



中国核学会辐射防护学会

第一次学术交流会议论文选编

辐射防护

原子能出版社

辐 射 防 护

中国核学会辐射防护学会第一次学术交流会论文选编

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书为中国核学会辐射防护学会第一次学术交流会论文选编,是我国近年来辐射防护科学技术成果的荟萃,也反映了国内辐射防护工作的概貌和动向。本书共选入90篇文章,分成四个部分:第一部分包括辐射防护标准与评价、核安全技术及防护方法;第二部分是辐射监测方法和测量装置;第三部分是辐射对环境的影响和三废处理;第四部分为辐射生物效应、医学防护和促排药物的研究。全书内容丰富,文字简练。

本书可供与放射性有关的科研、生产、卫生等单位的科技人员、管理干部以及大专院校师生参考。

辐 射 防 护

中国核学会辐射防护学会第一次学术交流会论文选编

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16 · 印张21³/₄ · 字数516千字
1982年6月北京第一版 · 1982年6月北京第一次印刷
印数001—2600 · 统一书号: 15175·399

定价: 2.70元

编 者 的 话

1980年3月6日至13日在太原市召开了中国核学会辐射防护学会第一次全国代表大会暨首次辐射防护学术报告会。

出席会议的代表共一百三十多人。他们来自全国各地区的科研、生产、设计、教育、卫生等各条战线，有在辐射防护领域中年资较高的专家、教授；有成绩显著的中青年科技工作者；还有热心支持学会工作的有关部门的领导干部。中国核学会理事长王淦昌在会上讲了话。

会议收到学术报告二百多篇，内容涉及辐射剂量学、辐射监测、防护与评价、环境保护、三废处理、生物效应与医学防护等各个方面。其中多数是近期的研究成果或经验总结，反映了我国辐射防护工作的进展情况。

近年来，我国辐射防护科学技术取得了明显的成绩，但与国际先进水平相比，还有相当大的差距。认真总结经验，加强学术交流，以推动辐射防护工作的发展，缩短与世界先进水平的差距，这就是今后的重要任务之一。出版本选编的目的也在于此。

本选编共搜集90篇文章，分为四个部分：第一部分包括辐射防护标准与评价、核安全技术及防护方法；第二部分是辐射监测方法和测量装置；第三部分是辐射对环境的影响和三废处理；第四部分为辐射生物效应、医学防护和促排药物的研究。我们期望它对辐射防护工作者有一定的参考价值。

参加本选编编辑工作的有叶常青、郑汝宽、王福臣、徐明达、祝汉民、张文浩和李玉成等同志。由于我们水平所限，编辑工作中难免有不当之处，请读者批评指正。

《辐射防护》编辑小组

1981年6月

目 录

有效剂量当量与剂量当量指数量	1
小剂量、低剂量率电离辐射对人的影响	6
辐射防护的发展	11
放射医学实验研究用 γ 照射室	15
人体剂量模型的研制	22
微量剂量学与辐射防护中的品质因子	26
我国成年人的某些生理参数	32
核反应堆的安全性问题	37
研究性重水反应堆上氚的监测与防护	41
1.5m回旋加速器运行时的辐射场	46
低能加速器的辐射安全	52
深部X线治疗机的辐射防护	57
30—300keV仪器校准用重过滤X射线源	60
186eV中子束 ^{238}U -过滤装置的研制	64
$1\pi\alpha$ 计数器	66
校准辐射防护仪表的刻度室	68
β 外照射的监测	70
测量环境辐射照射量率的高压电离室	73
气流电离室测低水平氚时应注意的一些问题	80
超薄II型热释光剂量元件的制作和应用	82
累积式多球中子计数器	86
$\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 热释光探测元件的光子、中子响应	91
热释光探测器在 γ 外照射监测中的应用	93
单光电子热释光剂量测量装置	96
LiF 热释光探测器剂量重现	100
硫酸钙(镱)-聚四氟乙烯热释光探测器	102
天然铀燃料元件生产中的 β - γ 外照射	105
鉴频式自动换档线性计数率表	108
个人 γ 照射量报警仪	111
测定大气中氡子体浓度的两段法	113
测定空气中 ^{222}Rn 的双滤膜法	120
核燃料工业中放射性微粒粒度特征	122
金属筛取样器的应用	124
空气中微量铀的快速分析	128
用氧化-冷凝法进行大气中总氡量的监测	130
空气中镭-241、镭-242的测定	132

环境土壤和空气中钷的测定	135
水样中 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 的连续分离和测定	141
应用“激光22”测定痕量铀的研究	146
弱 β 废水连续监测仪	149
水样中总 α 测定方法的研究及总 α 、总 β 船试报告	151
生物样品快速灰化方法及有关装置的研究	154
动物组织中 ^{239}Pu 的测定	159
铀矿山废水对周围农田污染的调查	161
铀水冶废水和环境污染	165
铀矿废水对环境的污染与居民所受剂量的估算	168
某矿外环境中水生生物污染的调查	170
放射性元素在水和岩石中的分配系数的测定以及裂变产物在地下水中的迁移	175
放射性核素向牧草-羊体的转移	178
长江某段扩散参数测量实验	182
某厂区固定监测点空气铀浓度的峰值期和季节变动的研究	186
原子能研究所周围植物中 ^{131}I 、 ^{125}I 污染的普查和有关参数的测定	188
放射性落下灰对环境污染的特点及卫生评价	194
海洋生物浓集 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 的研究	199
活性炭吸附法消除空气流中放射性碘的性能研究	202
应用国产天然沸石处理放射性废水的研究进展	207
硝酸钠型废液水泥固化研究	211
聚氯乙烯塑料固化几种放射性废物	218
放射性废物实验焚烧炉的试验与研究	220
小剂量 γ 外照射和若干环境因素对动物机体的综合作用	225
内外复合照射对狗的生物效应	227
长期吸入氦及氦子体诱发大鼠肺癌的观察	232
铀矿粉对肺泡巨噬细胞作用的研究——相差镜下的观察	236
^{210}Po 在狗毛、血中的蓄积和氦-222 子体暴露水平关系的研究	239
大鼠体内 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 含量与氦子体累积暴露量的关系	242
妊娠期氡水照射对胎鼠大脑发育的影响	244
稀土球墨铸铁生产场所的放射卫生学研究	248
残余辐射场小剂量外照射人员十年医学观察	253
镭-252和镭-铍中子源照射离体人血诱发淋巴细胞染色体畸变的剂量-效应关系	255
100 例医用 X 线工作者的染色体畸变	260
肺内石英粉尘累计负荷量的估算方法及其在不同矿山的应用	262
矿工肺癌氦子体累积暴露量的估算	267
铀水冶厂劳动条件对职工健康影响的调查分析	272
某铀矿职工外周血 E 玫瑰花结形成细胞的观察	277
某厂铀作业职工的健康调查	278

