

电离辐射防护

技术与管理

任宝印 郝爱国 赵永军 主编

河北科学技术出版社

电离辐射防护技术与管理

任宝印 郝爱国 赵永军 主编

河北科学技术出版社

主 编 任宝印 郝爱国 赵永军
副主编 陈水平 贾玉新 刘新生 妙跃英
魏鹏飞 赵博兰 安朝辉 李 菲
孙保林

图书在版篇目 (C I P) 数据

电离辐射防护技术与管理 / 任宝印, 郝爱国, 赵永军主编. -- 石家庄: 河北科学技术出版社, 2014.5
ISBN 978-7-5375-6912-5

I. ①电… II. ①任… ②郝… ③赵… III. ①电离辐射—辐射防护 IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 103997 号

电离辐射防护技术与管理

任宝印 郝爱国 赵永军 主编

出版发行 河北科学技术出版社

地 址 石家庄市友谊北大街 330 号 (邮编: 050061)

印 刷 满城县益镗印刷有限公司

经 销 新华书店

开 本 850*1168 1/32

印 张 8.375

字 数 205 千字

版 次 2014 年 6 月第 1 版

2014 年 6 月第 1 次印刷

定 价 25 元

前 言

电离辐射是一把“双刃剑”，在应用放射性同位素和射线装置的过程中，既能造福于人类，又会给人们带来一定危害，如不注意防护，可对人体造成辐射损伤，甚至危及子孙后代。因此，为了保障放射工作人员和公众的身体健康和安全，提高人口质量，必须做好辐射防护工作。

电离辐射防护是研究人类免受或少受电离辐射危害的一门综合性学科。其基本任务是保护从事放射性工作的人员、公众及其后代的健康与安全，促进电离辐射技术的发展；辐射防护研究的主要内容包括辐射剂量学、辐射防护标准、辐射防护技术、辐射防护评价和辐射防护管理等。

为了落实《中华人民共和国职业病防治法》，贯彻放射卫生配套规章、标准，宣传辐射防护基础知识，我们组织放射卫生专家编写了《电离辐射防护技术与管理》一书。本书内容深入浅出，通俗易懂，实用性强，主要介绍了电离辐射剂量学、医用诊断的辐射防护、医用 X 射线特殊诊疗的辐射防护、介入放射学辐射防护、临床核医学的辐射防护、放射治疗的防护以及放射工作人员健康监护与管理。此书不仅是放射工作人员防护知识教材，也是放射卫生监督管理人员和临床医生的有益参考资料。由于笔者编写水平所限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2012 年 6 月

目 录

第一章 概述	1
第一节 电离辐射剂量学简介.....	1
第二节 电离辐射对健康的影响.....	3
第三节 电离辐射损伤的医学处理.....	4
第四节 电离辐射防护原则.....	7
第五节 核反应原理及核事故分级.....	9
第六节 世界与中国的核电发展.....	10
第二章 医用诊断的防护	12
第一节 放射诊断的特点与防护现状.....	12
第二节 防护原则.....	15
第三节 X 射线机.....	16
第四节 防护设施.....	23
第五节 X 射线工作者的防护.....	28
第六节 X 射线检查的合理应用.....	29
第七节 受检者和患者的防护.....	32
第八节 放射诊断的质量保证.....	44
第三章 医用 X 射线特殊诊疗的辐射防护	50
第一节 X 射线计算机断层摄影 (CT) 的防护.....	50
第二节 泌尿生殖器官造影 X 射线的防护.....	59
第三节 骨科整骨与 APLD 的辐射防护.....	62
第四节 体外震波碎石 X 射线的防护.....	67

