

全国医用设备使用人员业务能力考评教材

核医学影像技师

主 审 李亚明
主 编 王 铁
副主编 尹大一



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

全国医用设备使用人员业务能力考评教材

核医学影像技师

主 审 李亚明

主 编 王 铁

副主编 尹大一

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 铁 首都医科大学附属北京朝阳医院

尹大一 中国人民解放军总医院

朱 虹 南京军区总医院

杨 志 北京大学肿瘤医院

李亚明 中国医科大学附属第一医院

李春林 首都医科大学附属北京友谊医院

陈英茂 中国人民解放军总医院

林岩松 北京协和医院

耿建华 中国医学科学院肿瘤医院

贾 强 天津医科大学总医院

人民卫生出版社

图书在版编目(CIP)数据

核医学影像技师/王铁主编.—北京:人民卫生出版社,
2015

全国医用设备使用人员业务能力考评教材

ISBN 978-7-117-20964-9

I. ①核… II. ①王… III. ①核医学-影像诊断-资格考试-教材 IV. ①R814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 133958 号

人卫社官网	www.pmph.com	出版物查询,在线购书
人卫医学网	www.ipmph.com	医学考试辅导,医学数据库服务,医学教育资源,大众健康资讯

版权所有,侵权必究!

核医学影像技师

主 编:王 铁

出版发行:人民卫生出版社(中继线 010-59780011)

地 址:北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编:100021

E-mail: pmph@pmph.com

购书热线:010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷:三河市博文印刷有限公司

经 销:新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:15

字 数:374 千字

版 次:2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号:ISBN 978-7-117-20964-9/R·20965

定 价:42.00 元

打击盗版举报电话:010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

前言

核医学在中国已有将近 60 年的历史,最近 10 年随着 PET(PET/CT)和 SPECT(SPECT/CT)等大型核医学影像设备的进步,核医学已经成为临床诊疗疾病不可或缺的平台。目前全国 PET(PET/CT)已经安装 200 余台,并且每年以 20% 的速度增长,SPECT(SPECT/CT)将近 600 台,同时 PET/MRI 也在陆续装机。全国核医学大型设备年检查量 230 万例,从业人员 8600 多人。但是在规范临床操作,保证诊疗质量方面还有待进一步提高。由于核医学在临床的应用越来越广泛,诊疗价值越来越重要,规范常规诊疗工作已成为保证诊疗质量的关键所在,这对于提高核医学诊疗质量、保护患者的利益、促进学科发展具有极其重要的意义。

为切实提高核医学大型设备使用人员的业务能力,中华医学会和国家卫生计生委人才交流服务中心自 2004 年开始分别组织对全国医用设备使用人员进行培训和专业技术知识统一考试。为使应试者了解考试范围,国家卫生计生委人才交流服务中心组织有关专家编写了《全国医用设备资格考试大纲》,作为应试者备考的依据。由于没有正式出版的配套教材,应试者感觉备考很迷茫。为此,来自全国 19 所院校和医疗机构的核医学专家编写了本套教材。

本套教材包含了《核医学影像医师》、《核医学影像技师》和《核医学物理师化学师》三本书。《核医学影像技师》共十八章:第一章至第八章是核医学总论、基础知识、仪器设备、放射防护和放射性药物的相关知识,第九章至十八章是核医学在各系统的临床应用,主要以核医学在各系统检查中的临床操作,如显像原理、给药方法和给药途径、图像采集、图像处理和注意事项为重点内容。力求通过对本书的学习,能够使核医学大型设备使用人员的业务能力达到考核所要求的水平。

本书除作为全国医用设备使用人员业务能力考评教材外,还可作为住院医师规范化培训的参考书以及从事核医学专业人员的基本教材。尽管经过编写人员的认真修改与完善,但仍难免有所疏漏或错误之处,欢迎各位读者批评指正。

王 铁

目 录

第一章 核医学总论	1
第一节 核医学的定义、内容及历史	1
第二节 放射性核素示踪技术	2
第三节 放射性核素显像技术	4
第二章 核物理学基础	7
第一节 原子与原子核	7
第二节 原子核的放射衰变	11
第三节 放射性活度	12
第四节 放射性核素的衰变规律	13
第五节 射线与物质的相互作用	15
第六节 电离辐射量及其单位	19
第三章 核医学设备	24
第一节 核医学仪器设备分类	24
第二节 活度计	26
第三节 放射防护仪器	27
第四节 SPECT 与 γ 相机	28
第五节 CT	35
第六节 SPECT/CT	40
第七节 PET	41
第八节 带符合线路的 SPECT	50
第九节 PET/CT	52
第十节 Micro PET	53
第十一节 非显像测量仪器	54
第四章 成像参数选取原则	56
第一节 准直器	56
第二节 图像采集参数	57
第三节 图像重建参数	58
第五章 图像采集方式	60

