

[通信作者] 陈栋梁, E-mail: chendongliang@chinansc.cn

[作者单位] 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082

K 值采用国际原子能机构 (IAEA) 58 号技术文件推荐值, 0.85 是指患者排空膀胱后体内剩余核素的份额。另外, 由于 ¹⁸F 半衰期较短 (*T*_{1/2} 为 110 min), 含源患者体内活度及对关注点的剂量率呈指数下降较快, 为提高估算结果准确性, 需考虑 *F* 和 *R* 两个因子 (表 1)。患者身体对药物产生的射线有吸收作用, AAPM108 工作组推荐患者的自吸收因子为 0.36^[5], ELSCHOT 等^[6]采用蒙特卡洛方法模拟计算的结果为 0.34, 但这些因子都是针对西方人种, 是否适用于中国人还有待验证, 因此从安全角度出发, 本次计算不考虑患者自吸收的影响。

$$E_{\text{分装、注射}} = (KABtN)/60r^2 \tag{1}$$

$$E_{\text{摆位、控制室}} = (0.85KAFBtN)/60r^2 \tag{2}$$

$$E = (0.85KA FRBtN)/60r^2 \tag{3}$$

$$D_{\text{手部}} = (KAtN)/60r^2 \tag{4}$$

表 1 各参数的涵义、取值或公式

参数	涵义	取值或公式
<i>E</i>	各操作岗位年有效剂量 (μSv)	—
<i>D</i>	手部当量剂量 (μSv)	—
<i>A</i>	患者注射量 (MBq)	370
<i>K</i>	剂量率常数 (μSv · m ² · h ⁻¹ /MBq)	0.147
<i>B</i>	屏蔽透射因子	*
<i>t</i>	单次操作时间 (min)	—
<i>d</i>	源与关注点之间的距离 (m)	根据实际情况取值
<i>F</i>	注射 <i>T</i> 时间后患者体内核素滞留的活度与 <i>T</i> 时段开始时体内活度的比值	$F = \exp(-0.693T/T_{1/2})$
<i>R</i>	<i>T</i> 时段内平均剂量率与该时段开始时剂量率的比值	$R = 1.443 \times (T_{1/2}/T) \times [1 - \exp(-0.693T/T_{1/2})]$
<i>N</i>	年检查人数	2500

[注]*: *B* 取值方法见下文。

¹⁸F 正电子湮灭产生的 511 keV 光子在铅、铁、砼中的透射因子, 根据 Archer 拟合的计算式给出^[7]:

$$B = [(1 + \beta/\alpha) e^{\alpha x} - \beta/\alpha]^{(-1/\gamma)} \tag{5}$$

式中, *x* 为屏蔽物质的厚度, 单位为 cm, α 、 β 、 γ 值列于表 2。

表 2 屏蔽透射因子计算参数

屏蔽物质	α (cm ⁻¹)	β (cm ⁻¹)	γ
铅	1.5430	-0.4408	2.1360
砼	0.1539	-0.1161	2.0750
铁	0.5704	-0.3063	0.6326

2 结果

2.1 工作人员年有效剂量

在年诊断量为 2500 例的情况下, 根据公式 (1)、(2)、(3) 计算出的分装、注射、摆位和控制室操作岗位的年有效剂量见表 3。

表 3 各操作岗位的年有效剂量

操作岗位	屏蔽	透射因子 (B)	操作时间 (min)	距离 (m)	年有效剂量 (mSv)	备注
分装	40 mm Pb	0.0024	1.0	0.3	0.06	由式 (1) 所得
注射	30 mm Pb	0.0114	0.5	0.3	0.14	由式 (1) 所得
摆位	1 mm Pb	0.8900	6.0	1.0	7.00	由式 (2) 所得
控制室	20 cm 砼	0.0904	30.0	3.0	0.36	由式 (3) 所得

根据上表结果结合工作人员的轮岗情况可确定年有效剂量。该中心有 4 名工作人员轮岗完成上述工作, 每名工作人员的年有效剂量约为 (0.06+0.14+7.00+0.36)/4=1.9 mSv。