第四章 介入放射学辐射防护	71
第一节 介入放射学辐射防护的重要性.....	71
第二节 介入手术者受照剂量及其危害.....	72
第三节 患者受照剂量及其危害.....	75
第四节 防护措施.....	78
第五章 临床核医学的辐射防护	91
第一节 核医学诊断的防护.....	91
第二节 核医学治疗的防护.....	112
第六章 放射治疗的防护	129
第一节 概述.....	129
第二节 医用治疗 X 射线机的防护.....	131
第三节 医用电子加速器的防护.....	134
第四节 钴—60 治疗机和 γ 刀的防护.....	160
第五节 后装治疗的防护.....	172
第六节 放射治疗患者的防护.....	177
第七章 放射工作人员健康监护与管理	179
第一节 职业健康监护导论.....	179
第二节 职业健康监护的法律依据.....	185
第三节 放射工作人员职业健康检查.....	199
第四节 职业健康监护档案管理.....	215
附录一：	
X 射线计算机断层摄影放射防护要求.....	221
附录二：	
医用 X 射线诊断放射防护要求.....	231
参考文献	258

第一章 概述

这里将主要介绍六个方面的内容，即电离辐射剂量学简介、电离辐射对健康的影响、电离辐射损伤的医学处理、电离辐射防护原则、核反应原理及核事故分级以及世界与中国的核电发展。

第一节 电离辐射剂量学简介

首先简单介绍电离辐射剂量学的概念。我们日常接触到的辐射可分为两种，即电离辐射和非电离辐射。电离辐射是指可以引起物质电离的辐射，这包括 α 、 β 、 γ 射线，中子、质子、正负电子，重离子、裂变碎片，X射线、宇宙线等。放射性核素和射线装置发出的射线都属于电离辐射。非电离辐射是指不能引起物质电离的辐射。这包括电磁辐射、微波、激光、红外线、紫外线、超声波(B超)等。电离辐射对人类健康的影响远大于非电离辐射。我们不能用电离辐射的理论，来解释非电离辐射造成的健康问题。

电离辐射又可分为天然电离辐射和人工电离辐射。天然电离辐射指从地球形成时就存在的电离辐射。这包括来自宇宙空间的初级、次级宇宙线以及它们与大气核素作用生成的宇生放射性核素，如 ^3H ， ^7Be ， ^{14}C ， ^{22}Na 等。天然电离辐射还包括来自地球本身的天然放射性核素，这主要是指来自铀系、钍系、锕系的放射性核素，以及 ^{40}K 、 ^{87}Rb 等放射性核素。

人工电离辐射是指随着科学技术的发展，人为制造出来放射性核素。光反应堆核裂变生成的人工放射性核素就多达 2500 多种，半衰期 10 年以上的就有 100 种以上。此外还有种类繁多的加速器和射线装置产生的电离辐射。

电离辐射，或称放射性，特征之一是有活度，有半衰期。放射性的活度单位是贝可（Bq），定义是每秒钟有 1 次衰变。旧的活度单位是居里（Ci）。 $1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。描述放射性衰变的另一个参数是半衰期。即放射性活度衰减到一半所需的时间，以 $T_{1/2}$ 表示。不同放射性核素的半衰期差别很大：如 ^{87}Rb 的半衰期长达 475 亿年，而 ^{133}Cs 的半衰期仅 2.8×10^{-10} 秒。

要考虑电离辐射与人体健康的关系，首先要了解人体接受的辐射剂量是多少。人体接受的辐射剂量有三种表达方式，即吸收剂量、当量剂量和有效剂量。

1. 吸收剂量 D 表示单位物质（人体）吸收了多少能量。单位是焦耳/千克（J/kg），专用单位是戈瑞（Gy）。旧单位是拉德（rad），定义是每克人体物质吸收 100 尔格的能量为 1 拉德。 $1\text{Gy}=100\text{rad}$ ， $1\text{rad}=0.01\text{Gy}$ 。

2. 当量剂量 H 因射线的种类和能量不同，人体器官虽接受的吸收剂量相同，但产生的生物效应会不一样，所以必须对射线的种类和能量给予考虑。权重因子（射线种类）的吸收剂量即为当量剂量。当量剂量的单位是焦耳/千克。专用单位为希沃特（Sv）。

3. 有效剂量 E 当量剂量考虑了射线的种类因素，但没有考虑人体的不同组织对射线的敏感程度不一样。考虑到人体组织权重因子的当量剂量，称为有效剂量。即有效剂量为体内所有组织和器官的加权当量剂量之和。单位为焦耳/千克（J/kg），专用单位为希沃特（Sv），与当量剂量相同。