第一节	静态采集	60
第二节	动态采集	61
第三节	断层采集	63
第四节	门控采集	64
第五节	表模采集	65
第六章	核医学设备与成像的质量控制	67
第一节	性能指标测试步骤与标准	67
第二节	常规维护与预防性质量控制	76
第三节	质量控制频度	80
第七章	核医学放射防护	83
第一节	放射生物效应	83
第二节	照射	84
第三节	放射防护的标准与原则	84
第四节	核医学工作场所	87
第五节	核医学工作中的防护	88
第六节	核医学诊疗患者的防护	94
第七节	放射性药品的管理	100
第八节	放射性废物处理	103
第九节	放射性事故应急处理	104
第八章	放射性药物	106
第一节	放射性药物的制备	106
第二节	放射性药物的质量控制	110
第三节	放射性药物的正确使用、不良反应及其防治	111
第四节	临床常用的放射性药物	112
第九章	神经系统	116
第一节	脑血流灌注显像	116
第二节	^{18}F -FDG PET 脑显像	118
第十章	循环系统	120
第一节	心肌灌注显像	120
第二节	硝酸甘油介入试验心肌灌注显像	124
第三节	平衡门控心血池显像	125
第四节	首次通过心血池显像	128
第五节	^{18}F -FDG 心肌葡萄糖代谢显像	129
第六节	放射性核素大动脉显像	131

第七节	放射性核素静脉显像	133
第十一章	消化系统	135
第一节	食管通过显像	135
第二节	胃食管反流显像	137
第三节	胃排空显像	138
第四节	十二指肠-胃反流显像	140
第五节	消化道出血显像	141
第六节	异位胃黏膜显像	142
第七节	放射性核素肝胆动态显像	144
第八节	肝血流灌注和肝血池显像	146
第九节	门静脉分流显像	147
第十二章	呼吸系统	149
第一节	肺灌注显像	149
第二节	肺通气显像	151
第十三章	泌尿系统	153
第一节	肾动态显像	153
第二节	肾静态显像	154
第三节	肾小球滤过率测定(GFR)	156
第四节	肾有效血浆流量(ERPF)	157
第五节	肾图	158
第六节	肾功能检查介入试验	159
第十四章	内分泌系统	161
第一节	甲状腺静态显像	161
第二节	甲状腺血流显像	162
第三节	甲状腺吸 ¹³¹ I 功能试验	163
第四节	甲状腺激素抑制试验	165
第五节	甲状旁腺显像	166
第六节	甲状腺阳性显像	168
第七节	寻找甲状腺癌转移灶	172
第八节	肾上腺皮质显像	176
第九节	肾上腺髓质显像	177
第十五章	血液与淋巴系统	180
第一节	骨髓显像	180
第二节	淋巴显像	182

第三节 脾脏显像	185
第十六章 骨骼系统	188
第一节 全身骨显像	188
第二节 骨断层显像	190
第三节 三相骨显像	191
第四节 骨关节与骨局部显像	192
第十七章 肿瘤显像	195
第一节 ^{18}F -FDG PET/CT 肿瘤显像	195
第二节 ^{201}Tl 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI 亲肿瘤显像	197
第三节 $^{99\text{m}}\text{Tc}(\text{V})$ -DMSA 肿瘤阳性显像	199
第四节 ^{67}Ga 肿瘤显像	201
第五节 放射免疫显像	203
第十八章 炎症显像	206
第一节 放射性核素标记白细胞显像	206
第二节 ^{67}Ga 炎症显像	208
全国医用设备使用人员业务能力考评核医学影像技师专业考试大纲	211
参考文献	227

第一章

核医学总论

第一节 核医学的定义、内容及历史

1. 核医学的定义 核医学是利用核素或核射线诊断、治疗疾病和进行医学研究的学科。

核医学是核技术与医学相结合的产物;广泛应用于疾病诊断、治疗及临床研究,几乎涉及医学各个学科和专业领域。核医学的应用可以使疾病诊断更加全面、深入,使疾病治疗更加科学、合理,是现代医学重要组成部分。在医疗单位,核医学是一门独立的临床医学学科。

