

医用放射防护基础



编 委 会

主 编：陈 琴 邬家龙

编 委：(以姓氏笔画为序)

王 芳 王 洁 王 赟 王新华

王延俊 李 慧 李秀萍 孙 卫

邬家龙 张 飙 陈 琴 罗伟立

杨海燕

前 言

1836年法拉第就发现了在稀薄气体中放电会产生美丽的辉光。1876年德国物理学家哥尔德施泰因证实了这种放电是“阴极射线”。1895年伦琴通过实验发现，阴极射线打在玻璃管的管壁上，会发出一种肉眼无法看到但是具有很强穿透力的特殊射线，这种射线能够使荧光物质发出荧光，可以使照相底片感光。1895年12月28日，伦琴用《一种新射线——初步报告》这个标题向维尔茨堡物理学会、医学协会作了报告，宣布他发现了X射线。这是一个划时代的基础成就，正如《简明不列颠百科全书》所评价：“宣布了现代物理学时代的到来，使医学发生了革命。”

伦琴发现X射线不久以后就首先在医学上开始应用，促使医学诊断与治疗方法产生突破性飞跃。一个多世纪以来，利用各类电离辐射所具备的各种特殊理化与生物学效应和自发核衰变特性，在生物医学科学研究、疾病的诊断与治疗领域得到广泛应用并迅速普及，如今已形成了X射线诊断学、核医学、放射肿瘤学、介入放射学等多个分支学科，成为现代医学不可或缺的重要组成部分。放射性核素与电离辐射技术还成功地渗透到生命科学各个领域并与之密切交叉融合，发挥核素示踪技术和超微量分析等特长，引发了生物化学、基础与临床医学等诸多学科的革命性变化，推进了分子生物学、分子免疫学、分子药理学、分子遗传学、分子核医学等新分支学科的崛起与发展。

越来越广泛普及的各类放射诊疗技术，不仅让接受医疗照射的受检者

或患者人数不断增加，而且导致各级医疗机构中的医学放射工作人员不断增加，形成一个数量巨大的放射性职业照射群体。放射诊疗工作人员熟练掌握放射防护知识是降低自身和患者所受放射损害的关键。本书针对医疗机构放射工作人员工作中所需要掌握的放射防护基础知识进行针对性编写。

本书由陈琴、邬家龙主编，王延俊、张飙、李秀萍等参与编写。由于能力所限，书中可能会出现缺陷及错误，在此我们表示歉意，同时感谢批评指正的读者和专家。

编者

2016年11月6日

目
录

CONTENTS

第一章 电离辐射基础知识 001

 第一节 电离辐射与非电离辐射 001

 第二节 电离辐射来源 002

 第三节 电离辐射在医学中的应用 006

 第四节 原子结构与放射性核素 009

 第五节 原子核的衰变 011

 第六节 放射性核素的衰变规律及其度量 014

 第七节 X射线 015

第二章 电离辐射与物质的相互作用 022

 第一节 带电粒子与物质的相互作用 022

 第二节 X(γ)射线与物质的相互作用 026

第三章 辐射量和单位 030

 第一节 描述辐射场性质的辐射量 031

 第二节 照射量 032

 第三节 吸收剂量 033

 第四节 比释动能 034

 第五节 剂量当量与剂量当量率 035

 第六节 有效剂量当量 036

第四章 电离辐射的基本测量 037

 第一节 电离室工作的基本原理 037

第二节	吸收剂量的其他测量方法	041
第三节	放射性计数测量	044
第五章	电离辐射生物学作用原理	049
第一节	电离辐射与物质的作用	049
第二节	电离辐射对生物体作用的生物化学基础	053
第三节	电离辐射生物学作用常用指标	059
第四节	电离辐射生物学作用的影响因素	064
第六章	电离辐射的生物学效应	071
第一节	电离辐射生物效应分类	071
第二节	随机性效应、确定性效应与组织反应	072
第三节	电离辐射的细胞效应	073
第四节	电离辐射致癌与遗传效应	078
第五节	电离辐射其他效应	083
第六节	小剂量/低剂量率照射生物效应	091
第七节	电离辐射损伤机制	094
第七章	电离辐射防护基础	099
第一节	辐射防护的基本原则	100
第二节	外照射的防护	103
第三节	医用内照射的防护	107
第四节	医用放射性废物的收集与处理	124
第八章	医用 X 线诊断的防护	129
第一节	X 线诊断工作人员和受检者的防护要求	129
第二节	牙科和乳腺摄影的防护要求	130
第三节	数字 X 线摄影的防护要求	133
第四节	X 线计算机断层摄影的防护要求	134
第五节	儿科放射学的防护要求	136
第六节	孕妇接受 X 线检查的辐射防护问题	143
第九章	核医学诊疗中的防护	146
第一节	核医学的概念及其危害因素	146
第二节	核医学诊疗防护的基本原则	149
第三节	核医学诊疗患者的防护要求	153
第四节	临床核医学工作场所的放射防护要求	154