在正常情况下，人体接受的天然辐射有效剂量，每年约为 2.4mSv，接受的来自人工辐射有效剂量，每年约为 0.6mSv。

第二节 电离辐射对健康的影响

电离辐射防护的目的是为了保护人的健康,使其免受或减轻电离辐射的危害。电离辐射对健康的影响有四种类型:变化(change)——可能对健康有害,也可能无害;损伤(damage)——表示某种程度的有害变化,如对细胞,但未必对整体有害,损害(harm)——临床上可观察到的有害效应;危害(detriment)——是一个较复杂的概念,它要考虑损害的概率、严重程度与持续时间,不易用量表达。

1. 确定性效应(组织反应) 射线入射器官或组织,会杀死遇到的细胞,如果损失的细胞数目较少,不会影响器官或组织的功能。但当射线剂量足够大,杀死的细胞足够多,器官或组织的功能就会受到影响了。此时的剂量称为“阈剂量”。只要接受的剂量达到或超过了阈剂量,这种功能损伤肯定会发生。我们称这种效应为“确定性效应”(新的说法称之为“组织反应 Tissue reaction”)。其表现有:乏力、脱发、牙龈出血、白细胞降低、性欲降低、皮肤红斑,直至不同类型的放射病。确定性效应的严重程度与接受剂量的大小有关。在一般情况下,确定性效应的阈剂量为 0.5Gy/a ,持续照射为 0.4Gy/a 。但对性腺、眼晶体及骨髓等敏感部位要特别注意。

2. 随机性效应 射线入射器官或组织,把遇到的细胞杀死,这不要紧,自然会有新生的细胞来补充。但如果把细胞杀伤,就比较麻烦了。受伤的细胞还要顽强地活下去,就可能发展成为癌细胞。进一步繁殖,发展成为癌变。但并不是每个受伤的细胞都会发展成癌细胞。这里存在着一个概率问题:照射剂量小,受伤细胞少,概率就低;反之,概率就高。把这种效应称为受照个人的“随机性效应”。随机性效应的主要表现是:随着剂量的增加,癌症发病率也增加,且没有最低“阈值”。癌症的严重程度与初始剂量无关。所以,当人体接受的

剂量低于“确定性效应”的阈值，并不是就没有危险了，接受的剂量会引起癌症发病率的增加。

3. 遗传效应——后代中的随机性效应 如果射线损伤了生殖细胞，这种损伤可以遗传下去，并表现为受照者后代的遗传紊乱。虽然在放射生物研究中尚未被确认，但是对动植物研究提示，这种效应将会出现。

4. 胎儿出生前受照效应 胎儿在母亲子宫中受照，会引起出生后智力迟钝，智商下降。尤其在怀孕 8~15 周期间，最为危险。在此期间胎儿受照 1Sv，出生后婴儿智商会下降 30 个智商点。

5. 小剂量刺激效应 有些实验数据表明，辐射可以刺激多种细胞的繁殖与修复。在有些情况下，辐射似乎还可以增强免疫响应及改变体内激素平衡。这种现象称为小剂量刺激效应。但是由于小剂量统计学上的困难，这些数据尚未成定论，尚未达到需要在放射防护中予以考虑的程度。

由上面的介绍可以看出，任何小剂量的照射，都可引起癌症危险度的增加。增加的幅度可由大剂量引起的危险度，按照线性模型外推得到。这就是现代放射防护的基础——“线性无阈”假说。与此而来的就是“ALARA 原则”的应用：我们接受的辐射剂量，要保持在可以合理做到的最低水平(As Low As Reasonable Achievable)。

第三节 电离辐射损伤的医学处理

1. 根据呕吐与红斑出现时间判定伤员接受的剂量 伤员受到电离辐射急性照射，及早判断出其所接受的辐射剂量值，对确定随后采取的治疗措施及预后判断，极为重要。伤员受照后呕吐与红斑出现时间是做出剂量判断的重要依据。若受照后无呕吐，无早期红斑，则全身受照吸收剂量应小于 1Gy，局部受照剂量小于 10Gy；若照后 2~3