2. 核医学的内容 核医学分为实验核医学和临床核医学两部分。

实验核医学主要包括放射药理学、放射性核素示踪技术、放射性核素示踪动力学分析、活化分析、放射自显影以及稳定性核素分析等。其任务是利用示踪技术进行医学研究,发展、创立新的诊疗技术和方法,推动临床核医学的发展,促进医学科学的进步。

临床核医学是核医学的重要部分,有显像、功能测定、体外分析及治疗等4大技术手段。临床核医学利用核医学的各种原理、技术和方法来研究疾病发生、发展,研究机体病理生理、生物化学和功能结构的变化,为临床提供病情、疗效及预后信息,达到诊治疾病目的。根据应用目的不同,临床核医学分为诊断核医学和治疗核医学两大部分。诊断核医学包括显像、功能测定、体外分析等;治疗核医学分为内照射治疗和外照射治疗两类。外照射治疗是用放射性核素体表敷贴进行照射的治疗;内照射治疗是将放射性核素引入体内病变靶区进行照射的治疗,内照射治疗是治疗核医学的主要内容。

随着临床核医学的不断发展和完善,又逐步细化形成了各系统核医学,如心血管核医学(又称核心脏病学)、内分泌核医学、神经系统核医学、消化系统核医学、呼吸系统核医学、造血系统核医学、泌尿系统核医学以及肿瘤核医学等分支学科。它反映了核医学不断成熟与完善的过程。

3. 核医学发展简史 1896年法国物理学家亨利·贝可勒尔发现铀(U、92号元素)的放射性,第一次认识到自发放射现象。1898年波兰化学家玛丽·居里与她的丈夫皮埃尔·居里共同发现了镭(Ra、88号元素)盐具有“放射性”,此后又发现了钋(Po、84号元素)和钍(Th、90号元素)也具有放射性,并把它们命名为“放射性元素”。1903年贝可勒尔和居里夫妇共获诺贝尔物理学奖;1911年居里夫人又获得诺贝尔化学奖。

1899年,出生于新西兰的英国科学家欧内斯特·卢瑟福发现了穿透力很强的 α 、 β 粒子。1910年英国科学家弗雷德里克·索迪提出了核素假说。1903年二人合作并确立了核素衰变理论。分别于1908年和1921年获诺贝尔化学奖。

1923 年匈牙利化学家格奥尔格·赫维西(乔治·海韦希)利用 Pb-212 在豆类植物进行生物示踪实验;1934 年用氘水测全身含水量,第一次在人体应用稳定性核素;1935 年他首次用 P-32 用于生物示踪研究;同年又创立了中子活化分析法。1943 年获诺贝尔化学奖。在核医学界,被称为“基础核医学之父”。1926 年美国波士顿医院内科医师赫尔曼·布卢姆加特首先应用氩研究循环时间,第一次应用了示踪技术,后来又进行了多领域的生理、病理和药理研究。在核医学界,被称为“临床核医学之父”。

1930 年美国物理学家劳伦斯生产出第一台回旋加速器。1934 年艾伦·居里和她的丈夫约里奥用 α 粒子照射 Al 生成 ^{30}P ,第一次用人工方法生产了放射性核素。1942 年费米在芝加哥大学建立了世界上第一座核反应堆。这些为此后人工放射性核素的大量生产奠定了基础。

1951 年美国加州大学的卡森(Cassen)研制第一台扫描机,通过逐点打印获得器官的图像,促进了显像的发展。美国核医学协会专门设立了“Cassen 奖”。1957 年 Anger 研制出第一台 γ 照相机,称 Anger 照相机,并在日内瓦原子能和平会议上展出。

1959 年美国戴维·库赫研制出双探头扫描机,并首先提出了发射式重建断层技术。1972 年应用三维显示法,用 ^{18}F -FDG 测定了脑局部葡萄糖的利用率。他的发明成为正电子发射型计算机断层成像(PET)和单光子发射型计算机断层成像(SPECT)技术的基础。被人们称为“发射断层之父”。

