

核技术及其在生物学中的应用丛书

核医学中的 辐射防护

汪桂江 郑钧正 编著

科学出版社

4X41103

• 核技术及其在生物医学中的应用丛书 •

核医学中的辐射防护

汪桂江 郑钧正 编著



A0047154

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书作为《核技术及其在生物学中的应用丛书》之一,专门讨论核医学中的辐射防护问题,旨在促进核技术在生物学中的应用更好地发展。书中阐述了核医学中辐射防护要点和有关基础知识;介绍了作为指导防护实践依据的放射卫生防护标准;具体讨论了内、外照射的防护,以及放射性污染的去除和放射性废物的处理问题;还介绍了防护监测和放射工作人员的健康管理等。

本书是核医学工作者的防护指南,除适合各级医院核医学科医务人员、有关实验核医学研究和涉及同位素示踪研究的工作人员阅读外,亦适宜其他放射工作人员和大专院校有关专业师生参考。

• 核技术及其在生物学中的应用丛书 •

核医学中的辐射防护

汪桂江 郑钧正 编著

责任编辑 王爱琳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992年2月第一版 开本:787×1092 1/32

1992年2月第一次印刷 印张:6 1/8

印数:1—1000 字数:137000

ISBN 7-03-002636-5/R·127

定价:5.60元

序 言

核技术的应用是医学生物学现代化的重要标志之一。国际原子能机构的一份公报指出：“从对技术影响的广度而论，可能只有现代电子学和数据处理才能与同位素相比。”同位素在生物医学中的应用尤其广泛。一方面，它深入到实验医学的各个领域，从分子水平动态地观察生命现象的本质与生命活动的物质基础。另一方面，它又为临床诊断与治疗开辟了新的途径。至于核技术，无疑不限于同位素的应用，核射线也是科研与医疗的重要手段。

我国核技术的应用已有 20 多年的历史，专业队伍不断扩大，工作也不断深入。当前急需总结国内外应用核技术的经验。为此，我们组织编写一套“核技术及其在生物医学中的应用丛书”，供生物医学工作者参考。我们希望，这套丛书能为实现四化做出一点点贡献，对我国核医学及核生物学的发展起一定的促进作用。

本丛书拟分专题介绍核技术及其在生物医学中的应用。每一分册包括一个专题。分册之间，既有联系，又各自独立。读者可以收集全套丛书，也可根据需要选购其中部分分册。

丛书每一分册都邀请对有关专题有丰富经验的同志撰写。这套丛书主要是他们辛勤劳动的成果，也得到他们所在单位的有力支持，特此向这些作者和单位表示衷心的感谢。

主编 王世真

核技术及其在生物医学中的应用丛书

已出版分册

稳定同位素分析法	赵墨田	编著
闪烁照相与临床应用	董惟誉	编著
放射自显影技术	刘鼎新	编著
激素和药物的代谢	杨守礼	
示踪动力学	黄胜利	编著
	江 骥	
甲状腺核医学	周 前	林祥通等 编著

目 录

序言

第一章 核医学辐射防护基础	1
第一节 核射线的基本性质.....	2
第二节 核医学中常用的辐射量及其单位.....	9
第三节 放射性核素的医学应用与防护要点.....	18
第四节 核医学中患者的防护问题.....	32
第二章 放射卫生防护标准	50
第一节 防护标准的沿革.....	50
第二节 剂量限制体系.....	54
第三节 我国的放射卫生防护标准.....	62
第三章 外照射防护	69
第一节 外照射防护的一般原则.....	69
第二节 γ 源辐射防护的最优化.....	72
第三节 对 β 射线的防护.....	74
第四节 外照射剂量的估算.....	76
第四章 内照射防护	83
第一节 放射性核素进入体内的途径及其归宿.....	83
第二节 内照射剂量的估算.....	89
第三节 加速排出放射性物质的方法.....	109
第四节 内照射的防护措施.....	116
第五章 放射性污染的去除和放射性废物的处理	121
第一节 放射性污染的去除.....	121
第二节 放射性废物的处理.....	141

第六章 辐射防护监测	150
第一节 个人剂量监测.....	150
第二节 工作场所监测.....	163
第七章 放射工作人员的健康管理	174
第一节 放射工作人员的健康要求.....	174
第二节 放射工作人员的医学监督.....	175
第三节 事故受照射人员的处理原则.....	177
参考文献	183
附录一 国际单位制 (SI) 词头	184
附录二 主要辐射量及单位	185