第五节 核医学操作的防护要求与剂量估算	156
第十章 肿瘤放射治疗中的放射防护	162
第一节 肿瘤放射治疗防护的特殊性	162
第二节 实施放射治疗的防护一般要求	164
第三节 近距离放射治疗的防护	166
第十一章 介入放射学与整骨复位的放射防护	169
第一节 介入放射学的防护	169
第二节 整骨复位中的放射防护	179
第十二章 医疗照射实践的质量保证	183
第一节 质量保证与许可证制度	183
第二节 诊断放射学和介入放射学的质量控制	187
第三节 临床核医学的质量控制	189
第四节 肿瘤放射治疗的质量控制	191
第五节 医疗照射质量控制检测	192
第十三章 放射卫生法规与标准概述	204
第一节 放射卫生相关法规的变迁	204
第二节 放射卫生相关法规体系	206
第三节 主要法律法规	208
第四节 放射卫生防护标准的发展	213
第五节 放射卫生防护标准的分类	218
第六节 放射防护相关国际组织	220
第十四章 放射防护管理	224
第一节 放射防护管理机构	224
第二节 放射防护管理规章制度	225
第三节 工作场所放射防护检测	226
第四节 个人剂量管理	227
第五节 职业健康管理	227
第六节 放射工作人员培训管理	228
第十五章 放射工作人员职业健康	230
第一节 放射工作人员健康标准	231
第二节 不应（或不宜）从事放射工作的健康和其他有关条件	232
第三节 部分职业性外照射放射性疾病	233

第十六章 术语 245

附录 放射防护法律法规 261

 中华人民共和国职业病防治法 261

 中华人民共和国放射性污染防治法 274

 放射性同位素与射线装置安全和防护条例 281

 射线装置分类办法 292

 放射诊疗管理规定 293

 放射工作人员职业健康管理辦法 300

参考文献 306

第一章 电离辐射基础知识

第一节 电离辐射与非电离辐射

辐射是以波或粒子的形式向周围介质传播能量的一种方式。狭义的辐射仅指电离辐射。在人类生活的自然环境里,辐射和阳光、空气、水等同时存在,由于它无色、无味、不可见,而且人体无法直接感应到,使得大家对于辐射存在深深的恐惧感。部分媒体有关辐射安全事故的夸张报道,更加剧了公众对于辐射的恐惧,几乎使人闻之色变。实际上在我们生活中始终伴随有辐射,例如,太阳中就有这类辐射,也就是人们常说的宇宙射线;土壤、岩石、水、空气、植物、动物中也都存在放射性,这些就构成了人类生存环境中的本底辐射。现代医学、农业和工业已经离不开核技术的应用,可以说放射性给我们现代文明做出了重要的贡献。例如,放射诊断、农产品辐照保鲜、产品结构无损检测等。随着核能、放射源和射线装置在发电、工业生产、核医学和军事领域的广泛应用,电离辐射的负面作用越来越受到国际社会的高度关注;另外,电磁技术在通讯、电力、雷达和家电行业全面普及,其所带来的电磁辐射问题也开始让老百姓忐忑不安。我们应该深入了解辐射是什么,这样才能利用它的优点,避开它的危害,而不再只是盲目的害怕。

辐射按照其发射形式进行分类,可分为粒子辐射、射线辐射、电磁波辐射、热辐射、声辐射等多种形式;按其辐射对象是否产生电离效应可分为电离辐射和非电离辐射两大类。

非电离辐射是指能量低,不足以将物质原子或分子电离化的一些辐射,即辐射对象不产生电离效应。如可见光、红外线、微波、无线电波、雷达波等都属于非电离辐射,其中,电磁辐射是非电离辐射的主要形式,它是变化的电场和变化的磁场相互作用而产生的一种能量流,如无线发射台、高压线、变电站、手机、电脑、电视机、功放机、电视塔、雷达站、卫星发射站、微波炉等设备工作时所产生的辐射均属于电磁辐射。

