

医疗设备质量控制检测技术丛书（十三）

核医学显像设备 质量控制检测技术

汪 静 李立伟 主编



中国质检出版社
中国标准出版社

医疗设备质量控制检测技术丛书(十三)

核医学显像设备 质量控制检测技术

汪 静 李立伟 主编

中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

核医学显像设备质量控制检测技术/汪静,李立伟主编.

—北京:中国标准出版社,2017.3

ISBN 978-7-5066-8535-1

I. ①核… II. ①汪… ②李… III. ①核医学—医疗器械—质量检验 IV. ①R810.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 003308 号

内 容 提 要

本书介绍核医学主要显像仪器及相关设备,包括 SPECT、SPECT/CT、PET/CT、PET/MR 及加速器等,重点阐述各仪器的结构、原理及质量控制等内容。

本书适用于核医学显像设备质量控制人员、显像设备技术人员,也可作为高等院校相关专业的教学与参考。

中国质检出版社
中国标准出版社 出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 162 千字

2017 年 3 月第一版 2017 年 3 月第一次印刷

*

定价 38.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

编审者名单

主 编 汪 静 李立伟

副主编 徐白萱 尹吉林 左长京 朱 虹
杨卫东 杨 冬

编 者 丁 勇 王 喆 尹大一 冯惠茹
刘家金 安建平 孙高峰 李前伟
李桂玉 张 军 张国旭 陈英茂
林志春 欧阳习 赵文锐 赵修义
党浩丹 黄定德 康 飞 魏龙晓
王继升 郭 萍

主 审 田嘉禾 孙志辉

审 核 蒋 勇 李咏雪 王 伟 王延生

序

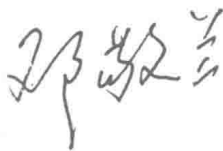
核医学是利用放射性核素或核射线对疾病进行诊断、治疗及医学研究的一门学科,它是核物理学、微电子学、计算机技术、放射药物学、生物学和医学本身等多学科相融合的产物。核医学利用示踪原理将放射性药物注入(或摄入)体内,根据核探测仪器所测得的该放射性药物在脏器组织中的分布及随时间的变化情况,提示人体的生理、生化、病理生理等过程及脏器形态改变状况,以作为诊断疾病的功能影像学依据。核医学为人类探索生命显像的本质提供了有效的工具,成为近年来发展十分迅速的新兴学科,在基础医学研究与临床医学中发挥着重要作用。

对核射线的准确探测与显示需要专业的核医学仪器,因而核医学探测与显像设备是核医学的重要支柱,核医学探测设备及显像仪器的发展,成为推动核医学向前发展的核心动力。核医学显像仪器内容众多,从最初的 γ 相机,到今天的SPECT,PET,乃至PET/CT,PET/MR等,核医学仪器的每一步超越都有力地推动了核医学的发展。目前的核医学影像,已不仅限于显示脏器结构的病变,更重要的是发展了功能性成像,准确地显示疾病的病理生理变化。进入21世纪以来,核医学影像仪器又进入一个令人瞩目的腾飞期,将核医学功能影像仪(PET,SPECT)发展为与解剖影像仪(如CT,MRI)相结合的PET/CT,SPECT/CT及PET/MR等新型仪器,同时获得PET,SPECT的功能影像与CT及MRI的解剖影像,并进行完美的图像融合,完成两种技术“一站式”检查,实现更精准的“定性、定量、定位、定期”的影像诊断,成为现代精准医学的重要工具,在肿瘤、心、脑血管等重大危害人类疾病的诊断治疗中发挥重要作用。

核医学仪器的发展,经历了从二维平面向三维立体、从静态到动态、从单一功能显像到功能解剖图像融合的几次跨越式发展,每一次超越都体现出技术上的革新以及对疾病本质的深入揭示。正确使用核医学显像仪器,将会有效地提高临床医学疾病诊疗的整体水平,为医学科学的进步做出更大的贡献。核医学仪器的快速发展、普及与核医学人才欠缺,尤其是核医学仪器专业人员缺乏的突出矛盾成为制约核医学发展的重要因素。此外,有效发挥现代核医学仪器的功能和作用,需要对仪器工作原理、结构等充分掌握并进行规范性操作。因此核医