第一章 核医学辐射防护基础

核医学是原子核科学技术与医学相结合的产物，是研究核素和核射线在医学上的应用及其理论的新兴学科，它是原子能利用的一个重要组成部分。根据国际原子能机构及世界卫生组织于第三届日内瓦和平利用原子能会议上介绍的资料，世界上生产的所有放射性核素中，约有 80—90% 用于医学上。核医学可分为实验核医学和临床核医学两大部分。前者主要利用核素进行生物医学研究，以探索生命现象的本质及其物质基础，加深人们对正常生理、生化过程以及病理过程的认识；后者则利用核素或加速器去诊断和治疗疾病，直接为人类造福。放射性核素在医学上的应用，以其能反映确切的体内生理生化过程和组织器官的功能形态，极大地丰富了人们的认识，解决了许多从前无法解决的问题，更新了不少陈旧的甚至错误的观念。它是医学科学现代化的重要标志之一。

无论是从事临床核医学还是实验核医学的人员，总经常要接触放射性物质和核射线。鉴于核射线兼有利与害的二重性，因而如何趋利避害，从核技术的医学应用中获取最大效益，同时又有效地防止可能带来的辐射危害，便成为核医学工作者以及社会各界十分关心的问题。搞好核医学中的辐射防护，关系到保护环境，关系到保障核医学工作者、接受核医学诊治的患者，以及公众的健康与安全，同时关系到更好发展核医学事业。

早在 1960 年，我国政府就发布《放射性工作卫生防护暂行规定》。1984 年卫生部发布了中华人民共和国国家标准《放

射卫生防护基本标准》(GB 4792-84)。1989年10月国务院又发布了《放射性同位素与射线装置放射防护条例》。这些法规标准均强调了放射防护的重要性和提出明确的放射防护要求。预防为主,有备无患。重视核医学中的辐射防护是发展核医学事业不可缺少的重要工作。显然,掌握放射防护基本知识也是核医学工作者必要的业务修养。

第一节 核射线的基本性质

一、核射线的种类

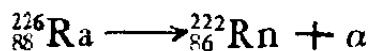
核射线属于放射性核素所释放的辐射能。放射性核素有天然的和人工产生的两类,它们都是不稳定的原子,都在时时刻刻自发地不断地释放出特定的射线,即核衰变。假定某一种放射性核素的原子数为 N_0 , 经过时间 t 后剩余的原子数为 N_t , 则它们之间有下列关系式:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

式中 e 为自然对数的底, λ 为衰变常数。由此可见放射性核衰变服从指数规律。特定的放射性核减少一半所需的时间为该放射性核素的物理半衰期,常用 $t_{1/2}$ 或 T_1 表示。

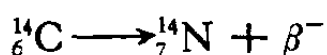
各种放射性核素都有自己的特征,核衰变时的方式也有所不同,主要有如下五种。

α 衰变: 主要发生于原子序数大于 82 的重元素核素。每次衰变释出一个氦核,称为 α 粒子。 α 粒子流就是 α 射线。母核失去二个质子和二个中子,故子核的原子序数较母核减小 2,原子质量数减少 4,例如:

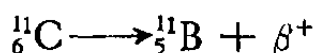


β^- 衰变: 主要发生在中子相对过剩的核素,核中一个中子转化为质子,总核子数不变。同时释出一个负电子及一个

反中微子。故子核的原子序数比母核增加 1，原子质量数不变。例如：

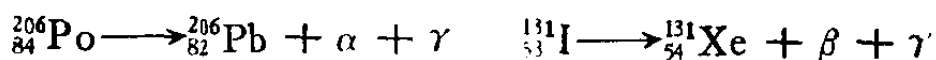


β^+ 衰变：主要发生在中子相对不足的核素，可以看作和 β^- 衰变相反的过程，即核中一个质子转变为中子，同时释放出一个正电子及一个中微子。故核子总数不变，子核原子序数减小 1，原子质量数也不变。例如：



核外电子俘获：也发生在中子相对不足的核素。原子核先从核外较内层的电子轨道俘获一个电子，使之与一个质子结合转化为中子，同时发射出一个中微子。子核的原子序数比母核减小 1，原子质量数不变。随后外层轨道上有一个电子跃入内层填补空缺。由于外层电子的能量比内层电子高，多余的能量以 X 射线形式释出。