1960 年美国 Berson 和 Yalow 建立了放射免疫分析法,并用于测定血浆胰岛素浓度,1977 年为此获得了诺贝尔生物学奖。

1968 年美国 John Hopkins 医学院的 Henry Wager 教授确立了“核医学”的概念,1969 年医院的同位素科开始改名为核医学科。

此后核医学发展的主要标志是:计算机技术广泛应用于核医学领域;SPECT、PET、PET/CT 相继研制成功并应用于临床。

我国核医学发展较晚。1956 年,在军委卫生部领导下,丁德洋和王世真教授主持,在第四军医大学举办了“生物医学同位素应用训练班”。标志着中国核医学的诞生。1958 年,在北京举办了第一个“同位素临床应用学习班”,标志着我国临床核医学正式起步。同年北京苏联红十字医院(现首都医科大学附属北京友谊医院)和北京医学院第一附属医院(现北京大学第一医院)等医院在前苏联专家的帮助下建立了同位素室。1977 年开始,我国将核医学列为医药院校本科生必修课程。1980 年,中华医学会核医学分会成立,1981 年,《中华核医学杂志》创刊,2012 年《中华核医学杂志》更名为《中华医学会核医学与分子影像学杂志》。

第二节 放射性核素示踪技术

放射性核素示踪技术是核医学最基本、最核心、最重要的技术,也是核医学应用的方法学基础。核医学的特点都和放射性核素示踪技术有关,核医学优势取决于它,核医学不足也源于它。放射性核素示踪技术是利用放射性核素及其标记化合物作为示踪剂(tracer),应用射线探测方法来检测它的行踪,用以研究生物体内各种物质的分布以及变化规律的一门技术。可以通过放射性探测仪器追踪该放射性核素示踪剂在体内位置、数量及变化过程,来研究生物体内相应物质的吸收、分布、代谢、排泄、转移等规律。

1. 示踪剂的概念 示踪剂是一种能显示它踪迹的物质。放射性核素示踪剂就是示踪

剂中标记有放射性核素,探测、追踪的是放射性核素所发出的射线。

2. 示踪技术的原理 包括放射性核素示踪技术在内,示踪原理都是基于示踪剂具有“同一性”和“可测性”两个性质:

(1)同一性:放射性核素及其标记化合物和相应的非标记化合物具有相同的化学及生物学性质,生物体不能区分,可以无差别参与生物代谢,其化学及生物学过程是同一的。因此,放射性核素标记化合物和相应的非标记化合物具有同一性。例如,放射性核素标记的 ^{18}F -脱氧葡萄糖与相应的非标记的脱氧葡萄糖在体内的化学及生物学过程完全相同。

(2)可测性:放射性核素示踪剂在体内的生物学行为取决于被标记物,而能够探测到其行踪则取决于放射性核素发出的射线。例如,用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等单光子核素标记的示踪剂可以被SPECT等仪器探测,而用 ^{18}F 等正电子核素标记的示踪剂可用PET探测。

3. 示踪技术的优点

(1)灵敏度高:可以精确地探测出极微量的物质。目前的核探测技术可测量最低37Bq的放射性核素,相当于能检出 $10^{-18} \sim 10^{-19}\text{g}$ 水平的放射性核素。这对于研究体内或体外微量生物物质的含量具有特殊价值。

(2)操作简便:只需测定放射性核素发射的射线数量即可确定核素的量。不受反应体系中其他非放射性杂质的干扰,不需要化学分析方法中的分离、提纯等繁杂步骤。

(3)干扰因素少:示踪剂中放射性核素的衰变有其自身固有的衰变规律,不受物理和化学等因素影响。示踪实验条件的改变不会影响其衰变,只要测量技术可靠就可获得较高的准确性。

(4)合乎生理条件与安全:由于放射性核素示踪技术方法灵敏度高,所需示踪剂化学量很少,不会干扰和破坏体内生理过程的平衡。反映的是被研究物质在生理状态下的代谢变化,所得结果更接近于真实的生理情况。由于使用示踪剂化学量很少,在引入体内时发生过敏等不良反应的机会很少。

(5)定量及定位功能:放射性核素示踪技术不仅能定量测定和进行动态研究,而且还可进行细胞水平的定位分析。

4. 示踪技术的缺点与局限性

(1)辐射分解:放射性核素发射的射线照射示踪剂自身,可引起辐射分解。其分解产物影响测量准确度。因此示踪剂应随生产随使用,不宜长时间保存。

(2)同位素效应:由于同位素的中子数不同,质量不同,可能影响其化学性质及生物学行为,即同位素效应。同位素效应轻元素较明显,临床核医学同位素效应很小,可忽略不计。

(3)放射防护问题:由于放射生物效应,使用不当可能会对受检者、工作人员产生一定的伤害。因此需要采取必要的放射性防护措施。

5. 示踪技术的主要类型及应用 放射性核素示踪技术主要分为体内示踪技术和体外示踪技术两大类。放射性核素示踪技术是核医学的精髓。以放射性核素示踪技术为基础,吸收、融合其他科学技术,建立了许多重要的方法。例如,将放射性核素示踪技术与生理数学模型结合,建立了放射性核素动力学分析方法,用于药代动力学分析、增殖细胞的细胞周期时间测定和脏器功能测定;将放射性核素示踪技术与成像技术结合建立了放射性核素显像方法,用于组织和脏器的功能、代谢显像;将放射性核素示踪技术与免疫学结合,建立了放射免疫分析技术,进一步结合单克隆抗体技术,发展了放射性免疫显像技术与放射性免疫治疗技术等。