学仪器专业书籍的编撰及专业人才的培养是目前核医学发展的重要方向。

为推动军队核医学规范化发展,全面提高军队核医学的整体水平,加强对核医学显像设备科学、合理的使用,提高军队核医学工作者对核医学仪器的掌握,由军事医学计量科委会牵头、中国人民解放军核医学设备质量安全控制专业委员会组织国内核医学资深工作者及核医学仪器工程师等专家组成编写小组,经过充分论证,集成最新核医学仪器,编撰《核医学显像设备质量控制检测技术》一书。本书涵盖各种核医学显像仪器及相关设备,包括 SPECT, PET, SPECT/CT, PET/CT, 加速器及最新的 PET/MR 等核医学主要仪器,重点阐述各仪器的结构、原理、操作规程及质量控制等内容。本书内容新颖全面,紧贴核医学临床工作,既有简明的原理,也有规范的指导意见,期望该书能成为广大核医学工作者的得力助手,更好地服务于临床,造福于广大患者。



第四军医大学第一附属医院

2016 年 12 月

前言

近年来,随着医学理论的快速发展及核医学新技术的不断涌现,各种新型核医学显像仪器不断进入临床,各种高、精、尖显像设备不断装备核医学科室。全军核医学显像设备的种类及数量急速上升,极大地促进了核医学临床诊疗水平的提升。与此同时,用好和管好核医学显像仪器对保障核医学的临床水平至关重要。为有效指导核医学工作人员对核医学显像仪器的管理和应用,配合全军卫生装备质量控制工作实施和推广,全军医学计量测试研究中心及核医学设备质量安全控制专业委员会组织相关人员编写了“医疗设备质量控制检测技术丛书”的《核医学显像设备质量控制检测技术》分册,以期全面介绍如何有效使用和科学管理核医学显像仪器。

核医学显像仪器是由各种物理、机械装置、电子元件与线路及各种软件等组成的复杂仪器,精确探测核射线在人体内的分布。核医学显像仪器是核医学的重要组成部分,也是核医学临床诊疗必不可少的工具。目前临床应用的核医学显像仪器种类较多,包括 SPECT、PET、SPECT/CT、PET/CT、最新的 PET/MR 及显像相关仪器加速器等核医学主要仪器,这些仪器能高灵敏地检测和显示各种不同核素所产生的射线。本书将重点阐述各种显像仪器的基本结构、工作原理、操作规程、技术参数及质量控制等内容。本书内容新颖全面,紧贴核医学临床工作,既有简明的原理,也有规范的指导意见,相信该书能成为广大核医学工作者的有力帮手。

参与编写的人员包括常年从事核医学工作的老专家及长期从事核医学仪器操作的高级工程师,具有丰富的核医学经验及显像仪器操作专业知识。在本书编写过程中,得到了许多同行的大力支持,他们提供了大量资料和其他帮助,在此一并表示衷心的感谢。

受作者水平所限,加之时间仓促,书中难免存在错误和疏漏,敬请同行批评指正。

编者

2016 年 12 月

目 录

第一章 核医学仪器设备的发展	1
第一节 核医学仪器设备分类	1
第二节 显像设备的进展	2
第二章 放射性探测仪器的基本原理	7
第一节 放射性探测仪器的基本原理和方法	7
第二节 闪烁探测器	8
第三节 半导体探测器	11
第四节 热释光探测器	12
第五节 信号预处理	12
第三章 SPECT 相关设备的原理结构与性能	16
第一节 γ 相机	16
第二节 单光子发射型计算机断层仪	25
第三节 SPECT/CT	34
第四节 兼容型 ECT——SPECT/PET	48
第四章 SPECT/CT 质量控制	54
第一节 SPECT/CT 性能指标	54
第二节 SPECT/CT 的质量控制与维护	62
第三节 SPECT/CT 的应用	67
第五章 PET/CT 结构原理	75
第一节 PET 显像原理	75
第二节 PET/CT 结构	76