难溶性铀生物效应的研究.....	281
原子能研究所医学防护工作20年.....	286
重水反应堆工作人员的健康评价.....	291
一例硝酸铀酰复合烧伤伤员体内铀负荷量的估算及医学随访.....	296
$^{238}\text{PuO}_2$ 扩散事故的处理.....	298
四例 ^{239}Pu 体内污染者临床观察总结.....	302
^{137}Cs 的滞留和排泄研究.....	304
人体内 K、 ^{137}Cs 、 ^{203}Hg 、 ^{60}Co 的测定.....	308
裂变碘核素在甲状腺的微观剂量分布.....	311
尿和大便中 ^{147}Pm 的测定.....	317
尿中微量铀的快速测定.....	319
^{14}C -811 在小鼠体内的药物代谢动力学.....	321
含 ^{14}C -811 的脂质体在小鼠体内的分布特点.....	327
新型螯合剂 H-73-10 促排钚的研究.....	330
口服他巴唑及甲状腺素加速体内 ^{131}I 的排出.....	334

有效剂量当量与剂量当量指数

李 德 平

一、辐射的随机性效应

“辐射防护的目的在于防止有害的非随机性效应，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。”〔国际放射防护委员会（ICRP）第26号出版物〕在此，近代辐射防护工作重视随机性效应的观点已经充分体现。

辐射防护中来自对其他有害物质的防护学科中的有阈的观点，只适用于躯体效应中的非随机性效应。既然非随机性效应的严重程度取决于所受剂量的大小，那就很可能存在不发生这种效应的阈剂量，或者至少存在一个实际上的阈值，在此以下所发生的效应是目前水平所无法觉察或可被认作是无害的。在辐射防护中，过去有相当多的概念、原则、措施和法规等是基于这样的有阈观点的。

随机性效应则是其发生的概率与所受剂量大小有关而其严重程度与剂量大小无关的效应。这个概念是早就形成了的。在辐射防护领域中，对癌与遗传缺陷的定量估计已进行了20年，并且已把在很低剂量下发生这种危险的可能性用作防护措施的依据，尽管并没有这种危险确实存在的证明^[1]。当然，高标准的防护就是要使人类得不到存在这种危险的直接证明，否则代价就太大了。因之，人类为自己所定的限制随机性效应的安全界限总是要包含某种外推或臆测的成分的。放射生物学知识和人类接触辐射所积累的经验以及对待这种有可能发生广泛而长远后果的问题有必要采取的审慎的态度，都使人们相信把随机性效应看作无阈是合理的和必要的，因此对随机性效应而言，防护的原则是使剂量保持在“能合理做到的尽可能低的水平”（ALARA）；另外还要规定一些合理的防护限值，把随机性效应的发生率限制在可以接受的水平。这在生活中是常用的办法，例如限制汽车时速来把交通事故率限制在可以接受的水平。在实际辐射防护工作中，随机性效应的防护限值常常远低于非随机性效应的防护限值，因而对前者需要更加注意。

为了限制随机性效应，需要改变防护上的一部分传统观点。其实，对待化学致癌致畸变物质的防护也迟早会有类似的改变。在宣传教育上，说明随机性效应比有阈的非随机性效应要困难得多，这还需要辐射防护工作者为此作更多的工作。

二、有效剂量当量

既然承认辐射的随机性效应是无阈的，那么在足够低的剂量范围内就可以认为它的发生概率与剂量大小近似成正比（即线性无阈）关系。在辐射防护所关心的极小概率下，几个作用或几种效应的危害（辐射所致损害的数学期望，即各种效应发生率的数学期望与表示危险程度的权重因子的乘积之和）应等于它们分别作用时的危害之和，即危害可以叠加。这样，对由相同个体（从人直到细胞）组成的群体，辐射随机性效应的危害在线性范围内将正比于

各个体所受剂量之总和，而与剂量在个体间的分布无关；对于不同个体组成的群体，只要把个体剂量按其敏感程度加权即可。所以，随机性效应对个人危害的合理表征，应该是各器官剂量当量的加权均值，即有效剂量当量

$$H_E = \sum_T W_T H_T = \sum_T W_T N_T Q_T D_T$$

式中， D_T 和 H_T 为器官(T)的吸收剂量和剂量当量； Q_T 为照射该器官辐射的品质因子； N_T 是为其他因素规定的改正值(目前为1)； W_T 为权重，其数值可见图1。因此，各种因素在 H_E 中都已考虑在内了。近代微剂量学对作为传能线密度的函数 Q 的挑战，下面另有文章介绍。