γ 跃迁：上述四种衰变的子核可能先处于激发状态。激发状态的原子不稳定，在短时间内就会回到基态，同时并以 γ 光子的形式释出多余的能量。此过程称为 γ 跃迁或 γ 衰变。通过 γ 跃迁，衰变成原子序数和原子质量数都和母核相同，但能级不同的子核。 γ 光子流就是 γ 射线，通常是伴随着 α 射线或 β 射线一起产生的，例如：



γ 射线、X 射线与可见光、紫外线等一样，也是一种电磁辐射。但可见光的光子能量只有几个电子伏特，而 γ 射线的能量都在几十千电子伏特以上。

在核物理学中还讨论了其他一些核射线，本书感兴趣的是 α, β, γ 和 X 等几种核射线。

二、核射线与物质的相互作用

射线与物质的相互作用属于射线的物理效应范畴，它包括射线对物质的作用和物质对射线的作用两个相互联系的方面。对核射线来说，它是一种能量传递和能量损耗过程；对受照射物质来说，它是一种对外来能量的物理性反应和吸收过程。各种射线由于其本身的性质不同，与物质的相互作用各有特点，这种特点还常与物质的密度和原子序数有关。射线进入物质后，在介质中主要引起电离、激发和次级辐射三种变化。现将射线在物质中的作用和射程分述于下。

（一）射线在物质中引起的三种主要变化

1. 引起物质的电离

当高能的带电粒子射线通过物质时，与介质中原子的轨道电子发生库仑作用，把本身的部分能量分次地传递给轨道电子，获得足够动能的轨道电子克服了原子核的束缚，逸出原子壳层成为自由电子。这过程叫做射线的电离作用。逸出的自由电子如果具有足够的能量，还可以使其他原子次级电离。通常次级电离约占总电离的 60—80%。电离后的原子带正电荷，它与逸出的自由电子合称为离子对。射线电离作用的强弱常用它产生的离子对数来量度。每厘米射程上形成的离子对数称为电离密度。

射线的电离作用是它引起介质物理、化学变化及生物效应的主要机制。

电离密度与粒子射线所带电荷成正比，与射线的速度成反比。 α 粒子电荷多，质量大，速度相对地慢，进入物质后引起的电离密度很大，比相同能量的 β 射线大数百至数千倍。由于它的电离本领很强，能引起生物机体很大的生物效应，人们

必须防止 α 源进入体内。 β 粒子电荷不多，质量很小，初速大，它在物质中引起的电离作用比 α 射线要小得多。当 β^- 射线通过物质时，由于其带负电荷，可以把介质中原子的轨道电子斥开。被斥电子获得动能可以引起次级电离甚至多级电离，直到电子能量不足以再引起电离作用为止。一般 β^- 粒子能量为 1 MeV（兆电子伏）时，其电离密度大约为 50 离子对/cm。 γ 射线不带电，它不能直接使物质电离。但在物质中必然要和介质的原子碰撞，发生能量的传递。高能 γ 光子进入物质后，经与介质中原子的壳层电子碰撞，可以把自己的全部能量传递给这个电子，使之克服核的束缚成为自由电子，叫光电子；也可以把能量部分地传给一个壳层电子，使之获得足够的动能，逸出原子，自己则在损耗能量的同时改变了运动方向，发生散射。前者叫做 γ 射线的光电效应，后者叫做康普顿效应。 γ 光子的能量大于 1.022 MeV 时，射入物质的光子消失，转化成一个正电子和一个负电子，这过程叫 γ 射线的电子对效应。 γ 射线就是通过这三种效应使所通过的介质原子电离的，因此它也属于一种电离辐射。X射线的作用与 γ 射线相似。

2. 引起物质的激发

在各种核射线的作用下，如果物质中原子的壳层电子获得的能量不足以克服原子核的束缚，而只是从低能级跃迁到高能级时，此过程称为射线的激发作用，它使物质的原子处于激发态。激发状态的原子具有较高的能量，是一种不稳定的原子，它在瞬间就会退激，放出多余的外来能量，回复到稳定的原子基态。多余的能量常以光子或热能的形式释出。 α 、 β 和 γ 射线都会引起激发作用。射线的激发作用也是它引起物理、化学、生物效应的机制之一。

