

放射性輻射的防护

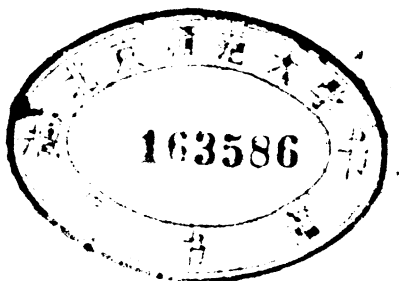
志民选編

内部資料 注意保存

中国科学院原子核科学委员会編輯委员会編輯

內 容 簡 介

本书共分六章。前四章选自“放射性同位素应用知識”(中国科学院原子能研究所編)的第四部份——安全防护，后两章是补充編写的。本书内容包括：射綫对人体的危害及允許剂量标准；对各种射綫的防护；輻射剂量的安全監察以及关于反应堆及加速器防护的概括介紹。本书可作为高等学校有关原子能专业的試用教材。



北师大图 B2412216

目 录

第一章 剂量	(1)
§1-1 剂量单位	(1)
§1-2 最高允许剂量	(6)
§1-3 剂量的探测	(14)
第二章 射线对人体的影响及其防护	(16)
§2-1 射线的伤害和防护简史	(16)
§2-2 射线对人体的影响	(17)
§2-3 射线的防护	(28)
§2-4 γ 射线的防护	(46)
§2-5 对放射性进入人体的预防	(78)
第三章 放射性同位素的安全使用	(95)
§3-1 放射性实验室	(95)
§3-2 工作人员	(101)
§3-3 安全检查	(102)
§3-4 安全的控制	(104)
§3-5 实验室规则	(105)
第四章 放射性污染物的去除	(107)
§4-1 去除污染的重要性	(107)
§4-2 污染的情况分类	(107)
§4-3 去除污染的方法	(108)
§4-4 放射性废物的排除	(112)
§4-5 紧急措施	(116)
第五章 辐射剂量的监察	(119)
§5-1 电离室和计数管在安全监察中的应用	(120)
§5-2 工作地区 γ 辐射的监察	(124)
§5-3 表面放射性沾污的监察	(131)
§5-4 个人 γ 剂量的监察	(138)

§5-5	大气和水中放射性浓度的监察	(142)
§5-6	中子剂量的安全监察	(146)
§5-7	剂量的绝对测量	(149)
§5-8	大剂量的测量	(157)
第六章	中子的防护 反应堆及加速器的防护	(161)
§6-1	中子与物质的相互作用	(163)
§6-2	中子的防护及其计算	(167)
§6-3	中子引起的次级辐射	(170)
§6-4	反应堆的防护	(173)
§6-5	关于加速器的辐射防护	(191)
§6-6	屏蔽材料	(197)

第 一 章

剂 量

在估計吸收能量的数值时，需引用剂量这个概念。剂量就是在单位质量被照射物质中所吸收的能量值，如下式所示：

$$D = \frac{E}{M} \text{ 尔格/克,}$$

其中 D 为剂量； E 为全部被照射物质所吸收的能量； M 为物质的质量。在 1 克被照射的物质中所吸收的能量决定于单位重量物质内电子的数量及电子的结合能。单质原子中所含的电子数及其结合能决定于原子序数 Z ；复杂物质的则决定于某一有效序数。空气、水、組織的有效原子序数大体相同，故 1 克空气、組織与水所吸收的能量亦大約相等。直接测量組織中的电离是很困难的，这是因为一般条件下組織中含有大量电解质的离子，所以即使在很强輻射流的作用下，也不能发觉离子数由此而有小量增加。

因此，要测量輻射所致的电离效应，須选择在正常情况下沒有电解质离子存在的物质。空气是达到这一目的的最适当物质，根据空气中的电离即可判断組織中所吸收的能量。

§1—1. 剂量单位

1. 剂量单位 剂量的单位是倫（倫琴），而放射性的单位常以居里表示，这是两个截然不同的概念。倫表示进入物质的射綫有多少能量会被物质吸收掉；而居里則表示一个放射源在单位時間內有多少个原子蜕变。剂量有其特有的单位系統。

国际放射学会确定倫为剂量的单位。倫是在 0.001293 克空气（0°C, 760 毫米水銀柱）中生成正負电荷各为 1 靜电单位的离子的 X 射綫或 γ 射綫的剂量。每一离子电荷的绝对值等于 4.8×10^{-10} 靜电单

位。产生一静电单位电荷需要

$$\frac{1}{4.8 \times 10^{-10}} = \frac{10^{10}}{4.8} = 2.083 \times 10^9 \text{对离子,}$$

因此，1 倫的剂量就是被 1 厘米³空气（在 0°C 与 760 毫米压力的标准状况下，1 厘米³空气的质量为 0.001293 克）吸收时能生成 2.083×10^9 对离子的辐射量。在空气中电离时所作的功可取作 32.5 电子伏，故 1 倫的单位剂量所相当的吸收能量为

$2.083 \times 10^9 \times 32.5 = 0.68 \times 10^{11}$ 电子伏/厘米³ 或 6.77×10^4 兆电子伏/厘米³。

因为 1 电子伏 = 1.60×10^{-12} 尔格，故

$$1 \text{ 倫} = 0.68 \times 10^{11} \times 1.60 \times 10^{-12} = 0.11 \text{ 尔格/厘米}^3。$$

因此，1 倫 = 0.11 尔格/厘米³ 或 0.11 尔格/0.001293 克。

当剂量为 1 倫时，1 克空气所吸收的能量为

$$E = \frac{0.11 \text{ 尔格/厘米}^3}{0.001293 \text{ 克/厘米}^3} \approx 85 \text{ 尔格。}$$

因为組織和空气的 Z 相近，故 1 克組織与 1 克空气吸收的能量大約相等。但是應該注意，上述情况只是对能量大于 300 千电子伏的辐射而言的（即未考虑光电效应）。事实上，当空气中的剂量为 1 倫时，在骨組織和肌肉組織中吸收之能量相差甚多。

如以軟組織的密度为 1 克/厘米³，則剂量 1 倫时，1 厘米³組織所吸收的能量应为 85 尔格。因組織的密度为空气密度的 770 倍，所以，1 厘米³組織所吸收的能量約为空气的 770 倍。

物理当量倫（物理当量倫琴）。对 X 射綫及 γ 射綫等以外的粒子也用倫表示是不很适当的。因此就提出以相当于倫的物理当量倫来表示。所謂物理当量倫是任何一种电离辐射所产生的剂量，在这样的辐射作用下，1 克物质所吸收的能量等于剂量为 1 倫的 X 射綫或 γ 射綫在 1 克空气中消耗于电离的能量。也可以用物理当量倫来表示 X 射綫和 γ 射綫的剂量，不过这时，用倫表示的物理剂量和用物理当量倫表示的剂量相等。

• X 射綫或 γ 射綫的 1 倫在 1 克的空气里有 85 尔格能量被吸收。

但是，同样的1倫在組織內被吸收的能量，則因組織的組成而異，一般約在60—100尔格的範圍中。經過各方面考虑之后，它被认为是93尔格。

生物当量倫（生物当量倫琴）。尽管生物組織得到的能量相同，但不同的射綫对生物組織的作用效果則不同，同时生物組織对不同的放射性元素又有紧要和不紧要器官之分。故引入相对生物效应的概念和生物当量倫琴这一單位。下面表示出各类輻射的相对生物效应：

輻射的类型	相对生物效应
γ 和倫琴射綫	1
β 射綫	1
α 粒子	20
质子	10
热能中子	5
快中子(20 兆电子伏以下)	10
快中子(大于 20 兆电子伏)	20

因此，生物当量倫的定义应该是：生物組織吸收某种輻射的那部分能量所引起的生物作用相当于得到1倫剂量X射綫或 γ 射綫时所引起的生物作用。

1953年在哥本哈根第七次国际放射学家會議上，提出过一个新單位rad其定义为：任何物质凡吸收射綫的能量数为100尔格时的剂量叫做1rad。但迄今未被广泛采用。1rad=1.19物理当量倫琴，1物理当量倫琴=0.84rad。

單位時間內所受的剂量叫剂量率，它的單位常用倫/小时、倫/分或倫/秒来表示。記住下面的例子对于以后的剂量計算是有利的：1毫克与蛻变产物处于平衡状态的鐳的点源，当經過0.5毫米的鉛片初步過濾以后，在空气中距离1厘米远处，所产生的剂量率为8.4倫琴/小时（不加濾片为9.7倫/小时）。

2. 剂量和放射性強度的关系 在沒有談到他們的关系之前，先提一下克鐳当量的概念（其他的放射性強度單位在原子核物理学部分均已讲过，这里不再重复）。

克镭当量是用以表示 γ 放射性的。其定义为：凡放出 γ 射线的物质和1克镭（与其蜕变的子体成平衡，并且被置于0.5毫米厚的铅管内）在同样的条件下所引起的电离作用相等时，则其放射性就叫做1克镭当量。除克镭当量外也有用毫克镭当量表示的，1毫克镭当量即为1克镭当量的千分之一。

在实际工作中，所使用的大多数剂量测量仪器是测量剂量率或剂量的。因此，知道剂量率与放射性强度之间的关系是很重要的。下面举出的三个剂量率和放射性强度关系公式是日常工作中常常要碰到的。

(1) 剂量率和光子流量的关系式：

$$P = \frac{N_{\gamma} \times hv \times \gamma \times 1.6 \times 10^{-6}}{0.11} \text{ 伦/秒} = 14.5 N_{\gamma} hv \gamma \text{ 微伦/秒}, \quad (1-1)$$

这里 P_{γ} ——物理剂量率； N_{γ} ——1秒内在1厘米²的面积上通过的 γ 光子流（即强度）； hv —— γ 光子的能量（以兆电子伏表示）； γ —— γ 射线在空气中的线性电子转换系数； 1.6×10^{-6} ——1兆电子伏所相当的尔格数；0.11——空气中相当于1伦的尔格数。

(2) 剂量率和毫克镭当量的关系式：

$$P_{\gamma} = \frac{m \times 8.4 \times 10^6}{R^2 \times 3600} = 2300 \frac{m}{R^2} \text{ 微伦/秒}, \quad (1-2)$$

这里 m ——毫克镭当量； R ——到点源的距离（以厘米表示）；8.4——在离外面包有厚0.5毫米铅管的1毫克的镭源1厘米处的 γ 射线的剂量率（以伦/小时表示）； 10^6 ——是将伦化为微伦的系数；3600——是将小时化为秒的系数。

(3) 剂量率和毫居里的关系式：

$$P_{\gamma} = \frac{MK_{\gamma} \times 10^6}{R^2 \times 3600} = 280 \frac{MK_{\gamma}}{R^2} \text{ 微伦/秒}, \quad (1-3)$$

这里 M ——以毫居里表示的放射性； K_{γ} —— γ 常数（以伦/小时·毫居里·厘米表示）； R ， 10^6 和3600同前。

顺便谈谈放射性样品的重量与强度的关系。我们已知，放射性的蜕变关系式为

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 \quad (1-4)$$

如果放射性以居里 ($= 3.71 \times 10^{10}$ 次蜕变/秒) 表示, 居里数为 x , 該元素的重量为 Q (无载体的重量), 原子量为 A , 且其半衰期为 T , 則放射性样品的重量与强度的关系可写成

$$x \times 3.71 \times 10^{10} = \frac{0.693}{T} \times \frac{Q}{A} \times 6 \times 10^{23},$$

其中 6×10^{23} 为亚佛加德罗常数, 单位为原子/克原子量。經化簡后,

$$\begin{aligned} Q &= 2.8 \times 10^{-6} ATx (T \text{ 以年为单位}) \\ &= 7.7 \times 10^{-9} ATx (T \text{ 以天为单位}) \\ &= 3.2 \times 10^{-10} ATx (T \text{ 以小时为单位}) \\ &= 5.3 \times 10^{-12} ATx (T \text{ 以分为单位}) \\ &= 8.9 \times 10^{-14} ATx (T \text{ 以秒为单位})。 \end{aligned} \quad (1-5)$$

这样, 在用某一元素来制得所需要的同位素至期望的放射性强度时, 其用量可直接由上面一些式子計算出来。

用同样方法可以算出相应于 T 以年、天、小时、分、秒来表示时的一定重量該元素的居里数:

$$\begin{aligned} x &= \frac{3.57 \times 10^5 Q}{AT} (T \text{ 以年为单位}) \\ &= \frac{1.30 \times 10^8}{AT} Q (T \text{ 以天为单位}) \\ &= \frac{3.10 \times 10^9}{AT} Q (T \text{ 以小时为单位}) \\ &= \frac{1.88 \times 10^{11}}{AT} Q (T \text{ 以分为单位}) \\ &= \frac{1.13 \times 10^{13}}{AT} Q (T \text{ 以秒为单位})。 \end{aligned} \quad (1-6)$$

在計算中, 我們常注意到放射性随時間而变化的特征以及子体增长的因素等等, 故对于前面的式子应作

$$x_t = x_0 e^{-\lambda t} = x_0 e^{-\frac{0.693t}{T}} \quad (1-7)$$

以及 $x_2 = x_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ 等等的变化, 以便应用于更广泛的

情况。式中 x_2 和 x_1 分别为子体在 t 时内的放射性的增长数和母体的原有放射性。 x_0 和 x_t 各为 $t=0$ 时的该种同位素的放射性和经过 t 时因蜕变而剩下的放射性。

有载体的，应先知道其载体的量或放射性比度，才能用以上的式子进行计算。

§1—2. 最高允许剂量 一提到射线和剂量，有些人就联想到射线对人的危害作用。似乎射线对人很陌生，以前从未遇到过似的；也似乎射线就是和危害连在一起似的。其实不然。人们是经常地处在射线的照射之下的。自然界存在着的碳（含有天然放射性同位素 C^{14} ）、钾（含天然放射性同位素 K^{40} ）和天然放射性镭（ Ra^{226} ），实际上不断新陈代谢地在人体内微量存在着，并不断地放射出射线照射着人体。此外，如果你去检查身体透视肺部等等，都要受到射线的照射。但对于这些，健康的人都能自然地适应，而毫不影响健康，当然人们对它们也是毫无感觉的。

在日常生活中，人们所受到的各种射线照射的剂量，如表 1—1 所示。

表 1—1 人们日常生活中所受各种照射的剂量

照 射 种 类	剂 量
天然放射性物质及宇宙射线的外部照射	0.0002 生物当量伦/天
镭及其蜕变产物的内部照射	0.00005—0.00125 生物当量伦/天
K^{40} 的内部照射	0.00015 生物当量伦/天
本底照射的总剂量	0.0004—0.0016 生物当量伦/天
普通胸部透视	0.1—2 伦
牙齿的伦琴射线照相（局部照射）	1.5—15 伦
治疗恶性肿瘤（局部剂量）	3000—7000 伦（一次疗程）
夜光表（手腕）	~0.001 伦/小时

射线在工农业、医学和科学研究等方面，显出了非凡的功能，这一点已被愈来愈多的事实所证明。然而，随着科学的发展和加速器、反应堆等的出现，放射性水平在急剧的提高，人们（特别是从事于原子能事业及其有关的人员）和放射性物质打交道的机会又愈来愈多，

愈来愈經常。这就不是一般人在日常生活中所受到的那种水平的剂量所能比拟，而是亿万倍地超过于它。起初由于有些人不注意防护，因而曾发生过一些不幸的事故。患射綫病或甚至伤亡。有鉴于此，国际上先后提出和确定最高允許剂量的問題，以确保人身安全。

最高允許剂量的确定是电离輻射防护上的重大問題，因为最高允許剂量的大小关系着工作者的健康和能否发生长期影响的問題。最高允許剂量是先輩惨痛的經歷所換得的結果，我們必須十分重視它。

所謂最高允許剂量，是现代的知識水平认为这样多的电离輻射的剂量，在人的一生的任何时候都不应引起对人体的显著損伤。“人体的显著損伤”定义为“权威医学专家认为是对人的健康及安全有害的一切損伤或影响”。显然可以看出，在允許剂量下工作对人体不会产生显著損害。但工作者應該时刻注意，即使在最高允許剂量以下，仍应爭取将照射的强度減至可能低的程度。最高允許剂量也不是一成不变的，这一点将在后面提到。

1. 外部照射的最高允許剂量。

(1) 1950年7月国际倫琴射綫會議提出以下几点規定：

(i) X射綫和 γ 射綫（能量 <3 兆电子伏）在身体外表面不定期照射时，每周最高允許剂量为0.5倫（这个輻射量相当于空气中測量的每周0.3倫，也相当于对重要器官每周0.3倫的照射）。

(ii) β 射綫和X射綫或 γ 射綫相同。

(iii) X, γ 或 β 射綫对手和前臂的剂量为1.5倫/周（比全身的最高允許剂量大5倍，其他部分不能用此数值）。

(iv) 质子、高能中子的最大允許剂量（生物当量倫）只能为 γ 射綫的十分之一， α 的为二十分之一，热中子的为五分之一。

此外，还規定每周的平均剂量为0.3倫，若以每日八小时工作計，則每小时应为6.25毫倫。在三个月之内不能超过 $13 \times 0.3 = 3.9$ 倫。

1956年4月在日内瓦召开的国际度量单位委员会和国际放射性防护委员会代表大会又討論了最大允許剂量。除了仍保留每周0.3倫这一标准外，并建議30岁以下的人所受剂量的总和不得超过50倫，

40 岁以下的人所受剂量的总和不得超过 100 倫，60 岁以下的人不得超过 200 倫。这一要求相当于每周为 0.1 倫的平均允許剂量。

(2) 最大允許剂量是根据射綫对于人体伤害的资料和对动物进行实验的结果，作了既全面而又深刻的分析来确定的。如根据很多 X 射綫工作者手臂上的皮肤以及全身照射的皮肤并不发生任何变异的剂量情况，来考虑分别采用每周不应超过 1.5 倫和 0.3 倫。又如根据对动物所作的大量实验和长期对人的造血器官、眼睛的水晶体和生殖器官等紧要器官在每周受到 0.3 倫的照射下观察的结果来肯定，每日全身照射小于 0.05 倫剂量时，对人无任何不利，当然也不影响寿命（如每日 0.10 倫长期全身照射才发现有缩短寿命的现象）。也就是根据前面这些主要之点，国际倫琴射綫会议才有把握地提出前面所述的建議。

2. 内部照射的最高允許剂量 内部照射是由于放射性物质被吸入，吃进或从伤口等处进入人体所引起的。内部照射的最高允許剂量系根据前面所提到的最大允許剂量的标准、并考虑到下列的因素来计算的：

(1) 分布的均匀性¹⁾，例如鈉和氬能很快的分布全身；而碘則集中于甲状腺；鈷、鋇和鈣等則沉积于骨骼組織里；

(2) 进入人体的速度和排出的時間。例如 Sr^{90} 、 Y^{90} 、 Sm^{151} 、 Pu^{239} 、 Ra^{226} 和 Th^{232} 等具有很大的半排出期，而鈉、氯等的半排出期則很短；

(3) 溶解度；

(4) 放射物质的状态（气体，液体，固体）；

(5) 进入人体后放射性物质所能保留的百分率大小等等。虽然作了以上这些問題的考虑，可是要确定人体究竟可以无害地承受多少放射性物质，是很复杂而且也是很困难的。故我們所作的計算也仅是近似值。

消化系統对各种不同的元素有所謂灵敏区，如胃是 F^{18} 、 K^{42} 、 Rh^{130m} 、 Pr^{144} 、 At^{211} 、 Pb^{207} 、 Bi^{214} 、 Po^{210} 、 Pb^{214} 、 Po^{210} 、 Pb^{211} 、 Bi^{212} 、 U^{238}

1) 关于放射性元素的分布，莫斯科列夫(Ю. И. Москалев)也曾提出这样的說法：一价阳离子在体内是均匀地分布的，两价的阳离子則分布于骨中，三价和四价的积聚于肝脏，五价、六价及七价的則主要积聚于肾脏里。

和 U^{238} 的灵敏区；小腸是 Na^{24} , I^{131} 和 Cs^{137} 的灵敏区；上部大腸是 Mn^{56} , Ac^{228} , 和 Bi^{212} 的灵敏区；而下部大腸是其余八十多种放射性同位素的灵敏区。危险性决定于停留的时间，停留的时间愈长，则危险就愈大。通常表上所列各种放射性同位素在体内的最大允许剂量就是沿胃肠道取很多点用电子计算机来计算的。

对于所谓有累积性的（即半排出期很大的）放射性同位素（如 Sr^{90} , Y^{90} , Sm^{151} , Pu^{239} , Ra^{226} 和 Th^{232} ）在体内的量有特殊要求，即在今后 70 年中（一生中）所获的总剂量不应超过 150 生物等效伦。

内部照射的危险性从某种意义上来说，要比外部照射大的多。因为人们可以设法使外部照射减低到安全水平以下，同时还可尽量地不停留在可能遭受放射性的地点。然而这一些对内部照射来说都是办不到的。对于内部照射来说，从伤口进入比吸入危险，而吸入又比吞咽危险。虽然如此，但就防护观点来讲，应该根本不让放射性物质通过任何方式进入人体。

关于人体中放射性物质的最大允许含量将在 §2—5 节中举例计算，这里只列出下表供参考。

如果将不同射线的最大允许剂量整理一下，内部照射的最大允许

表 1—2 倫敦辐射学会建議的最大允許濃度

元 素	最大允許濃度 (居里/升)		全身所允許 的放射性 (微居里)	有效半衰 期有效 (天)	从腸胃中 重新吸附 系数	留在肺中 的系数
	水 中	空 气 中				
Ra^{226}	4×10^{-11}	8×10^{-11}	0.1	10^4	0.1	0.06
Pu^{239}	1.5×10^{-11}	2×10^{-11}	0.04	10^4	0.001	0.1
Sr^{89}	—	—	2	—	—	—
$Sr^{90} \rightarrow Y^{90}$	8×10^{-10}	2×10^{-10}	1	5.10^3	0.1	0.06
Po^{210}	—	—	0.005	—	—	—
H^3	4×10^{-4}	5×10^{-8}	10^4	10	1.0	1.0
C^{14}	—	1×10^{-9}	—	—	—	—
Na^{24}	8×10^{-6}	—	15	0.8	1.0	—
P^{32}	2×10^{-7}	3.6×10^{-11}	10	20	1.0	—
Co^{60}	1×10^{-8}	—	1	20	1.0	—
I^{131}	3×10^{-8}	3×10^{-12}	0.3(0.18 甲状腺)	8	0.2	—

剂量如下表所示。

周圍环境如水和空气中的最大允許濃度如下表所示。

3. 最高允許劑量随客观条件的改变 最高允許劑量不是一成不变的，我們應該根据科学成果和其他的条件来确定和采用新的标准。这种新标准的允許量水平，可能减少也可能增加。1956年4月2日至11日在日内瓦召开的国际度量单位委员会及国际放射性防护委员会代表大会通过了最高允許劑量的新标准。

表1—3 根据莫尔高和弗尔得的意見，放射性物质侵入体内时的最大允許濃度

元 素	緊要器官	水中最大允許濃度 (居里/升)	空气中最大允許濃度 (居里/升)	排泄物中的最大允許量		
				一次吸入 (微居里)	一次吃入 (微居里)	經常吃入 (微居里/天)
1	2	3	4	5	6	7
H ³	全 身	5×10^{-3}	6×10^{-8}	迹 量	迹 量	400
Bc ⁷	骨 髓	2×10^{-5}	9×10^{-9}	100	200	4
C ¹⁴ (CO ₂)	脂肪, 骨髓	6×10^{-5}	6×10^{-9}	4	300	0.7
F ¹⁸	骨 髓	1×10^{-3}	1×10^{-3}	迹 量	迹 量	2
Na ²⁴	全 身	8×10^{-6}	2×10^{-10}	0.6	6	0.8
P ³²	全 身	8×10^{-7}	5×10^{-10}	2	40(?)	0.5
S ³⁵	皮 肤	6×10^{-6}	6×10^{-9}	40	40	0.6
C	骨 髓	1×10^{-5}	1×10^{-9}	8	9	5
K ⁴²	肌 肉	3×10^{-6}	4×10^{-10}	2	5	0.2
Ca ⁴⁵	骨 髓	2×10^{-5}	3×10^{-9}	5	30	3×10^{-3}
Sc ⁴⁵	肝, 脾	4×10^{-7}	7×10^{-11}	3	6	0.1
Sc ⁴⁷	同 上	4×10^{-7}	7×10^{-11}	8	6	6×10^{-2}
Sc ⁴⁸	肝, 脾	9×10^{-7}	2×10^{-10}	40	10	0.2
V ⁴⁸	骨 髓	3×10^{-7}	5×10^{-11}	3	5	0.3
Cr ⁵¹	腎	2×10^{-5}	4×10^{-9}	400	300	20
Mn ⁵³	腎, 肝	3×10^{-5}	5×10^{-10}	90	40	7×10^{-2}
Fe ⁵⁵	血	1×10^{-4}	2×10^{-8}	100	200	7
Fe ⁵⁹	血	3×10^{-6}	4×10^{-10}	1	2	7×10^{-2}
Co ⁶⁰	肝, 脾	4×10^{-7}	8×10^{-11}	2	5	0.1
Ni ⁶³	肝	4×10^{-6}	7×10^{-10}	70	50	2
Cu ⁶⁴	肝	5×10^{-6}	9×10^{-10}	100	60	0.1
Zn ⁶⁵	骨 髓	2×10^{-6}	4×10^{-10}	10	30	2
Ga ⁷²	同 上	5×10^{-7}	1×10^{-10}	20	8	0.6

表 1—3 (續)

元 素	緊要器官	水中最大允許濃度 (居里/升)	空氣中最大允許濃度 (居里/升)	排泄物中的最大允許量		
				一次吃入 (微居里)	一次吃入 (微居里)	經常吃入 (微居里/天)
1	2	3	4	5	6	7
Ge ⁷¹	腎	2×10^{-5}	3×10^{-9}	500	200	20
As ⁷⁶	腎	2×10^{-7}	4×10^{-11}	10	4	2×10^{-2}
Rb ⁸⁶	肌 肉	4×10^{-5}	5×10^{-10}	跡 量	跡 量	3
Sr ⁸⁹	骨 骼	7×10^{-7}	1×10^{-10}	3	4	7×10^{-3}
Sr ⁹⁰ →Y ⁹⁰	同 上	4×10^{-7}	7×10^{-11}	2	2	4×10^{-3}
Y ⁹¹	同 上	3×10^{-7}	5×10^{-11}	8	4	2×10^{-2}
Nb ⁹²	同 上	2×10^{-6}	3×10^{-10}	5	20	0.8
Mo ⁹⁹	同 上	3×10^{-6}	5×10^{-10}	5	10	0.1
Te ⁹⁶	腎	1×10^{-6}	2×10^{-10}	2	7	3
Ru ¹⁰⁶ →Rh ¹⁰⁶	腎	1×10^{-7}	2×10^{-11}	3	2	3×10^{-3}
Rh ¹⁰⁶	腎	1×10^{-6}	2×10^{-10}	20	10	0.3
Ru ¹⁰³ →Rh ¹⁰³	腎	5×10^{-6}	9×10^{-10}	50	60	0.8
Ag ¹⁰⁶	肝	4×10^{-7}	7×10^{-11}	3	6	5
Ag ^{110, 111}	肝	5×10^{-7}	8×10^{-11}	20	7	10
Cd ¹⁰⁹ +Cd ^{109m}	肝	7×10^{-4}	5×10^{-9}	0.5	80	0.1
Sn ¹¹³	骨 骼	2×10^{-3}	3×10^{-10}	10	30	0.8
Te ¹²⁷	腎	7×10^{-7}	1×10^{-10}	10	8	0.1
I ¹³¹	甲 狀 腺	2×10^{-7}	3×10^{-11}	跡 量	跡 量	10^{-3}
Te ¹²⁹	腎	2×10^{-7}	4×10^{-11}	2	3	4×10^{-2}
Cs ¹³⁷ +Ba ^{137m}	肌 肉	4×10^{-5}	6×10^{-10}	跡 量	跡 量	2
Ba ¹⁴⁰ →La ¹⁴⁰	骨 骼	2×10^{-7}	3×10^{-11}	2	2	3×10^{-2}
La ¹⁴⁰	同 上	3×10^{-7}	5×10^{-11}	9	5	0.6
Ce ¹⁴⁴ →Pr ¹⁴¹	同 上	1×10^{-7}	2×10^{-11}	3	2	10^{-2}
Pr ¹⁴³	同 上	5×10^{-7}	9×10^{-11}	20	8	5×10^{-2}
Pm ¹⁴⁷	同 上	2×10^{-6}	4×10^{-10}	60	40	2
Sm ¹⁵¹	骨 骼	8×10^{-6}	1×10^{-9}	200	100	50
Eu ¹⁵⁴	同 上	4×10^{-7}	8×10^{-11}	5	7	4×10^{-2}
Ho ¹⁶⁶	同 上	5×10^{-7}	8×10^{-11}	20	6	0.3
Tu ¹⁷⁰	同 上	5×10^{-7}	8×10^{-11}	10	7	4×10^{-2}
Lu ¹⁷⁷	同 上	1×10^{-6}	2×10^{-11}	40	20	8
Ta ¹⁸²	肝	5×10^{-7}	9×10^{-11}	5	8	3×10^{-2}
W ¹⁸¹	骨 骼	7×10^{-7}	1×10^{-10}	4	9	3

表 1-3 (續)

元 素	緊要器官	水中最大允許濃度 (居里升/)	空气中最大允許濃度 (居里升/)	排泄物中的最大允許量		
				一次吸入 (微居里)	一次吃入 (微居里)	經常吃入 (微居里/天)
1	2	3	4	5	6	7
Re ¹⁸⁸	甲狀腺, 皮膚	2×10^{-6}	4×10^{-10}	3	20	3
Ir ¹⁹⁰	腎, 肺	3×15^{-6}	6×10^{-10}	20	40	1
Ir ¹⁹²	同上	5×10^{-7}	9×10^{-11}	4	6	0.2
Pt ¹⁹¹	腎	7×10^{-7}	1×10^{-10}	6	10	5×10^{-3}
Pt ¹⁹³	腎	9×10^{-7}	2×10^{-10}	6	10	8×10^{-3}
Au ¹⁹⁶	肝, 腎	2×10^{-6}	4×10^{-10}	20	30	0.4
Au ¹⁹⁸	同上	6×10^{-7}	1×10^{-10}	10	8	0.5
Au ¹⁹⁹	同上	2×10^{-7}	3×10^{-10}	30	20	1
Tl ²⁰⁰	肌肉	1×10^{-6}	2×10^{-10}	8	10	0.6
Tl ²⁰¹	同上	9×10^{-3}	2×10^{-6}	30	80	5
Tl ²⁰²	同上	5×10^{-6}	9×10^{-10}	10	40	4
Tl ²⁰⁴	同上	1×10^{-6}	2×10^{-10}	9	9	4
Pb ²⁰³	骨 骼	2×10^{-7}	4×10^{-10}	20	30	5×10^{-2}
Pb ²¹⁰	同上	3×10^{-9}	6×10^{-13}	6×10^{-2}	4×10^{-2}	5×10^{-5}
Po ²¹⁰	脾	3×10^{-9}	5×10^{-13}	8×10^{-2}	4×10^{-2}	1×10^{-5}
At ²¹¹	甲狀腺	4×10^{-9}	6×10^{-10}	跡 量	跡 量	6×10^{-8}
Ra ²²⁶ + 55% dr	骨 骼	1×10^{-9}	2×10^{-13}	10^{-2}	10^{-2}	4×10^{-3}
Ac ²²⁷ + dr	同上	5×10^{-10}	8×10^{-14}	10^{-2}	7×10^{-3}	10^{-5}
Th ²³²	同上	4×10^{-10}	7×10^{-14}	10^{-2}	6×10^{-3}	8×10^{-5}
Th ²³⁴ + Pa ²³⁴	同上	2×10^{-7}	3×10^{-11}	5	3	0.4
U ²³³	同上	3×10^{-9}	5×10^{-13}	9×10^{-2}	5×10^{-2}	9×10^{-5}
Unat	骨 骼, 腎	2×10^{-9}	3×10^{-13}	5×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-5}
Pu ²³³	骨 骼	3×10^{-9}	5×10^{-13}	8×10^{-2}	4×10^{-2}	6×10^{-7}
Am ²⁴¹	同上	3×10^{-9}	5×10^{-13}	8×10^{-2}	4×10^{-2}	4×10^{-5}
Cm ²⁴²	同上	2×10^{-9}	4×10^{-13}	7×10^{-2}	4×10^{-2}	8×10^{-5}

由于研究工作的深入, 对于不同的放射性同位素的最高允許濃度或含量也是有很大改变的。如 Pu²³⁹, 以前认为它在腸胃中被吸收的分数为 0.10%, 故在水中的最大允許濃度訂得較現在为低。但 1955 年日内瓦和平利用原子能會議上, 則根据了科学的证明, 其吸收分数不是 0.10% 而約是 0.01% (考虑到安全系数为 10), 建議 Pu²³⁹ 在水中的

表 1-4

射 綫 种 类	每 天 的 剂 量				24小时内連續照射的粒子流量 (近似值)
	γ		γ_{ep}	γ_{em}	
X 或 γ 射綫	0.050	1	0.050	0.050	1100个能量为1兆电子伏的 光子/厘米 ² ·秒
β 射 綫		1	0.050	0.050	15个能量为1兆电子伏的 β 粒子/厘米 ² ·秒
α 射 綫		20	0.0025	0.050	0.001个能量为4兆电子伏 的 α 粒子/厘米 ² ·秒
热 中 子 (~0.025电子伏)		5	0.010	0.050	300个能量为0.02电子伏的中 子/厘米 ² ·秒
快 中 子 (~20兆电子伏)		10	0.005	0.050	17个能量为2兆电子伏的中 子/厘米 ² ·秒
快 中 子 (>20兆电子伏)		20	0.0025	0.050	6个能量为20兆电子伏的快 中子/厘米 ² ·秒
质 子		10	0.005	0.050	10个,能量为2兆电子伏的 质子/厘米 ² ·秒

最大允許濃度可以比旧标准所規定的量增加10倍。又如鉴于 Ru¹⁰⁶ 的紧要器官是骨骼而不是腎臟，同时它对于骨骼更加灵敏，于是建議将 Ru¹⁰⁶ 在水中的最大允許濃度值减少100倍。

以前所規定的 I¹³¹ 在空气的最大允許含量虽然对人是无害的，但为了防止 I¹³¹ 在植物中的濃度会对牧場上的牛羊等有害，故又建議將

表 1-5

放 射 源	放射性濃度(微居里/厘米 ³)	
	空 气	水
β 或 γ 放射性	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷
α 放 射 体	5 × 10 ⁻¹¹	10 ⁻⁷

I¹³¹ 在空气中的濃度降低四个数量級。同样怕 P³² 可能随魚类进入人体，建議將 P³² 在水中的最大允許濃度由 2 × 10⁻⁷ 居里/升降低至 3 × 10⁻¹⁰ 居里/升。为了维护大魚的安全，又将水中 Na²⁴ 的濃度由 8 × 10⁻⁶ 居里/升降低至 2 × 10⁻⁹ 居里/升。

仔細研究起来，对于不同的对象，实际的允許剂量也是不相同

的，以下的材料更可以說明，我們不能把最高允許劑量看成那麼肯定。

(1) 動物種類的差異 試驗證明，不同的動物對同一種放射性物質中毒反應不同，如狗的敏感性就較兔子和白鼠為小。

(2) 性別的差異 某些研究證明，雌性動物比雄性動物敏感。

(3) 年齡的差異 年幼的動物對放射性較為敏感，鈾在年幼動物中易于積存，而在年老的機體里則積存較少。

(4) 動物神經系統調節動力過程的差異 中樞神經系統的興奮與抑制狀態可以改變對放射性鈾的吸收、分布與排泄，用咖啡因、可拉明和溴鹽可以加速、加強或減弱硝酸鈾酰中毒時的強度及時值的變化。應用卡地阿素可以提前針中毒的紅血球表現，而用基克森鈉爾後，可不表現紅血球的變化，但使淋巴球顯著減少。

(5) 外界溫度可以降低動物對放射性物質的抵抗，又如營養因素可以改變中毒過程的發展。高醣高維生素、人工缺磷等對於中毒過程有利。不過尚有待進一步研究。

前面已經講到過，外部照射的最高允許劑量每周為 0.3 倫，平均每天為 0.05 倫，但這 0.05 倫/天的劑量應該是少量的、分散的受到照射，而不是大量的、集中的遭受照射，因為這樣可以很好的恢復。不同的社會制度的國家雖然都採取了每周為 0.3 倫為最高允許劑量值，但在資本主義國家如美國、英國等卻採用每天最大允許劑量為 0.1 倫；蘇聯與我國等社會主義國家，因為黨和政府對人民健康的無限關懷，則採用每日最大允許劑量，為 0.05 倫，以便更好地達到少量分散照射的要求。

這裡應該指出，每日最大允許劑量 0.05 倫應該是指的各種類型射綫劑量的總和，因為劑量是疊加的。所以一個人不能在一天中受了 0.05 倫的 γ 射綫劑量而又去受 0.05 生物當量倫的其他射綫的劑量。

§1—3. 劑量的探測 劑量的探測是極其重要的，它可以告訴工作者是否處於危險的境地；究竟能工作多少時間；怎樣來進行防護。如果操作較強的樣品，沒有探測儀器時，就不宜進行工作。

探測儀器工作原理的依據是放射性物質的射綫與物質相互作用時所具有的特征效應：如電離效應、光效應、照象效應、熱效應、化學

效应等等。

常用的剂量探测仪有随身剂量计，携带式偷计，照相胶片，计数管等。而探测器和剂量仪部分已在原子核物理部分中详细讲述过，此处不拟重复。

第二章

射綫对人体的影响及其防护

一切組織的損伤都是电离輻射被組織吸收的結果，电离輻射在物质中的吸收，已在原子核基础知識部分討論过了。这里再就他們与組織作用的机制和所引起的生物效应作一些必要的說明。

射綫对生物体究竟有些什么影响呢？先讓我們回顾一下发现伤害和进行防护的历史；然后再分別进行討論。

§ 2-1. 射綫的伤害和防护簡史 1895年倫琴发现了X射綫，第二年就有人因做这些射綫的實驗而发生了異常的皮炎，到1897年就发展到23个人。1898年鐳又发现了，因为大量地和經常地做这方面的工作，而沒有注意防护，也引起过不幸事故。在一个不长的時間內，經過观察和研究，在从事这方面工作的人員及被實驗的动物身上，发现并确定了X射綫和 γ 射綫的一系列生理上的变化，如皮炎，眼痛，脱发，疲劳，虚弱，嘔吐，炎肿，白血球减少，骨髓发生变化等等病态。

X射綫的危害早已确定，但其有害剂量的研究却很晚。1902年(是已有因照射而出現死亡事件的一年)，洛倫茲曾用照相法来确定危險輻射程度，但只能定性而不能确定剂量。直到1921年英国成立了不列顛倫琴射綫及鐳的防护委员会，才第一次提出确定有害剂量的任务。

1930年以后，加速器发展了，虽然有些防护，但仍有不少人因为不小心而受伤和眼睛失明。

1942年，第一个反应堆建成了，它的威力更大，为了保障工作人員及附近居民的安全，防护問題成为更为重要和迫切需要解决的問題了。后来在这方面作了不少改进，并在1950年在国际倫琴学家會議上确定了最大剂量。

今天原子能的事业已达到工业化的地步，由于对安全防护的重视，

不幸事故已减少很多，据苏联的统计材料说明，在苏联原子能工业中不幸事故不比一般工业中的不幸事故为多。

§ 2-2. 射线对人体的影响 射线的生物效应是依靠射线的能量而体现出来的。当然这种效应只是受被机体所吸收的那部分能量所制约的。故实际上生物效应是和射线的许多特性（粒子的电荷、质量、运动速度等）的综合性有关，因为机体所吸收的能量与此有关。机体能吸收的能量，亦即射线能量在机体内的消耗，随射线种类及能量的大小不同而有较大的差异（见表 2-1）。

表 2-1 各种射线能量的线性消耗及相对的生物效应

电离粒子	射 线	能量线性消耗 (千电子伏/微米)	相对生物效应
电 子	β 射线及 X 射线(20—30 百万电子伏)	0.3	0.3—1.0
	自然及人为放射性同位素的硬 β 与 γ 射线	0.3—0.4	0.4—1.4
	硬 X 射线(1000 千伏)	0.5	1.0
	X 射线(200—250 千伏)	2.7	1.0
	氚的 β 射线	5.0	1.3—1.6
中 子	快速中子(8—14 百万电子伏)	6.6—12.8	1.6—5.2
	某些核反应的中子	28—37	1.3—16
	中子射线	~100	—
重 氢 核	190 百万电子伏(射程的开始部)	0.73	—
	190 百万电子伏(射程的终了部)	50—30	—
α 粒子	快速氦核(380 百万电子伏)	2.9	—
	氦核(加速器)	44	—
	放射性同位素的 α 射线	100—170	~10
	硼(中子, 重氢核)锂反应		
碳 核	碳核, 120 百万电子伏(回旋加速器)	220	512
碳、氮、氧核、铁核	宇宙射线	1120	—
	宇宙射线	3340	—

表中相对生物效应是表示以相同的剂量（物理当量伦）照射时，其生物学作用对通常 200—250 千伏的 X 射线作用的比值（以 X 射线为 1）。此表可和表 1-3 配合起来看。相对生物效应的大小与被研究

的生物体的状态、发育阶段以及照射方法等有密切关系。然而对大多数的生物体来说，尤其是对多细胞生物体来说，射线作用的效应随射线在机体内的线性能量消耗的增加而增加，这一点是无容置疑的，图2-1可以说明这一点。