第三节 PET/CT 图像采集和重建	79
第四节 PET/CT 显像特点	82
第六章 PET/CT 质量控制与应用	84
第一节 PET/CT 性能指标	84
第二节 PET/CT 的质量控制	87
第三节 PET/CT 的主要应用	92
第七章 PET/MR 显像原理及结构	97
第一节 PET/MR 显像原理	97
第二节 PET/MR 结构	101
第八章 医用小型回旋加速器	107
第一节 粒子加速器	107
第二节 医用小型回旋加速器	108
第三节 医用小型回旋加速器的结构组成	112
第四节 回旋加速器性能指标	121
参考文献	124

第一章 核医学仪器设备的发展

核医学仪器设备是核医学的重要支柱,核医学仪器设备的发展代表了核医学的发展水平。本章介绍核医学仪器设备的分类及显像设备的发展。

第一节 核医学仪器设备分类

核医学仪器设备中大部分为核射线探测仪器设备,此外还有放射性药物制备仪器设备。核射线探测仪器设备分类方式有多种,可按用途、探测原理及探测器材料分类。按用途分类,核射线探测仪器设备可分为显像设备、非显像功能测定仪器、样品测量仪器、放射防护仪器等。

一、显像设备

用于临床显像,测定患者体内放射性药物的摄取、分布、排泄等,并以图像的形式显示结果。最早的显像设备为扫描仪(也称扫描机),目前核医学中常用的显像设备有 γ 相机、单光子发射型计算机断层扫描(single photo emission computed tomography, SPECT)、SPECT/CT、正电子发射型计算机断层扫描(positron emission computed tomography, PET)、PET/CT、PET/MRI等。

二、非显像功能测定仪器

用于临床检查,测定患者体内某些器官组织的放射性药物摄取、排泄等,以数据、曲线的形式显示结果。功能测定仪器有肾功能测定仪(肾图仪)、甲状腺功能测定仪(甲功仪)、核听诊器、脑血流测定仪及多功能测定仪。目前核医学中常用的非显像测定仪器为甲功仪及肾图仪。

三、样品测量仪器

样品测量仪器包括活度计及体外分析仪器。活度计用于测定放射性物质的活度。体外分析仪器分析体外样品,用于临床检查及研究。核医学中常用的体外分析仪器有井型 γ 计数器、放免仪及液闪仪等。

四、放射防护仪器

用于防护目的探测环境及工作人员所受的辐射。核医学中常用的有表面沾污检测仪、

环境辐射监测仪、个人剂量仪等。

五、放射性药物制备仪器设备

核医学中常用的放射性药物制备仪器设备有钼锝发生器、回旋加速器及正电子药物合成器。钼锝发生器用于制备核医学中最常用放射性核素 ^{99m}Tc 。回旋加速器用于生产正电子核素。正电子药物合成器利用回旋加速器生产的正电子核素合成正电子药物。

第二节 显像设备的进展

核医学仪器设备中,发展最快、应用最多的是显像设备。核医学显像为核医学主要的工作内容,显像设备决定了核医学诊断的方式与水平。显像设备的发展经历了扫描仪、 γ 相机(Gamma camera)、SPECT、PET、PET/CT、SPECT/CT、PET/MRI等,代表了核医学发展的各个不同的时代。

一、扫描仪

1950年闪烁探测器的问世,使核射线探测灵敏度大幅提高,在此基础上,功能测定仪器及扫描仪很快问世。1951年美国加州大学的卡森(Benedict Cassen)研制出第一台扫描仪,通过逐点打印获得器官的放射性核素分布图像。20世纪60年代初,我国开始应用扫描仪,对脏器进行显像。我国自己研制的扫描仪成为20世纪90年代前我国核医学显像的主要设备。我国在20世纪70年代初开始引进 γ 相机,1983年开始引进单光子发射型计算机断层扫描(SPECT),截至2015年底,我国已有SPECT 357台、SPECT/CT 304台、复合线路89台、 γ 相机15台、肾图仪8台、甲功仪421台、 γ 计数器847台、液闪仪168台。当时,放射性核素显像已具一定规模,其中扫描仪仍然是显像的主要手段;核素显像、功能测定及体外分析是核医学诊断主要形式。此后,SPECT迅速发展,逐渐取代了扫描仪成为核素显像的主要设备。