第三节 放射性核素显像技术

一、显像原理

放射性核素显像技术是以示踪技术为基础的临床核医学常用技术,是放射性核素示踪技术与成像技术结合的产物。放射性药物引入体内后,将根据药物与脏器或组织的相互作用,参与机体的代谢过程,被脏器或组织吸收、分布、浓聚和排泄。由于放射性核素在自发地衰变中能发射出射线,如 γ 射线,因此,利用显像仪器能够准确获得核素及其核素标记物在脏器、组织的分布和量变规律,从而达到诊断疾病的目的。

二、脏器或组织摄取显像剂的机制

1. 合成代谢 脏器和组织的正常合成功能需要某种元素或一定的化合物,若用该元素的放射性核素或利用放射性核素标记特定的化合物引入体内,可被特定的脏器和组织摄取,从而进行体外显像。例如, ^{18}F 标记的脱氧葡萄糖(^{18}F -FDG)与一般葡萄糖一样可作为能源物质被心肌细胞、脑细胞和肿瘤组织摄取,用正电子发射计算机断层仪(PET)获得图像,观察和分析心肌、脑及肿瘤组织的葡萄糖代谢状况。

2. 细胞吞噬 单核-吞噬细胞具有吞噬异物的功能。将放射性胶体颗粒等由静脉注入体内,放射性胶体作为机体的异物被单核-吞噬细胞系统的吞噬细胞所吞噬,可用于肝、脾、骨髓显像。而将放射性胶体颗粒注入皮下或组织间隙,则可以被淋巴组织吞噬,用于淋巴回流及淋巴结分布显像。

3. 循环通路 利用放射性核素进入循环通路的过程,可显示该通路及有关器官的影像。如经腰椎穿刺将放射性药物注入蛛网膜下腔,用于了解脑脊液循环异常;吸入放射性气体或放射性气溶胶,用于判断呼吸道的通气功能;通过静脉“弹丸”式快速注入放射性药物后,可以做放射性核素心血管显像;当显像剂随血流从动脉向相应脏器血管床灌注时,还可获得该脏器的动脉灌注影像;静脉注入直径大于肺毛细血管的放射性药物时,这些颗粒被肺毛细血管床阻断,暂时性的阻塞于部分肺微血管内使肺显像,可以观察肺内血流灌注的情况;将放射性药物引入体内某一空间可以显示该空间的大小和形态可用于心、肝等血池显像等。

4. 选择性浓聚 病变组织对某些放射性药物有选择性摄取作用,静脉注入该药物后在一定时相内能浓集于病变组织使其显像,如肿瘤阳性显像。

5. 选择性排泄 某些脏器对一些引入体内的放射性药物具有选择性摄取并排泄的功能,可显示脏器的形态,还可观察其分泌、排泄功能和排泄通道情况。如静脉注入经肾小管上皮细胞分泌或肾小球滤过的放射性药物,可以显示肾的形态、功能以及尿路通畅情况。使用经肝多角细胞分泌至毛细胆管并随胆汁排泄到肠道的放射性药物则可显示肝、胆囊、胆道及其通道的影像,用以判断肝、胆功能及胆道通畅情况等。

6. 通透弥散 进入体内的某些放射性药物借助简单的通透弥散作用可使脏器和组织显像。例如,静脉注入 ^{133}Xe 生理盐水后,放射性惰性气体(^{133}Xe)流经肺组织时从血液中弥散至肺泡内可同时进行肺灌注和肺通气显影。某些放射性药物能透过正常的血-脑屏障并较长期地滞留于脑组织,通过显像可了解脑局部的血流量。

7. 化学吸附和离子交换 静脉注入 ^{99m}Tc -亚甲基二磷酸盐(^{99m}Tc -MDP)后可使骨骼清晰显像,其影像分布可以反映骨代谢的活跃程度。其原理就是基于骨骼类似于一个离子交换柱,可以与某些离子或性质类似者进行交换和化学吸附。

