

心脏超声检查者的辐射安全：

辐射安全编写组给美国超声心动图学会心血管超声检查的建议

Elizabeth F. McIlwain, MHS, RCS, FASE (Chair), Patrick D. Coon, RCCS, RDCS, FASE, Andrew J. Einstein, MD, PhD, Carol K. C. Mitchell, PhD, RDMS, RDCS, RVT, RT(R), FASE, Gregory W. Natello, DO, FASE, Richard A. Palma, BS, RDCS, RCS, FASE, Margaret M. Park, BS, RDCS, RVT, FASE, Frank Ranallo, PhD, and Marsha L. Roberts, RCS, FASE, New Orleans, Louisiana; Philadelphia, Pennsylvania; New York, New York; Milwaukee and Madison, Wisconsin; Morristown, New Jersey; Hartford, Connecticut; Cleveland, Ohio; Grand Prairie, Texas

翻译：哈尔滨医科大学附属第一医院韩薇，修春红，杨宁

审阅：马萨诸塞州贝斯特医学中心心内科 张玉凤

关键词：辐射安全性、辐射暴露、心脏超声科医师、超声心动图、核素负荷试验、经食管超声心动图辅助下的透视导引操作或手术（TEEFPs）、超声心动图引导下的介入治疗、美国超声心动图学会

心脏病学在治疗方面的进展激动人心，这种进步与心脏超声获得的成果并驾齐驱，在某种程度上与心脏超声的飞速发展密不可分。心脏超声对心血管疾病日常诊疗必不可少，扮演了重要的角色。与其他显像方法相比，超声心动图灵敏度高、携带性好、费用较低，而且没有电离辐射的潜在风险。心脏超声科医师需要参与的住院或门诊患者的诊疗日益增加。超声科医师越来越多在心导管介入室、电生理实验室、各种心脏外科手术间参与经食管超声心动图辅助下的透视导引下的诊疗（TEEFPs），这会大大增加其暴露在辐射条件下的机率，尤其是在为因核素心肌灌注或其他放射性检查而刚接受放射性同位素的病人做检查时，超声科医师辐射暴露的机率更大。

超声科医师对接受心肌灌注（核素运动试验）患者进行经胸超声心动图（TTE）检查，或参与 TEEFPs 吸收的辐射及可能伴随的风险的数据并不充分，还是未知数。有确凿证据表明高辐射量照射的风险确实存在，并能引起组织器官反应如皮肤烧伤、白内障，还能引起随机效应相关的疾病如癌症、胎儿畸形。¹⁻³ 最近的证据表明不存在安全的辐射剂量，即使低剂量也能致癌，风险通常与剂量呈

正相关。⁴⁻⁶ 这些指南指出了超声科医师面临的问题、阐述了超声科医师辐射暴露的一般情况、提出了超声科医生该如何使辐射暴露减低到最小的建议、及用何种方式向行政领导阐明超声科医师面临电离辐射风险等问题。

辐射的类型及基本的辐射原理

1985 年 Wilhelm Rontgen 发现 X 线，并首次创造出 X 线影像（他妻子的手指图像）。⁷ Thomas Edison 将其进一步发展，在 1896 年获得首次应用并可商购。⁸ 1904 年，Edison 的助手 Clarence Dally 因重复照射的累积效应病逝。⁸ 在此之前，除了皮肤烧伤，几乎无人知晓电离辐射的其他副作用。自此以后，对电离辐射的进一步了解要求其在医疗成像应用方面要具有安全性和有效性。

X 线透过人体产生射线图像时，其光子通过三种方式与人体组织发生相互作用：光电吸收、相干散射、康普顿散射。剩余的光子经过成像接收器形成图像。⁹ 形成这种图像最重要的原理是光电吸收。光电吸收是一个 X 线光子将所有能量转移给原子轨道的一个电子，光子消失（完全被吸收）。⁹ 电子离开原子轨道，产生的能量在临近组织中储存。相干散射是一个 X 线光子与一个整个原子发生相互作用，改变其方向性，但不损失能量。⁹ 当散射光子随机定位在成像接收器时，会使整体图像模糊导致影像质量下降。仅有微乎其微的相干散射离开患者辐射周围，因此接受 X 线照射检查的患者对周围并不会产生严重的辐射问题。对心脏超声科医师来说，康普顿散射产生的潜在风险最大。康普顿散射是 X 线的光子与原子中的电子作用，并转移一些能量给电子，让这个电子从原子中发射出来。⁹ 然而这个光子仍保留大量能量，可以向任何方向散射。这些散射的光子可能离开患者，对患者附近其他人员造成辐射风险。

