

正电子医学成像

陈百万 赵仁宏 李淑玮

(潍坊医学院物理系 山东 261042)

自从 1932 年发现正电子以来, 已经有 70 个年头了。从上世纪 50 年代初开始研究正电子医学成像以来, 经过半个世纪的历程, 目前正电子医学成像技术已发展成为现代医学影像技术的独具特色的重要组成部分, 在医学临床诊断和对生命科学的研究方面发挥着重要作用。

一、正电子与正电子放射性核素

英国理论物理学家狄拉克于 1928 年从理论上预言了自然界中应当存在着反电子。这种反电子具有与普通电子(负电子)一样的静止质量和相等数量的电荷。所不同的是它所带的是正电荷, 因此把这种反电子称为正电子。狄拉克还进一步预言, 正负电子(吸收能量大于 1.02MeV 的光子时)可同时对产生, 正负电子对紧密结合后可同时湮没(并放出总能量大于或等于 1.02MeV 的光子)。

狄拉克的预言很快被实验证实了。1932 年, 美国物理学家卡尔·安德逊首先利用云室在宇宙射线中发现了正电子。他因此而与他人分享了 1936 年的诺贝尔物理学奖。以后的实验发现, 正电子不仅存在于宇宙射线中, 在某些人工放射性核素的衰变中也能产生正电子。另外, 利用能量高于 1.02MeV 的 γ 射线辐射铅板、金属箔等, 观察到了正负电子对的出现, 称为电子对效应。在某些实验中也观测到了一些人工放射性核素衰变时发射出的正电子, 这种正电子常称为 β^+ 粒子, 而能放出 β^+ 粒子的核衰变就称为 β^+ 衰变。

在核医学成像中所用的正电子就是 β^+ 衰变放出的正电子。能产生 β^+ 衰变的核素称 β^+ 衰变核素或正电子放射性核素, 它可由加速器或正电子放射性核素发生器产生。正电子成像所用的正电子放射性核素多由回旋加速器产生。表 1 为正电子成像常用的正电子放射性核素及其半衰期以及生产它所用的核反应。

正电子在真空中的寿命很长, 但在物质中它会很快损失能量, 当它的速度接近或等于零时, 便与邻近的自由负电子结合并湮没, 同时放出能量各为

511KeV、飞行方向相反的两个 γ 光子。这种 γ 光子称为电子对的湮没辐射光子。正电子在人体组织中的行程与其能量大小及组织性质有关, 一般最大为 2mm, 因此, 可用正负电子对的湮没辐射事件来定位产生衰变的正电子放射性核素。

表 1 医学显像用正电子放射性核素

核素	半衰期(min)	核反应
^{11}C	20.3	$^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha) ^{11}\text{C}$
^{13}N	10.0	$^{16}\text{O}(\text{p}, \alpha) ^{13}\text{N}$
^{15}O	2.05	$^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n}) ^{15}\text{O}$ $^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n}) ^{15}\text{O}$
^{18}F	110	$^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n}) ^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(\text{d}, \alpha) ^{18}\text{F}$

注: 反应式中括弧前为靶核, 括弧后为生成核; 括弧中逗号前后分别为入射粒子和出射粒子。

二、正电子医学成像及其发展简史

正电子医学成像技术是现代医学成像技术的重要组成部分, 近几年来由于其固有的特点及潜在的价值极受人们青睐。正电子医学影像的物理实质是引入体内的正电子放射性核素在受检部位的浓度(或放射性活度)的分布图像。它是通过在体外探测正电子核素放出的正电子与组织内的负电子的湮没辐射光子而成像的, 因此, 正电子医学成像实际上是正电子与负电子产生的 511KeV 湮没辐射 γ 光子的成像。正电子放射性核素可构成人体各部位的任何影像, 包括平面影像、动态影像、断层影像、3 维影像及全身影像。目前多采用断层成像法。实现断层成像的方法有单光子断层法和符合探测法两种。后者能进行电子准直, 是常用的一种方法。成像仪的机械结构主要包括探头、断层床、计算机和一些附属设备。探头和计算机是正电子成像仪的核心。

正电子成像已经历了半个世纪的发展。它已从 20 世纪 50 年代初期的正电子脑肿瘤定位显像发展到现在的多环多层面全身断层显像。在机型的变化方面, 正电子成像经历了 3 个阶段, 即正电子扫描机、正电子照相机和正电子发射型计算机断层仪(PET)。在影像类型的发展上, 最初为正电子平面