扫描仪的发展经历了黑白图像及彩色图像阶段。黑白扫描仪的探头采用NaI晶体(sodium iodide crystal),晶体厚度50 mm,直径为75 mm~200 mm。其工作原理为:探头沿弓形路线逐点往复扫描人体被显像部位像,探头在每个点处的输出信号经过电路放大、幅度分析等处理,转换成频率与计数率成正比的电脉冲,每个电脉冲驱动打印装置在纸上打出一个色点,色点越多,颜色越深,代表探头位置的放射性浓度越高。打印装置在纸上沿和探头相同的弓形路线逐点打印,将各个点的计数率打印到纸上,形成了放射性分布的黑白图像。

彩色扫描仪将计数率按其大小分成不同的区段,用不同的颜色打印,可形成放射性分布的彩色图像。

扫描仪图像为二维平面图像,人体内不同深度的信息叠加在一起。

二、 γ 相机

1958年哈尔·O·安格(Hal O. Anger)等研制出第一台 γ 相机。 γ 相机探头由准直器

(collimator)、NaI 晶体及光电倍增管阵列组成,晶体厚度 6 mm~12.5 mm,直径为 250 mm~500 mm。工作时,将需显像的人体部位置于探头下,体内的放射性核素发射出的一个 γ 光子首先经过准直器,投射到晶体上,晶体转换此 γ 光子成多个可见闪烁光,闪烁光的数量与 γ 光子能量成正比。光电倍增管将闪烁光变为电信号并放大,形成一个电脉冲,电脉冲的幅度与 γ 光子能量成正比。能量甄别电路首先判断该脉冲的幅度是否与被成像的 γ 光子能量相符,不相符者剔除不计录。通过能量甄别后,再由定位电路根据各相邻的光电倍增管输出脉冲强度的差异确定出闪烁光产生的位置,即 γ 光子入射的位置,最后在显示器上的相应位置上增加一个亮点。这样该电脉冲信号经过特殊能量电路甄别和位置电路定位,最后被记录成为一个计数。记录大量的闪烁光点,形成一幅体内放射性浓度分布图像,即为一幅 γ 相机图像。 γ 相机图像与扫描仪图像一样,也为二维平面图像,人体内不同深度的信息叠加在一起。但是 γ 相机图像质量远高于扫描仪图像。

为了纪念安格(Anger)的贡献,称上述 γ 相机为安格相机。安格相机的设计理念一直沿用至今,目前使用的 SPECT 均为安格相机旋转模式。我国 20 世纪 70 年代初开始引进 γ 相机,目前 γ 相机在临床中仍有应用。

三、SPECT

SPECT 可用于获得体内放射性核素的三维立体分布图像,是目前核医学临床中使用最多、最普及的设备。SPECT 的核心部件为 γ 相机, γ 相机探头可绕轴旋转即为 SPECT。SPECT 包含 γ 相机的所有功能。在很多临床应用中,SPECT 可以不旋转,只使用 γ 相机的功能,即仅获得平面图像。因此在一些文献资料中也称 SPECT 为 γ 相机。SPECT 可以有 1 个、2 个或 3 个探头,目前 2 个探头的 SPECT 最多。

事实上,SPECT 的研制工作早于 X-CT。1963 年戴维·库尔(David Kuhl)和罗依·爱德华(Roy Edwards)等研制成功了一种横向断面扫描仪(transverse sectional scanner),为 SPECT 的前身,受当时重建等技术的限制,图像质量差。1976 年凯斯(Keyes)研制出了第一台 γ 相机型 SPECT。此后 SPECT 发展迅速并不断地更新换代,使核医学显像技术从二维平面影像时代发展到三维断层影像时代。我国 1983 年开始引入 SPECT。SPECT 逐渐取代了扫描仪。在 20 世纪 90 年代成为临床中普遍应用的显像设备。目前我国 SPECT(含 SPECT/CT)已有 600 多台,是各种核医学显像设备中数量最多的设备。

