

# 国外辐射剂量学研究概况

史元明

## 一、引言

近十年来,由于原子能的应用遍及于物理、化学、医学、生物学、工业、农业、军事等各个方面,因而对辐射在应用方面的计量提出了更多的要求。

自 1895 年伦琴公布了 X 射线的发现后,在不到数周的时间内<sup>[1,2]</sup>,即发现了这种“不可见”的光线对皮肤具有烧伤作用,从而引起了医学家的注意。几个月以后, X 射线就被作为一种医疗手段用以治疗某些疾患;随即提出了“剂量”定量问题。至今,经过了六十多年的历程,但直到 1956 年方逐渐澄清了多年来“剂量”定义的含混部分,使用上的混乱也逐渐克服。“剂量”单位的标准测量方法也是在近十年来才获得较满意的结果。

现在高能辐射的应用,虽然已大大超出了医学范围,但由于历史上的习惯,“剂量”名称仍沿用至今,即使从广义的角度来理解“剂量”的意义,它也与物理学中常见的辐射通量不同。辐射剂量学的兴趣在于,辐射与物体间能量的传递、转换及转换的途径、方式等,并企图用“剂量”表明辐射的效应。因而辐射剂量学是辐射与物质作用的度量科学。

辐射剂量学的内容甚为广泛,它需要有物理学、数学、生物学、化学等多方面知识,这是一项在今天尚未定型的边界科学,而内容也还在不断发展充实。下面仅介绍其中主要的一些问题。

## 二、辐射剂量的单位、定义与标准测量

早期选择“剂量”单位时,限于辐射与物质作用的知识尚少,且实验技术较差,经过了长时间的探索阶段。当时曾从 X 射线的胶片感光效应、荧光现象、某些物质受照射后颜色的改变、皮肤红斑、电离等多方面现象来考虑,产生了许多不同的单位及定义。

1925 年成立了国际辐射剂量单位与测量委员会(简称 ICRU)。1928 年在斯德哥尔摩的第二次会议上,决定接受“伦琴”为 X 射线的剂量单位,当时的定义为:“在没有电离室壁的影响之下的 1 厘米<sup>3</sup>空气内(温度为 0℃,气压为 76 厘米汞柱),所收集到的全部二次电子在饱和电流情况下测得为 1 静电单位时的 X 射线的量为 1 伦琴”。

1937 年在芝加哥召开的第三次 ICRU 会议上,决定把伦琴单位推广应用到镭的  $\gamma$  射线剂量上,并且对定义作相应的修改,将 1 厘米<sup>3</sup>空气改为 0.001293 克空气。

第二次世界大战后,放射性同位素应用日广,帕克(Parker)在 1948 年提出物理伦琴当量(rep),以适应  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $n$  等各种辐射的度量,此单位未得到 ICRU 的承认,但在许多国家流传使用。由于 rep 的出现使得“伦琴”值更加不宜于表达物体受照射的计量要求。1953 年正式制定拉德(rad)单位后,rep 就被取消,但有些国家还一直沿用到 1959 年。

“伦琴”单位最大的缺点及含混的地方是:它不能计量被照射物内真正受辐射作用的大小<sup>[3,4,5]</sup>。受照射物体所发生的效应是与其吸收的能量有关的,而吸收的能量与辐射的通量、能谱、照射的几何条件、受照射物体的化学成分和密度等有密切的关系。例如用相同“伦琴”数量中等硬度的 X 射线照射人体,则骨骼内吸收的能量将较软组织内吸收的能量大三倍多。又如

以相同“伦琴”数量但能量不同的辐射进行照射,受照射体所吸收的能量将视能量相差情况而会有差别。再如照射剂量“伦琴”值相等,但几何条件不同,或被照射物体积不同,则被照射物所吸收的能量也将不同。

1950年开始注意到单位的混乱,而考虑以基本能量单位作为辐射剂量的基础。1953年在哥本哈根召开的会议上,正式提出吸收剂量单位——拉德,规定“在被照射体内,单位质量中受电离粒子传递得来的能量为吸收剂量”;拉德定为吸收剂量的单位,1拉德=100尔格/克。在这次会议上,仍保留过去的伦琴单位及定义,仅附加光子能量低于3兆电子伏时适用的说明。

1953年可以认为是剂量单位澄清概念的转折时期,但多年的习惯势力影响很大,尤其是在英国,一些老放射治疗学家对使用新单位极为抵触,至今尚有相当数量的医学文献仍沿用旧定义。吸收剂量推行困难的另一原因是直接测量的方法较少,用数学方法计算或换算也较为繁琐。

1956年ICRU于日内瓦开会,进一步明确了剂量的定义<sup>[6]</sup>如下:

(1) 吸收剂量——任何电离辐射照射物体,在物体內某处的单位质量受电离粒子作用而传递得来的能量为吸收剂量,仍以拉德<sup>1)</sup>为单位。

(2) 照射剂量——用以描述低于3兆电子伏的X或γ射线的辐射场(在空气內),它是根据二次电子在空气內的电离来量度的,单位为伦琴。伦琴单位的解释同前。

(3) 规定了其他相应的衍生单位,如规定

$$\text{生物剂量 rem}^1 = \text{RBE (相对生物效应)} \times \text{拉德}.$$

1959年在慕尼黑又召开了ICRU会议<sup>[9]</sup>,这次会上对定义未做修订。最近在怀柯夫(Wyckoff)的通讯<sup>[7]</sup>中介绍,ICRU将在下次会议(1962)上修订吸收剂量的名称与定义,以使之更为确切。看来剂量单位及定义的问题在国际上虽然仍有争论<sup>[8,10]</sup>,但有统一及更加完善的趋向。

在伦琴单位确定前后(1927—1934年)杜安(Duane)<sup>[11]</sup>,费勒(Failla)<sup>[12]</sup>,特勒(Taylor)<sup>[13,14]</sup>,贝恩肯(Behnken)<sup>[15]</sup>等人分别建立了用来测量200或250千伏以下的X射线的平行板式或圆柱式自由空气标准电离室。当时最大的误差来源在于有效空气体积的确定、电场扭曲的修正等方面,对这些虽然进行了一系列的研究(特勒等人)<sup>[16—18]</sup>,但未能很好地获得解决。早期国际(英、美、法、德)间所作的比较,虽然相互差别很小(±0.5%)<sup>[9]</sup>,但肯普(Kemp)<sup>[20]</sup>在1954年再比较时,发现这些国家的标准设备之间相差2—3%之多。在1956年日内瓦ICRU会议的前后,雷朱斯凯(Rajewsky)<sup>[21]</sup>、怀柯夫<sup>[22]</sup>等人提出了较成熟的设计,并对误差进行了分析和讨论,按现有的理论与实验技术,对所有的因素进行了修正,已可做到误差为±0.5%。1956年阿斯頓(Aston)等<sup>[23,24]</sup>对几个国家的标准设备进行了比较,发现:英国国家物理实验室(NPL)与美国标准局(NBS)的标准设备所测得的伦琴值相差为0.4%;瑞典国家标准测量装置与美国标准局相差为0.5%;美、法、西德三国标准电离室相差也在0.5%以内<sup>[25]</sup>。

至今500千电子伏以下的X射线自由空气标准电离室大体上已定形式,约有13个以上的国家建立了此项设备。

能量在0.5—3兆电子伏X射线或γ射线的伦琴单位的标准测量较为复杂困难,许多国家早已开始了此项研究。最初的目的是用来测量γ射线剂量。确定Kr常数有下列三种测量

1) 1956年以前,rad,rem分别解释为伦琴吸收剂量及生物伦琴当量,1956年以后,仅以rad,rem作为符号表示吸收剂量及生物剂量的单位。

## 方法:

(1) 按布拉格-格雷 (Bragg-Gray) 的空腔理論<sup>[25]</sup>, 用小型空腔电离室进行测量。三十年来, 英国国家物理实验室和美国标准局等实验室进行了多次实验, 趋向于用碳壁电离室测量空腔内的电量, 然后再进行修正换算。

