

· 辐射剂量与辐射损伤 ·

核医学从业人员的职业暴露与放射防护

袁志斌 周志俊

【摘要】 职业暴露是指由于职业关系而暴露在危险因素中,从而有可能损害健康或危及生命的一种情形。该文介绍了有关职业暴露的基本概念以及核医学从业人员职业暴露的特点,并对国内外近年来迅猛发展的核医学诊疗趋势进行了分析。文章中对核医学外照射防护的三要素即时间、距离和屏蔽防护进行了重点描述,同时对孕妇胎儿、PET-CT 检查和低剂量辐射生物效应等近年来在辐射防护领域中的研究热点作了文献回顾。

【关键词】 核医学; 职业暴露; 辐射防护; 剂量效应关系; 辐射

Occupational exposure and radiation protection of nuclear medicine professional staffs YUAN Zhi-bin*, ZHOU Zhi-jun. *Department of Nuclear Medicine, Shanghai 6th People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200233, China

Corresponding author: ZHOU Zhi-jun, Email: zjzhou@shmu.edu.cn

【Abstract】 An occupational exposure occurs during the performance of job duties and may place a worker at risk of infection in terms of health or life. In this review the basic concept of occupational exposure and the characteristics of occupational exposure in nuclear medicine practice were introduced at first. And then introduced the global rapid trends in diagnostic and therapeutic nuclear medicine modalities applied in medical procedure. The external radiation protection in nuclear medicine practice mainly including time, distance and shielding were emphasized. Moreover, a literature retrospective review was undertaken focusing the hot topics in radiation protection fields, like pregnancy, fetal, PET-CT and radiation low-dose biological effects.

【Key words】 Nuclear medicine; Occupational exposure; Radiation protection; Dose-response relationship, radiation

自从 1895 年伦琴发现 X 射线后,射线被广泛应用于医学领域,包括 X 线诊断技术、X 线放射治疗、应用放射性核素释放的各种射线的核医学诊疗技术等。在这些射线技术广泛应用的同时,也带来了无数的生物不良反应,认识到这种因果关系后,与医学放射暴露危害相关的防护研究也受到了广泛关注。本文对核医学诊疗过程中核医学从业人员可能受到的放射职业暴露进行了综述,并且对防护手段也做了针对性的介绍。

1 核医学职业暴露

职业暴露是指由于职业关系而暴露在危险因素中,从而可能损害健康甚至危及生命的一种情形^[1]。暴露是流行病学中的一个专业术语,流行病学中的

暴露包括机体在外环境中接触的某些因素(化学、物理、生物学因素等)以及机体本身具有的特征(生物学、社会、心理特征等)。收集暴露信息的目的是:①评价暴露与疾病之间的联系;②估计致癌危险性评价中的阈效应;③评价暴露与疾病之间的时间关系(癌的始动与促进因子,累积暴露与癌,孕期暴露与致畸性);④在暴露率低的情况下(如职业人群),暴露评价尤为重要。

核医学从业人员的职业暴露主要来自工作中接触的放射性核素释放的各种射线,对健康可能造成损害,这种暴露与工作环境中使用的放射性核素种类以及工作性质,如药物制备、显像摄片、药物注射、核素治疗等相关,简单地说就是与受照剂量相关^[2-3]。放射环境下的职业暴露除射线外还有一个容易被忽视的方面——职业紧张。职业紧张是在职业条件下,环境和机体之间的相互作用在从业者个人需求、行为与环境压力产生不协调时导致的生理、心理和行为表现。职业紧张虽然不像生物、物

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2011.01.014

作者单位: 200233, 上海交通大学附属第六人民医院核医学科(袁志斌); 200032 上海, 复旦大学公共卫生学院职业卫生与毒理学教研室(周志俊)

通信作者: 周志俊 (Email: zjzhou@shmu.edu.cn)

理或化学因素那样引起特定的职业性疾病，却可以以非特异性的方式损害身体健康。职业紧张引起的多种相关疾病，不仅严重影响人们的身心健康，而且明显降低人们的脑力和体力作业能力，并导致严重的经济损失。孙小那、冀晓雨等^[4-5]运用Osipow^[6]于1998年研制的职业紧张量表，将放射性工作人员以及不接触放射性的工作人员作为对照组进行了相关的调查研究。该量表由3张问卷组成：职业任务问卷、个体紧张反应问卷和个体应对资源问卷，每一问卷由相应的项目组成，而每一项目又由相应的条目组成，根据得分高低评价职业紧张和紧张反应强度。同时，采用芬兰赫尔辛基职业卫生所制定的工作能力指数调查表，应用工作能力指数法来评价工作能力。结果表明，研究对象与对照组在职业紧张度上存在着显著差异，表明放射性工作是一种紧张的职业；而职业能力上差异不显著，笔者认为这可能与从业人员都接受过良好的职业教育有关。