器官	权重
1—性腺	0.25
2—乳腺	0.15
3—红骨髓	0.12
4—肺	0.12
5—骨表面	0.03
6—甲状腺	0.03
7—其余器官 [●]	0.30
8—(皮肤) [●]	(0.01)
	1.00

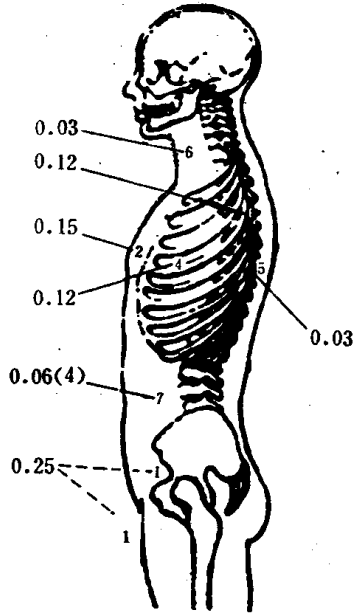


图1 有效剂量当量权重因子示意图

- 可以认为是不包括手、前臂、足、踝、皮肤、晶体在内的其余五个接受剂量当量最大的器官分别予以权重0.06；消化道受照射时，胃、小肠、大肠上下段可以视作四个器官。
- 估计对群体的危害时考虑。

规定 W_T 值的依据主要是现有的辐射对人类的随机性效应的有限(幸而有限)的知识。受害者是人类总体中的子群而不是那一类人群或种族的子群。如果要区分不同子群的话，剂量当量(而不是积分剂量当量或其他)用于表征随机性效应是否合理也还有待考查。此外，危害尚与生活习惯(如吸烟)、生育安排及医疗水平有关。随着预防、早期诊断及医疗技术的进步，辐射危害很可能将明显地减小。对随机性效应机理的深入认识(首先会改变医疗水平)，也会改变对危险度的估计。这些都会改变权重值，甚至防护的着眼点。

对不同器官的剂量，ICRP第26号出版物有一些说明与规定，有的还涉及多腔剂量学及界面剂量学。在评价随机性效应时，器官剂量(当量)总是指器官中具有相同敏感性的全部细胞的平均剂量。对肺剂量，这种观点更发展为规定把肺、气管、支气管及肺淋巴结看作一个综合器官来求其平均剂量当量[●]。过去为计算呼吸系统中氦子体剂量的分布，及考察未结合态氦子体对此分布的影响，花了不少力气，其实这主要是从有阈观点出发的。

对随机性效应，内、外照射的危害也是可以叠加的，虽然从剂量上讲后者指已接受的剂量，而前者还包括注定将要接受的剂量。ICRP第26号出版物提出了对内照射防护采用年摄入量极限(ALI)作为次级防护限值。这里要防止简单地把几个核素的紧要器官剂量加权求和，因为核素也可能分布在别的器官中，同时，所用参数与计算方法也有了改进。

对 γ 或X射线外照射，可以用 H_E 与习用的无受体时的照射量 X_0 之比来表示 H_E 随光子能量变化的情况。这方面可直接利用的资料很少。图2表示的各向同性照射下的 H_E/X_0 随能量变化的曲线是按各向同性照射下58千克及70千克非均匀体模内器官所受剂量^[2,3]计算而得的。角图是70千克非均匀体模^[4]在单向照射下的结果[●]。图中还标出了在70千克均匀体模

● 国外铀矿工资料表明在 $1.3 \times 10^6 \text{ MeV/l}$ 的 α 子体潜能下工作170小时，所增加的肺癌发病率为 2.3×10^{-4} ，相应的综合器官平均剂量当量约为0.1Sv，故与 $2 \times 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ 的危险度一致。

● 与圆柱均匀体模比较低能端有些矛盾，此处是先求出 H_E 与最大剂量之比，再参照 $H_{T,d}$ 计算的。

中正向及旋转照射的实测点^[5]。计算与实验间的符合恐怕是偶然的。由图中曲线可以看出，在同一辐射场中，体重、性别与取向对 H_E 均有影响。58千克体模的 H_E 约比70千克的 H_E 大10%，但女性由于性腺位置较深，所以其 H_E 仍与男性接近。角图中的正向照射曲线在考虑了女性体重较轻后亦将与男性正向照射曲线接近，但反向照射的 H_E 反而相差更多。体内器官部位只有骨髓是偏后的，但总的说来是偏前的（图1、3），所以正向照射的 H_E 总是较大。器官沿照射方向的平均深度大致如图3所示。身体中部 H 等于 H_E 那一点的深度在低能端略小于平均深度，而在高能端则略大一些。侧向照射时 H_E 更小，但由于计算中有些主要器官剂量是参照均匀圆柱模型^[6]估计的，可靠程度差一些。