在 SPECT 断层成像采集时,探头围绕患者旋转。在旋转的过程中,探头表面总是与旋转轴平行,旋转轴与患者检查床平行。根据需要在预定时间内采集 360°范围内不同角度(方位)处的平面图像,任一方位的平面图像称为投影图像(projection image)。利用在各个方位获得的多幅投影图像,通过数据处理、校正、图像重建,最终获得体内断层图像,即 SPECT 断层图像。

SPECT 利用不同的放射性药物对人体各组织器官进行功能显像,其放射性药物主要为 ^{99m}Tc 标记,目前 SPECT 已成为临床中必不可少的影像设备。

四、PET

PET 的全称为正电子发射计算机断层扫描(positron emission computer tomography)。PET 与 SPECT 根本的不同有两点:一是采用正电子核素标记的放射性药物,使用的正电子核素[例如, ^{18}F (与 H 的化学性质很相似)、 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{11}C]本身为人体组成的基本元素,可标记参与活体代谢的生物活性分子,可提供在分子水平上反映体内代谢的影像;二是不使用准直器,而采用符合探测,使空间分辨力及灵敏度同时得到大幅度提高。体内的正电子核素衰变时发射出正电子,正电子减速后,与体内的自由电子形成正负电子对,发生湮灭辐射,正负电子对消失,转换为两个能量均为 511 keV 且方向相反的 γ 光子,PET 通过探测这两个光子进行成像,当相对的两个探测器几乎同时(一个很短的时间内)探测到 511 keV 的 γ 光子时,就可确定这两个探测器间有一个湮灭事件,记录该事件,即为一个计数,为此 PET 探头一般设计为环形结构。对探头各方向探测到的所有数据进行处理及图像重建,可获得体内放射性浓度的三维分布图像,即 PET 断层图像。

PET 于 20 世纪 70 年代问世。90 年代前,PET 主要用于科研,安装在研究机构。90 年代后,正电子类示踪剂的独特生物学优势逐渐显露,PET 开始进入临床。PET 的性能不断提高,装机量也逐年上升,到 90 年代末,美国及欧洲一些国家政府和保险公司已将多种 PET 检查列入医疗保险范围。1995 年我国开始引进 PET,到 2001 年底,我国已有 10 台 PET,标志着我国的核医学显像进入新的时代。PET 显像应用绝大部分为肿瘤显像,其次为心肌及脑显像。PET 较之前的核医学显像在定量分析方面有独特的优势,使核医学显像从定性时代进入到定量时代。

进入 21 世纪,随着 PET/CT 的应用,单独的 PET 逐渐被 PET/CT 所取代。

五、PET/CT

世界上第一台 PET/CT 于 2001 年安装在瑞士苏黎世大学医学院。2002 年,PET/CT 进入我国。这在我国核医学仪器设备史上第一次缩短了与国际的差距,在使用时间上与国际接轨。PET/CT 的发展非常迅猛,到 2015 年,我国已有近 300 台 PET/CT,已成为临床中不可或缺的成像设备。

PET/CT 使我国核医学进入到了崭新的时期。PET/CT 将 PET 和 CT 在硬件、软件及图像上有机地融合在一起,是核医学和放射影像学飞速发展、紧密结合的产物,是不同于 PET 及 CT 的新型影像设备。PET/CT 把 PET 与 CT 融合在一起,给功能影像赋予了精细的解剖结构,在一幅 PET/CT 图像上,我们既可以获得丰富的分子代谢的功能信息,又能了解病灶与脏器及其他组织的解剖关系,对恶性肿瘤甚至还可以勾画出生物靶区以供放射治疗参考。此外,CT 还可以为 PET 图像重建提供衰减校正信息。