2 国内外核医学诊疗现状

中华医学会核医学分会于2010年3月至8月进行了全国核医学现状普查^[7]，截至2010年7月31日，我国大陆地区共有核医学相关科室875个，共有6838人从事核医学工作，各种SPECT仪器555台，PET-CT仪器133台，回旋加速器72台。2009年，行SPECT检查者117.88万例，行PET检查者15.48万例，治疗甲亢患者17.18万人次、甲状腺癌患者1.43万人次、皮肤病患者15.59万人次、骨转移癌患者1.15万人次，摄碘率检测者33.79万人次，行肾图检查者5.38万人次，放射免疫检测1313.83万个标本，非放免检测3011.15万个标本。

从1982年起，日本同位素协会每隔5年对全日本的核医学状况进行一次普查，最近一次是2007年进行的^[8]，他们对1309家登记在册使用放射性核素的单位发出了问卷，其中，1219家使用核素进行体内检查，49家进行体外检测，212家行PET，最终回收得到1207张答卷。统计结果显示，1119家各类机构中安装了1569台SPECT，每年进行大约141万人次的检查；放射免疫分析年约1310万人次；放射性核素治疗并没有在日本广泛开展，年均治疗甲亢患者仅2373人次、甲状腺癌患者仅4146人次；PET检查在日本广泛开展，保守估计，2007年检查人次为40万。

从1950年起，美国公共卫生服务机构以及食品与药品管理局进行了多次全美国范围的医学放射性诊疗状况的调查^[9]，重在评估医学中使用的放射性诊疗方法对于公众以及专业从业人员带来的辐射安全问题(表1、表2)。联合国在2000年公布的统计数据中，天然本底辐射情况下，世界范围内人均辐射剂量为2.8 mSv^[10]。两个表格中的数据提醒核医学从业人员，在工作量逐年增加的情况下，科学地进行辐射防护是非常必要的。

表1 不同年份美国进行的核医学诊疗人次(万)

	1973年	1982年	2005年
骨扫描	12.5	181.1	345.0
心脏	3.3	95.0	980.0
肺	41.7	119.1	74.0
甲状腺	46.0	67.7	-
肾脏	12.2	23.6	47.0
胃肠道	53.5	160.3	121.0
脑	151.0	81.2	-
感染	-	-	38.0
肿瘤	1.4	12.1	34.0
其他	29.4	-	-
总计	351.0	740.0	1720.0

注：表中，“-”为未作详细统计。

表2 不同检查项目下核医学从业人员的受照剂量(mSv)

检查项目	年平均剂量(铅屏蔽)	年平均剂量(无铅屏蔽)
全身骨扫描	1.50	3.56
甲状腺	0.94	1.63
肾脏	0.33	0.53
^{99m} Tc-MIBI心脏	0.86	2.02
²⁰¹ Tl心脏	0.20	0.29

3 核医学辐射防护的几个基本问题

辐射防护的目的是防止有害的确定性效应，限制随机性效应的发生率，使之达到可以接受的水平，也就是使一切具有正当理由的照射保持在可以合理做到的最低水平。辐射防护的两大原则是实践的正当化(即确定放射诊疗是应该进行的)以及放射防护的最优化(即在确定放射诊疗是可行的前提下受照辐射剂量尽可能低)。核医学辐射有两个特点：①对患者主要是内照射，即放射性核素进入人体内产生的照射，对医务人员主要是外照射，即放射性核素从人体外发射的射线对人体产生的照射；

②由于放射性药物在体内的特殊分布，患者全身的受照剂量小，个别器官组织受照剂量高。

核医学从业人员要做好内、外照射的防护，实际工作中，内照射防护的要点就是采取一切切实可行的方法防止放射性核素进入人体内；经典的外照射防护三原则是时间防护、距离防护和屏蔽防护^[1]。

时间防护：暴露在放射环境中的时间越长，受照剂量就越大。剂量和剂量率是两个不同的概念，剂量指的是一段时间内接受到的总的电离辐射的量；剂量率指的是个人在特定的环境下一定时间内受到的电离辐射的量。这个概念必须牢记并且贯彻在核医学从业人员的实际工作中，应经常使用表面污染仪监测环境，使用剂量率仪测定各种环境实际工作状态下的剂量率，避免在高剂量率的环境中长时间的工作，即使是在低剂量率的环境中也必须避免任何私人活动的进行。时间防护是简单易行的减少放射暴露的方法。