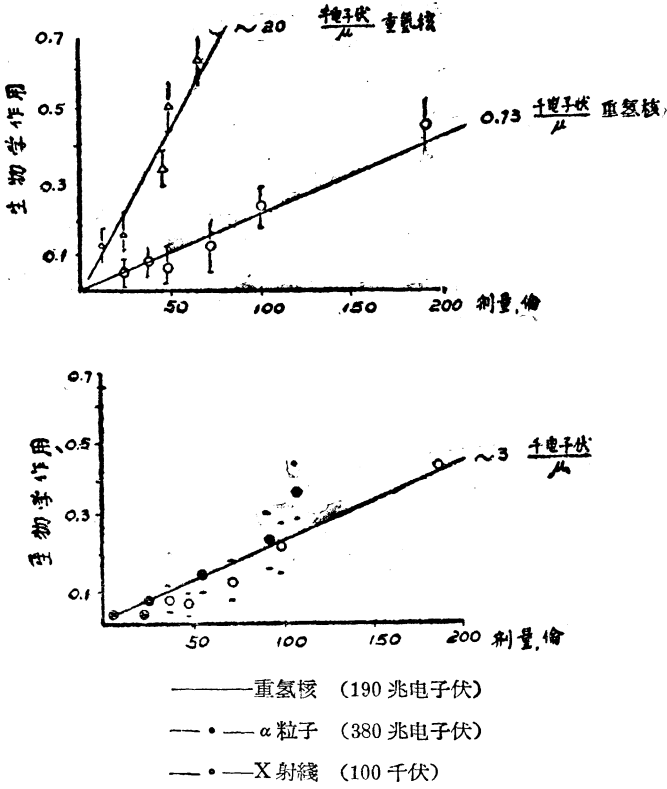


图2-1 生物学作用与在机体内的能量线性消耗的依赖关系

图2-1的上方表明了一种射线（即能量为190百万电子伏的重氢核）的生物学作用；但在机体内能量线性消耗是不同的，因为一种情况是能量在射程的起始部分消耗了，而另一种情况是在离射程终点不远的地方消耗了。我们可以看到，在这样情形下所发生的生物学作用是大大不相同的，能量线性消耗为20千电子伏/微米时的作用显然大于

0.73 千电子伏/微米时的作用。图的下部表明了种类极不相同的各种射线的生物学作用,这些射线是: X 射线, 能量为 190 兆电子伏的重氢核以及能量为 380 兆电子伏的 α 粒子, 不过所选取的这些射线在机体内的能量消耗速度都是相同的(~ 3 千电子伏/微米)。在这种情况下, 这些射线的生物学作用实际上也都是相同的。

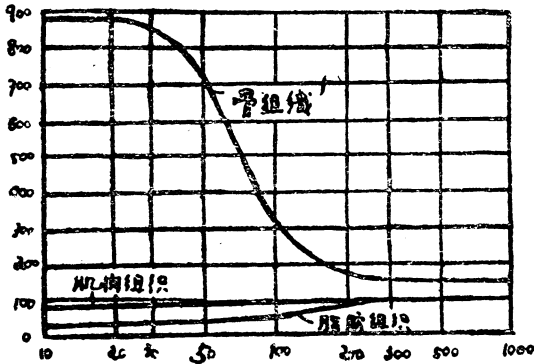


图 2-1*

但是大家也都知道, 机体对任何作用的回答是各种不同的反应, 而这种反应是在时间中进行的, 这种反应不仅在不同机体上可能有极大的差异, 就是在同一机体上, 由于其发育阶段、机能状态等等不同也有很大差异, 并且还与其作用的性质有关。由此可见, 我们所观察到的生物效应乃是在相应的每个时间内所发生的过程——放射作用固有的以及机体反应的两个过程的结果。发生的生物作用的情况要视单位时间内传给机体的辐射强度的量也就是辐射能传给机体的速度而定。在绝大多数情况下, 剂量率大时, 其生物效应也大 (在总剂量相同的情况下比较), 因为在此情况下机体完全来不及显现出它的修复过程。此时, 射线能量消耗较大和较小的相比, 在生物效应对剂量率的依赖关系上, 前者比后者要小。此外, 分次照射比连续照射要好些, 因为分次照射可以使机体能够更好地实现自己的适应性作用和修复作用。当然, 在这种情况下, 照射时间的长短以及间隔时间的长短也有其很大的意义。射线能量消耗不同的射线在此时也都随着呈现出多少有些不同的规律性。

就輻射生物学来讲，照射动物和植物时，产生再生过程的抑制是它的特点，也是普遍的規律性。无论是外伤后的或生理性的再生，在照射的影响下均可受到抑制，后者如对造血、精子形成和上皮形成的抑制就是。由于照射，可以引起形态学等等的变化。但适当的射綫剂量照射所引起的形态学的变化是可以恢复的。例如造血过程經抑制后，还可恢复正常。有时甚至以致死量照射动物所引起的伤害也可以部分地得到恢复。

下面再分別具体地談一下各种射綫的生物作用

1. 射綫的生理作用 α 射綫具有显著的生理作用，它的电离本领极大，且在不大的吸收层内发生（1微米有2000—6000对离子，比起 β 来要大600—700倍）这种作用。 α 能量愈大，破坏性也愈大，因为生物作用与电离的密度有关系。 α 致伤集中，細胞一死就是一团，故不易恢复。当然在外部照射时，它不能透过皮层，致伤程度减至很小，然而皮肤也会引起燒伤或发炎。外部照射时它不及 γ 射綫危害大，但可以想象， α 在身体内部的危害就很大了。

β 射綫也具有較为显著的生理作用，它的电离本领也很大，并在不很大的范围内分布（在几个毫米中）。在1微米内約生成3—10对离子。如受了 β 的伤害，一般是容易恢复的；因为在这里伤害不很集中，死細胞的旁边还有很多好的細胞，易借新陈代謝恢复正常。外部照射时被皮层及皮下的一些細胞所吸收而引起皮炎等，但不如 γ 射綫为害大。 β 在体内的危害次于 α 。

应该注意， α 、 β 射綫对于皮肤和各种各样感受器官等的伤害，实际上也会或多或少地对各种器官系統产生复杂的反射影响。故 α 、 β 这种非穿透性的射綫的剂量不是可以因其穿透性小而相对地增大的，而是应该采取和穿透性射綫的最高允許剂量相同的值作为其最高允許剂量，即每周为0.3生物当量倫琴。

X射綫和 γ 射綫的穿透性很大，电离作用或多或少是均匀的。作体外照射时，它的危害最大，它易引起体内的各种病症。在体内照射时却較 α 和 β 射綫的危害为小。大剂量的 γ 射綫照射眼睛时，能发生内障病，不能恢复。

中子流不带电，在人体内的自由射程较长（5兆电子伏的中子在人体内的射程为6.37厘米），其危害不仅限于表面一带。中子进入人体后被氢、碳等减速；产生 $H^1(n, \gamma) H^2$, $C^{12}(n, \gamma) C^{13}$ 等反应。在中子与氢原子碰撞的减速慢化过程中，氢原子得到最大的能量形成了反冲质子。其后已被慢化的中子和氮作用起 $N^{14}(n, p) C^{14}$ 反应（截面很大），又产生了反冲质子。这些带有很大能量的反冲质子使生物体产生强烈的电离，危害很大，此外还有 $Na^{23}(n, \gamma) Na^{24}$ 等反应。所有这些反应中放出的 γ 射线就和 γ 放射体所放出的 γ 射线一样，对人体起严重的伤害作用。所以说中子的危害不管是体内或体外都是很大的。

质子流因为本身带有电荷，其作用和 α 射线很相似，但如果能量很大的质子或由高能加速器出来的加速了的质子，其危害远比 α 粒子为甚。

根据试验说明， β 和 γ 射线的生物效应差不多，而 α 射线和中子流的生物效应比 β 大得多。快中子又比慢中子生物效应大。质子的生物效应也不小。

根据生物效应，可以总结辐射损伤引起灵敏的生理变化的一般情况。数据虽然很多，但绝大多数来自对小动物的实验。人体极其复杂，显然对射线的反应和小动物相比不会完全相同，但就文献上引证的一些射线病患者的病历看来，很多地方有相同的规律。

（1）循环系统。血液中淋巴球、白血球和血小板等对射线最敏感，可以作为考查所受剂量的生物指标。淋巴球、白血球均随所受剂量的增加而下降。血小板在照射后也会减少。大白鼠全身受300伦或300伦以上的照射后，血小板即行减少。雌性小白鼠受600伦照射后，在第9日血小板减少得最严重（见图2-2）。

动物或人受电离辐射后，因为血小板减少等等原因，凝血能力有所减低，尤其是在急性照射以后更加显著。小剂量照射后，可以发生紫斑或流血；中等致死量在照射后一星期时即可以发生流血，第二、三星期更为严重，出血地点常见于皮下、胃肠、泌尿系统及心肺等处。应用X射线照射治疗时，有血压降低现象，如剂量增加大时，甚至有因血压降低、心跳加速、而引起休克的现象。

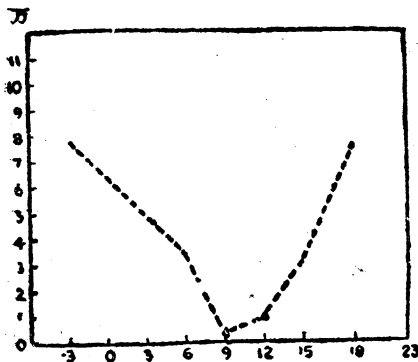


图 2-2 雌性小白鼠受全身照射后血小板的变化

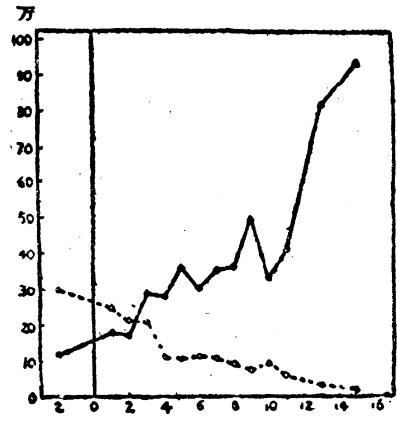


图 2-3 狗全身受 450 伦照射后血小板的变化

(2) 消化系統。它对放射性作用較为敏感。受一定剂量后，可能引起食欲减低，腸蠕動增加（小剂量 X 射綫照射时，数分钟内恢复正常）等现象，受大剂量照射后可能出现腸壁緊張力增强，引起痙攣性收縮，胃液、胃酸分泌减少，胃臟吸收能力减低的現象。与此同时，也常伴有嘔吐、腹瀉、失水、組織破坏流血而造成体液及电解质之变化。小动物經致死剂量照射后，小腸部分腸粘膜炎坏死、絨毛脫落、水肿、流血潰瘍、細菌繁殖，而在胃与大腸部位則变化輕微。

(3) 神經系統。中小剂量照射时，导致失眠头痛，記憶力衰减，手指尖端（末梢神經）感觉力衰退或破坏；剂量更大时可能引起部分瘫痪，受一定剂量后，也会引起新陈代謝作用的紊乱和破坏，毛发脫落即其象征之一。以上这种种象征的初次出現是一个严重的訊号，应听医生所囑，立即休息或治疗，以免于受害。

2. 射綫病及其长期影响 放射性物质及原子能被人类发现与应用以来，由于当时未能掌握其特性及缺乏防护知識，所以在过去 50 年中，有不少这方面的工作人員患了射綫病，甚至引起一些不必要的伤亡事件。

(1) 分类。

(i) 急性。①全身或局部非穿透性射綫所致的损伤。②局部穿

透性射綫所致的損傷（常发生于局部治療之后）。③全身穿透性射綫所致的損傷（原子堆或加速器等的不幸事故等）。

(ii) 慢性。①全身穿透性射綫所致的損傷：⊖血液系統的病症（貧血、出血性紫斑、白血病）；⊖癌腫。②非穿透性射綫所致的損傷：⊖皮膚病——皮膚萎縮、脫髮、潰瘍、癌腫；⊖眼病——內障病。

(2) 急性放射病的症狀。

(i) 非穿透射綫（弱 X 射綫， α ， β 及陰極射綫）所致的損傷。此射綫多作用于皮膚、毛囊、眼睛，其所發生的損傷類似紫外綫或灼熱所致的損傷：第一期，照射后局部充血或水腫、發癢、有燒灼或刺痛感，2—3 日后自行消退。第二期，經過潛伏期約 3—7 日，无任何症狀。第三期，照射后 5—7 日發生紅斑、較痛、起小水泡或大水泡；照射后 2—4 周時有脫皮現象。皮膚及上皮萎縮變薄及形成肉芽組織。第四期，照射后 4 周，第三期之症狀復發而形成深部坏死及嚴重疼痛。第五期，照射后 3 個月，放射損傷轉為慢性，而且發生毛細管擴張、角化症、癌腫改變或營養不良性潰瘍的結果。

(ii) 急性穿透性射綫損傷。

①非全身性照射發生損傷的程度因照射部位與劑量不同而有所不同，其中以胸部、腹部為最，其他部位次之，所發生之病狀多為惡心嘔吐及食欲不振。Friedrich Ellinger (1952) 觀察了 7 個月深部 X 光治療對人體所發生的影響，在 254 名患者中，以照射胸部腹部發病最為嚴重，並且發現，在同一部位照射時，其發病程度一般隨劑量增加而增劇。

②全身照射。根據動物試驗及遭受原子彈損傷者的觀察，全身照射后所顯出的症狀與照射當時的劑量最有關係。一般認為：

⊖劑量小於 50 倫時，可能不發生病狀，如果發生則為暫時性的惡心或輕微的或晚期的白血球減少（特別是淋巴細胞）。

⊖ 50—1000 倫時可以發生典型臨床症狀：

(a) 初期全身症狀期：照射后數小時發生惡心、嘔吐、衰弱、頭痛頭暈、食欲減輕、心悸、易受激惹、失眠、不同程度的白血球減少、貧血及血小板減少等。

(b) 潜伏期：病状常于 24—48 小时后消退，但经过 2—3 周时间又出现第一期症状。此潜伏期当照射剂量大时则缩短，如剂量大到相当程度，则无潜伏期。

(c) 临床症状增剧期：全身不适、食欲丧失、发热、口腔与喉部粘膜严重发炎、皮肤苍白、腹泻、鼻出血、皮肤局部点状出血。

(d) 恢复期。

但是在这个剂量范围内，病情又因剂量的大小发生几种轻重不同的类型：

(a) 轻病例：

照射后日期	病 状
1—18	无任何症状。
19—60以上	脱发、食欲减轻、消瘦、喉痛、紫斑、腹泻。

死亡率不定（如无并发症常可恢复）。

(b) 中等病例：

照射后日期	病 状
1	1—2小时后恶心，呕吐。
2—11	潜伏期。
11—14	脱发。
18—30	食欲减低，周身衰弱，发烧，口腔发炎、齿龈炎，苍白，紫斑，便血，鼻衄，吐血，消瘦，死亡。

死亡率 50%（3—6 周）

(c) 严重病例：

照射后日期	病 状
1	1—2小时后恶心，呕吐。
2—4	潜伏期。
5—9	便血，呕吐，口腔发炎，发热，消瘦，死亡。

死亡率 100%（一般在 2 周内）

在这个范围的剂量照射下死亡率与剂量的关系有如图 2—4 所示。

③ 2000—3000 倫时, 症状非常严重, 于 3—4 日死亡。

④ 30000 倫以上, 用小白鼠試驗立即死亡, 死前有抽搐及呼吸障碍症状。

(3) 深远影响。

(i) 恶性肿瘤的发展。所有各种射线粒子都会引起恶性肿瘤, 但外部照射时可能性很小(但皮肤的癌及恶性肿瘤都是外部照射所致, 见前)。

恶性肿瘤并不是在照射之后立即出现, 一般有一潜伏期; 它与动物的寿命成正比。对人說潜伏期为 10—20 年, 老鼠射线病的潜伏期则几个月。但也有一照就发现的。

骨路肿瘤是由于放射性同位素沉积在骨头里(如 Ba^0 , Sr^9 , Ra^{226} , Pu^{239} 等均易沉积)所引起的。

造血系统的肿瘤的最危险的后果就是白血病, 据统计, 伦琴射线学家患白血病的数目比其他专业的医生患该病的人数要大 10 倍。

肺癌。铀矿中患肺癌的百分率很高, 这是由于吸进了含量高的空气所致。其发病率比附近居民大 30 倍。一般工作了 13—17 年才发生。实验证明, 置于这样的矿井中的动物有 30% 长了恶性肿瘤。

卵巢癌。被照射过的雌豚鼠常得卵巢癌。因此完全可以料想到, 辐射可能使妇女得卵巢癌(故女子的允许剂量应较男子的低些)。

此外眼睛的内障症也是照射的一种远期效应。

(ii) 不育、遗传和早死。经过动物实验, 发现辐射可能引起不育、遗传和早死。但对于人很多地方还不尽然。

不育。雌鼠卵巢被辐射照射后, 累积到一定量就不能生育, 也不能恢复。对雄鼠则只影响精子的产生, 但可以恢复。不能认为经常的照射肯定会使受胎能力降低, 可是可以肯定, 照射并不影响内分泌, 即不会降低人的性欲。

遗传。以果蝇作实验(以 150 伦剂量照射它)表明射线的生物作

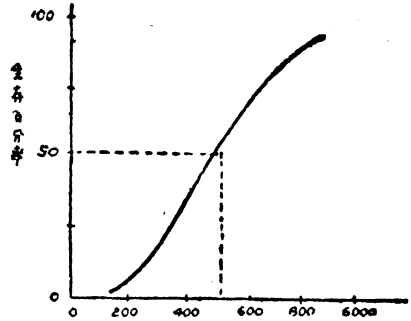


图 2—4 γ 射线全身照射剂量与死亡的关系

用具有叠加性质，所引起的变化不会磨灭，不能复原，而是一代代的傳下去。由于許多原因对人进行研究是很复杂的；如人的寿命长，后代的数目太少；实验上检查很困难。

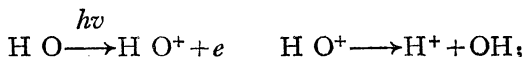
早死。受了照射的动物，无论大小剂量都会引起早衰。

对人来说，生理上的差别是如此之大，因之要确定经常受照射的人和一般居民之间可能在存的寿命上的微小差别是困难的。

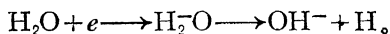
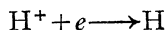
3. 辐射生物作用的生物化学基础 近年来的广泛研究，使我们现在能够揭示在照射时和照射后射线作用最初的几小时内，被照射的机体內发生的复杂生物化学主要之点。

(1) 射线的间接作用——游离基理论。水占成年人体重的70%，作为生物溶剂的水受辐射起了变化以后，不能不影响到其中所含物质。射线作用于生物体时，即可引起水分子的电离和激发。

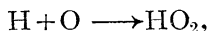
水分子的电离：



上面的 e 和 H^+ 以及 e 与 H_2O 也起作用：



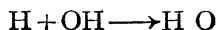
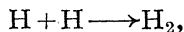
水分子的激发：水分子激发后生成 H_2O^* ，它们因为自己的相互冲突而生成所谓水分解的分子产物 H_2 及 H_2O_2 。有氧存在时，则



虽然移去了一些H，但使OH寿命延长。

这样在水中就有了非常活泼的强氧化剂（如 $\text{OH} \cdot$, $\text{HO}_2 \cdot$ 等）以及强还原剂（ H_2 等），它们可以引起机体內正常的氧化还原过程的改变，影响机体內的正常的物质代谢，引起机体的一系列的各种反应，而这些不同的反应归根到底都将造成生物效应。而生物变化将借助于内部能源来继续下去。

除了上面这些反应以外，也还在存着



等反应，自动地减少 H, OH ，而消除一些不良的影响。

有人讲在照射前，往組織内注入能直接或间接使組織中氧含量减少的物质（如半胱氨酸葡萄糖、叠氮化钠及其他一些化合物），也可以起預防作用，减低患病率。但这种說法是不全面的。因为需要有氧存在，才能产生活性很强的氧化剂 HO_2 等的只是綫性能量消耗小的射綫。在綫性能量消耗中等的情况下（质子，中子等）这现象还可能体现出一些来。而在綫性能量消耗大的射綫的作用情况下，不仅是在沒有氧时就很容易产生这种氧化剂，而且这样的射綫本身就会产生游离氧。故往組織中注入使氧含量减少的物质来作防护是不能一概而論的。

(2) 射綫的直接作用。有人这样說：只有在含水量为 3% 以下的材料及化合物中，才能談及直接作用，实际上这样的条件对无生物才有可能；也只有当受以几十万倫計的剂量照射时，才可以发生直接作用。直接作用是直接使化合物如蛋白质、酵素、碳水化合物等的化学鍵轰断，使之电离或激发，蛋白质中的一个原子发生变化就可能引起包含数十万原子的結構失去活性。蛋白质是与生命紧密联系的，它的变化必然会引起生命活动的改变。此外，实际上那些放射性由皮内、皮下使皮肤燒伤及在骨骼中的放射性元素使骨骼形成肉瘤，在淋巴中积聚的放射性元素对淋巴球的作用也都是直接作用。

4. 不幸事故的避免 从前面所談的看来，放射性显得可怕极了，但事实上并不尽然。現分別作如下說明。

首先應該肯定，在不超过最大允許剂量的条件下工作，是不会有any伤害的，每天受到小于 0.05 倫剂量对于造血器官，生殖器官，眼睛水晶体，人的寿命（人的寿命在长期遭受 0.6 倫/周的剂量时，才开始有减短現象）等等都沒有影响，因为人的机体很巧妙，它有一种适应性，在这样的情况下，即令有些失常，也可以完全恢复（但如超过一定剂量，长期日积月累下去，如对脑系、腎臟、眼睛的水晶体，还有女性性腺等有所伤害后，則不能恢复）。其次，即使平时不做有关放射性工作的同志，終日也处在宇宙射綫的照射中，有时因为有病需連續地用 X 射綫檢查身体、拍片子等，这类檢查一次就要受几个倫的

照射，也沒有听到說有什么問題。有这样的說法：一次受到 50—100 倫的全身照射，可能引起較严重的射綫病，就是这种射綫病也仍可以恢复。更局部的照射，則可忍受数千倫（如治疗恶性肿瘤，即用了 3000—7000 倫的局部照射）。虽然如此，但我們必須謹慎，应始終不移的重視最大允許剂量，設法使受到的剂量尽可能减低以确保安全。因为“沒有病比有病好”，必須做到“有备无患”。第三，如果回顾一下不幸事故发生的原因，可以說大都由于对放射性的知識不足，沒有安全操作規程和麻痹大意所造成的。这些例子随手可得，如 1914—1918 年从事发光塗料（內含鐳及新釷）的几百工人由于不知不觉吃进了鐳和新釷而引起了再生障碍性貧血、骨炎、骨坏死或骨肉瘤。1924 年一磷光性塗料（含硫化鋅和鐳）工厂的女工 800 人因常用嘴舔平塗料的刷子，当然就有鐳留在嘴里，几年后有一部分女工就因极度疲倦而停工，很多人患恶性貧血，10 人亡于恶性貧血和颌骨坏死，很多女工死于骨肉瘤。又有一医院里，一卫生管理人員为了得到病人的欢心，用倫琴射綫透視他們的四肢，結果 63 个病人患了皮炎，18 个病人不得不动截除手术。一實驗室工作者自以为身体强，不用保护設備而常常直接用眼睛观察有中子射出处的設備工作情况，結果眼睛瞎了。其他象什么以为 Ra 水可治病，但喝多了以后，血液发生了变異，生骨瘤，得了放射病。这类例子是不胜枚举的。

最后也可以看到，只要規定了操作規程，作了必要的防护措施，設有灵敏的探测器的监护以及必要的檢查和必要的治疗制度，是完全可以避免輻射的危害的。这些都可用苏联的經驗证明。因此我們完全可以这样說，放射性不可怕，不幸的事故完全可以避免。

§2—3. 射綫的防护 由上面已知道，不管是外部或內部照射都会对工作人員产生危害作用，因此必須进行防护，使所受到的輻射剂量在安全值以下。

1. 防护措施 在談到怎样防护以前先得着重提出，必須具备必要的探测器和設備，因为放射性的危害是不能直接摸到和看到的，必須以相应的仪器設備来代替人的感觉器官。而仪器設備本身也应常常校正。必須有安全操作規程和實驗室守則，而且要切实遵守，否則会引

起事故的发生，如遭受体外的大量的或长期的照射，或将放射性物质吸入体内，或污染了环境，危及整个实验室和整个地区。

必须尽量少受或不受照射，不要超过最大允许剂量，也不要一定凑到最大允许剂量的水平。能少受照射就少受照射，能不照射就不去受照射，少照射比多照射好，不受照射则更好。

必须重视增强体质、加强营养、注意锻炼，以增强身体对放射性的适应性和恢复机能。每个有关单位均应根据不同的放射性水平建立保健营养津贴。

必须规定一检查体格的制度，定期检查身体，及时地发现身体生理是否有所变异。这是一种生物指标，可以弥补仪器不可靠的缺点。检查时，常观察血液的成分血沉、指纹是否有所变化，以及检查粪便、尿液、分泌物，甚至测量个别器官(如甲状腺)是否有放射性等。根据统计我国正常人的血液范围是：

白血球	6000—12000 万/毫米 ³ ；
	男 450—600 万/毫米 ³ ；
红血球	女 400—500 万/毫米 ³ ；
淋巴球	20—30% (白血球中百分数)；
颗粒白血球	50—65% (白血球中百分数)。

但正常人们的血液成分差别还是相当大的。年龄大小、性别差异、怀孕与否等都是其原因，此外还有若干偶然疾病、传染病、而特别是中毒(如苯蒸气中毒)以及其他因素(饮食制度、周围温度、拔海高度、季节、气候)都会引起血液的变化。因此，在参加工作以前应该先进行全面的体格检查(检查血液应在上午 11 点和下午 3 点进行，并取其平均值，如果误差大还应再检查一次)作为“本底”。假如原来就患有贫血病，肺结核病，身体虚弱等的慢性病，最好不要让他参加此类工作。在工作中如发现有所变异，也不必过分紧张，因为不一定是受了较多剂量的原故。究竟如何，应由医生替你诊断。

2. 防护的基本原则

- (1) 避免放射性物质进入体内和污染身体。
- (2) 减少人体接受来自外部照射的剂量。

为了保证上述两点的贯彻，就需要

(3) 工作人员要受严格训练，具备必要的防护知识、谨慎作风、熟练技巧并遵守纪律。

3. 对体外照射的防护 从下面四方面着手：

(1) 用量。在不影响实验和工作的条件下尽量少用，因为

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (2-1)$$

N 大， $\frac{dN}{dt}$ 就大。

(2) 时间。受照射的时间尽可能短，不要在有放射性物质（特别是 β, γ 体）的周围，作不必要的停留。工作时力求迅速，操作力求简单熟练。故要求在做放射性实验之前做些空白实验。因为所受剂量是与时间成正比。

必要时，由一些人共同分担一定任务，免得长时间照射大大超过容许剂量。

(3) 距离。尽可能地远，愈远愈好，因为 γ 射线象光源发出光波一样，其强度与距离的平方成反比；

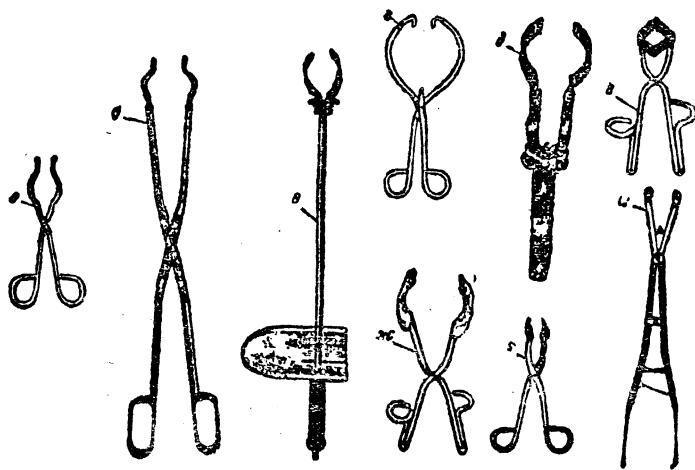


图 2-5 操作放射性物质用的夹具和移液管

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (2-2)$$

为了利用强度与距离平方成反比的原理，可以利用各种夹具，但此时必须注意：

(i) 不要用力过猛将瓶子压碎，最好瓶子外边有东西保护它，否则应该完全安全可靠。

(ii) 镊子不宜太长，否则增加了操作的困难。

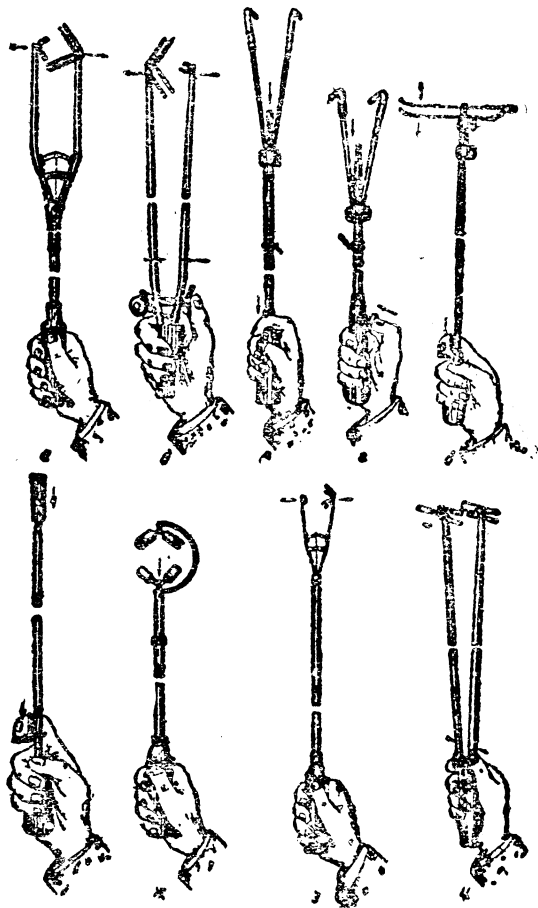


图 2-5 操作放射性物质用的夹具和移液管 (續)

(iii) 鑷子要保证不断地保持夹紧的状态，而鑷子最好成套，各种形状都有，以适应需要。鑷子材料最好为不銹鋼，开口处外面要有衬垫物。

图 2—5 所示为我们常用的夹具。

(4) 屏蔽。主要取决于物质的阻止本领，故一般说来那种物质都行。用的材料有：鉛，铁，水泥，磚，石，泥土，硼酸，石蜡，鋁，鉛玻璃，有机玻璃，水和溴化鋅水溶液等。

所用的屏蔽，特别是屏蔽 γ 的，都是非常笨重的，除了需要长期固定者外，都应做成可拆装，便于搬动的块状物，特别是鉛和铁。但它们的形状应该要求做到不让射线从迭成的磚縫中透出屏外。故可设计成所需要的形状。如图 2—6a 所示，有时也可以成整块的屏状如图 2—6b 所示。

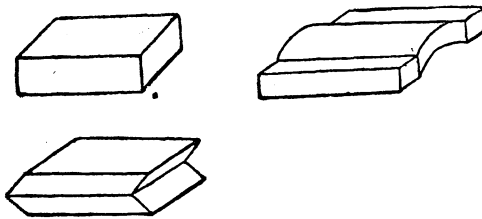


图 2—6a 不同形状的鉛磚

計成所需要的形状。如图 2—6a 所示，有时也可以成整块的屏状如图 2—6b 所示。

如果所用的屏状物是不透明的（如鉛屏），又不便于用眼睛直接去观察，

那在工作时可以备一鏡子通过反射来进行操作，当然事前应该练习純熟，否則容易发生撒潑等事故。

有时为了便于运输和貯藏常制成一定厚度的大小不同的鉛罐和鉛罐。

此外，对鉛罐或鉛罐中的安瓿瓶或試管也应有所注意。放射性很强的液体应当封在玻璃的細頸瓶中，并在液体上面留出相当大的空間，然后封好。因为辐射的电离作用使得空气的分子解离，增加了液面上方空間的气压，如果容器的空間很小，那么安瓿瓶有可能受不了那样大的內压力而破碎。这样一来，不仅損失了貴重的放射性药剂，而且会沾污了周圍环境，危害很大，一般在装好的瓶子外面垫以棉絮、吸水軟紙，再套一有机的容器，以保证万一发生上述不幸事件，还可以全部回收，不致流出造成污染。对于气态的放射性物质应使容器內所充气体的压力比大气压力稍小一些

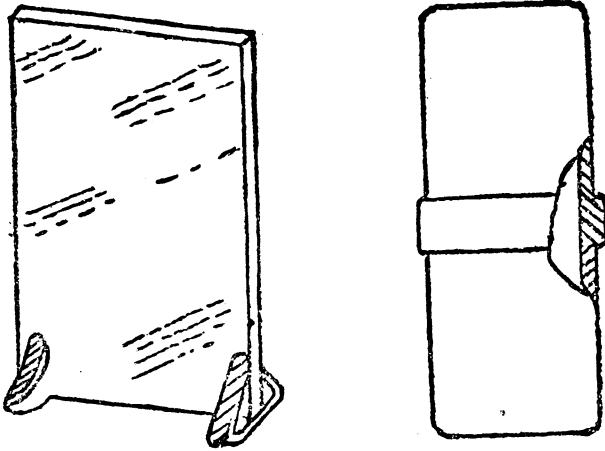


图2—66 鉛玻璃屏

对于不同的粒子射綫，防护措施也是不同的。

(1) α 射綫。本来它的射程就很小，很薄的空气层就可吸收掉它。我們工作时应带手套同时不要直接用手去摸放射性物质，那么， α 射綫的电离比值虽然大，但对其作外部輻射的防护則是不必要的。以 5 百万电子伏的 α 来說，其在組織中的射程为：

$$\begin{aligned} \text{組織中的射程(厘米)} &= \frac{\text{空气密度}}{\text{組織密度}} \times \text{空气中射程(厘米)} = \\ &= \frac{0.00129}{1} \times 3.5 \text{ 厘米} = 0.0045 \text{ 厘米。} \end{aligned}$$

这是很短的。

可見，即使不幸碰到皮肤（但應該不使其和皮肤直接接触）也是很容易被皮肤角质层所吸收的。对 α 粒子說来最重要的是不要让其輻射体进入人体。

伴随 α 有 β 的（如铯制剂），应按防护 β 的方法处理。

伴随 α 有 γ 的（如鐳），应按防护 γ 的方法处理。

(2) β 射綫。它比 α 具有更大的穿透能力，在空气中的射程可达几米。

β 射綫容易被不太厚的鋁层、銅片、有机玻璃或玻璃所吸收。故防护 β 輻射的外部照射仍是很简单的。

但是，在任何情況下都不能忽視这种防护，因为由于 β 射綫之易于被吸收，它就有可能在机体組織的表面上被完全吸收而引起很大的破坏作用。象眼睛的角膜、粘膜层等最易受伤，所以那怕是手指等和几十毫居里 β 輻射体有所接触都可能引起严重的、不易痊愈的烫伤。曾有人用 10 毫居里的 P^{32} 源在不同距离的地方作实验发现即使离开源已有一定的距离， β 射綫的作用也是很大的。

表 2-2

离源的距离(厘米)	0	1	2	5	10	25	50	100
剂量率(倫/小时)	740	300	112	31.1	9.94	1.8	0.43	0.084
經换算后的剂量率(微倫/秒)	2.06×10^5	8.33×10^4	3.61×10^4	8.64×10^3	2.75×10^3	5×10^2	1.2×10^2	2.33×10

由此表可以看出，如果直接与样品接触时，在小于 1 秒的时间內就将达到最大允許剂量。而在 1 米远的地方如果呆 1 小时即受到 0.084 倫（超过了最大允許剂量），此剂量就和 100 毫克镭当量的 γ 放射性样品在同样条件下所产生的剂量率相等。所以 β 射綫屏蔽的必要性严重性是很明显的。

为了妥善地进行对 β 射綫的防护，下面的材料可供参考。图 2-7 是屏蔽 β 射綫的一种措施以及所需要的屏蔽物厚度的簡要說明。

原子量較高的物质一般不适于作为 β 射綫的屏蔽物，特别是对于高能量的 β 輻射更不适宜。因为它们較易引起穿透力强的倫琴射綫（軀致輻射）。

电子在核的电場（庫侖場）中受阻止时所失去的能量就轉換成軀致倫琴射綫（相当于在倫琴管中的倫琴輻射过程）。在低能量时这种过程仅仅損失总能量的一小部分，因为此时电子損失于电离的能量比損失于輻射的能量要大得多。然而，高能量的 β 射綫通过重的物质时，可能以輻射的形式損失很大部分的能量，因为此时能量損失是随着 β 粒子本身的动能 E 以及受照射物质的原子序数的平方 (Z^2) 綫性地增加，即

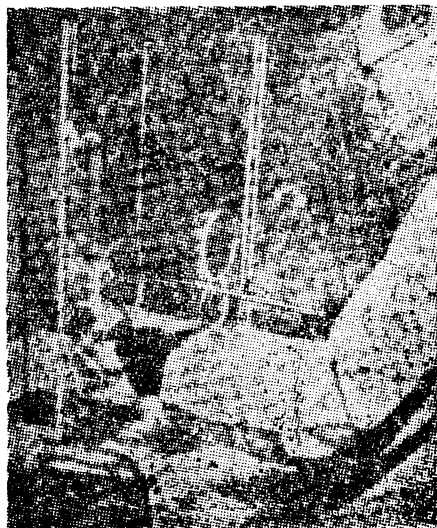


图 2—7a 操作100 毫居里P³²时
β射线的防护

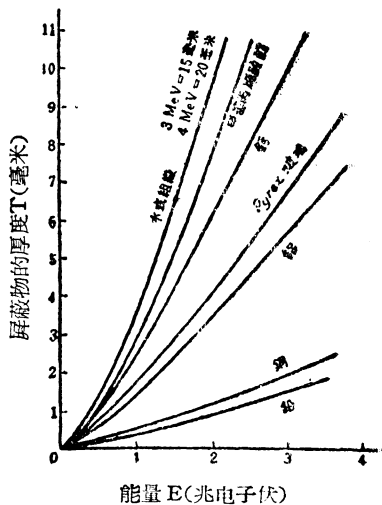


图 2—7b 决定 β 射线屏蔽物
的厚度图

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{辐射}} \sim \frac{NZ^2E}{m_0^2}, \quad (2-3)$$

这里 m_0 为运动粒子的静质量，即电子的静质量； N 为放射出的 β 粒子数。在一般情况下，光子的能量即是电子损失的能量；而轫致辐射的产额在高能 β 粒子入射到铅（原子序数很大）中的几率是很大很大的，这就是一般不宜用铅来防护 β 射线特别是高能 β 射线的原因。如果对能量较低的 β 射线仍要用铅来屏蔽的话，那么必需有足够的厚度来减弱次级伦琴射线的穿透能力。

实际上，计算电子的能量转变成轫致辐射的份数是常常应用康普敦的经验公式的，所得到的数值比理论值稍大一些：

$$F = 1.1 \times 10^{-3} Z_0. \quad (2-4)$$

如果已知放射性强度，还可以算出单位时间内所产生的轫致辐射的 γ 光子数：

$$N_\gamma = FI, \quad (2-5)$$

这里 Z 为被照射的物质的原子序数； ε 为入射的 β 粒子的能量（兆电

子伏)； I 为放射性强度(居里)。

这样，再计算其剂量率就很容易了。

一般的 β 放射性物质放在带有磨口塞的玻璃瓶或安瓿瓶中，外加一厚度为几个毫米到10毫米厚的硬铝合金套。其间再垫一些棉絮和软的吸水纸。但当放射性很大时，引起的伦琴射线是很危险的，必须将此容器放在铁柜中，加以防护。如果伴随 β 而又放出 γ 的，则在防护 β 射线的防护层外面，再加以适当厚度的铅罐或水泥罐。在应用放射性强度大的 β 辐射源时，除了要注意加以屏蔽外还要特别注意不要让手或其他部位直接暴露在沒有屏蔽的部分(例如容器的顶部)，更不要用眼睛去直接观察。因为在这种情况下，短时间的暴露往往可以使我們接受极大的剂量，特别是在周围有屏蔽的情况下。因为由于 β 射线散射等，以致在有屏蔽部位的辐射强度要比当周围沒有屏蔽时还要高些。故在这样的情况下，最好用镊子操作以避免直接照射，同时带上护目镜来观察为最安全。

剂量计算。求1毫居里 P^{32} 的 β 射线在1米距离处的剂率。查表知其最大能量为1.171兆电子伏。

解：1毫居里的放射源每秒放出的 β 数为

$$3.7 \times 10^{10} \times 10^{-3} = 3.7 \times 10^7 / \text{秒},$$

1米处每厘米²上的 β 数是

$$\frac{3.7 \times 10^7}{4\pi(100)^2} = 2.95 \times 10^2 / \text{秒} \cdot \text{厘米}^2,$$

每厘米²上的能量流是

$$\begin{aligned} 2.95 \times 10^2 \times 0.695 &= 205 \text{ 兆电子伏/秒} \cdot \text{厘米}^2 \\ &= 3.28 \times 10^{-4} \text{ 尔格/秒} \cdot \text{厘米}^2, \end{aligned}$$

$$1 \text{ 百万电子伏} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ 尔格}$$

(0.695为 β 的平均能量，这数据可以在表上查得，也可用最大能量的40%代替它)。

若组织的密度为1，则每克组织中平均能耗量为

$$\frac{3.28 \times 10^{-4} \text{ 尔格/秒} \cdot \text{厘米}^2}{0.8 \text{ 厘米}} \times 1 \text{ 厘米}^3 / \text{克} = 4.1 \times 10^{-4} \text{ 尔格/克} \cdot \text{秒}$$

(0.8 厘米系該种 β 在組織內的射程，它可以在表上查到，也可以从該 β 在其他物质中的射程来近似地換算，換算公式：

$$d_1 = \frac{d_2 \rho_2}{\rho_1}, \quad (2-6)$$

ρ 为密度， d 为最大射程)。还有一种近似算法是：

$$\text{組織內 } \beta \text{ 射程(厘米)} = \frac{\beta \text{ 最大能量 (兆电子伏)}}{2}.$$

根据物理当量倫的定义：凡給予生物組織以 93 尔格/克能量的剂量叫一个物理当量倫。故可以求出剂量率：

$$\begin{aligned} \text{剂量率} &= \frac{4.1 \times 10^{-4} \text{ 尔格/克} \cdot \text{秒}}{93 \text{ 尔格/克/物理当量倫}} = 4.4 \times 10^{-6} \text{ 物理当量倫/秒} \\ &= 16 \text{ 毫物理当量倫/小时。} \end{aligned}$$