超声科医师的辐射来源

超声科医师存在两种辐射来源：患者及检查操作本身。超声科医师坐在患者旁边，频繁地在患者身体上方悬架胳膊和身体，有些患者因核医学诊断刚接受放射性药物，故具有瞬时辐射性。对超声科医师而言，接近并较长时间的暴露于这种辐射源是两个潜在的吸收辐射的重要因素。^{3,9} 这点对初学者和接受培

训的超声科医师更为重要，因为他们需要更多时间完成检查。

在过去的十年里 TEEFPs 检查需求显著增长。¹⁰ 在经导管主动脉瓣置换术、经皮二尖瓣修复术、左心耳封堵器置入术、房间隔缺损或卵圆孔未闭封堵术中，超声科医师常需要长时间在心导管介入室、电生理实验室、各种心脏外科手术间等毗邻产生辐射的 X 线装置的地方协助完成经食管超声心动图。

我们知道电离辐射的持续照射可引起白内障、白血病和其他恶性肿瘤。^{2,5} 对于心内超声科医师来说，另外潜在的辐射源是那些近期接受电离辐射药物的病人，在协助做 TEEFPs 和 TTE 检查时，这些患者体内的这些药物继续产生辐射（“热源”病人）。了解基本个人防护技巧可以显著减少超声科医师吸收的辐射剂量，包括 X 射线装置中的 X 线光子、诊断或治疗需要的放射性同位素衰减产生的伽马射线。已有文献报道接触辐射患者的护士及放射技术员可接受的辐射剂量，^{3,11} 而对长期密切接触辐射患者的心脏超声科医师尚未有充分调查研究。

对超声科医师而言，知晓所处的辐射环境、采取相应的防护和监测自己的方法，这一点十分必要。他们需要了解临床环境中所有的电离辐射源。

个人防护技巧

心脏超声科医师遵从辐射安全的基本原则可显著减少来自携带放射性同位素患者、及接受 TEEFPs 检查患者的辐射，原则为：时间、距离、屏蔽¹²（图 1）。这些原则包含以下几个方法：1、减少受辐射时间 2、增加与放射源之间的距离 3、延长心脏超声检查与接受同位素之间的间隔 4、使用个人防护装置（PPD）及屏蔽（表 1）。在这一章节我们讲述每个环节。

减少辐射暴露时间

尽管长时间密切接触同位素携带患者（辐射源），但当为“热源”患者进行 TTE 检查时，超声科医师通常意识不到自己处在射线照射环境中。由于在 TTE 检查之前接受放射性同位素核扫描的患者数量增加，超声科医师在这个过程中以及在 TEEFPs 检查过程时受到的辐射值得我们注意。超声科医师应该轮流为这些患者做检查来削弱或最大程度减少辐射风险。怀孕的超声科医师应避免接触这

些患者及操作。若怀孕的超声科医师必须参与，则应严格遵守辐射安全守则。

增加与放射源之间的距离。¹³⁻¹⁵

增加与放射源之间的距离可以显著减少辐射。与放射源距离加倍可以减少到原辐射剂量的 1/4。¹⁶ 因此，小范围增加距离可以显著减少照射。我们需要注意患者这类辐射源，如果患者近期接受了放射性同位素就会成为放射源；若患者正接受 TEEFPs 就成为 X 线散射源。第二种情况中，超声科医师可以忽略不计来自 X 射线管的直接辐射。然而，在实施 TEEFPs 期间 TEE 操作者和超声科医师紧密靠近患者、工作台和 X 射线管装置，另一方面使用屏蔽设备存在空间局限性，这些都增加了他们的潜在辐射风险。我们应该认识到病人 X 射线束入口端的散射辐射强度是最大的，因此使他们自身处在安全位置以及合理使用屏蔽设备是十分重要的。减少操作者和超声科医师辐射的最佳位置是在 X 射线管的对面。在做操作应先选好位置。