用空腔电离室进行标准测量, 最大的困难与误差来源是, 壁的电子平衡厚度与吸收的修正以及阻止本领的准确度、电子能谱分布和  $\delta$  射线的影响等。近年来伯奇 (Burch), 斯彭塞 (Spencer) 等人对空腔理论的研究和改进<sup>[23-31, 33]</sup>, 使得阻止本领的理论值与实验值的误差已达到了 0.5% 以下<sup>[32]</sup>。

(2) 用自由空气电离室对 0.5—3 兆电子伏的 X 或  $\gamma$  射线进行标准测量。远在 1938 年, 给依 (Kaye)<sup>[34]</sup> 等人就建造了大型自由空气标准电离室。阿格利采夫 (Аглицев)<sup>[35, 36]</sup> 报告的高气压自由空气标准电离室的误差为 2%。高气压电离室的体积可比不加压的自由空气标准电离室小许多, 但在高气压下, 难于收集到全部电离电流, 而只能用外推法加以修正。不加压的自由空气电离室, 则不仅体积大, 而且电场扭曲及  $\gamma$  射线在空气中的衰减等皆难于修正, 现多已不使用。

按 1960 年怀柯夫<sup>[37]</sup> 的实验和讨论认为, 空腔电离室或自由空气电离室 (高气压) 的误差来源虽不相同, 但皆可做标准量度仪器。根据作者的讨论, 高气压自由空气电离室误差为 1.9%, 空腔电离室为 1.5%。

(3) 用量热法测量  $\gamma$  射线的吸收剂量, 并推算为伦琴值。用量热法测量高能辐射并作为标准测量是具有一定的困难的。首先吸收的辐射能量很低, 温升很小, 探测元件必须十分灵敏, 其次测量体积需与周围介质有良好的热绝缘, 并且必须满足电子平衡要求 (即由体积内逸出的电子应由体积外进入的电子补偿)。但随着实验技术的提高, 量热法作为标准测量已提到日程上来了, 且准确度已等于或高于电离室方法。如 1961 年瑞得 (Reid)<sup>[38]</sup> 报导, 用量热法准确地测出  $\text{Co}^{60}$  及  $\text{Cs}^{137}$  在空气中的电离功  $W = 33.8 \pm 0.4$  电子伏/对离子。

$\gamma$  放射性物质克镭当量数值的测量: 这项工作包括标准镭放射源及标准测量方法。前者的研究很多, 国际间亦经常进行比较。近年洛弗斯 (Loffus) 比较了美、英、西德、加拿大等国的镭标准源<sup>[39]</sup>, 相互间相差在 0.2% 以内。克镭当量数值多用电离室或比较法测量。阿格利采夫报导了用电离室比较测量的方法<sup>[40, 41]</sup>。

镭的  $\gamma$  常数 ( $K_{\gamma}$  值) 在近三十年来被许多作者用不同方法进行了测量 (基本上多用自由空气标准电离室或空腔电离室)。过去由于一些校正因素不清, 所以得出了从 1.96 伦琴/厘米·小时·毫克至 9.4 伦琴/厘米·小时·毫克各种数值, 就其中较好的结果 7.80 [弗里德里奇 (Friedrich), 1935] 至 8.47 [怀特 (White), 1940] 来看, 相差尚达 9% 之多。过去曾使用格雷 (1937) 的结果 8.40 (伦琴/厘米·小时·毫克), 近年阿迪克斯 (Attix)<sup>[42]</sup> 对过去结果进行了分析讨论, 并提出  $K_{\gamma}$  值应为  $8.26 \pm 0.005$ 。美国与加拿大在 1958 年正式宣布将镭的  $K_{\gamma}$  值改订为 8.25 伦琴/厘米·小时·毫克<sup>[43]</sup>。索克 (Sewkor)<sup>[44]</sup> 又于 1961 年发表了他的研究结果, 他分析了各种误差的来源, 并作了修正。最后得出  $K_{\gamma}$  的实验数值为  $8.13 \pm 0.2$ , 理论计算数值为  $8.30 \pm 0.4$ 。

### 三、辐射剂量学的基本理论问题

(1) 辐射剂量学的目的就是要给辐射与物质的作用定量, 辐射测量也依靠辐射和物质的作用, 故辐射与物质的作用应视为剂量学的基础。总括来看, 辐射与物质的作用可有 12 种作用过程<sup>[45]</sup>, 但其中有一些所占成分甚少。各过程的特性可由下表看出<sup>[46]</sup>, 粗框中表示主要的作

作用对象	效应种类	吸收		散 射		光子散射
		弹性散射	非弹性散射	弹性散射	非弹性散射	
原子中的电子	光电效应 $\sigma \sim z^5/137^4$	瑞利散射 $\sigma \sim z^2$ (低能界限)	康普顿散射 $\sigma \sim z/137$ 汤姆孙散射 $\frac{d\sigma}{d\tau} = \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \times \frac{1}{2}(1 + \cos^2\theta)$	二光子的康普顿散射		
电子 正电子	对电子产生 $\sigma \sim z^2/137^2$	德布利克散射 $\sigma \sim (z/137)^4$				
核 子	光核反应 ( $\gamma, n$ ) ( $\gamma, p$ ) 等 $\sigma \sim z^2$	( $\gamma, \gamma$ ) $\sigma \sim z^2$ 低能界限: 汤姆孙散射 $\frac{d\sigma}{d\tau} = \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \left(\frac{1}{1822}\right)^2 \times \frac{1}{2}(1 + \cos^2\theta)$	( $\gamma, \gamma$ )			
介 子	光介子产生	变态 ( $\gamma, \gamma$ )				

用。

光子散射后次级作用可以归纳为荧光辐射、康普顿散射、真湮辐射、轫致辐射及次级电子等。

一个入射光子可能在物质中发生十至数十次散射，才完全消失其能量。

从剂量学的角度来研究辐射与物质的相互作用其目的是更好地找出辐射在物质中的吸收及能量消失的过程。当然，这对防护屏蔽的设计及微观放射生物效应有更突出的意义。

研究吸收问题时，宽束的多次散射影响对剂量贡献很大，而吸收公式应为：

$$I = I_0 B(x) e^{-\mu x}$$

$B(x)$ 称做积累因子，与吸收物质的种类、特性、入射光子能量等有关系。费诺(Fano)<sup>[47]</sup>给出了四面同性点源的积累因子数据。更深入的资料可参看苟耳德斯顿(Goldstein)的计算结果<sup>[48]</sup>。

目前较完整的吸收数据资料见于贝格(Berger)<sup>[49]</sup>，苟耳德斯顿<sup>[50]</sup>等人的报告。

辐射在物质中的吸收及积累因子等可用塞格瑞(Segre)<sup>[51,52]</sup>等介绍的实验方法研究，也可用数学方法计算。常用方法如下：

(A) 蒙特-卡罗(Monte-Carlo)方法<sup>[53,54]</sup> 此法是用概率方法进行计算的，先选择光子最大可能运行途径，再按概率找出可能发生何种能量转换，并算出散射光子能量及散射光子角度的方向。按照概率计算原理进行计算，其结果的准确程度与样品数量的平方根成正比，故计算者需要至少追踪50000个以上这类事件，从平均结果中找出可靠的、可能发生作用的物理途径。这种计算方法运算复杂，要运用电子计算技术。这种方法不适于用来计算辐射在厚屏蔽内的减弱，这是由于辐射穿过相当厚度以后，光子数量减少，此时将无法得到准确的结果。但这一方法对反散射的计算较适合<sup>[55]</sup>，因反散射数量较大，故可得到相当精确的结果。