下面介紹一些表格数据，供計算和考虑防护問題参考。

表 2-3 几种 β 輻射源的某些特性

元 素	半 衰 期	每一克的 放 射 性 Q, 居里	β 射綫的 最大能量 E_{β} 兆电子伏	平均能量 \bar{E}_{β} 兆电子伏	最大射程 R_{β} (在 Al 中) 毫克/厘米 ²	半減弱层 $\Delta \frac{1}{2}$ 毫克/厘米 ²	每次蜕变 产生該质 点的百分 率, %
H ³	12.46 年	$9.55 \cdot 10^3$	0.019	0.006	0.62	0.28	100
C ¹⁴	55.68 年	4.58	0.155	0.053	3.4	2.6	~100
Na ²⁴	15.06 小时	$8.58 \cdot 10^7$	1.39	0.55	$6.0 \cdot 10^2$	88	~100
			4.17	1.92	$2.1 \cdot 10^3$	288	~ 0.003
Mg ²⁸	21.2 小时	$5.22 \cdot 10^7$	0.418	0.15	$1.3 \cdot 10^2$	12.8	100
P ³²	14.3 天	$2.84 \cdot 10^6$	1.708	0.68	$8.0 \cdot 10^2$	115	100
S ³⁵	87.1 天	$4.26 \cdot 10^4$	0.169	0.056	32	3.0	100
K ⁴⁰	$1.42 \cdot 10^9$ 年	$6.28 \cdot 10^6$	1.325	0.51	$5.8 \cdot 10^2$	81	100
K ⁴²	12.44 小时	$5.93 \cdot 10^7$	2.09	0.89	$1.0 \cdot 10^3$	143	25
			3.58	1.61	$1.7 \cdot 10^3$	249	75
Ca ⁴⁴	152 天	$1.90 \cdot 10^4$	0.254	0.084	57	5.5	100
Sc ⁴⁶	85 天	$3.32 \cdot 10^4$	0.34	0.11	96	8.6	99.5
			1.2	0.46	$5.0 \cdot 10^2$	70	0.5
Ti ⁵¹	5.82 分钟	$6.33 \cdot 10^8$	1.9	0.80	$9.0 \cdot 10^2$	130	70
			2.2	0.92	$1.1 \cdot 10^3$	150	30
V ⁴⁸	16 天	$1.70 \cdot 10^5$	0.69	0.26	$2.5 \cdot 10^2$	29	95
			0.80	0.30	$3.0 \cdot 10^2$	38	5

表 2-3 (續)

元 素	半 衰 期	每一克的 放 射 性 Q, 居 里	β 射綫的 最大能量 E_{β} 兆电子伏	平均能量 \bar{E}_{β} 兆电子伏	最大射程 R_{β} (在Al中) 毫米/厘米 ²	減半弱层 $A_{\frac{1}{2}}$ 毫克/厘米 ²	每次嬗变 产生該质 点的百分 率, %
Mn ⁵²	6 天	4.17 · 10 ⁵	0.58	0.21	2.0 · 10 ²	22.5	35
Fe ⁵⁹	45.1 天	4.88 · 10 ⁴	0.46	0.16	1.4 · 10 ²	15.1	50
			0.257	0.082	60	5.5	50
Co ⁶⁰	5.3 年	1.13 · 10 ³	0.306	0.098	80	7.3	100
Cu ⁶¹	12.8 小时	3.78 · 10 ⁷	0.57	0.19	1.9 · 10 ²	21.8	100
Zn ⁶⁶	250 天	8.00 · 10 ³	0.325	0.10	90	8.0	2.5
As ⁷⁶	26.8 小时	1.52 · 10 ⁷	1.29	0.48	70	78	15
			2.49	1.04	1.2 · 10 ³	175	25
			30.4	1.28	1.5 · 10 ³	212	60
Br ⁸²	35.9 小时	1.05 · 10 ⁷	0.465	0.14	1.3 · 10 ²	15.5	100
Sr ⁸⁹	53 天	2.76 · 10 ⁴	1.5	0.57	6.9 · 10 ²	97	100
Sr ⁹⁰	19.9 年	2.00 · 10 ²	0.61	0.20	2.1 · 10 ²	24.4	100
Y ⁹⁰	61 小时	5.70 · 10 ²	2.18	0.89	1.1 · 10 ³	150	100
Y ⁹¹	61 天	2.30 · 10 ⁴	1.54	0.60	8.0 · 10 ²	103	100
Zr ⁹⁵	65 天	2.11 · 10 ⁴	0.371	0.16	96	10	99
			0.84	0.30	3.2 · 10 ²	40	1
Nb ⁹⁵	35 天	3.93 · 10 ⁴	0.16	0.046	30	2.8	100
Ru ¹⁰³	39.8 天	3.18 · 10 ⁴	0.217	0.065	46	4.2	99
			0.698	0.22	2.5 · 10 ²	29.5	1
Ru ¹⁰⁶	306 天	3.40 · 10 ³	0.039	0.011	2.5	0.6	100
Rh ¹⁰⁶	30 秒	3.55 · 10 ⁹	2.0	0.80	9.2 · 10 ²	140	3
			2.44	1.00	1.2 · 10 ³	170	12
			3.1	1.30	1.5 · 10 ³	218	11
			3.53	1.55	1.8 · 10 ³	244	68
Ag ^{110m} + + Ag ¹¹⁰	270 天	4.40 · 10 ³	0.087	0.023	11	4.2	58
			0.530	0.17	7.7 · 10 ²	19	35
			2.120	0.85	1.0 · 10 ³	147	3
			2.86	1.20	1.4 · 10 ³	200	3
Ag ¹¹¹	7.6 天	1.54 · 10 ⁵	0.700	0.23	2.6 · 10 ²	30.3	8
			0.800	0.27	3.0 · 10 ²	37.4	1
			1.040	0.37	4.2 · 10 ²	56	91
Sn ^{123m}	136 天	7.80 · 10 ³	1.42	0.52	6.2 · 10 ²	90	100
Sb ¹²⁷	3.95 天	2.59 · 10 ⁵	0.8	0.27	3.0 · 10 ²	37.4	100

表 2—3 (續)

元 素	半 衰 期	每一克的 放 射 性 Q, 居 里	β 射綫的 最大能量 E_{β} 兆电子伏	平均能量 \bar{E}_{β} 兆电子伏	最大射程 R_{β} (在Al中) 毫克/厘米 ²	半減層 Δz 毫克/厘米 ²	每次變 生該質 点的百分 率, %
I ¹³¹	8.14 天	1.22 · 10 ⁶	0.250	0.070	59	4.6	2.8
			0.335	0.097	90	8.2	9.3
			0.608	0.19	2.1 · 10 ²	24.5	87.2
			0.812	0.27	3.1 · 10 ²	38	0.7
Cs ¹³⁴	2.3 年	1.16 · 10 ³	0.090	0.024	12	4.5	25
			0.648	0.20	2.2 · 10 ²	26	75
Cs ¹³⁷	2.66 年	98	0.523	0.16	1.7 · 10 ²	18.9	92
			1.18	0.40	4.8 · 10 ²	68	8
Ba ¹⁴⁰	12.8 天	7.25 · 10 ⁴	0.480	0.14	1.5 · 10 ²	16.3	40
			1.022	0.35	1.4 · 10 ²	55	60
La ¹⁴⁰	40 小时	5.59 · 10 ⁶	1.32	0.46	5.6 · 10 ²	80	70
			1.67	0.62	7.2 · 10 ²	114	26
			2.26	0.88	1.2 · 10 ³	156	10
Ce ¹⁴¹	33.1 天	2.80 · 10 ⁴	0.442	0.13	1.4 · 10 ³	14.7	67
			0.581	0.18	1.9 · 10 ²	22.6	33
Ce ¹⁴⁴	282 天	3.20 · 10 ³	0.300	0.084	76	7.0	70
			0.170	0.046	30	3.0	30
Pr ¹⁴⁴	17.5 分钟	7.46 · 10 ⁷	2.32	0.90	1.2 · 10 ³	160	1
			2.97	1.22	1.9 · 10 ³	207	98
Nd ¹⁴⁷	11.3 天	7.83 · 10 ⁴	0.38	0.042	1.1 · 10 ²	10.6	25
			0.60	0.19	2.0 · 10 ²	23.8	15
			0.83	0.27	3.2 · 10 ²	40	60
Eu ¹⁵⁶	15.4 天	5.41 · 10 ⁴	0.5	0.15	1.6 · 10 ²	17.5	60
			2.4	0.96	1.2 · 10 ³	167	40
Tu ¹⁷⁰	129 天	5.93 · 10 ³	0.884	0.29	3.5 · 10 ²	43	24
			0.968	0.32	3.8 · 10 ²	50	76
Au ¹⁹⁸	2.69 天	2.45 · 10 ⁵	0.290	0.084	74	6.6	1.7
			0.957	0.32	3.8 · 10 ²	50	98.3
			1.381	0.48	5.6 · 10 ²	87	0.01
Au ¹⁹⁹	3.15 天	2.08 · 10 ⁵	0.242	0.068	58	5.0	20
			0.293	0.082	70	6.6	73
			0.450	0.14	1.4 · 10 ²	14.5	7
Hg ²⁰³	47.9 天	1.34 · 10 ⁴	0.208	0.058	42	4.2	100

表 2-4 几种物质的密度

材 料	密 度 (克/厘米 ³)	材 料	密 度 (克/厘米 ³)	材 料	密 度 (克/厘米 ³)	材 料	密 度 (克/厘米 ³)
铝	2.7	铜	7.1—7.9	铜	8.9	石英	2.21
混凝土	2.2—2.35	铁	7.89	铅	11.3	橡皮	0.91—0.93
纸	0.7—1.1	皮肤	0.85—0.1	玻璃	2.4—2.6	硬橡皮	1.8
空气	0.001293	骨	1.8—2.0	石墨	2.3	塑料	1.4

表 2-5 β 粒子的最大射程 R_{β}

β 粒子的最大 能量 R_{β} (兆电子伏)	铝		组织或水	空 气
	R_{β} (毫克/厘米 ²)	R_{β} (毫米)	R_{β} (毫米)	R_{β} (厘米)
0.01	0.16	0.0006	0.002	0.13
0.02	0.70	0.0026	0.008	0.52
0.03	1.5	0.0056	0.018	1.12
0.04	2.6	0.0096	0.030	1.94
0.05	3.9	0.0144	0.046	2.91
0.06	5.4	0.0200	0.063	4.03
0.07	7.1	0.0263	0.083	5.29
0.08	9.3	0.0344	0.109	6.93
0.09	11	0.0407	0.129	8.20
0.1	14	0.0500	0.158	10.1
0.2	42	0.155	0.491	31.3
0.3	76	0.231	0.889	56.7
0.4	115	0.426	1.35	85.7
0.5	160	0.593	1.87	119
0.6	220	0.778	2.46	157
0.7	250	0.926	2.92	186
0.8	310	1.15	3.63	231
0.9	350	1.30	4.10	261
1.0	410	1.52	4.80	306
1.25	540	2.02	6.32	406
1.50	670	2.47	7.80	494
1.75	800	3.01	9.50	610
2.0	950	3.51	11.1	710

表 2—5 (續)

β 粒子的最大 能量 E_{β} (兆电子伏)	鋁		組織或水	空 气
	R_{β} (毫克/厘米 ²)	R_{β} (毫米)	R_{β} (毫米)	R_{β} (厘米)
2.5	1220	4.52	14.3	1910
3.0	1500	5.50	17.4	1100
3.5	1750	6.48	20.4	1300
4.0	2000	7.46	23.6	1500
4.5	2280	8.44	26.7	1700
5	2540	9.42	29.8	1900
6	3080	11.4	36.0	2300
7	3600	13.3	42.2	2700
8	4140	15.3	48.4	3100
9	4650	17.3	54.6	3500
10	5200	19.2	60.8	3900
12	6250	23.2	73.2	4700
14	7300	27.1	85.6	5400
16	8400	31.0	98.0	6200
18	9500	35.0	110	7000
20	10500	39.0	123	7800

其他象 β 射綫在样品中的自吸收因素、 β 射綫在鋁中的减弱情况等均可由顾晒夫 (H. Г. Гусев) 著的放射性辐射及防护手册中查到。

(3) γ 射綫。下面将以一节的篇幅来叙述 γ 射綫的防护，此处不談了。

(4) 中子流。中子的危害是很大的，因为象前面 13—2 节 1 节中中子流所說的那樣，快中子的生物作用很大，此外，当快中子被慢化为热中子时，又能与很多的元素作用产生核反应，而大多数的核反应都放出很大能量的 γ 射綫，有时还产生反冲质子，就是由于这些原故，中子的防护問題是一个很严重的問題。

中子防护的問題归結起来实为快中子的减速和热中子的吸收的問題。但中子的穿透性质实际上决定于快中子的行为，而中子一經減慢，就可以认为已經离开了中子的射綫束了。中子的穿透本领实质上只是由起始綫束中最硬的組份来决定的，这組份那怕是只占有中子

数的一小部分。

(i) 中子防护的一般原则：

① 减速剂的选择。最好的中子减速剂是轻元素。因为减速作用主要是源于碰撞。中子与原子核的弹性碰撞会引起中子运动方向的改变和中子的一部分能量的损失(传给原子核)。由能量、动量守恒定律出发,可以证明与中子运动方向成 θ 角的方向射出的质量为 M 的反冲核能量可以写成:

$$E_{\text{反冲核}} = E_{\text{中子}} \frac{4Mm}{(M+m)^2} \cos^2\theta = \alpha E_{\text{中子}} \cos^2\theta,$$

其中 m 为中子的质量。设 $m=1, M=A$, 那么,

$$\alpha = \frac{4A}{(A+1)^2}.$$

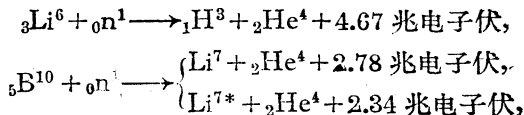
给原子核的能量愈大,则中子慢化就愈快。要原子核得到的能量大的话,在等同的 θ 角,同一中子能量 $E_{\text{中子}}$ 时,就要求 α 值大起来才能达到。而要求 α 值大就要求 A 值小。现在就很明显了,从一次碰撞中子能量损失的观点来看,比较好的减速剂是轻元素,其中最好的是氢。故一般用效果又好、也很便宜的水、石蜡等作为防护用中子的慢化剂。

② 吸收剂的选择。对吸收剂的要求是在捕获吸收中子时放出来的粒子能量要小,而且最好是易于被阻止、被吸收的。但大部分场合中当捕获中子时所放出的能量均为 6 兆电子伏左右的 γ 光子。如表 2—6 所示。

表 2—6 在 (n, γ) 核反应时所放出的 γ 光子的能量

元 素	H	Be	C	Na	Al	Fe	Cl	Pb ²⁰⁶	Pb ²⁰⁷
γ 光子能量(兆电子伏)	2.2	6.8	4.9	6.3	7.7	7.6	7.5	6.7	7.4

这样,就需要另加防护层来防护 γ 了,所以不能用。只有 Li, B 等很符合上述要求。它们与中子的核反应是:



鋰并不放出 γ 射綫。硼在 95% 的捕获中給出 0.5 兆电子伏的軟 γ 射綫，但是很容易被吸收掉。由表 12—6 看来，氫也是比較好的吸收剂（但較鋰、硼差得多）。一般常用的吸收剂是硼酸水溶液。

很多情况下是将減速剂和吸收剂混在一起用。就硼酸水而言，实际上它具有氫和硼两种作用。也有人将石蜡中加入 20 克/公斤的硼酸，也就是希望它起这种作用。

(ii) 中子防护計算的复杂性。中子防护的計算不象計算 γ 射綫防护那样簡單精确。这是因为中子与防护材料的原子核的各种可能的相互作用的截面与中子的能量以及与防护材料的原子序数的关系都是很复杂的原故。中子防护的設計，不是說能以一个截面值再根据指数吸收公式进行計算就能解决問題的。实际上要使中子防护設計做得好，必須进行一些实地試驗。

(iii) 中子流的防护。作为不是在原子堆旁工作的人，平时最多是碰到已經做好的中子源。虽然中子源本身已經有一防护的箱子或外壳，但有时由于工作的必需要将中子源拿出来作一些实验。因此我們應該知道中子源是如何防护的。

① 純中子源。鈷-鈹中子源是在 (α, n) 反应中放出中子的，只有很少的 γ 射綫，故可以屬于这一类。其防护还是比較容易的。可以用石蜡或水来做防护层，在防护层里面外面均放一层含硼的物质以防止散漏。有些时候可以做成一块块摺有硼的石蜡或做成适当形状的装有硼 (B_2O_3) 的水溶液的金屬水箱，堆置成中子防护层。

中子源周圍有 8 吋的石蜡就可将大部分中子慢化为热中子，慢化过程不超过 0.001 秒。而防护层用 18 厘米至 20 厘米厚的含 20 克/公斤硼的石蜡来做就可以了。

② 不純中子源。在實踐中几乎任何时候也不会碰到純中子源（鈷-鈹中子源也不是純中子源，只不过因为它絕大多是放出中子，而 γ 射綫可以忽略的原故，才将它勉强地作为純中子源例子提出来）。在一般的中子源（鈾-鈹源，鐳-鈹源等等）中， γ 射綫常較中子流强烈得多，以致可以把中子劑量略去，故防护层的設計只要考虑到 γ 射綫所产生的劑量就可以了，因为在防护层中所含的足够的杂质就能够将

此不多的中子減速并把它們吸收掉。

如果有这样一种中子源，它的中子流也很密（即很强），同时放出的 γ 射綫也很强烈，其防护是值得很好研究的。因为作为中子的很好的防护材料（輕元素的）那就不能減弱和防护 γ 射綫；反之亦然。是不是可以将重元素和水拌混放置或将重、輕元素的材料分层間隔放置？到目前为止认为这只能从实验上来解决：从具体条件出发，了解源的几何形状、放出的中子和 γ 的流量及其能譜成分、以及所提出的防护要求进行设计的。但可以指出，如果拌混放置的防护有足够的厚度或相隔放置每一层都有足够的厚度，特别是外层重元素层加至足够的厚度时（不应只是两层，而是应由几层交叉排列起来。如果只有两层，当 γ 防护层在内，而中子防护层在外时，那么中子将穿过内层而在外层产生捕获 γ 射綫，但外层不能吸收，故会给出非常高的剂量，当中子防护层在内，而 γ 防护层在外时，则外层中放出来的光中子就可能在防护层后面给出很高的中子剂量。这都是很不好的），则不管是中子或 γ 射綫都能被吸收掉。

(iv) 中子流强度減弱和剂量的計算。

① 能量为 1 兆电子伏，强度为 10^{15} 中子/厘米²·秒的和能量为 10 兆电子伏，强度为 10^6 中子/厘米²·秒的两束平直中子輻射到厚度为 100 厘米的水层上，其穿过水层后的射綫束强度如何？

我們知道在 1 厘米³ 水中氫核的数目 $n_{\text{H}} = 6.7 \times 10^{22}$ ；氧核的数目 $n_{\text{O}} = 3.35 \times 10^{22}$ ，对于能量为 1 兆电子伏的中子总截面 $\sigma_{\text{H}} = 4.2 \times 10^{-24}$ 厘米²， $\sigma_{\text{O}} = 8.0 \times 10^{-24}$ 厘米²，对于 10 兆电子伏的中子总截面 $\sigma_{\text{H}} = 0.95 \times 10^{-24}$ 厘米²， $\sigma_{\text{O}} = 15 \times 10^{-24}$ 厘米²。

故对于能量为 1 兆电子伏的中子，經吸收后，其强度为

$$\begin{aligned} I &= I_0 e^{-\Sigma_j \sigma_j n_j x} \\ &= 10^{15} e^{-54.9} \approx 0. \end{aligned}$$

对于能量为 10 兆电子伏的中子，經吸收后，其强度为

$$I = 10^6 e^{-11.4} = 11 \text{ 中子/厘米}^2 \cdot \text{秒}。$$

由此看出，防护层后面的中子剂量只是由能量大的組份来决定，尽管它在起始輻射中占的比例是 1:10⁹。

②大家知道，做得很好的 Ra-Be 中子源的中子产量是每克 Ra 约可放出 10^7 个中子，求 300 毫克 Ra 在 1 米远处的中子和 γ 射线所产生的剂量率。

假定中子的产量是 3×10^6 中子/厘米²·秒，在相距 1 米处，中子流的密度是

$$n_{\text{中子}} = \frac{N_{\text{中子}}}{4\pi R^2} = \frac{3 \times 10^6}{4\pi \times 100^2} = 24 \text{ 中子/厘米}^2 \cdot \text{秒}.$$

在相距同样远的地方 γ 射线的剂量率：

$$p = 0.23 \frac{m}{R^2} = 0.23 \times \frac{300}{1} = 69 \text{ 微伦/秒}.$$

由此例中可以看出，防护 γ 射线是主要的任务。至于中子则在防护 γ 射线后，就没有问题了。

③钋-铍中子源每秒钟放出平均能量为 4 兆电子伏的中子 10^6 个，求为了把石蜡球外表面上的快中子强度降低到 100 中子/厘米²·秒所必须的石蜡球的半径。

由中子截面的表我们找到，在中子能量为 4 兆电子伏时与氢作用的截面为 2 巴恩，与碳作用的截面为 2 巴恩。因为石蜡的密度为 0.89 克/厘米³，化学式为 CH_2 ，分子量为 14，故 1 厘米³ 石蜡中 CH_2 基的数目为：

$$n_{\text{CH}_2} = \frac{0.89 \times 6.023 \times 10^{23}}{14} = 3.83 \times 10^{22} \text{ CH}_2 \text{ 基/厘米}^3.$$

由点源公式可得到

$$\begin{aligned} n_{\text{中子}} &= \frac{N}{4\pi R^2} \times e^{-\sum \sigma_i n_i R} \\ &= \frac{10}{4\pi R^2} e^{-0.23R} \end{aligned}$$

解此方程式，得 $R = 9.5$ 厘米。厚而且含硼的石蜡球就可达到要求了。

快中子在圆柱形石蜡和水的容器中的减弱情况如图 2-8。

除了 α , β , γ , 中子外其他象原子反应堆。各种类型的加速器的防护更是极其重要的。

对于原子堆本身的防护设计问题，此处不必详述，但作为我们有

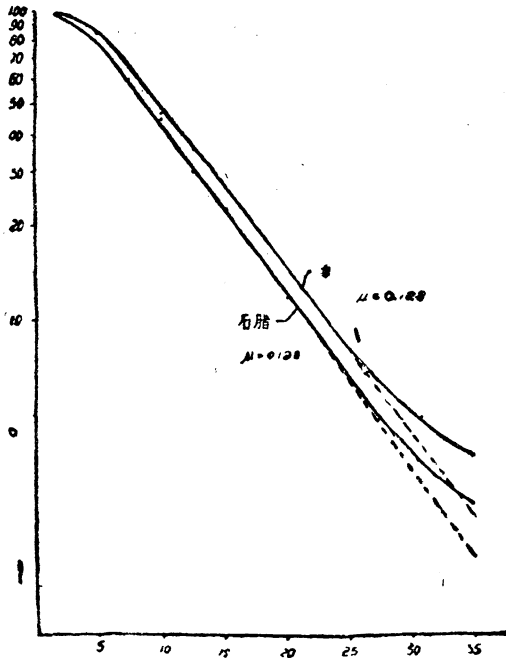


图 2—8 在圆柱形石蜡和水的盛器中快中子的减弱

可能在原子堆旁作实验的同志来说，倒是应该知道进行实验的安全措施。这里所指的安全措施主要是设置防护屏或使实验者远离原子堆，或把放射源停置足够长的时间以后减少其放射强度而后再操作。但在许多情况下都是采用前面一个方法，后一个方法是做不到的。要由反应堆中移出中子束来时，常由装置在反应堆防护层中的准直管引出来，这样做可以使散射辐射不致穿透到工作室里来。有时为了遮住中子流同时还不至于产生散射，就采用专门准备的“射线束捕集器”（外层为 Pb，中层为含硼的石蜡，内层为 LiF 的瓶状器皿）来收集。

对于加速器的防护，应考虑到它的类型、被加速粒子的最大能量、希望用它来得到什么辐射（带电粒子、中子、 γ 射线）以及用它来解决什么研究任务等因素，以个别进行防护设计。有关加速器防护的详细内容，希参考专门著作。

§2—4. γ 射线的防护 γ 射线的防护是很重要的。因为 γ 射线具有

极大的穿透能力，能量大至几兆电子伏，如沒有防护，能輻射到很远。同时 γ 射綫的間接电离作用是比較均匀的，对人体来說很容易引起內部病症和伤害眼睛。而且在工业上和實驗室里最常用的放射性同位素都是 γ 輻射性。故它的防护問題不仅重要，而且是經常碰到的問題。 γ 射綫与物质的作用：0.06 兆电子伏以下的，以光电效应为主；0.06—0.09 兆电子伏，其光电、康普敦效应具有相同的作用；0.2—2 兆电子伏，以康普敦效应为主；2 兆电子伏以上，电子偶效应显著。

γ 射綫的防护原則，§ 2—3 中 2 段所提到的几点都能应用。此处再就剂量防护的計算作一些介紹。

1. 关于計算的正确性 應該提出，欧美的文獻上曾流行的关于 γ 射綫的防护計算是在存着一些缺陷的，如有一些表（所謂格氏表或格米尔德費尔特表）曾將一些讀者引入迷途。它的缺陷在于它的根据是細束的 γ 射綫的衰减規律，而不是寬束的。实际上我們碰到的大多是寬束的情况，这样就将防护层中发生的多次散射的复杂而且重要的过程輕輕放过。此外，該表中源的 γ 放射性不是用通用的放射性单位克錒当量来表示，而是用居里为单位，实际上就忽略了能量这一因素。故所得出来的結論即所需要的防护层厚度也是錯的。

下面所用的計算方法和所采用的表格是經過全面考虑的，因而是正确的。这些表格是馬尔夏克(Marshak)、維克(Wick)、彼契(Betch)、斯本塞尔(Spencer)和法諾(Fano)等人根据气体运动学的方程式充分地研究了解决关于輻射穿透方面(尤其是 γ 射綫穿透物质这方面)的問題所作出的貢獻。到現在为止，对起始能量为 0.5—10 兆电子伏的源以及穿透厚度由距离源 1—20 个自由射程的情况的計算已經完成(超过此范围的还不准确)。

表 2—7 是描述寬束 γ 射綫在水、鋁、铁和鉛中多次散射而引起防护层后物理剂量率增长的因素。如果沒有防护时，其剂量率为 P_1 ，则加以防护层后（不考虑多次散射的問題）的剂量率应为 $P = P_0 f(h\nu, g, Z)$ 。 $f(h\nu, g, Z)$ 就是只考虑了防护层的原子序数 Z ，射綫的几何形状 g ，以及 γ 射綫本身的能量 $h\nu$ 的 γ 射綫在物质中的减弱規律。如果考虑了多次散射的增长因素，则为 $P = P_0 f(h\nu, g, Z) B(h\nu, x, Z)$ 。

$B(h\nu, x, Z)$ 即是增长因素, 是将来计算时的指数前的一个乘数, 它与 γ 能量防护物质原子序有关, 同时还与自由射程 D 有关。

表中 μ_0 是防护物质的线性减弱系数, x 为防护层厚度。

例如求由平面平行源放出的能量为 1 兆电子伏的初级 γ 射线束被厚度为 14.5 厘米的铁屏 ($\mu_0 = 0.47 \text{ 厘米}^{-1}$) 减弱的倍数, 在不考虑多次散射时将为

$$k = \frac{I_0}{I} = \sigma^{\mu_0 x} = e^7 = 1096.$$

表 2-7 考虑了防护层中宽束的 γ 射线的多次散射而引起物理剂量率增长的特征因素
水

射线的能量 $h\nu$ (兆电子伏)	$D = \mu_0 x$					
	1	2	4	7	10	15
0.256	3.09	7.14	23.0	72.9	166	455
0.5	2.52	5.14	14.3	38.8	77.6	178
1	2.08	3.50	7.21	14.6	24.0	44.7
2	1.83	2.77	4.88	8.46	12.4	19.5
3	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.8
4	1.58	2.17	3.34	5.12	6.94	9.97
6	1.46	1.91	2.80	4.08	5.33	7.34
8	1.39	1.77	2.49	3.51	4.50	6.05
10	1.32	1.63	2.22	3.04	3.82	5.07

铝

射线的能量 $h\nu$ (兆电子伏)	$D = \mu_0 x$					
	2	4	7	10	15	20
0.5	4.24	9.47	21.5	38.9	80.8	141
1	3.31	6.57	13.1	21.2	37.9	58.5
2	2.61	4.62	8.05	11.9	18.7	26.3
3	2.32	3.78	6.15	8.65	13.0	17.7
4	2.08	3.22	5.01	6.88	10.1	13.4
6	1.85	2.70	4.06	5.49	7.96	10.4
8	1.68	2.37	3.45	4.58	6.56	8.52
10	1.55	2.12	3.01	3.96	5.63	7.32

表 2—7 (續)

铁

射线的能量 $h\nu$ (兆电子伏)	$D = \mu \cdot x$					
	2	4	7	10	15	20
0.5	3.09	5.98	11.73	19.23	35.42	55.6
1	2.88	5.39	10.21	16.18	28.31	42.7
2	2.38	4.08	6.99	10.47	16.83	24.0
3	2.12	3.44	5.74	8.35	13.25	18.8
4	1.94	3.03	4.91	7.11	11.23	16.6
6	1.72	2.58	4.14	6.02	9.89	14.7
8	1.56	2.23	3.49	5.07	8.50	13.0
10	1.42	1.95	2.98	4.35	7.54	12.4

鉛

射线的能量 $h\nu$ (兆电子伏)	$D = \mu \cdot x$				
	2	4	7	10	15
0.5	1.42	1.69	2.00	2.27	2.65
1	1.69	2.26	3.02	3.74	4.81
2	1.76	2.51	3.66	4.84	6.86
3	1.68	2.43	3.75	5.30	8.44
4	1.56	2.25	3.61	5.44	9.80
5.11	1.46	2.08	3.44	5.55	11.74
6	1.40	1.97	3.34	5.69	13.80
8	1.30	1.74	2.89	5.07	14.05
10	1.23	1.58	2.52	4.34	12.54

但考虑了多次散射，则为

$$k = \frac{I_0}{I} = \frac{e^{\mu_0 x}}{B(h\nu, x, Z)} = \frac{e^7}{10.21} \sim 100。$$

这两个结果几乎相差 10 倍，可见多次散射的考虑是多么重要。

下面介绍的表 2—8 是几种材料对窄束 γ 射线的线性减弱系数表，以供计算时应用。

由于其它一些原因，物理剂量的增长因素还会在存一定的不精确性，但其结果与实验数据的差别仍不会超过 5—10%（在确定屏的厚度方面）。在低能量（小于 0.5 兆电子伏）以及厚度很小时（小于 1—2

表 2—8 几种材料对窄束 γ 射线束的线性减弱系数

辐射能量 (兆电子伏)	铅 $\rho=11.34$ (克/厘米 ³)	生铁 $\rho=7.2$ (克/厘米 ³)	铝 $\rho=2.7$ (克/厘米 ³)	水泥 $\rho=2.3$ (克/厘米 ³)	水 $\rho=1.0$ (克/厘米 ³)	铁 $\rho=7.89$ (克/厘米 ³)
0.1	60.0	2.57	0.444	0.378	0.171	2.82
0.125	35.0	1.78	0.388	0.330	0.159	1.95
0.15	24.4	1.44	0.362	0.308	0.151	1.58
0.175	15.4	1.16	0.336	0.286	0.143	1.27
0.2	11.8	1.03	0.323	0.275	0.137	1.13
0.25	6.58	0.86	0.296	0.252	0.127	0.94
0.3	4.76	0.78	0.278	0.236	0.119	0.85
0.35	3.31	0.71	0.265	0.226	0.112	0.78
0.4	2.51	0.67	0.251	0.214	0.106	0.73
0.5	1.72	0.60	0.228	0.194	0.0967	0.66
0.6	1.37	0.55	0.210	0.179	0.0994	0.60
0.7	1.12	0.51	0.196	0.167	0.0835	0.56
0.8	0.99	0.47	0.184	0.156	0.0786	0.52
0.9	0.86	0.46	0.176	0.150	0.0743	0.50
1.0	0.79	0.43	0.166	0.141	0.0706	0.47
1.1	0.72	0.41	0.158	0.134	0.0673	0.45
1.2	0.68	0.39	0.152	0.129	0.0644	0.43
1.3	0.64	0.37	0.146	0.124	0.0620	0.41
1.4	0.60	0.36	0.141	0.120	0.0597	0.40
1.5	0.58	0.35	0.137	0.116	0.0576	0.38
1.6	0.55	0.34	0.131	0.111	0.0555	0.37
1.7	0.54	0.33	0.128	0.109	0.0538	0.36
1.8	0.53	0.32	0.124	0.106	0.0521	0.35
1.9	0.52	0.31	0.120	0.102	0.0507	0.34
2.0	0.51	0.30	0.117	0.100	0.0493	0.33
2.5	0.48	0.28	0.106	0.090	0.0433	
3.0	0.46	0.26	0.094	0.080	0.0396	
4.0	0.47	0.24	0.084	0.071	0.0339	
5.0	0.49	0.23	0.075	0.064	0.0302	
6.0	0.51	0.22	0.072	0.061	0.0277	
7	0.53	0.24	0.070	0.060	0.0256	
8	0.55	0.23	0.068	0.058	0.0242	
9	0.58	0.23	0.063	0.054	0.0231	
10	0.60	0.23	0.062	0.053	0.0221	

自由射程)，精确度较小，但目前尚没有满意的理论。

此外目前已经根据法诺关于宽束 γ 射线衰减理论计算出对于铅、铁、水泥和水的万用表(见表 2—9, 表 2—10, 表 2—11, 表 2—12)。应该注意这里所说的减弱倍数是指自己根据不超过或所要求的剂量水平所需要的减弱倍数。剂量可以用物理剂量率表示。

表 2—9 寬束 γ 射綫在不同的減弱倍數 k 時鉛的厚度 (厚度以厘米表示: 鉛的密度 $\rho = 11.34$ 克/厘米³)

減弱倍數 k	γ 輻射的能量 ($h\nu$) (兆電子伏)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1.5	0.05	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8
2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.15	1.3
5	0.2	0.4	0.6	0.9	1.1	1.5	1.9	2.2	2.5	2.8
8	0.2	0.5	0.8	1.1	1.5	1.95	2.35	2.8	3.2	3.5
10	0.3	0.55	0.9	1.3	1.6	2.1	2.6	3.05	3.5	3.8
20	0.3	0.6	1.1	1.5	2.0	2.6	3.25	3.85	4.4	4.9
30	0.35	0.7	1.15	1.7	2.3	3.0	3.65	4.3	4.95	5.5
40	0.4	0.8	1.3	1.8	2.4	3.1	3.8	4.5	5.2	5.8
50	0.4	0.85	1.4	1.95	2.6	3.25	3.95	4.6	5.3	6.0
60	0.45	0.9	1.45	2.05	2.7	3.45	4.2	4.95	5.6	6.3
80	0.45	1.0	1.55	2.15	2.8	3.7	4.5	5.3	6.0	6.7
100	0.5	1.0	1.6	2.3	3.0	3.85	4.7	5.5	6.3	7.0
2×10^2	0.6	1.25	1.9	2.6	3.4	4.4	5.3	6.3	7.2	8.0
5×10^2	0.65	1.4	2.2	3.1	4.0	5.1	6.1	7.2	8.2	9.2
10^3	0.7	1.5	2.4	3.3	4.4	5.7	6.95	8.1	9.2	10.2
2×10^3	0.85	1.7	2.7	3.8	5.0	6.3	7.6	8.8	10.0	11.1
5×10^3	0.9	1.9	3.0	4.2	5.5	7.0	8.5	9.9	11.2	12.4
10^4	1.05	2.1	3.3	4.55	5.9	7.5	9.1	10.6	12.0	13.3
2×10^4	1.1	2.2	3.5	4.85	6.3	8.0	9.7	11.3	12.8	14.2
5×10^4	1.15	2.35	3.7	5.2	6.9	8.7	10.5	12.3	14.0	15.6
10^5	1.15	2.4	3.8	5.4	7.2	9.2	11.1	13.0	14.8	16.5
2×10^5	1.3	2.6	4.1	5.7	7.6	9.6	11.6	13.6	15.5	17.4
5×10^5	1.4	2.8	4.4	6.1	8.2	10.2	12.3	14.4	16.5	18.5
10^6	1.45	3.0	4.7	6.5	8.7	10.9	13.1	15.3	17.5	19.5
2×10^6	1.55	3.2	5.0	7.0	9.1	11.5	14.0	16.3	18.5	20.4
5×10^6	1.65	3.3	5.3	7.3	9.6	12.1	14.7	17.2	19.5	21.6
10^7	1.7	3.4	5.4	7.6	10.1	12.6	15.2	17.8	20.3	22.5

表 2—9 (續)

減弱倍數	γ 輻的能量 ($h\nu$) (兆电子伏)									
	1.25	1.5	1.75	2.0	2.2	3	4	6	8	10
1.5	0.95	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.0	0.9	0.9
2	1.5	1.7	1.85	2.0	2.0	2.1	2.0	1.6	1.5	1.35
5	3.4	3.8	4.1	4.3	4.4	4.6	4.5	3.8	3.3	3.0
8	4.2	4.8	5.25	5.5	5.7	5.9	5.8	5.0	4.3	3.8
10	4.5	5.1	5.6	5.9	6.1	6.5	6.4	5.5	4.9	4.2
20	5.8	6.6	7.2	7.6	7.8	8.3	8.2	7.1	6.3	5.6
30	6.5	7.3	8.0	8.5	8.8	9.3	9.2	8.0	7.2	6.3
40	6.85	7.8	8.6	9.1	9.4	10.0	9.9	8.7	7.8	6.8
50	7.2	8.2	9.0	9.6	10.0	10.6	10.5	9.2	8.3	7.3
60	7.5	8.6	9.5	10.1	10.4	11.0	10.9	9.7	8.7	7.7
80	8.0	9.2	10.1	10.7	11.1	11.7	11.6	10.4	9.4	8.2
100	8.45	9.65	10.6	11.3	11.7	12.2	12.1	10.9	9.9	8.7
2×10^2	9.65	11.1	12.2	12.9	13.4	14.0	13.8	12.6	11.4	10.2
5×10^2	11.3	12.9	14.2	15.0	15.4	16.3	16.1	14.9	13.3	11.9
10^3	12.3	14.1	15.5	16.5	17.0	18.0	17.8	16.5	15.1	13.3
2×10^3	13.5	15.4	16.8	17.9	18.5	19.7	19.5	18.1	16.6	14.8
5×10^3	14.9	17.0	18.6	19.8	20.5	21.9	21.7	20.3	18.5	16.6
10^4	16.1	18.3	20.1	21.3	22.1	23.5	23.4	22.0	22.1	18.0
2×10^4	17.2	19.5	21.4	22.7	23.5	25.1	25.0	23.6	21.7	19.5
5×10^4	18.8	21.4	23.3	24.7	25.5	27.3	27.2	25.8	23.7	21.5
10^5	20.1	22.7	24.7	26.2	27.0	28.9	28.9	27.5	25.3	22.9
2×10^5	21.3	24.1	26.1	27.6	28.5	30.5	30.5	29.2	25.9	24.3
5×10^5	22.3	25.4	27.8	29.5	30.4	32.7	32.7	31.4	28.0	26.3
10^6	23.5	26.8	29.2	31.0	32.0	34.3	34.4	33.0	30.4	27.7
2×10^6	24.4	27.8	30.5	32.4	33.5	36.0	36.1	34.6	32.0	29.2
5×10^6	26.2	29.7	32.3	34.3	35.5	38.1	38.3	36.8	34.0	31.1
10^7	27.5	31.2	33.9	35.8	37.0	39.7	39.9	38.4	35.5	32.5

表 2—10 寬束 γ 射綫在不同的減弱倍数 k 時鐵的厚度(厚度以厘米表示;
鐵的密度 $\rho = 7.89$ 克/厘米³)

減弱倍数 k	γ 輻射的能量($h\nu$)(兆電子伏)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1.5	0.5	0.9	1.2	1.4	1.6	1.7	1.85	2.0	2.05	2.1
2	0.7	1.2	1.7	2.2	2.5	2.7	2.9	3.1	3.2	3.3
5	1.4	2.5	3.4	4.1	4.8	5.1	5.5	5.7	6.1	6.4
8	1.7	3.1	4.2	5.1	5.8	6.3	6.7	7.1	7.5	7.8
10	1.9	3.5	4.6	5.6	6.3	6.8	7.3	7.7	8.1	8.5
20	2.3	4.3	5.7	6.8	7.7	8.3	8.8	9.4	9.8	10.3
30	2.4	4.5	6.2	7.5	8.5	9.2	9.8	10.4	10.9	11.4
40	2.5	4.8	6.6	8.0	9.1	9.8	10.5	11.1	11.7	12.2
50	2.9	5.2	7.1	8.4	9.5	10.3	11.0	11.6	12.2	12.7
60	3.1	5.6	7.5	8.8	9.8	10.7	11.4	12.1	12.7	13.2
80	3.2	5.9	7.7	9.2	10.4	11.2	12.0	12.7	13.4	14.0
100	3.4	6.1	8.1	9.6	10.8	11.7	12.5	13.2	13.9	14.5
2×10^2	4.2	7.0	9.1	10.7	12.0	13.1	14.0	14.8	15.6	16.3
5×10^2	4.4	7.7	10.1	12.0	13.7	14.9	16.0	17.0	17.9	18.7
10^3	4.5	8.2	11.0	13.2	15.0	16.3	17.5	18.6	19.6	20.5
2×10^3	4.9	9.0	11.1	14.4	16.2	17.7	19.0	20.2	21.2	22.2
5×10^3	5.6	10.1	13.4	15.8	17.7	19.3	20.7	22.0	23.2	24.3
10^4	6.8	11.5	14.7	17.1	19.0	20.7	22.3	23.6	24.9	26.0
2×10^4	8.0	12.9	16.0	18.3	20.2	21.9	23.4	24.8	26.3	27.6
2×10^4	8.6	13.8	17.0	19.6	21.8	23.6	25.2	26.9	28.4	29.9
10^5	10.0	15.8	18.2	20.8	23.0	24.9	26.7	28.4	30.0	31.5
2×10^5	11.3	15.9	19.3	21.8	24.1	26.1	28.1	29.9	31.6	33.3
5×10^5	12.0	16.9	20.4	23.2	25.6	27.8	29.9	31.8	33.6	35.4
10^6	12.8	17.9	21.4	24.2	26.7	28.9	31.2	33.3	35.2	37.0
2×10^6	13.5	18.9	22.1	25.0	27.7	30.3	32.7	34.8	36.8	38.7
5×10^6	14.5	19.4	23.2	26.5	29.3	32.2	34.6	36.7	38.8	40.9
10^7	15.0	20.3	24.3	27.6	30.5	33.2	35.8	38.1	40.2	42.4