2.2 手部当量剂量

保守考虑, 将含药物的注射器视为点源, 工作人员分装和注射操作中手部与注射器的距离为 5 cm, 则根据公式 (4) 计算出工作人员分装和注射过程中手部当量剂量分别为 906 mSv、453 mSv。在 4 人轮换操作的情况下, 每名工作人员平均手部当量剂量约 340 mSv。

3 讨论

经估算, 该 PET/CT 中心在现有工作量和条件下, 工作人员的年有效剂量和手部当量剂量分别为 1.9 mSv 和 340 mSv, 满足 GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》中关于职业照射剂量限值的要求。

由各操作岗位的年有效剂量可知, 工作人员在摆位环节受照剂量最大, 约占全部操作所受剂量的 93%, 这是由于摆位工作人员需要与含源患者近距离接触, 且通常的铅衣对 511 keV 光子的屏蔽效果不好, 如 1 mm 铅衣的屏蔽系数仅为 0.11。分装和注射环节采用铅屏等屏蔽措施后全身受照剂量较小, 但手部剂量较大, 距含 370 MBq 的 ¹⁸F 注射器 5 cm 处手部剂量可达到 22 mSv/h。鉴于以上两点, 工作人员轮岗或轮换操作是必要的, 以满足剂量限值的要求。

从工作人员各操作岗位剂量分布及手部当量剂量估算结果可知, 摆位过程中工作人员的外照射防护和分装、注射过程中的手部防护, 是 PET/CT 职业照射辐射防护的重点。根据外照射防护三原则, 工作人员摆位过程中应尽量使用扩音设备引导患者配合床前辅助摆位, 缩短操作时间, 并使用铅屏等屏蔽设施。分装时应尽量使用自动分装设备, 问询、解释、采血检验等工作尽可能在注射前完成, 减少与患者的接触时间, 注射时可使用带屏蔽的注射器, 并轮换操作, 分装和注射操作过程中应佩戴戒指剂量计, 定期监测。另外, 工作人员应加强培训, 提高各项操作的熟练程度, 以减少作业时间。

本次估算中未考虑和 PET/CT 的校正源和 CT 对工作人员产生的剂量。校正源不工作时处于装置屏蔽条件下, 工作时校正源接近探测器或模体, 源的射线几乎被其吸收; 根据 GBZ/T 180—2006《医用 X 射线 CT 机房的辐射屏蔽规范》, CT 机一般工作量下的机房屏蔽仅需 16 cm 砼或 2 mm Pb, 而 PET/CT 检查的患者数量少, 扫描参数 (kV/mA) 也低于通常诊断用扫描参数, 工作量较诊断专用 CT 小很多, 在针对 511 keV 光子的屏蔽条件下, PET/CT 产生的 X 射线对职业人员产生的剂量可忽略。

• 作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献:

[1] 杨晴, 王美霞. PET-CT 扫描诊断中职业照射与公众照射剂量估算[J]. 中国辐射卫生, 2011, 20(3): 319-320.
[2] 安晶刚. 正电发射断层成像仪中心的辐射防护屏蔽设计[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2005, 25(3): 272-273.
[3] VARGAS CASTRILLÓN S, CUTANDA HENRIQUEZ F. A study on

高低不但与探测器的选择和测读仪器有关,还与操作人员的素质和操作技能密切相关。操作人员应加强学习,积极参与比对和能力考核,不断提高整体素质和操作技能,抓好质量控制的每一个环节,确保实验室测量结果的准确可靠。另外还值得注意的是,2012 年由于比对方案中未告知射线的品种和能量,单项性能均为正误差,存在系统误差,因此在今后的比对工作中可购入鉴别式热释光个人剂量计,熟习相关性能,分出各个盲样组的射线品种和相关能量,提高检测能力。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献:

- [1] 于海涛,牛昊巍,孙全富,等.全国个人监测机构的现状分析[J].中华放射医学与防护杂志,2010,30(4):466-468.