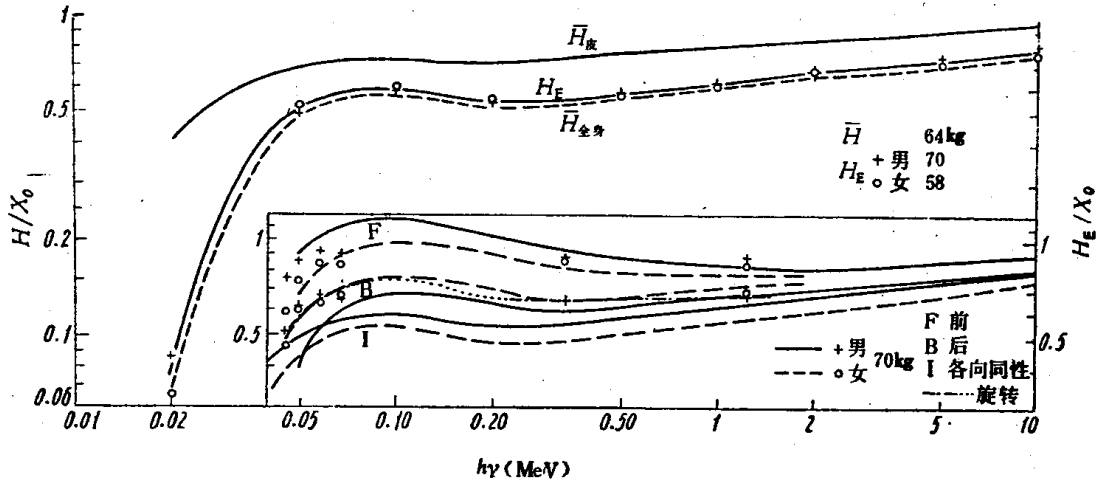


图2 H/X_0 及 H_E/X_0

H —剂量当量； H_E —有效剂量当量； X_0 —照射量（无受体）。

个人剂量计的读数总是指示有受体条件下的量。如果照射方向基本固定，佩带位置得宜，则原则上其指示即为深部软组织最大剂量当量 $H_{max,d}$ ，而 H_E 与 $H_{max,d}$ 间的关系已表示于图4。不然就需在接近实际情况的标准照射（如正向，前 2π ，水平旋转，前 $\pm 60^\circ$ 等）条件下，在体模上刻度个人剂量计，或直接建立它与 H_E 或其他器官剂量间的关系，甚至可为此调整剂量计的能量响应。这类办法的主要弱点还是标准照射条件能否反映真实的情况。

当遇到能引起急性放射损伤的严重照射时，应给出各种辐射成分的器官剂量而不是 H_E 。

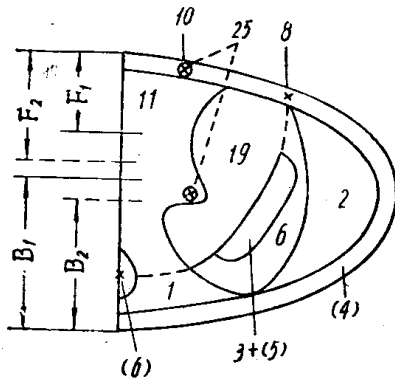


图3 器官分布俯视图

数字为各区内平均剂量之权重。
括号内数字应加骨表面及骨髓改正。
 F_1 (B_1) 男前(背)部平均深度。
 F_2 (B_2) 女

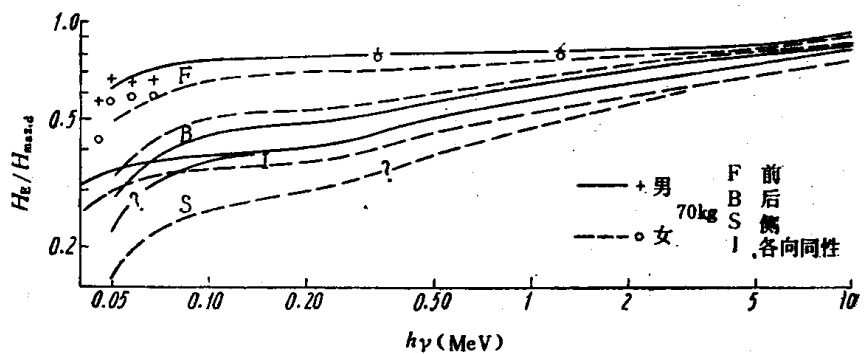


图4 $H_E/H_{max,d}$

$H_{max,d}$ 是体模内深度1cm处的最大软组织剂量当量。

三、剂量当量指数之应用

在辐射场监测中，所测的量常是被照射对象（受体）不在时的照射量率。引入受体后，由于吸收和散射作用，辐射场即有所畸变，因而仪表读数与所关心的剂量率间并无简单的关系。只有在确定了受体的形状、大小、材料和取向并说明所指的部位后，剂量才有明确的意义。对于有效剂量当量，虽已明确了材料与部位，但还需说明大小、性别及取向（从防护的观点看，主要是取向）。国际辐射单位与测量委员会（ICRU）于1971年提出以剂量（当量）指数作为一种辐射防护量。此处规定了受体的材料（密度为1克·厘米⁻³的软组织等效材料）、形状、大小（ ϕ 30厘米的球，因而也不用规定取向），并规定以球内●最大剂量（当量）作为球心位置的剂量（当量）指数 $D_1(H_1)$ 。进一步可以把深度在0.007厘米到1厘米间剂量（当量）的最大值称为浅表剂量（当量）指数 $D_{1,s}(H_{1,s})$ ，而把深度超过1厘米处（即 ϕ 28厘米的中心球内）的最大值称作深部剂量（当量）指数 $D_{1,d}(H_{1,d})$ 。当人体中心处于球心时，可以认为头与躯干中的软组织最大剂量（当量）值大致等于指数量。所以，这是一种偏安全的估计。既已对受体作了明确规定，所以指数量是完全由辐射场的参数决定的，是用以表征辐射场的一种方式。此外，既然所指的是剂量，也就避开了在不能保证次级粒子平衡时企图测量间接致电离辐射的比释动能或照射量所遇到的原理上的困难与混乱。作为最大值，指数量一般是不能叠加的，即两个源同时照射时的 H_1 常小于分别照射时的 H_1 之和。另一个麻烦是测量的敏感体积常在距球心10厘米以外处，却要把读数算在球心位置；而且在物体表面15厘米以内没有指数量，这都是使用者一时难以习惯的事。