应用平方反比定律可以计算出辐射量： $I_1/I_2=(D_2/D_1)^2$ ，其中 I 表示光束的强度， D 表示的与放射源的距离，X 射线束的强度与距离平方成反比。因此我们强调，小幅度增加与放射源间的距离能大大减少辐射暴露。这一原则同样适用于患者这类辐射源，如接受放射性同位素、TEEFP、近距离放射治疗（内放射治疗）这几种患者。

延长应用同位素与超声检查的时间间隔

在病人接受放射性同位素药物前完成 TTE 检查或对已经接受放射性同位素的病人推迟 TTE 检查可以消除或减少受辐射量。推迟为刚接受放射性同位素病人做超声心动描检查会允许一些放射性衰变，从而减低对超声科医师的潜在辐射剂量。因此如果有可能，应该推迟对刚接受放射性同位素病人行超声检查。锝-^{99m}Tc 同位素用于绝大多数心脏核研究（表 2）。同位素 ²⁰¹Tl 很少使用，虽然与 ^{99m}Tc 相比具有更长的半衰期，但其有较低的辐射量率常数，对超声科医师潜在辐射剂量较低（至少一个数量级）。

屏蔽

屏蔽可减少散射或初级辐射的 X 射线及放射性同位素的 γ 射线和 X 射线。屏蔽包括 PPD，移动（流动）屏蔽，或安装好的透明含铅塑料防护的设备。^{3,9,17} PPDs 包括防辐射服装（单件，双件马夹/裙子和较大的孕妇围裙）、保护甲状腺的脖套和护目镜。^{3,9} 习惯上把防辐射衣服称为“铅围裙”。时至最近，铅是专用的辐射衰减防护服材料。目前许多销售商出售含铅、复合材料、无铅材料的防护服，使用术语“防辐射服装”比“铅围裙”更准确。可代替铅的辐射衰减防护材料包括氧化铋、硫酸钡，稀土材料，含铅、锡、钨和钡的复合材料。^{18,19} 这些材料具有与铅相同的保护作用，并且重量轻，还可避免后期处理有毒物质的问题。然而，铅的替代材料耐用性较差、当能量 >100 keV 时其提供的保护较少，对于来自携带 ^{99m}Tc 放射性药物（140keV）的“热源“患者（如大多数核应力测试的患者）辐射防护较差。¹⁵

防辐射围裙有等同 0.25 至 0.5 毫米的铅厚度效果两种⁹。与 0.25 毫米铅作用相同的防护设备允许 10% 的 X 射线穿过屏蔽⁹，适用于接触少量 X 射线的个体。

与 0.5 毫米铅作用等同的材料可以更大幅度的衰减辐射，只有大约 2% 的 X 射线可以穿过⁹。这种更高程度衰减辐射的材料应用于接受更多量辐射的人群及怀孕的工作人群。

未衰减的 X 射线主要用于患者，必须避免接触，如果不能避免则要尽量最小化。如果操作者的手暴露在射线束下，最好戴高衰减手套或使用防辐射氧化铋乳液。尚未有研究报道超声医生在对带有放射性的患者进行 TTE 检查时，是否需要使用防护手套。超声医生在进行 TEEFP 检查时，需要戴护目镜以预防白内障。

除了 PPD，可移动的屏蔽及安装屏蔽装置也对防辐射有重要作用。安装屏蔽装置包括安装在天花板的屏蔽、工作台两侧的屏蔽设备及工作台周边的窗帘。^{9,17}

对近期接受放射性同位素的患者进行 TTE 检查时，PPDs 可能减少辐射。然而并没有文献描述在上述环境中使用 PPD，这可能由于其可能引起的肌肉骨骼损伤及不适，^{20,21} 防护围裙对特殊的放射性同位素的功效也相对减弱。放射性同位素的发射粒子其能量和穿透力是不同的。一些放射性同位素，如正电子发射层