(B) 矩法 这是一种非常有用的方法，可用以计算光子流在无限介质中的多次散射、决定积累因子等，它的详细计算方法可以参看苟耳德斯顿<sup>[48]</sup>及费诺<sup>[47]</sup>的有关著作。用此方法计算

50千电子伏至10兆电子伏能量范围内光子的吸收可得到5%的准确度,对于高穿透力或低能部分的计算结果误差较大。

根据上述方法进行剂量计算在实用上有很大意义。塞佛特 (Sievert)<sup>[56]</sup>, 梅内沃德 (Mayneord)<sup>[57]</sup> 等人在30年前即开始用数学方法计算镭放射源及X射线的剂量,但由于当时计算技术的限制及散射因素的数据不完备,而常常需要用图解法得出结果,故范围小,准确度也较差。计算剂量不仅可用于防护屏蔽的设计<sup>[58-61]</sup>,而且对于照射工作亦有很大意义,例如照射源排列的设计,寻找最合适的照射方法,照射体内吸收剂量的计算,深度量散射能谱分布的计算,剂量分布的计算等等。但至今在放射生物等研究中尚未广泛使用。

(2) 带电粒子与物质的作用:带电粒子与物质的作用主要是与原子中电子的库伦场作用,可有激发与电离两种效应。电离所产生的电子具有较高能量可以再产生电离时称做 $\delta$ 电子。带电粒子与物质作用也可以有弹性散射、轫致辐射效应等,这些方面的研究对辐射剂量学也具有重要意义。例如,研究 $\alpha$ ,  $\beta$ , 质子等的吸收剂量,利用空腔电离室测量射线剂量,电离功 $W$ 值的研究等等。

研究带电粒子与物质作用的一个主要课题是碰撞损失与阻止本领。早在1933年比思 (Bethe) 即已给出阻止本领的计算公式<sup>[62,63]</sup>。电子阻止本领的可靠程度依赖于平均电离电位 $I$ ,因为在阻止本领的方程式中除 $I$ 外皆为已确定的较可靠的常数,而 $I$ 值需要依靠实验求得, $I$ 值与原子序数 $Z$ 成比例 $I = KZ$ , $K$ 在8—14之间<sup>[64]</sup>。 $I$ 值的实验测定可在一已知厚度的物质内测量粒子的能量损失,计算与实验结果相差达1%以上。现在以巴克 (Bakke) 及塞格瑞<sup>[65]</sup>的结果应用较为广泛。 $I_{\text{空气}}$ 为80.5电子伏, $I_{\text{水}}$ 为76.4电子伏(包括密度效应因素)<sup>[1]</sup>。

除去上述的能量损失方式外,尚有辐射能量损失(轫致辐射),这项损失约与原子序数成正比,100千电子伏以下可忽略不计。

带电粒子的散射作用关系到角分布问题,这项内容对修正空腔电离室有一定意义。比思<sup>[67]</sup>,斯彭塞,费诺<sup>[68]</sup>等人进行了理论研究,阿格利采夫<sup>[69,70]</sup>等人也于最近用电子谱仪进行了空腔电离室壁散射电子角分布与电子平衡关系的实验。

在剂量学中能量损失的另一重要问题是线性能量转换(LET)<sup>[2]</sup>,它是近年来在医学和生物学辐射作用中的一项很有兴趣的问题。1940年泽克耳(Zirkle)<sup>[71,72]</sup>提出了LET与生物效应的关系(有关此项问题在后面的生物剂量中讨论)。一个给定能量的粒子,可用阻止本领对LET进行计算。由于在物质中指定小范围的位置内二次粒子的能量可由零至最大,故对LET值须有充分的估计和计算。巴奇(Burch)<sup>[73]</sup>,格瑞<sup>[74]</sup>,科马克(Cormack)<sup>[75]</sup>,周哈斯(Johns)<sup>[76]</sup>和博格(Boag)<sup>[77]</sup>等人对此进行了较多的研究。

(3) 电离功( $W$ )的研究:多年来对电离功 $W$ 值的研究偏重于实验测定,许多作者用计数管、电离室或外推电离室、量热法等进行测量。测量 $W$ 值时不仅依赖于受照射气体的性质,而且也与几何形状、电离室阴极物质、气压等有很大的关系。过去以伊斯耳(Eisl)<sup>[78]</sup>所得结果32.5电子伏/对离子为使用标准,1956年ICRU公布改用34电子伏/对离子。这是根据近年来格拜斯(Gerbes)<sup>[79]</sup>,戈罗斯(Gross)<sup>[80]</sup>等较精确的测定提出的。最近一些作者对 $W$ 值的测定结果列于下表。

$W$ 值由理论推算的工作也有人在进行<sup>[90]</sup>,但这方面的进展较慢。

- 1) 比思的公式仅考虑到单个原子与粒子的作用,而在物质中其他相邻原子的作用不能忽略,此称之为密度效应。较全面的对密度效应的计算见斯特恩海默 (Sternheimer)<sup>[66]</sup>的报告。
- 2) 即电离粒子在被照射体内每微米径迹上能量的转换,以千电子伏/微米为单位。

作者	射线	W (空气)	标准差
伊默赖(Emery) <sup>[81]</sup>		33.5电子伏	—
戈罗斯等 <sup>[82]</sup>	S <sup>85</sup> β	33.6	0.3
貝 (Bay)等 <sup>[88]</sup>	S <sup>85</sup> β	33.7	0.3
杰斯(Jesse)等 <sup>[84]</sup>	H <sup>8</sup> β	33.9	—
杰斯	Ni <sup>60</sup> β	34.0	—
巴伯(Barber) <sup>[85]</sup>	1—35 兆电子伏电子	33.8	1.2
维斯(Weiss)等 <sup>[86]</sup>	2 兆电子伏 X 射线	33.9	0.8
貝尼耳(Bernier)等 <sup>[87]</sup>	Co <sup>60</sup> γ 射线	33.0	0.3
斯卡斯加德(Skarsgard) <sup>[89]</sup>	22兆电子伏 X 射线	32.8	0.6
瑞得 <sup>[88]</sup>	Co <sup>60</sup> , Cs <sup>137</sup>	33.8	0.4
費勒 <sup>[12]</sup>	S <sup>85</sup> β	23.5	—
雷克(Reick)等 <sup>[90]</sup>	H <sup>8</sup>	34.1	—

#### 四、吸收剂量

吸收剂量是研究物质受射线照射所吸收的能量,这是剂量学中的重要问题,因为物质受照射后的变化取决于吸收能量的多少和作用方式。近年来对吸收剂量甚为重视,尤其在生物学和医学领域,生物效应是与吸收剂量有密切关系的,因而许多作者都企图在这方面找出吸收剂量与相对生物效应(RBE)的关系,进而希望从能量的吸收来探讨放射生物学的根本机制<sup>[91]</sup>。同时,这方面的研究已由宏观深入到显微及亚显微水平,但目前主要的困难在于有关的一些参数如W值、阻止本领等精密与准确程度尚不足,对δ射线的机制、能量的真实吸收状态尚不十分清楚,而更重要的是大分子接受能量的情况等尚停留于初步的理论探讨阶段。运用数理方法通过射线与物质的作用推算能量的吸收,还相当粗糙,不足以在显微结构上应用。