小时出现呕吐, 12~24 小时出现红斑, 则全身受照剂量会有 1~2Gy, 局部受照剂量为 8~15Gy; 当照后 1~2 小时出现呕吐, 8~15 小时出现红斑时, 全身受照剂量可达 2~4Cy, 局部受照剂量会有 15~25Gy, 当照后 1 小时之内出现呕吐或低血压, 照后 3~6 小时出现红斑, 则全身受照剂量会大于 4Cy, 局部受照剂量会大于 25Gy。

2. 根据淋巴细胞绝对数, 预测愈后存活关系 照后 2 天的淋巴细胞绝对数是判定伤员是否存活的重要指标。当淋巴细胞绝对数为 700~1000/mm³ 时, 属轻度放射病, 肯定存活; 当淋巴细胞绝对数为 400~700/mm³ 时, 属中度放射病, 可能存活; 当淋巴细胞绝对数为 100~400/mm³ 时, 属重度放射病, 经治疗后可能存活; 当淋巴细胞绝对数在 100/mm³ 以下时, 属极重度放射病, 不易存活。

3. 高剂量率 γ 射线急性照射局部放射损伤特点 高剂量率 γ 射线急性照射是放射事故中常见的一种照射方式。其局部损伤特点列于表 1-1。

表 1-1 高剂量率 γ 射线急性照射局部放射损伤特点

病程	严重程度与相应剂量			
	轻度 8~12Cy	中度 12~30Cy	重度 30~50Cy	极重度 >50Cy
早期红斑	无或持续数小时	持续数小时到 3 天	均出现, 持续 2~6 天	均出现, 直至极期
假愈期	照后 15~20 天	照后 10~15 天	照后 7~14 天	无
极期	继发红斑	继发红斑、水肿、起水泡	继发红斑、水肿、疼痛、起疱、糜烂、溃疡、化脓	水肿、疼痛综合征、局部出血、坏死
缓发效应	照后 25~30 天, 干性脱皮	湿性脱皮, 1~2 月后在剥脱皮处长出新上皮细胞	溃疡持续数月, 如不移植皮肤, 溃疡不愈合	照后 3~6 周出现中毒性坏疽和脓毒症, 必须手术
愈后	受照部位皮肤干燥, 色素沉着	受照部位皮肤、皮下组织萎缩; 缓发放射溃疡	结痂与上皮缺失; 深度营养退化和硬化改变; 坏死	切除、溃疡复发和挛缩效应

4. 手指、手掌受照后症状与剂量关系 在放射事故中, 手指和

手掌是最常见的受照部位。其受照剂量与症状的关系可见表 1-2。

表 1-2 手指、手掌受照后症状与剂量关系

射线 类型	剂量 Gy	症状出现时间					晚期效应 d	愈后
		初始红斑 h	继发红斑 d	起水疱 d	糜烂溃疡 d	坏死 d		
轻度								
γ 高能 X	10~17 8~15	无	18~24	无	无	无	干性脱皮 30~35	无或轻微皮 肤萎缩
β 低能 X	12~18 10~15	<24	12~20					无
中度								
γ 高能 X	18~20 15~24	无或 24	12~18	18~22	无	无	湿性脱皮 45~50	萎缩， 2~3 年后晚期溃疡
β 低能 X	20~30 18~25	无或 6~12	6~14	8~15				无或皮肤萎 缩，色素减退
重度								
γ 高能 X	30~100 25~80	24	6~12	8~15	20~30	无	结痂 60~80	皮肤萎缩， 疤痕营养障 碍，关节变形， 骨质疏松，稍 后形成晚期溃疡
β 低能 X	35~100 30~70	4~6	3~7	5~10	10~18		结痂 60~80	皮肤萎缩， 色素减退，毛 细血管扩张
极重度								
γ 高能 X	>100 >80	4~6	1~4	3~6	6~10	6~10	不愈合	继发感染， 败血症，骨髓 炎，病理性断裂
β 低能 X	>100 >70	1~2	0~4	3~5	6~7	6~10	结痂 60~80	皮肤萎缩， 色素减退，毛 细血管扩张， 过度角质化