3. 引起物质的次级辐射

核射线在种种不同的情况下会引起物质的次级辐射。上述激发态的原子向基态转化时，其多余的能量常以电磁辐射的形式释出，这是核射线造成的间接或次级辐射。当高速运动的带电粒子从原子核附近掠过时，它会受到原子核库仑场的作用而产生加速或减速，并将其部分或全部能量转化为连续的电磁辐射，叫做轫致辐射。它是 β 射线在物质中损失能量的重要方式，它发生的几率与 β 粒子的能量和介质的原子序数成正比，因此在防护上对 β 射线的屏蔽应采用低密度材料以减少轫致辐射。又如一个粒子在物质中与其相应的反粒子发生碰撞时，其质量可能转化为 γ 辐射。这种辐射叫做湮没辐射。例如当 β^+ 粒子与物质中一个负电子相撞，产生二个能量为 0.511 MeV 的 γ 光子。这种转化完全遵循质量和能量守恒定律。上述种种都属于射线在介质中引起的次级辐射。次级辐射都是电磁辐射，在某些情况下也不能忽视。

(二) 核射线在物质中的射程

射程指的是核射线从射入物质到最后被物质吸收所经过的最大直线距离。射线在射程中损耗去它的所有能量。射程的远近与粒子的种类、初始能量及吸收物质的密度有关。

1. α 射线的射程

α 粒子的质量大，初速慢，在物质中射程极短。 3 MeV 的 α 射线在空气中的射程为 16 mm ，在生物组织中的射程约为 0.02 mm 。从防护的角度看，对 α 射线的外照射可以不加考虑，戴上一双医用手套就足以挡住 α 射线的照射。

2. β 射线的射程

β 射线的射程比 α 射线大得多。而且由于同一源发出的 β 粒子的能谱是从零到一个最大值的连续谱，因此各粒子的射程不一。所谓 β 射线的射程，是指它的最大射程。 β 射线的

射程与其本身的能量和介质的性质有密切关系.例如 0.5MeV 的 β 射线在空气中的射程为 155 cm, 5.1 MeV 的 β 射线在空气中的射程却为 2 200 cm; 0.51 MeV 的 β 射线在铝和铅中的射程分别为 0.085 cm 和 0.031 cm, 5.1 MeV 的 β 射线在铝和铅中的射程则为 1.15 cm 和 0.33 cm. β 粒子质量小,在物质中与原子或电子相互作用时容易改变其方向,有明显的散射现象,在计算 β 射线的绝对放射性活度时应加以校正.

3. γ 射线的射程

在 α, β, γ 三种核射线中, γ 射线的穿透力最强,射程最大. 表 1-1 是同为 1 MeV 的三种射线在空气中的射程和电离密度的比较.

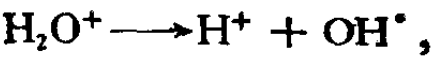
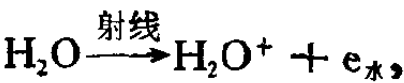
表 1-1 能量为 1 MeV 的三种射线在空气中的射程和电离密度

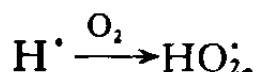
射线种类	在空气中的射程(m)	电离密度(离子对/cm)
α	0.01	6 000
β	10	6
γ	~600	0.1

三、核射线的生物效应

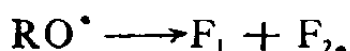
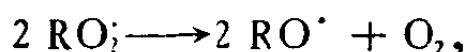
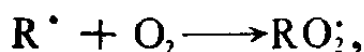
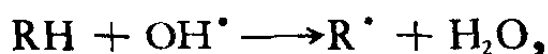
核射线的生物效应是核射线在生物机体物质中发生作用的一种特殊形式,系指核射线的能量传递给生物机体后所造成的后果.核射线进入生物机体后,在机体内穿行时,与机体各种成分发生碰撞,将能量传递给机体而引起反应.

水在机体中占 70% 以上,与射线碰撞的机会最多.射线撞击水分子,将其电子击出,形成 $H^{\bullet}, OH^{\bullet}, HO_2^{\bullet}$ 等各种自由基:





这些自由基可以与机体中的其他有机化合物分子发生反应,生成不稳定的有机化合物的自由基 $\text{R}^\cdot$, $\text{RO}_2^\cdot$ 和 $\text{RO}^\cdot$:



式中 RH 代表有机化合物分子, F_1, F_2 代表有机化合物分裂后的两个部分. 这些反应代表生物分子在射线作用下, 与自由基反应趋向分裂的一般方式. 受水的自由基作用的生物有机化合物包括蛋白质、酶、核酸等最重要的生物体内高分子化合物. 射线也直接与这些生物大分子发生碰撞, 使它们的分子键断裂. 射线的这些作用是它引起生物效应的基础. 富含核酸的细胞核对电离辐射最敏感, 特别是在细胞处于有丝分裂时期, 染色体上的基因结构处于更加张开的状态, 使之对辐射更为敏感, 更易于受到自由基的伤害. 结果可以诱发组织细胞的癌变、突变或后裔畸形等迟发性或遗传性严重疾病.