电离辐射是指能量高,能够通过直接或间接作用使物质电离的辐射。如核设施、放射源、射线装置等产生的 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线、X射线和中子等都属于电离辐射。 α 粒子实际上是氦原子核,它的穿透力小,只要用一张纸就能挡住,但其电离作用大,一旦吸人体内,造成的危害极大,是典型的内照射粒子。 β 粒子实际上是电子流,有一定的穿透力,皮肤沾上后可明显烧伤皮肤深层,但电离作用比 α 粒子小得多,即使进入人体,危害也比 α 粒子小很多。 γ 射线来源于原子核本身激发跃迁或 γ 衰变,是一种光子流,其穿透力极强,能穿透人体和建筑物,可危害的距离很远。X射线性质与 γ 射线类似。中子极不稳定,可自发地产生 β 衰变并伴有 γ 或X射线,其防护更难。从危害严重程度讲,X射

线、 γ 射线、中子等电离辐射的危害远远大于雷达、变电站、手机等产生的电磁辐射。本书中所讲的辐射都是指电离辐射。

早在1895年,德国物理学家伦琴发现一种眼睛看不见但能穿透物质的射线,称为X射线,俗称X光。随后不久便发现了X射线会使空气电离而导电。紧接着在1896年2月,法国科学家贝克勒尔发现铀的化合物会发出一种不同于X射线,但也具有穿透能力,能够使照相底片感光的射线,当时称为铀放射线。1898年7月,居里夫妇首次从沥青铀矿中提炼出一种新元素,命名为钋,以纪念居里夫人的祖国波兰。同年12月又成功地分离出另一种新元素镭。放射性这个名词就是由居里夫人所创。同年,威廉韦恩发现了带正电的质子,1899年拉瑟福德发现了带2个正电单位的 α 粒子,称为阿尔法射线;还证明了带一个负电单位的贝塔(β)射线就是电子。在1900年韦拉特发现另一种电磁波射线,能量比X射线还高,命名为伽马(γ)射线。不带电的中子是最后被发现的,到1932年2月才由查德威克发现。至此人类对原子核里面的构造,才有了较清楚的了解。

第二节 电离辐射来源

地球的形成环境中,辐射场是一个很重要的组成部分。可以说人类的发展进化过程就是在一个辐射场环境中进行的。电离辐射对生命的进化过程而言很重要。当人类能够改造自然以后,放射源的应用、射线装置的制造与使用等人工辐射环境随之出现。因此可以把作用于人体的电离辐射源分为两大类,即天然辐射源和人工辐射源。

一、天然辐射源

天然辐射源包括来自大气层外的宇宙辐射和来自地壳物质中存在的天然放射性核素产生的地球辐射。天然辐射源对地球上人类的辐射照射,称为天然本底照射。在天然放射性核素中,有些核素的半衰期之长可以与地球的年龄相当,如 ^{238}U ,加上宇宙辐射连续不断地投向地球表面,所以人类一直在接受着天然辐射源的照射。受照水平的高低受地磁纬度、海拔高度、居室条件、膳食习惯、年龄和生理代谢等诸因素的影响。

1. 宇宙辐射

宇宙射线指的是来自于宇宙中的一种具有相当大能量的带电粒子流。1912年,德国科学家韦克多·汉斯带着电离室在乘气球升空测定空气电离度的实验中,发现电离室内的电流随海拔升高而变大,从而认定电流是来自地球以外的一种穿透性极强的射线所产生的,于是有人为之取名为宇宙射线。宇宙射线又分为初级宇宙射线和次级宇宙射线。

能够到达地球的初级宇宙射线基本上来自地球所在的银河系。今天,人类仍然不能准确说出宇宙射线是由什么地方产生的,但普遍认为它们可能来自超新星爆发、来自遥远的活动星系。宇宙射线主要是由质子、氦核、铁核等裸原子核组成的高能粒子流,也含有中性的 γ 射线和能穿过地球的中微子流。它们在星系际银河和太阳磁场中得到加速和调制,其中一些最终穿过大气层到达地球。虽然当宇宙射线到达地球的时候,会有大

气层来阻挡住部分的辐射,但射线流的强度依然很大,很可能对空中交通产生一定程度的影响。例如,现代飞行器上所使用的控制系统和导航系统均由相当敏感的微电路组成。一旦在高空遭到带电粒子的攻击,就有可能失效,从而可能给飞行带来相当大的麻烦和威胁。

地磁场对进入地球外围的宇宙射线有抑制作用,于是高能带电粒子运动方向趋向于地球南北磁极。即宇宙射线的地磁纬度效应:在同一海拔高度,地磁赤道处的宇宙射线强度和剂量率最小,而接近地磁两极处的宇宙射线强度和剂量率最大。