5. 根据伤员症状确定治疗安排 由于伤员接受的辐射剂量不同，

引起的症状也不一样,治疗方法会有很大差别。具体情况可见表 1-3。

表 1-3 根据伤员症状确定治疗安排

症 状	采 取 措 施
无恶心、呕吐或腹泻 照后 48 小时淋巴细胞绝对数大于 $1000/\text{mm}^3$ 。不会危及生命	定期观察症状变化
恶心,轻度呕吐,结膜发红,出现红斑 照后 48 小时淋巴细胞绝对数在 $700\sim 1000/\text{mm}^3$ 之间	轻度损伤;制订治疗计划
有明显恶心、呕吐;可能有腹泻,结膜发红、出现红斑 照后 48 小时,淋巴细胞绝对数在 $400\sim 700/\text{mm}^3$ 之间	可能危及生命;送省级或国家级核和辐射损伤救治基地治疗
很快出现剧烈呕吐、血性腹泻、红斑和低血压 照后 48 小时淋巴细胞计数在 $100\sim 400/\text{mm}^3$ 之间	会危及生命;送省级或国家级核和辐射损伤救治基地治疗
意识丧失。很快有剧烈呕吐、血性腹泻、红斑和低血压 照后 48 小时淋巴细胞计数低于 $100/\text{mm}^3$	不易存活;送省级或国家级核和辐射损伤救治基地治疗,支持性治疗

第四节 电离辐射防护原则

电离辐射的防护原则,就是要防止确定性效应的发生,并把随机效应的发生率降低到可以接受的水平。要达到这一目标,就要做到以下几点。

1. 实践的正当性 涉及照射的实践,即采取任何可能接受辐射剂量的行动,都要经过事先的论证,进行正当化分析。在此行动中,个人和社会得到的利益要大于辐射造成的危害。否则就不能采取这样的行动。

2. 防护的最优化 在进行实践的正当性分析之后,确定了要进行涉及照射的实践,此时要进行防护最优化分析:考虑经济和社会因素,采取防护措施,使受照人数、接受剂量保持在可以合理做到的最低水平。

3. 个人剂量限值 在进行了上述两项分析之后,从安全角度考

虑，还要对个人在行动中接受的剂量加以限制。以保证个人不会受到不可接受的辐射危险。个人剂量限值的具体数据在表 1-4 中给出。

表 1-4 个人剂量限值

剂量	职业人员	公众
有效剂量	20mSv / a (5 年平均, 任一年不能超过 5mSv)	1mSv / a (在特殊情况下, 允许 5 年平均)
年当量剂量		
眼晶体	150mSv	15mSv
皮肤	500mSv	50mSv
手和足	500mSv	

实践的正当性, 防护的最优化和个人剂量限值构成了一个完整的放射防护体系。三者同等重要, 缺一不可。不能只强调个人剂量限值 (标准) 一项, 把它当做一把尺子, 超过的就不行, 不超过的就通过。这其实是一种误解。必须全面贯彻整个放射防护体系。

通常在发生有放射性物质泄漏的核事故后, 人们最关心的是受放射性污染的食品是否可以安全食用。表 1-5 给出了这方面的数值。

表 1-5 食品中放射性核素的通用行动水平

放射性核素	通用行动水平(Bq / kg)
一般食品	
铯—134、铯—137、碘—131、钐—103、钐—106、铈—89	1000
锶—90	100
镅—241、钷—238、钷—239、钷—240、钷—242	10
牛奶、婴儿食品、饮用水	
铯—134、铯—137、钐—103、钐—106、铈—89	1000
碘—131、锶—90	100
镅—241、钷—238、钷—239、钷—240、钷—242	1

第五节 核反应原理及核事故分级

核反应包括核裂变反应与核聚变反应。原子弹爆炸与核电站是利用了核裂变反应原理。即 ^{235}U 受到中子打击后破裂成两块或三块（新的放射性核素）同时释放出大量能量。在自然界中， ^{235}U 仅占天然铀的 0.73%。只有当 ^{235}U 的丰度达到 3%，才可用作反应堆燃料。当然武器级的 ^{235}U 丰度要求就更高了。聚变反应的原理是在高温（1.5 亿摄氏度）、高压（140 万大气压）下，氘核发生聚变生成氦核，同时释放大量能量。核聚变释放的能量要比核裂变释放的能量高得多，并且绝对不存在放射性污染。除高温、高压条件外，要使氘核发生聚变也不容易，因为在常态下，氘为气体。要使其与锂—6 相结合成氧化锂—6，成为固体，才可用。自然界中锂—6 含量仅占天然锂含量的 7.5%，要使其丰度达到 40% 以上才能派上用场。所以到目前为止，利用核聚变反应发电还仅处于研究阶段。