按1956年ICRU会议所确定的吸收剂量的定义,及附给的一些数据(这些数据自1956年以后在陆续修订),空气中的吸收剂量

$$D_{\text{空气}} = 0.877R \text{ 拉德}$$

式中R为在电子平衡状态下测得的照射剂量(伦琴)。

受照射物体内的吸收剂量 $D_{\text{物质}}$ 可用“空气等效”壁电离室测量,再按下式计算:

$$D_{\text{物质}} = \frac{(m\mu en)_{\text{物质}}}{(m\mu en)_{\text{空气}}} D_{\text{空气}} = 0.877R \frac{(m\mu en)_{\text{物质}}}{(m\mu en)_{\text{空气}}} = f \cdot R \text{ 拉德}$$

式中 $(m\mu en)_{\text{物质}}$ ,  $(m\mu en)_{\text{空气}}$ 分别为物质与空气的质量吸收系数;f值可在ICRU报告中<sup>[5,6]</sup>查到。

若不使用标定好的空气等效壁电离室测量,而用碳壁或其他材料制成的电离室测量,则可用下式计算:

$$D_{\text{物质}} = 0.877QS_{m\text{空气}}^{\text{物质}} \text{ 拉德}$$

式中Q为标准状态下的电离电量(静电单位/厘米<sup>3</sup>);

$S_{m\text{空气}}^{\text{物质}}$ 为阻止本领比,则

$$D_{\text{物质}} = 0.877 \times S_m \times Q \times \frac{(m\mu en)_{\text{物质}}}{(m\mu en)_{\text{空气}}} \text{ 拉德}$$

但若不能满足电子平衡状态,如:

- (A) 在放射源附近,射线强度的变化梯度大。
- (B) 射线能量过高,在物质中的电子平衡距离内具有明显的吸收。

(C) 射线作用在不同介质的交界处,如骨组织与软组织相邻部位<sup>[6,92]</sup>。

在上述情况下,应使用薄壁小空腔电离室,腔内的电离是由周围物质中来的二次电子所造成的,壁不起作用。但实际上难于作出这样的薄壁电离室,而多采用室壁由与周围物质等效的材料做成的电离室进行测量,再按下式计算:

$$D_{物质} = [0.87, \times S_{组织} \times Q] \text{ 拉德}$$

在计算吸收剂量时,主要参数——阻止本领比  $S_{组织}$  关系到计算结果的准确性。在计算中都假设电子的减慢是连续性的,并忽略了  $\delta$  射线,这些可使吸收剂量的计算结果的误差达到 1% 以上。

用量热法测定吸收剂量是一种直接方法,白尼耳<sup>[87]</sup>,瑞得<sup>[38]</sup>等作了精确的工作。这种方法的根据是计算出水温升高与吸收剂量的关系:

$$1 \text{ 拉德} = 100 \frac{\text{尔格}}{\text{克}} = 2.39 \times 10^{-14} \frac{\text{卡}}{\text{克}}$$

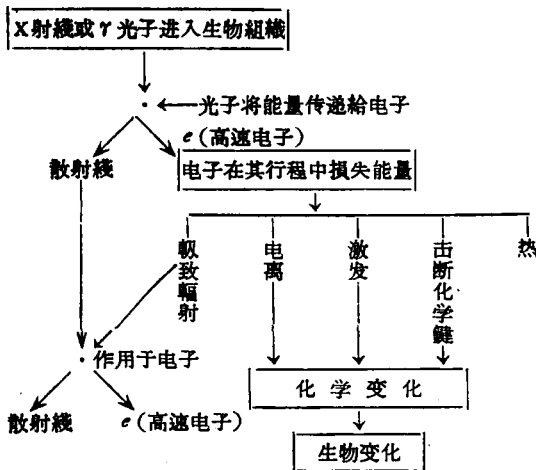
由于水的比热是 1,故水吸收 1 拉德的剂量温度可升高  $2.39 \times 10^{-14} \text{ } ^\circ\text{C}$ 。用量热法及电离法测得的吸收剂量相差可达 3%。

应用化学方法亦可以测定吸收剂量,早在 1928 年京恩特 (Günthe)<sup>[93]</sup> 即观察到氯仿经照射后析出的盐酸正比于吸收剂量。1927 年富利克 (Fricke)<sup>[94]</sup> 观察到氧化亚铁在射线作用下氧化为氧化铁等效应。近年许多作者利用这些辐射化学效应进行吸收能量的测定<sup>[95]</sup>。最近米耳里 (Milry)<sup>[96]</sup> 等比较了量热法与富利克硫酸亚铁溶液剂量法测定的吸收剂量,后者比前者高 3—4%。

### 五、放射生物学研究中的剂量问题

在放射生物学领域内包括有许多剂量学工作,今概述如下。

**1. 照射问题** 为了进行放射生物学研究必须对生物进行照射。照射模型的剂量研究内容很多,如照射剂量、吸收剂量、剂量分布等,但这方面研究工作的报导不多,更缺少系统的资料。泽克耳<sup>[97]</sup>对照射方法进行了一些较全面的分析。1956 年 ICRU 规定了一些描述照射条件的要求。莫根 (Morgan)<sup>[98]</sup>,邦得 (Bond)<sup>[99]</sup>,德姆斯腊克 (Домшлак)<sup>[100]</sup>,彼别尔加里 (Бибергаль)<sup>[101]</sup> 等对照射方法、剂量分布及剂量与死亡率的关系等作了一些介绍。为了更合理地发挥放射源的效率,须对其排列进行适当的研究。彼别尔加里<sup>[102]</sup>等报告的 ГУБЭ, ЭГО-2, ЭГО-20 等型  $\text{Co}^{60}$  放射源的照射场内剂量分布的不均匀程度在  $\pm 10\%$  以下。



**2. 生物组织中能量吸收的研究** 生物效应的来源是与带电粒子在组织中运行时能量的吸收及吸收方法有关的,如下图(周哈斯<sup>[92]</sup>)所示。从光子进入组织内产生高速电子至发生化学变化这一物理过程是放射生物效应的最初阶段。这一阶段的探讨对搞清楚原发反应及研究放射损伤的机制有密切的关系。但从目前情况看来,这一环节的研究尚处于开始阶段。几年来多着重于线性能量转换(LET)方面的研究,而细胞水平以下的能量吸收和传递等研究得尚不多。

LET 的研究多与射线生物效应结合进行,

各种不同射线的 LET 值相差很大,  $\text{Co}^{60}$   $\gamma$  射线的 LET 值为 0.2 千电子伏/微米, 而 5.5 兆电子伏  $\alpha$  射线的 LET 值为 250 千电子伏/微米。同一射线, 即使是单能射线, 其 LET 也为一复杂谱。如  $\text{Co}^{60}$   $\gamma$  射线 LET 的分布可由 0.2 千电子伏/微米至 2.0 千电子伏/微米。LET 随着粒子运动速度的减慢而增大, 并于粒子径迹的尾区达到最大值, 在此处射线相应地也产生最大作用<sup>[103]</sup>。罗西 (Rossi)<sup>[104,105]</sup> 讨论了用组织当量正比计数管测量 LET 的方法。

LET 愈高生物效应愈大, 但增大至一定程度以后, 又出现 LET 增大生物效应反而降低的现象。此现象对单细胞生物体较易于解释, 因 LET 增大后, 同样剂量所具有的电离粒子数目将减少, 而在小容积单元 (直径在 10 微米以下) 内, 不受辐射作用的单元数目的概率为  $e^{-N}$  ( $N$  为粒子数)。由统计学可知, LET 虽大, 但随之有更多的小单元避开了辐射的作用, 因而其生物效应亦随之而降低。