距离防护：距离放射源越远，受到的辐射剂量就越小，剂量大小与距离的平方成反比。在工作中可以使用剂量率仪来巡查我们的工作场所，监测离开高活性区域不同的距离下实际的剂量率有多高，是否处于安全的位置。

屏蔽防护：屏蔽防护的方法很大程度上决定于到底是针对哪一种电离辐射，是 α 、 β 、 γ 、正电子、X射线，还是其中的组合，针对不同的电离辐射采取不同的防护方法。 α 射线一般是不需要屏蔽的，它的穿透能力非常弱，一张面巾纸或者皮肤都无法穿透，我们仅仅关心是否存在放射性核素进入体内；但是，它的传能线密度很高，可导致大量的细胞损伤。放射性核素进入体内的途径有3个：吸收、摄入和吸入，因此，核医学科的高活性工作场所内是禁止饮食、吸烟或化妆的。进行放射性操作时，必须佩戴手套、防护服以及其他个人防护用品，一旦皮肤发生放射性物质沾染，用洗手液等温和去污剂清洗后，再用大量水冲洗，严重的情况下，24 h 佩戴手套，通过出汗的方式将放射性物质带出皮肤外后再清洗。对 β 射线的防护我们要注意两点，其一， β 射线的穿透能力比 α 射线要强，行进的路径是“之”字状扭曲的，需要更加厚实的材料来防护；其二，如果用高原子序数的材料(如铅等)来防护 β 射线，要同时考虑韧致辐射的发生，可以采用树脂玻璃、玻璃和塑料等来防护。比

如，实际工作中核医学科经常使用的 ^{131}I ，其衰变过程中同时释放出 β 和 γ 射线，防护这种核素可以采用一种贴有塑料贴面的铅材料，可同时防护 β 射线和 γ 射线。 γ 射线的防护需要高原子序数的材料，其厚度取决于射线的能量以及这种材料的半值层，即将射线能量衰减一半的材料的厚度，一般10个半值层厚度的材料足够了。核医学常用的放射性核素、主要的 γ 射线能量以及防护材料铅的半值层见表3。

表3 核医学常用放射性核素及防护材料铅的半值层

核素	主要能量(keV)	铅的半值层(cm)
$^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$	140	~0.02
^{131}I	364	~0.30
^{133}Xe	81	~0.03
^{111}In	245	~0.10
^{137}Cs	662	~0.65
^{201}Tl	70	~0.03
^{125}I	35.5	~0.01

4 有关孕妇与胎儿的辐射防护

核医学从业人员如果怀孕，必须告知自己的部门领导以及同事，因为射线对孕妇和胎儿的影响非常大，后果非常严重，因此对于孕妇来讲，有足够的理由避免一切可能的射线辐射^[12]。在怀孕的前3个月，也就是胚胎发育的器官形成期，对辐射暴露是最为敏感的，因为大量的细胞分裂和干细胞发育都在此阶段发生。因此，一旦从业人员怀孕，必须采取一些有效的安全防护措施，孕妇必须穿着有足够铅当量厚度的围裙，衰减临床工作使用的放射性核素造成的辐射暴露至场所本底水平。例如，对于临床核医学上使用最多的放射性核素 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ ，围裙的铅当量厚度不得低于0.25 cm。放射防护的最优化以及外照射防护三原则，在理论和实践上都是行之有效的防护手段。在怀孕期间，所有的放射性核素治疗手段，如 ^{131}I 治疗等都是禁止的。

正电子显像的辐射防护存在一个特殊的问题：大多数铅围裙在511 keV的光子面前是无能为力的，射线的最大危害发生在截断位置上(即：射线与物质相互作用后能量急剧衰减的位置)，如果围裙的材料及其厚度不足够将射线衰减到本底水平，射线在孕妇体内与脏器相互作用而减速释放能量，

将会给孕妇带来更大的危害。因此，在胚胎发育的器官形成期内，应避免接触正电子射线。

怀孕以后监测胎儿的剂量也是必须的，测定的方法是使用胎儿全身剂量计，将其佩戴在孕妇腰部铅围裙里面。在怀孕的9个月中，暴露剂量不得超过500 cSv，如果在怀孕时就已达到了500 cSv，那么在接下来的时间内，累积剂量不得超过50 cSv，因为随着胎儿的不断生长，对辐射暴露的敏感性也随之下降。胎儿的辐射暴露会造成很多可能的不良反应，包括生长延迟、智力下降、神经系统发育缓慢以及各种重大器官畸形等^[13]。