建筑物对宇宙射线有阻挡作用,观测结果表明,穿透坚实建筑物屋顶的宇宙射线,往往有约 20% 的衰减,这就是建筑物对宇宙射线的屏蔽效应。建筑物对宇宙射线屏蔽因子的大小取决于建筑物设计和对建筑材料的选用。

对地球而言,初级宇宙射线进入大气层后,与大气层中的原子核相互作用发生级联效应或次级反应,产生大量的新的辐射粒子,即次级宇宙射线。几乎所有外来的高能宇宙射线,除中微子外,在穿过大气层时都要与大气中的氧、氮等原子核发生碰撞,并转化出次级宇宙射线粒子,而超高能宇宙射线的次级粒子又将有足够能量产生下一代粒子,如此下去,将会产生一个庞大的粒子群;这一现象是 1938 年由法国人奥吉尔在阿尔卑斯山观测发现的,并取名为“广延大气簇射”。

初级宇宙射线与大气层的某些原子核相互作用生成的放射性核素,称为宇生放射性核素,有 20 余种,其中具有代表性的有 ^3H 、 ^{14}C 。天然 ^3H 中有 1/4 是由宇宙射线中的中子与 ^{14}N 作用产生的,其余的是大气中子核被宇宙射线中的高能粒子击碎后形成的。天然存在的 ^{14}C 是宇宙射线中的中子和天然存在的 ^{14}N 作用得到的核反应产物。对人类健康有意义的宇生放射性核素主要有 4 种,它们是: ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 和 ^{22}Na 。

2. 陆地辐射

陆地上的各种物质中和生物体内存在着的天然放射性核素,统称为原生放射性核素。主要的原生核素是 ^{238}U 系和 ^{232}Th 系的各级子代放射性核素及 ^{40}K 。它们的半衰期很长, ^{238}U 为 $4.47 \times 10^{10} \text{a}$, ^{232}Th 为 $1.41 \times 10^{10} \text{a}$, ^{40}K 为 $1.28 \times 10^9 \text{a}$ 。原生放射性核素核衰变释放出的 β 射线和 γ 射线对人体产生外照射。在人体内存在的痕量原生核素衰变时释放出的 α 粒子、 β 粒子和 γ 射线对人体产生内照射。

室外的外照射除了来自宇宙射线以外,主要来自土壤中存在的痕迹量原生核素核衰变释放的 γ 射线的外照射。人身受到的外部源照射主要是由于 ^{238}U 和 ^{232}Th 系中核素放出的 γ 辐射以及 ^{40}K 的照射。这些核素也在体内存在并通过 α 和 β 粒子以及 γ 射线照射各种器官。一些其他的陆地放射性核素,包括 ^{238}U 系的各核素, ^{87}Rb 、 ^{138}La 、 ^{147}Sm 和 ^{176}Lu ,在自然界存在,但水平很低,它们对人体的剂量贡献很小。

室内 γ 射线照射主要来自于建材,室内四周额外的装修材料的整体效应可能导致室内 γ 射线辐射剂量率增高约 20%。采用木质材料构筑的建筑物,室内外的 γ 射线辐射剂量率几乎一致。室内空气吸收剂量率调查数据大约代表了全世界人口的 45%,按人口加权平均是 $84 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$,范围从 $20 \sim 200 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

世界上有少数地区的陆地 γ 射线辐射空气吸收剂量率非常明显地高于世界大多数地区的 γ 射线本底水平,称为高本底地区。一般认为,当地的陆地 γ 射线辐射水平、空气

中氡浓度和水中氡浓度高于正常本底水平的 3~5 倍以上时,这些地区称为高本底地区。世界上著名的高本底地区有中国广东阳江、埃及尼罗河三角洲、伊朗腊姆萨尔等。

通过吸入、食入途径以及皮肤进入人体的原生放射性核素产生内照射。吸入产生的剂量是由悬浮在空气中的土壤颗粒内含的 ^{40}K 、铀系和钍系核素贡献的。食入产生的剂量主要是食物和水中所含的原生放射性核素引起的。

陆地物质中广泛地存在着 ^{238}U 和 ^{232}Th , ^{226}Ra 和 ^{224}Ra 也伴随存在,所以人类到处都会受到氡及其衰变子体的照射。摄入氡及其子体产生的内照射剂量约占天然辐射源对人体照射总剂量的 1/2。在铀矿开采实践中人们认识到氡及其子体是致肺癌的重要病因之一。经估算, ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 对人体产生的有效剂量共计为 $1.25 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