ICRP第26号出版物把剂量当量指数 $H_{1,s}$ 和 $H_{1,d}$ 用作外照射的次级防护极限：在受到贯穿辐射外照射的情形下，当身体内部

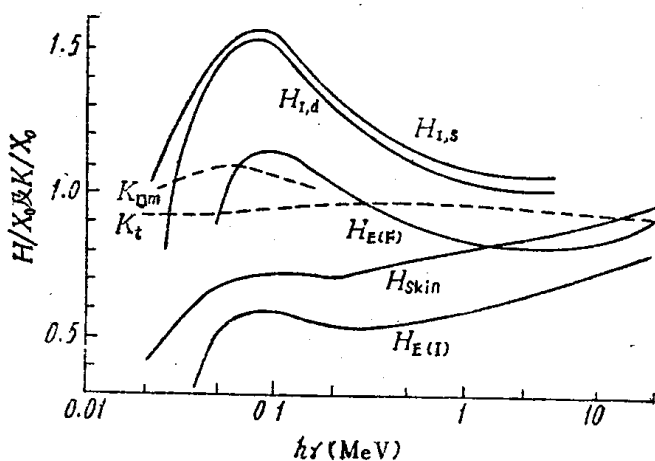


图5 剂量当量指数与有效剂量及比释动能

X_0 ——照射量； H_E ——有效剂量当量； $K_{r,m}$ ——红骨髓比释动能； H_{skin} ——皮肤剂量当量； K_t ——软组织比释动能； H_1 ——剂量当量指数。

剂量当量的实际分布不明时，只要把 $H_{1,d}$ 限制在每年50mSv以下；同时限制 $H_{1,s}$ ，使其不超过每年500mSv以保护皮肤，则可认为没有超过基本的防护限值。在多数情况下，这也同时将300毫克·厘米⁻²以内的剂量当量限制在每年300mSv以下。有人主张，应把800毫克·厘米⁻²深度处的剂量当量限制在每年500mSv以下，以照顾能量大于2MeV的纯 β 源^[7]。但也不乏反对意见^[8]。

ϕ 30厘米球只为定义 $H_1(D_1)$

之用而不是测量仪器，也用不着带着这14千克的球到处去测量。只要仪表读数能大致对应于这样定义的 $D_1(H_1)$ 就算是剂量（当量）指数仪。图5^[9]中的 $H_{1,s}$ 和 $H_{1,d}$ 曲线表示了单能单向照射下该指数量与照射量之比。图中还附有无受体时在骨髓及软组织中的比释动

● ICRU第25号报告中改为“球内深度大于0.007厘米处的”最大剂量（当量），即 $H_1=H_{1,d}, H_{1,s}$ 中之最大值。

能, 以资比较。 H_I 的这种能量响应原不难做到, 但对于最常用的角响应近于各向同性的仪表, 由于读数是可叠加的而 H_I 却不能叠加, 所以在多能多向照射下仪表读数总是 H_I 的偏高估计。虽然, 其差别一般不到2倍(对 $H_{I,d}$ 各向同性因子可大于2), 但已足以使 H_I 与 X_e 间的差别失去意义。由图5可见, H_I 曲线就连形状也是不同于各向同性照射下的 H_E 或皮肤剂量当量 H_{skin} 曲线的。就是说, 这类剂量当量指数仪在环境辐射测量中反而不及照射量仪适用。这并不是指数量概念的过错, 因为在各向同性照射下, 真实的 H_I 值也是与单向照射下的 H_I 相差很远而较接近 H_{skin} 的。同样, 图5的 H_I 与正向照射的 H_E (F)就较为接近。显然, 低能部分的“峰”还有些夸张, 因为 $H_{I,d}$ 所对应的1厘米的深度远小于实际器官的平均深度。至于对其他取向的照射就差得较多, 这在图4中表示得比较清楚。广泛使用的中子雷姆仪是用这种单能单向照射刻度而角响应近于各向同性的仪表, 其相应的 H_E/H_{max} 绘于图6。这是按 26×36 厘米椭圆截面均匀体模的计算结果^[10]估计的。这里也可以看出它在测量 H_E 中的弱点。

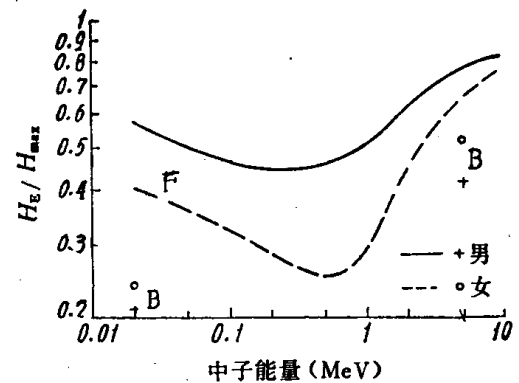


图6 中子照射的有效剂量当量
 H_E ——有效剂量当量; H_{max} ——柱形体模内剂量当量最大值。

要求在任何照射条件下均能读出不可叠加量 H_I 的真值的仪表, 是难于设想的。但如果最大剂量点的深度基本不变(如在 β 、 γ 、X测量中), 则可以按最大剂量深度上一个固定点的剂量随入射方向的变化来规定仪器的角响应。这种仪器如在使用中能旋转探头以寻出读数的最大值, 则可以作为对单向和多向照射都适用的“真实的”指数量仪。但这种较繁杂的操作要求以及它所包含的发生低估差错的可能性, 是否能在实际监测中行得通还很难说。另一方面, 人们对有角响应的仪器, 依靠他们对辐射来源的实际了解, 使用起来也不是那样地笨拙或束手无策的。