表2-10 (續)

減弱倍數	γ 輻射的能量($h\nu$)(兆电子伏)									
	k	1.25	1.5	1.75	2.0	2.2	3	4	6	8
15.	2.15	2.2	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	2.9	2.4	2.0
2	3.45	3.6	3.8	3.9	4.1	4.4	4.5	4.6	4.0	3.4
5	6.9	7.4	7.8	8.1	8.3	8.9	9.4	9.6	9.0	8.0
8	8.5	9.1	9.6	10.1	10.3	11.2	11.6	12.1	11.2	10.4
10	9.3	10.0	10.6	11.0	11.4	12.2	12.6	13.2	12.4	11.4
20	11.3	12.2	13.0	13.6	14.1	15.3	15.9	16.6	16.0	15.0
30	12.6	13.6	14.4	15.1	15.6	17.0	17.7	18.8	18.0	17.0
40	13.3	14.4	15.3	16.1	16.6	18.2	19.1	20.4	19.4	18.4
50	13.9	15.1	16.1	16.9	17.5	19.1	20.0	21.5	20.6	19.6
60	14.5	15.7	16.7	17.6	18.2	19.9	21.0	22.4	21.4	20.6
80	15.5	16.3	17.8	18.7	19.4	21.2	22.2	24.0	23.0	22.0
100	16.1	17.3	18.5	19.5	20.2	22.1	23.3	25.0	24.0	23.1
2×10^2	18.0	19.6	20.8	22.0	22.8	25.0	26.6	28.4	27.4	26.6
5×10^2	20.6	22.3	23.7	25.0	25.9	28.8	30.6	32.7	32.0	31.2
10^3	22.6	24.4	26.1	27.5	28.6	31.7	33.7	36.0	35.4	34.6
2×10^3	24.5	26.5	28.3	30.0	31.2	34.6	36.8	39.2	38.7	37.9
5×10^3	27.0	29.4	31.4	33.3	34.3	38.2	40.7	43.2	43.0	42.2
10^4	28.8	31.3	33.6	35.5	36.9	40.9	43.7	46.5	46.3	45.2
2×10^4	30.6	33.2	35.6	37.8	39.2	43.4	46.5	50.8	49.6	48.6
5×10^4	33.0	35.9	38.4	40.8	42.3	47.2	50.4	55.0	54.0	53.0
10^5	34.9	38.0	40.7	43.2	44.7	50.0	53.4	58.3	57.2	56.1
2×10^5	36.8	40.1	43.0	45.4	47.1	52.6	56.4	61.8	60.8	59.8
5×10^5	39.1	42.5	45.5	48.3	49.9	56.1	60.2	66.0	65.0	64.0
10^6	41.1	44.7	47.8	50.6	52.3	58.8	63.3	69.0	68.3	67.0
2×10^6	42.9	46.6	49.9	52.8	54.7	61.4	66.2	72.3	71.2	70.3
5×10^6	45.5	49.4	52.7	55.7	57.7	64.9	70.3	76.5	75.5	74.8
10^7	47.1	51.3	54.8	57.9	60.1	67.5	73.1	79.4	78.8	78.0

表 2-11 寬束 γ 射線在不同的減弱倍數 k 時水泥的厚度(厚度以厘米表示)
水泥的密度 $\rho = 2.3$ 克/厘米³)

減弱倍數 k	γ 輻射的能量($h\nu$)(兆電子伏)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1.5	2.6	4.7	6.3	7.5	8.2	8.2	8.2	8.3	8.3	8.5
2	4.7	7.6	9.9	11.3	12.3	12.4	12.4	12.6	12.7	12.9
5	5.6	11.0	15.5	18.8	21.1	21.8	22.3	22.6	23.0	23.5
8	7.0	12.9	17.8	22.0	24.6	25.6	26.4	27.2	27.9	28.8
10	8.2	14.6	19.7	23.7	25.8	26.8	27.6	28.4	29.1	29.9
20	8.2	15.3	21.4	25.8	29.9	31.9	33.6	35.0	36.2	37.0
30	8.5	16.4	22.8	27.7	32.9	34.8	36.4	37.8	39.2	40.5
40	8.5	17.6	24.2	29.6	34.0	36.2	37.9	39.6	41.3	42.8
50	9.9	18.8	25.1	30.8	35.0	37.6	39.4	41.2	42.8	44.6
60	11.0	20.0	26.1	31.7	36.4	38.5	40.5	42.5	44.1	45.8
80	11.5	20.4	27.7	33.6	38.7	41.1	43.0	44.8	46.5	48.1
100	11.5	21.1	28.9	35.2	39.9	43.0	45.3	47.2	48.8	50.5
2×10^2	12.7	23.5	32.4	39.2	44.6	47.9	50.5	52.6	54.6	56.4
5×10^2	13.8	24.6	35.2	43.9	50.5	54.5	57.3	58.8	62.5	64.6
10^3	15.5	28.2	39.2	48.1	55.2	59.2	62.5	65.3	67.8	70.4
2×10^3	17.6	30.5	42.3	52.4	59.9	64.1	67.4	70.4	73.2	75.7
5×10^3	18.8	33.1	45.6	56.4	65.7	70.0	74.0	77.0	80.2	82.8
10^4	18.8	35.2	48.5	60.3	69.3	74.7	79.1	82.9	86.2	89.2
2×10^4	21.1	38.4	51.9	63.4	72.8	78.2	83.1	87.3	91.1	94.5
5×10^4	23.3	42.3	56.4	68.6	78.1	83.4	88.7	93.4	97.9	102.1
10^5	30.5	50.5	64.6	75.1	82.8	88.3	93.5	98.1	102.5	106.8
2×10^5	38.3	56.7	69.8	79.4	86.9	92.4	97.7	102.8	108.0	112.7
5×10^5	44.8	61.5	73.7	83.7	91.6	98.1	103.9	109.5	114.8	119.7
10^6	49.3	66.4	79.8	89.8	97.4	103.7	109.2	114.1	119.5	124.4
2×10^6	67.6	73.1	84.5	93.3	101.0	107.4	113.6	119.7	125.6	131.5
5×10^6	59.4	79.7	91.6	100.6	108.0	114.1	120.2	126.0	133.7	138.8
10^7	64.0	84.9	95.7	130.7	110.3	117.4	123.6	130.0	136.2	142.0

表 2-11 (續)

減弱倍數	γ 輻射的能量($h\nu$)(兆电子伏)									
	1.25	1.2	1.75	2.0	2.2	3.0	4	6	8	10
1.5	8.6	8.7	8.7	8.8	8.9	9.4	10.0	11.7	11.7	11.7
2	13.3	13.6	13.8	14.1	14.3	15.3	16.4	18.8	18.8	18.8
5	24.6	26.8	27.0	28.2	29.4	32.9	35.2	38.7	39.3	39.9
8	30.5	32.2	33.8	35.2	36.4	39.9	43.4	48.1	48.7	49.3
10	31.9	34.0	35.9	37.6	39.0	43.4	47.5	51.6	52.8	54.0
20	39.9	42.5	44.8	47.0	48.6	54.0	58.7	64.6	65.7	69.3
30	43.7	46.5	49.3	51.6	53.5	59.9	65.7	71.6	72.8	78.1
40	45.3	49.8	52.8	55.2	57.3	64.0	69.8	77.5	79.2	84.5
50	48.5	52.1	55.2	58.1	60.1	66.9	72.8	81.6	83.9	89.8
60	50.1	54.0	57.5	60.5	62.7	69.8	74.0	85.1	88.0	93.9
80	52.4	56.4	59.9	63.4	65.7	74.0	81.0	90.4	93.9	100.4
100	54.5	58.3	62.2	65.7	68.6	77.5	84.5	95.1	98.0	105.1
2×10^2	60.8	65.3	69.7	74.0	77.2	88.0	95.7	108.0	112.1	120.9
5×10^2	69.8	74.8	79.8	84.5	88.5	101.0	110.4	124.4	129.7	139.7
10^3	76.1	81.7	87.6	92.7	97.0	110.9	120.9	137.9	143.2	155.0
2×10^3	82.2	88.5	94.6	100.4	104.0	120.9	132.1	150.3	156.1	168.5
5×10^3	90.2	97.4	104.2	110.9	115.5	132.7	146.8	166.7	173.8	186.7
10^4	97.2	104.5	111.5	118.6	124.7	143.2	156.7	179.0	187.8	201.3
2×10^4	102.7	110.8	118.6	126.2	131.7	152.6	167.3	190.8	201.9	216.0
5×10^4	111.5	120.4	128.4	136.2	142.0	164.9	181.4	206.6	218.4	233.6
10^5	116.9	126.6	135.7	144.4	150.7	173.8	191.4	218.4	231.3	248.9
2×10^5	125.1	135.6	145.1	153.8	160.2	177.3	201.9	231.3	245.4	263.0
5×10^5	133.8	142.5	152.6	162.0	169.2	196.0	214.8	247.1	261.8	281.2
10^6	140.2	149.8	160.6	171.4	178.6	205.4	225.4	260.6	274.7	295.8
2×10^6	148.4	157.8	169.2	179.6	187.2	213.7	237.1	272.4	287.6	308.8
5×10^6	154.7	165.8	178.0	189.0	197.8	227.8	250.1	287.6	302.9	327.5
10^7	160.0	170.8	183.6	194.9	203.4	236.0	259.4	299.4	314.6	340.5

表 2—12 寬束 γ 射綫在不同的減弱倍數 k 時水的厚度(厚度以厘米表示;
水的密度 $\rho=1.0$ 克/厘米³)

減弱倍數 k	γ 輻射的能量($h\nu$)(兆電子伏)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1.5	14	20	25	24	22	22	21	19	19	18
2	18	27	30	30	29	28	27	27	26	26
5	27	37	42	44	46	46	47	47	48	48
8	32	44	49	51	54	55	57	58	59	59
10	35	47	52	55	57	58	60	61	62	63
20	41	54	60	64	68	71	72	73	74	75
30	45	58	65	69	73	75	77	79	81	82
40	48	62	68	72	76	78	81	83	85	87
50	48	63	71	76	79	81	81	86	89	92
60	50	65	73	78	82	84	87	89	92	95
80	53	68	76	81	85	88	91	94	97	100
100	53	70	79	84	88	92	95	98	101	104
2×10^2	60	77	87	93	98	102	105	109	113	116
5×10^3	81	105	120	130	138	147	154	160	165	170
10^4	91	114	123	139	147	155	162	168	175	181
2×10^4	95	120	135	146	156	164	172	179	186	192
5×10^4	103	128	144	156	167	175	183	190	196	205
10^5	110	135	152	164	175	184	192	201	209	216
2×10^5	118	144	161	174	185	194	203	211	219	228
5×10^5	121	152	170	185	197	205	214	223	232	241
10^6	128	156	176	192	205	215	224	233	243	253
2×10^6	135	164	184	200	213	223	232	242	252	263
5×10^6	143	173	194	210	224	234	245	256	267	278
10^7	150	178	200	217	232	243	255	265	277	288

表 2—12 (續)

減弱倍數	γ 輻射的能量($h\nu$)(兆电子伏)									
	0.25	1.5	1.75	2.0	2.2	3	4	6	8	10
1.5	18	19	21	23	23	24	25	25	26	26
2	27	28	30	33	35	37	38	40	45	45
5	51	53	56	59	61	69	74	85	93	98
8	62	65	69	73	76	85	93	106	117	123
10	67	71	75	79	82	92	101	116	127	135
20	81	87	92	97	100	112	126	145	161	175
30	89	96	102	107	111	124	140	163	180	192
40	93	100	107	114	118	132	150	175	193	206
50	99	106	113	120	124	138	158	184	204	217
60	102	110	117	124	128	144	165	191	212	226
80	108	116	123	131	136	152	175	204	226	242
100	112	120	128	136	141	160	182	212	236	253
2×10^2	126	135	144	153	158	180	206	241	270	289
5×10^2	143	153	163	173	181	206	234	277	310	334
10^3	155	167	178	189	197	226	257	306	342	368
2×10^3	168	181	193	205	214	246	280	333	373	402
5×10^3	184	198	212	225	235	271	309	368	414	446
10^4	197	212	227	241	252	290	331	396	446	480
2×10^4	209	225	247	256	267	310	354	425	477	510
5×10^4	224	241	259	276	288	334	383	460	515	554
10^5	236	255	274	292	305	353	404	487	545	587
2×10^5	249	269	288	306	320	370	427	510	575	621
5×10^5	264	286	307	327	342	397	456	545	614	665
10^6	277	299	320	342	358	415	479	571	643	695
2×10^6	289	314	336	358	374	435	502	598	674	730
5×10^6	305	331	355	378	396	460	530	632	713	772
10^7	317	344	370	393	412	478	554	657	741	807

以上这些表是由大家知道的那些单能的 γ 射线计算得来的，关于把这一计算理论用于有连续谱的轫致辐射的问题要进行专门的研究。

2. 在计算防护时应该知道的一些原始数据

(1) 所表示的单位。

(i) 用克镭当量或毫克镭当量表示的源的总的 γ 放射性或者放射性比度 m 。

(ii) 用居里表示的源的总的 γ 放射性或放射性比度 M 。

(iii) 放射源所放出的 γ 光子的总流量 N_γ 光子/秒或流量密度 n_γ 光子/厘米²·秒。

(iv) 代表源的以毫克镭当量表示的 γ 放射性所给出的物理剂量率 p_γ (换算关系见 1-1 节)。

(2) 辐射的性质和穿透本领 (常以兆电子伏表示)。 γ 射线穿透本领大时，减弱倍数就小。

(3) γ 辐射谱的组分。

(4) 源的几何形状和在厚源情况下的自吸收。

(5) 源强度的可能改变。

(6) 操作 γ 放射源时源与人的距离。

(7) 操作 γ 放射源的照射时间。

表 2-13 空气中 γ 射线的线性电子转换系数 γ (厘米⁻¹)

辐射能量 $h\nu$ (兆电子伏)	γ (厘米 ⁻¹ ·10 ⁹)	辐射能量 $h\nu$ (兆电子伏)	γ (厘米 ⁻¹ ·10 ⁹)
0.03	17.9	0.6	3.78
0.04	8.00	0.8	3.75
0.05	4.86	1.0	3.56
0.06	3.70	1.5	3.28
0.08	3.06	2	3.04
0.10	3.00	3	2.72
0.15	3.23	4	2.49
0.2	3.47	5	2.35
0.3	3.72	6	2.23
0.4	3.80	8	2.10
0.5	3.80	10	2.01

表 2-14 在水、鋁、铁和鉛中 γ 射綫的綫性电子轉換系数(厘米⁻¹)

輻射能量 $h\nu$ (兆电子伏)	水 $\rho=1.0$ 克/厘米 ³	鋁 $\rho=2.7$ 克/厘米 ³	铁 $\rho=7.89$ 克/厘米 ³	鉛 $\rho=11.34$ 克/厘米 ³
0.088	0.0252	0.1202	2.4747	27.8964
0.10	0.0253	0.1002	1.7409	24.4944
0.125	0.0266	0.0829	0.9705	17.5770
0.15	0.0278	0.0761	0.6320	12.2472
0.175	0.0289	0.0745	0.4695	8.8339
0.20	0.0299	0.0742	0.3327	6.6452
0.25	0.0312	0.0753	0.3077	4.0597
0.30	0.0320	0.0764	0.2683	2.7329
0.40	0.0328	0.0775	0.2414	1.5422
0.50	0.0330	0.0775	0.2312	1.0217
0.60	0.0329	0.0772	0.2257	0.7757
0.70	0.0326	0.0764	0.2193	0.6350
0.80	0.0321	0.0751	0.2146	0.5409
0.90	0.0316	0.0740	0.2099	0.4808
1.00	0.0310	0.0726	0.2059	0.4355
1.25	0.0296	0.0694	0.1957	0.3595
1.5	0.0283	0.0664	0.1870	0.3175
1.75	0.0271	0.0637	0.1791	0.2948
2.0	0.0260	0.0613	0.1728	0.2812
2.5	0.0241	0.0575	0.1649	0.2699
3.0	0.0227	0.0543	0.1602	0.2699
4.0	0.0204	0.0508	0.1562	0.2869
5.0	0.0189	0.0486	0.1562	0.3084
6.0	0.0178	0.0470	0.1578	0.3255
7.0	0.0170	0.0462	0.1602	0.3379
8.0	0.0163	0.0456	0.1615	0.3504
9.0	0.0158	0.0454	0.1649	0.3617
10.0	0.0154	0.0451	0.1681	0.3720

(8) 邻近的源和可能有的污染的影响。

3. 放射性元素的 γ 常数 K_γ 的意义和计算 在计算 γ 射綫的剂量和防护时, 会感到 K_γ 对我们的帮助是很大的。他的直接的含意是每一毫居里在 1 小时内给与相距 1 厘米处的空气的剂量伦数。这里边即包括了 γ 光子的流量, 同时还加入了能量的因素。如果 γ 輻射体的强

度以居里系統表示，經過計算就可以比較出誰給出的劑量高些或低些。假使以Ra（包有0.5毫米Pt濾片的）所給出的劑量為1時，可以將所求得的這些數值相應乘上一個因數並加以整理，則那些數值就各自相當地為該種 γ 輻射體的毫克鐳當量數：

表2—15 一般常用同位素的 K_γ 值和克鐳當量

元 素	Na ²⁴	Fe ⁶⁰	Co ⁶⁰	Cu ⁶⁴	Zn ⁶⁵	Zr ⁹⁵	Rh ¹⁰⁶
K_γ	19.06	6.25	13.20	1.20	2.85	4.19	1.17
克鐳當量	2.27	0.74	1.57	0.14	0.34	0.50	0.14
元 素	Sn ¹¹³ (+In ^{115*})	Sb ¹²⁴	Sb ¹²⁵ (+Te ^{125*})	I ¹³¹ (+Xe ^{131*2}) (+Xe ^{131*1})	Xe ¹³³	Cs ¹³⁴	Cs ¹³⁷ (+Ba ^{137*})
K_γ	1.68	9.00	2.91	2.30	0.14	9.88	3.55
克鐳當量	0.20	1.07	0.35	0.27	0.017	1.18	0.42
元 素	Ba ¹⁴⁰	Ce ¹⁴⁴	Eu ¹⁵⁴	Eu ¹⁵⁵	Tu ¹⁷⁰	Hf ¹⁸¹ (+Ta ^{181*2}) (+Ta ^{181*1})	
K_γ	2.52	0.25	6.23	0.51	0.033	3.13	
克鐳當量	0.3	0.03	0.74	0.061	0.0039	0.37	
元 素	Ir ¹⁹²	Au ¹⁹⁸	Po ²¹⁰ (RaD)	Po ²¹⁰			
K_γ	4.97	2.47	0.014	4.6×10^{-5}			
克鐳當量	0.59	0.29	0.0017	5.5×10^{-6}			
元 素	Ra ²²⁶	Th ²²⁸ (RdTh)	Th ²³⁴ (UX1)	Am ²⁴¹ (+Np ^{237*})			
K_γ	9.834	0.012	0.085	0.20			
克鐳當量	1.17	0.0014	0.01	0.024			

$$K = \frac{1 \times 3.7 \times 10^7 \sum n_i \times hv_i \times \gamma_i \times 1.6 \times 10^{-6} \times 3600}{4\pi r_0^2 \times 0.11}$$

倫/小時·毫居里·厘米, (2—7)

這裡 n_i 為一個核蛻變放出的 γ 光子數； hv_i 為 γ 光子的能量以兆電子

伏表示； γ_i 为空气的綫性电子轉換系数以厘米⁻¹为单位； r_0 为离源的距离（此处 $r_0=1$ 厘米）； 1.6×10^{-6} 是 1 个兆电子伏的能量相当的尔格数；0.11 为用尔格表示的倫琴的能量当量。

由于 K_γ 表很长，此处不拟列出，需要时可以参考顧晒夫 (H. Г. Гыцев) 著放射性輻射及防护手册 84—110 頁。

一般常用的源的 K_γ 值見表 2—15。

为了計算方便将 γ 射綫的綫性电子轉換系数表列于表 2—13，表 2—14。

4. 无防护屏时的防护計算

(1) 如果已給的 γ 源放射强度的单位是毫克鐳当量 m ，計算在离源 R (以米为单位) 处的剂量率和 t 小时内的剂量并寻出在不超过日剂量的情况下， m ， t ， R 的关系。

从 § 1-1 中知道，1 毫克鐳当量的 γ 源在 1 米处的剂量率为 0.84 毫倫/时，故可以写出 m 毫克鐳当量的源在 R 米处的剂量率为

$$\begin{aligned} p &= \frac{m \times 0.84}{R^2} \text{毫倫/时} = \\ &= \frac{m \times 0.84 \times 1000}{R^2 \times 3600} = 0.23 \frac{m}{R^2} \text{微倫/秒。} \end{aligned} \quad (2-8)$$

t 小时内的剂量是

$$D = 0.84 \times 10^{-3} \frac{mt}{R^2} \text{倫。} \quad (2-9)$$

每日最大允許剂量 $D=0.05$ 倫，則代入上式为

$$\frac{mt}{R^2} \simeq 60. \quad (2-10)$$

将此式再代回 $p=0.23 \frac{m}{R^2}$ 中，又得到

$$P = \frac{14}{t}. \quad (2-11)$$

(2) 如果已給的 γ 源放射强度的单位是毫居里 M ，計算在离源 R (以米为单位) 处的剂量率和 t 小时内的剂量，并导出在不超过日剂量的情况下之 M ， t ， R 間的关系。

M 毫居里的源在 R 米处的剂量率为

$$p = \frac{K_\gamma \cdot M}{R^2} \times 10^{-4} \text{倫/小时，} \quad (2-12)$$

这里 K_γ 即 γ 常数。10⁻⁴ 是单位换算时引进去的。 t 小时内的剂量是

$$D = 10^{-4} \frac{MK_\gamma t}{R^2} \text{ 倫。} \quad (2-13)$$

每日最大允許剂量 $D = 0.05$ 倫，代入上式，为

$$\frac{MK_\gamma t}{R^2} = 500. \quad (2-14)$$

由 (1), (2) 中我們可以看出，縮短時間，特別是增加 R ，就能減小剂量。

(3) 几个实际的例子。

(i) 求最大允許的源的放射性强度 m ，人們可以在沒有防护的情况下在相距 0.8 米处操作它 6 小时。

应用公式 (2-10)，

$$m = 60 \frac{R^2}{t} = 60 \frac{0.64}{6} = 6.4 \text{ (毫克鐳当量)}。$$

(ii) 求在相距 1 米处操作 20 毫居里的 Co^{60} 的最大允許的工作時間，由 K_γ 表我們找到，对 Co^{60} 而言， $K_\gamma = 13.20$ 倫/小时。按照公式 (2-14)，

$$t = 500 \frac{R^2}{MK_\gamma} = 500 \frac{1}{20 \cdot 13.20} = 1.9 \text{ 小时。}$$

(iii) 在操作放射性强度为 15 毫居里的铁 Fe^{59} 的样品时，在一个工作日中至少需要在相距 30 厘米处操作它的 20 分钟，在其余的时间內实际上可以离开样品 1.5 米。如果假定 Fe^{59} 的 β 輻射 ($e_\beta = 0.26$, 0.40 兆电子伏) 完全被玻璃屏蔽所吸收，求在这种情况下允許的工作時間。对 Fe^{59} 而言， $K = 6.25$ 倫/小时，在相距 30 厘米处 20 分钟內得到的剂量等于 [用公式 (2-9)]

$$\begin{aligned} D &= 10^{-4} \frac{MK_\gamma t}{R^2} \text{ 倫} = \\ &= 10^{-4} \frac{15 \cdot 6.25 \cdot 0.33}{(0.30)^2} = 0.034 \text{ 倫。} \end{aligned}$$

因而就获得最大允許剂量來說，还不足 $0.05 - 0.034 = 0.016$ 倫，对時間 t 可解剛才用过的那个公式，我們就得到为了获得 0.016 倫的剂量

可以允許在 1.5 米远处工作的時間：

$$t = 10^4 \frac{DR^2}{MK_\gamma} = 10^4 \frac{0.016 \cdot (1.5)^2}{15 \cdot 6.25} \approx 4.8 \text{ 小时。}$$

因而在这样条件下操作铁 Fe^{59} 的样品时工作時間不能超过 $0.33 + 4.8 = 5.13$ 小时或 5 小时 8 分。

(iv) 在工作地点测量的 γ 光子的流量密度等于 $1.1 \cdot 10^6$ 光子/厘米²·秒，如果 γ 光子的能量等于 0.5 兆电子伏特，求在无防护的情况下可以停留在这样的 γ 光子流中多少時間。

用公式 (2—7) 来确定工作地点的物理剂量率，因为对 γ 光子能量为 0.5 兆电子伏而言 $\gamma = 3.8 \times 10^{-3}$ 厘米⁻¹，故

$p = 14.5nh\nu\gamma = 14.5 \times 1.1 \times 10^6 \times 0.5 \times 3.8 \times 10^{-5} = 30$ 微倫/秒。根据公式 (2—11) 我們就得到用这样的剂量率照射时最大允許的照射時間：

$$t = \frac{14}{p} = \frac{14}{30} = 4.7 \text{ 小时。}$$

(4) 根据以上这些規律制成图表 (图 2—9)，应用起来也是很方便的。

这图表的使用很简单，不預备举例說明了，在后面 § 2—5 中有类似的图表并举例，請參看它。

5. 根据减弱倍数来计算防护 前面 § 2—4(1) 节中已經提到过，在計算防护层时应该考虑多次散射而引起的增长因素。我們知道，无防护时的剂量率

$$p = 0.028 \frac{MK_\gamma}{R^2} \text{ 微倫/秒。}$$

加了防护层以后的剂量为 $p_x = p e^{-\mu x}$ ， μ 为綫性吸收系数， x 为防护层厚度。但考虑了寬束多次散射的情况时 $p = B p_x = B p e^{-\mu x}$ 。 B 叫法諾因素或增长因素。根据这些，我們已有了万用表 (表 2—9, 表 2—10, 表 2—11, 表 2—12)。这样，我們的計算就很方便了。

(1) 根据物理剂量率的减弱倍数的計算。

任务是找寻从剂量率 p_0 減低到最大允許剂量率 p_x 所必須的防护

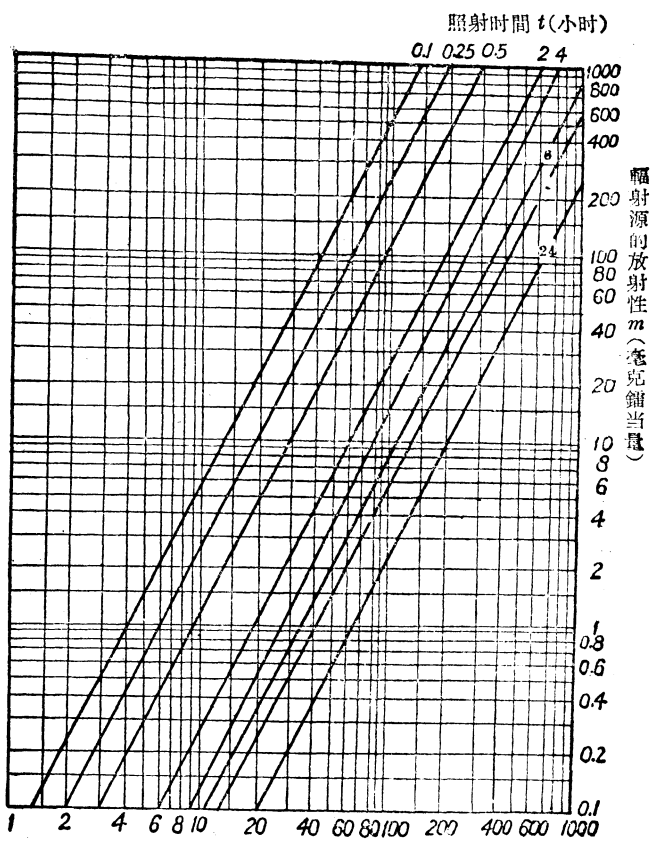


图 2-9

层厚度。方法是先计算该减弱的倍数 $k = \frac{p_0}{p}$ ，然后，根据此值及该射线的能量，从表 2-9 到表 2-12 中即可查出所需的该种防护层厚度 x 。

下面援引几个例子。

(i) 放射源为 $\text{Co}^{60}\gamma$ 源，其平均能量为 1.25 兆电子伏。在工作地点测得物理剂量率为 $p_0 = 200$ 微伦/秒，求使减弱至 $p = 2.5$ 微伦/秒所需的铅屏厚度。

先算出减弱倍数

$$k = \frac{p_0}{p_x} = \frac{200}{2.5} = 80.$$

从表 2—9 中查 $k=80$, $h\nu=1.25$ 兆电子伏时的铅屏厚为 $x=8.0$ 厘米。此即答案。

(ii) 强度为 50 克镭当量的放射性钴源，平时放于铅容器中有很好的防护，但工作时要将它无防护地移至另一个轻便的容器中。无防护的时间是 6 分钟。假如距离为 2 米。求问于操作台和装置间的水泥防护墙厚度。但在设计时要考虑安全系数为 5。

安全系数为 5，即日允许剂量为 $D=0.01$ 伦。

2 米处该无防护源的物理剂量率为

$$p = \frac{50000 \times 8.4 \times 10^6}{4 \times 10^4 \times 3600} = 2900 \text{ 微伦/秒,}$$

当 $t=6$ 分钟 $=0.1$ 小时，最大允许剂量率为

$$p_x = \frac{14}{0.1} = 140 \text{ 微伦/秒.}$$

考虑了安全系数时的减弱倍数为

$$k = \frac{2900 \times 5}{140} = 104.$$

根据 k 和 $h\nu$ 值所求的密度 $\rho=2.3$ 克/厘米³ 的水泥墙厚度为 $x=55$ 厘米。

(2) 根据剂量减弱倍数的计算。

例：一工作者运送放射性强度 $M=3.2$ 居里的 Co^{60} 到外地去历时三昼夜。工作者与源间的距离最近为 1.5 米，求装此源的铅容器的厚度。

此例中受剂量时间虽然不止一昼夜，但仍按 24 小时受照射来计算。对于距离为 1.5 米，一昼夜所受的剂量为

$$D_0 = \frac{K_r M t}{R^2} = \frac{3.2 \times 10^3 \times 13.2 \times 24}{2.25 \times 10^4} = 45 \text{ 伦.}$$

而每一昼夜的允许剂量是 $D_x=0.05$ 伦。减弱倍数

$$k = \frac{45}{0.05} = 900.$$

从表 2—9 中查得铅的厚度应为 $x=12$ 厘米。

(3) 根据放射性比度减弱倍数的计算。

这方面的计算是很简单的。也是先知道其需要的减弱倍数 k 。不过这里是用到的放射性物质的放射性比度与不超过最大允许剂量 ($p_0 = 2.5$ 微伦/秒) 的放射性比度之比。

例： γ 光子能量 $h\nu = 0.66$ 兆电子伏的 Cs^{137} 放射源其 γ 放射性比度 $q = 10$ 毫克镭当量/升，已知 $q_0 = 0.01$ 毫克镭当量/升的放射性比度，即可产生 2.5 微伦/秒，亦即达到最高允许物理剂量了，求所需水泥防护层的厚度。

减弱倍数为

$$k = \frac{q}{q_0} = \frac{10}{0.01} = 1000.$$

由表 2-11 中查得，当 $k = 1000$, $h\nu = 0.66$ 兆电子伏时，所需水泥厚度 $x = 61.2$ 厘米。

6. 根据时间、距离和在允许剂量的情况下来计算防护层厚度

(1) 几个例子。

(i) 放射源为 Co^{60} ，防护材料为铅，当 $t = 4$ 小时能够满足安全要求的防护，用之于 $t = 8$ 小时仍然要达到安全要求的话，那么应该再加厚多少？

由题要求知道所需的减弱倍数为

$$k = \frac{t_2}{t_1} = 2.$$

从表 2-9 中，我们可以查到需要加铅的厚度为 1.5 厘米 (Co^{60} 的 γ 能量有两种：1.17 和 1.33，平均约为 1.25 兆电子伏)。

(ii) 已知某源在距离为 $R_1 = 1.5$ 米处的物理剂量率为 $p_1 = 35$ 伦/时。若距离改为 $R_2 = 5$ 米，照射时间 $t = 8$ 小时，用含有生铁填料的水泥 ($\rho = 4.1$ 克/厘米³) 来作该源的防护层应为多厚？射线能量 $h\nu = 1.25$ 兆电子伏。

根据点源的射线强度与距离平方成反比的道理，知 5 米处的

$$p_2 = p_1 \frac{R_1^2}{R_2^2} = 35 \times \frac{2.25}{25} = 3.15 \text{ 伦/小时}.$$

8 小时的剂量为： $8 \times 3.15 = 25$ 伦。

要求的减弱倍数 (对每日 0.05 伦说) 为

$$k = \frac{25}{0.05} = 500,$$

从表 2—11 中查得 $x = 69.8$ 厘米。但因为密度不同，故所需本题给的水泥的厚度为

$$69.8 \times \frac{2.3}{4.1} = 39 \text{ 厘米}。$$

一些材料的密度在表 2—4 里可以查得。

(2) 根据一系列的实验，在每天工作剂量不超过 0.05 伦的条件下找出 Co^{60} 的毫克镭当量、距离、铅防护层厚度的关系，并考虑了时间校正作出下图（图 2—10）。因为采用的单位是毫克镭当量，故不仅可以用于 Co^{60} 防护的计算，而是可以用于任何一种 γ 放射性同位素。

例：在 $m = 50$ 毫克镭当量的 Na^{24} 辐射源前一米处工作 8 小时，求铅屏的厚度。50 毫克镭当量相当于多少毫克居里？

解：50 毫克镭当量的 Na^{24} 应为 $\frac{50}{2.29} = 22$ 毫克居里，这里 2.29 系 Na^{24} 的毫克镭当量。可以从 K_γ 表（表 2—15）中查到。

根据图上 $m = 50$ 毫克镭当量的水平线与 $R = 1$ 米的垂线交点，求得 $d = 3.1$ 厘米。

因为工作是 8 小时，不是 6 小时，故应查图上的时间校正。查的结果应加上 0.6 厘米，所以 $d_{\text{Co}^{60}} = 3.1 + 0.6 = 3.7$ 厘米。

又因为 Na^{24} 的 γ 能量为 2.75 兆电子伏，查图上的换算系数知 $K = 1.42$ 。

最终厚度为

$$d = K \times d_{\text{Co}^{60}} = 1.42 \times 3.7 = 5.25 \text{ 厘米}。$$

此外，图 2—10 还可用于固定其他条件求适当距离；或固定其他条件求允许的最大放射性。

7. 根据半减弱层来计算防护 所谓半减弱层，就是指把剂量率减弱至原有剂量率的 $1/2$ 的防护层或吸收层的厚度。当我们需要迅速地装置防护层，而手头又没有必要的图表时，那么根据所需的半减弱层的数目来确定防护层的大致厚度是很方便的。但应该指出，无论是对单色射线或是复杂谱的源而言，只要是宽束的情况，其半减弱层都与防护层的厚度有关。对于单色射线来说半减弱层的厚度是随防护层的

厚度的增加而增加的，但在厚度很大时就随防护层的增加而减少了。正因为如此，故根据所需的半减弱层的数目来计算防护层虽然快，但难做到正确。然而实践中常常需要很快地确定防护层厚度，利用半减弱层就很容易做到这一点。例如对Ra和Co⁶⁰的γ射线而言，半减弱层 $\Delta_{1/2}$ 的值可以近似地看作是相同的，并且都近似地等于1.3厘米铅、2.4厘米铁或6.9厘米水泥。为了将剂量减弱k倍所需的半减弱层的数目n，可从下式求得：

$$k = 2^n \quad (2-15)$$

只要确定了所须要减弱的倍数，就可以求出所须的半减弱层的数目，并由 $x = n \cdot \Delta_{1/2}$ 来确定防护层总的厚度 x 。

例如，要求将Co⁶⁰所产生的剂量减弱 $k=2000$ 倍所须的铅防护层的厚度，如果 $\Delta_{1/2}=1.3$ 厘米铅的话。

因为 $k=2000=2^n=2 \cdot 2^{10}=2 \cdot 1024$ ，故 $n=1+10=11$ ，因而要求的防护层厚度为 $x=1.3 \times 11=14.3$ 厘米，如果根据表来确定所要的防护层的厚度得到的结果为13.5厘米。

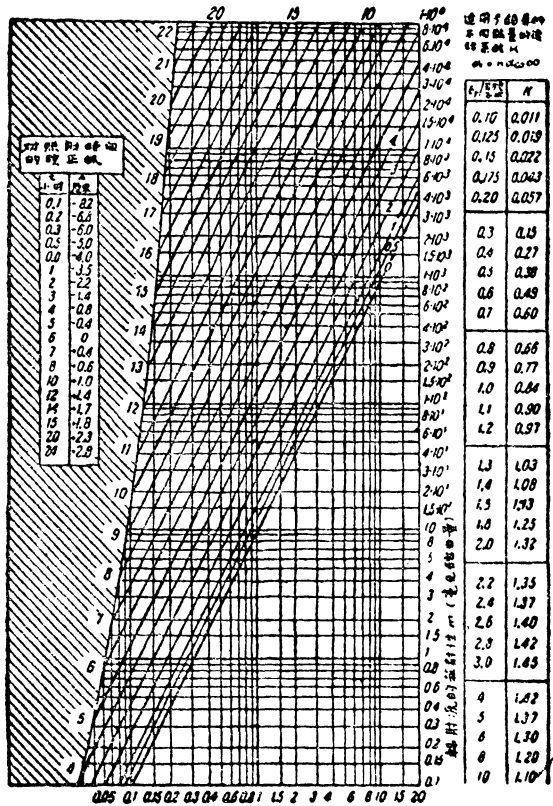


图2-10 在日剂量0.05伦以内的毫克镭当量距离和铅防护层厚度的关系图

表 2—16 γ 射綫的半減弱层(吋)

射綫能量 (兆电子伏)	吸 收 物 質			
	水	水 泥	鋼	鉛
0.5	2.91	1.46	0.425	0.159
0.6	3.15	1.56	0.456	0.191
0.7	3.38	1.66	0.497	0.230
0.8	3.60	1.76	0.533	0.273
0.9	3.80	1.86	0.568	0.315
1.0	4.00	1.96	0.597	0.350
1.1	4.19	2.06	0.630	0.381
1.2	4.35	2.16	0.660	0.405
1.3	4.53	2.26	0.690	0.430
1.4	4.68	2.37	0.718	0.456
1.5	4.85	2.49	0.744	0.478
1.6	4.99	2.60	0.774	0.499
1.7	5.13	2.72	0.803	0.517
1.8	5.29	2.82	0.835	0.537
1.9	5.46	2.91	0.866	0.559
2.0	5.59	2.99	0.894	0.573
2.2	5.87	3.12	0.945	0.597
2.4	6.16	3.24	0.994	0.613
2.6	6.45	3.36	1.04	0.619
2.8	6.71	3.48	1.09	0.625
3.0	7.00	3.59	1.13	0.625

8. 复杂譜成分的防护計算 对单能的 γ 射綫的防护計算是簡單的。对于象 Co^{60} 那样級联放出的 γ 光子的能量值很相近 ($\varepsilon_{\gamma_1}=1.17$ 兆电子伏, $\varepsilon_{\gamma_2}=1.33$ 兆电子伏) 时, 也可采用它的能量平均值 $\varepsilon_{\gamma}=1.25$ 兆电子伏来进行計算。但是非单色輻射的情况下, 計算确是比较复杂的; 此时必須首先确定参加竞争的 γ 光子的組分, 即那些在防护层后面产生最大物理剂量率的 γ 光子的組分, 而后把那些需要最厚的防护层的能量分出来。

在非常复杂的、由許多譜綫构成的輻射譜的情况下, 为了能根据其百分成分很好地选出如上所說的这样一个能量范围来, 把这些譜綫归并成若干組是很合适的。輻射的百分成分是根据剂量率 p_{γ} 或用克镭

当量表示的 γ 放射性来确定的（而不是根据每一个蜕变中放出的 γ 光子的数目 N_γ 来确定）。

如果源是强度（居里数）已知的放射性同位素的混合物，则必须既考虑到某个同位素在混合物中的百分成分，又要考虑到对某个同位素而言在一个蜕变中发出某个能量的 γ 光子的数目。然后对各种 γ 光子的能量（或能量范围）分别求出剂量率或用克镭当量表示的 γ 放射性，它们的总的效应是与这些光子属于那个同位素无关的。

例. 辐射源的强度为 $M=10$ 居里的镭 (Sb^{124})。如果 $R=0.5$ 米，而 $t=6$ 小时，求铅防护层的厚度。

表 2—17 Sb^{124} 的 γ 辐射谱成分

$h\nu_i$ (兆电子伏)	一次蜕变的 γ 光子数	各种能量的 γ 光子的 $K_{\gamma i}$ (伦/小时·毫居里·厘米)	πi 各种 γ 辐射 的百分成分
2.11	0.099	0.96	10.7
1.71	0.457	3.97	42.1
1.38	0.062	0.44	4.9
0.99	0.054	0.30	3.3
0.603	1.000	3.51	39.0
总 计	1.672	9.00	100.0

由这个源的整个 γ 辐射谱产生的剂量将为

$$D = \frac{mK_{\gamma i}t}{R^2} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 9 \cdot 6}{0.25 \cdot 10^4} = 216 \text{ 伦。}$$

为了将剂量减少到最大允许的剂量水平 $D_0=0.05$ 伦，须要减弱的倍数为

$$K = \frac{D}{D_0} = \frac{216}{0.05} = 4320.$$

每一条线的微分减弱倍数¹⁾可由下式求得：

$$K_i = \frac{\pi i K}{100},$$

因此： $K_1 = \frac{10.7 \times 4320}{100} = 462$ ； $K_2 = 1818$ ； $K_3 = 127$ ； $K_4 = 143$ ； $K_5 = 1685$ 。根据表 2—9，我们就得到下列计算出来的铅的理论厚度：

