

辐射的生物损伤与防护标准的变革

郑华智

(中国科学院近代物理研究所)

摘要: 本文回顾了辐射生物损伤的认识过程, 防护标准的历史演变, 重点介绍了辐射危害的定量评价资料和 ICRP1990 年建议书的内容。

一、引言

国际辐射防护委员会 (ICRP) 是辐射防护领域的世界权威性组织。它的建议书是该组织的主要出版物, 也是各国制定国家防护管理标准的基本依据。1990 年 11 月, ICRP 在英国切尔顿召开的全体会议上, 一致通过了新的建议书, 该建议书将作为 ICRP 第 60 号出版物正式发表。与 1977 年建议书 (ICRP 第 26 号出版物) 相比较, 新建议书最重要的变动是把职业性照射剂量限值从每年 50mSv (5rem) 降到 5 年内平均每年 20mSv, 附加条件是任意一年中不得超过 50mSv。此外, 新建议书在名词术语、概念体系上都有不少变化, 例如剂量当量改称为当量剂量, 有效剂量当量改称为有效剂量等^[1,2]。

二、历史的教训

远在人类能够认识并控制辐射之前, 辐射对人类的作用就已存在。除了天然本底外, 由于日益发展的生产活动和科学实验, 使人类自身不自觉地受到了不同来源的辐射作用, 如铀被用于玻璃与瓷釉, 钷被用于气灯纱罩的生产。最严重的是在德捷边界处矿山中流行数百年的“矿山病”导致大量矿工的死亡, 直到 1921 年才查明是由于吸入高浓度的氡气引起的肺癌所致。

辐射的生物损伤是在人类付出惨痛代价

后才逐渐认识的。1895 年, W. C. Röntgen 发现 X 射线后二、三个月, 一名 X 射线球管制造者的手受照射, 引发了特异性皮炎, 导致晚年手和手指的切除。1896 年 3 月, T. A. Edison 眼部受照数小时, 引起疼痛, 继而发生结膜炎。同年 4 月, 有人用 X 射线确定头骨中异物位置, 意外发现病人脱发秃头和严重皮肤反应, 到 1897 年, 已有上百例的 X 射线受害者。1902 年, 首次报导 X 射线照射引起溃疡继发皮癌, 到 1904 年已报导 104 例辐射诱发的癌症、再生不良性贫血等恶性疾病患者。1927 年, 辐照动物果蝇实验, 发现遗传突变概率大大增加, 由此遗传效应也引起人们的注意。

1896 年, H. Becquerel 发现天然放射性和 1898 年居里夫妇发现并分离出了镭, 提供了与 X 射线完全不同的新辐射源。辐射生物损伤也随之扩大, 导致了許多悲剧的发生。1901 年 4 月, Becquerel 把从居里夫人处借来的装有镭盐的小玻璃管放在上衣口袋里 6 小时, 7 天后接触处皮肤发红, 11 天后发生溃疡。居里夫人为验证辐射伤害, 特意用氯化镭接触自己皮肤 10 小时, 在第 3 周出现溃疡。由于在长期的研究中经受过量辐照, 居里夫人患再生不良性贫血病病倒了。皮埃尔·居里为了弄明白镭射线的生物危害, 曾故意照射自己腕部数小时, 出现了类似日晒后的反应。他们的女儿艾·居里也是由于放射性引起的白血病逝世的。早期的著名科学家, 如 Röntgen 夫妇和后来的费米等, 都是辐射的受害者。截

止到 1922 年,就已有 100 名以上的放射学家死于职业照射诱发的癌症。

在镭的早期应用中,使用量最大,后果最严重的要算表盘涂料工业。到 1925 年,美国新泽西州钟表厂,在使用镭激活发光涂料的、只有几年工龄的 800 名青年女工中,已有癌症患者 50 多例,其中 18 名死于再生障碍性贫血和伴有严重口腔炎的骨肉瘤,这是因为她们频繁用舌唇舔有镭液的毛笔尖,无知给她们带来多么惨痛的后果。