影像, X 线 CT 问世后发展为断层影像, 近几年又发展为全身断层影像和 3 维重建图像。

从上世纪 50 年代初到 60 年代末的 20 年为正电子成像的初期阶段。1950 年初出现了正电子放射性核素脑肿瘤定位显像; 1960 年初美国的安格等人研制出了正电子照相机。这一时期主要是正电子平面显像, 尽管也有正电子发射断层的尝试, 但由于当时没有好的数据处理系统及未采用滤波反投影法, 最终未获成功。这一时期的特点是发展缓慢, 机型单一, 用途有限。

70 年代初到 80 年代初, 正电子成像有了较快的发展。受 X 线计算机断层(CT)技术的影响, 1975 年正电子发射型计算机断层仪研制成功。初期阶段的 PET 为单环 NaI(Tl) 多晶体 PET; 1980 年初出现了第一台锗酸铋(BGO)晶体的 PET, 开始为单环, 以后发展为双环。这一时期 PET 发展的主要特点是技术发展快, 机型多, 探头材料由 NaI 晶体发展为 BGO 晶体, 空间分辨力和灵敏度均有了很大提高。缺点是仍主要停留在实验室研究阶段, 探头环数不多, 临床应用较少。

80 年代中期以后, PET 的发展有了突破性的进展, 并开始广泛用于临床。这一时期的主要特点是探头由分离的 BGO 晶体向模块式晶体转化。模块式探头大大提高了 PET 的空间分辨力和灵敏度, 机械稳定性和可靠性也大有改善。这一时期开发出了多环、多层面及 3 维 PET。这些都为 PET 广泛用于临床打下了基础。

当代的正电子成像是以 PET 为典型代表的, 它也是现代其他正电子成像的基础。这里仅介绍下面 3 种类型的正电子断层仪。

三、正电子发射型计算机断层仪

正电子发射型计算机断层(PECT)简称正电子发射断层(PET)或正电子 CT。临床上一般称为 PET。

PET 是 20 世纪 90 年代以来得到迅速发展和应用的新一代医学显像技术。由于它能灵敏和正确地测定活体内分子水平的生理生化指标, 已发展成为当代医疗和生命科学研究的重要影像设备。

1. PET 原理

PET 用共线对置的探测器采用快速符合技术来探测正负电子湮没事件释放出的两个方向相反的 γ 光子, 由计算机将收集到的数据进行处理, 以重建断层图像, 再现受检部位某断层面的正电子放射性核

素的放射性分布。目前应用最广泛的图像重建方法是滤波反投影法。

2. PET 设备的组成

一台完整的 PET 设备一般都由数据采集系统、电子计算机系统、图像显示系统及其他附属部分组成。

数据采集系统包括探头和断层床等。探头部分是机器的核心, 是决定机器性能的主要部分。其主要功能是将集中于人体受检部位的正电子放射性核素发射的正电子而产生的湮没辐射光子置换成空间位置信号和能量信号, 供后面的计算机系统进行处理, 并重建断层图像。探头部分主要由闪烁晶体、光电转换与放大器件(目前主要用光电倍增管)和前端电子学线路等组成。目前较先进的机器设备大多采用槽式模块结构的 BGO 晶体, 构成多环(可多达 32 环)多层面 PET。利用氟化铯(CsF)晶体荧光衰减时间短(0.005 μ s)的特点, 可进行飞行时间测量, 对正负电子湮没事件准确定位, 以提高空间分辨力和信噪比。另外, 英国有的实验室正在进行用多丝正比室作为 PET 探测器件的实验和研究工作。

用于 PET 的电子计算机一般为具有大容量存储器的快速计算机。其外部设备有磁盘、磁带和宽行打印机等。

显示系统可即时观察和记录图像, 另外还带有一些能进行图像分析的设备。

3. PET 的优点

PET 是正电子成像中最先进、最完善、最高级的成像设备, 也是当前最重要的大型医学影像设备之一。

PET 显像的物理特点是灵敏度高(比磁共振成像即 MRI 高 100 多倍)、分辨力好(横向分辨力和深部分辨力都较高)、图像清晰、且能进行定量分析, 其适用面广, 可做身体各部位的检查, 并可以获得全身各方位的断层像。

PET 显像的最大优势在于它是一种代谢功能显像, 而且是在分子水平上反映人体生理生化指标的显像。PET 所常用的正电子放射性核素 ^{11}C 、 ^{13}N 和 ^{15}O 都是人体组织的基本元素, 可标记生理性物质(如糖类、氨基酸和脂肪等); 而 ^{18}F 可替代 H、-OH 或其他卤素等标记药物。这些核素都适合生理示踪要求, 特别适宜作人体生理功能方面的检查和研究。因此, PET 被誉为生理生化断层术或活体生化显像, 所以, PET 特别有利于疾病的早期诊断(病变组织的