至于防护非随机性效应, 使用相应防护限值的场合多属肢端照射、躯干的局部照射或“软”射线的浅表照射, 此时真实的最大剂量当量也是不同于单向照射下的 H_I 的。因此, 各向同性指数量仪的应用总是有其严重的局限性的, 也许按某一角分布的照射条件刻度的结果会好一些。目前剂量当量指数仪仅在一些国际团体的拟议之中(包括对角响应要求的争论), 尚未有成品问世。

另一极端是改进仪表的能量响应与角响应使之能给出规定大小的人体的 H_E 。如果能接受有方向性的指数量仪, 就没有不能接受有方向性的有效剂量当量仪的理由。符合严格要求的 H_E 仪可能是难于制造与使用的; 但如放宽部分要求, 那怕只能读出 H_E 的某种均值或偏安全估计值, 也有可能成为比较能反映实际情况的可行方案。

总之, 目前存在着若干各有其优缺点的解决途径。但正确的抉择又必须基于 H_E 、 H_I 和 X_e 等辐射量间的精确的数值关系。由于可用资料的不足与包含着某些“不得已”而采用的假定, 文中给出的是借以揭示问题的聊胜于无的初步结果。鉴于建立按ICRP第26号出版物的原理测量外照射方法的迫切性, 相应的剂量学研究, 及各种可行途径的探讨都极待开展。

参 考 文 献

- [1] B.Lindell (1973 Sievert Lecture), Health Phys., 31, 265 (1976).
- [2] K.O'Brien and R.Sanna, Health Phys., 30, 71 (1976).
- [3] K.O'Brien and R. Sanna, Health Phys., 34, 107 (1978).
- [4] T. D. Jones, et al., Health Phys., 24, 241 (1973).
- [5] E.Stranden and T. Wöhni, Health Phys., 35, 457 (1978).
- [6] R. W. Euz and H.M.Murphy, Health Phys., 24, 53 (1973).
- [7] D. F. White and T.M. Francis, Phys. Med. Biol., 22, 1209 (1977).
- [8] M. W. Charles, Phys. Med. Biol., 23, 518 (1978).
- [9] K. O'Brien, Health Phys., 35, 506 (1978).
- [10] B. Г. 佐洛图欣等著, 蒋洪第译, 人体中子组织剂量, 第三章, 原子能出版社, 1978年。

小剂量、低剂量率电离辐射对人的影响

魏 履 新

环境中的电离辐射对人类会产生影响, 其主要的也是最常见的作用方式是小剂量、低剂量率照射。因此, 了解它们对大人影响的特点, 研究各种损害的表现和规律, 对于修订辐射防护标准、合理地采取防护措施是非常重要的。

一、小剂量、低剂量率电离辐射对人影响的一些特点

小剂量、低剂量率对人引起的损害主要是随机性效应, 即损害的发生频率随剂量而变化, 而其严重程度则与剂量无关。这种损害包括恶性肿瘤和遗传性疾患, 有人把胚胎受照引起的畸形也归在这一类。这种随机现象是长期观察和研究的结果。在低于剂量限制量上限条件下受照, 非随机性损害是很少出现的。

遗传性损害和恶性肿瘤都具有观察周期长的特点, 即从最初受照到出现可观察到的损害要很长的时间。亲代受照要通过子代或许多世代才表现出遗传性损害; 恶性肿瘤有很长的潜伏期; 从开始受照到因肿瘤死亡约25年以上, 白血病短些, 平均也要10年。在相应的理论机制和方法学没有重大突破以前只能进行长期观察。

长期对人的观察和实验研究都证实电离辐射只能使原有的肿瘤、遗传性损害和畸形在数量上增加, 从而提高它们的发生率。这一特点(损害的特异性差)增加了对随机性损害观察和研究的困难。

这些损害的自然发生率较高。自发的遗传性疾病和缺陷可达活产的百分之十; 恶性肿瘤的死亡率达到每年万分之几到千分之几。这样, 在本来较高的自然发生率和死亡率的基础上, 判断小剂量、低剂量率诱发的小量的随机性损害是很困难的, 无论是人群调查还是实验研究都需要很大的样本, 而在实际情况下往往不易做到, 因而常常采取将大剂量时观察到的结果外推至小剂量的方法, 并需对很多条件作出假设。

进行这些损害效应的研究和观察时还会受到相当多的相随变数的干扰。这些变数有来自环境的, 如环境中的各种诱变物; 有来自生活习惯的; 也有来自受照者本身的, 如种族、年

龄、性别和机体的健康状况。当剂量很大时，这些相随变数的影响不明显，而在小剂量、低剂量率时，要辨别损害中有多少份额由电离辐射引起是不容易的。因此，恰当地选好对照，仔细地进行对比研究，往往成为这类研究的关键。

二、辐射致癌的危险度估计

电离辐射可以使多种组织和器官发生恶性肿瘤，这已为许多长期的流行病学调查和实验研究所证实。在受照剂量范围广泛的多项研究中重复出现，因而在推测危险度时可靠程度较大的有：白血病、甲状腺癌、乳腺癌、肺癌、骨肉瘤和骨癌。有关其它器官、组织的资料完整性差些，有的则还没有资料。根据目前已有的知识，可以把不同器官和组织对辐射致癌的易感程度和危险度系数作一估计，如表 1 所列。