X 射线和镭的生物效应研究与广泛的应用极大地推动了医学的发展,但同时也伴随着某些人士“包治百病”的泛滥,致使许多病人接受过量照射治疗而死于癌症(包括白血病),这种情况一直延续到四十年代。它的副产品是积累了十分难得的人体辐射效应的直接观察资料,人们逐渐认识到过量照射可以引起皮肤烧伤、脱发、溃疡、血相变化、损害造血器官、性腺、眼晶体、引起不育和诱发癌症等。从而,吸引了一批有远见卓识的科学家去收集研究生物效应与剂量的关系以及预防辐射损伤的办法。

三、辐射防护标准的历史演变

在付出了沉重的代价后,人们要求对辐射的危害采取防护措施,这就需要对辐射拟定一个可以度量的量,探求辐射损伤与这个量的关系。由于辐射数量含有医学味道,故命名为剂量。承袭以往对付毒物的传统办法,希望找到一个剂量阈值,在阈值以下照射是安全的,从而,由此产生了辐射安全标准。

1925 年,Mutscheller 第一次提出“耐受剂量”概念,并根据实际经验,建议以 30 天内皮肤“红斑剂量”(引起皮肤红斑反应的辐射量)的 1/100 为耐受标准,大约相当于 0.2R/d。同年稍后,Mutscheller 和 Seivert 又联合建议修改为每年“红斑剂量”的 1/10,大约相当于 100kV X 射线 25R/a,或者 200kV

的 X 射线 50R/a。1930 年以前,各国选用的标准很不一致,法国选用的耐受剂量高达 4000R/a,而英国所用的是 0.7R/d。美国使用的防护标准是根据 1929 年成立的美国国家辐射防护委员会(NCRP)提出的建议,1931 年 NCRP 的标准为 0.2R/d。1928 年,在国际放射学大会上,成立了国际辐射防护委员会,简称 ICRP。原名国际 X 射线与镭防护委员会,缩写为 IXRPC,为统一防护标准开辟了道路。它在 1934 年接受了耐受剂量的概念,采用了 0.2R/d 的标准,这个值也相似于当时英国所用的 1R/w 的剂量率,ICRP 提出的这个标准一直延用到 1950 年。1936 年,NCRP 考虑到造血器官对放射性照射比皮肤更敏感,把耐受剂量率降到 0.1R/d,并作为曼哈顿工程辐射防护使用的基本标准。1947 年,英国也将标准降到 0.5R/w,美英两国标准趋于一致。然而两年之后,根据辐射生物效应研究的新成果,NCRP 再次降低到 0.3R/w。1950 年 ICRP 认识到耐受剂量概念不妥,改用最大容许剂量(MPD),数值与 NCRP 所规定的相同。MPD 的定义是“在此剂量率的长期照射下,根据现在的知识水平,在一生中的任何时候也不会引起可感觉到的身体损伤”。显然从耐受剂量到 MPD 是个进步。

随着原子能事业和辐射应用的飞速发展,射线种类和能量范围显著扩大,受辐照人数剧增。与此同时,医学和生物学也有了异乎寻常的进步。人们认识到从整个社会考虑,需要对 MPD 有更加严格的限制。1956 年,ICRP 推荐了新的个人剂量限值,把 MPD 值降低到原来的 1/3;即职业辐射工作者全身均匀照射的 MPD 为 5R/a,同时按身体各部位和各器官对辐射敏感程度的差异,分别规定了不同的标准。MPD 的定义修改为“无论是长期积累还是一次受照所接受的剂量,根据现在的知识,它产生严重躯体损伤或遗传损伤的概率是微不足道的,它所引起的最常见的任何影响也是很轻微的,受照者个人

和专门的医务人员也认为可以接受。”

在 1965 年, ICRP 在辐射效应的认识上又有了重大发展, 认为任何数量的照射都伴有一定程度的危险。这反映在 ICRP 的第 9 号出版物中, 抛弃了 MPD 概念, 要求在考虑到经济及社会因素的条件下, 所有的剂量都应该保持在不难达到的最低水平。