PET/CT 主要应用于肿瘤显像,其次用于心肌及脑显像,可用于疾病诊断、治疗及预后随访的全过程。PET/CT 的应用大大提高了肿瘤诊断的灵敏度、特异性和精确度。此外,PET/CT 在现代放疗确定生物靶区方面有不可替代的独特优势。

PET/CT 的应用为核医学带来了新的发展前景,它使核医学本身突破了自己的范畴进

入到其他学科领域,并使其他学科渗透到了核医学的领域。PET/CT 不仅是设备的融合,还有知识的融合、人才及学科的融合。PET/CT 已成为最先进的医学影像技术的标志。

随着 PET/CT 的应用,医学影像学进入分子影像学时代。分子影像学是医学影像技术与分子生物学相结合的产物,其定义为:在活体状态下,从分子水平,应用影像学技术对生物过程进行定性和定量的研究。从临床角度看,分子影像学是借助现代影像学技术,从分子水平去研究和观察疾病的发生、发展和病理生理变化过程。核医学影像显示放射性示踪剂(放射性药物、显像剂)分子在体内的分布,因此,核医学影像,特别是 PET/CT 成为分子影像技术的主要内容。

六、多功能 ECT

PET 及 PET/CT 在临床应用中有其独特的优势,但其价格昂贵,因此一种兼容型 ECT (emission computed tomography)在 20 世纪末应运而生。这种兼容型 ECT 是在 SPECT 系统上加上符合探测的软硬件,既有普通 SPECT 的功能,又能对正电子进行符合成像,即具有 PET 的功能,因此也称为多功能 ECT 或带符合线路 SPECT、SPECT/PET、兼容型 PET (hybrid PET),其价格低于专用型 PET。融合 CT 后成为 SPECT/PET/CT。这种设备一问世,受到发展中国家青睐。我国 21 世纪初开始引进 SPECT/PET/CT,到 2008 年年底,我国安装近百台。但是这种设备的性能与专用型 PET/CT 有一定的差距,为 PET/CT 的一种过渡设备。随着 PET/CT 的发展,这种多功能 ECT 已逐渐退出。

七、SPECT/CT

SPECT/CT 比 PET/CT 问世还要早,1998 年鹰眼(Hawkeye)系列 SPECT/CT 已面市。但是,SPECT/CT 并未像 PET/CT 取代 PET 那样取代 SPECT,目前临床上在用的 SPECT 数量高于 SPECT/CT。因为只有在断层显像时 CT 才能发挥出其作用,而 SPECT 的很多临床应用只需获得平面图像。截止到 2013 年底,我国拥有 SPECT/CT 215 台。

CT 在 SPECT/CT 的作用与其 PET/CT 相同:为 SPECT 提供定位、衰减校正及诊断信息。在 PET/CT 中的 CT 均为高档诊断级 CT,而 SPECT/CT 中 CT 有三种规格:①诊断 CT,其性能同诊断专用 CT,可提供上述 3 种功能;②只提供衰减校正及大致定位信息,其管电流只有 2.5 mA;③可提供有限的诊断信息,提供定位及衰减校正功能,其管电流可达 30 mA。但是,随 CT 功能增强,患者所受 X 射线辐射剂量会增加。

SPECT/CT 与 PET/CT 类似,SPECT 探头与 CT 的探头分离,通过检查床的移动依次采集。

八、PET/MRI

PET/MRI 是将 PET 和 MRI(Magnetic Resonance Imaging,磁共振断层扫描仪)技术整合在一起的一种影像设备。

MR 成像技术能够提供很好的软组织对比度、高的空间和时间分辨力、组织多参数和功

能成像;而 PET 成像技术具有很多特异性的示踪剂和很高的灵敏度。所以这两种成像技术的整合具有重要的临床和科研意义。

将 PET 和 MRI 相结合的研究起始于 20 世纪 90 年代早期,主要集中于小动物影像。2006 年美国田纳西州 Knoxville 医学中心在北美放射学年会(RSNA)上报道了首例用西门子公司头部 PET/MRI 一体机同步采集的人脑融合图像,取得了令人振奋的效果,揭开了一体式 PET/MRI 临床应用的新篇章。