表 1 不同器官、组织对辐射致癌的易感程度及危险度估计●

按辐射致癌的易感程度排列	按发生率估计的危险度 (低 LET, 10^{-6}rad^{-1})	按死亡率估计的危险度 (低 LET, 10^{-6}rad^{-1})
1. 甲状腺	100	5—10
乳腺	100(妇女) 50(男女各半)	50(妇女) 25(男女各半)
2. 肺	25—50	20
3. 红骨髓(白血病)	中等剂量时50 小剂量时20	20
4. 胃、肝、大肠、脑、唾液腺	10—15	
5. 骨、食道、小肠、膀胱、胰、 直肠、淋巴组织、鼻窦粘膜	2—5	
6. 皮肤	更低些，无确切资料	

● 根据文献[1, 2]和 ICRP26 号出版物等材料整理。

由于小剂量，尤其是 20rad 以下电离辐射对人影响的直接观测数据非常缺乏，所以这个估计带有一定的不肯定的性质。但总的来看，在辐射防护领域的限制值范围内，恶性肿瘤的危险度是低的，尽管在低到什么程度上还有争论。

三、电离辐射的遗传性损害估计

电离辐射可引起生殖细胞的基因突变和染色体畸变，从而使后代发生遗传性损害。在估算电离辐射对人诱发的遗传性损害频率时，目前还是依据动物实验，主要是用小鼠实验的结果，因为有关人的直接观察资料很缺乏。但大量的流行病学调查提供了人群自然发生率的数据和一些可供分析的资料。从加重人类遗传负担考虑，常染色体显性基因突变、伴性遗传性疾病和由于染色体畸变引起的疾病最受重视。

常染色体显性基因的性状不需要相对基因的同型结合就可以在后代表现出来，因此有害性状在子一代就可以观察到，这对于调查和研究是一个有利条件。对于隐性基因，目前认为这种突变体数量最多，但绝大多数处于异型结合的状态中，所以在隐性基因的总贮量中增加一些隐性基因突变体并不会改变人群隐性基因疾病的发生率。如果电离辐射使这种突变率增

加, 要达到新的平衡将是一个非常缓慢的过程, 所以在观察时不会发现与突变率相一致的隐性基因疾患的增加。有相当一部分隐性基因是不完全隐性, 即带有部分显性, 因此, 在异型结合体中也可表现出若干性状。“选择”对这种异型结合体起的作用很小, 这是因为它们的损害效应小, 又不影响生育, 所以这种不完全隐性基因, 按其实际起的作用可视为选择系数小的显性基因。近来, 在作危险度分析时对它很重视。伴性基因在X染色体上, 同Y染色体结合时, 因为没有相对基因, 所以即使是隐性基因, 性状也可在子代(男性)表现出来。在这一点上, 它的作用类似显性基因, 所以在估计损害时常与常染色体显性基因损害一起考虑。

染色体畸变包括染色体数改变和结构改变。染色体数改变是由于生殖细胞在减数分裂时出现不分离而产生的(性染色体或常染色体)。这种畸变可引起自发流产或后代的遗传性疾病。电离辐射究竟在多大程度上影响不分离的发生, 还是一个相当不清楚的问题。很可能, 小剂量、低剂量率照射的影响是不大的。染色体结构的改变是由于染色体断裂后进行了重排, 在这方面最受重视的是易位, 因为含有易位染色体的生殖细胞可以继续分裂, 也可能进行减数分裂, 因而有可能传给后代。在电离辐射遗传影响的分析中, 把易位看做是能造成遗传负担的一个重要因素。

从五十年代起, 科学界对低LET、小剂量、低剂量率电离辐射对人群所致的遗传性损害做过多种估计, 并与高LET辐射效应进行了比较。现在的估计比五十年代的要乐观得多了。在估算时, 自然发生率采用大人群调查的结果, 诱发率则主要依据小鼠的实验结果。在估算方法上采用加倍剂量(使自然发生率增加一倍的剂量)估算法和直接估算法(按单位剂量每配子形成遗传性损害的预期数计算)。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)以100rad为加倍剂量估算的结果如下表。

表2 生育一百万活产的群体(人) 每代每人受照1rad时的遗传损害估计
(低LET, 小剂量, 低剂量率) ●

疾 病 类 别	目前发生率 (每百万活产)	亲代各受1rad照射, 每代每百万活产中增加数	
		第 一 代	平 衡 时
常染色体显性和X伴性疾病●	10000	20	100
隐性疾病	1100	相当少	增长极慢
染色体疾病	4000	38	40
先天畸形●			
畸形, 出生后经一定时期表现●	90000	5	45
体质的和退行性疾病●			
共	105200	63	185
占目前发生率的百分数		0.06	0.17

- 引自 UNSCEAR 1977 Report, p.539, 假设加倍剂量为 100rad。
- 第一代(F_1)的发生率假定为平衡时的1/5。
- 第一代(F_1)的发生率假定为平衡时的1/10, 并假定突变成分占5%。

从以上的讨论可以看出, 对电离辐射致遗传损害的认识有了很大的进展, 但因为它不像恶性肿瘤那样有较多的能定量的人的材料, 在理论机制上又了解得不够, 所以在损害估计上可靠程度差些。

四、小剂量电离辐射对胚胎和胎儿的影响

胚胎和胎儿对电离辐射有较高的易感性，这一点已为动物实验和对人体长期观察所证实。辐射引起的损害因孕期的阶段不同而异。对哺乳动物的观察发现：受精后植入前期受照，可能出现胚的死亡或不能植入；器官形成期（推算到人约在受精后9至40天）受照则易于发生畸形，有材料介绍，在器官形成期内小鼠受到低至5rad照射，大鼠受低至5—10rad照射后可出现畸形发生率增加；在胎儿期受照，可发生胎儿死亡或生长发育障碍，畸形发生的几率大为降低，死亡数也逐渐减少。对人观察的材料是不完整的，尤其缺乏小剂量、低剂量率方面的材料，因而难以作出危险度的估计。据辐射效应研究基金会（RERF）在日本广岛长期流行病学观察的结果，原子弹爆炸时在母亲子宫内受照者，剂量低至几十rad，出生后头小畸形和智力障碍的发生率已明显增加，但对长崎同类受照者（主要受低LET辐射）的观察，却发现产生这种损害要更高的剂量。怀孕早期受照者的发生率高于后期受照的。人在胎儿期受照，可出现生长发育障碍，大剂量时也可出现死亡。