2008 年国际原子能机构对核与放射事件给出了分级标准（INES）。具体情况如下。

1. 7 级——特大事故 有大量放射性物质释放，对健康与环境造成广泛影响，须采取应急措施和其他对策。如 1986 年的前苏联切尔诺贝利核事故、2011 年日本福岛核事故。

2. 6 级——重大事故 有明显放射性物质释放。需要采取应急措施。如 1957 年前苏联基斯迪姆后处理厂事故，高放射性废物罐爆炸，导致向环境中释放大量放射性物质。

3. 5 级——大范围事故 有限释放放射性物质，需要采取部分应急措施；辐射造成了多人死亡。如 1957 年英国温次凯尔反应堆事故，堆心失火导致放射性物质泄漏。1979 年美国三哩岛事故，堆心熔化，严重受损。1987 年巴西戈阿尼亚事故，一个废弃破损 ^{137}Cs 强

放射源导致 4 人受照死亡, 6 人受照达数戈瑞。

4. 4 级——局部事故 1999 年日本东海村事故, 核设施发生严重事故, 多名工人受到致死剂量照射。1980 年法国圣洛朗核电站事故, 反应堆中部分燃料熔化, 未向外部释放放射性物质。2006 年保加利亚福禄如斯事故, 一名工人受到来自一座商用辐照装置的高剂量照射, 出现严重健康影响。

5. 3 级——重大事件 2005 年英国塞拉菲尔德事件, 设备内大量放射性物质外泄。1989 年西班牙温德鲁斯事件, 临近失火, 导致核电站安全系统失灵。1999 年秘鲁亚南枸事件, 医用放射源发生事件, 导致严重放射烧伤。1999 年土耳其依克特利丢失了一枚强 ^{60}Co 放射源。

6. 2 级——事件 2005 年阿根廷阿图查事件, 一名工人受到来自核电站反应堆的过量照射 (超过年剂量限值)。1993 年法国卡达拉克事件, 放射性污染超出了预期设定边界。2006 年瑞典福斯马克事件, 由于特殊原因导致核电站应急动力供应系统失效, 使安全性降低。2005 年美国一名操作员受到了过量照射, 超过了放射人员的年剂量限值。1995 年法国, 加速器设备进出口控制系统失灵。

7. 1 级——异常 核设施操作规程受到破坏。

第六节 世界与中国的核电发展

截止到 2011 年 1 月, 全球共有 29 个国家拥有核电站。全球有 442 台正在运行的核电机组, 中国有 13 台。全球有在建核电机组 65 台, 中国有 28 台, 占 43%。到 2015 年中国预计核电装机容量 4294 万千瓦; 2020 年预计中国核电装机容量 9000 万千瓦。目前中国湖北、湖南、江西、安徽、河南、四川、重庆、甘肃、吉林等内陆省市已提出了建核电站计划。在 40 多个已通过初审的核电项目中, 内陆厂址

约占 75%。

中国的发展核电战略：1983 年是“要大力发展核电”。1985 年是“本世纪以火电为主，逐步加大水电的比重，核电是一个补充”。2007 年是“核电发展专题规划是电力发展规划的重要组成部分”，核电发展方针是“以我为主，中外合作，积极引进，推进国产”。

核电站周围居民健康与卫生监测工作指南（卫办监督发〔2010〕142 号）要求：核电站运行前、运行期居民食品、饮用水监测；进行核电站 50km 范围内居民健康状况调查，其中包括：放射性本底值；全癌症、白血病、甲状腺癌发病率，甲状腺疾病；完善核事故医学应急计划与准备，监测核裂变产物（特别是放射性碘）对公众的影响。