1) 即 дифференциальная кратность

$x_1=15.0$ 厘米, $x_2=16.3$ 厘米, $x_3=10.5$ 厘米, $x_4=7.5$ 厘米, $x_5=6.1$ 厘米, 显然, 能量为 $h\nu_2=1.71$ 兆电子伏的这条谱线是决定防护层厚度的谱线。谱线 $h\nu_1$ 所需铅的厚度和它的差不到半减弱层 (1.3 厘米)。假如谱线 $h\nu_1$ 须要与谱线 $h\nu_2$ 同样的防护层厚度, 即假如 $x_1=16.3$ 厘米, 则在防护屏后面的剂量将加倍, 即为 $0.05 \times 2=0.1$ 伦, 此时就需要增加一个对穿透性最强的组分而言的半减弱层, 即 $\Delta_{1/2}=1.5$ 厘米, 在我们所讨论的例子中谱线 $h\nu_1$ 只和谱线 $h\nu_2$ 相差不到一个半减弱层, 即只差 1.3 厘米。为了消除这一谱线在防护层后所发生的作用, 需要在 x_2 上增加大约半个半减弱层, 即 0.7 厘米的铅。因而, 根据万用表用微分方法计算出来的、我们所要求的防护层的厚度为 $16.3 + 0.7=17.0$ 厘米铅。

必须指出, 关于复杂的谱中那一条线给出最大的需要的防护厚度这一问题不仅与 γ 射线的能量及百分成分有关, 而且也与防护层的厚度有关。更精确地说, 与减弱倍数有关。这样的情形是常有的, 即两条或甚至三条相互竞争着的谱线随着防护层厚度的增加而改变其地位, 轮流地成为决定防护层厚度的谱线。常常有这样的情况, 即能量较小、但放射性的百分含量较大的谱线在防护层的最初若干厘米中决定着防护层的厚度, 而后来一些放射性强度较弱、但能量较大的谱线变成决定防护层厚度的谱线。

VII “斜”射线在防护层中的减弱。 上图是由各向同性点源出来的宽束 γ 射线的情况。这里可以看出, 对防护层说来, 有很大一部分射线是偏斜地射过去的, 它在防护层中与宽束的平行线束的减弱情况是不同的。在小角度 (10° 以内) 相差很少, 但在大角度时则射线强度随着材料的线性吸收系数和防护层的厚度 h 的乘积 μh 的增加而减少的速度就相差很大。张角愈大, 则差数愈大。

反之, 如图 2—11, 情况也相同, 系遵循同样规律而减弱。

这一现象的物理意义就在于偏斜射线由源探到测器或由探测器到源时, 在防护层中所走的路程要比垂直地走时长得多。

下面表 2—18 中偏斜射线的校正 d_0 的数值就是在计算时进行校正的因数。校正的结果应小于宽束平行射线所要求的厚度,

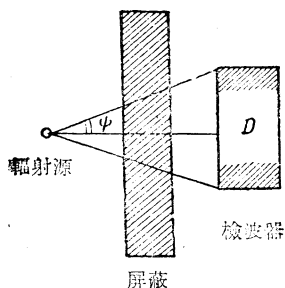


图 2-11 发散的 γ 射线的减弱

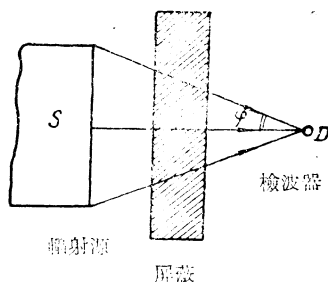


图 2-12 收敛的 γ 射线的减弱

如图 2-11 的情况，角度为 2ψ ， $\psi = 30^\circ$ ，假如源的 γ 光子能量为 $h\nu = 1.75$ 兆电子伏，考虑减弱 1000 倍 ($k = 1000$)，求水泥的防护层的厚度。

从表 2-11 中查得当 $h\nu = 1.75$ 兆电子伏和 $k = 1000$ 时，对于宽束平行 γ 射线的水泥防护层 $x = 88$ 厘米。

从表 2-18 中查得当 $k = 100$ ， $\psi = 30^\circ$ 时的 $d_0 = 0.45$ ，这里 d_0 是无因次的， $d_0 = \mu_0 x_0$ ； μ_0 为所给的该种能量的窄束 γ 射线在所给防护材料中的线性吸收系数。见表 2-8。 x_0 为所求的，需要从上面查得 x 中减去的校正值：

$$x_0 = \frac{d_0}{\mu_0} = \frac{0.45}{0.107} = 4.2 \text{ 厘米,}$$

故考虑了偏斜射线的因素后，所需的水防护层的真正厚度为：

$$x_1 = x - x_0 = 88 - 4.2 = 84 \text{ 厘米。}$$

对 γ 射线的防护，所要考虑的问题是很多的，通常建议在操作强度超过 25 居里的 γ 辐射体时，不要使用没有顶板的小工作室。

显然，被散射的辐射同样也可以通过水泥防护层上的各种各样的弯曲的缝（门缝，供操纵者用的孔等等）。并且辐射愈软，这种穿透的危险性愈大，软 γ 辐射的剂量率可能保持在比允许剂量率高的水平上，甚至于经过弯曲的缝多次散射后仍然高于允许剂量的水平，由于这个原因，建议在类似的弯曲的缝的入口处挂上一些薄的铅片。

在操作放射性强度的源时，必须考虑到散射出来的辐射。许多情况下必须在没有顶板的小工作室或很长的小室的某一段中进行操作，

表 2—18“偏斜”射线效应的校正 d_0 。

从表 2—9 至 12 求得的 x 的值算出校正值 $x_0 = d_0 / \mu_0$ 。系数 μ_0 在表 2—8 中求得； k 是减弱倍数； ψ 是源或室的半视角； $d_0 = \mu_0 x_0$ 是自由程

k	ψ					
	15°	30°	45°	60°	75°	98°
1.5	0.012	0.03	0.06	0.10	0.17	0.27
2	0.016	0.05	0.11	0.18	0.29	0.42
5	0.036	0.11	0.24	0.41	0.62	0.80
8	0.050	0.14	0.30	0.50	0.75	0.95
10	0.057	0.15	0.33	0.55	0.80	1.02
20	0.071	0.20	0.44	0.70	0.99	1.23
30	0.083	0.23	0.49	0.79	1.08	1.31
40	0.092	0.24	0.52	0.83	1.13	1.37
50	0.096	0.25	0.54	0.87	1.17	1.42
60	0.105	0.27	0.57	0.91	1.22	1.47
80	0.114	0.28	0.60	0.97	1.28	1.52
100	0.118	0.29	0.63	1.00	1.32	1.56
2.10 ²	0.128	0.34	0.71	1.10	1.43	1.68
5.10 ²	0.162	0.41	0.82	1.25	1.56	1.82
10 ³	0.176	0.45	0.89	1.32	1.66	1.92
2.10 ³	0.186	0.48	0.94	1.39	1.72	1.99
5.10 ³	0.215	0.54	1.04	1.49	1.83	2.10
10 ⁴	0.240	0.59	1.10	1.57	1.91	2.19
2.10 ⁴	0.254	0.61	1.15	1.62	1.97	2.26
5.10 ⁴	0.266	0.66	1.23	1.71	2.06	2.34
10 ⁵	0.279	0.69	1.28	1.76	2.12	2.40
2.10 ⁵	0.35	0.75	1.30	1.80	2.20	2.45
5.10 ⁵	0.35	0.80	1.35	1.85	2.30	2.55
10 ⁶	0.35	0.80	1.40	1.85	2.30	2.60
2.10 ⁶	0.35	0.80	1.45	1.95	2.30	2.60
5.10 ⁶	0.40	0.95	1.55	2.00	2.45	2.70
10 ⁷	0.40	0.95	1.60	2.10	2.50	2.75

此时操作者有足够厚的墙防护起来，免受直接的 γ 射线的作用，正如图 2—13 所示。从小室的墙上面穿过来的 γ 射线为空气、照明用的灯、观察用的镜子、天花板和房子的其他部分所散射。当应用这样形

式的小室时，这种照射是一个决定性的因素。数学计算表明，在操作至几十居里的源时，由于这种照射在小室附近产生的剂量率可能大于最大允许剂量率，因为对于能量较小的 γ 辐射，产生的散射辐射的剂量将比硬光子产生的要大。

在某个放射性强度时，由敞开着顶的小室出来的散射辐射就成为有危险性的了。这一放射性强度的数值与我们使用的放射性同位素的性质以及小室的大小有关。

理论上的计算不是很可靠的，但是已经从实验上得到这样的结果，就是用软辐射的源（例如 I^{131} ）时，在有很高的墙但没有顶的小室中，最多只能操作10—20居里，而在墙约为一个人那么高时，这一最大值减到2—3居里。放硬辐射的源（例如 Co^{60} ）的散射不是那样地强烈，所可操作的量大概可以增加一倍。

铅是防护 γ 辐射最好的材料。由于它的光电吸收系数很高，它对于软辐射特别有效。因此铅常常与其他材料一起用以防散射出来的辐射。在铅中产生电子偶的截面也很大，故而铅也是防护高能 γ 辐射的有效材料，在大大减弱的情况下穿过铅防护的高能辐射将主要是能量为3兆电子伏的辐射，这样的能量相当于截面的最小值。铅的主要缺点是力学性质很坏，并且价格很贵。在应用铅时，通常认为它的抗拉强度等于零，而其坚固性是用钢的支架结构来保证的。通常把铅浇到钢板中间组成一组屏。有了支架结构，铅的“爬行”性质就不起作用了。在临时工作中，常常应用铅块来防护。为了填补防护层的空穴或者是体积上的缺陷，常常采用小的铅球，这样的铅球的平均密度等于铅的密度的85%。

为了防护 γ 辐射，常常用钢和铁，它比铅便宜，但占的体积很大。

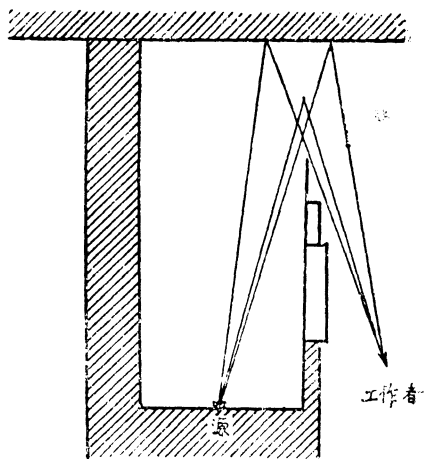


图2—13 来自上面的照射

当我们希望要有一种能阻止住 γ 辐射但对中子的吸收不大的材料时我们可以用铋。

建筑放射性同位素的工作室和储藏室时常常用水泥。对一般的工业应用来说，这大概算是最便宜的防护材料了。如果地方不够大、需要防护层小些的话，那就可以借用重水泥来减少它的厚度。重水泥通常用作反应堆和回旋加速器的防护屏。在普通水泥中主要是含有轻的元素。为了提高水泥防护 ν 射线的能力，可以在其中加入原子量大的物质，这样就得到所谓重水泥，它防护效率的提高将近似地正比于密度的增加。在表 2-19 中给出了用来制造各种水泥的填料。

表 2-19 加入各种不同填料的水泥密度

填 料	重量的成分	密度(克/厘米 ³)
砂+碎石	1: 8.5	2.4
砂+碎石+硼砂	1: 8.5	2.4
褐铁矿+褐铁矿	1: 6.5	2.7
砂+铁屑	1: 14	4.1
褐铁矿+铁屑	1: 12	4.2

重晶石水泥 (баритовый бетон) 对于建筑放射性同位素的贮藏室有很好的防护性质。这种水泥是用把便宜的重晶石矿 (未精制的硫酸钡) 代替普通水泥中的粗的和细的填料的办法得到的。它的密度 (因而连它的防护 γ 辐射的性质) 将比普通水泥高出 50%。

在编制万用表时，采用了下列这样的防护材料的密度：铅——11.34 克/厘米³，铁——7.89 克/厘米³，水泥——2.3 克/厘米³，水——1.0 克/厘米³，对其它的建筑材料可以根据它的密度把防护层换算一下；但此时必须最大限度地保持材料的有效原子序的相近性，必须注意到，对铅而言， $Z=82$ ；对铁而言， $Z=26$ ；对水泥而言， $Z_{\text{有效}}=14$ ；对水而言， $Z_{\text{有效}}=7.4$ 。能量愈大，防护材料愈轻，按密度来换算防护层的误差亦就愈小。例如，在能量大于 1 兆电子伏时，根据密度进行防护换算不仅对于由一种牌子到另一种牌子的水泥或者是由水泥到砖和土的换算，而且对于由水泥到铁的换算都没有很大的误差。无论在能量方面，或者减弱倍数方面，这些表是制定得那样详细，以至于我们

可以仅限于作一些綫性的外推。假如須要減弱的倍数大于 10^7 ，那就允許用比較表中最后面几个減弱倍数的办法把厚度外推。

計算例子。

例：强度为 $M=20$ 居里的 Co^{60} 源，沿着长 $l=2.5$ 米的无防护的輸送管，以每秒 5 米的速度由鉛的容器搬运到照射的小室中去，操纵台附近的工作地点是在厚 $x_1=25$ 厘米的水泥墙的后面，距源 2 米。

(1) 如果 Co^{60} 在容器內或照射小室內时产生的照剂量可以略去，則求在一个工作日中可以把源由容器运到小室往返几次？

Co^{60} 的 γ 射綫的平均能量为 $\bar{\epsilon}_\gamma=1.25$ 兆电子伏， $K_\gamma=13.20$ 倫琴/小时。

在无防护时在工作地点的剂量率为

$$P_0=0.028 \frac{MK_\gamma}{R^2}=0.028 \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 13.20}{4}=1.848 \times 10^3 \text{ 微倫/秒。}$$

从表上我們得到，厚 25 厘米的水泥墙将能量为 1.25 兆电子伏的 γ 射綫的剂量率減弱 $K=5$ 倍，因而，在工作地点的剂量率将为

$$p_x=\frac{1.848}{5} 10^3 \sim 370 \text{ 微倫/秒。}$$

最大允許停留在这样强度的輻射場里的时间为：

$$t_1=\frac{15}{p_x}=\frac{15}{370}=0.04 \text{ 小时，}$$

或

$$t_1=0.04 \cdot 60 \cdot 60=144 \text{ 秒。}$$

因为把 Co^{60} 源由容器运到照射小室来回一次，它在无防护的輸送管中停留的时间为

$$t_2=2 \times \frac{l}{v}=2 \times \frac{2.5}{5}=1 \text{ 秒，}$$

故在一个工作日中允許的搬运源的次数为

$$n=\frac{t_1}{t_2}=144 \text{ 次。}$$

(2) 如果工作条件須要在每个工作日中进行两倍次数的照射，求所需要附加的磚防护层的厚度。

必須增加的減弱倍数为 $K_2=2$ 。

因为可以认为，磚的 Z 与水泥的 Z 很相近，由表上得到，水泥減

弱能量为 1.25 兆电子伏的 γ 射线的半减弱层厚度为 13.3 厘米，故利用密度关系式 ($\rho_{\text{水泥}} = 2.3$ 克/厘米³。 $\rho_{\text{磚}} = 1.9$ 克/厘米³)，我们就得到所需的磚的厚度：

$$x_{\text{磚}} = \frac{\rho_{\text{水泥}}}{\rho_{\text{磚}}} x_{\text{水泥}} = \frac{2.3}{1.9} 13.3 = 16.1 \text{ 厘米。}$$

这一结果稍为大了一些，因为在计算中并未考虑已有的防护层的厚度，而宽束 γ 射线即使是单能的，其半吸收层是随防护厚度改变的。在工作地点所需要的总的减弱倍数为

$$K = K_1 \cdot K_2 = 5 \times 2 = 10 \text{ 倍。}$$

所需的水泥防护层的总的厚度为

$$x_0 = 31.9 \text{ 厘米。}$$

考虑到已有厚 $x_1 = 24.6$ 厘米的水泥墙存在，故要再减弱 2 倍，所需增加的防护层为 $x_2 = 31.9 - 24.6 = 7.3$ 厘米，而不是在没有考虑已有防护层时所得到的 13.3 厘米，因此所需增加的磚防护层的厚度将大大变小：

$$x_{\text{磚}} = \frac{\rho_{\text{水泥}}}{\rho_{\text{磚}}} x_2 = \frac{2.3}{1.9} 7.3 \sim 8.8 \text{ 厘米。}$$

材料愈轻，防护层愈厚，由前面这种计算得到的结果，其误差亦愈大。这一点在所有计算已有防护层的补充防护层的情况下都是如此。

在使用铅屏蔽时，还要注意应尽量接近放射源而远离工作者，因为这样做时 (1) 可以减少次级 β -辐射的影响，因为辐射程短。(2) 可以减少铅的用量而得到较大的屏蔽面。(3) 使操作比较方便。实验室中有许多特殊设计的容器铅保护套应用得相当方便。至于手套等薄的铅屏蔽物，因为远不足以得到满意的辐射减弱效果，倒是它的次数 γ 辐射大部以至全部为手所吸收，反不如原来的 γ 射线可以穿过手部，因而被吸收得较少。加以戴铅手套时工作不灵活，故一般 γ 射线的防护不使用铅手套等薄的铅屏蔽物。

§2-5. 对放射性进入人体的预防 当大量的放射性同位素进入体内时，其中的一些除致电离作用外，由于其本身的化学性质，尚能对有机体显出某种毒效，又由于放射性物质从体内排出要经历一段颇长的时间，有的索性就积聚在某一部分不出来，这对健康是很危险

表 2—20 某些放射性同位素的相对危险程度

I. 少危险

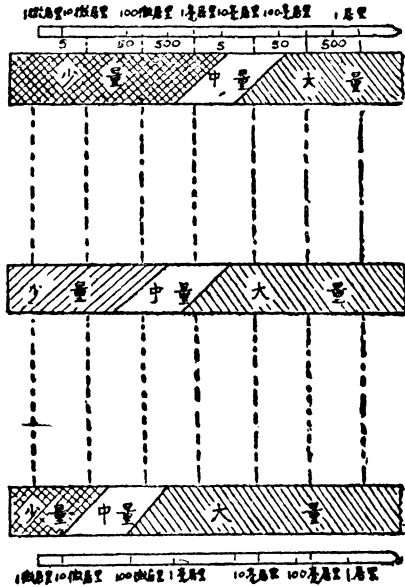
*Na²⁴, K⁴², Cu⁶⁴, *Mn⁵², *As⁷⁶,
As⁷⁷, Kr⁸⁵, *Hg¹⁹⁷

II. 中等危险

H³, C¹⁴, P³², *Na²², S³⁵, Cl³⁶,
*Mn⁵⁴, *Fe⁵⁹, *Co⁶⁰, Sr⁹⁰, *Cd¹⁰⁵,
*Ru¹⁰³, R¹⁰⁶, Te¹⁰⁷, Te¹²⁹, I¹³¹,
*Cs¹³⁷, *Ba¹⁴⁰, *La¹⁴⁰, Ce¹⁴¹,
Pr¹⁴³, *Nd¹⁴⁷, *Au¹⁹⁸, *Au¹⁹⁹,
Hg^{203, 205}

III. 最危险

Ca⁴⁵, Fe⁵⁵, Sr⁹⁰, Y⁹¹, *Zr⁹⁵,
Ce¹⁴⁴, Pm¹⁴⁷, Bi²¹⁰



* 表示主要的 γ 放射性同位素

的。因此防止放射性物质进入人体的措施是有其重要意义的。

放射性物质能够进入体内的情况有 (1) 当手及身体其他部分, 工作服等被放射性物质所污染, 或不遵守工作守则, 用咀吸取液体等时, 易于经过消化系统进入体内; (2) 当吸入放射性气体和尘埃时通过呼吸器官进入血液到体内各部或长期沉积在肺部; (3) 当皮肤上有创伤时, 极易通过创伤或未伤的皮肤而进入体内。

α, β, γ , 中子, 质子等危险程度不同的情况, 前面已谈过。此外, 同位素半衰期愈长, 能量愈高, 愈不易排泄, 愈易局部积聚的, 则其危险性就愈大。此外, 进入机体的方式不同, 危险性也不同, 如钚不易在体液中溶解, 因此从呼吸器官吸入就比吞咽它时更危险。兹就同位素的相对危险性表示如表 2—20。

1. 进入人体的允许剂量的计算和沾污的允许剂量计算 计算原则已在 § 1-2.2 中提到过了。下面只介绍一般计算的方法并举几个

例子。

(1) 一般計算法。計算時所用的相当于蜕变常数的有效常数为

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_s, \quad (2-16)$$

其中 λ_p 为放射体的蜕变常数； λ_s 为放射体物质在体内的排泄常数。

計算時所用的半衰期应为

$$T = \frac{T_p \cdot T_s}{T_p + T_s}, \quad (2-17)$$

T_p 为放射性物质衰变的半衰期； T_s 为生理上的半排出周期。

計算時应考虑进入紧要器官的那部分放射性原子而不是所有进入体内的原子总数；因数 f 为进入紧要器官的分数。此值可以从后面表 2-23 中查得。

下面的計算是求进入人体的放射性物质，在体内的最大允許濃度。

(i) 如果 β 放射性物质在 $t=0$ 时有 n 个核进入人体的話，那么在 t 时在 1 克的紧要器官中将 有 $\frac{nf}{m}e^{-\lambda t}$ 个放射性原子核。此处 m 为該器官的重量。

在 t 到 $t+dt$ 間应有

$$\frac{dn}{dn} = \frac{nf}{m} \lambda_p e^{-\lambda t} dt \quad (2-18)$$

个 β 放射性核发生衰变。因而在 1 克組織中被吸收的能量将等于

$$d\varepsilon = \bar{\varepsilon}_\beta dn = \bar{\varepsilon}_\beta \frac{nf}{m} \lambda_p e^{-\lambda t} dt, \quad (2-19)$$

此处 $\bar{\varepsilon}_\beta$ 为 β 粒子的平均能量，以兆电子伏表示。

在 1 克組織內放出的能量为

$$\varepsilon = \int_0^t \bar{\varepsilon}_\beta \frac{nf}{m} \lambda_p e^{-\lambda t} dt = \bar{\varepsilon}_\beta \frac{nf}{m} \frac{\lambda_p}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}).$$

亦即

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon}_\beta \frac{nf}{m} \cdot \frac{T}{T_p} \left(-e^{-\frac{0.693}{T} t} \right). \quad (2-20)$$

如果我們將粒子数(以 C 代替微居里)代入，再以一个倫相当的 1 克空气吸收的能量为 5.3×10^7 兆电子伏的关系引进去，即可求得剂量。

$$D_\beta = \frac{\varepsilon}{5.3 \times 10^7} =$$

$$= \frac{\bar{\epsilon}_\beta}{5.3 \times 10^7} \cdot \frac{f}{m} \cdot \frac{T}{T_p} (1 - e^{-\frac{0.693}{T} t}) \cdot \frac{3.7 \times 10^4 C \times 60 \times 60 \times 24}{0.693 T} \quad (2-21)$$

(因为 $-\frac{dn}{dt} = 3.7 \times 10^4 C = n\lambda_p$, 又因为 λ_p 的单位是秒⁻¹, 而这里 T_p 是以天为单位的。

故
$$n = \frac{3.7 \times 10^4 C}{\frac{0.693}{T_p}} \times 60 \times 60 \times 24。$$

即

$$D_\beta = 87 \times \bar{\epsilon}_\beta \frac{cf}{m} T (1 - e^{-\frac{0.693}{T} t}) = A_\beta C_\beta (1 - e^{-\frac{0.693}{T} t}), \quad (2-22)$$

这里 $A_\beta = 87\bar{\epsilon}_\beta$ 为 1 微居里 β 放射性物质完全蜕变和排出体外时在 1 克组织中产生的剂量 (伦), $C_\beta = \frac{cf}{m}$ 为放射性物质在紧要器官中的最大允许浓度 (以微居里/克为单位)。

最严重的情况是进入人体后的第一天, 以后由于蜕变和排出会逐渐减小的。每天以不大于 0.05 伦计算 ($D_\beta = 0.05$ 伦), 则可以求出放射性物质进入人体的最大允许量 C , 或 C_β :

$$C = \frac{0.05m}{87\bar{\epsilon}_\beta T f} \times \frac{1}{(1 - e^{-\frac{0.693}{T}})} \text{微居里}, \quad (2-23)$$

$$C_\beta = \frac{cf}{m} = \frac{0.05}{87\bar{\epsilon}_\beta T} \times \frac{1}{(1 - e^{-\frac{0.693}{T}})} \text{微居里/克}。 \quad (2-24)$$

(ii) 如为 γ 放射性物质, 进行计算后, 同样可以得到一方程式:

$$D_\gamma = A_\gamma \frac{cf}{m} g (1 - e^{-\frac{0.693}{T}}) \text{伦}, \quad (2-25)$$

此处 A_γ 为 1 微居里 γ 放射性物质在完全衰变和排泄出去时在相距 1 厘米远处产生的剂量, 单位为伦; g 为几何形状因数, 它决定于辐射所局限的人体的部位和 γ 射线的吸收系数, 很复杂, 但对于位于人体躯干中心的源来说, g 的近似值为: $g = 314(1 - 13\mu)$; μ 为该同位素

的 γ 射綫在組織中的吸收系数。

同样可以相似于 $\frac{dn}{dt} = nk$, 写出

$$A \lambda = A_{\gamma} \frac{0.693}{T} = K_{\gamma} \times 10^{-3}, \text{ 即 } A_{\gamma} = K_{\gamma} \frac{T}{0.693} \times 10^{-3}, \quad (2-26)$$

此处 K_{γ} 是电离常数, 而 T 用小时为单位, 这样, 式 (2-25) 可以变为

$$\begin{aligned} D_{\gamma} &= K_{\gamma} \frac{T}{0.693} \times 10^{-3} \times \frac{cf}{m} g (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t}) = \\ &= 1.43 \times 10^{-3} K_{\gamma} T \frac{cf}{m} g (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t}) \text{ 倫} \end{aligned} \quad (2-27)$$

或
$$D_{\gamma} = A_{\gamma} C_{\gamma} g (-e^{-\frac{0.693}{T}t}) \text{ 倫}.$$

此处 C_{γ} 为紧要器官中 γ 放射性物质的浓度, 以微居里/克表示。由此, 同求 β 放射性物质的最大允许浓度一样, 可求 γ 放射性物质的最大允许浓度:

$$\begin{aligned} C &= \frac{0.05}{A_{\gamma} g (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t})} = \\ &= \frac{50}{1.43 \times K_{\gamma} \times T \times g (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t})} \text{ 微居里/克}, \end{aligned} \quad (2-28)$$

那么一次进入身体的 γ 放射性物质的最大允许量为

$$C = \frac{mC_{\gamma}}{f} = \frac{50m}{1.43 \times K_{\gamma} \times T \times g \times f (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t})} \text{ 微居里}。 \quad (2-29)$$

(iii) 如果一种同位素既放 β , 也放出 γ , 则总剂量应该是加成的:

$$D_{\beta+\gamma} = (A_{\beta} + A_{\gamma} g) C_{\beta+\gamma} (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t}) \text{ 倫}, \quad (2-30)$$

其最大允许浓度为

$$C_{\beta+\gamma} = \frac{0.05}{(A_{\beta} + A_{\gamma} g) (1 - e^{-\frac{0.693}{T}t})} \text{ 微居里/克}。 \quad (2-31)$$

(2) 几个实例。

(i) 确定 P^{32} 一次进入人体的最大允许量。

P^{32} 的平均能量 $\bar{\epsilon}_\beta = 0.695$ 兆电子伏, 半衰期为 $T = 14.3$ 天。 P^{32} 主要是沉积于骨骼中, 一般假定骨骼重 $m = 7000$ 克, 而 P^{32} 进入紧要器官 (此处即为骨骼) 的分数为 0.3。这样, P^{32} 一次进入人体的最大允许量为

$$C = \frac{0.05m}{87\bar{\epsilon}_\beta \times T \times f} \times \frac{1}{(1 - e^{-\frac{0.693}{T}})} =$$

$$= \frac{0.05 \times 7000}{87 \times 0.695 \times 14.3 \times 0.3} \times \frac{1}{(1 - e^{-\frac{0.693}{14.3}})} = 28 \text{ 微居里,}$$

在紧要器官中的最大允许浓度为

$$C_p = \frac{cf}{m} = 1.2 \times 10^{-3} \text{ 微居里/克。}$$

(ii) β , γ 放射性的 Na^{24} 进入身体的情况讨论。

Na^{24} 的 β 能量 $\bar{\epsilon}_\beta = 0.54$ 兆电子伏, γ 的能量 $\bar{\epsilon}_\gamma = 1.368$ 兆电子伏, $\epsilon_{\gamma_1} = 2.754$ 兆电子伏, 半衰期 $T = \frac{15.1}{24}$ 天, $K_\gamma = 19.1 \frac{\text{伦}}{\text{时} \cdot \text{毫居里} \cdot \text{厘米}}$ 。 Na^{24} 可以分布全身 (即其紧要器官), $f = 1$ 。人体约重 $m = 70000$ 克。又 $A_\beta = 87 \times \bar{\epsilon}_\beta \cdot T = 87 \times 0.540 \times \frac{15.1}{24} = 29$ 伦。 $A = K \frac{I}{0.693} \times 10^{-3} = 0.4$ 伦。几何形状因数 $g = 314(1 - 13 \times 0.025) = 210$, 这里 0.025 为 $\bar{\mu}$ 值, 因为 μ_1, μ_2 各为 0.0267 和 0.0233, 其 $\bar{\mu} = 0.025$ ($\bar{\epsilon}_\gamma = 1.368$ 兆电子伏, $\bar{\epsilon}_{\gamma_1} = 2.754$ 兆电子伏)。

故最大允许浓度可写为

$$C_{\beta+\gamma} = \frac{0.05}{A_\beta + A_\gamma g} \times \frac{1}{1 - e^{-\frac{0.693}{T}}} =$$

$$= \frac{0.05}{(29 + 0.4 \times 210) \times 0.68} = 0.00065 \text{ 微居里/克,}$$

一次进入人体的最大允许量

$$C = \frac{C_{\beta+\gamma} m}{f} = 46 \text{ 微居里,}$$

Na²⁴ 的 β, γ 的总剂量为

$$\begin{aligned} D_{\beta+\gamma} &= (A_{\beta} + A_{\gamma} g) C_0 (1 - e^{-\frac{0.693}{T}}) = \\ &= (29 + 0.4 \times 210) \times 0.00065 = 0.074 \text{ 伦当量。} \end{aligned}$$

(iii) 咽入 I¹³¹ 时的情况。

I¹³¹ 的紧要器官为甲状腺, 重 $m = 20$ 克, $f = 0.2$, I¹³¹ 也是既放 β 又放 γ 的放射体, 仿前算法, 可得甲状腺中 I¹³¹ 的最大允许浓度为

$$C_{\beta+\gamma} = 4.35 \times 10^{-3} \text{ 微居里/克,}$$

I¹³¹ 在人体中的最大允许量为

$$C = C_{\beta+\gamma} \times \frac{m}{f} = 0.43 \text{ 微居里。}$$

以上几个例子中并未考虑到生理排泄的速度, 而是假定 $T_s \gg T$ 即 $T = T_p$, 故算出的数值较之表上所查到的为低。考虑排泄这一因素后即可使 P³² 的一次进入人体的最大允许量提高到 34 微居里, 而把 Na²⁴ 的量提高到 1.7×10^2 微居里, 使 I¹³¹ 提高到 0.52 微居里。

为了便于进行计算和应用, 特介绍下面一些表。

表 2-21 “标准人”的紧要器官重量和大小

器 官	重量(克)	半径(厘米)	器 官	重量(克)	半径(厘米)
全 身	70,000	30	小 肠	1,100	30
肌 肉	30,000	30	胃	250	10
脂肪组织	10,000	20	大肠下部	150	5
骨 骼	7,000	5	大肠上部	135	5
血 液	5,400	—	肺	1,000	30
皮 肤	2,000	0.1	肾 脏	300	7
肝 脏	1,700	10	脾 脏	150	7
肠胃食道	1,600	—	甲 状 腺	20	3

表 2—22 一次注入时最大允许量

同位素	紧要器官	进入紧要器官的分数 f_2	进入人体可溶化合物的最大允许量 (微居里)	进入人体的不可溶化合物的最大允许量 (微居里)	不溶化合物的重量 (毫克)
H ³	全身	1.0	$1.1 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-11}$
Be ⁷	骨骼	0.35	$2.0 \cdot 10^3$	$8.1 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-12}$
C ¹⁴	脂肪	0.5	$3.4 \cdot 10^2$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-9}$
F ¹⁸	骨骼	0.1	$3.0 \cdot 10^3$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-15}$
Na ²⁴	全身	1.0	$1.7 \cdot 10^2$	$9.9 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-15}$
P ³²	骨骼	0.3	34	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$5.2 \cdot 10^{-15}$
S ³⁵	皮肤	0.14	$2.5 \cdot 10^2$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$3.7 \cdot 10^{-12}$
Cl ³⁵	全身	1.0	$2.6 \cdot 10^2$	$3.3 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$
K ⁴²	肌肉	0.75	$1.9 \cdot 10^2$	$5.6 \cdot 10^{-5}$	$9.3 \cdot 10^{-13}$
Ca ⁴⁵	骨骼	0.58	24	10^{-5}	$5.6 \cdot 10^{-12}$
Sc ⁴⁶	脾, 肝	$3 \cdot 10^{-2}$	57	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$
		0.6	10		
Sc ⁴⁷	脾, 肝	$3 \cdot 10^{-2}$	31	$7.5 \cdot 10^{-6}$	$9.2 \cdot 10^{-11}$
		0.6	24		
Sc ⁴⁸	脾, 肝	$3 \cdot 10^{-2}$	20	10^{-6}	$6.7 \cdot 10^{-15}$
		0.6	94		
V ⁴⁸	骨骼	0.1	64	$6.6 \cdot 10^{-6}$	$3.9 \cdot 10^{-14}$
Cr ⁵¹	肾	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^3$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-12}$
Mn ⁵⁶	肾, 肝	$8 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^2$	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-15}$
		0.16	$3.7 \cdot 10^2$		
Fe ⁵⁵	血液	1.0	$7.8 \cdot 10^2$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$6.4 \cdot 10^{-11}$
Fe ⁵⁹	血液	1.0	9.1	$7.5 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-12}$
Co ⁶⁰	肝	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^2$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	$6.8 \cdot 10^{-12}$
Ni ⁶³	肝	$2 \cdot 10^{-1}$	$1.9 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$
Cu ⁶⁴	肝	0.33	$2.6 \cdot 10^2$	$7.5 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-14}$
Zn ⁶⁵	骨骼	0.15	$4.5 \cdot 10^2$	$6.6 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-12}$
Ga ⁷²	骨骼	0.4	46	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$4.8 \cdot 10^{-15}$
Ge ⁷¹	肾	$2 \cdot 10^{-2}$	$2.2 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$6.8 \cdot 10^{-13}$
As ⁷⁶	肾	$1 \cdot 10^{-2}$	10^2	$3.6 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-15}$
Rb ⁸⁶	肌肉	0.44	10^2	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-14}$

(續)

表 2-22

同位素	緊要器官	進入緊要器官的分数 f_2	進入人體可溶化合物的最大允許量 (微居里)	進入人體的不可溶化合物的最大允許量 (微居量)	不溶化合物的重量 (毫克)
Sr^{90}	骨 髓	0.4	5.5	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$5.7 \cdot 10^{-14}$
$\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$	骨 髓	0.4	2.9	$8.5 \cdot 10^{-7}$	$4.3 \cdot 10^{-12}$
Y^{91}	骨 髓	0.55	4.0	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$6.4 \cdot 10^{-14}$
$\text{Nb}^{95} + \text{Nb}^{98}$	骨 髓	0.23	27	$4.9 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-13}$
Nb^{95}	骨 髓	0.25	79	$1.9 \cdot 10^{-5}$	$8.8 \cdot 10^{-13}$
Mo^{99}	骨 髓	$3 \cdot 10^{-4}$	$5.9 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$3.0 \cdot 10^{-14}$
Tc^{99}	腎	$5 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$5.5 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-13}$
$\text{Ru}^{106} + \text{Rh}^{106}$	腎	$4 \cdot 10^{-2}$	5.1	$6.3 \cdot 10^{-7}$	$1.9 \cdot 10^{-13}$
Rh^{105}	腎	$5 \cdot 10^{-2}$	51	10^{-5}	$1.2 \cdot 10^{-14}$
$\text{Rd}^{103} + \text{Rh}^{103m}$	腎	0.1	56	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-13}$
Ag^{108}	肝	$6 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^2$	$9.0 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-12}$
Ag^{111}	肝	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^3$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-14}$
$\text{Cd}^{109} + \text{Ag}^{109m}$	肝	0.75	49	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$8.2 \cdot 10^{-11}$
Sn^{113}	骨 髓	0.3	$2.4 \cdot 10^2$	$4.4 \cdot 10^{-4}$	$4.2 \cdot 10^{-11}$
Tc^{127}	腎	$6 \cdot 10^{-2}$	18	$3.2 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-13}$
Tc^{129}	腎	$6 \cdot 10^{-2}$	5.9	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$4.6 \cdot 10^{-14}$
I^{131}	甲状腺	0.2	0.52	$6.3 \cdot 10^{-6}$	$5.0 \cdot 10^{-14}$
$\text{Cs}^{137} + \text{Ba}^{137m}$	肌 肉	0.48	$1.1 \cdot 10^2$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$5.9 \cdot 10^{-11}$
$\text{Ba}^{140} + \text{La}^{140}$	骨 髓	0.7	2.4	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-14}$
La^{140}	骨 髓	0.4	16	$4.8 \cdot 10^{-6}$	$8.5 \cdot 10^{-15}$
$\text{Ce}^{144} + \text{Pr}^{144}$	骨 髓	0.4	2.3	$6.9 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-13}$
Pr^{143}	骨 髓	0.25	18	$3.3 \cdot 10^{-6}$	$4.9 \cdot 10^{-14}$
Pm^{147}	骨 髓	0.35	50	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-11}$
Sm^{151}	骨 髓	0.2	$3.0 \cdot 10^2$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$
Eu^{154}	骨 髓	0.35	14	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$2.8 \cdot 10^{-11}$
Ho^{166}	骨 髓	0.22	37	$5.7 \cdot 10^{-6}$	$8.2 \cdot 10^{-15}$
Tm^{170}	骨 髓	0.7	5.4	$2.7 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^{-13}$
Lu^{171}	骨 髓	0.3	58	$9.2 \cdot 10^{-6}$	$8.4 \cdot 10^{-14}$
Ta^{182}	肝	0.3	11	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$7.8 \cdot 10^{-13}$
W^{181}	骨 髓	$8 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^3$	$2.9 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-12}$

(續)

表 2-22

同位素	紧要器官	进入紧要器官的分数 f_2	进入人体可溶化合物的最大允许量 (微居里)	进入人体的不可溶化合物的最大允许量 (微居里)	不溶化重量 (毫克)
Re ¹⁸⁷	皮肤, 甲状腺	$\begin{cases} 0.8 \\ 2.5 \cdot 10^{-3} \end{cases}$	$\begin{cases} 1.1 \cdot 10^3 \\ 7.2 \cdot 10^2 \end{cases}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-11}$
Ir ¹⁹⁰	肾, 脾	$\begin{cases} 5 \cdot 10^{-2} \\ 8 \cdot 10^{-2} \end{cases}$	$\begin{cases} 98 \\ 28 \end{cases}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-13}$
Ir ¹⁹²	肾, 脾	$\begin{cases} 5 \cdot 10^{-2} \\ 8 \cdot 10^{-2} \end{cases}$	$\begin{cases} 12 \\ 3.6 \end{cases}$	$4.0 \cdot 10^{-6}$	$4.3 \cdot 10^{-13}$
Pt ¹⁹¹	肾	0.11	12	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-12}$
Pt ¹⁹²	肾	0.11	11	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-12}$
Au ¹⁹⁸	肝, 肾	$\begin{cases} 0.98 \\ 0.24 \end{cases}$	$\begin{cases} 13 \\ 13 \end{cases}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-13}$
Au ¹⁹⁹	肝, 肾	$\begin{cases} 0.98 \\ 0.24 \end{cases}$	$\begin{cases} 7.4 \\ 5.8 \end{cases}$	$5.8 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-14}$
Au ¹⁹⁹	肝, 肾	$\begin{cases} 0.98 \\ 0.24 \end{cases}$	$\begin{cases} 18 \\ 15 \end{cases}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-14}$
Ti ²⁰⁰	肌肉	$6 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^3$	$3.3 \cdot 10^{-5}$	$5.7 \cdot 10^{-14}$
Ti ²⁰¹	肌肉	$6 \cdot 10^{-2}$	$5.8 \cdot 10^3$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-11}$
Ti ²⁰²	肌肉	$6 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-12}$
Ti ²⁰⁴	肌肉	$6 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^3$	$3.4 \cdot 10^{-6}$	$7.9 \cdot 10^{-12}$
Pb ²⁰³	骨髓	0.3	$4.1 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$7.0 \cdot 10^{-13}$
Pb ²¹⁰	骨髓	0.3	$7.1 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$
Po ²¹⁰	脾	$2 \cdot 10^{-2}$	0.12	$1.6 \cdot 10^{-9}$	$3.5 \cdot 10^{-15}$
At ²¹¹	甲状腺	$7 \cdot 10^{-2}$	$5.3 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$8.9 \cdot 10^{-17}$
Ra ²²⁶ + 55%dr	骨髓	$7.5 \cdot 10^{-2}$	0.49	$5.3 \cdot 10^{-9}$	$5.4 \cdot 10^{-12}$
Ac ²²⁷ + dr	骨髓	0.3	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-9}$	$3.5 \cdot 10^{-14}$
Th ^{nat}	骨髓	0.78	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-9}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
Th ²³⁴ + Pa ²³⁴	骨髓	0.78	1.9	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$4.7 \cdot 10^{-14}$
Unat	肾	0.33	$8.7 \cdot 10^{-3}$	$9.1 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$
U ²³³	骨髓	0.33	$7.1 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$
Pu ²³⁹	骨髓	0.7	$3.5 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-10}$
Am ²⁴¹	骨髓	0.25	$8.4 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$4.9 \cdot 10^{-12}$
Cm ²⁴²	骨髓	0.25	$7.6 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$4.2 \cdot 10^{-15}$