1977 年, ICRP 全面研究了新的资料, 重新审议了以往的工作, 发表了著名的第 26 号出版物, 取代了以往的基本建议, 在辐射防护指导思想、原则和概念、辐射量及其单位上都有许多大变动, 从而把防护标准理论发展到现代的水平, 并产生了深远影响。在这个建议书中, 辐射量全部采用了国际制 (SI)

表 1 ICRP 1990 年建议的新剂量限值

应 用	剂量限值 ⁽¹⁾	
	职业人员	公 众
有效剂量	每年 20mSv 在规定的 5 年 内平均 ⁽²⁾	1 年 1mSv
年当量剂量		
眼晶体	150mSv	15mSv
皮肤	500mSv	50mSv
手、脚	500mSv	—

附注: (1) 所列限值用于在规定期间内接受的外照射有关剂量与同期间摄入引起的 50 年待积剂量 (对儿童到 70 岁) 的总和。

(2) 同时规定任何单独一年的有效剂量不超过 50mSv。

表 2 个人剂量限值的历史发展

年代	国家或提出机构	剂量限值	使用术语
1924	法 国	(4000 rem/a)	
	英 国	0.7 R/d (326 rem/a)	
1925	美 国	1/10 红斑剂量/a	
	瑞 典	(50 rem/a)	
1925	Mutscheller	0.2 R/d (73 rem/a)	耐受剂量
1931	NCRP	0.2 R/d (73 rem/a)	耐受剂量
1934	ICRP	0.2 R/d (73 rem/a)	耐受剂量
	英 国	1 R/w (52 rem/a)	耐受剂量
1936	NCRP	0.1 R/d (36 rem/a)	耐受剂量
1947	英 国	0.5 R/w (26 rem/a)	耐受剂量
1949	NCRP	0.3 R/w (15 rem/a)	最大容许剂量
1950	ICRP	0.3 R/w (15 rem/a)	最大容许剂量
1956	ICRP	5 rem/a	最大容许剂量当量
1965	ICRP	5 rem/a	可以接受的剂量水平
1977	ICRP	5 rem/a	剂量当量极限
1990	ICRP	20 mSv/a (2 rem/a)	剂量限值

单位, 放射性强度、吸收剂量、剂量当量的单位分别用贝克勒尔 (Bq)、戈瑞 (Gy)、西弗特 (Sv) 取代了居里 (Ci)、拉德 (rad)、雷姆 (rem)。1977 年建议书的最大贡献是首次

提出了作为辐射防护指导原则的剂量限制体系, 简称为辐射防护三原则: 辐射实践的正当性、辐射防护的最优化和个人剂量限制。实践的正当性判断是指引入伴有辐射照射的某

种新实践,必须是扣除了代价后能带来纯利益的。辐射防护最优化是指在考虑到经济和社会因素的条件下,所有辐射照射都应保持在尽可能低的水平。个人剂量的限制用剂量限值来体现。建议书用剂量限制取代了MPD,尽管该建议书的剂量限值与MPD的数值相同,都是50mSv/a(5rem/a),但其意义和作用是有原则区别的。

ICRP一直在积极活动着,1990年11月在英国牛津郡国家辐射防护局总部通过的新建议书认为,新的数据是对以往资料的新解释。现已表明,某些与辐射有关的危险值约为十年前估计值的三倍。这就要求委员会对其建议书做一些数量上的变更。新建议书的剂量限值归纳于表1^[1]。新建议书重申要继续保持并加强其辐射防护体系,强调防护安排的最优化,要求采取一切合理的措施来限制由人为活动引起的照射。

回顾历史可以看到,个人剂量限值作为辐射防护的基本标准,其数值在不断地变化。职业性全身照射的年剂量限值也在降低。表2汇总了个人剂量限值和所用术语的历史演变^[3,4]。