胎儿在子宫内受照是否会引出生后恶性肿瘤发生率升高，是一个长期争论的问题。Stewart等用流行病学方法的研究结果，认为胎儿受X射线照射（产前检查）出生后10岁内恶性肿瘤发生率增加。但有相当多的论著反对这种看法。争论之处在于这些材料与在广岛、长崎观察到的不相符合，同时，对调查方法和观察对象的选择提出了质疑。总的来说，还需要作进一步的观察和研究，以了解辐射以外的相随变数的影响有多大。UNSCEAR目前给出的危险度估计是：胚胎受照0.2—20rad范围内，诱发的致死性肿瘤为 $(200-250) \times 10^{-6} \text{ rad}^{-1}$ ，其中半数为白血病，1/4为神经系统肿瘤。

五、高辐射本底地区居民健康状况调查

为了直接研究小剂量、低剂量率电离辐射对人的影响，国内外进行了多种辐射水平的流行病学调查，其中包括对高辐射本底地区的环境辐射和居民健康状况的研究。我国在天然辐射水平较高的广东阳江县和邻近的对照地区也进行了这方面的调查研究。

单靠高本底地区调查当然不能全面说明不同LET辐射的剂量与效应的关系，也不能回答是否存在随机性损害的实际阈剂量问题。但是，如果调查研究设计得当，数据可靠，则高本底地区居民健康状况调查的结果可以检验现行的危险度分析是否完全符合实际，同时它又能弥补剂量-效应关系中20rad以下那一部分数据的严重不足，而辐射防护工作者遇得最多的剂量正是在这个范围内。由于核能和各种辐射源应用所造成的环境污染（内、外照射）使广大人群受到的附加照射，除事故情况外，其剂量负担比高本底的要低；就是职业性人员，也有相当多的人，其受照射的剂量与高本底地区居民的相接近。因此，这类调查如果符合流行病学要求，不仅对剂量-效应关系的理论探讨有所助益，而且能为辐射防护工作中争论最多的危害评价问题提供直接的数据。

我国广东本底较高地区对调查研究的有利条件是：地区放射性分布较均匀，人口在七万以上（被调查人群可以看做是一个整体），是一个相当稳定的大群体，根据各种文物、家谱的考证和调查资料，当地百分之九十以上的居民六代以上世居于本地区。从世界上著名的高本

底地区看，巴西高本底地区共有三个部分：Morro do Ferro 地区地表 γ 照射量率高达3.2mR/h，但无居民，是牧场；Guarapari-Meaipe 地区大约有两万人，地表 γ 照射量率变动范围很大，波动于0.03—1mR/h之间；另一个地区 Araxa-Tapira 地区，约一万五千人， γ 照射量率仅为0.01—0.02mR/h因为土壤有丰富的磷灰石，故农作物中的放射性水平较高。印度高本底地区约七万居民，其中16600人受到的照射量率大于0.5R/yr，整个地区平均年照射量为397mR。有关巴西、印度高本底地区调查的报道中未见有世代居住的情况。

对于一个世代居住于高本底地区的较稳定的大群体，由于多代连续受到比正常本底高的照射，有可能观察到由于突变率增加，在建立新平衡过程中形成的遗传性损害的积累（如果有这种突变率增加的话）。如果前面谈到的胚胎和胎儿的损害效应，即使在这样小的剂量情况下也确实存在的话，那么在先天畸形和某些恶性肿瘤发生率的调查中应该反映出来。同样，如果前面谈到的辐射致癌危险度分析是正确的，对于出生后长期接受这种小剂量照射的人群，也可能观察到癌症的增加。

我国广东本底较高地区的剂量学和居民健康状况的调查从1972年起已进行了8年多，该地区土壤中总铀、总钍和 ^{226}Ra 的含量大约是对照地区的5倍，室内外的照射量大约是对照地区的3倍。外周血淋巴细胞染色体畸变率、妇女生育状况以及儿童生长发育状况在两地区未发现统计学上的差异，也未发现儿童的遗传性疾病、畸形、总人口恶性肿瘤死亡率在两地区有明显的差别。到1979年止的调查人·年数和调查结果如表3和表4所示。

**表3 广东本底较高地区与对照地区遗传性疾病和先天畸形发生率比较
(1975、1979年两次12岁以下儿童体检结果) ●**

	本底较高地区			对照地区		
	儿童人数	患者	发生率 (%)	儿童人数	患者	发生率 (%)
1975年	3504	48	13.70	3170	46	14.51
1979年	9921	251	25.30	9917	248	25.00
合计	13425	299	22.27	13087	294	22.46

● 两次检查的方法、指标均相同。

**表4 广东本底较高地区与对照地区恶性肿瘤死亡率●比较
(1970.1.1—1978.12.31)**

	本底较高地区			对照地区		
	调查人·年数	死亡例数	死亡率(10^{-5})	调查人·年数	死亡例数	死亡率(10^{-5})
1970~1974	96533	45	45.69	122554	55	44.83
1975~1978	287120	108	36.53	295711	172	52.85

● 死亡率经标准化处理。

出现这样的调查结果，或者是因为在广东高本底辐射的条件下对人诱发的损害增长量大