2010 年的北美放射学会年会上,西门子公司高调推出了具有里程碑意义的临床用全身扫描型 PET/MRI 一体机(Biograph mMR)系统。该系统采用磁兼容的镓硅酸盐(LSO)晶体和磁兼容的雪崩光电二极管(avalanche photodiodes, APD)组成 PET 探测器环,并将其内置于直径为 70 cm 孔径的 3T 超导 MRI 磁体腔内,实现了 MRI 系统与 PET 系统的同空间、同中心和同步扫描。而且, PET/MRI 一体机的孔径达到 60 cm,与临床常规 MRI 的标准孔径一致。遗憾的是由于 APD 的时间分辨力较差,在 PET 中无法实现 TOF 技术。

2013 年 GE 公司推出了自己的 PET/MRI 一体机,其最大亮点是 PET 探测器中采用的是硅光电倍增管(SiPM,工作在盖革模式的 ADP 阵列),SiPM 的时间分辨力达到了传统光电倍增管的水平,因此这款机型中 PET 实现了 TOF 技术。不过,目前这款机型还未正式上市。

PET 在 MRI 的磁场环境中不能正常运行,这是 PET/CT 所不曾遇到的最大挑战。即使通过磁屏蔽技术实现了 PET 和 MRI 的背靠背组合,但由于 MRI 的扫描时间远大于 CT,与 PET 相当,这样不同步扫描的时间要比 PET/CT 大一倍,这从经济和临床上都是较难接受的。因此追求同空间同步扫描的 PET/MRI 一体机一直是研究者努力的方向。Biograph mMR 的出现,标志着 PET 和 MRI 技术上的突破,可以说是影像技术的一场革命。

目前临床型 PET 和 MRI 组合有 3 种方式:

(1) 异室方式

PET 或 PET/CT 和 MRI 分别安装在相邻的两个房间中,检查床可自由移动,通过软件将分别获得的 PET 和 MRI 图像融合。其缺点是扫描不同步使检查总时间过长,且易造成融合失配准。

(2) 分体方式

PET 和 MRI 间隔 2 m 并平行安装在同一室内,检查床放在 PET 和 MRI 之间,通过 180°旋转检查床先后完成 PET 和 MRI 检查。同样存在上述问题,但融合失配准程度低。

(3) 整合方式

将 PET 和 MRI 安装在同一机架内,并保证二者扫描视野的同一性,使 PET 和 MRI 真正实现同空间、同中心和同时间的数据采集,这是最理想的一体机设计。

第二章 放射性探测仪器的基本原理

射线是一种能量很高的特殊粒子,必须用特定的装置把射线转换成可以被普通仪器记录的电信号才得以探测。通常都是利用射线和物质的相互作用产生的各种效应将射线转换为另一种便于探测的信号。在射线能量转换后,利用相应的探测设备将转换后的信号经过一系列的转化、放大及处理后,直观地以图像的方式显示出来,最终成功对放射性核素的分布进行显像。对核素在生物体内的分布、代谢进行显像是核医学的重要内容,核医学显像的主要仪器包括单光子发射型计算机断层扫描(SPECT)和正电子发射型计算机断层扫描(PET),两种显像仪器对放射性的探测和显像具有一定的相似之处。本章将重点介绍放射性探测仪器的基本原理和方法及主要结构。

第一节 放射性探测仪器的基本原理和方法

一、放射性探测的基本原理

放射性探测是用探测仪器把射线能量转换成可记录和定量的光能、电能等,通过一定的电子学线路分析计算,表示为放射性核素的活度、能量、分布的过程,其基本原理是建立在射线与物质相互作用的基础上。核医学显像仪器主要利用激发-荧光现象进行核医学显像。

激发-荧光显像:带电粒子直接激发闪烁物质(NaI 晶体),当被激发的闪烁分子退回到低能级时发出荧光。 γ 射线是通过与物质相互作用的光电效应、康普顿效应或电子对生成效应产生次级电子,再由次级电子激发闪烁物质发出荧光。荧光的亮度和数量分别与射线的能量和数量成正比。通过光电倍增管将荧光转化为电信号并放大,经电子线路处理分析,测得射线的相关信息(活度、分布等)。