除上述原因外,人类实践活动也会增加天然辐射照射。某些工业活动,如磷酸盐加工、金属矿石加工、铀矿开采、锆矿砂分选、钛色素生产、石油和天然气提取、建筑石材加工和利用、钍化合物生产和利用、废金属加工和水泥生产等工业活动中涉及的原材料、产品和副产品以及废物中含有的天然放射性核素释放到环境大气、水体和土壤中,会对周围的公众产生增加的天然辐射源照射。

二、人工辐射源

根据联合国辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2000 年报告,在人工辐射源所致的世界人口年平均剂量中,X 射线诊断为 0.4 mSv ;大气层核试验为 0.005 mSv ;切尔诺贝利核事故为 0.002 mSv ;核能生产为 $0.000 2 \text{ mSv}$,总计为 0.41 mSv 。天然辐射源照射量(2.4 mSv)和人工辐射源照射量(0.4 mSv)比较可以看出,天然辐射是人类受照射的最大辐射源,约占人类总受照剂量的 85%。氡及其子体的剂量约占天然辐射照射剂量的 50%。而医疗辐射照射是最大的人工辐射源,其剂量贡献约占人工辐射的 98%,约占人类总受照剂量的 14%。

1. 人工辐射源对公众产生的照射剂量

人类的辐射实践活动已经涉及医药卫生、工农业生产、国防、能源等方面,在这些辐射实践过程中,都会有不同量的放射性物质向环境排放,并按照规模的不同对居民导致不同的影响。主要有以下几方面:

(1)核武器试验产生的公众剂量

人类第一次成功的核武器试验是 1945 年 7 月 16 日在美国新墨西哥州阿拉莫戈多市的沙漠里进行的。核武器的爆炸方式分为:大气层核爆、地面核爆、地下核爆、水下核爆。

大气层核试验是人工辐射源之一,是环境中人工辐射源对全球公众照射剂量的主要贡献者。从 1945 年持续到 1980 年的 35 年间,在大气层中核武器试验的总次数为 543 次,总当量为 440 Mt。大气层核试验次数最多的年份依次是 1962 年、1961 年、1958 年和 1954 年。在近地面大气中进行核试验,部分核裂变产物沉降在试验场(局部沉降)和在距试验场数千千米下风向区域(中程沉降);核裂变产物在局部的沉降量与中程沉降量的比例,因气象条件、爆炸高度、周围地面和材料类型的不同而有所差异。

大气层核武器试验落下灰在南北半球的沉积量随时间而变化。据估算 1963 年全球

公众受落下灰照射的年平均有效剂量最高达 $110\ \mu\text{Sv}$, 到 2000 年这个剂量降到 $5\ \mu\text{Sv}$, 主要是残留在环境中的 ^{14}C 、 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 所致。北半球公众的年平均有效剂量比南半球的高 10%。尽管人们对大气层核试验的后果很担心, 但就以向环境中释放人工辐射源最多年份的 1963 年而言, 核试验所致全球人口的年平均有效剂量最多为天然辐射本底水平的 5%。

(2) 核能发电对公众所致的剂量

自 1956 年核能发电产业形成以来, 核能发电量一直稳定增长。核能发电不可避免的涉及包含铀矿开采、铀矿石水冶、铀的浓集与转化、核燃料元件制造、核反应堆运行、乏燃料后处理、退役和放射性废物管理以及有关科研和开发活动的核燃料循环过程。

在核燃料循环过程的这些活动中会对局部地区的公众产生某种程度的辐射剂量, 主要有: 采矿和水冶对公众所致的剂量、浓缩铀和核燃料元件生产对公众所致的剂量、发电核反应堆对公众所致的剂量、乏燃料后处理等对公众所致的剂量。

(3) 同位素生产和应用对公众所致的剂量

放射性同位素被广泛地应用于工业、医学和科学研究中, 在放射性同位素生产过程中少量的放射性排放、同位素应用过程或含放射性核素产品的处置等过程都可能引起照射。对于寿命非常长的放射性核素, 最终都会释放到环境中去。而对于短寿命的放射性核素, 将其贮存起来、在排放前让放射性衰变是主要的处理方法。

现在, 人们普遍认为放射性同位素在工农业、教育和临床医学等领域应用中, 就公众的受照剂量而言, 接受核药物治疗的患者家属受到的照射剂量可能是主要的, 应当给予关注。