8. 特异性结合 放射性标记的受体配体只与该受体结合,放射性标记的抗体只与相应的抗原结合,从而可使受体和含有特殊抗原的组织显影,这种影像具有高度的特异性。例如放射性碘标记的间位碘代苄胍能与肾上腺素能受体结合,使富含肾上腺素能受体的嗜铬细胞瘤及其转移灶等特异性显影。

放射性核素显像反映了脏器和组织的生理和病理生理变化,属于功能代谢影像。核医学显像已经由单纯功能代谢显像,向分子、功能代谢与形态相结合的显像。

三、显像类型

1. 静态显像 显像剂在脏器组织和病变内达到分布平衡时所进行的显像称为静态显像。

2. 动态显像 显像剂引入人体后以一定速度连续或间断地多幅成像,用以显示显像剂在脏器组织和病变内放射性在数量或位置随时间而发生变化的显像称为动态显像。

3. 局部显像 指显影范围仅限于身体某一部位或某一脏器的显像。

4. 全身显像 显像装置沿体表从头至脚或从脚至头做匀速移动,将采集全身各部位的放射性显示成为一帧影像称为全身显像。

5. 平面显像 放射性探测器置于体表的一定位置显示某脏器的影像为平面显像。

6. 断层显像 显像装置围绕体表作 180° 或 360° 连续或间断采集多体位的平面信息,或利用环状排列的探测器获取脏器各个方位的信息,经计算机重建,获得横断、冠状和矢状位或三维立体影像称为断层显像。

7. 早期显像 一般认为显像剂引入体内2小时内所进行的显像称为早期显像。

8. 延迟显像 显像剂注入体内2小时以后所进行的显像称为延迟显像。

9. 阴性显像 正常脏器和组织细胞可选择性摄取显像剂,而病灶区不能摄取显像剂,呈现放射性分布稀释或缺损(即“冷区”)的显像称为阴性显像,又称为“冷区”显像。

10. 阳性显像 病灶部位的放射性活度高于正常脏器组织的显像称为阳性显像,又称“热区”显像。

11. 静息显像 在显像剂引入人体或采集图像时,受检者处于安静状态,没有受到任何生理性刺激或药物干扰所进行的显像称为静息显像。

12. 负荷显像 在显像剂引入人体或采集图像时,给予受检者特定的生理性刺激或药物干扰所进行的显像称为负荷显像,又称为介入显像。

四、图像质量的评价

一幅好的图像应具备:影像轮廓完整、对比度适当、病灶显示清楚、解剖标志准确、图像失真度小等。

五、核医学显像的不足与图像融合

组织结构解剖分辨率低和解剖定位能力差是以放射性核素示踪技术为技术基础的核医学显像固有缺点,而这些恰恰是CT等影像技术的优势。为弥补核医学影像的不足,将核医

学影像与 CT、MRI 等解剖形态影像进行融合,称为“图像融合”。目前的图像融合技术分为同机图像融合和软件图像融合两种,前者主要包括 PET/CT 和 SPECT/CT 等,一次显像同时可以获得 CT 解剖影像和核医学功能代谢影像,大大改善了核医学影像质量。而后者精确性不如前者,但可以进行不同时间影像的比较,了解疾病的发展变化。同机图像融合技术是医学影像技术又一新的里程碑。

(李春林)

第二章

核物理学基础

第一节 原子与原子核

原子与原子核的有关知识是深刻理解核素的放射现象,掌握核医学诊疗方法和技术的基础。

一、原子结构

1. 分子、原子和元素

(1)分子是能保持物质化学性质的最小单位。

(2)原子是用化学方法不能再分割的物质存在的最小单位。

(3)原子的质量:不同的原子,质量不同。通常用质量的相对值来表示原子的质量。把自然界中最丰富的原子碳-12 的质量定为 12.000 个原子质量单位,将其作为原子质量的标准单位,其他原子的质量与碳-12 比较,定出质量值,称为原子量。原子量的单位为原子质量单位,简写为 amu 或 u,因为是以碳-12 为标准制定的,因此原子质量单位也称为碳单位。元素周期表中给出的原子量就是以原子质量单位为度量单位的值。

(4)原子的大小:不同的原子,大小也不同,但半径的数量级均为 10^{-10} 米(m)。

(5)元素:原子序数相同的一类原子总称为元素。到目前为止,发现的元素已经有 110 多种。

2. 原子的结构

(1)电子:电子的质量: $m_e = 9.109\ 39 \times 10^{-31}$ 千克(kg);电子的电量: $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ 库仑(C);电子带电符号为负。