功能改变早于形态学的改变) 和生命科学的研究。正电子成像的这一特点是其他任何类型的医学成像都无法比拟的。

PET 显像的安全性也是它的一大优点。一次全身 PET 检查的照射剂量远小于一个部位的常规 X-CT 检查。

4. PET 的应用

PET 在经历了漫长的研究应用后, 90 年代开始进入临床应用, 特别是 ^{18}F 标记的氟代脱氧葡萄糖 (^{18}F FDG) 的获准临床应用, 大大促进了 PET 的临床应用。在近年来的 PET 检查中, ^{18}F FDG 显像占绝大部分。其主要是在肿瘤学、心脏病学和神经学三大方面的应用。其中以肿瘤学方面应用最多。PET 可早期发现肿瘤的原发、转移和复发病灶; 鉴别肿瘤和瘢痕坏死组织; 在肿瘤分期、恶性程度分级和疗效观察方面有显著优势; 对肺癌、乳腺癌、头颈部癌、结肠癌、卵巢癌、淋巴瘤和黑色素瘤等的诊断率在 90% 以上。PET 显像是了解冠心病心肌缺血状况、评价心梗后心肌存活情况的“金标准”。PET 脑显像可解决癫痫病灶定位、脑血管病脑组织血流储备和代谢测定、脑部肿瘤恶性程度分级、帕金森氏病和早老性痴呆的早期诊断和鉴别等其他影像检查所不能解决的问题。

目前 PET 脑显像是研究脑科学的主要手段, 它可揭示人脑的奥秘, 可观察和研究人在完成不同功能活动(如听、看、说话等)时大脑活跃部位的差异; 在研究大脑神经传递的细微分子变化时, 用 PET 可检测出 10^{-12}mol 浓度, 其灵敏度比 MRI 提高 10 亿倍。利用 PET 可无损伤地了解人体内基因表达有否异常, 以及及时报告基因治疗是否成功。

以分子功能显像为基础的 PET 技术还可望在中医药理论研究方面(如中药作用原理、经络本质等方面)显示其独特的优势。

5. PET 的发展方向

PET 使用的短半衰期显像核素不能长期保存和长途运输。因此, 购置 PET 设备时须连带购置用于生产显像核素的医用回旋加速器, 致使 PET 的总体设备购置费更加昂贵; 另一方面, 做 PET 检查需要医师、技师、药师、化学家和工程学家等各类人员的密切配合才能进行。这使 PET 的广泛推广应用受到一定的限制, 目前主要被用于少数医疗中心、大型医院和医学研究机构。但由于其具有独特的优点, PET 仍不愧是一种具有巨大竞争能力和发展前途的

现代医学成像方法。其发展方向总体来说是提高性能、降低成本、推广应用。具体来说有以下几方面:

- ①研制和应用新的闪烁晶体和新的光电转换器件;
- ②进一步改进前端电子学线路和采集系统;
- ③改善计算机图像处理系统, 如提高运算速度和采用 3 维重建系统等;
- ④在改进性能的同时进一步降低设备成本;
- ⑤研制新的各种短半衰期正电子显像核素和药物。

四、SPECT- PET(FDG- SPECT)

如前所述, PET 有其独特的优越性, 但其推广应用有一定困难。为了解决这一问题, 各国研究人员对降低 PET 设备总体成本方面进行了不懈的探索和研究; 另一方面在另辟蹊径实现正电子断层成像方面也进行了不懈的努力。

随着双探头 SPECT(单光子发射型计算机断层成像)的发展以及正电子药物 ^{18}F FDG 的获准应用, 使人们想到利用 SPECT 的双探头来采集 ^{18}F 的正电子湮没辐射光子的可能性。许多生产厂家在数字式双探头 SPECT 机上进行了正电子湮没辐射符合探测成像的开发与研究, 取得了重大成功, 并已在临床应用中得到证实, 其图像质量和临床价值受到肯定。这种正电子显像通常称为 SPECT- PET, 由于它目前多用于 ^{18}F FDG 显像, 故又称为 FDG- SPECT。

将 SPECT 机改造为 SPECT- PET 机, 主要有两方面的工作。一是要增加符合探测线路, 以对正电子的湮没辐射光子进行符合探测; 二是要增加闪烁晶体厚度, 以提高对能量为 511KeV 的湮没辐射光子的探测灵敏度。晶体厚度对这种光子的空间分辨力影响不大, 但对其灵敏度影响很大, 故必须适当增加晶体厚度来提高对光子的探测灵敏度; 晶体增厚后对 SPECT 原来探测的低能光子(如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的光子)的固有空间分辨力会有一定影响(略有增大, 但对其系统空间分辨力和灵敏度的影响非常小, 可忽略不计。