四、辐射生物危害的 定量评价

辐射生物损伤是由于射线与细胞的相互作用,将辐射能量传递给细胞,引起细胞内的原子和分子的电离或激发,从而使细胞受到损伤。其中脱氧核糖核酸(DNA)的损伤最为明显,DNA损伤后可能被细胞所修复,或影响细胞的存活和繁殖,或产生生活的但却发生了变异的细胞。从辐射损伤的角度看,人体的细胞可以分为两大类:体细胞和胚细胞。体细胞受到损伤,使受照者本人受到危害,这种效应称为躯体效应,例如眼晶体的白内障、皮肤的良性损伤和造血障碍等,但最主要的躯体效应是诱发癌症。倘若胚细胞受到辐射

损伤,可能对受照者的下一代或者以后各子代的健康产生影响,这种效应称为遗传效应。

从辐射防护角度出发,根据辐射效应与剂量的关系可分为随机性效应和决定性效应。辐射造成的细胞伤亡是一个随机过程,当器官或组织内有足够数量的细胞被杀死或不能繁殖时,会出现器官功能丧失,则发生决定性效应。它属于躯体效应,临床表现很多,如白内障、晶体混浊、皮肤红斑、脱毛、造血障碍和精子细胞损伤引起的生育力降低以致不育等等。

决定性效应的特点是存在着明显的剂量阈值。超过阈值后,效应的严重程度随剂量而变化。照射剂量很小时,引起损害的概率为零,当剂量增加时,损害的概率与剂量呈“S”形相关,剂量提高到一定程度后,概率增加到100%,这个剂量称为阈剂量。超过阈剂量后损害的严重程度将随剂量和剂量率上升而增加。需指出的是,这个阈值不是效应基本机制的阈值,而是从临床水平上可观察症状的阈值。在辐射防护上只要使受照剂量远低于阈值就不会发生决定性效应。ICRP提供的人体产生决定性效应的阈剂量值列于表3中。

随机性效应是指发生概率与剂量的大小有关的效应,主要表现是各种癌症(包括白血病)和遗传性疾病。对这种效应不存在剂量阈值,任何低剂量照射都有可能发生,只不过概率小些而已。这样,对随机效应就不可能做到完全防止,只能做到限制其发生率。因此,ICRP建议书中明确指出,辐射防护的目的在于防止有害的决定性效应,并限制随机性效应的发生率,使之达到被认为可以接受的水平。那么,多大的风险概率才是可以接受的呢?可以这样来考虑^[5],(1)与其它职业和自然存在的危害进行比较,由于辐射引起的职业危害是很小的。(2)癌症是辐射产生的主要危害,比较辐射诱发的死亡性癌症和总的癌症死亡率,应该是很低的。(3)技

术上是可行的,经济上是合理的,过高的要求以致于实际上行不通也是没有意义的。表4列出了一些行业由于职业原因引起的死亡率,可见制造业的安全记录最好,年死亡率为 $1.9 \times 10^{-4}/a$ 。表5给出了北京市18个区县,中国29个省市和世界27个国家癌症年

平均死亡率的变化范围、平均值和标准偏差。如果认为与标准偏差相当的危险对职业照射来讲是可以接受的,那么其中标准偏差最小的是 1.014×10^{-4} ,所以,ICRP 1977年建议书选择 1×10^{-4} 为辐射工作的危险的标准,由此导出防护标准的剂量限值。

表3 引起决定性效应的阈剂量值

决定性效应	阈剂量值	
	急性照射 (Gy)	迁延照射 (Gy/a)
照射睾丸引起男性暂时不育	≈ 0.15	≈ 0.4
照射睾丸引起男性永久不育	3.5~6	≈ 2
妇女永久不育	2.5~6	≈ 0.2
低LET照射引起白内障	2~10	> 0.15
照射骨髓引起造血功能明显障碍	0.5	> 0.4
全身均匀照射 60天内半数死亡	3~5	