表 2—23 一次吸入时最大允许量 (微居里)

同位素	进入紧要器官的分数 f	肠胃中容不溶化合物	肺中容不溶化合物	表 2—22 的第二行所列紧要器官里可溶化合物	重量(毫克)
H ³	0.75	$1.2 \cdot 10^4$	$3.4 \cdot 10^3$	$4.6 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^{-4}$
Be ⁷	$9 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^2$	$5.8 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^{-6}$
C ¹⁴	0.36	$1.4 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^2$	$1.4 \cdot 10^3$	$8.6 \cdot 10^{-2}$
F ¹⁹	$7.5 \cdot 10^{-2}$	$5.6 \cdot 10^2$	$1.6 \cdot 10^4$	$3.8 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^{-9}$
Na ²⁴	0.73	48	68	$8.5 \cdot 10^2$	$5.5 \cdot 10^{-9}$
P ³²	0.2	19	36	$1.6 \cdot 10^2$	$6.6 \cdot 10^{-3}$
S ³⁵	$7.4 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^2$	$3.8 \cdot 10^2$	$1.4 \cdot 10^3$	$3.7 \cdot 10^{-6}$
K ⁴²	0.53	79	$1.5 \cdot 10^2$	10^3	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Ca ⁴⁶	0.41	$4.4 \cdot 10^2$	$2.4 \cdot 10^2$	10^2	$5.9 \cdot 10^{-6}$
Sc ⁴⁶	{ $7.7 \cdot 10^{-3}$ 肝 0.12 脾	9.2	17	87	$2.7 \cdot 10^{-7}$
Sc ⁴⁷	同上	20	$1.9 \cdot 10^2$	$3.7 \cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
Sc ⁴⁸	同上	8.5	39	$1.5 \cdot 10^2$	$5.7 \cdot 10^{-9}$
V ⁴⁸	0.025	7.1	14	$8.0 \cdot 10^2$	$4.1 \cdot 10^{-8}$
Cr ⁵¹	$4 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^2$	$2.0 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^4$	$5.4 \cdot 10^{-8}$
Mn ⁵⁸	{ $2.2 \cdot 10^{-2}$ 肾 $9 \cdot 10^{-2}$ 脾	33	$1.2 \cdot 10^2$	$3.5 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^{-9}$
Fe ⁵⁹	0.65	$3.1 \cdot 10^3$	$3.4 \cdot 10^3$	$3.6 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^{-3}$
Fe ⁶⁰	0.65	68	27	42	$5.5 \cdot 10^{-7}$
Co ⁶⁰	$7 \cdot 10^{-3}$	11	14	$1.1 \cdot 10^3$	$9.5 \cdot 10^{-6}$
Ni ⁶³	$7 \cdot 10^{-3}$	94	$4.1 \cdot 10^2$	$1.7 \cdot 10^4$	1.2
Cu ⁶⁴	0.13	86	$1.1 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 10^{-8}$
Zn ⁶⁵	$4.5 \cdot 10^{-2}$	49	63	$4.5 \cdot 10^3$	$5.9 \cdot 10^{-6}$
Ga ⁷²	0.1	8.9	10^2	$6.7 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^{-9}$
Ge ⁷¹	$5 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^2$	$2.6 \cdot 10^2$	$2.7 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^{-6}$
As ⁷⁶	$2.7 \cdot 10^{-3}$	4.9	76	$1.3 \cdot 10^{\pm 3}$	$3.1 \cdot 10^{-9}$
Rb ⁸¹	0.33	$1.3 \cdot 10^2$	32	$4.3 \cdot 10^2$	$4.1 \cdot 10^{-7}$
Sr ⁸⁹	0.22	17	39	30	$6.1 \cdot 10^{-7}$
Y ⁹⁰	0.14	5.2	—	—	$9.1 \cdot 10^{-9}$
Sr ⁹⁰ +Y ⁹⁰	0.22	21	21	15	$7.5 \cdot 10^{-6}$
Y ⁹¹	0.14	6.6	38	47	$2.6 \cdot 10^{-6}$

表 2-23 (續)

同位素	进入紧要器官的分数 f	腸胃中容不溶化合物	肺中容不溶化合物	表 2-22 的列第二行所容可紧要器官里溶化合物	重量(毫克)
Nb ⁹⁵	0.12	46	43	5.0 · 10 ²	8.9 · 10 ⁻¹³
Zr ⁹⁵ +Nb ⁹⁵	5.8 · 10 ⁻²	16	22	3.3 · 10 ²	7.5 · 10 ⁻⁷
Mo ⁹⁹	2 · 10 ⁻⁴	69	85	2.8 · 10 ⁵	1.5 · 10 ⁻⁷
Tc ⁹⁹	3 · 10 ⁻³	23	24	1.4 · 10 ³	7.0 · 10 ⁻⁸
Ru ¹⁰⁶ +Rh ¹⁰⁶	10 ⁻²	2.7	14	61	7.9 · 10 ⁻⁷
Rh ¹⁰⁶	2 · 10 ⁻²	20	1.6 · 10 ³	4.2 · 10 ²	2.4 · 10 ⁻⁸
Rh ^{103m}	2 · 10 ⁻²	4.0 · 10 ³	—	—	1.2 · 10 ⁻⁶
Pd ¹⁰³ +Rh ^{103m}	4 · 10 ⁻²	1.2 · 10 ²	3.2 · 10 ²	4.3 · 10 ²	1.6 · 10 ⁻⁶
Ag ¹⁰⁶	2 · 10 ⁻³	9.4	13	6.1 · 10 ³	3.4 · 10 ⁻⁷
Ag ¹¹¹	2 · 10 ⁻³	11	78	1.5 · 10 ⁴	7.0 · 10 ⁻⁸
Cd ¹⁰⁹ +Ag ¹⁰⁹	0.19	1.3 · 10 ³	2.9 · 10 ²	5.9 · 10 ²	5.1 · 10 ⁻⁵
Sn ¹¹³	7.6 · 10 ⁻²	44	68	2.8 · 10 ³	4.2 · 10 ⁻⁶
Te ¹²⁷	2 · 10 ⁻²	18	66	1.6 · 10 ²	2.0 · 10 ⁻⁶
Te ¹²⁹	2 · 10 ⁻²	6.1	16	54	2.0 · 10 ⁻⁷
I ¹³¹	0.15	2.9 · 10 ²	65	2.1	1.7 · 10 ⁻⁵
Cs ¹³⁷ +Ba ^{137m}	0.36	2.2 · 10 ²	36	4.3 · 10 ²	4.5 · 10 ⁻⁴
La ¹⁴⁴	0.1	6.2	44	2.1 · 10 ²	1.1 · 10 ⁻⁶
Ba ¹⁴⁰ +La ¹⁴⁰	0.2	7	13	26	9.5 · 10 ⁻⁸
Pr ¹⁴⁴	6.3 · 10 ⁻²	2.4 · 10 ²	—	—	3.2 · 10 ⁻⁹
Ce ¹⁴⁴ +Pr ¹⁴⁴	0.1	2.9	15	28	9.2 · 10 ⁻⁷
Pr ¹⁴³	6.3 · 10 ⁻²	13	81	2.2 · 10 ²	2.0 · 10 ⁻⁷
Pm ¹⁴⁷	9 · 10 ⁻²	56	3.1 · 10 ²	5.9 · 10 ²	5.9 · 10 ⁻⁵
Sm ¹⁵⁴	5 · 10 ⁻²	1.9 · 10 ²	10 ³	7.3 · 10 ²	8.0 · 10 ⁻³
Eu ¹⁵⁴	9 · 10 ⁻²	11	25	1.7 · 10 ²	7.5 · 10 ⁻⁵
Ho ¹⁶⁶	7 · 10 ⁻²	9.2	1.4 · 10 ²	3.9 · 10 ²	1.3 · 10 ⁻⁵
Tu ¹⁷⁰	0.18	12	65	64	2.0 · 10 ⁻⁶
Lu ¹⁷⁷	7.5 · 10 ⁻²	28	1.7 · 10 ²	7.2 · 10 ²	2.6 · 10 ⁻⁷
Ta ¹⁸²	7.5 · 10 ⁻²	12	26	1.4 · 10 ²	1.8 · 10 ⁻⁶
W ¹⁸⁷	2.4 · 10 ⁻²	16	19	2.8 · 10 ⁴	3.1 · 10 ⁻⁶
Re ¹⁸⁷	1.3 · 10 ⁻³ { 甲状腺 0.12 皮肤	50	33	4.2 · 10 ³	5.5 · 10 ⁻⁶

表 2-23 (續)

同位素	进入紧要器官的分数 f	腸胃中容不溶化合物	肺中容不溶化合物	表 2-22 的第二行所列紧要器官里可溶化合物	重量(毫克)
Ir ¹⁹⁰	1.7 · 10 ⁻² 腎	81	1.3 · 10 ²	8.8 · 10 ²	1.3 · 10 ⁻⁶
Ir ¹⁹²	6 · 10 ⁻² 脾	12	22	93	1.3 · 10 ⁻⁶
Pt ¹⁹¹	3.2 · 10 ⁻²	17	36	1.3 · 10 ²	7.4 · 10 ⁻⁸
Pt ¹⁹³	3.2 · 10 ⁻²	21	35	1.2 · 10 ²	1.3 · 10 ⁻⁷
Au ¹⁹⁶	0.25 肝 0.72 腎	50	84	1.3 · 10 ²	4.1 · 10 ⁻⁷
Au ¹⁹⁸		13	82	61	5.3 · 10 ⁻⁶
Au ¹⁹⁹		39	1.9 · 10 ²	1.6 · 10 ²	1.9 · 10 ⁻⁷
Tl ²⁰⁰	0.26	28	79	1.2 · 10 ³	4.8 · 10 ⁻⁸
Tl ²⁰¹	0.26	2.1 · 10 ²	2.7 · 10 ²	4.2 · 10 ³	9.6 · 10 ⁻⁷
Tl ²⁰²	0.26	1.2 · 10 ²	1.2 · 10 ²	2.0 · 10 ³	2.2 · 10 ⁻⁶
Tl ²⁰⁴	0.26	27	82	1.4 · 10 ³	6.3 · 10 ⁻⁵
Pb ²⁰³	0.098	44	1.1 · 10 ²	4.0 · 10 ³	1.5 · 10 ⁻⁷
Po ²¹⁰	0.004	6.4 · 10 ⁻²	—	1.8	1.4 · 10 ⁻⁸
Bi ²¹⁰ + Po ²¹⁰	—	5.8	—	—	4.6 · 10 ⁻⁸
Pb ²¹⁰	0.098	—	0.37	—	4.7 · 10 ⁻⁶
Pb ²¹⁰ + 子产物	0.098	—	—	0.64	8.2 · 10 ⁻⁶
Pb ²¹⁰ + Po ²¹⁰	0.098	39	0.37	—	4.7 · 10 ⁻⁶
At ²¹¹ + Pb ²¹¹	0.05	1.7	6.3	0.31	1.5 · 10 ⁻¹⁰
Bi ²¹⁴ - Po ²¹⁴	—	3.3	—	—	7.4 · 10 ⁻¹¹
Pb ²¹⁴ - Po ²¹⁴	0.098	4	—	—	1.2 · 10 ⁻¹⁰
Rn ²²² - Po ²¹⁰	—	2.1 · 10 ⁻²	—	—	1.4 · 10 ⁻²
Ra ²²⁶ - Po ²¹⁰	0.026	5.1 · 10 ⁻²	—	—	5.2 · 10 ⁻⁵
Ra ²²⁶ + 55% 子产物	0.026	—	8.3 · 10 ²	0.95	8.4 · 10 ⁻⁵
Pb ²¹¹	0.098	2.7	—	—	1.1 · 10 ⁻¹⁰
Ra ²²³ - Pb ²¹¹	0.026	1.8 · 10 ⁻²	—	—	3.4 · 10 ⁻¹⁰
Th ²²⁷ - Pb ²¹¹	0.2	4.7 · 10 ⁻²	—	—	1.5 · 10 ⁻⁹
Ac ²²⁷ - Pb ²¹¹	0.075	1.1	—	—	1.5 · 10 ⁻⁵
Bi ²¹²	—	1.9	—	—	1.3 · 10 ⁻¹⁰
Pb ²¹² + Bi ²¹²	0.098	0.12	—	—	8.5 · 10 ⁻¹¹
Ra ²²⁴ + Bi ²¹²	0.026	2.2 · 10 ⁻²	—	—	1.4 · 10 ⁻¹⁰

表 2—23 (續)

同位素	进入紧要器官的分數 f	腸胃中容不溶化合物	肺中容不溶化合物	表 13—22 的列第二行所緊要器官里可溶化合物	重量(毫克)
Th ²²⁹ -Bi ²¹²	0.2	$3.5 \cdot 10^{-2}$	—	—	$4.2 \cdot 10^{-8}$
Ac ²²⁸ -Bi ²¹²	0.075	20	—	—	$8.8 \cdot 10^{-9}$
Ra ²²⁸ -Bi ²¹²	0.026	6.4	—	—	$2.7 \cdot 10^{-5}$
Ac ²²⁷ +子产物	0.75	—	$6.3 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-7}$
Tb ^{nat}	0.2	—	$5.6 \cdot 10^{-2}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$	70
Th ²³² -Bi ²¹²	0.2	$9.2 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
Th ²³⁴ +Pa ²³⁴	0.2	4.4	0.25	23	$1.1 \cdot 10^{-8}$
U ^{nat}	0.08	—	0.22	0.11	330
U ²³⁸	0.08	—	—	2.6	7700
U ²³⁵	—	2.5	—	—	1200
U ²³⁴	—	$7.7 \cdot 10^5$	—	—	$1.2 \cdot 10^{-2}$
U ²³³	0.05	$7.5 \cdot 10^{-2}$	0.42	1.3	$7.9 \cdot 10^{-3}$
Pu ²³⁹	0.18	$7.1 \cdot 10^{-2}$	0.39	$6.1 \cdot 10^{-2}$	$9.7 \cdot 10^{-4}$
Am ²⁴¹	0.063	$6.7 \cdot 10^{-2}$	0.37	1.0	$2.2 \cdot 10^{-3}$
Cm ²⁴²	0.063	$6.0 \cdot 10^{-2}$	0.32	0.87	$1.8 \cdot 10^{-3}$

2. 防止由消化系統进入人体

(1) 禁止用口吸取溶液，当然在实验室内亦不应吃喝，吸烟，或以其他部分与口腔接触。

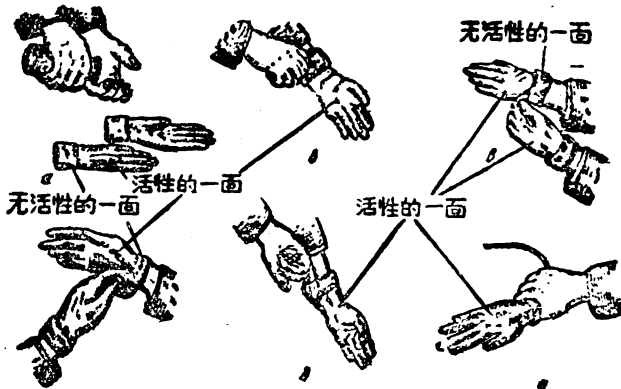


图 2—14 戴和脱手套的方法
前面三个是戴的情况，后面三个是脱的情况

(2) 工作必要时一定要戴手套口罩。口罩和手套内部，特别是口罩要保持高度的清洁，戴上手套后不要乱摸别的东西。不要用已破的手套。并须注意手套的表面及里面，不要将沾污了的外表面翻转到里面戴上手去。戴手套的顺序和方法见图 2—14。

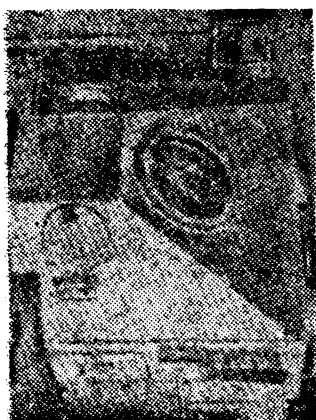


图 2—15 貯存放射性廢物的污物筒

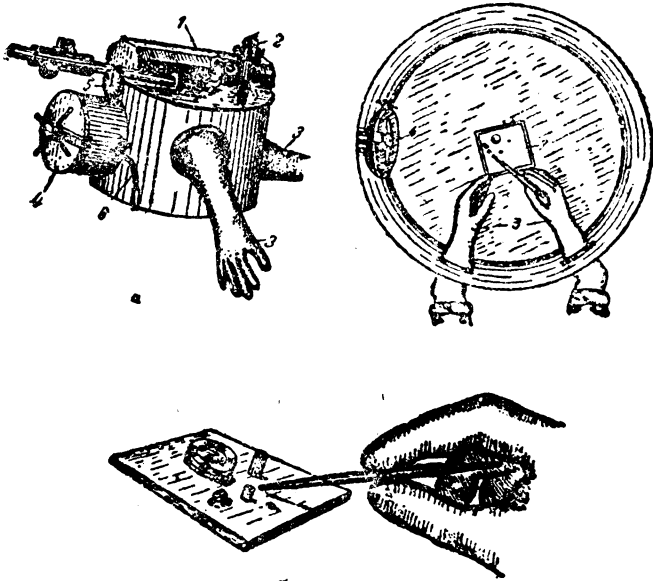


图 2—16 通風橱，手套箱（干室和湿室）

(4) 指甲常剪，工作后，离实验室前应很好的洗手，检查手以及可能污染的部分到容许程度以下才能离开。

(5) 尽量减少以至杜绝放射性物质散布造成污染。放射性废物应贮存在专用的污物筒中，定期处理。

3. 防止通过呼吸系统进入体内

(1) 室中保持高度的清洁，经常清扫，不要用扫帚干扫，因为这样会引起尘土飞扬。应用吸尘器吸去地面上的灰尘或用潮湿的拖布拖拭。遇有污染时应慎重处理。

(2) 室中要有良好的通风，必要的工作如煮沸，烤干，蒸发等应在通风柜中进行。处理粉末应在手套箱中进行。

(3) 调节气流使新鲜空气先通过工作者而后经过放射性物质排出。

(4) 如工作有必要时，还可戴滤过型呼吸器。特别是其内部应保持高度清洁。

4. 防止通过皮肤进入体内

(1) 小心工作，不要让仪器等物特别是沾有放射性的部分割破皮肤（最危险）。

(2) 手如有小伤要妥善包扎后戴入手套再工作，如伤部不小，需停止工作。

(3) 不要用有机溶剂洗手和涂敷皮肤，否则会增加对放射性物质的渗透性（如溶有放射性物质的乙醚、氯仿、三氯乙烯等溶液可以通过正常的皮肤进入体内）。

除了以上三方面具体的措施外，下列原则仍然是重要的：

(1) 选择同位素时，在满足实验要求的情况下尽量取危险性小的应用。

(2) 取用的量尽可能的少。

(3) 尽可能的简化手续，缩短操作时间。

第三章

放射性同位素的安全使用

本章將敘述放射性同位素的一般的安全操作。不可能在此章中對一切放射性同位素的应用作詳盡充分的安全使用的描述，只對小規模应用的放射性實驗室的操作，敘述一些一般應採用的措施及應留意的地方。在一切情況下，各应用單位的領導都應負責建立及維持安全防護的標準措施。在操作微量放射性的實驗室，我們所要討論的措施可以省略或加以修改，但需請防護專家作周期性的監察，看是否需要加強控制，大實驗室或工廠需要較嚴密的詳盡的管理，需得有專職的輻射防護人員，尤其是操作放射性的工作人員超過 20 人時，更為必要。

§3-1. 放射性實驗室 放射性實驗室與一般化學實驗室不同，須有特殊的設計及裝備。牆壁、門窗和天花板都要塗上一層耐酸的油漆、地面要用光平的材料，例如上釉的瓷磚，磚塊可以比常用的瓷磚大些和厚些，混凝土和木板完全不宜鋪化學實驗室的地面。瓷磚接縫處可以用油石灰填塞好。上面再塗一層硝基纖維漆。毫居里量的實驗室無須外加的表面防護物，700 毫居里的實驗室最好塗上一層剝得下來的防護層。若是沾污了，可以剝下來當廢物處理。電燈、電綫應當裝在牆壁內，以免積聚沾污的塵土。地板要能負荷重量，有時需要能負荷 2 噸的鉛。洗滌池用不銹鋼或上釉的瓷器。櫃子少用把手，少用抽屜。實驗室要有良好的通風設備。操作大量放射性的實驗室每分鐘需通風 4000 立方呎。氣流應從無放射性的地方或弱放射性的地方通向放射性強的地方。

設計實驗室時還應當把高放射性、中放射性、低放射性、計數區域及行政區域，依上列次序排列。操作放射性的房間需應聚在一起，不操作放射性的房間，如辦公室等，應聚在另一處。

一般化学实验室的通风橱，效率不高，只适合于微居里级的放射性操作。放射性较高的实验室的通风橱应特别设计。出气道口可以安一个活动障板，这样可调节通风速率。距橱口 20 厘米的地方可划一直线，一切操作需在线的后边进行。橱内前部的左右两端可装两个环形倾泻池，这比一般的设在后面的安全方便些。煤气、水、真空等应开口在橱内前部的两边。橱前外部两边，至少每一边有一个电插头。

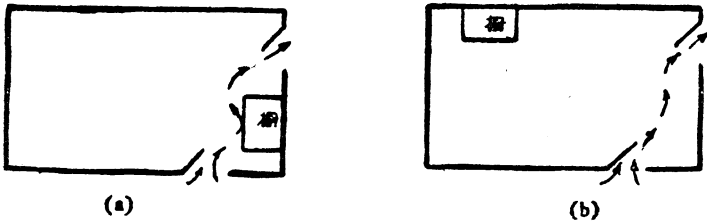


图 3—1 橱的位置应避免空气流
(a)橱的位置不好，(b)橱的位置恰当

再好的通风橱都要受强空气流的影响。所以橱的位置很重要；不应放置在强空气流的地方。室内若有两个橱，马达应由一个开关控制。若一橱通风，一橱不通风，则未通风橱内的沾污会传入室内。不用时橱窗应随时关上。

橱的出气道的口应高出屋顶五至十呎，以免沾污空气回入室内（图 3—3）。

鼓风机应在屋顶，那么马达与橱间的压力小于大气压，排气管若有漏气的地方，亦不过把空气从外面吸入管内，然后再从管口排出。假若马达只在橱的上面，那么马达以上的压力大于大气压，排气管若漏气，则沾污的空气会从管内漏出，进入室内（图 3—4）。

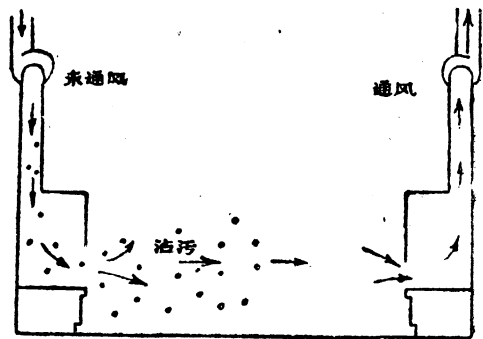


图 3—2 一橱通风，一橱未通风，沾污传布之状

通风马达应在管道外而不应在管道内，以免将马达

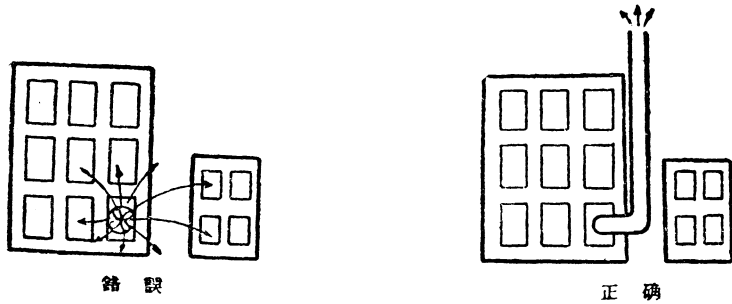


图 3—3 通風櫥出氣管道口的位置

沾污，应用离心式的馬达，不要用軸流式的（图 3—5）。

直綫風速約为每秒 1—5 米。特別危險操作，如操作长半衰期的銻、鈣等放射性同位素于动物的呼吸实验时，工作人員应着适宜的呼吸器或供应空气的面具。通風櫥宜有过滤装置。

櫥柜，凳子，家具等应用无孔性的材料表面要光滑，避免有隙縫，有尖角。木材多孔隙，易聚积放射性物质，不易去污，上层油漆后較好，地面材料很重要，应注意选择；树胶磚孔隙性小，不起化学作用，接縫处填好适于作地面材料，沾污了亦可換置。油漆布孔隙性小，上腊后更好，边縫及裂縫亦須填好。但价高，不易小块小块地更換。磨光不銹鋼很好，但很貴，亦可为酸性（特别是 HCl）烟霧腐蝕。普通的滾压不銹鋼反不合宜，其微細小孔易渗入沾污。玻璃很好，抗化学腐蝕，且极易去污，但易破碎。鋼化玻璃宜于作桌面或其他工作表面，不易破碎，但重大的打击亦可破裂，桌面应只用一張这种材料。可剝下的塑料可用以遮蔽工作表面，孔隙性小，易于更換，但有为有机溶剂溶解的危險。普通的油漆，除用以保护牆壁外，不适用，易吸收活性物质，且与之起化学作用，亦为有机溶剂溶解。乙烯地板面或乙烯磚能抗化学腐蝕，且不易磨損。裂縫

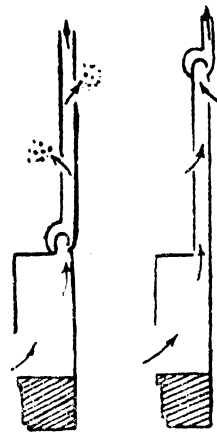


图 3—4 風扇的位置

应填好，为有机溶剂溶解。

放射性同位素的存储应使其射线不致对工作人员有害，也不致影响照相胶片或影响计数率。运输用的容器亦可用于在实验室中的存储。 β 放射体的混凝土容器(图3-7a)即可在实验室中作为容器，不必退还同位素生产单位。 γ 放射体的铅罐(图3-7b)，必须在一月内退还，实验室可根据原容器自作一铅或铸铁容器，作为存储之用。存储容器可置于实验室内偏僻的一角，不须另加屏蔽。

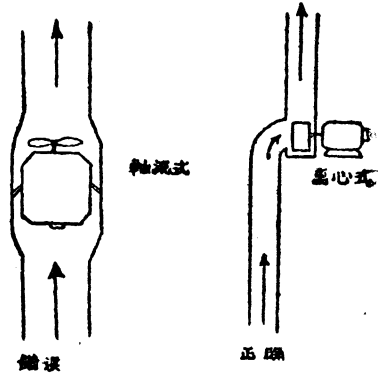


图3-5 通风马达类型及其位置

高水平实验室可作一存储室，用混凝土作成。内有一系列的孔道可盛放射性同位素的瓶，孔道用混凝土的或铁的或铅的塞子盖着。

罐式容器比窖式容器经济，但如水平高，要盛的放射性同位素的种类多，则亦可用窖式。存储同位素应考虑地板的负荷，不要超出负荷。

若不用罐式或窖式容器时，可用铅砖、铁砖或石砖屏蔽放射性，至少四方都应有屏蔽，放射性在1居里以上时，则应六方都有，以免“天空”的散射。室内要检查剂量强度，存储放射性的隔壁的近墙处亦应检查。

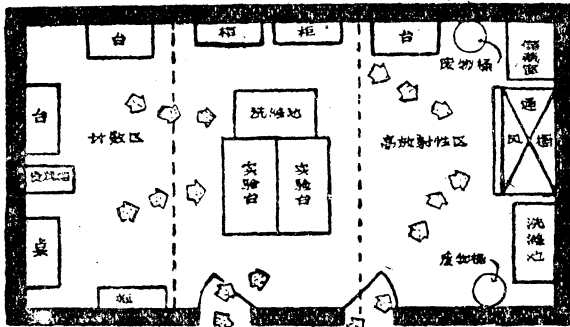


图3-6 低水平放射化学实验室各区的排布及通风情况

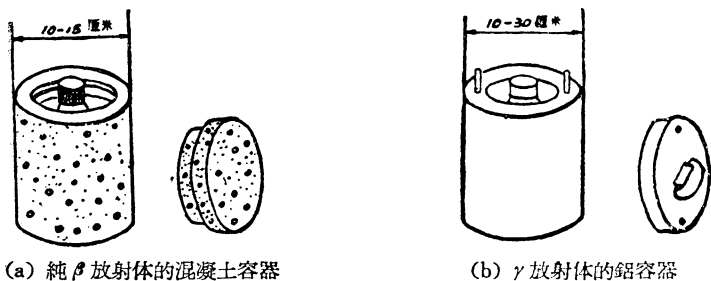


图 3-7 运输容器

手套箱是一密封的金属箱，装有手套，可在手套内将手伸入箱内工作，不致将手沾污，或将放射性物质吸入体内。弱 β 放射体如 S^{35} 及 C^{14} 最好在箱内操作。可用不到一匹马力的马达通风使箱内维持负压，由箱通出的空气可通过滤器，再入通风管道。手套箱可局限沾污，去污的空间亦比用通风橱为小。更简单的工作，手套箱不通风亦可。

随放射性水平的不同，应有适当的装备及器具，包括夹子、镊子、盘子等。毫居里级的放射性的操作应用长柄操作手，亦应包括半远距离控制的取样设备及搅拌设备。更高的水平应有特殊设计的远距离控制设备，包括光学系统如潜望镜或反射镜等。纯 β 放射体可用透明的有机塑料作为密封装置的墙壁。

暂时存储放射性废物的废物桶须易于去污，在废物桶中置一硬纸袋，再将废物放入其中。废物桶须是足踏式，而且须特别设计，使其桶盖开启时，不致将沾污空气从废物桶中吹向工作者。液体废物的容器若易破裂的，须有不碎的外容器保护之。

洗涤池或下水池最好不要有尖角，以便于去污。两边各置一漏水板，一边的放沾污了

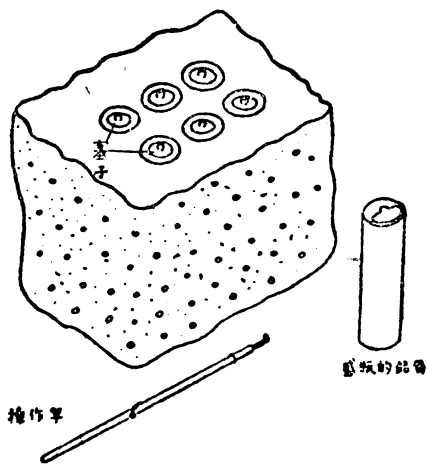


图 3-8 存储容器

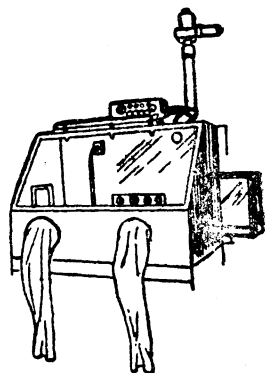
的玻璃器，一边的放洗干净的玻璃器，这样可以避免刚洗了的又被沾污。放水应用足踏式、臂动式或膝动式的龙头。下水管的接头和弯曲的地方越少越好。

现将一般放射化学实验室所需设备列于表 3-1 以供参考。各实验室应本多快好省原则，就实际情况斟酌设置。

单房实验室适于操作低能量（小于 0.3 兆电子伏）的 β 放射体几个毫居里或微居里级的高能量的 β 放射体或 γ 放射体。在单房实验室中须极力避免低水平样品为高水平放射性所沾污，并须维持本底使其很小，以免影响计数。因为化学操作和计数都在同一房中，故计数区域应远离化学操作区。因为操作的是弱 β 或微量的 γ ，故通风橱的屏蔽及远距离不致使计数器受到影响，但须大力注意，不使计数器受到沾污。在实验台上或橱内操作都需在瓷盘内进行。

双房实验室的计数在别一房中进行。化学操作室内高低水平放射性物质的操作应使用分别的玻璃器具或其他设备，以免交叉沾污。通风橱专用于高水平或挥发性放射性物质，实验台专用于低水平放射性物质。双房实验室可操作低毫居里量的任何放射性同位素。

在三房实验室中，高水平放射性操作、低水平放射性操作、计数各占一房。有时可将单房或双房用隔板分隔为三房实验室。低水平区在中間，两头一为高水平区，一为计数区，通风应由计数区经过低水平区，从高水平区出去。低水平区可设一计数管以检查工作人员的手、衣、鞋等。



手套箱

图 3-9 手套箱

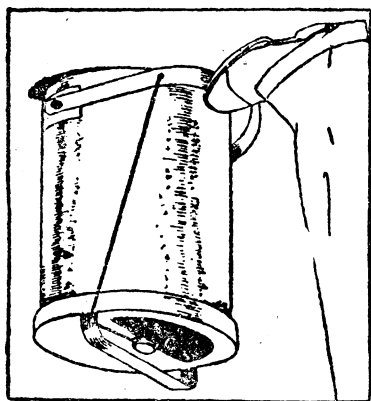


图 3-10 固体废物桶

总之，放射性实验室的设计须考虑三要素：(1) 安全，(2) 经济，(3) 便利。放射性沾于人体可能引起伤害，实验室中必须有安全设备并须进行安全操作以保证工作人员的健康。应用放射性同位素的计划若在一月内可能完成，则不必建造实验室，可委托或协同其他放射性实验室执行。若须数月完成，可将现成的非放射性实验室改装，设置一些简单、经济的操作设备。若计划为长期的，可考虑设置耐用而较贵的设备。若经济与安全有矛盾时，应以安全为第一。放射性实验室中操作的难易，对工作人员是很重要的问题，但方便若与安全有矛盾，只有牺牲方便，方便有时亦须服从于经济。

表 3-1 放射化学实验室设备

一般设备	单房	双房	三房	一般设备	单房	双房	三房
	实验室	实验室	实验室		实验室	实验室	实验室
通风橱	1	1	2	长夹子	0	0	1
办公桌	3	4	5	短夹子	2	4	6
实验台	1	1	2	针筒移液管(套)	1	1	2
储物柜	1	2	3	辐射仪器			
瓷洗涤池	1	1	2	定标器	1	1	2
瓷盘	2	4	6	备用计数管	1	1	2
废物桶	1	1	2	计数管铅屏蔽圆筒	1	1	2
同位素存储罐	2	3	4	剂量检查仪	1	1	1
铁砣或铅砣	10	20	40	钢笔式剂量计或剂量胶片	2	3	4
有机玻璃屏	2	2	3	吸收片(套)	1	1	1

§3-2. 工作人员 放射性同位素的工作人员要养成平时小心、整洁的习惯。从事工作前应严格检查身体，尤应注意其从前受过照射否。新从事工作的人员应详细告知以可能遭遇到的危害，给以剂量防护的教育，并应习惯于严格遵守安全防护的规章、制度。

从事放射性工作前要详尽的检查血液、定时连续查血两天最好。血液检查发现不正常的人不得参加放射性工作。在工作期间应定期，如三月一次，检查血液。应特别注意连续两次检血的变化，特别是两次检查的差别。要注意的是，受了超过剂量的照射不必一定引起血液的变化。但严重伤害发现以前是可以从检血中发现的。

工作人員應每年全身檢查一次到兩次。受到照射的可能越大時，檢查的間隔越短。檢驗的性質則隨所操作的放射性的不同而有異。對於一切放射性都能發生反應的靈敏的檢驗法是容易的。

尿中的放射性應當檢驗。尿中含有的自然放射性元素鉀有時妨礙其他放射性的檢驗。或者將鉀分離，檢驗余下的放射性，或若已知某一種放射性同位素，則將該同位素從尿中分離亦可。若同位素可能從胃腸排出，則應檢驗大便。檢驗特種放射性同位素如碘時，則可檢查甲狀腺。若暴露於放射性的微塵或霧煙時，應檢查鼻涕或鼻孔擦拭物，或吐的痰。

放射性同位素應如其他毒物一樣處理，實驗室內個人應特別注意整潔。放射性物質不能使之濺潑或散落，不應與衣着及手接觸。工作完畢必須仔細洗手。若一時不能將手完全洗干淨，不得用那隻手取食物或吸煙（否則可能將放射性食入胃內或吸入肺內）。並須設法去除手上沾污。

欲防止實驗室內沾污的傳布，實驗室內必須維持整潔，有条不紊。非需用的儀器以及材料、藥品等不得放在工作區域。工具、設備用後即要清洗、去污，並儲放於控制地區。

劑量防護人員應注意各種工作是否在安全狀況下進行。如認為不安全時，劑量防護人員有權停止其工作。規章、制度是否嚴格執行，個人的沾污是否檢查，廢物如何處置等等，必須經常檢查、監督，以使每一工作人員遵守必需程序，為了自己的安全，也為了其他同志們的安全。在放射性實驗室中輻射防護的技術及知識，與化學、生物的技術操作一樣重要。必須熟悉應用防護技術。

§3—3. 安全檢查 工作人員需佩戴鋼筆式劑量計或劑量膠片。鋼筆劑量計每日查看，劑量膠片每周沖洗一次。經驗證明，若經常受的照射很低時，可每兩周沖洗一次。同樣情形下的鋼筆劑量計，假若漏電不多，亦可多帶一、二日。

每一工作人員應檢查自己的沾污，包括衣服、手或其他部分的定性沾污檢查。沾污一發現，必須立即去污。上午工作完畢，在進餐前，及下午下班前都必須很好檢查手的沾污。手上受了割傷的不得進

行工作。

工作地点要作定期性的檢查。用钟罩形盖革計数器，其云母窗面积为 2 平方吋的，以一般的移动速度在沾污表面或可疑的表面上檢查，若計数器有明显的反应，表示沾污过度，虽对于工作人員尚不致有危險，但亦須进行去污，以維持工作地点的极端清潔。但須注意檢查仪器需能檢查放射性同位素的輻射。如对 C^{14} 需用云母薄窗以檢查其軟 β 射綫。若可能发生气体、蒸汽、粉末或雾状的放射性物质时，則須經常檢查实验室內的空气。

工作服在脱下之前需要檢查。沾污很厉害的可作固体廢物处理，置于密闭容器中，其他的需洗滌，并于洗后再經檢查。需有专用的洗放射性衣物的設備，不可送出去与普通衣服一齐洗，洗用試剂随所沾污的化学性质而異。一般可用稀醋酸或稀檸檬酸。橡胶衣物可用稀硝酸。对第一类及第二类的放射性同位素的沾污，工作服的最高允許为 1 毫倫/小时或 1000 計数/分（两平方吋的盖革計数器）。对第三类毒性极大的放射性同位素的沾污，最高允許为小于 0.1 毫倫/小时或小于 100 計数/分。

除非是新到、新开的，一切工具仪器要先測量后才能使用。沾污的允許量同上节所述。

廢物桶亦应檢查，有时并須檢查其周圍的空气，看受了沾污与否。液体廢物亦要檢查。放射性廢水下水管弯曲聚水的地方要每周檢查，以防放射性聚积在那里。剂量率不得超过每一工作日（6 或 8 小时）10 毫倫。

总之，工作人員、工作衣物、工作用具、工作地点等都需时常檢查有无沾污。在每一新的实验开始前及结束后，都要檢查，并需作周期性的檢查。

工作人員受到或可疑受到过度照射，应立即离开危險地区，若非經医生檢查不致引起輻射伤害，不得回到原来的輻射工作。

工作人員被放射性溶液濺潑，应立即冲洗被濺部分，若沾污尚未去除，則应使用去沾污的制剂。若放射性溶液的化学性质不明，可試用 EDTA，或鈦白粉，或飽和 $KMnO_4$ 溶液继之以 5% $NaHSO_3$ 溶液

的洗滌。手上某点受到高放射性比度的沾污时，不宜洗手的全部，將沾污傳布到全手。以棉花醮去污剂在該点擦拭。不宜用热水洗手或身上，以免將毛孔放大，吸入放射性物质，不要將皮肤擦伤，注意指甲下，不要留沾污。吸入或吞入放射性物质，或被放射性沾污器皿划破皮肤的处理見 §4—5 节。

§3—4. 安全的控制 实验区域，实验工具，工作人員的沾污問題，是非常重要的問題。每一放射性工作者必須經常注意防止沾污，并限制其傳布。主要目的是为了工作人員的安全。为了公共的安全，必須不让沾污傳到实验室以外。要得到精确可靠的測量結果，实验室內的沾污必須減至最少限度。工作人員必須先懂得安全操作方法，怎样防护自己，防护別人。

各种药品、盛器等都要貼上标签，說明年、月、日、实验人姓名、那一种放射性物质、放射性的大小、注意事項等等。工作地点，如工作人員离开，相当长时间内无人照顾时，要挂上显明的牌子，以免不知道的人去接近。沾污了的地方，或有可疑沾污了的地方亦应标明，以免有人进入。反之，需要特別保持清洁的地方亦要标明。不要把沾污帶到办公室或會議室等地方。这些地方的工作人員并没有操作放射性物质，因此警惕性并不要求高，譬如說，当然可以抽烟的，但若把沾污傳播到这些地方，对这些地方的工作人員就有危險了。

各个应用放射性同位素比較多的单位应有一輻射防护小組，監督、管理放射性物质的操作、使用。小組中应包括一个对放射性物质的操作、測量及防护有經驗或至少有訓練或知識的人員。他的职责是：

- (1) 檢查或批准工作地点及防护措施；
- (2) 檢查或批准特种或非常操作的特別安全措施；
- (3) 維持各实验室的經常或周期性的檢查及剂量測定；
- (4) 檢查工作人員是否遵守安全規章；
- (5) 在特种情形下，規定允許的工作時間，并将情况事先报呈領導；
- (6) 帮助解决新发生的輻射防护問題；
- (7) 保持各种放射性物质的記錄，及工作人員个人所受輻射剂量

的記錄。

輻射防護小組應指定專人負責接收、處理、標籤、貯存、分發、處置各種放射物質。

§3—5. 實驗室規則 進入實驗室時，工作人員須佩戴或攜帶劑量儀器，每周劑量不得超過 0.3 倫。每三月或其他需要時，檢查血液一次。

(1) 實驗室內指定專人負責接收、儲藏、取用放射性物質，並應保有記錄。

(2) 放射性物質在工作人員間的轉移，應在擬定的表格上記錄簽署。

(3) 某一區域，不能容許若干量以上的放射性進入時，應明顯的標明。

(4) 劑量超過 100 毫倫/每小時的區域，應明顯標明。

(5) 放射性的溶液，應在通風櫥內操作，以免吸入放射性物質。操作放射性的固體粉末，應戴特殊的防護口罩或防毒面具。

(6) 可能受沾污的台面、凳面，要用吸收紙蓋起來，並隨時檢查，沾污了應作廢物處理，另換新紙。操作應在蓋上吸收紙的瓷盤或不銹鋼盤上舉行。移液管、攪拌棍等用後不得直接放在實驗台上。