析成像示踪剂，发射的光子比诊断性 X 射线束的光子能量更高。与 0.25 至 0.5 毫米铅相当的防辐射服可以阻挡低能量伽玛射线，但是对高能量的伽玛射线光子屏蔽效果差。^{99m}Tc 与 ²⁰¹Tl 是两种常见的单光子发射计算机断层成像的放射性同位素。²⁰¹Tl 的辐射包含较低能量的光子，所以防辐射服的屏蔽效果与上述提到的对 X 射线的效果相同。^{99m}Tc 的辐射包含的是能量较高的光子，衰减效果较差。在携带 ^{99m}Tc 同位素患者身边工作时，约 40% 的辐射可以穿过与 0.25 毫米铅相当的防辐射服，15% 的辐射可以穿过与 0.5 毫米铅相当的防辐射服。因此，相当于高铅量（0.5 毫米）的防辐射服会更有效地衰减来自携带有 ^{99m}Tc 同位素药物患者的辐射。

监管和行政问题

通常情况下，在医院设置安全防护措施以减少和监测医护人员辐射。州、联邦、当地三级监管医疗辐射的使用。州政府辐射保护机构制定了回旋加速器及核素加速器产生放射性核素的使用规则，为当地医院辐射安全政策提供基本准则。在无协议州放射性核素在核医学和放射治疗中的应用由美国核管理委员会监管，而其他 37 个有协议的州自己监管²²⁻²⁴。此外，器械产生的辐射由美国食品药品监督管理局的设备及放射卫生中心，连同各州的辐射防御项目组一同监管。所有用于人类诊断或治疗的器械以及电离辐射室，必须符合美国食品药品监督管理局和各州辐射防御项目组的设计和使用标准。所有使用放射性核素的医学机构必须有辐射安全专员（RSOs）和辐射安全委员会。RSO 管理所有医护人员的辐射安全相关问题。机构管理者应该与 RSO 共同工作一同确保心脏超声科医师接触的辐射尽可能低。

组织辐射安全培训，监测特殊的辐射暴露区域（如在床旁、核医学机器等）可以减少随机效应风险。个人的辐射徽章或辐射剂量监测器通常用于监测辐射。这些徽章包括 X 射线胶片徽章、热释光剂量计徽章、视觉刺激发光剂量计徽章和自动读数剂量计徽章；工作者可把扁平的徽章戴在身上，注射放射性药物的工作者还可以将环状徽章戴在手指上。^{11, 15, 25} 这些徽章测量一定时间内的数据

(通常是一个月一次), 并提供长期辐射接触的重要信息。胶片徽章虽然价格便宜, 但是测量最不准确。热释光剂量计徽章通常使用氟化锂晶体测量辐射量, 当今的指环徽章通常使用这项技术, 是一次性的, 不能重复使用。一次性的视觉刺激发光徽章用氧化铝测量辐射, 它比胶片徽章和热释光放射量测定器徽章更敏感, 是当今医护人员使用最广泛的个人剂量监测徽章。可自读的辐射测量装置如袖珍辐射检测设备可以立即读取数据, 并可用于对单一操作或系列操作所受辐射的监测。虽然美国各地的实际情况有所不同, 但是接触大量辐射的工作人员可能会佩戴 2 个徽章, 一个在衣领上测量直接接触的辐射, 一个在围裙里边的腰部测量衰减的辐射。¹¹ 联邦法律规定, 对于可能超过 10% 职业许可接触的辐射量的人员应至少佩戴一个徽章。²³

政策发展

管理人员应承认作为医务工作者一部分, 超声科医师有可能接触医疗辐射。按照法律法规和制度政策,²³ 超声心动图部门应加设辐射安全的任职培训, 并对适当的医护人员给予辐射徽章。应对可能接触辐射的医护人员进行不断的安全教育以提高安全意识。心脏超声学院应该对临床的超声医师进行职业风险及安全实践教育, 教育不仅局限于辐射, 并让他们意识到来自于“热源”病人的辐射和有辐射的操作。学院、评审和认证组织还应为这个职业培育安全文化。辐射安全培训应包括超声科医师可能接触辐射的一些环境的特殊培训。

胚胎和胎儿的辐射接触问题更引人关注。针对怀孕医生和心导管室工作人员的专家共识, 已经由心脏科妇女创新小组发布出版, 并得到了美国心血管造影和介入协会的认可。妊娠的心脏超声科医师应及时通知上级人员来帮助确保胎儿的保护。在法律上声明怀孕并在雇主那备案是必要的, 它可启动监测推荐剂量, 确保更低辐射限值。^{13, 14, 16} 除了遵守辐射安全原则和推荐的监测, 还可考虑对近期接受放射性核素患者进行 TTE 检查时使用 PPD, 限制或可能排除妊娠超声科医师对这样的患者进行检查以及参与 TEEFPs。