5 关于 PET-CT 的辐射剂量和防护

PET 的临床应用价值已经得到了广泛认可，包括肿瘤诊断随访、脑功能研究以及心脏代谢显像等，PET-CT 的装机量和临床检查病例数也因此逐年迅速增加。然而这种趋势带来了一个严肃的问题：PET-CT 检查中 CT 的 X 射线与正电子衰变是不是给患者带来了双重的辐射暴露？Huang 等^[14] 研究了全身 PET-CT 的辐射剂量和带来的潜在致癌危险，他们采用 Alderson-Rando 模型和热释光剂量计来测量 CT 带来的辐射剂量，实验中模拟了 CT 的3种不同 CT 的采集条件，各种条件参数以及最终的有效剂量结果见表4；PET 的辐射剂量根据医学内照射剂量的程序进行理论计算得到，假设注射¹⁸F-FDG 的剂量为370 MBq，采集5个床位，每个床位2.75 min，整个检查大约需要20 min，理论计算得到单独 PET 的有效剂量为6.23 mSv；将 PET 的有效剂量与 CT 的有效剂量相加得到 PET-CT 的总有效剂量。结果，在3种 CT 采集条件下，PET-CT 的总有效剂量男性分别为13.65 mSv、24.80 mSv和32.18 mSv，女性分别为13.45 mSv、24.79 mSv和31.91 mSv，其中 CT 的贡献为54%~81%；采用终生归因危险来进行辐射致癌的评估，结果表明，对于20岁的女性，癌症发生率的终生归因危险值

为0.231%~0.514%，对于20岁的男性，该值为0.163%~0.323%；随着年龄增长，辐射暴露导致发生癌症的危险度下降。结论：PET-CT 检查伴随带来辐射剂量和癌症的风险，因此该项检查必须是临床需要的，并且应采取适当的措施来降低辐射剂量。

6 低剂量生物效应

受多种因素的影响，射线所引起的临床反应亦多种多样。射线对人体的损伤表现在受照者本身时称躯体 (本体) 效应，如影响到受照者后代则称遗传效应；按对受照者损伤的范围不同又可分全身效应 (如急、慢性放射病)、单一组织的效应 (如皮肤损伤、眼晶体损伤等) 和胎内照射的效应 (如胎儿畸型等)；若从射线作用于机体后产生效应的时间考虑，可分为近期效应和远期效应。根据国际放射防护委员会的新建议，将辐射生物效应分为随机效应和非随机效应。随机效应是指发生的概率 (而非严重程度) 与剂量的大小有关的效应，对于这种效应不存在剂量的阈值，任何微小的剂量也可引起效应，只是发生的概率极其微小。在辐射防护所涉及的剂量范围内，遗传效应和致癌效应为随机效应。非随机效应的严重程度则随着剂量的变化而改变，对于这种效应可能存在着剂量阈值。它是某些特殊组织所独有的躯体性效应，例如眼晶体的白内障、皮肤的良性损伤、骨髓内细胞的减少而致的造血障碍、性腺细胞的损伤所致生育能力的损害等。

核医学从业人员不可避免地暴露于慢性低剂量的电离辐射中，遗传效应一般出现在长期低剂量暴露后，包括染色体数量和结构上的变化以及基因变异，其个体差异取决于吸收剂量的不同。细胞核包含着重要的遗传物质，相比于细胞质而言对辐射更加敏感，辐射暴露后，细胞核的变化包括核膜的肿胀以及染色体的分裂。很多研究采用姊妹染色体交换和核仁来评价基因的损伤，Sahin 等^[15] 采用这两个监测指标研究了电离辐射对核医学从业人员的遗

表 4 PET-CT 中 CT 的不同采集条件对患者模型有效剂量的变化

方案	管电压(kV)	旋转时间(s)	层厚(mm)	螺距	管电流(mA)	男性有效剂量 (mSv)	女性有效剂量 (mSv)
A	120	0.5	0.625	0.984	100~300	7.42	7.22
B	120	0.5	0.625	0.984	200	18.57	18.56
C	140	0.5	0.625	0.984	150~350	25.95	25.95