(2)原子的结构:①结构:在原子的中心是一个原子核,电子在它的周围按一定的运行轨道绕核运行。②电量:原子不带电,是电中性的。电子带有负电荷,原子核带有与核外电子等量的正电荷。③受力:绕核旋转的带负电的电子受到原子核所带正电荷的静电吸引力,绕核高速旋转。④质量分配:原子核的质量比核外绕行电子的总质量大得多。一个电子的质量与氢原子核的质量之比为 1/1836。原子序数越大,核外电子的总质量与核的质量的比值越小。因此,原子的质量绝大部分集中在核内。⑤体积分配:原子核所占据的体积只是整个原子空间的极小一部分,原子核的直径一般在 10^{-15} m ~ 10^{-14} m 之间。⑥壳层结构:原子核周围的电子是按壳层排布的,每个电子都在其确定的圆形或椭圆形的轨道上绕核运行。这些电子轨道按其离核远近分为不同的壳层,离核最近的是第 1 层,其次是第 2 层,……,直到

第 n 层 (n 代表正整数)。习惯上用大写字母 K, L, M, N, O, P, Q 等代表核外电子轨道的不同壳层, 分别对应于 1, 2, 3, …… n 。⑦能级: 核外电子受到核的吸引, 具有势能。同时具有一定质量的电子以接近光速的速度绕核旋转, 又有动能。在不同轨道上, 电子的能量不同, 且只能取某个特定的值。这些特定的能量值是分离的、不连续的, 称这些分离的能量值为原子能级。电子轨道越靠近核, 其能级越高。允许的最低能级称为基态, 高于基态的能级称为激发态。基态为稳定的能级状态, 激发态是不稳定的能级状态, 其寿命很短。⑧激发与跃迁: 在一定的条件下, 原子核外的电子可以从一个轨道壳层跃迁到另一个壳层, 同时吸收或者放出一定的能量, 一般情况下为吸收或发射一个光子。从低能级跃迁到高能级过程称为激发, 从高能级跃迁到低能级过程称为退激。跃迁前后两轨道能级之差等于吸收或发射的光子的能量。

原子外层的电子轨道之间能级差较小, 而内层轨道之间能级差较大, 由此造成电子在较外层之间跃迁时, 会放出紫外光、可见光或红外光; 而在内层轨道间跃迁时, 如跃迁到 K 层或者 L 层轨道, 则会放出高能光子, 即 X 射线。

X 射线、紫外线、可见光、红外线、广播电视信号、微波及由核能级变化发出的 γ 射线, 本质上都是电磁波即光子, 只是波长、频率不同, 即具有的能量不同。

二、原子核的结构

人类对原子核的结构的认识是从放射性的发现开始的。

1. 原子核的组成 原子核是由质子和中子组成的, 它们在核内不停地运动。质子和中子统称为核子。

原子核具有一定的能量, 并且能量是量子化的。如同原子一样, 最低的能级称为基态, 高的能级称为激发态。在正常情况下, 原子核都处于基态。只有在核反应、核衰变过程中以及裂变产物中, 核才会处于激发态。核在激发态的寿命很短, 它将很快跃迁到基态或先跃迁到较低能级而后再跃迁到基态, 并放出 γ 射线或放射出粒子而变成新的核素, γ 射线的能量等于两个能级的差值 ΔE 。

$$\Delta E = h\nu$$

式中: h 为普朗克常数, $h = 6.6262 \text{ Js}$; ν 为 γ 射线的频率。

在核物理中, 能量的单位常用电子伏特 (eV) 表示, 与焦耳 (J) 之间的关系为:

$$1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$$

核医学中常用千电子伏特 (keV) 和兆电子伏特 (MeV)。

2. 原子核的大小 不同的原子核, 其大小也不同, 但其半径的数量级均为 10^{-14} m 。

3. 质子 质子是原子核的组成部分, 质子数等于核外电子数, 质子带正电, 一个质子所带电量与一个电子所带的电量大小相等、符号相反。质子的质量为: $m_p = 1.672\ 614 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

氢原子核实际上就是一个质子, 因此有时也用 ^1H 表示质子。

4. 中子 中子不带电, 中子的质量为: $m_n = 1.674\ 920 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。可见中子略重于质子。