由化学剂量方法 (硫酸亚铁法) 可知,  $G$  值随 LET 改变,  $\text{Fe}^{++}$  的  $G$  值可由 4 变化至 16<sup>[106]</sup>。这对分析原发化学效应也有很大意义。又如在高 LET 电离粒子作用下, 氧效应不显著, 一些作者按电离密度探讨了 OH 与 H 自由基及过氧化氢自由基产生的关系, 至今虽然仍有很多争论, 但已表明从 LET 的角度分析这类原发反应是很有意义的。

在 LET 谱的研究中常忽略了低能  $\delta$  射线的作用。在云雾室照片中可以清楚地看出  $\delta$  射线的径迹。 $\alpha$  粒子的  $\delta$  射线的作用可视为较小, 但对 X 或  $\gamma$  射线来说,  $\delta$  射线的作用就不应忽略, 它可对全部剂量作出约 10% 的贡献。李 (Lea)<sup>[107]</sup> 曾指出, 紫鸭跖草属小胞的染色体在 X 射线或  $\gamma$  射线作用下结构的改变几乎大部分是由这些低速电子造成的。伯奇<sup>[108]</sup> 曾试图找出包括  $\delta$  射线作用在内的 X 或  $\gamma$  射线的 LET 值, 但用这个结果分析不同的生物效应与 LET 谱的关系反而更加不明确。格瑞<sup>[109]</sup> 则认为这是确定  $\delta$  射线范围及对其作用结果考虑不当所致。

射线在生物体中 1 微米长度上能量的转移还远不能用以说明在微观中能量吸收的性质和因果关系, 即 LET 本身还远不能满足微观要求。而在 1 微米长度上能量转移的分布也是不均匀的, 此外径迹直径的变化和几率分布关系等还都存在有许多未解决的问题。LET 的计算方法和概念至今也未统一, 如伯奇, 格瑞和周哈斯等人所计算的 LET 值相差很大 (见下表)。

射线种类	格瑞(1947) 千电子伏/微米	科马克及周哈斯(1952) 千电子伏/微米	伯奇(1957) 千电子伏/微米
$\alpha$ (1 兆电子伏)	—	—	128.4
$\alpha$ $\text{Po}^{210}$ (5.3 兆电子伏)	1.58	—	84.5
$\beta$	—	—	30.1
X 射线 (100 千伏)	—	—	25.9
X 射线 (220 千伏)	3.25	1.79	25.8
$\text{Co}^{60}$ $\gamma$ 射线	0.36	0.254	19.6
电子 (1 兆电子伏)	—	—	19.4
电子 (2 兆电子伏)	—	—	18.6
电子加速器电子束 (25 兆电子伏)	0.28	0.202	18.4

罗西<sup>[91,110,111]</sup> 在 1958 年后提出了用  $Y$  值代替 LET 描述辐射特性的方法, 分析了 LET 的存在问题和  $Y$  值的特点, 并发表了实验方法和结果。 $Y$  值是按单位直径 (1 微米) 圆球容积内能量转换的数值计算, 仍以千电子伏/微米为单位。作者认为这种表述方法可以更好地说明不同辐射的 RBE 关系, 但至今尚无足够材料证实此概念的结果。

电子的激发作用在能量转换中占有一定的成份, 从物理学角度来看, 激发与电离皆列入电



高损失,电离功( $W$ )实际包括了激发所消耗的能量,但从生物学方面考虑,则不能轻视激发的作用,而这一部分的物理机制研究较少,仅在生物能方学中探讨大分子的激发时进行了一些初步摸索。此外,如激发的发光现象与 LET 关系等亦有人<sup>[112]</sup>在进行研究,但至今还没有建立确实可靠的理论与实验基础,不过其重要性已被普遍重视。

各种不同射线相对生物效应(RBE)的研究已经进行了许多年,但早期由于剂量定量方法不同难于找到统一的解释,因而对给出结果的分析造成极大的困难。近年来由于采用了统一的吸收剂量为基础,按 ICRU 的规定应以 LET 值为 3 千电子伏/微米的射线为比较标准。辛克累(Sinclair)<sup>[113]</sup>的统计如下表。

射线能量	RBE
1 兆电子伏	0.86 <sup>[114]</sup>
1.25 兆电子伏	0.85
22 兆电子伏	0.85
22.5 兆电子伏	1.06 <sup>[115]</sup>

洛肯(Loken)<sup>[116]</sup>认为,  $\text{Co}^{60}$   $\gamma$  射线与 220 千伏 X 射线的生物效应相比为 0.80。浮凯耳(Vogel)<sup>[117]</sup>认为裂变产物中子与  $\text{Co}^{60}$  相比为 2.8。贝莱(Baily)<sup>[118]</sup>的报告分析了计算 RBE 的方法。可造成 LET 值更大的射线,如  $\alpha$  粒子、中子等,其生物效应也更高。LET 与 RBE

关系如下:

在水中每微米的离子对	LET = 千电子伏/微米	RBE
<100	<3.5	1
100—200	3.5—7.0	1—2
200—650	7.0—23	2—5
650—1500	23—53	5—10
1500—5000	53—175	10—20

**3. 内照射剂量** 第二次世界大战以后,由于人工放射性同位素的生产和应用,使临床治疗与检查上增添了新的工具——使用放射性同位素,尤其是  $\text{I}^{131}$ ,  $\text{P}^{32}$ ,  $\text{Fe}^{59}$  等应用很广。 $\text{I}^{131}$  治疗甲状腺机能亢进有显著的疗效,但过去由于对内照射剂量的忽视,接连出现用量过大,造成不可挽回的伤害病例,这就更引起剂量学家的注意。早在 1947 年伊范思(Evans)<sup>[119]</sup>及稍后梅内沃德<sup>[120]</sup>,莫根<sup>[121]</sup>等,就开始研究进入到体内的放射性物质所致的剂量。研究这一问题必须同时考虑同位素半衰期、生物半衰期<sup>[122]</sup>、同位素在体内的分布与器官间的转移等。准确地计算吸收剂量有很大困难,尤其是  $\gamma$  放射性物质更为困难;一般都采取简化公式。近来由于实验技术的提高(如闪烁法做全身低水平测量、能谱分析等<sup>[123,124]</sup>),已能获得较可靠的结果。在内照射剂量学中也还有些作者致力于吸入放射性气体和粉尘的剂量计算与测定的研究<sup>[125]</sup>,这对放射性工矿卫生有很大意义。

近年来由于核武器试验的不断进行和原子能工业的发展而造成自然本底的增加;对人的危害究竟如何首先须了解进入体内放射性物质所致的剂量<sup>[126,127]</sup>。这方面的报导多偏重于落下灰和饮食内放射性物质的放射性的测量工作,由此造成的吸收剂量的计算和实验尚较少。

**4. 防护剂量** 在制定最大容许量、容许浓度等方面,剂量学的任务是解决度量问题。1950 年以前最大容许外照射剂量为 0.2 伦琴/天,1950 年至 1956 年为 0.3 生物伦琴当量/周,1956 年以后又降低为 5 生物伦琴当量/年<sup>[128-130]</sup>(相当于 0.1 生物伦琴当量/周)。国际辐射防护委员会(ICRP)<sup>[131]</sup>在 1959 年详尽地规定了各类条件的最大容许剂量,并不断修订这些数值。由于容许剂量的一再降低,因而对剂量学家提出了更多的要求,对个人剂量测量更为重视,要求测量准确可靠,并具有更宽的量程及能量范围。现在在做个人剂量测量的仪器应满足下列要

求:携带式电容式电离室——测量 $\beta, \gamma$ , 中子剂量, 量程为5—300毫拉德; 携带式静电计——测量 $\beta, \gamma$ 和中子的剂量, 量程为5—3000毫拉德; 携带式报警器——测量 $\gamma$ 射线, 当吸收剂量率或积分剂量超过容许量时发出音响或可见信号; 个人胶片剂量仪——用以测量宽量程, 适于宽能量范围, 如0.02兆电子伏—3兆电子伏, 0.02拉德—10拉德—500拉德—5000拉德, 并能测定中子; 此外还有玻璃个人剂量仪、磷光体个人剂量仪、固体探测器个人剂量仪、化学个人剂量仪等等。