(7) 戴橡皮手套，實驗後，就戴在手上洗。

(8) 盡量用遠距離操作器具。

(9) 盡量在防護屏後操作。

(10) 實際操作放射性物質前，常需用非放射性物質練習操作。

(11) 絕對禁止用口吸移液管來轉移放射性液體，不但有偶然把液體吸進口內的危險，也有吸入放射性蒸汽的危險。

(12) 在相當區域內需穿戴防護衣、鞋、帽。

(13) 操作前後要把手測量過，並記錄下來，沾污了時需洗至允許量以下。

(14) 工作人員的實驗衣每周要測量並記錄下來。

(15) 新實驗開始前後要測量、記錄實驗室各部分的放射性沾污。

(16) 非工作人員不得進入實驗室，參觀人員需先得允許，並需

穿防护衣，受测量如工作人员一般。

(17) 防护衣在离开实验室前要脱下，不得穿到外面别的地方。

(18) 每一工作人员应测量他工作区域内的器具、凳面、地面等，并记录下来。若以薄壁盖革计数器测量，最高允许量如下：

鞋	每分钟 1000 次；
衣	每分钟 500 次；
台面、地面等	每分钟 300 次；
塗搽試驗（两平方吋的滤紙 12 平方吋的凳面）	每分钟 300 次；

(19) 廢物放在以足操作的廢物桶中。

(20) 实验室应每周检查一次清洁。

(21) 抽烟、吃、喝也是绝对禁止的。

(22) 放射性物质应貯藏在防护着的地点。放射性物质需經批准后才能拿出室外。

(23) 放射性廢液貯藏到衰变至允许量以下，超过允许量以上的放射性不能从洗滌池放出。

(24) 任何仪器、工具等未测量，未得允许前，不得拿出实验室。

(25) 盛放射性物质的容器应放在不易碎的外盛器中，盛液体的容器要加盖。

(26) 与放射性操作无关的操作，不要在放射性实验室内举行。

第四章

放射性污染的去除

§4—1. 去除污染的重要性

(1) 从安全观点来说，实际工作中在百次千次万次的操作中，难免不发生放射物质的污染，如溅出、打翻等情况。如果不采取紧急措施，则对于空气、下水道、试验室和周围环境都会引起放射性的急速增长。这样不仅对本人、周围同志不利，甚至使工作停顿和威胁着附近居民的安全。曾经有人举出这样的例子来说明其危险性：含 1 克 P^{32} 溶液能引起一亿人口的死亡，而 P^{32} 还不是最毒的同位素（因为 0.01 微克的 P^{32} 即约 3 毫居里的 P^{32} 浓聚在骨头里会引起几百伦的剂量而致死亡）。当然这例子不是很恰当的，因为一般污染量不会有这么多，但可以说明污染的危害是多么大，和保持环境的卫生是多么的重要。

(2) 从实验准确度的观点来说，我们的实验总是以测定放射性而得到结果的。如果周围或仪器上有放射性的污染，会使本底增大而影响测量的准确性（误差增大），甚至使此仪器及实验室暂时不能工作。如果在烧杯试管等仪器上有未洗净的放射性杂质，则在测量样品时，会得出虚假的结果。这些乱七八糟的数据不能重复，也不能解释。即浪费了时间，又浪费人力物力，甚至将一个很有价值的实验白白地放过，或断送了几个月的工作成果。

§4—2. 污染的情况分类 依据汤姆金(Tompkin)的实验，放射性同位素与物件表面的结合情况可能有三种现象：

- (1) 化学结合（化学吸收，离子交换）；
- (2) 物理结合（吸附）；
- (3) 机械结合。

当选择除污染的方法时，必须考虑以下三种因素：

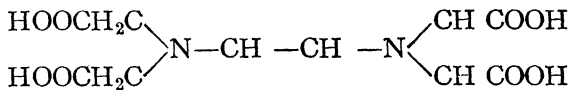
- (1) 沾污的情况。
- (2) 被沾污表面的特点。
- (3) 洗液的性质。

§4—3. 去除沾染的方法 因情况不同，去除沾染方法也不同。想规定一种通用的方法较为困难，只能根据不同情况采用不同的洗液及方法。

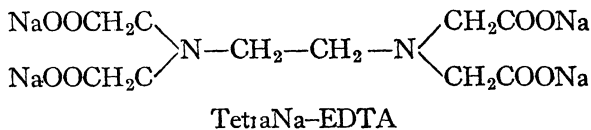
1. 常用的洗液

- (1) 10% 檸檬酸，盐酸（将檸檬酸溶解于稀盐酸中），10% 檸檬酸，8N 硝酸，6% 醋酸，1N 盐酸。
- (2) 5% 碳酸鈉，10% 氨水，5% 氫氧化鈉。
- (3) 0.5% 乙二胺四醋酸鈉（简称 NaEDTA）。

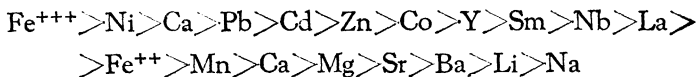
从 1947 年起，对此化合物进行了研究，并被广泛应用在各个方面（如染色，硬水软化等）。EDTA 为无色、无味、无臭之结晶固体，有下列的构造：



在四个羧基上的 H 原子可被金属元素置换，例如与金属钠置换，可生成 DiNa-EDTA，TetraNa-EDTA



EDTA 与金属元素的结合力，受溶液 pH 的影响，在 0.1MKCl 中与金属的结合力可以排成下列顺序：



由上列顺序可以看出 EDTA 与钠的结合力最弱，当其他任一种金属元素存在时，钠极易被他种金属所替代，而使他种金属与 EDTA 结合。与 EDTA 结合后的金属元素有离子化的性质，正是利用它的这种性质，来去除金属放射性同位素的沾染，较之其他洗液效果良好。

除上述洗液外，用相同状态的化合物的稳定性同位素溶液去除污染，也可得到良好效果。如

洗 Ba ¹⁴⁰	用 6N Ba(NO ₃) ₂
洗 P ³²	用 3NHNO ₃ + 3NH ₃ PO ₄
洗 I ¹³¹	用 56% HI,

这就是一些很好的例子。

綜合上述，可見由于沾污了的放射性物质不同，就应该采用不同洗液，不同方法，就必须經過仔細考虑后再决定除沾污的步驟。应该指出，当我们发现污染后，立即洗滌一般是比较容易的，放置时间越久越不容易去掉。下面介紹一些常用的除沾污步驟，作为参考。

2. 除沾污的步驟

(1) 玻璃和陶瓷器皿上沾污的除去。把被污染的物体按沾污程度渐增的次序先后排列。从沾污最少的物件开始洗起，首先用冷水或热水洗滌，实验結果說明，其去污率絕大部分达 99% 以上，比其他材料上污染都容易去除。如果用水不能除去时，可以按下列程序清洗：

(i) 把物件置于盛有 3% 盐酸和 10% 檸檬酸的缸里，浸洗一小时。

(ii) 把物件移置入盛有水的缸里冲洗。

(iii) 浸入鉻酸溶液（重鉻酸鉀的濃硫酸飽和液）中 15 分钟。

(iv) 用水冲洗。

(2) 金屬用具上沾污的除去：

(i) 把用具置于冷水或热水中进行冲洗。

(ii) 把用具置于盛有 10% 檸檬酸溶液的器皿中冲洗。

(iii) 把用具置于盛有水的器皿中冲洗。

(iv) 把用具放在盛有 8N 硝酸溶液的器皿中浸 2 小时。

(v) 用水冲洗。

(3) 塑料和油漆布上的沾污首先可以用冷水或热水洗滌。塑料上沾污时用水来冲洗其去污率达 90% 以上，用水冲洗后仍保留較强的污染时，可以用稀的盐酸或檸檬酸来处理。

(4) 塗漆表面的沾污首先用水来冲洗，当油漆表面很光滑时，用

水洗其去污率达 95% 以上，其次再用 10% 盐酸，磷酸鈉的肥皂溶液清洗。

(5) 有孔的表面（如木料和水泥等材料）除去沾污是极为困难的，可用盐酸和檸檬酸混合液反复多次清洗，要达到接近清洁是困难的。

在清洗过程中，最初放射性减少得很快，后来减慢，似乎达到平衡，因此不断更换新洗液就会使清洗效率提高。

(6) 衣服上沾污的除去。使用放射性样品进行工作的人员或在沾污区域内工作人员的衣服按照馬克-底都夫 (Мак-Дльдуф) 的建議，应注意下列各点：首先衣服要仔細檢查（两平方吋的盖革計数管），依其放射性分为三类：

(i) β, γ 放射源污染了的，計数的脉冲小于 1000 次/分。

(ii) β, γ 放射源污染了的，計数的脉冲大于 1000 次/分。

(iii) α 放射性同位素所污染的。

属于第一类的衣服可以用平常洗衣服的方式清洗，其他两类衣服用下面的方法清洗：

①水中冲洗。

②在 6% 檸檬酸的热溶液中冲洗。

③热水冲洗。

④浸在热水中加除污剂洗。

⑤在酸中冲洗。

⑥在热水中冲洗。

⑦在热水中加入除污剂冲洗。

⑧在热酸中冲洗。

⑨在热水中冲洗。

⑩—⑫水中冲洗三次。

在十二个步骤中每次洗滌約五分钟。倘若完成清洗工作服的前三步之后， α, γ 放射源的脉冲讀数仍然超过 1000 次/分，这件衣服只能分別保管，直到放射性衰减至允許值以下。如果衣服上保持有即使不多的 α 放射性，也应将它妥善地埋入地中。

被污染的衣服必須在專門的房間內用洗衣機來清洗。

皮面衣服和鞋，特別是反皮的衣服，要是沾上污染，極不易除去，故工作時應避免穿皮制服裝和鞋子。

(7) 手套和手上沾污的去除。

(i) 手套在脫下之前，先用肥皂清洗，然後用水沖洗，測定放射性，如仍有放射性物質存在，則用1%檸檬酸水洗，然後再用水洗。

(ii) 手上污染的去除（適合於皮膚的其他裸露區域）。手的沾污程度很輕，用肥皂及軟毛刷子及溫水刷洗五分鐘，測量放射性，不超過容許程度即可。如果超過，再重新洗五分鐘。如手的放射性仍然超過容許程度則採取其它方法洗手。

如已知是何種同位素污染時，則根據該種同位素的性質及手的耐受程度決定適當的洗液，常常收到良好的效果。如不了解污染的是何種放射性物質或受混合的放射性物質所污染時，可採用下述步驟：

①將手浸入飽和的過錳酸鉀溶液。

②用水洗手。

③用新鮮的5%亞硫酸氫鈉洗手。

④用水洗手。

⑤如果需要也可以試用稀酸洗手。

⑥結束後用羊毛脂或軟膏擦手。

應該指出，清除皮膚沾污的洗液，不應採取有機溶劑，因有機溶劑如乙醚、氯仿、三氯乙稀等能增強組織的透過性，使放射性物質容易通過正常皮膚滲入組織中。

如給老鼠皮上塗以硝酸鈾酰的乙醚溶液時，證明可以通過正常的皮膚被吸收。也曾有兩個工作人員，他們的手每天要在硝酸鈾酰乙醚溶液中浸泡兩小時，結果發現有微量的鐳進入體內，對於這種通過皮膚進入體內的危險，應該注意防止。

手上沾污了 P^{32} 的放射性物質時，不能用肥皂洗手，否則反倒不易洗下來。

不宜用較濃的酸洗手（用於洗手的酸不應大於3N），否則會產生看不出的皮膚龜裂，沾污不但不易洗下來，反倒粘了進去。洗手時如

果需用酸，則稀的酸特別是溫熱的稀酸，洗滌效果良好。

EDTA 或其他的螯合劑是很好的洗滌劑，前面已經提到了。它的配制可以用蒸餾水做成 5% 的 EDTA 溶液。太多了是難溶的。也可以用弱氨水來調劑。

3. 沾污表面的允許程度：

沾污表面的允許程度可以參看表 4—1。

表 4—1 放射性元素污染表面的允許程度*

物 体	β 輻射和 γ 輻射的允許劑量**， 每小時的毫倫數或當量數值	α 輻射的容許劑量 150 平方厘米面積的脈沖數/分鐘
工作地點的表面	0.1	200
衣服的表面	0.1	1500
身體的表面	0.05	0
殘余放射性***	0.05	0

* 此值是用離開它們很近並沿其表面移動的儀器來測量的。

** 這些允許劑量取決於測量的條件的。此處由一帶精細的玻璃小窗（厚度為 0.125 毫米）及有效表面為 5.4 厘米² 的計數器 [恩拉與克萊伯斯計數器 (Счетчик Энна и Кребса)] 所記錄的 300 脈沖/分鐘，相當於每小時約 0.1m μ 。此值不一定適合於我們實際情況，如要做標準值就應作實驗來求得。

*** 這個測量是在污染表面清洗之後做的，以供測定殘余放射性之用。這裡是用一張 12 厘米² 的紙擦淨污染表面 70 厘米² (桌、地板等的表面) 來測量它的放射性的。

此外，我們在前面提到衣服上沾污的去除時，曾談到過一些單位時間脈沖數同樣道理，也只能作參考用。要作為標準值亦應作實驗求得。

§4—4. 放射性廢物的排除 在放射性同位素實驗室中工作，必須經常保持一個牢固的“污染”概念，正如醫生經常有“消毒”的概念一樣，在實驗過程中應盡量縮小污染範圍。但儘管是多麼小心謹慎，在實驗室中只要做實驗工作，就必然使一些用具受到放射性物質的污染，同時也會有一些放射性廢物產生。而放射性物質又與一般毒物不同，不能用化學方法中和，這就增加了排除和清洗上的困難。因此所有放射性實驗室工作人員都必須重視放射性廢物的排除問題和掌握這方面的必要知識，遵守處理廢物的常規。

首先應將實驗過程中產生的放射性廢物收集在專用的污物桶中，

桶的外部塗上紅漆或写上紅字，最好將同一种放射性同位素所沾污的廢物收集在一个桶內，以減少处理时的困难。作實驗的动物，如不能及时埋藏或焚化时則將其放置鉛桶中，放在冰室或用福尔馬林水泡浸，以后再行处理，不应随便到处放置，也不应放入廢物桶中，以防其腐敗。

放射性廢物在处理前，先进行濃縮或稀釋。这些方法依据該同位素的性质，采用加热及加入沉淀剂、水等方式来实现。經過这样处理后，再用埋入土中、焚化、放入下水道、經過通風排入大气或投入海中等方法排出。总起来看不外是(1)濃縮儲存，(2)稀釋分散的原則。

根据放射性同位素半衰期的长短、性质，可采用不同的方法来处理。一般說来，半衰期短的同位素易于处理，半衰期长的則不易处理。下面依照放射性同位素的半衰期长短，將常用的同位素分为三类，并叙述其处理方法：

1. 半衰期为两周左右或两周以下的同位素 这类同位素在實驗室中常用的有 K^{42} (半衰期为 12.4 小时)， Na^{24} (半衰期为 15 小时)， I^{131} (半衰期为 8.0 天)， P^{32} (半衰期为 14.3 天)。这几种同位素由于半衰期短，对其廢物处理的最好方法是將廢物桶密闭后，置于專門的貯存室，放置一定時間（十个半衰期）使其衰变后再行处理。处理的方式是倒入水中或將其焚化。但如將上述放射性同位素适当稀釋不經放置衰变亦可直接由下水道排出，但应注意下列事項：

(1) I^{131} 在下列条件下可由下水道排出：

(i) 每天从下水道排出的水量应保证其中放射性碘的稀釋度达 0.5 微居里/升。

(ii) 每周的排除总量不应超过 10 毫居里。

(iii) 必須系統地檢查污水的放射性。

(iv) 在修理下水道系統时，一定要預先測量修理部分的放射性。

(2) 如以无机碘化物的形式，含于病人排泄物中的放射性碘，在下列条件下可以由下水道排出：

(i) 將准备由下水道排出廢物以普通碘化鉀稀釋，每 1 毫居里放射性廢物加入碘化鉀 10 克。

(ii) 流入当地下水道系統的每日排出量应保证把放射性碘稀釋到濃度为 1 微居里/升。

(iii) 必須系統地檢查污水的放射性。

(iv) 在修理下水道系統时一定要預先測量修理部分的放射性。

直接与皮肤接触的液体中 I^{131} 的濃度不超过 0.5 微居里/升时，可以认为沒有危險。

(3) P^{32} 在下列条件下可以由下水道排出：

(i) 傾入当地排水系統的排水量（一昼夜的）應該保证把放射性磷稀釋到濃度为 0.1 微居里/升。

(ii) 在排棄时，用磷酸盐形态的非放射性磷，按 10 克稳定性磷对 1 毫居里放射性磷的比例加以稀釋。

(iii) 一周內排出廢物的放射性最高不超过 10 毫居里。

(iv) 在修理下水道管道时，一定要預先測量修理部分的放射性。

(v) 污水系統不应直接通入污水池。

用稳定性同位素稀釋法对放射性磷的排除有特别的意义，因为有些微生物积聚磷的能力非常强，如果用稳定性磷稀釋或足够均匀的混合物，可使此放射性减低到生物积累作用表現不出来的程度。

2. 中等程度半衰期的同位素 这类放射性同位素常用者有 Ca^{54} （半衰期为 152 天）， Fe^{59} （半衰期为 45.5 天）， Zn^{65} （半衰期为 250 天）及 S^{35} （半衰期为 87.1 天）等同位素。

对这几种放射性同位素的排除，奎茂培(Quimby) 主張用稳定性同位素或用水稀釋后由下水系統排出。然而采用这种方式必須十分注意，更为妥善的方法是經過濃縮或焚化后埋在地中。

3. 半衰期长的同位素 这类放射性同位素常用者有 Co^{60} （半衰期为 5.3 年）， C^{14} （半衰期为 5720 年）。对半衰期长的金屬放射性同位素。最妥善的处理方法依然是經過濃縮或焚化后埋在地中，其处理方法簡單介紹如下。

(1) 固体廢物。固体廢物当中約有 80% 是可以燃燒的，这些廢物送至焚化炉中进行燃燒。焚化炉最好是用不銹鋼制成，炉內要供給过剩的空气以进行充分的燃燒，燃燒后的灰通过格子漏到圓錐形的炉

底，底部通入水，灰經過过滤用的布袋后进行烘干，焚化后的灰处理方法有三：第一种是将灰放到密闭的铁罐中埋在地下；第二种是将灰与粘土混合在一起在 1200°C 高温下进行燒結，这样放射性元素的化学状态已經安定，所以埋在地下或放到海中放射性几乎都不会被浸出。第三种是将灰和水泥原料混合在一起进行攪拌，干燥后成为水泥块，再貯藏起来或者埋在地下。焚化炉中燃燒生成的烟从炉上的导管出来后，要經過洗滌装置，将放射性灰尘除去后才可放出。

(2) 液体廢物。由于放射性同位素半衰期长及放射性强度較强，不适用于稀釋法，而采用濃縮的方法。处理方法有下列几种。

(i) 蒸发法。这种方法比較簡單，其去污系数率达 10^4-10^7 ，但設備費用較高，这是它的缺点。它适用于放射性高的廢液，不适用于含有揮发性放射性元素的溶液。蒸发时，放射性元素的性质、PH 值、濃縮程度对去污系数有很大影响；应注意不要蒸发干。

(ii) 离子交换法。蒸发濃縮后的液体廢物用离子交换进行进一步濃縮，单独用阳离子交换树脂，其去污系数为 50。如果与阴离子交换树脂并用，其去污系数为 10^6 。它适用于濃縮后体积小的液体廢物。如果大量处理則經費很高。

(iii) 凝集沉淀法。它是一般工业用水广泛应用的方法，对放射性廢液处理也有很大的效果。凝集剂如硫酸鋁鉀、氯化铁、磷酸鈉、氫氧化鈣等，能成为胶体沉淀的盐。当胶体沉淀下沉后，上部澄清液所含的放射性大部分已除去。如果在最大允許剂量以下时即可以放出。凝集沉淀法的去污系数与所含的放射性元素以及溶液的 pH 值有关。

下面将 C^{14} 的排出概述如下。 C^{14} 廢物的排出可采用以下几种方法：

(1) 每 1 微居里的放射性碳，用 13.2 克同样化学状态的稳定性碳加以稀釋后排除。此时任何一种排除方法都可以采用，因为經過这样濃度的稀釋后，即使在不断被人体吸收的情况下，并不会有任何危害。

(2) 可以由下水系統排出，但准备排入当地下水道的污水中放射

性碳濃度不得超過 1 毫居里/100 加侖。

(3) 動物屍體的每克組織所含的 C^{14} 在不超过 0.2 微居里時，可以在焚化爐中焚化。但應注意使燃燒完全，決不能使固態放射性碳粒飛入大氣，因為一旦將它吸入肺中，就不能排出，極為危險。

(4) 將 C^{14} 的廢物變成 $C^{14}O_2$ 的形態由排飛櫥中排入大氣中。排氣時風速最少要保持在 15 米/分。為了防止被沾污的放射性灰塵外溢，在排氣孔中裝置灰塵濾過器。

(5) 在下列條件下也可將 C^{14} 廢物埋入土中：

(i) 埋藏的生物組織每克中 C^{14} 的含量最高不得超過 5 微居里。

(ii) 在一立方呎的廢物中 C^{14} 化合物的濃度不得超過 10 毫居里。

綜合上述，可見對放射性廢物的處理都是根據不同的同位素，而採用了不同的處理方法。除 C^{14} 可以採用焚化法處理外，大多數放射性廢物最後需要採用埋入土中的方法來處理。因此，對埋藏時應注意的問題，下面將分別加以探討。

(1) 在埋藏前應將放射性同位素和相同狀態的穩定性同位素均勻混合，而且形成這樣一個比例，即由 1 克稀釋了的混合物一晝夜所造成的電離所引起的能量不超過 4.15 爾格。

(2) 傾棄廢物時，可將其裝入容器中，放置於坑的底部，坑底及四壁用水泥修築，上邊用水泥蓋蓋好。一直到傾棄的廢物距地面 1.5 米時，再將此坑用土堅實埋好。

(3) 在坑的周圍應設立標誌，以後不能在廢物坑的土地附近，修建房屋。

(4) 為安全起見，也可將廢物運至遠離市區無人居住的山谷地中埋藏，此時用一般土坑即可，在放射性廢物上堅實地用土蓋至 1.5 米厚。但事先應將埋藏地點收購，不准轉讓不作別用，並與當地政府聯繫，獲得地方當局的支持注意和看管。

§4-5. 緊急措施 萬一發生了事故，不要慌張，可以採取一系列的措施來進行特殊的處理。其目的在於保護工作人員免受輻射傷害，同時限制沾污區不讓其擴大或傳播。

要詳細記錄一切情況，以便分析，取得教訓防止再發生該類事故；以便了解工作人員的安全情況，便于追究責任。

下面就一些情況提出處理步驟，只供參考。另外可視情況嚴重與否酌情增減。

1. 對於輻射大的溶液之濺潑的處理步驟

(1) 手上戴手套，將容器扶正。

(2) 立即通知別人離開。

(3) 沖洗去手上皮膚上的污染，脫去濺潑時沾污了的衣服。

(4) 報告有關人員（安全防護人員或有關領導）進行處理。進行處理的人，應穿著配帶防護、清理、測量這三方面的儀器設備。

(5) 小心地吸起溶液，再用特殊吸水紙去吸干。

(6) 保持濕潤狀態，加入適當的酸洗滌，再吸干。重複幾次。

(7) 加入一些水去洗，再吸干。重複幾次。

(8) 進行測量，到容許劑量以下。恢復工作。

(9) 詳細記錄經過情況。

其中(5)－(9)不管大小濺潑都是必須的。(6)，(7)兩項視不同的同位素在不同的材料的情況下，而有不同。具體情況可以參看污染的去除一節 (§4-3, 1)。

2. 對於放射性粉末撒潑的處理步驟

(1) 通知別人離開（小心地走，不要引起粉末飛揚），關通風扇。

(2) 關閉引起粉末飛揚的門窗。

(3) 必要時應停止呼吸，迅速用水沖去皮膚上的沾污，脫去沾污了的衣服。

(4) 報告有關人員，進行處理，進行處理的人除如上節所說要有必要的設備儀器外，另外應備有濾過型呼吸器或隔絕的單獨呼吸系統。

(5) 小心地回收粉末，對難於回收的部分則用相應的酸溶解之。

(6) 如液體濺潑中(6)－(9)進行。

如果撒潑的是固體顆粒，處理起來就較粉末容易一些。但如果是霧、蒸氣、氣體，則應參考此原則找出適當的清除辦法。一般說來，這種狀態的放射性物質均應在密閉的通風櫥、手套箱中極其慎重地進行，

問題不会出得很严重。

3. 对于放射性器皿割破了皮肤的处理步骤

(1) 立即用水冲洗（早一秒，好一秒）割破部分，用EDTA洗滌。

(2) 报告领导人（或安全防护人员）。

(3) 就医（情况严重的，还要切除伤口部分）。

洗时应引起大量的出血（用手压伤口上方几厘米处，停止静脉血循环，但不要破坏动脉血循环）。

割破皮肤的那一物件，应保留作为分析事故情况之用。

4. 对吸入吞入放射性物质的处理 报告领导人，请医生医治。减少被吞入放射性物质在消化系统中的吸收的办法有：

(1) 吃催吐剂（使吃进去的放射性同位素吐出来）或进行洗胃（如果将放射性气体吸到肺中则应迅速设法从肺中排出）。

(2) 吃相应的沉淀剂，减少胃肠中的吸收。

(3) 吃合适的泻药促使其排出。

5. 一些常识

Pu, Po, Ce, Pm 等在消化系统中一般很难吸收，进入肠胃时可服用胃抗酸剂，使这些金属呈氢氧化物而沉淀。

吞入稀土金属的放射性同位素时可服用草酸盐含量较高的蔬菜如菠菜、大黄等，也可服用极细的羧基阳离子交换树脂。切忌使用络合剂，因为它们会增加这些同位素的溶解度。

吞入镧土金属的放射性同位素时，因其硫酸盐不易溶解，故可用硫酸镁治疗。又多磷酸胺的铵盐及羧基阳离子交替树脂也可用来治疗。因为镧土金属在胃肠道中极易被吸收，必须立即治疗。大量服用磷酸钙可以减少锶的吸收。但不应吃奶粉，因为它会促进这些同位素的吸收。

— 其他还有脱钙疗法、络合剂疗法等等。此处均不加详述。有关放射性物质中毒的事故。必须马上就医治疗，不应拖延或乱搞一通。

第五章

輻射劑量的監察

射綫并不能直接由感觉器官查觉，要发现射綫的存在或者确定輻射剂量的大小必須使用专门的仪器进行测量。計算所得出的剂量是否正确以及所作的相应的防护是否安全可靠也必須实际测量来檢驗。因此，要确保安全的工作条件，对輻射进行实际的探测是极其重要的。

剂量監察就是要确定在各种工作情况下，放射性輻射的剂量是否超过了最大允許規定，并确定安全的程度。一般分作这几方面的監察：工作地区外部照射剂量的監察；表面放射性沾污的監察；个人剂量的監察；空气及水被放射性物质沾污的監察等方面。

从这些任务所要测量的物理量来看，有些是测量放射性强度的，有些是测量剂量大小的。关于后一問題的测量通常用两种办法进行：

(1) 真正测量机体組織中或者空气中吸收輻射的能量（以侖琴或者物理侖琴当量表示）。要求得到生物效应的大小还必须再轉換成生物侖琴当量。(2) 测量輻射的其它物理量（通量、强度等），以后再轉換成相应剂量的大小。后一方法广泛地用于测量带电粒子和中子的情况。正因为如此，所以 β -粒子、中子的最大允許剂量就常用最大允許通量来表示。根据不同的情况及条件，测量仪器采用了多种的测量原理。大多数探测仪器基于电离方法（电离室、計数管），也经常应用閃爍方法和感光方法。在一些特殊問題上，使用其它方法是更方便和有效的（如测量大剂量时利用化学方法）。

本章内容主要着重在安全監察方面，叙述一下各种監察是怎样进行的，采用了一些什么方法和仪器等。除此之外在最后两节里要談到輻射剂量的绝对测量和大剂量测量的問題，这些对今后进一步的研究或者在輻射的其它应用和生产領域里是必需的。

§5-1. 电离室和計数管在安全監察中的应用 根据測量任务的不同，有各种类型的电离室和計数管用来作为安全監察仪器的探头。为了讲述它們，先簡略地介紹一下电离室和計数管的一般特点（主要在 γ -輻射的測量方面）。

1. 电离室 我們知道，按电离室記錄粒子的情况来分，电离室有脉冲式的和累計式的（电流式的）两种。前者对每一个入射粒子分別地記錄（計数）；后者記錄所有入射粒子产生的总离子对数，以游离电流（或总电荷量）表示出来。在剂量測量中，关心总游离的效果，因而多半使用累計式的电流电离室。

为了測量剂量的大小，从理論上来說；或者在最理想的情况下，电离室的室壁材料应该选用“空气当量”的物质做成。所謂“空气当量”材料是指这样的材料，它的有效原子序数近似等于空气的有效原子序数（7.64）（化学成分近似相同），只是在密度上和空气不同。“空气当量”电离室就能保证在輻射的照射下，电离室給出电流的大小严格地和剂量率大小成正比，而和光子能量无关。反之，非“空气当量”电离室，其电流大小不仅和輻射的剂量率有关，并且和光子能量有关。这样，若有两种不同能譜 γ -射綫照射电离室时，电离室产生的电流并不和两种射綫对应的剂量率成比例。这样在測量上将引起一定的誤差。实际上，这是由于不同能量的光子从室壁打出电子的情况不同而产生的（室壁效应）。在准确地要求測量剂量时必须考虑到这一点（§5-7）。

由于很多困难，我們不能做出这种理想的“空气当量”电离室，但可以选用近似于“空气当量”的材料（如有机玻璃、电木、塑料）做室壁的材料。这样在某一定的能量范圍內，能做到电离室电流的大小和光子能量无关，（或依賴关系很小）而只和剂量（率）的大小有关。

在安全監察中，实际上大多用鋁作电离室的室壁材料，室中充有空气。鋁壁电离室对于光子能量在0.4—2Mev的范圍內的 γ -射綫来說，滿足空气当量的要求比較好，室壁效应带来的誤差約为10%。作为安全監察用还是可以的。

现在考虑一下，在一定的剂量率下，电离室能给出多大的电流来。我们假设加在电离室上工作电压很高，不考虑复合扩散等原因引起的离子对的损失，并且略去室壁效应的影响（“空气当量”电离室）。

我们知道 1 P 相当于每 cm^3 空气中所产生离子对数所荷总电量为 1 CGSE ($1 \text{ CGSE} = 3.3 \times 10^{-10}$ 库仑)，则当剂量率为 1 P/cek 时，并假定所产生的离子对数全部被收集的话，那末体积为 1 cm^3 充空气的电离室所产生的电流将为 3.3×10^{-10} 安培。设剂量率为 P (伦/秒) 电离室体积为 $V(\text{cm}^3)$ ，则饱和电流 i_H (安) 的大小可用下式表示：

$$i_H = 3.3 \times 10^{-10} P V \quad (5-1)$$

一般电离室所给出的电流大小是很小的 ($10^{-12} - 10^{-17} \text{ a}$)，可以用静电计（验电器）或静电计管的弱电流量测线路来量测。

根据测量任务的不同，有要求测量剂量率 (P) 的大小，也有要求测量在一段时间内累计剂量 (D) 的大小。这可以用两种收集离子对的方法来达到。

我们知道：

$$P \propto i_H$$

$$D = Pt \propto i_H t = Q \quad (5-2)$$

所以测量电离室的电流能知道剂量率的大小，而测量在一定时间间隔内电离室形成的总离子对数（总电量 Q ）能知道累计剂量的大小。

用静电计管线路来量测弱电一般有两种接入方式：

(1) 常偏转式

电离室产生的电流流经高阻 R^* 并在 R^* 上产生一定的压降 ΔU_c ，因而

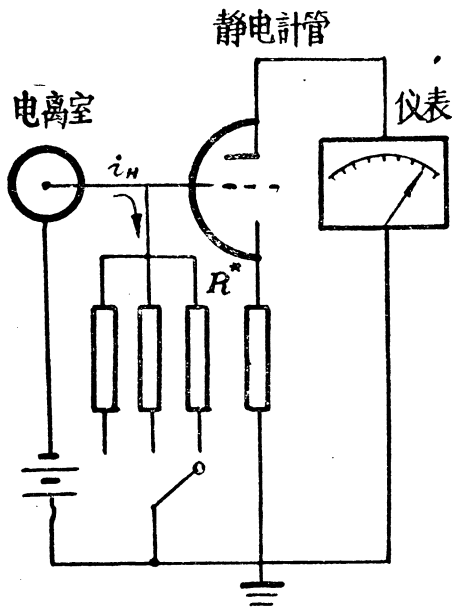


图 5-1 弱电流量的量测——常偏转式

改变了静电计管的栅压，而被后面的线路记录下来。

$$\Delta U_c = i_H R^*,$$

$$\therefore i_H \propto P$$

$$\therefore \Delta U_c \propto P \quad (5-3)$$

因为，一般 i_H 是很小的，为了得到足够大的压降，电阻 R^* 应选择得足够大，一般为 $10^7 - 10^{13} \Omega$ 。相应的电流测量范围为 $10^{-9} - 10^{-13} a$ 。

这样接入方式的仪器电表指示和游离电流 i_H 大小成正比。因而可测出剂量率的大小。

(2) 浮栅式

电离室产生的电流 i_H 给电容 C 充电（或放电）而引起静电计管栅极电压的变化。在一定时间间隔 t 后，其变化量为：

$$\Delta U_c = \frac{\Delta Q}{C_0} = \frac{i_H t}{C_0}, \quad (5-4)$$

即仪器指示和栅压的改变 ΔU_c 成比例，而 ΔU_c 的大小和在 t 时间间隔内收集的电量 ΔQ 成正比。因而这样的接入方式能测出在一段时间间隔内累计剂量的大小。若剂量率是常数，观察仪器指示变化的速度，也可以测出剂量率的大小来。实际的仪器中， C_0 往往就是分布电容，显然 C_0 愈小，仪器的敏度愈高。一般讲，该种接入方式比上者能测到更弱的电流。

用静电计（或验电器）测量弱电流在原理上和浮栅式情况类似。

2. 计数管 计数管是用来测量放射性强度的，每个粒子引起一个脉冲而被记录下来。用来测量剂量或剂量率有一定的缺点。

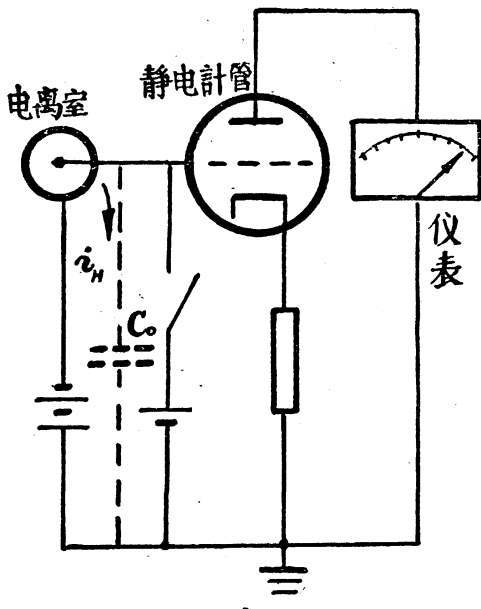


图 5-2 弱电流的量测——浮栅式

首先計数管的灵敏度随光子的能量不同有很大的变化。这里，所謂灵敏度就是指每单位剂量所引起計数管的計数。

設入射 γ -射綫通量为 n_0 ；剂量率为 P ；計数管記錄效率为 η ； n_0 引起的計数为 $n_{c\gamma}$ ；光子在空气中的綫性电子轉換系数为 γ 。

$$\text{則：} \quad n_{c\gamma} = n_0 \eta \quad P = I \cdot \gamma = n_0 \cdot h\nu \cdot \gamma.$$

$$\frac{n_{c\gamma}}{P} = \frac{\eta}{\gamma \cdot h\nu} = \frac{1}{\gamma} \quad (5-5)$$

($\because \eta$ 大約和 $h\nu$ 成正比)

我們知道， γ 和 $h\nu$ 有关，不是一个常数。因此，由上式看出单位剂量率引起計数管的計数率和光子能量是有关系的。在所测量的輻射能譜有可能改变时，則用計数多少代表剂量率大小就会引起誤差。尤其在低能时 ($h\nu < 200\text{keV}$)， γ 随 $h\nu$ 变化很大，因而能引起很大誤差。当用計数管来測輻射的剂量率时，計数管必須先用有类似能譜的标准源来定标。在屏蔽层后散射的低能光子較多，使用計数管作为探头測量剂量率时必须注意这个問題。

其次用計数管測量較强的 γ -輻射时，漏計数很大(計数管失效時間 $\sim 10^{-4}$ 秒)，并且計数管有一定的寿命 ($10^9 - 10^{10}$ 次計数)。因而計数管不宜用来測量强度很大的 γ -射綫。用計数管作为探头的剂量率仪，其量程上限受着一定限制，远不及电离室的量測上限。

但另一方面，計数管有很高的灵敏度，可以測量很低的剂量率，这比电离室來說，优越得多。在脉冲数目不比本底少很多时就可使用計数管，例如，我們假定一个直徑为 2cm、长为 10cm 的計数管，本底計数一般每分鐘 60 个脉冲，也就是每秒钟一个脉冲。因为 1 倫琴大約相当于每平方厘米通过 $2 \times 10^9 \gamma$ -光子 ($h\nu = 1\text{MeV}$)，故当計数效率等于 1% 时对截面为 20cm^2 的計数管，最大可能的灵敏度約为 $\frac{1}{2 \times 10^9 \times 20 \times 0.01} = 0.25 \times 10^{-8} \text{p/сек}$ ，也就是大約为 0.0025mkp/сек ，这比电离室要灵敏的多了。当計数管用来进一步測量更弱的 γ -射綫时將是不可靠的了。

其次用計数管进行測量时所用記錄设备具有簡便和穩定的优点。

从所要的线路来讲，计数管后面只要跟随一个定标器或计数率计。它们没有象弱电流量测线路的那样复杂和不稳定。

在安全监察中，也有用计数管测量辐射剂量率的。但它更多地用来作为辐射指示仪，即用来发现放射性的有无（例如在表面沾污探测的一些仪器中）。在空气和水放射性浓度的测定中，要求测量的是放射性强度，计数管使用的很多。

最后附带说明一下闪烁计数器。它和计数管情况类似，但有着更高的记录 γ -光子的效率（采用大晶体可以得到近于100%的效率），非常高的分辨本领（ 10^{-6} — 10^{-9} 秒），并且可测定粒子的能谱。在安全监察中，它的应用情况和计数管类似。因其灵敏度更高，故可用来测量更弱的放射性强度；此外在中子的安全监察中应用也很广泛（§5—6）。它的灵敏度和光子能量有很大的依赖关系，现在还很少使用它来直接测量 γ 剂量或剂量率的大小。

§5—2. 工作地区 γ 辐射的监察 在接触到有关 γ -辐射的场合下， γ -射线的剂量率若可能超过允许剂量的话，都必须对 γ -射线剂量率进行监察，例如在反应堆，加速器附近就应设置这样的监察点；此外在操作很强 β -射线的情形下（ $>0.5 P$ ），也应进行对 γ -剂量的监察，因为 β -射线能产生韧致辐射，它和 γ -射线一样，都能造成对人体的伤害。通过监察得到剂量率的大小，决定允许停留的时间或采取相应的防护等等。

1. 监察的方式 一般有两种监察的方式：

(1) 设立固定的探测点，探头的位置一般设置在有代表性的地方。那里的剂量率能够反映出附近地区的辐射水平；

(2) 流动式地探测，用可携带仪器对可能出现较大辐射水平的地方进行测量。

与此相应使用的仪器一般也有两种形式：

(1) 固定式探测仪器：一般对这种仪器要求能远距离地传输信号，即要求仪器的探头和测量控制部分能够分开，中间通过很长的电缆来传送信号。这样可以测量有较高辐射水平的地方的剂量率。人可以离开探头而远距离地控制和测量，以确保测量人员的安全。有时当

設置的探測點數目很多時，為了管理的方便也要求儀器的探頭和測量部分分開，這時將所有儀器的測量控制部分集中在一起，由專人管理來了解各個探測點處的劑量率大小。根據這種應用情況也要求這種儀器帶有警報信號系統和能接入自動記錄的裝置。發警報信號的閾值可事先調好，當劑量水平超過此值時，儀器就發出警報信號來。

(2) 可攜帶式探測儀器：這種儀器的特點是輕便、靈敏、便于攜帶。一般是自備電源的（用干電池作為電源）。

作為儀器的探頭可以用电離室也可以用計數管。它們各有優缺點。電離室後面用各種類型的弱電流量測線路以量測弱電流的大小，而計數管後面使用各種類型的計數率計以量測計數率的大小，然後儀表直接用劑量單位刻度或作出換算表而得到劑量率的大小。

2. 常用的儀器介紹 下面是兩個用电離室作為探頭和一種用計數管作為探頭的劑量率儀的例子：

(1) Кактус 微倫儀

該儀器是一種固定式 γ -射綫劑量率儀，用电離室作為探頭。它的測量範圍為 $0-2 \times 10^4 \text{ мкр/сек}$ ，共分五個量程： $0-2 \text{ мкр/сек}$ ； $0-20 \text{ мкр/сек}$ ； $0-200 \text{ мкр/сек}$ ； $0-2000 \text{ мкр/сек}$ ； $0-20000 \text{ мкр/сек}$ 。

儀器由兩部分組成：①探頭：包括電離室和前置放大器。電離室是一個圓柱形鋁壁電離室，體積有5升和1升的兩種；②測量部分：包括主放大器、測量儀表、信號系統、電源等。探頭和測量控制部分是分開的，可以接入相當長的電纜（最大長度 <100 米）以達到遠距離控制的要求。