- [2] 秦永春,余宁乐,杨小勇,等.2009 年参加全国个人剂量比对结果分析[J].中国辐射卫生,2011,20(4):425-426.
- [3] 中华人民共和国卫生部.GBZ 128—2002 职业性外照射个人监测规范[S].北京:法律出版社,2002.
- [4] 中华人民共和国卫生部.GBZ 207—2008 外照射个人剂量系统性能检验规范[S].北京:人民卫生出版社,2008.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局.JJG 593—2006 个人与环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量测量(装置)系统检定规程[S].北京:中国计量出版社,2006.
- [6] 胡爱英,徐辉,袁龙.全国外照射个人剂量计比对分析[J].中华放射医学与防护杂志,2007,27(4):387-389.

(收稿日期:2013-09-03)

(英文编辑:汪源;编辑:洪琪;校对:郑轻舟)

(上接第 399 页)

- occupational exposure in a PET/CT facility[J].Radiat Prot Dosimetry, 2011,147(1-2):247-249.
- [4] International Atomic Energy Agency. Radiation protection in newer medical imaging techniques: PET/CT[M].Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008.
- [5] MADSEN MT, ANDERSON JA, HALAMA JR, et al. AAPM Task Group 108: PET and PET/CT shielding requirements[J].Med Phys, 2006,33(1):4-15.

- [6] ELACHOT M, De WIT TC, De JONG HW. The influence of self-absorption on PET and PET/CT shielding requirements[J].Med Phys, 2010,37(6):2999-3007.
- [7] ARCHER BR, THORNBYS JI, BUSHONG SC. Diagnostic X-ray shielding design based on an empirical model of photon attenuation[J].Health Phys, 1983,44(5):507-517.

(收稿日期:2013-10-24)

(英文编辑:汪源;编辑:张晶;校对:洪琪)

【精彩预告】

上海市某区饮用水中三卤甲烷和卤乙酸含量分析及其健康风险评价

郝莉鹏,孙乔,刘晓琳,陆娟,詹铭,于娟,黄云彪

为了解上海饮用水中消毒副产物三卤甲烷和卤乙酸含量及其对人群潜在的健康风险,研究人员选取上海某区 5 家水厂出厂水,于 2012 年的 3、5 和 6 月份,2013 年的 3、5 和 8 月份以及 2014 年的 2 月份采集水样共 28 份,分别检测三卤甲烷和卤乙酸含量,结合风险评价模型对人群通过饮水途径暴露于三卤甲烷和卤乙酸进行健康风险评价。结果显示,出厂水消毒副产物检出浓度最高者为 D 水厂丰水期的氯仿($15.0\mu\text{g/L}$);最低者为 B 水厂枯水期的二氯乙酸(未检出);5 家水厂中氯仿浓度丰水期>枯水期,二溴一氯甲烷和溴仿浓度丰水期<枯水期;5 家水厂二氯乙酸和三氯乙酸浓度范围分别为未检出~ $5.00\mu\text{g/L}$ 和 $0.55\sim 8.25\mu\text{g/L}$,其中三氯乙酸浓度在丰水期略高于枯水期而二氯乙酸含量变化不大。经口致癌风险中二溴一氯甲烷居首位(最高为 2.90×10^{-5}),最低为氯仿(5.30×10^{-7})。除丰水期溴仿(风险范围 $5.30\times 10^{-7}\sim 1.10\times 10^{-6}$),五水厂两时期的二溴一氯甲烷、一溴二氯甲烷、二氯乙酸和三氯乙酸致癌风险范围在 $2.00\times 10^{-6}\sim 2.90\times 10^{-5}$,高于美国环境保护署给出的可接受最低致癌风险(10^{-6})。非致癌风险氯仿最高,其次为枯水期的二氯乙酸。经口致癌和非致癌风险均表现为时期和性别差异:枯水期>丰水期(5 家水厂氯仿和 B 水厂二氯乙酸和三氯乙酸的非致癌风险表现丰水期>枯水期),女性>男性。由此认为 5 家水厂饮用水中二溴一氯甲烷和一溴二氯甲烷的致癌风险最高,氯仿和二氯乙酸非致癌风险最高,且枯水期大于丰水期,在改善饮用水加工工艺时应重视长期暴露于饮用水中消毒副产物引起的潜在健康风险,并针对枯水期和丰水期的差异进行工艺调整,降低水中消毒副产物对人群的健康危害。

此文将于近期刊出,敬请关注!