心血管超声检查室应对长期直接接触病人的医护人员的辐射照射情况予以

关注。实验室负责人应定期会见 RSO 以讨论和确定辐射情况，建立相关的教育和监测计划，并针对实验室的需求制定政策。这些政策应该包括对新员工及员工的年度教育、培养超声科医师对特殊辐射环境的意识、最小化辐射接触的方法、制定超声科医师合理的轮换计划以降低辐射接触，对怀孕超声科医师的特殊关照、监测辐射接触。应该对那些可能需要更多时间完成检查的个体给予特殊关注，比如学生和研究生在内的超声初学者。

建议

- 1、心脏超声检查室和机构管理部门应意识到超声科医师是暴露于医疗辐射环境下的另一个群体、并存在相关风险。
- 2、超声科医师应在辐射安全基本原则方面进行自我教育、承担个人责任以确保自身安全。
- 3、心脏超声学院应该在课程中包含辐射基本原理和相关的辐射安全知识。
- 4、认证机构应该么要求心脏超声学院将教授辐射基本原理及相关的辐射安全知识作为教育计划的一部分。
- 5、对心脏超声科医师提供认证的组织在认证考试中应包括辐射基本原理及相关的辐射安全主题。
- 6、心脏超声检查室和 ROS 应针对超声科医师制定辐射安全政策和规程。
- 7、只要有可能，超声科医师在提高检查质量的同时应努力减少与辐射源接触的时间。
- 8、只要有可能，超声科医师在提高检查质量的同时应努力增加与辐射源之间的距离。超声科医师应留意辐射暴露的环境和辐射源。（通常是病人或源自病人的散射 X 线）
- 9、超声科医师参与 TEEFPs 检查时同其他处在同一环境中的医护人员一样，必须例行穿 PPDS，并受 RSO 管理。应尽可能常规使用辐射防护屏。
- 10、当为近期注射过放射性同位素的病人进行 TTE 检查时，超声科医师可以考虑使用 PPD。然而，尚未有文献报道在这种情况下使用 PPD，其使用受限于可能

引起的肌肉骨骼不适及疲劳，防护围裙对特定的放射性同位素的功效也许会降低。

11、参与 TEEFPs 的超声科医师同其他处在同一环境中的医护人员一样，必须佩带辐射监测徽章。

12、尽管对近期注射放射性同位素的患者进行 TTE 检查并不少见，尚缺乏关于检查时超声科医师的辐射吸收量的文献报道。在充足的数据公布之前，谨慎起见超声科医师应同其他与这些放射源接触医护人员一样佩带监测辐射徽章。

13、患者的医疗记录必须记载患者接受的放射性同位素的药剂名称、剂量、使用日期和注射时间。超声医师或超声心动图工作人员为此类患者做 TTE 检查前，必须先回顾医疗记录，以便适当调整。（例如，重新安排检查时间，有针对性的加快检查时间、使用 PPDs、尽可能替换怀孕的超声科医师做此类检查）

14、TTE 检查应在放射性同位素注射之前完成。如果可行，对近期接受放射性同位素的患者的超声检查应推迟。

15、心脏超声检查室应意识到，妊娠的超声科医师因胚胎或胎儿潜在的辐射接触，而导致风险增加。应采取措施尽量减少胚胎和胎儿的辐射接触。由于尚缺乏针对超声科医师的调查数据，除了遵守辐射安全准则和执行推荐的监测方案，还应考虑对近期接受放射性同位素的患者做 TTE 检查时使用 PPDs，尽可能限制、排除怀孕的超声科医师对这样的患者检查以及参与 TEEFPs。