(4) 医疗照射中 X 射线诊断对公众产生的剂量

医疗照射就是患者进行疾病诊断或治疗受到的辐射照射、扶持患者接受诊断和治疗的自愿者受到的照射, 或接受医学诊断研究的自愿者受到的照射, 或接受医学健康检查的人员受到的照射。人工辐射源对全球人口因疾病接受 X 射线诊断产生的年人均有效剂量在 $0.04\sim 1.0\ \text{mSv}$ 之间, 平均值为 $0.4\ \text{mSv}$ 。

(5) 核事故对公众产生的剂量

在核安全和放射防护范畴内, 包括设备故障和操作失误在内的, 凡是能导致或可能导致不可忽视的后果或潜在后果的任何意外事件, 称为事故。核事故造成的放射性核素泄露、核反应堆会造成局部或大范围的公众辐射剂量升高。

2. 人工辐射源对职业人员产生的照射剂量

在核燃料循环、辐射工业应用、辐射医学应用、国防活动、教育和兽医学活动中的职业人员受到了不同程度的辐射照射。这种照射称为职业照射。

在 20 世纪 90 年代早期, 人工源的职业照射集体剂量的估算值为 $2\ 700\ \text{人}\cdot\text{Sv}$, 比 20 世纪 70 年代的集体剂量大约低 $1/2$, 现在全球范围的职业人员年平均有效剂量则由 $1.9\ \text{mSv}$ 降到 $0.6\ \text{mSv}$ 。

第三节 电离辐射在医学中的应用

1895年伦琴通过实验发现,阴极射线打在玻璃管的管壁上,会发出一种肉眼无法看到,但是具有很强穿透力的特殊射线,这种射线能够使荧光物质发出荧光,可以使照相底片感光。1895年12月22日,他把妻子带进实验室,并给她的手照了一张X光照片,从照片中清楚地看到了她的手指骨影像——这就是第一张人类的活体骨骼照片。12月28日,伦琴用《一种新射线——初步报告》这个标题向维尔茨堡物理学会、医学协会作了报告,宣布他发现了X射线。这是一个划时代的基础成就,正如《简明不列颠百科全书》所评价:“宣布了现代物理学时代的到来,使医学发生了革命”。数月后就首先在医学上开始应用,促使医学诊断与治疗方法引发突破性飞跃。一个多世纪来,利用各类电离辐射所具备的各种特殊理化与生物学效应和自发核衰变特性,在生物医学科学研究、疾病的诊断与治疗领域得到广泛应用并迅速普及,如今已形成了放射诊断学、核医学、放射肿瘤学(放射治疗学)、介入放射学等多个分支学科,已经成为现代医学不可或缺的重要组成部分。

一、放射诊断学

20世纪初,人们利用X射线的穿透性、能激发荧光物质产生可视影像以及能使胶片感光形成黑白影像的特性,在医用诊断X射线设备上实现了透视和记录人体解剖结构影像(摄影)进行疾病的检查诊断。

传统的医学放射学检查中,先后出现了许多技术革新,例如,根据人体组织器官的密度、厚度的差异研发出钡剂、碘剂等造影剂;为了解决影像重叠问题,开展了断(体)层X线摄影检查;为了使用方便而研发出移动式X线透视和摄影设备、X线电视、车载X线机、C形臂X线机等;在影像接收器方面研发出影像增强器以及摄影胶片的各种片屏组合增感屏等,这些技术改进的目的是方便不同类型医学X线检查诊断,提高影像的灵敏度。

传统的X线机以胶片和增感屏作为载体来获得影像学信息,它的软X线多,病人皮肤剂量较大,图像质量不高,防护水平低。促使医学诊断又一次革命的是20世纪70年代诞生的X射线计算机断层(X-CT)扫描机,以及后来不断涌现的数字化X线设备。CT在短短20年间经历了五代更新,随后问世的多排(层)螺旋CT又迅猛发展;加上数字减影血管造影(DSA)、数字胃肠点片(DSI)、计算机摄影(CR)、数字摄影(DR)以及双X射线源CT等新设备、新技术和新方法接连涌现,显著地提高了临床医学中的放射诊断质量。

二、临床核医学

核医学是研究核技术在医学中应用的专门学科,分为基础医学应用和临床医学应用,即实验核医学和临床核医学,它们的发展又与核药学及核仪器等密切相关。前者主

要利用核素及射线进行生物医学的理论研究,以探索生命本质中的重大问题,加深人们对正常生理生化过程和病理过程的认识。临床核医学主要是利用核素及射线来诊断和治疗疾病。1983年美国核医学学会给核医学的定义是“核医学是应用放射性和稳定性核素的核特征对人体进行解剖学或生理学的诊断估价,也是应用开放性放射源进行治疗的一般医学专业”。由此可见,核医学与医学诊断和治疗疾病关系密切,也是临床研究的好方法。由于它的安全、有效、无痛和无创性,在临床上广泛应用。