核射线的生物效应可分为躯体效应和遗传效应两大类. 前者出现在受照射者本身, 后者出现在受照射者的后代.

核射线的遗传效应是由于细胞中的染色体对电离辐射敏感, 而生殖细胞染色体上的一些基因决定着遗传的特性, 基因受了电离辐射的损害, 会将那些损伤信息传给后代, 使之出现畸变. 电离辐射所引起的基因突变后代畸形的发生率与受照射剂量有关.

人们对核射线生物效应的认识是不断深入发展的. 这又正是研究充分利用核射线和防止其损伤的基础. 近来人们发

现，射线杀死的细胞达一定量后将影响到组织或器官的功能而表现出放射损伤，这是一类有剂量阈值的确定性效应，如眼晶体放射损伤等。此外还有一类效应，如前面提及的辐射致癌和遗传效应，可能没有剂量阈值，而效应发生几率随受照射剂量的增加而增加，现称之为随机性效应。辐射生物效应不仅与是否接受照射以及受照射剂量大小密切相关，而且与受照射射线类型，射线品质和照射条件、方式、部位等关系很大。大剂量、高剂量率照射比小剂量、低剂量率照射所致辐射危险度高。对核射线当然必须认真对待，但又不必盲目害怕。人类一直就生活在充满电离辐射的自然环境中。由宇宙射线和地球辐射构成的天然本底照射每时每刻均对全球公众照射。我国某地因地质结构等原因而导致该地区天然本底辐射高于正常地区 3 倍，经十多年大规模辐射流行病学调查研究，未见高本底地区世代居住居民有不利于健康的影响。近代放射医学与防护学术研究还发现低于某阈值的小剂量电离辐射照射可能有兴奋效应，称为 *Hormesis* 现象。这种小剂量辐射对细胞、组织和机体的刺激作用正通过动物实验和流行病学研究深入进行中。

第二节 核医学中常用的辐射量及其单位

在利用核射线以及对其损伤作用进行防护时，需要对射线在不同空间部位(即辐射场)及在不同物质中的电离作用进行计量。迄今为止，人们从不同角度提出的表征电离辐射的量已有几十种之多，这里仅就核医学中常用的几种辐射量及其单位作一介绍。

一、放射性活度 A

放射性活度(简称活度)是描述放射性核素特征的一个重要的辐射量。在某时刻处于某个特定能态的一定量放射性核素的活度 A , 是 dN 除以 dt 所得的商, 即

$$A = \frac{dN}{dt}$$

dN 是在时间间隔 dt 内由该能态发生自发核衰变次数的期望值。 dN 之所以是期望值是由于放射性衰变具有随机性。上述定义中特定能态在没有其他说明时, 是指该核素的基态。处于某一特定能态的一定量放射性核素的活度, 等于此核素那个能态的衰变常数与该能态的原子核数目之乘积 (即 $A = \lambda N$)。

放射性活度反映的是放射性核素的核衰变率, 历史上曾俗称过放射性强度。

活度的单位是秒⁻¹ (s^{-1}), 实际含义为每秒衰变次数。

放射性活度的国际制单位 (SI) 的专门名称为贝可勒尔 (Becquerel), 简称贝可, 符号为 Bq。

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

过去活度沿用居里 (Ci) 为其特殊的专用单位, 1 居里表示每秒 3.7×10^{10} 次衰变。国际计量大会已决定淘汰旧专用单位。为便于过渡, 80 年代曾暂时保留与国际制单位并用一阶段。贝可勒尔与居里的换算关系是:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

必须指出, 贝可勒尔表示的是放射性核素的衰变率, 而不是某种辐射的发射速率。例如活度为 $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ (即 1 Ci) 的 ^{32}P 和 ^{60}Co , 它们的核衰变次数相同, 但发射的粒子数不