表4 部分行业由于职业原因引起的死亡率

行业	死因	范围	时间	年死亡率
采矿业	事故	全世界	1965—1974	1.1×10^{-3}
建筑业	事故	全世界	1965—1974	6.7×10^{-4}
铁路	事故	全世界	1965—1974	4.5×10^{-4}
制造业	事故	全世界	1965—1974	1.9×10^{-4}
各种工业	事故	全世界	1965—1974	6×10^{-4}
各种工业	职业病	意大利	1965—1971	1.1×10^{-3}

表5 部分区域癌症年平均死亡率及其标准偏差 ($\times 10^{-4}$)

区域	年平均死亡率变化范围	年死亡率平均值	标准偏差
北京市18个区县	5.091~5.537	6.329	1.014
中国29个省市	2.963~10.156	6.586	1.79
世界27个国家	2.42~16.25	11.812	3.795

现在讨论单位剂量辐射所致随机效应的发生概率,命名为额定概率系数,以前称危险度。近年来,有关人群的生物效应(放疗副作用,意外辐射事故的观察等)以及动物和细胞培养实验,特别是长崎、广岛原爆的

剂量修订结果(即DS 86报告)和最近一轮9万名幸存者的数百万人年随访统计中新发现的癌症病例^[6],已积累了相当数量的有价值的资料。此外,在计算受照人员今后癌症发生率预测模型研究方面也取得了大的进

展。联合国原子辐射效应科学委员会的报告(UNSCEAR 1988)和美国国家科学院电离辐射生物效应委员会的报告(BEIR V.1990)分别进行了综合分析,在此基础上,ICRP 多次讨论后明确认为,随机效应的额定概率系数应该比 1977 年的数值有明显的增加。现将最新值列于表 6 中。表中,全体居民组比工作人员组的概率系数高,是因为前者包括了儿童等对辐射更敏感人群。孕妇受照将引起儿童智力障碍,例如妊娠 8~15 周宫内受照后,出生儿童智力下降约 30 IQ 点/Sv(即 $30 \times 10^{-2}/\text{Sv}$)。严重智力迟钝儿童的发生率随子宫内受照剂量而增加,增加概率大约 0.40/Sv。这就表明在正常水平照射下,不可能发生个体严重损伤,只在大剂量照射后才能出现智力下降,故表 6 中没有列出^[1,7]。

表 6 辐射引起随机性效应的额定概率系数 ($10^{-2}/\text{Sv}$)

生物效应	成年工作人员	全体居民
致死性癌症	4.0	5.0
严重遗传效应(权重后)	0.6	1.0

借助随机效应的额定概率系数可以得知接受不同剂量时,各种危害发生的概率。表 7 给出了工作人群接受不同剂量照射所致危害的评价指标。年有效剂量 20mSv 是 ICRP 新推荐的限值,50mSv 是旧值。从表中了解到,每年接受 50mSv,终生癌症死亡概率高达 8.6%,人均寿命损失 1.1 年,这显然是很高的,因此 ICRP 新建议书限值减为每年 20mSv。防护体系全面贯彻后,实际很少有人接受这样高的照射。

表 7 职业工作人群(18~65岁)接受不同剂量照射所致危害的评价指标

年有效剂量 (mSv)	10	20	30	50
终生剂量近似值 (Sv)	0.5	1.0	1.4	2.4
合计危害 (%)	2.3	4.8	7.0	11.3
归因死亡概率 (%)	1.8	3.6	5.3	8.6
非致死性癌症的加权贡献 (%)	0.2	0.5	0.7	1.1
遗传效应的加权贡献 (%)	0.3	0.7	1.0	1.6
归因死亡病例的时间损失 (Y)	13	13	13	13
18 岁时的预期寿命平均损失 (Y)	0.2	0.5	0.7	1.1