SPECT- PET 的空间分辨力接近 PET, 但 SPECT 符合探测成像仪价格比 PET 便宜, 可兼做单光子断层成像和正电子符合断层成像, 不仅达到了一机两用的目的, 而且加速了正电子断层显像(特别是 ^{18}F FDG 显像)的推广应用, 弥补了 PET 的不足。虽然 SPECT- PET 图像清晰度还不能与 PET 相比, 也还不能进行定量分析, 但前者的成本相对低廉, 其初步应用已得到比较满意的临床效果。相信随着对这种“杂交”技术的不断完善和进一步改进, 将会取得更加满意的临床应用效果。

绿色技术与非绿色技术

林劲松

(安徽望江党校自然辩证法教研组 安徽 246200)

科学技术活动作为一种社会现象,具有两面性。即:它对人类社会的发展有其有利的一面,给人类带来文明,但处理不当也有其不利的一面,将给人类带来负作用。人类社会的持续发展,必须要具备能支撑其持续发展的科技体系。为此,人类在刷新发展观的同时,也在刷新自己的技术观。

根据有利于人类可持续发展规律的要求,人们将技术划分为绿色技术与非绿色技术。所谓绿色技术,是指符合可持续发展要求的技术,例如无铅汽油,利用太阳能、风能、生物质能、地热能等“清洁能源”的技术。对有实用价值,但不利于可持续发展要求的技术,人们则称之为“非绿色技术”。为有效从事绿色技术的研究与开发工作,加强对技术发展的宏观调控,科技管理者建立了基础性的技术发展效果的评价体系。

这个评价体系主要由4个子块构成:

(1) 技术效益评价:技术水平高,说明技术本身的先进性。

(2) 生态效益评价:如某项技术应用会带来生态恶化,严重污染,即使该技术经济效益、技术效益相当好,也是不可取的。

(3) 经济效益评价:技术成果只有转化成现实的生产力,实现商品化,才具有强大的生命力。因此,必须对技术应用进行经济效益方面的分析。

(4) 社会效益评价:即评价技术应用对人类社会所起的作用和意义,包括社会的安全稳定,人类文化、卫生条件的改善等方面。

在上述4项指标中,衡量某技术绿色系数大小的目标函数为技术效益最大,其约束条件为生态效益、经济效益和社会效益。

绿色技术与非绿色技术的区分、技术发展效果评价体系的构建,标志着新的技术观的形成。

新技术观以协调人与自然界的关系,有利于可持续发展为最高准则,它充分考虑了科技发展的长远效应,为科学技术的发展指明了方向。

现在一些发达国家已开始把环境技术作为开发

五、PET/X-CT机

PET的最大优势是功能显像(例如能显示肿瘤生长等细微代谢进程),有利于疾病的早期诊断,但其组织形态像的清晰度远不如X-CT(X线计算机断层成像)好;而X-CT像则能显示清晰的解剖细节,有利于疾病(特别是肿瘤)的准确定位,但它不能在组织形态明显改变前早期诊断疾病。两种成像有互补的特点,如能配合使用,将达到对疾病既能早期发现又能准确定位的目的。然而,医生,特别是癌症外科医生,往往无法就这两种不同的扫描图像进行对照观察,以进行精确的诊断。为此,美国物理学家戴维·汤森和电气工程师罗纳德·纳特于1998年研制成功一种集PET与X-CT于一体的医学成像设备。称为PET/X-CT,通常简称PET/CT。它的孔道被放宽到71cm,这样用一次扫描就可以将待检部位扫描完毕。汤森和纳特还率先创造了用一台计算机控制台来控制两种不同成像装置的软件。

2000年10月,美国食品与药物管理局(FDA)已

批准这种PET/CT机投放市场。

该机投入使用后,改进了许多病例的诊断与治疗。例如,在一个病历中,标准X-CT扫描检查出患者颈部左侧有一肿块,但未见淋巴结异常;经PET/CT检查,发现患者颈部左侧尚有疑为与肿块有连带关系的微小淋巴结,后经活组织检查得到证实。该机的使用还能使宫颈癌和卵巢癌的诊断与治疗有所改观。例如它能显示骨盆一带新生的小肿块的确切位置,让外科医生在肿瘤转移前及早手术摘除。

PET/CT集两种成像的优点于一身,它将大大改善患者的临床诊断与治疗,还将大大缩短全身检查所需的时间。将两种具有互补性能的影像设备集于一体,是今后医学影像设备发展的一个方向。

正电子的发现以及短半衰期正电子放射性核素的人工生产,使医学成像的大家族增加了一个新成员。正电子医学成像是现代医学成像的重要组成部分,它不仅对有关疾病的早期诊断发挥重要作用,更是本世纪人类研究生命科学的最重要手段之一。