二、放射性探测的基本方法

用于放射性探测的仪器种类繁多,但基本结构是一致的,由两部分组成,包括放射性探测器和后续电子单元。放射性探测器常被称为探头,主要目的在于将射线能量转换为电能,通过射线在其中产生电离或激发,并将产生的离子或荧光收集并转变为可记录的电信号而实现。常见的探测器主要包括:以固体或液体为介质的闪烁探测器、以气体为介质的气体电离探测器、半导体探测器和感光材料探测器。核医学显像仪器所用探测器主要包括闪烁探测器和半导体探测器,固体探测器是目前应用最普遍、最广泛的探测器。

第二节 闪烁探测器

射线使闪烁探测材料的原子激发,原子从激发态回到基态或较低能态时发出闪烁荧光[这些荧光为可见光(波长在 400 nm 左右),可用肉眼观察到,因此称为闪烁探测]。闪烁荧光可通过光电倍增管转换成电信号,经放大后记录下来。入射到闪烁探测材料的一个 γ 光子或射线粒子(β 粒子、电子),可产生多个荧光光子,经光电倍增管转换放大,输出一个电脉冲。电脉冲的幅度取决于荧光光子的数量,与闪烁探测材料吸收的能量成正比。记录电脉冲的数量、幅度、波形可以获得射线的强度、能量、种类等信息。核医学中大部分仪器设备均采用此类闪烁探测原理,这包括所有的显像设备(如 γ 相机、SPECT、PET、PET/CT 等)和非显像测定仪器(如肾功能测定仪、甲状腺功能测定仪)以及体外分析仪器(如井型 γ 计数器、放免测量仪及液闪测量仪等)。

按照不同的闪烁探测材料,探测仪器设备可分为液体闪烁探测器(液闪仪)和晶体闪烁探测器等。固体闪烁探测材料又分为有机晶体和无机晶体。目前核医学中常用的闪烁探测材料为固体闪烁晶体,因此本节将重点介绍固体闪烁探测器。固体闪烁探测器既可测定射线强度,也可测射线能量。闪烁探测器有较高的探测效率,可探测各种类型的辐射,并能在很高计数率下工作。

一、结构与原理

固体闪烁计数器(solid scintillation counter)是核医学最常用的核射线探测器,主要由晶体(闪烁体)、光导、光电倍增管、前置放大器及后续电子学线路等组成。晶体、光电倍增管、前置放大器等部件共同组成探测器(探头),其主要作用是将射线能量转换成电脉冲信号,入射粒子射到闪烁体上,引起闪烁体中原子激发,原子退激发出荧光。荧光通过光收集部件进入光电倍增管,先通过“光阴极”产生光电效应发出光电子,光电子经光电倍增管中“倍增极”的倍增作用,逐级放大,最后在光电倍增管的“阳极”产生一个负脉冲,该脉冲的幅度的大小正比于射线能量,负脉冲数量的多少正比于射线强度。

二、晶体

用于放射测量的闪烁晶体是在放射线或原子核粒子作用下发生闪烁现象的晶体材料,其主要作用是将射线的辐射能转变为光能,因此又称为闪烁体(scintillator)。目前常用的闪烁体有两大类:无机闪烁体、有机闪烁体。无机闪烁体由无机晶体加少量杂质(激活剂)构成,如 NaI(Tl)、ZnS(Ag)等,前者用于探测 γ 射线,后者用于探测 α 粒子。有机闪烁体是芳香族的碳氢化合物,包括有机晶体(如蒽氏晶体)和塑料闪烁体。无机闪烁体对 γ 射线的测量优于有机闪烁体,使用最广泛。

不同材料的晶体对探测器性能有不同的影响。NaI(Tl)晶体的特点是光子产额最大,发射波长与光电倍增管光阴极的匹配性好,有很高的发光效率,并且在发光波段有明显的吸收,对 X 射线和 γ 射线均有良好的分辨能力。此外,它的价格便宜,制备较为方便,晶体的大