剂量限值的选取是个复杂的问题,需要定量考虑与危害评价有关的各个因素,而有些因素的定量计算是相当困难的。这是因为人类对辐射效应的直接观测资料还是很有限的,尤其是低剂量照射的情况。随机效应很小的概率,相当长的潜伏期,辐射诱发疾病与其它原因诱发的疾病难以区分,以及辐照方式、辐射种类和能量的变化等都增加了不确定因素。虽然动物实验获得了许多有益的成果,但终究不能完全代替人类流行病学的研究,况且从统计学观点看,动物实验的数量也毕竟是有限的。对此,ICRP 的态度是密

切注意新发表的资料,已经注意到所做的评价对照射后果不要造成低估。力求维持建议书的稳定性,假若有证据表明需要对现有建议进行改动,ICRP 将迅速作出反应。

由于辐射损害的随机性效应没有阈值存在,不论多么小的剂量都是有害的,又由于世上绝对无害的事是没有的,人们不会因噎废食,也不可能不惜一切代价地降低受照剂量,所以 ICRP 强调辐射防护最优化的重要性,应将一切照射保持在可合理达到的最低水平。不能把剂量限值作为设计和安排工作

(下转第 39 页)

Akioka 等人^[7]曾分析过动脉和静脉中游离脂肪酸的血药浓度,观察到运动会明显降低心肌对脂肪酸的吸收。有心脏病的人降低(37~51)%,无心脏病的人降低(6.9~16)%。Costill 等人^[8]也报导过类同的实验结果。因此,受试者不论是否有心脏病,在测试期间都应该处于休息状态。

五、结 论

通过研究心肌对脂肪酸代谢而建立起来的、用呼气实验检查心脏病的方法,能够清楚地区分心肌梗塞与正常的情况。尽管它还不能完全区别各类心脏病,但它在评价心肌功能等许多方面还是有价值的。经过进一步研究,比如寻找更有特征的标记脂肪酸,寻找其它更有鉴别能力的参数等,¹³C 呼气实验用于心脏病的检查就会更加完善。

(上接第 45 页)

的直接依据,它更不是区分安全与危险的界线。剂量限值作为强制性的约束条件,是不允许接受的剂量范围的下限,而不是其上限。实现最优化后,只在很少情况下才有必要使用个人剂量限值。

辐射防护设计和安排的依据只能是最优化,这不仅是定性考虑问题的方法,也是定量评价问题的方法。近年来,在 ICRP 和 IAEA 等国际组织推动下,最优化的实际应用已经取得较大进展,代价与利益分析法已基本成熟,多特征分析法等正在积极开发中。目前还有许多工作等待开展,特别是如何把危害与工程费用放在同一尺度上来考虑,鉴于各

参 考 文 献

- [1] Peter D. Klein, E. Roseland Klein, Stable Isotopes (Proceedings of the 4th International Conference, March 23-26 1981) 347
- [2] 夏宗勤等,核技术(3)1(1985)
- [3] 曾文炳等,中国科学院兰州地质研究所生物气体地球化学开放实验室研究年报,兰州:甘肃科学技术出版社 1986, 215-226
- [4] Weiss E. S. et al., Prog. Cardiovasc Dis. 20, 191-206 (1977)
- [5] Klein M. S. et al., Am. J. Physics 237, H51-H58 (1979)
- [6] Richard A. Goldstein, et al., J. Nucl. Med. 21, 342-8 (1980)
- [7] H. Akioka, et al., Jap. Heart J. 7, 267-274 (1975)
- [8] D. L. Costill, et al., J. Appl. Physics 34, 764-769 (1973)

国情况的差异,我国必须开展自己的研究。

参 考 文 献

- [1] 孙世荃,辐射防护通讯,6,1(1990)
- [2] 郑华智,核物理动态,8,1,47(1991)
- [3] H. W. Patterson and R. H. Thomas, Accelerator Health Physics, Academic Press (1973)
- [4] 谢滋,中华放射医学与防护杂志,(1981)
- [5] 潘自强,辐射防护,2,5,334(1982)
- [6] M. P. Little and M. W. Charles, Health Physics, 59, 6, 765 (1990)
- [7] F. A. Mettler and W. K. Sinclair, Health Physics, 58, 3, 241 (1990)