5. 原子的质量数 原子的质量数等于原子核中质子数 Z 与中子数 N 之和, 即核子数。原子的质量数用 A 表示, 因此: $A = Z + N$ 。

6. 原子表示法 现在国际上表示元素原子的通用方法是将元素的符号写在正中央, 把

质量数 A 写在元素符号的左上角,把原子序数 Z 写在元素符号的左下角,而右上角有时用来表示元素原子的化合价、所带电荷或者激发态 m ,激发态 m 也可与质量数 A 一起写在左上,右下角有时用来表示分子状态。

$${}_{Z}^{Am}X^M$$

例如: ${}_{9}^{18}\text{F}$ 、 ${}_{6}^{11}\text{C}$ 、 ${}_{53}^{131}\text{I}$ 等。

在核医学中通常省略左下角的原子序数 Z 及右边的标志,只在左上角写出质量数即可。例如: ${}^{18}\text{F}$ 、 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 等。对原子核处在激发态的原子,用在左上角或右上角加 m 表示,例如,用 ${}^{99m}\text{Tc}$ 或 ${}^{99}\text{Tc}^m$ 表示原子核处在激发态的 ${}^{99}\text{Tc}$ 。

三、放射性与放射性核素

1. 放射现象 1896 年法国物理学家 H. Becquerel(贝可勒耳)实验时发现铀的化合物能使附近包在黑纸里边的照相底片感光,他当时断定铀能自发地放射出一种看不见但穿透力很强的射线。这是人类首次发现元素的放射现象。为了纪念他的功绩,定义放射性活度的国际单位为: Becquerel 简称 Bq(贝可)。

2. 放射线的本质 通过磁场对射线的分解实验,得知放射性元素可以发射出三种射线,将之命名为: α 射线、 β 射线、 γ 射线。

(1) α 射线: ①本质: α 射线的本质为带正电的粒子流,该粒子称为 α 粒子。它由两个质子和两个中子组成,其实就是氦原子核。②穿透能力: α 射线与 β 、 γ 射线比较,它的穿透能力最弱。它很容易被物质吸收,一张薄纸就能将 α 射线全部挡住,在空气中也只能穿透几个厘米。③电离本领: α 射线与 β 、 γ 射线比较,它的电离本领最强。

(2) β 射线: ①本质: 最早发现的 β 射线为高速运动的电子流。但是后来又发现了正电子,因此, β 射线包括两种: β^- 和 β^+ 射线。 β^- 射线为带负电的电子流, β^+ 射线为正电子流。②穿透能力: β 射线的穿透能力比 α 射线强,但比 γ 射线弱。它很容易穿透黑纸,甚至可以穿透几个毫米的铝板。③电离本领: β 射线的电离本领比 α 射线弱,但比 γ 射线强。

(3) γ 射线: ①本质: γ 射线的本质为光子流,属于电磁辐射。它的性质和 X 射线很相似。②穿透能力: γ 射线与 β 、 α 射线比较,它的穿透能力最强。③电离本领: γ 射线的电离本领很小,和 β 、 α 射线比较最弱。

除上述的性质外,这三种射线还有一些共同的性质,比如都能使物质发生电离,都能引起生物和化学变化,都能产生荧光,都能使周围的介质升温,都能使胶片感光等。

3. 核素 在核医学中经常会遇到元素、同位素、核素、同量异位素、异质素、同中异荷素、同质异能素等概念,下面将之分述如下。

(1) 元素: 元素为原子序数相同的一类原子的总称。到目前为止,发现的元素已经有 110 多种。

(2) 同位素: 核内具有相同的质子数而具有不同的中子数的原子互为同位素。它们在元素周期表中占据同一位置,由此得名同位素。大多数元素都有其同位素。例如磷元素有 7 种同位素: ${}_{15}^{28}\text{P}$ 、 ${}_{15}^{29}\text{P}$ 、 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 、 ${}_{15}^{31}\text{P}$ 、 ${}_{15}^{32}\text{P}$ 、 ${}_{15}^{33}\text{P}$ 、 ${}_{15}^{34}\text{P}$,每一种原子都是磷的同位素。它们的核内都有 15 个质子,却有 13~19 个数量不等的中子。

(3) 核素: 核素为原子核具有一定质子数、中子数和一定能态的一种原子。原子核有不同的能级,处在不同能级上的原子核其放射性不同。例如 ${}^{99m}\text{Tc}$ 与 ${}^{99}\text{Tc}$ 两种核素,它们核内的质子数和中子数是相同的,是同一种同位素,但核处的能级不同,在高能级的 ${}^{99m}\text{Tc}$ 是核医