反应堆和加速器的问世引发了人工制备放射性核素新时代的到来,随着放射性核素标记和示踪技术用于人体脏器的显像及功能测定,放射性核素与医学相结合产生了核医学学科,临床核医学既有各种核素显像与功能测定的诊断检查,又有以不断发展的放射性核素标记药物的靶向治疗。

1940年,放射性核素制剂在临床上开始使用;20世纪50年代,先后研制出扫描机和 γ 照相机;60年代, ^{99m}Tc 发生器和 ^{99m}Tc 标记显像剂相继用于临床;70年代,电子计算机的应用把核医学推进到定量与动态核医学的新阶段,单光子发射计算机断层显像(SPECT)装置问世,使许多功能性的疾病可以通过SPECT得以诊断。

20世纪90年代,分子核医学崛起,开创了核医学的新篇章,正电子发射计算机断层显像(PET)设备运用人工生产的正电子发射体的核素标记生理性化合物或代谢底物、氨基酸、受体的配体及水等,可以显示人体脏器或组织的代谢活性及受体的功能与分布,PET的出现使得医学影像技术达到了一个崭新的水平,它能够无创伤、动态地、定量评价活体组织或器官,并在生理状态下及疾病过程中根据细胞代谢活动的生理、生化改变,获得分子水平的影像信息,这是目前其他任何方法所无法实现的,它为疾病的早期诊断开创了新纪元。

核医学的不断发展同样要求加强与之相适应的放射防护与安全,尤其是核医学中既有外照射又有复杂的内照射放射防护问题,需要重视和加强。

三、放射肿瘤(放射治疗学)

由于放射线对细胞有损伤作用,人们想到了利用放射线照射来治疗疾病,放射治疗学是最先从放射学中分离出来独立形成的一门用于疾病治疗的分支学科,已经历了一个多世纪的发展历史。

在伦琴发现X射线和居里夫人发现镭之后,很快就分别用于治疗恶性肿瘤和其他良性疾病,比如早期用X射线治疗强直性脊柱炎等,后来随着良性疾病的放射治疗逐渐被淘汰,放射治疗主要用于恶性肿瘤的治疗,这门致力于肿瘤放射治疗的分支学科称为放射肿瘤学。

放射治疗是肿瘤治疗的重要手段之一,各种远距离与近距离放射治疗和辅助治疗设备应用在全世界迅速增加,从早期的镭针、 ^{60}Co 治疗机、深部X线治疗机,到现在的医用电子加速器、 γ 刀、X刀、中子刀、质子加速器、放射性粒子植入等新技术方兴未艾。

放射治疗按照治疗过程中对病人实施照射的方式和技术特点,分为远距离治疗、近距离治疗、放射性核素治疗以及其他特殊技术治疗。远距离治疗是放射治疗的主要方式,它是利用射线装置和密封核素产生的光子或电子束对病人靶区进行照射。近距离治

疗是排在第二位的放射治疗照射方式,它是把密封核素置于病人自然体腔或组织间隙,对其邻近靶区进行照射。放射性核素(非密封)治疗的照射范围是人体的特殊器官或区域。立体定向治疗的病灶范围很小,一般为毫米量级。

在肿瘤的放射治疗中,一般处方吸收剂量高达几十戈瑞(Gy),由于射线在杀伤肿瘤组织的过程中不可避免地损伤了周围的健康组织,如何加强肿瘤放射治疗的防护与安全,实现放射治疗的最优化与质量保证,保护接受放射治疗患者的正常组织等,已经成为放射肿瘤学的重要研究课题,因此在肿瘤放疗中出现了立体定向放疗、三维适形放疗、调强适形放疗、图像导引放射治疗等新技术的应用,这些新技术的目的是在同一台治疗设备上做到精确计划、精确定位和精确治疗。

四、其他医学应用

1. 介入放射学

从单一的X射线诊断到影像医学的发展,近代医学放射学不仅在疾病诊断上显现出独特的优势,而且随着生物医学、材料科学以及导管、导丝和各种检查技术的发展,已跨越诊断范畴延伸到介入放射学诊疗的时代。

介入放射学是在影像学方法的引导下,采用经皮穿刺插管等方法对患者进行血管造影,采集病理学、生理学、细胞学、生物化学等检查资料,开展药物灌注、血管栓塞或扩张成形、体腔引流以及临床疾病等微创伤的方法进行诊断和治疗。