由于原子能工业的发展, 对于事故剂量的研究也具有重要意义。决定发生事故时人员所受剂量除去依靠个人剂量仪外, 还须通过对人体的测量, 如测定血液样品的感生放射性( $\text{Na}^{24}$ ,  $\text{P}^{32}$ ,  $\text{Cl}^{36}$ 等), 尤其是 $\text{Na}^{24}$ 的测量是更为方便。若一受照者接受了400拉德快中子照射, 事故10分钟后用盖革计数管在胸前可测到20毫拉德/小时的强度, 内照射剂量还可通过血、尿、骨髓等来测定。计算总剂量是相当复杂的工作, 斯奈德(Snyder)<sup>[133]</sup>介绍了测量与计算方法, 并给出一些有用的曲线。丘珀(Kuper)等<sup>[134-136]</sup>介绍了各主要脏器的内照射剂量的计算方法。

## 六、中子剂量学

中子的能量范围极广, 约可从 $10^{-2}$ 电子伏至 $10^8$ 电子伏。中子和物质的作用更为复杂, 基本上有非弹性散射、弹性散射与中子捕获三种形式。近年来中子物理学发展速度很快, 因而在中子和物质作用的理论和实践方面也获得了很大的成就。在散射截面、角分布、捕获截面等的理论计算与实验测定方面都有了较为可靠的结果。但在医学和生物学中应用中子的剂量定量问题, 至今尚未获得满意的解决。最早曾以“ $n$ ”作为中子剂量单位, 即以维克多林(Victoreen)剂量仪的100伦琴电离室进行测量, 仪表读数(伦琴值)即为 $n$ 值。但该仪器原为测量X射线而设计的, 室壁组成与组织的成分相差很多, 电离室壁厚度亦不适宜, 用以测量中子亦绝非可靠。罗西<sup>[137]</sup>实验指出, 1 $n$ 剂量的中子在组织中的能量吸收约相当于2—2.5倍 $\gamma$ 射线的伦琴值。近年来则按ICRU规定的吸收剂量作中子剂量的单位, 即 $\text{rem} = \Sigma[\text{吸收剂量拉德} \times \text{RBE}]$ 。

中子与组织的作用, 视中子的能量而不同。超快中子(大于20兆电子伏)主要作用是使组织内的碳、氢、氧和氮元素的原子核裂变; 低于20兆电子伏的中子, 主要为弹性散射; 在软组织中最重要的是中子与氢的作用, 能量转换有85—95%是使组织中产生反冲质子, 应用上以20千电子伏为快中子下限。对中能中子来讲, 最重要的能量转换为弹性碰撞; 反冲质子虽然不再引起电离, 但可使原子或分子激发。造成电离的仅有氢或氮的捕获中子过程, 但除中子能量低于100电子伏者外, 这种效应很小, 故中能中子在生物体内的剂量不能以电离来衡量。但已知中能中子在组织内经慢化而成为热中子, 俘获热中子时放出的 $\gamma$ 辐射所引起的剂量可占约50%。反应堆活性区引出的中子束流及核武器爆炸时中能中子都占有很大比重, 而其在剂量学上的贡献, 尤其是对机体的作用, 比等量的热中子流要大得多<sup>[138]</sup>。

由理论上计算中子在组织内的吸收剂量首先遇到的问题是, 中子的多次碰撞与能量转换。照射小动物的剂量按一次碰撞计算是较可靠的和简便的方法, 但厚度增大后即必须按多次碰撞考虑。斯奈德<sup>[139, 140]</sup>用蒙特-卡罗方法计算了在组织模型中的吸收剂量, 也有些作者针对单能中子进行了一些研究<sup>[141-143]</sup>。

中子的生物效应多以平均组织剂量与其他射线的平均组织剂量进行比较<sup>[144]</sup>, 但中子生物效应要考虑两种情况: 一种是大剂量率急性照射; 另一种是慢性小剂量照射。中子慢性作用的后果至今还不够完全清楚, 但可知其远期效应与X或 $\gamma$ 射线不同。因而所定的中子相对生物效应值是推算出的理论值, 高于急性实验中观察到的数值数倍<sup>[145, 146]</sup>。

中子剂量的测量尚属薄弱的环节,如組織壁电离室、赫尔斯特(Hurst)計数管等方法,不仅设备复杂,准确程度亦不高,一般誤差在15—20%以上<sup>[147-149]</sup>。

## 七、結 束 語

輻射剂量学的历史較长,但仅仅是近十多年才出現較多的进展。它与医学和生物学关系較密切,面临的任务是复杂的和困难的。实践中提出的要求,有許多是超出今天物理学理論和技术水平的,因而有待于进一步发展和研究,但其理論基础又势必依赖于物理学和数学的发展。近年来对輻射剂量的单位、定义与标准测量研究得較多,这也是必然的趋势。一門科学若沒有可靠的計量根据,則将不成为科学。而物理学中沒有其它任何計量单位,有过象輻射剂量单位和定义这样曲折复杂的变动过程。

从应用的角度来看,輻射剂量学的研究有着重于射綫在物质中的減弱和吸收的,也有着重在物质受射綫作用后能量吸收及吸收过程的。前者将推动防护屏蔽設計的发展,后者对放射生物学具有更重要的意义。同时在放射生物学研究領域內微观吸收剂量的研究引起了日益广泛的重視。

剂量測量在整个剂量学中占有重要的地位,目前多偏重于探索新方法,探討并提高已有方法的精密度和准确度。

此外,愈来愈趋向于把放射性的測量也归納到輻射剂量学中,但这与剂量学原意相距較远,是否恰当尚有待研究。

## 参 考 文 献

- [1] K. Z. Morgan, in "Selected topics in radiation dosimetry" IAEA (1961).
- [2] O. Glasser, Physical foundation of radiology 2nd ed. (1952).
- [3] F. W. Spiers, in "Radiation dosimetry" ed. G. J. Hine, G. L. Brownell (1956).
- [4] C. H. 阿尔达什尼科夫, 原子能, 3卷, 1期 (1958).
- [5] Ю. B. 西文切夫, 原子能, 11期, 964頁 (1960).
- [6] Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) Nat. Bur. Stand. Handbook 62 (1957).
- [7] R. J. Berger, *Radiation Research*, 15, 7 (1961).
- [8] L. S. Taylor, 9th International Congress Radiology 2, 1301 (1961).
- [9] Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) Nat. Bur. Stand. Handbook 78 (1959).
- [10] H. Fränz, W. Hüber, in "Quantities units and measuring methods of ionizing radiation" ed. F. Fossati (1959).
- [11] W. Duane, et. al., *Am. J. Roentgenol.*, 19, 461 (1928).
- [12] G. Failla, *Am. J. Roentgenol.*, 21, 471 (1929).
- [13] L. S. Taylor, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 2, 771 (1929).
- [14] L. S. Taylor, *Am. J. Roentgenol.* 31, 815 (1934).
- [15] H. Behnken, *Strahlentherapie*, 26, 79 (1927).
- [16] L. S. Taylor, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 3, 807 (1929).
- [17] L. S. Taylor, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 5, 507 (1930).
- [18] L. S. Taylor, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 6, 219 (1931).
- [19] L. S. Taylor, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 8, 9 (1932).
- [20] L. A. W. Kemp, *Brit. J. Radiol.*, 27, 219 (1954).
- [21] B. Rajewsky, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (1955).
- [22] H. O. Wyckoff Nat. Bur. Stand. Handbook 64 (1957).
- [23] G. H. Aston, F. H. Attix, *Acta Radiol.*, 46, 747 (1956).
- [24] R. Thuraeus, H. O. Wyckoff, *Acta Radiol.*, 46, 741 (1956).
- [25] H. O. Wyckoff, 9th International Congress of Radiology 2, 1315 (1961).
- [26] L. H. Gray, *Proc. Roy. Soc. A.*, 158, 578 (1936).
- [27] G. N. Whyte, Principles of Radioation Dosimetry (1959).