16、需要关于超声科医师对携带放射性同位素患者进行超声检查后其辐射吸收剂量的研究。

总结

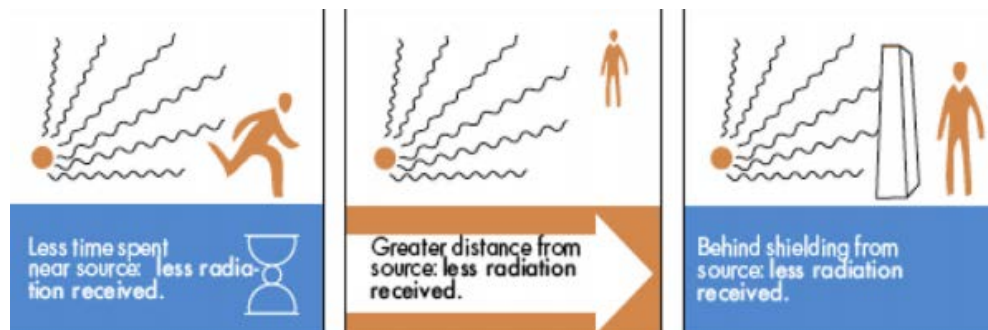
心脏超声科医师暴露于电离辐射的研究至今尚很不足。心脏超声科医师的临床工作越来越多地接触使用电离辐射方法的患者。所以建议心脏超声科医师减少辐射照射是必要的。虽然这篇报道是从超声科医师的角度描述的，但是此文提出的观点和建议同样适用于医生，护士，技师，和心脏超声的所有其他从业人员。这些指南为心脏超声检查室的辐射安全提供了制定政策和拟定草案的

基础，此外可以为心脏超声科医师提供安全准则、树立安全意识，以最大程度地减少辐射照射。

告知与免责声明

ASE 把此报告作为其成员的参考标准。本报告仅提出建议，而不应是医疗实践中做决定或对任何员工纪律处分的唯一依据。本报告所提的建议和说明主要基于专家意见，而不是来自科学验证数据。ASE 没有明确阐述或默示关于本报告中信息的完整性或准确性，包括针对特定用途的适销性或适用性的保证。ASE 不对你，你的病人或第三者根据这一报告做出的任何决定，或者对你或其他相关者采取的行动承担责任。当个人将这些信息作为医疗建议，ASE 不承担责任，ASE 也不与你的患者或其他任何人存在医患关系。

图 1:



保护原则是尽量减少辐射暴露。时间，辐射源的距离，屏蔽对辐射暴露及剂量吸收的作用。通过减少与放射源的接触时间、增加与放射源间的距离（增加距离能以指数方式减少辐射）和使用屏蔽来使辐射照射最小化。来自核管理委员会。¹²

表 1 个人防护技巧：减少辐射的方法

1. 减少受辐射时间

2. 延长心脏超声检查与应用同位素之间的间隔

3. 增加与辐射源间的距离

4. 使用个人防护装置及实验室屏蔽

取自核管理委员会并略作修改¹²

表 2 放射性同位素的半衰期及心脏病应用适应症

同位素 (放射性药物)	物理半衰期	应用
^{99m} Tc-示踪剂 (如 ^{99m} Tc-sestamibi)	6 小时	SPECT MPI (心肌灌注、心功能、心肌存活性)
²⁰¹ Tl	73 小时	SPECT MPI (心肌灌注、心肌存活性、心功能)
^{99m} Tc-pertechnetate	6 小时	放射性核素心室造影, 也称为 MUGA 扫描 (心脏功能)
¹⁸ F-FDG	110 分钟	PET (心肌代谢、心肌存活性和炎症)
⁸² Rb	75 秒	PET (心肌灌注、血流和心功能)
¹³ N	10 分钟	PET (心肌灌注、血流和心功能)

FDG, 氟脱氧葡萄糖; MPI, 心肌灌注显像研究; MUGA, 多门电路控制采集法; PET, 正电子发射断层摄影术; SPECT, 单光子发射计算机断层摄影。

REFERENCES

1. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann IC RP 2007;37(2-4):1-332.
2. Stewart FA, Akleyev AV, Hauer-Jensen M, Hendry JH, Kleiman NJ, Macvittie TJ, et al. ICRP Publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. Ann IC RP 2012;41(1-2):1-322.
3. Barr JMB, Schiska AD. Radiologic safety: historical perspectives and contemporary recommendations. J Rad Nurs 2005;24(1):6-10.
4. National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation:

- BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press; 2006.
5. Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Lande CE, Little JB, et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003;100(24):13761-6.
 6. Einstein AJ. Effects of radiation exposure from cardiac imaging: how good are the data? *J Am Coll Cardiol* 2012;59(6):553-65.
 7. Röntgen WC. Eine neue Art von Strahlen. *Sitzungsberichte der Physik.-Med. Gesellschaft zu Würzburg* 1895;137:132-41. Translated into English as: Stanton A. On a new kind of rays. *Nature* 1896;53:274-7.
 8. Duke University rare book, manuscript, and special collections library: 'Edison fears the hidden perils of the x-rays'. Durham: New York World; August 3, 1903.
 9. Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt EM, Boone JM. The essential physics of medical imaging. 3rd ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health; 2011.
 10. Silvestry FE, Kerber RE, Brook MM, Carroll JD, Eberman KM, Goldstein SA, et al. Echocardiography-guided interventions. *J Am Soc Echocardiogr* 2009;22(3):213-31.
 11. NCRP Report No.122, use of personal monitors to estimate effective dose equivalent and effective dose to workers for external exposure to low-level radiation. National Council on Radiation Protection and Measurements; 1996.
 12. United States Nuclear Regulatory Commission. Minimize your exposure. Available at: <http://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/protects-you/protection-principles.html#tds>. Accessibility verified May 25, 2014.
 13. Purdue University. Radiologic and environmental management. Pregnancy and radiation. Available at: <http://www.purdue.edu/rem/rs/preg.htm>. Accessibility verified May 25, 2014.
 14. Best PJ, Scadding KA, Tehran R, Chiefs A, Canadian V, Madam M, et al. SCAI consensus document on occupational radiation exposure to the pregnant cardiologist and technical personnel. *Catheter Cardiovasc Interv* 2011;77(2):232-41.
 15. Limacher MC, Douglas PS, Germano G, Laskey WK, Lindsay BD, McKetty MH, et al. ACC expert consensus document. Radiation safety in the practice of cardiology. American college of cardiology. *J Am Coll Cardiol* 1998;31:892-913.
 16. Selman J. The fundamentals of x-ray and radium physics. 6th ed. Springfield: C. C. Thomas; 1980.
 17. Miller DL, Vano E, Bartal G, Balter S, Dixon R, Padovani R, et al. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the cardiovascular and interventional radiology society of Europe and the society of interventional radiology. *J Vasc Interv Radiol* 2010;21(5):607-15.
 18. Warren-Forward H, Cardew P, Smith B, Clack L, McWhirter K, Johnson S, et al. A comparison of dose shavings of lead and lightweight aprons for shielding of 99m-technetium

radiation. *Radiat Prot Dosimetry* 2007;124(2):89-96.

19. Uthoff H, Benenati M J, Katzen BT, Peña C, Gandhi R, Staub D, et al. Light-weight bilayer barium sulfate–bismuth oxide composite thyroid collars for superior radiation protection in fluoroscopy-guided interventions: a prospective randomized controlled trial. *Radiology* 2014;270:601-6.

20. Smith AC, Wolf J G, Xie GY, Smith M D. Musculoskeletal pain in cardiac ultrasonographers: results of a random survey. *J Am Soc Echocardiogr* 1997;10(4):357-62.

21. Evans K, Roll S, Baker J. Work-related musculoskeletal disorders (WRMSD) among registered diagnostic medical sonographers and vascular technologists: a representative sample. *J Diagn Med Sonogr* 2009;25(6):287-99.

22. United States Nuclear Regulatory Commission. Agreement state program. Available at: <http://www.nrc.gov/about-nrc/state-tribal/agreement-states.html>. Accessibility verified May 25, 2014.

23. Saha G B. Basics of PET imaging: physics, chemistry, and regulations. 1st ed. New York: Springer; 2004.

24. United States Nuclear Regulatory Commission. Part 20-standards for protection against radiation. Available at: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-text.html>. Accessibility verified May 25, 2014.

25. U.S. Department of Health & Human Services. Radiation emergency medical management. Diagnosis and treatment for health care providers. Radiation detection devices. Available at: <http://www.remm.nlm.gov/civilian.html>. Accessibility verified May 25, 2014.

26. United States Nuclear Regulatory Commission. Part 20.1208 dose equivalent to an embryo/fetus. Available at: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1208.html>. Accessibility verified May 25, 2014.