介入诊断与治疗的领域日益扩大,几乎涉及各个临床学科,尤其是在心血管、脑血管、外周血管以及肿瘤等方面,它的诊治优势越来越凸显。但是介入放射学是近台放射性操作,对患者和有关人员所致的照射剂量较大,已成为辐射防护学最难的课题之一。

2. 医学影像学的融合

影像融合技术是利用计算机将多种影像学检查的图像信息进行数字化综合处理,将多源数据进行空间配准后,产生一种全新的信息影像,以获得研究对象的一致性描述,同时融合各种检查的优势,以达到辅助诊断的目的。影像融合技术采用医学检查优势互补的方法,集成了传统放射学、数字化放射学、核医学显像、超声波成像、磁共振成像五大类医学成像方法。

21世纪的医学影像学将成为医学和生物学中发展最快的学科之一,影像学的诊断方法将由以大体形态成像为主向生理、功能代谢成像转变,其对比增强由一般性组织向疾病特异性组织转变,图像分析由“定性”向“定量”方向发展,诊断模式也由原来的胶片采像与阅读向数字采像和电子传输的无胶片方向转变。

由于电子学、计算机等信息学科的飞速发展,医学图像的存储和传输通信系统、远程传输、介入放射学与微创伤外科学的相互融合,在临床医学诊疗中相继出现了PET-CT、SPECT-CT、PET-MR。

第四节 原子结构与放射性核素

一、原子结构

世界是由物质组成的,物质是由分子组成,用化学方法可以分解或合成分子。构成分子的基本单位是原子,是用任何化学方法都不能分割的最小粒子。19世纪末期以前,大多数物理学家都认为原子是构成物质最小的、不能再分的微粒,直到1895年伦琴发现X射线,次年贝克勒尔又发现放射性现象以后,才打破了原来的看法,逐步揭示和认识了原子结构的微观奥妙。

1911年,英国物理学家卢瑟福用一束高速带正电荷的 α 粒子流,轰击金属薄膜,发现绝大多数 α 粒子穿过金属薄膜而不改变方向,这说明原子的内部是很“宽敞”的,有些 α 粒子穿过金属薄膜时方向稍有改变,个别粒子好像碰到一种极硬、不可穿过的东西一样被弹回来。这说明 α 粒子碰到了一种体积很小,带正电荷的物质,卢瑟福称之为“原子核”。卢瑟福 α 粒子散射实验奠定了现代原子模型的基础。通过对实验结果的理论分析,确定原子中存在一个带正电的核心,即原子核,其尺寸在 10^{-14}m 数量级,仅为原子大小的万分之一,质量却占到99.9%以上。由于原子整体上呈中性,因此,原子核的电量必定与核外的电子总电量相等,但符号相反。

核外电子以一定的轨道围绕原子核运动,每个轨道只有一个电子,而一定数目的轨道形成一个电子壳层,核外可有几个电子壳层,最靠近核的电子壳层称K层,依次向外称为L、M、N、O……层。每个电子壳层可容纳的电子数为 $2n^2$ 个, n 表示第几个壳层。每个壳层上的电子分别具有一定的能量,距核越远其位能越高。

原子核由2种质量几乎相等的基本粒子——质子(proton,P)和中子(neutron,N)组成。质子和中子统称为核子。质子带正电荷,与电子所带电荷数量相等,符号相反。中子不带电荷。原子核内质子和中子数目之和即为原子质量数,用 A 表示。原子核内的质子数(即核电荷数)称为原子序数,用 Z 表示,原子核内的中子数为 A 减 Z 。

国际上通常采用 ${}_Z^AX$ 表示各种核素,也常简化为 AX , X 为某种元素符号,如 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{14}\text{N}$ 等。有些核素右上角加 m ,表示该核素处于激发态,如 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。

1. 原子核能级

电子在原子核库仑场中所具有的势能主要由主量子数 n 和轨道量子数 l 决定,并随 n 和 l 的增大而提高。习惯上规定当电子与原子核相距无穷远时势能为零,因此,当电子位于原子核外某一个壳层时,势能为负。 n 和 l 的变化就构成了分离的原子能级。电子填充壳层时按照从低能级到高能级的顺序以保证原子处于能量最低状态,这种状态称为基态。由于高原子序数的原子核比低原子序数的原子核对电子的吸引力大,因此对于同一个能级,当所属原子的原子序数增加时,它的能量更低。

当一个自由电子填充壳层时,会以发射一个光子的形式释放能量,能量值的大小等于壳层能级能量的绝对值,这些能量称为相应壳层的结合能。由于壳层能级能量随主量