- [28] P. R. J. Burch, *Radiation Research*, **3**, 361 (1955).
- [29] P. R. J. Burch, *Radiation Research*, **6**, 79 (1957).
- [30] L. V. Spencer, F. H. Attix, *Radiation Research*, **3**, 239 (1955).
- [31] T. E. Burlin, *Phys. in Med. and Biol.*, **6**, 33 (1961).
- [32] G. N. Whyte, *Radiation Research*, **6**, 371 (1957).
- [33] C. P. Barnard, *Phy. in Med. and Biol.*, **3**, 4, 366 (1959).
- [34] G. W. C. Kaye, *Am. J. Roentgenol.*, **40**, 80 (1938).
- [35] К. К. Аглинцев, и др. Труды ВНИИМ вып. 30/90, 109 (1957).
- [36] К. К. Аглинцев, и др. in "Selected topics in radioation dosimetry" IAEA (1961).
- [37] H. O. Wyckoff, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **64C**, 2 (1960).
- [38] W. B. Reid, H. E. Johus, *Radiation Research*, **14**, 1 (1961).
- [39] T. P. Loftus, et. al., *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **58**, 1104 (1958).
- [40] К. К. Аглинцев, и др. Peaceful uses of atomic energy P/2087, **21**, 84 (1958).
- [41] К. К. Аглинцев, и др., *Измерительная техника*, **6**, 85 (1957).
- [42] F. H. Attix, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **59**, 293 (1957).
- [43] C. Garrett, *Canad. J. Phy.*, **36**, 149 (1958) 及 *J. Res. Nat. Bur. Stand.* **41**, 12, 198 (1957).
- [44] A. Sewkor, *Strahlentherapie*, **115**, 122 (1961).
- [45] U. Fano, *Nucleonics*, **13**, 8, 8 (1953).
- [46] U. Fano, et. al., *Encyclopedia of Physics*, **38** (2) 660 (1959).
- [47] U. Fano, *Nucleonics*, **13**, 9, 55 (1953).
- [48] H. Goldstein USAEC report NYO 3075 (1954).
- [49] R. T. Berger, *Radiation Research*, **15**, 1 (1961).
- [50] H. Goldstein, G. White, Nat. Bur. Stand. Circular 583 (1957).
- [51] S. A. Colecole, *Phy. Rev.*, **87**, 592 (1952).
- [52] E. Segre, ed Experimental nuclear physics Vol. 3 (1959).
- [53] M. J. Berger, et. al., *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **56**, 89 (1956).
- [54] E. D. Cashwell, C. J. Everett, "Monte-Carlo Method (1959).
- [55] M. J. Berger, et. al., *Radiation Research*, **12**, 20 (1960).
- [56] R. M. Sievert, *Acta Radiol.*, **1**, 89 (1921).
- [57] W. V. Mayneord, *Brit. J. Radiol.*, **5**, 677 (1932).
- [58] B. T. Price, et. al., Radioation Shielding (1957).
- [59] H. Goldstein, Fundamental aspects of reactor shield (1959).
- [60] Г. В. Горшков, Гамма-излучение радиоактивных тел и элементы расчета защиты от излучения (1959).
- [61] О. И. Лейпунский и др., Распространение гамма квантов в веществе (1960).
- [62] H. A. Bethe, in "Experimental nuclear physics" ed. Segre, Vol. 1 (1953).
- [63] H. A. Bethe, *Handbuck der Physik*, **24**, 273 (1933).
- [64] F. Bloch, *Z. Physik*, **81**, 363 (1933).
- [65] C. J. Baker, E. Segre, *Phy. Rev.*, **81**, 489 (1951).
- [66] R. M. Sternheimer, *Phy. Rev.*, **103**, 511 (1956).
- [67] H. A. Bethe et. al. in "Experimental nuclear physics" Vol. 2 (1953).
- [68] L. V. Spencer, U. Fano, *Phy. Rev.*, **93**, 1172 (1954).
- [69] К. К. Аглинцев, Selected topics in Radioation dosimetry IAEA (1961).
- [70] A. K. 瓦里捷尔等, 原子能, **12**, 1055 (1960).
- [71] R. Zirkle, *J. Cellular, Comp. Physiol.*, **16**, 221 (1940).
- [72] R. Zirkle, in "Radiation Biology" ed. Hollender Vol. 1, 135 (1954).
- [73] P. R. J. Burch, *Brit. J. Radiol.*, **30**, 524 (1957).
- [74] L. H. Gray, *Brit. J. Radiol. Suppl.*, **1** (1947).
- [75] D. V. Cormack, H. E. Johns, *Brit. J. Radiol.*, **25**, 369 (1952).
- [76] H. E. Johus, in "Radiation Dosimetry" ed. Hine (1956).
- [77] J. W. Boag, *Radiation Research.*, **1**, 323 (1954).
- [78] E. Eisl. *Ann. d. phys.*, **3**, 277 (1929).
- [79] W. Gerbes, *Ann. d. phys.*, **23**, 648 (1935).
- [80] W. Gross, et. al., *Radiology*, **66**, 101 (1956).
- [81] E. W. Emery, *Brit. J. Radiol.*, **29**, (5), 370 (1956).
- [82] W. Gross, et. al., *Radiation Research*, **7**, 570 (1957).
- [83] Z. Bay, et. al., *Radiation Research*, **7**, 558 (1957).
- [84] W. P. Jesse, *J. Phys. Rev.*, **97**, 1668 (1955).