传效应：分别在工作期间以及休假 1 个月以后采集每个研究对象的外周血样进行不同淋巴细胞的培养，用姊妹染色体交换和核仁来评价电离辐射对核医学从业人员的遗传效应，两次休假期间的职业暴露带来的辐射剂量为 1.20 mSv~48.56 mSv，结果表明，几乎所有研究对象在职业暴露期间的姊妹染色体交换值都要比休假后显著增高，同样，大部分研究对象的核仁值在职业暴露期间也比休假后显著增高，这表明大部分研究对象的遗传效应是可逆的，核医学从业人员的定期休假也是必须的。此项研究带来了另一个争论的焦点问题：是否存在一个使遗传效应变得不可逆转的辐射剂量的阈值？

7 结语

随着核医学诊疗手段的不断普及以及 PET-CT 等各种新方法的出现，核医学从业人员的职业辐射暴露问题也应该得到更多的关注。从目前的资料可得知，严格遵守放射防护的条例，核医学从业人员的职业辐射暴露仍然在安全可控的范围内。

参 考 文 献

[1] Linet MS, Kim KP, Miller DL, et al. Historical review of occupational exposures and cancer risks in medical radiation workers. Radiat Res, 2010, 174 (6): 793-808.

[2] Salvatori M, Lucignani G. Radiation exposure, protection and risk from nuclear medicine procedures. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2010, 37 (6): 1225-1231.

[3] Lundberg TM, Gray PJ, Bartlett ML. Measuring and minimizing the radiation dose to nuclear medicine technologists. J Nucl Med Technol, 2002, 30(1): 25-30.

[4] 孙小娜, 刘继文, 杨晓燕. 放射人员职业紧张水平和工作满意度的调查与分析. 新疆医科大学学报, 2007, 30(9): 958-960, 964.

[5] 冀晓丽, 谭卫国, 刘继文. 放射工作者职业紧张与工作能力关系的研究. 新疆医科大学学报, 2010, 33(9): 1052-1055.

[6] Osipow SH. Occupational stress inventory revised edition (OSI-R). 5th ed. Odessa: Psychological Assessment Resources, 1998, 24-25.

[7] 中华医学会核医学分会. 2010 年全国核医学现状普查. 中华核医学杂志, 2010, 30(6): 428-429.

[8] Kuwabara Y, Koizumi K, Ushijima Y, et al. Nuclear medicine practice in Japan: a report of the sixth nationwide survey in 2007. Ann Nucl Med, 2009, 23(2): 209-215.

[9] Mettler FA Jr, Bhargavan M, Faulkner K, et al. Radiologic and nuclear medicine studies in the United States and worldwide: frequency, radiation dose, and comparison with other radiation sources—1950-2007. Radiology, 2009, 253(2): 520-531.

[10] Fairlie I. Commentary on UNSCEAR 2006 Report: Annex C-the new effects of radiation. Radiat Prot Dosimetry, 2010, 138(2): 190-193.

[11] Bolus NE. Review of common occupational hazards and safety concerns for nuclear medicine technologists. J Nucl Med Technol, 2008, 36(1): 11-17.

[12] Buls N, Covens P, Nieboer K, et al. Dealing with pregnancy in radiology: a thin line between science, social and regulatory aspects. JBR-BTR, 2009, 92 (6): 271-279.

[13] Suárez RC, Berard P, Harrison JD, et al. Review of standards of protection for pregnant workers and their offspring. Radiat Prot Dosimetry, 2007, 127(1-4): 19-22.

[14] Huang B, Law MW, Khong PL. Whole-body PET/CT scanning: estimation of radiation dose and cancer risk. Radiology, 2009, 251 (1): 166-174.

[15] Sahin A, Tatar A, Oztas S, et al. Evaluation of the genotoxic effects of chronic low-dose ionizing radiation exposure on nuclear medicine workers. Nucl Med Biol, 2009, 36 (5): 575-578.

(收稿日期: 2010-11-22)

《国际放射医学核医学杂志》第四届编辑委员会通讯委员名单

(以下按姓氏汉语拼音排序)

陈黎波	陈文新	陈志军	高再荣	关宴星	贺小红
黄建敏	鞠永健	李百龙	李宝生	李殿富	李 雨
缪蔚冰	刘功传	刘建军	刘晓东	刘 毅	农天雷
秦永德	任志刚	沈江帆	史春梦	田 琼	汪 静
王伯岑	王春祥	王善强	魏月芳	徐 蓉	徐 颖
杨爱民	杨 波	杨吉刚	查金顺	张照辉	朱高红
朱国英	朱应葆	邹 跃	邹仲敏		