- [85] W. C. Barber, *Phys. Rev.*, **97**, 1071 (1955).
- [86] J. Weiss, *Phys. Rev.*, **103**, 1253 (1956).
- [87] J. P. Bernier et. al., *Radiation Research*, **5**, 613 (1956).
- [88] L. D. Skarsgard et. al., *Radiation Research*, **7**, 217 (1957).
- [89] H. G. Rieck, et. al., *Radiation Research*, **4**, 451 (1956).
- [90] R. L. Platzman, *Inter. J. App. Rad. and Iso.*, **10**, 116 (1961).
- [91] H. H. Rossi, 9th International Congress of Radiology, **2**, 1343 (1961).
- [92] H. E. Johns, *The Physics of Radiology* 2nd ed. 290 (1961).
- [93] P. Gunther, *Z. Electrochem.*, **34**, 616 (1928).
- [94] H. Fricke, et. al., *Am. J. Roentgenol.*, **18**, 430 (1927).
- [95] A. O. Allen, *Radiation Research*, **1**, 85 (1954).
- [96] P. Milvy, et. al., 9th International Congress of Radiology **2**, 1348 (1961).
- [97] R. E. Zirkle ed. "Biological Effect of External X and Gamma Radiation" Part 1. chapter 2, **7**, 22 (1954).
- [98] J. E. Morgan, et. al., *Radiology*, **66** (6) 877 (1956).
- [99] V. P. Bond, *Radiation Research*, **6**, 554 (1957).
- [100] М. П. Домшляк, и др. *Медицинская Радиология*, **12**, 3 (1959).
- [101] А. В. Бибергаль, и др. *Биофизика*, **3**, 1, 118 (1958).
- [102] А. В. Бибергаль, и др. Труды ВВТК. М. Изд-во. АН СССР. (1958).
- [103] Е. С. 謝波季娃, 原子能, 2卷1期, 138頁 (1957).
- [104] H. H. Rossi, *Radiology*, **64**, 404 (1955).
- [105] H. H. Rossi, *Radiation Research*, **2** (1955).
- [106] W. Minder, 9th International Congress of Radiology, **2**, 1381 (1961).
- [107] D. E. Lea, *Action of Radiation on Living Cell* 2nd ed. 269 (1955).
- [108] P. J. R. Burch, *Radiation Research*, **6**, 289 (1957).
- [109] L. H. Gray, in "Radiation Biology" ed. J. H. Martin, **1** (1958).
- [110] H. H. Rossi, *Rad. Res.*, **10**, 522 (1959).
- [111] H. H. Rossi, *Rad. Res.*, **13**, 503 (1960).
- [112] H. Maier, *Strahlentherapie* **91** (4), 566 (1953).
- [113] W. S. Sinclair, et. al., *Radiation Research*, **10**, 418 (1959).
- [114] H. I. Kohn, et. al., *Radiation Research*, **5**, 674 (1956).
- [115] S. E. Gunter, et. al., *Radiation Research*, **4**, 326 (1956).
- [116] M. K. Loken, et. al., *Radiation Research*, **12**, 202 (1960).
- [117] H. H. Vogel, et. al., *Radiation Research*, **11**, 667 (1959).
- [118] N. A. Baily, et. al., *Radiation Research*, **12**, 389 (1960).
- [119] R. D. Evans, *Am. J. Roentgenol.*, **58**, 754 (1947).
- [120] W. V. Mayneord, *Brit. J. Radiol. Suppl.*, No. 2 (1950).
- [121] K. Z. Morgan, *Nucleonics*, **12** (6) 32 (1954).
- [122] Ю. М. 什图青别尔格, 原子能, 2卷2期, 123頁 (1957).
- [123] G. R. Menesly ed. "Radioactivity in Man" (1960).
- [124] M. M. Nold, et. al., *Health Physics*, **4**, 79 (1960), **4**, 86 (1960).
- [125] Л. С. 香泽尔, 原子能, 10期, 881頁 (1960).
- [126] A. Brido, et. al., *Health Physics*, **5**, 63 (1961).
- [127] О. И. 列普斯基, 原子能, 4卷5期, 480頁 (1959).
- [128] Recommendations of the ICRP Publication No. 1 (1958).
- [129] Permissible dose for internal radiation (1959) Rev. ICRP Pub. No. 2 (1960).
- [130] Report on decisions at the July 1959 meeting in Munich of the ICRP, *Am. J. Roentgenol.*, **83**, 372 (1960).
- [131] Report of Committee II permissible dose for internal radiation, *Health Physics* **3**, (1960). 及 *Health Physics*, **5**, 1 (1961).
- [132] F. Wachsmann, in "Selected topics in Radiation Dosimetry" 275 (1961).
- [133] W. S. Snyder, in "Selected topics in Radiation Dosimetry" (1961).
- [134] J. B. H. Kuper, et. al., in "Progress in Nuclear Energy Health Physics" (1958).
- [135] G. S. Hurst, *Health Physics*, **2**, 121 (1959).
- [136] R. H. Ritchie, ORNL-2748 (1959).
- [137] H. H. Rossi, *Radiology*, **61**, 93 (1953).
- [138] А. Г. 伊斯托明娜等, 原子能, 7期, 601頁 (1960).
- [139] W. S. Snyder, J. Neufeld, *Brit. J. Radiol.*, **28**, 342 (1955).
- [140] W. S. Snyder, J. Neufeld, AECU-2328 (1950).
- [141] Б. 伊薩耶夫, 原子能, 1期, 126頁 (1960).

(下轉第 610 頁)

- [47] П. А. Забелин, Дозиметрический и специальный технологический контроль на атомной электростанции (1961).
- [48] А. Н. Комаровский, Покрытия строительных конструкций в радиоактивных помещениях. *Атомная Энергия*, 6, 599 (1961).
- [49] Л. В. Кузнецова, Гигиена труда при работе на некоторых видах ускорительных установок (1960).
- [50] Л. В. Кузнецова и др., Основные факторы среды и профессиональные вредности, возникающие на ускорителях одно- и многозарядных ионов. *Медицинская Радиология*, 7, 63 (1961).
- [51] В. С. Кушлева, К вопросу об отдаленных последствиях комбинированного поражения животных двуокисью кремния и радоном. Рефераты докладов на конференции по отдаленным последствиям поражений, вызванных воздействиями ионизирующей радиации, Стр. 36, 1956.
- [52] А. В. Лебединский, и Ю. И. Москалев, О некоторых проблем современной радиобиологии. *Вестник АМН СССР*, 9, 3 (1959).
- [53] В. П. Московский, и П. Т. Асташенков, Проблемы использования атомной энергии, 1956 (中文譯本为刘銘宇等譯, 1959).
- [54] С. А. Пречистянский, Радиоактивные выбросы в атмосферу (1961).
- [55] Санитарные правила работающих с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений (1960).
- [56] Т. Сирс, Роль врача в противоатомной защите (перевод с английского) (1955).
- [57] Н. Ю. Тарасенко и др., Гигиена труда при работе на атомных электростанциях (1960).
- [58] В. И. Феоктистов, Основы медицинской радиологии, 1960.
- [59] И. Л. Шалаев, О предельно-допустимой концентрации короткоживущих дочерних продуктов распада радона. *Медицинская Радиология*, 10, 56 (1960).
- [60] М. Е. Nahmias, 原子核能, 周奇譯 (1959).
- [61] 山口正己, 放射性气体、液体、固体の処理, 原子力工业, vol. 5, No. 8 (1959), p. 4.
- [62] 松田俊彦, 放射性废弃物的处理, 原子力工业, vol. 6, No. 9 (1960), p. 41.
- [63] 鈴木間左支, 原子力燃料产业に伴う障害とその対策, 原子力工业, vol. 4, No. 7 (1958), p. 56.
- [64] 鈴木間左支, 放射線障害のみか原子力产业の危害ではない, 原子力工业, vol. 4, No. 12 (1958), p. 4.
- [65] 鈴木間左支, 原子力产业の発展に伴う危害と対策 (一) (二), 原子力工业, vol. 5, No. 3 (1959), p. 55. 同上 vol. 5, No. 4 (1959), p. 60.
- [66] 高島洋一, 放射性废弃物的处理, 原子力工业, vol. 3, No. 8(1957), p. 61.
- [67] 中华人民共和国卫生部編, 放射卫生学和放射医学讲义 (1961).

(編輯部收稿日期 1961 年 12 月 28 日)

(上接第 586 頁)

- [142] J. Tait, *Brit. J. Radiol.*, 23, 269 (1950).
- [143] А. М. 科甘等, 原子能, 2 期, 136 頁 (1960).
- [144] М. И. 沙里諾夫, 原子能, 10 期, 970 頁 (1958).
- [145] Protection against neutron radiation up to 30 mev. *Nat. Bur. Stand.*, 63, (1958).
- [146] И. К. Маргус, Peaceful Uses of Atomic Energy P/2078, 21, 237 (1958).
- [147] Ю. И. Брегалзе и др. in "Selected topics in Radiation Dosimetry" 435 (1961).
- [148] G. J. Neary, et. al., in "Selected topics in Radiation Dosimetry" 463 (1961).
- [149] Ю. И. 勃列加德澤等, 原子能, 12 期, 1046 頁 (1960).

(編輯部收稿日期 1962 年 2 月 20 日)