儀器的綫路簡圖見圖5-3

在 γ -輻射照射下，電離室產生一個微弱的電流（ $10^{-9}-10^{-12}a$ ）流過高阻（ $10^7-10^{11}\Omega$ ），引起第一級靜電計管（2Э2П）柵壓的改變，通過放大，而被記錄下來。弱電流放大級綫路採用了兩級橋式平衡綫路，因而減少了由於電子管工作狀態不穩定而引起的儀器零點的漂移和不穩定。測量儀表接在第二級橋式綫路電子管的板極里，直接用劑量率單位刻度。

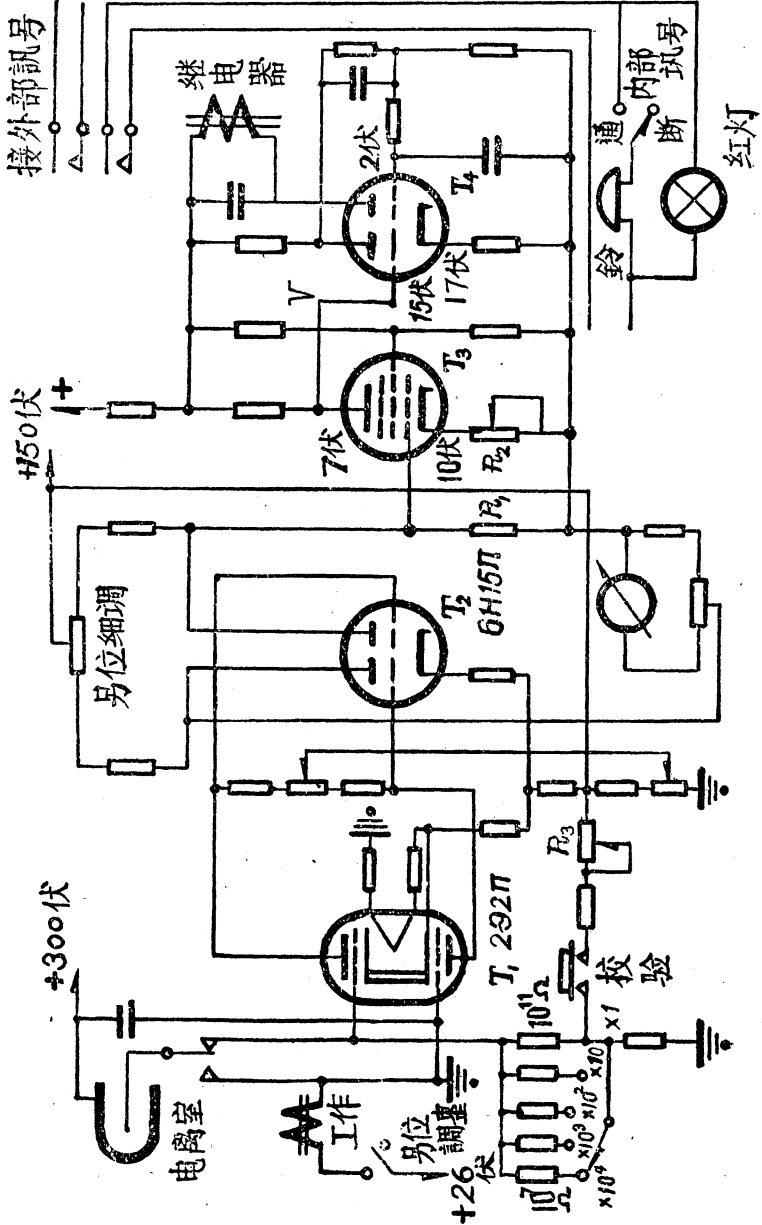


图 5-3 Kарт yc 微偷仪线路简图

量程的轉換通过更換高阻而获得。更換高阻，是借助于相应的继电器的的工作而实现的。这样可以滿足远距离控制的要求。

警报信号綫路由一个单管放大綫路和多諧振荡器組成。当剂量率超过一定閾值时，仪器发出警报信号（鈴响，指示灯亮）。通过附加的接綫可以把这个信号送出去，引起在探头附近工作人員的注意。发警报的閾值可預先調好。

(2) ПМР-1 微倫仪

这是一种可携带式的，用来探測 γ —輻射剂量率大小的仪器，測量范围为 0—5000мкр/сек，分四个量程、0—5мкр/сек；0—50мкр/сек；0—500мкр/сек；0—5000мкр/сек。

仪器由电离室、弱电流量測綫路，測量仪表、电源等部分组成。电离室有一个长方形的形状，体积为 1 升，用鋁作室壁材料，安置在仪器的底部，和測量控制部分紧紧連在一起。

仪器的綫路簡图見图 5—4

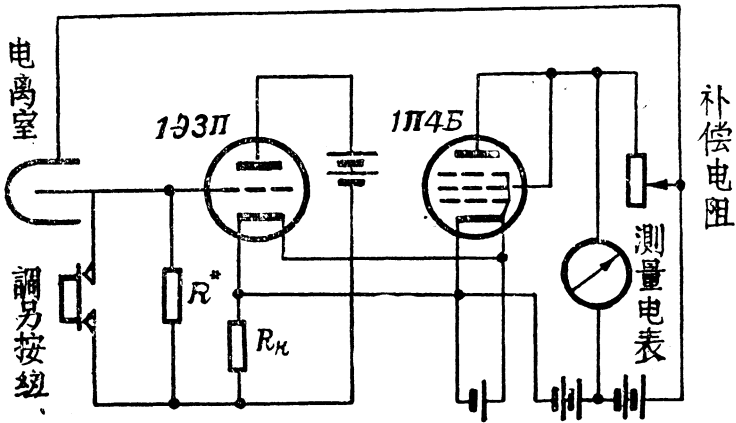


图 5—4 ПМР-1 微倫仪綫路原理图

电离室产生的电流常用偏轉方式接入到量測部分，量測綫路采用了二級阴极輸出器的电流放大綫路。这样不仅使得微弱电流得到了放大，同时，因为有很深的反饋，保证了仪器指針建立的时间很快（縮短了測量时间），并且有很好的稳定性。

測量綫路採用了所謂補償式綫路。調節補償電阻能夠抵消電子管中初始的板流，因而提高了儀器的靈敏度。儀器用干電池供電，便於攜帶和野外測量用。

(3) 用計數管作為探頭的劑量率儀：前節已指出，用計數管來測量 γ —輻射的劑量率是有一定缺點的（對 γ —輻射能譜的影響、量程的範圍、壽命等），但由於它簡便穩定，近年來也應用得很廣泛。

我們現在來介紹這種類型的一個劑量率儀：儀器由探頭和測量控制兩部分組成。

探頭和測量控制部分同樣可以分開，中間可接入100米內的長電纜，以滿足遠距離控制的要求。

探頭由計數管和陰極輸出器組成，計數管是一種CTC—5型的鹵素管。採用鹵素管的好處是工作電壓低（320—400伏），壽命長（達 10^{10} 次）。

測量控制部分由一個計數率計綫路和信號系統組成。計數率計測量出每分鐘進入的脈沖數目，儀表直接刻成劑量率的大小。儀器的測量範圍：0—30μkr/сек；分五個量程：0—0.3μkr/сек；0—1μkr/сек；0—3μkr/сек；0—10μkr/сек；0—30μkr/сек；測量的上限是由計數管允許的最大計數率決定的。信號系統的警報閾可預先調好，當劑量率超過閾值時，就發出警告的信號來。

儀器的綫路簡圖如圖5—5：

計數率計由成形綫路，積分電路和真空管伏特計組成。成形綫路用來把進入的脈沖改造成幅度和形狀一樣的标准脈沖，以滿足積分電路的需要。積分電路把進來的脈沖數轉成一個平均的直流電壓。電壓的大小和每分鐘進來的脈沖數成正比。通過真空管伏特計測量這個電壓的大小，從而知道每分鐘進來的脈沖數。

信號系統由一個甄別器組成，為了提高靈敏度和清晰度，甄別器前加了一級放大。當積分電路上電壓超過一定值時，甄別器工作狀態就改變，接入在甄別器右半管板極里的繼電器通過了電流，而引起裝有的燈和鈴發出信號來。

這種儀器常做成有數個探頭和信號系統（6—10個），而共用一個

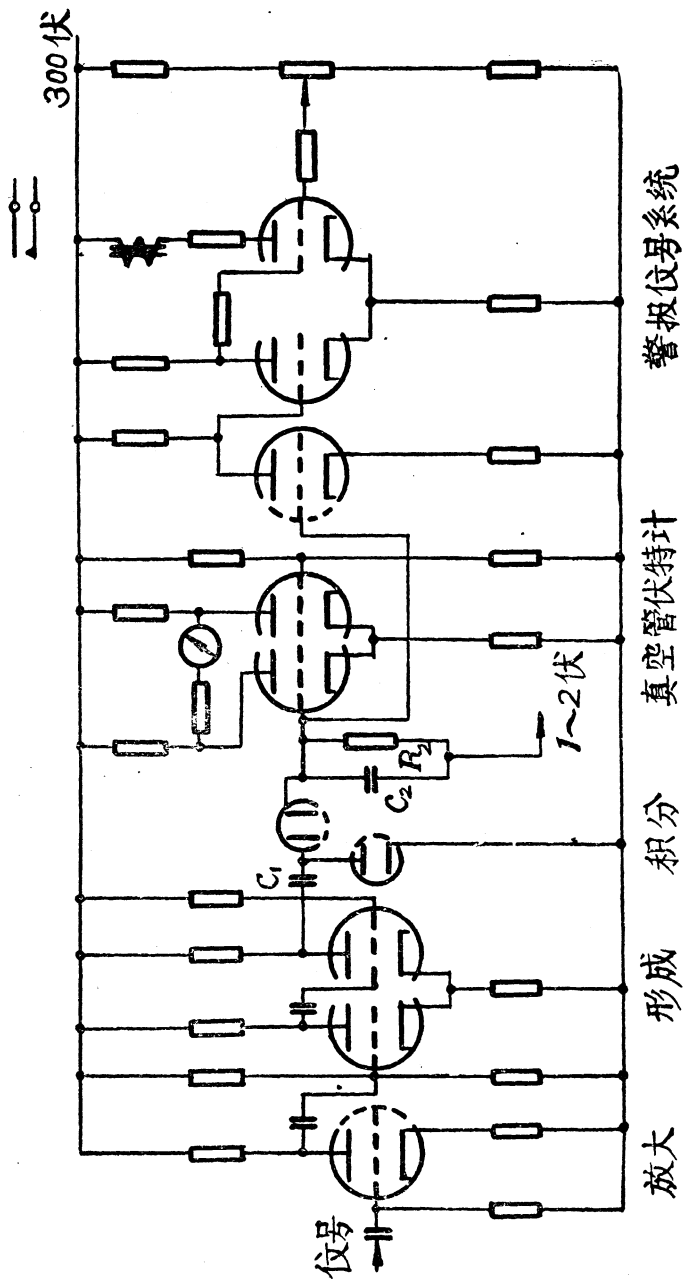


图 5—5 计数管式测速率仪线路简图

真空管伏特計。每个信号系統的警報閾可分別地預先調到規定值。当某一探头处的輻射剂量率超过預定值时，則引起該道信号系統发出警報信号来，那时再接入真空管伏特計測量該道剂量率的大小。这样在制造仪器时省去了很多电子学元件，因而降低了仪器的造价。

3. 仪器的定标 做好的剂量率仪(不論电离室的还是計数管的)，使用前都必須进行定标，即把測量仪表的讀数轉刻成相应剂量率的大小。在使用的过程中也要定期地檢驗仪器的刻度是否准确。

一般用两种方法进行定标：

(1) 标准源法：探头放在已知剂量率的輻射場中，調整仪器，把仪表的讀数刻成已知剂量率的大小。剂量率的大小可以根据标准源强度及几何位置等因素計算出来。点源的計算公式如下：

$$P = 2300 \frac{m}{R^2}$$

或
$$P = 280 \frac{Mk_r}{R^2}$$

P ：剂量率的大小 (мкр/сек)； m ：以毫克镭当量为单位表示的源的强度； M ：以毫居里为单位表示的源的强度； R ：探头和源之間的距离 (cm)； k_r ：标准源的电离常数。

定标示意图見图 5—6

定标时要注意几点：

(i) 放射源的源强数值要准确地知道。源的强度应足够大以保证在源和探头間有相当大距离时，还能对仪表的滿刻度进行定标。放射源 γ -光子的能量要和仪器将来探測时遇到的輻射能譜成分大致相同(这点对計数管特別要注意)。常用 Ra^{226} 源或 Co^{60} 源来作为定标的标准源。

(ii) 源和探头間距离要相当的大，使得源对探头來說可以看成是一个点，以保证使用上面的点源公式計算剂量率时有足够的准确度，一般要 $R \geq 10l$ ， l 为探头的綫度。否則要进行相应的校正。

(iii) 要防止散射輻射的影响，斜射的綫会通过周圍物体(天花板、牆壁、地板等)的散射而射到探測器上，引起附加(在計算中难以

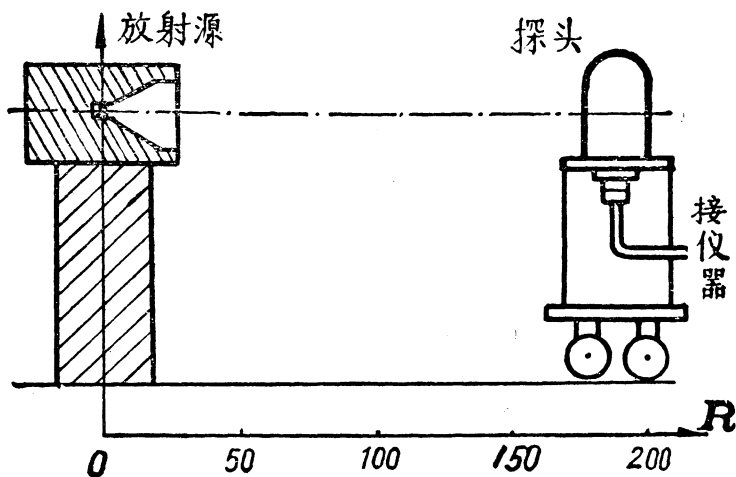


图 5—6 定标示意图

考虑的)的计数,以致引起定标的误差。为减少这种影响,定标系统的中心线离开周围物体的距离要足够大(一般要大于1米以上)。

(iv) 定标中要注意本底的影响。定标室附近不应存放其它的源。本底值在定标过程中不应改变,并要从读数中减去。

(2) 标准仪器法:定标或校正仪器也可以采用与标准仪器作比较的方法。比较时需注意:

(i) 一般标准仪器误差均以全刻度的百分数表示,因此比较时应尽量选择测量仪表的满格附近进行。

(ii) 须考虑到两种仪器探头对辐射能量的响应是否相同。

(iii) 两个探头相对于射线的方位都应该和探头一般工作时相对于射线的方位相同以减少不同方位可能有不同的探测效率而带来的误差。

§5—3 表面放射性沾污的监察 在实际工作中(如开放性的放射样品的操作)常常会有一些物体的表面被放射性物质所沾污。从可能受到内部照射的观点来说,那怕是一点点沾污也是很危险的。因此对一些被沾污物体表面进行检查和测量,得知沾污的程度,很有必要。

我们知道,物体表面沾污的大小是用每单位时间内,一定大小面

积的表面在 2π 立体角内所放出的粒子数目来表示的，它并不是表面上沾污物质的放射性强度。这一点对测量来讲是很方便的，因为测量时就不用考虑计数中是否有了自吸收及散射这些因素的影响。

1. 对测量表面沾污仪器的要求 用来测量表面放射性沾污的仪器，应该满足下面一些要求：

(1) 仪器探头测量窗口的面积要有合适的大小。一般要求有 150cm^2 的大小 ($10 \times 15\text{cm}$)。

(2) 有足够的灵敏度。这因为允许沾污的标准是很低的，而通常又要求能够测出低于允许标准一个量级的沾污水平。

(3) 探测器对 α 、 β —粒子的吸收应是很小的，保证对 α 、 β —粒子有较高的记录效率。

(4) 要能够分开不同的辐射类型，能够在有 β 、 γ —射线的本底存在情况下测量 α —放射性物质对表面的沾污，在 γ —射线本底下测量 β —放射性物质的沾污。

(5) 仪器的测量时间要短。

(6) 有信号系统：当沾污超过标准时，仪器能发出信号。

(7) 其它：譬如要求探头有这样的结构外形，它不易被放射性物质所污染，污染后要能够换取或清洗。

为了有较高的灵敏度，探测元件多用计数管和闪烁计数器做成，而很少使用电离室（尤其对于 α —粒子）。它们的室壁和窗口选用原子序数较小的材料做成并且要做的很薄，以减少 α 、 β —粒子的吸收，例如对测 0.2Mev 的 β 和 γ —辐射的表面沾污，可以用 $30\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的玻璃（或铝制）的盖格计数管。对测 α —粒子可以用云母窗厚为 $1-2\text{mg}/\text{cm}^2$ 的钟罩形计数管。

为了分开 α 、 β 、 γ 可以分次地进行测量。例如，在 γ 本底下测量 β —辐射的污染，可以在探测器窗口前加一个吸收 β —射线的过滤片（厚度视 β —辐射的最大射程决定），根据有无过滤片的计数差确定 β 或 γ 的沾污大小。此外，区分 α 、 β 、 γ 还可以选用不同灵敏度的探测器。例如，测量 α —粒子的污染可使用很薄窗口的钟罩型计数管，它对 α —粒子的灵敏度很高，而对 β —射线比较不灵敏；用正比计数管测量 α —粒子

可以更好地消除 γ -射线或其它辐射的影响；用闪烁计数器 (ZnS(Ag)) 来测定 α -粒子灵敏度很高而对 γ -射线几乎不灵敏。

增大测量窗口的面积可以将几个计数管并联起来。用闪烁方法来测量时，增加窗口面积有一定困难，因为闪烁体不易做的很大，且不经济。除了探测器的选择外，从测量线路着手考虑也很重要。

2. 典型的沾污探测仪器介绍：

(1) Тисс 万能辐射仪

这种仪器用于测量手、衣服或其它物体表面受 α 或 β 、 γ 放射性物质沾污的程度，并能发出沾污或清洁的信号。

仪器有三个探头和一个主体部分。

探头：(i) T_{α} 探头：有三个并列的卤素管 (CTC-6)，组成窗口面积为 $150\text{cm}^2 (10 \times 15\text{cm})$ 。用来测量表面为 β 、 γ 放射性物质污染的程度。

(ii) T_{β} 探头：是一个正比计数器，窗口面积也为 150cm^2 ，用来测量 α 放射性物质污染的表面。

(iii) T_U 探头：是一个用 ZnS 晶体构成的闪烁计数器，窗口面积有 7cm^2 ， 23cm^2 两种，以进行 α 放射性测量。

仪器的方块图如下：

仪器主体由测量线路和信号系统两部分组成。测量线路有一个计数率计和一个机械计数器。从探头传出的脉冲，送入成形线路，改造

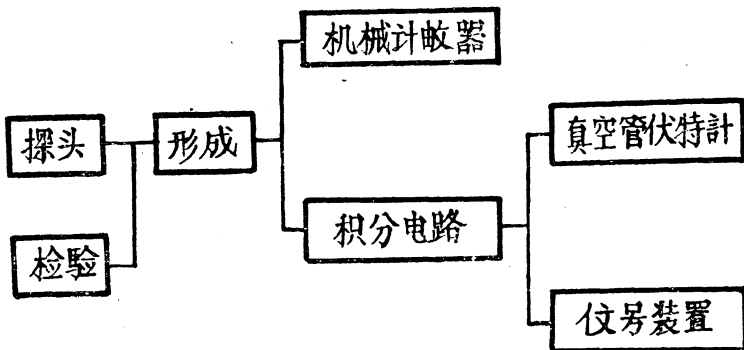


图 5-7 Тисс 万能辐射仪方块图

成具有一定幅度和形状的脉冲。成形后的脉冲进入积分电路，产生了一定的平均电压。此电压用真空管伏特計来测量。电压的大小和每分钟进来的脉冲数成正比，仪表的讀数直接刻度成“脉冲数/分”。成形綫路后面还接了一个机械計数器，进入的脉冲数目又可直接由机械計数器記錄下来。

信号系統和真空管伏特計一样，接在积分电路的后面，当积分电路上电压超过一定的閾值时，信号系統就发出信号来，此閾值大小可預先調节。在使用 T_4 探头时（測量 β, γ 污染），信号系統有两种发出信号的方法，这两种方法对应着本底消除的两种不同的方法：

(i) “手动”消除：

在探头远离被沾污表面时，仪表的讀数代表本底的大小 $N_{\text{本}}$ 。在測量污染表面时，仪表的讀数代表本底和被測量表面的放射性之和 $N_{\text{本底}}$ 。这两次測量讀数之差，即 $N_{\text{真}} = N_{\text{本底}} - N_{\text{本}}$ 将表示被放射性物质污染的表面所引起的計数。与这种本底消除方法相应的信号系統称手动信号系統。其工作情况为：当仪表的讀数（总計数）超过一定閾值时（事先用标准源調好）有一紅灯給出閃光信号，表示超过沾污标准，低于閾值时将沒有信号发出。

(ii) “自动”消除：

在探头远离沾污表面时，仪数的讀数代表本底的大小 $N_{\text{本}}$ ，在要測量沾污表面时，将探头移向沾污表面并同时按下装在探头上的按钮，这时仪表給出的讀数将不包括本底計数而直接給出沾污放射性所引起的計数（不用再减去本底的大小了），即所謂“自动”消除本底。

与此本底消除方法相应的信号系統称为自动信号系統。其信号特点是在按下按钮后，当沾污表面的放射性（而非总計数）低于或超过某一定閾值时就有綠灯或紅灯发亮，表示所测表面是清洁的还是沾污的。此閾值大小同样可預先用标准源調好。

本底所以能够自动地消除是通过积分电路里一个电容 C_3 在測量过程中改变了連接的方法而实现的(图 5—8)。

为了分开 β 和 γ 射綫分別引起的計数，可以按上述的在探头窗

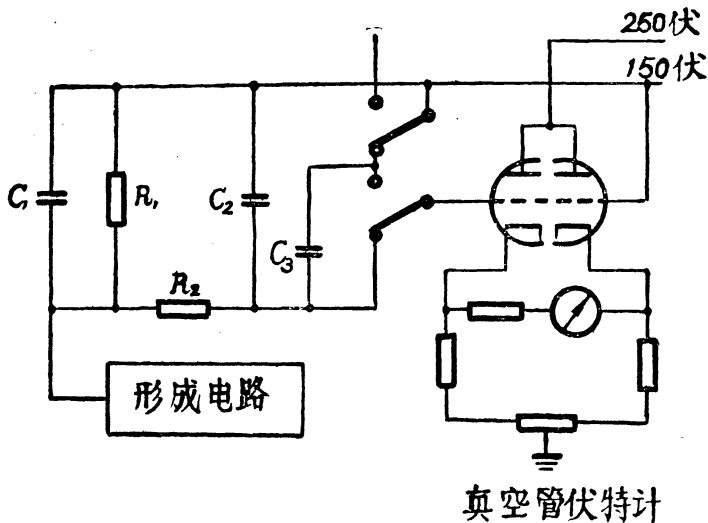


图 5—8 本底补偿原理图

口前加沪片的两次测定方法进行。

(2) Cy-1 型人身沾污检查仪：

这种仪器用来检查当工作人员离开可能遭受到沾污的区域时，全身各部是否遭受了放射性污染。仪表共有 12 个探头，它们按照人体各待测部位固定在一个架子上。每个探头里有 2 个 CTC-6 计数管。其外圈用 5cm 厚的铅层包住，只有朝向人体一面未包。这样用来减少本底影响，并且可以分别的探测人体各部位的沾污情况。每个探头记录的脉冲分别送入相应的信号单元。信号单元由成形线路、积分电路、甄别器等组成。当某部位受沾污程度超过规定值时，相应的信号单元则借助指示灯给出警报信号。

信号阈可预先调节，调节范围：对 γ -射线为 $0.03\text{мкр/сек} - 3\text{мкр/сек}$ ；对 β -粒子相当于 $150 - 15000 \beta$ -粒子/分 150cm^2 ，分作两个量程。

仪器的测量过程是自动化的，它有一个自动控制机构，由光源和光敏电阻组成。当进行测量时，人体遮住了光源，而引起以后相继的

測量过程。这样可以避免仪器遭到可能的污染。

还有一些类似的，但做得简单一些的叫作手足沾污检查仪的仪器，只用来检查手、足部分的沾污情况。

(3) ДП—11—Б 辐射指示仪

是一种可携带式的用来发现和测量 β 、 γ —放射性沾污情况的仪器，也可作野外探测用(如探放射性矿藏)。探头里有一个 CTC—5 型的卤素管，探头后面跟有一个计数率计。电源是用干电池供给的。对 γ —射线可测量到 20 毫伦/时；对 β —粒子可测量到 $10^6\beta$ —粒子/分 cm^2 ，分作两个量程。仪器里附装有一个耳机，当探测到放射性时，可听到计数的响声。该仪器很灵敏，使用也非常方便，比如說在实验室里当放射源丢失时，用它来寻找是很方便的。使用时应该注意，不要让它 在很强辐射下工作，因为计数管寿命是有一定的。不用时应立即关闭电源，防止电池的无故损耗。

3. 仪器的定标 测量时，沾污表面所引起仪器的计数 $N_{c\alpha}$ 并非就是真正沾污大小的数值 N 。其差别在于

(i) 探测窗口对沾污表面所张的立体角非 2π ；

(ii) 粒子入射时，还要受到空气层和探测器外壳(如计数管管壁)的吸收。

但是表面的沾污数值 N 和仪器的计数 $N_{c\alpha}$ 是有关的，可以写成：

$$N = KN_{c\alpha} \quad (5-6)$$

这里 K 是一个比例系数。实际测量时必须知道 K 的大小。 K 的大小要通过定标求得。

(1) 对 β —辐射

测量出一个已知强度的具有一定面积的标准 β —辐射源，在一定几何条件下，单位时间内引起的计数 $N_{c\alpha}$ ，再根据源强换算出标准源所相应的沾污大小 N 来，即可按下式求出 K 值：

$$K = \frac{N_{c\alpha}}{N}$$

设标准面源的强度是 Q_β (粒子数/秒)，它是在 4π 立体角内放出的，相应沾污的大小应该用下式计算：

$$N = \frac{Q_{\beta}}{2} f_{\text{反}}$$

式中因子 $\frac{1}{2}$ 是由于只考虑在 2π 立体角所放出的粒子数, $f_{\text{反}}$ 是由于源衬托物的反散射引起在向着探测器 2π 立体角内粒子数增加的系数, 对 β —辐射能量 $E_{\beta} \geq 0.6\text{Mev}$ 时, $f_{\text{反}} = 1.25 - 1.3$; 此外, 假定源很薄上式中沒有考虑自吸收的影响。

代入后可得到下式:

$$K = \frac{N_{c\alpha}}{\frac{1.3}{2} Q_{\beta}} \quad (5-7)$$

β 的标准源一般是用与子代产物处在平衡态的 U^{238} 物质做成的, U^{238} 塗在一定面积的 Al 板上, 放射源上还盖有一层很薄的鋁箔, 它吸收源内放出的 α —粒子和軟的 β —粒子。使只有上限能量为 2.3Mev 的 β —粒子 (UX_2 放出的) 能够通过。这种源的优点是譜綫单纯、沒有 α —射綫。寿命长、很容易計算放射性强度。定标也可用其它的 β —放射性源 (Sr^{90} 或 $\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$)。

(2) 对 α —粒子

定标方法和上面情况一样, 使用的 α 标准源通常是在一块鋁板上塗上很薄一层 Pu^{239} 或 U^{238} 。这种源当做得很薄时自吸收影响可以忽略。設源强是 Q_{α} 粒子/秒, 相应 α 沾污的大小是

$$N = \frac{Q_{\alpha}}{2},$$

测出的单位时间的計数是 $N_{c\alpha}$

則:

$$K = \frac{N_{c\alpha}}{N} = \frac{N_{c\alpha}}{Q_{\alpha}} \quad (5-8)$$

K 定出后, 实际测量时就可由仪器讀数值求出真正沾污数值大小。要注意使用时, 测量的条件应和定标时条件尽量取得一样 (立体角、面积大小、辐射能量等), 否则要作必要的修正。

近来表面沾污的测量有用一种擦洗取样的方法来进行。这种方法不是直接用仪器测量沾污表面的放射性, 而是从沾污表面取下一定的

放射性物质，进行放射性强度的测量，再推算出表面沾污的大小。这种方法在某些情况下是很有用处的。例如当沾污表面凹凸不平时或者仪器直接放入很不方便时，就可用擦洗法进行测量。在 γ —辐射很强的本底下测量 β 沾污时，直接用仪器去测量已很难测出了，这时用这种方法也是很有效的。

§5—4. 个人 γ 剂量的监察。在可能遇到 γ 辐射的地区内工作的所有人员都必须进行个人 γ 剂量的监察。也就是测量工作人员在一定时间内（如一天或一周内）所受到的总的 γ 辐射剂量，控制所受到的剂量得使不超过允许剂量的标准。并且可将测得的结果纪录和保存起来，以备以后的查阅（例如在健康检查时）。一般采用两种类型的监察仪器，1. 笔型电容式个人剂量计；2. 感光片型个人剂量计。利用它们能够记录在一定时间内所接受到的 γ —辐射的总剂量。

1. 笔型电容式个人剂量计：（个人剂量笔）

我们以 KИД—I 型个人剂量计来举例说明。它包括一盒剂量笔和一台充电—测量的仪器。其剂量笔似一自来水笔，实际上是一个小电离室，充电后，佩带在工作人员身上，经过一定时期后，把剂量笔插入测量仪器内即可测出所受的 X 射线或 γ 射线的累计剂量。该剂量计所能测量的剂量范围为 0.02—2 伦，分为两个量程：0.02—0.2 伦；0.2—2.0 伦。第一量程的误差不超过 ± 0.02 伦；第二量程不超过 ± 0.3 伦。

剂量笔的构造如图所示。它包括两个电离室，其中之一用于 0.2 伦的量程，另一用于 2.0 伦的量程。电离室外壳由一种导电塑料做成，

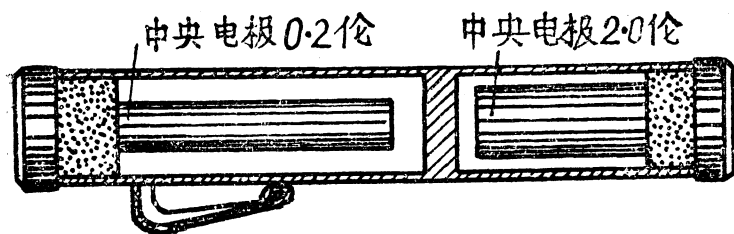


图 5—9 KИД—I 型个人剂量笔

作为电离室一个电极。中央电极由胶木棒构成，用高绝缘材料与外壳分开。绝缘材料电阻达 $10^{17}\Omega$ 以上。

剂量笔的工作原理如下：使用前，先将电离室插入仪器内充电，使中央电极获得一定的电位。电离室取出后，如果受到射线的作用，电离室内的空气将发生电离，正负离子分别向两极移动引起放电，使中央电极的电位降低，降低的数值决定于受照射的剂量。然后将电离室再插入仪器内测量中央电极的电位，即可推知受照的剂量。设 D —受照射的剂量（伦）； C —电离室电容量（cm）； V —电离室空腔体积（ cm^3 ）； ΔV —射线照射下电离室电极间下降的电压（伏）。

$$\text{则：} \quad D = \frac{CAV}{300V} \quad (5-9)$$

300 是由电压的绝对单位（CGSE）转换到实用单位（伏）的转换因子， $1\text{CGSE} = 300\text{V}$ 。

剂量笔的充电电压约为 95 伏，电离室的电容和体积如下：用于量程为 0.2 伦的电离室 $C = 3.3\mu\text{f}$ ， $V = 4.1\text{cm}^3$ ；用于量程为 2.0 伦的电离室 $C = 4.15\mu\text{f}$ ， $V = 0.57\text{cm}^3$ 。剂量笔的室壁材料是选用近于空气当量物质做成的，以减少灵敏度对辐射能量的依赖关系。

测量电离室电极间的电位是比较困难的，困难在于其电容量很小，储存电荷量很少，因此，在接入量测线路时，很容易由于量测线路的输入阻抗而引起电离室的放电，以致于电离室上电压发生改变而引起误差，甚至测量不出来。因此，要求测量线路具有大的输入阻抗，即输入电阻大，输入电容小。此外测量中不能有其它的充放电影响，例如栅流的影响。КИД-1 仪器的测量线路是一个电子管伏特计，它能满足上面所提出的要求。其基本线路如图 5-10 所示：

Π_1 和 Π_2 合成一个阴极输出器。它有很深的负反馈，因此其输入电阻极大，约在 $10^{14}\Omega$ 以上，输入电容很小，在 $1\mu\text{f}$ 以下。第一管工作在静电计管状态，其栅流也极小。测量时，电离室中央电极的电位加在 Π_1 管栅极上，使它的阴极（即 Π_2 栅极）电位发生变化。 Π_2 的输出由微安培计测量。微安培计直接刻度为剂量的伦琴数。

有时在一次的放射性物质操作中，可能受到大量的辐射照射，要

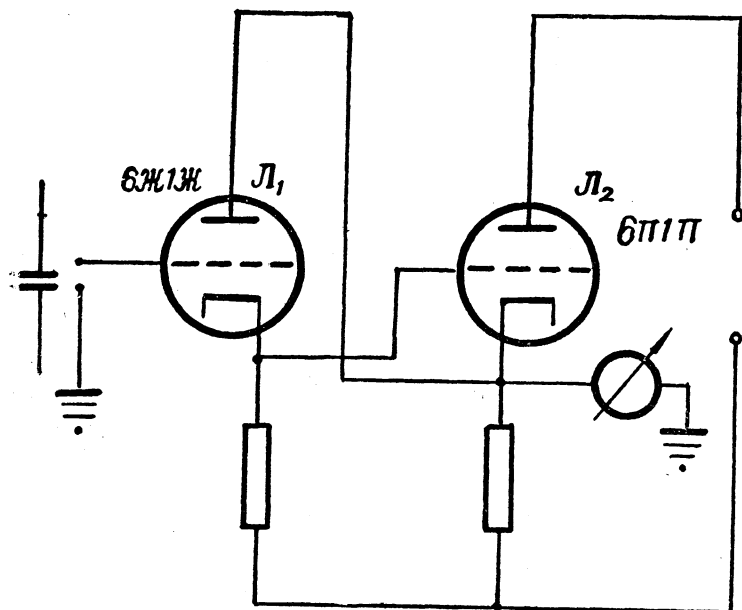


图 5—10 Кид—I 型测量仪器线路原理图

求每一个人能随时了解到他所受到的剂量情况，可以用一种直讀式的个人剂量計（如 ДК—0.2 型个人剂量計）。

ДК—0.2 型直讀式剂量笔的結構如图 5—11 所示。其外电极是圓柱形的壳体，內电极是一弯曲的金属絲，它的一端固定在絕緣体上和外电极絕緣，另一端装着一根直徑为 4.6 微米的鍍鉑石英絲，石英絲

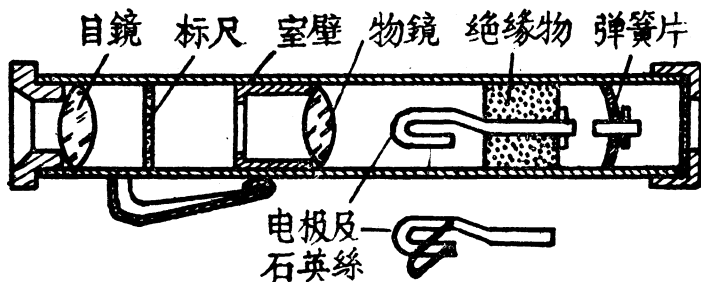


图 5—11 ДК—0.2 型个人剂量笔

的两端和金屬絲固定着而中間可以張開。

使用前先在充電器內充電。充電後，由於金屬絲和石英絲帶有同性的電荷而互相排斥，使石英絲向外張開。充電完畢後劑量筆即可使用。此後，如在電離輻射照射下，電極上電荷將有一部分漏去，減小了金屬絲與石英絲之間的靜電排斥力，因而石英絲逐漸靠攏金屬絲。合攏的程度決定於所受的電離輻射的劑量。劑量筆內裝有一透明的標尺，從目鏡上觀察石英絲在標尺上的位置，即可讀出所受的照射劑量。標尺刻度分為 20 格，每格等於 10 毫倫。

DK-0.2 型劑量筆測量範圍為 10—200 毫倫，誤差為 ±10%。

2. 感光片型個人劑量計 這種劑量計的工作原理是根據電離輻射在感光片上能產生與普通光綫有類似作用這一事實的。受照射後的感光片經過顯影後會變黑，根據變黑的程度可以確定劑量的大小。

黑度 S 的定義如下：

$$S = \lg \frac{I_0}{I} \quad (5-10)$$

I_0 : 入射在感光片上的光綫強度;
 I : 通過感光片後的光綫強度。

感光片的黑度 S 和照射劑量 D 的典型關係 (稱感光曲綫) 如圖 5-12 所示：

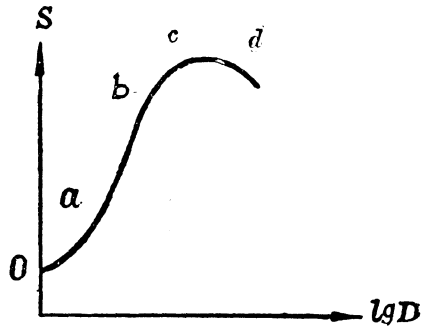


圖 5-12 感光特性曲綫

感光曲綫可分四個區域 (i) oa 段稱感光不足區；(ii) ab 段稱正常感光區；(iii) bc 段稱感光過度區；(iv) cd 段稱負

感光區。對測量劑量的目的只可用在 ab 正常感光區內，切不可用在負感光區；否則將導致嚴重錯誤。

感光片對劑量測量的靈敏度隨輻射能量的變化關係如圖 5-13 所示。縱座標代表每單位劑量所引起的黑度 $\left(\frac{S}{D}\right)$ (稱為靈敏度)，橫座標代表光子的能量。可以看出對低能輻射 (150 Kev 左右) 感光片具

有大的灵敏度。灵敏度对不同能量的差别在测量上会带来很大的不便，可能导致较大的测量误差。为了消除灵敏度对光子能量的依赖关系，常在感光片外附加一层过滤片（如铅片）。由于它对低能的辐射更易吸收，以致于能在很大的一段能量范围内使灵敏度曲线变平。

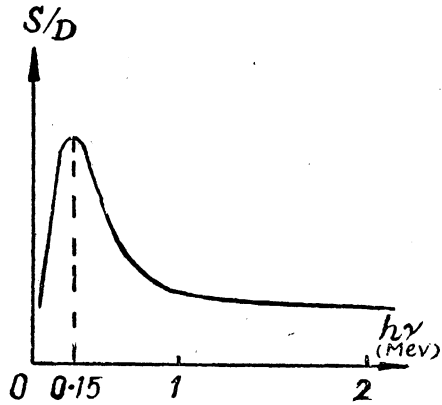


图 5—13 感光片灵敏度曲线

苏联生产的感光片型个人剂量计有一个大小为 $67 \times 43 \times 9$ mm 的胶木盒；里面装有一厚度为 0.75 ± 0.05 mm 的 Π 形的铅滤片，其作用在于消除感光片灵敏度对辐射能量的依赖关系。感光片用纸包着（怕漏光）放在铅滤片里。胶木盒内可以同时放入几种不同灵敏度的感光片以提高剂量测量的范围，也可以同时装有专门的乳胶片用来测定中子的剂量。（§5—6）

按上法装好的胶木盒即可交工作人员佩带，经过一定时间后（几天到一星期），取出感光片并进行显影、定影，然后用黑度计测量其黑度。为了能够由黑度确定出剂量及为了消除显影条件（如显影时间、温度等）不同对测量结果的影响，常用另一套已知剂量的标准感光片和待测的感光片同时在同一条件下进行显影、定影。作出已知剂量的标准感光片的感光曲线来，由此曲线找出所相应待测的照射剂量来。

笔型和感光片型两种个人剂量计各有其优缺点，一般同时使用，前者灵敏可每日测量一次，后者可每周测量一次。当两者读数不同时，一般认为得到较小的剂量数值是正确的，因为这两种方法的误差（剂量笔——漏电，感光片——漏光、低能辐射影响等）都会导致读数的增大。

§5—5. 大气和水中放射性浓度的监察 在原子能企业里，大气和水中放射性浓度的监察对工作人员和附近周围地区居民的健康和安全

來說有着极其重要的意义。

大气的污染有两种情形：一种是含有放射性微尘，一种是含有放射性气体。由于放射性物质在空气中极限允许浓度都很低，因而这种监察一般讲是比较困难的。例如元素 Pu^{239} 在空气中的极限允许浓度为 2×10^{-15} 居/升，这相当于重量浓度为 3×10^{-14} 克/升，或相当于在 1 升空气中的微尘数少于 1 个半径为 0.1 微米的颗粒。

下面介绍一一般的监察方法：

1. 空气中放射性微尘浓度的监察 测量空气中放射性微尘浓度的一般方法是这样的：先将一定体积的空气通过一个微尘收集系统（通常称为过滤器），然后测量所收集的微尘放射性，求出空气中放射性微尘浓度来。设 V ：表示通过过滤器空气的体积（升）； ϵ ：过滤器对微尘的收集效率（收集的微尘数占总进入的微尘数的百分数）； N ：收集到的微尘引起计数装置的计数（计数/分）； η ：计数装置的效率（记录的粒子数占收集微尘放出的粒子数的百分数）；则空气中放射性微尘浓度 C 可用下式表示：

$$C = \frac{N}{2.2 \times 10^{12} \epsilon V} \quad (\text{居/升}) \quad (5-11)$$

式中，因子 2.2×10^{12} 是考虑单位转换而得出的。在抽气和测量过程中，如果所测量的放射性微尘元素由于本身放射性衰变、子代生成等因素而引起放射性强度改变的话，那末从上式所得的结果中还要对这些因素进行相应的校正。

收集微尘（取样）通常用两种方法进行：

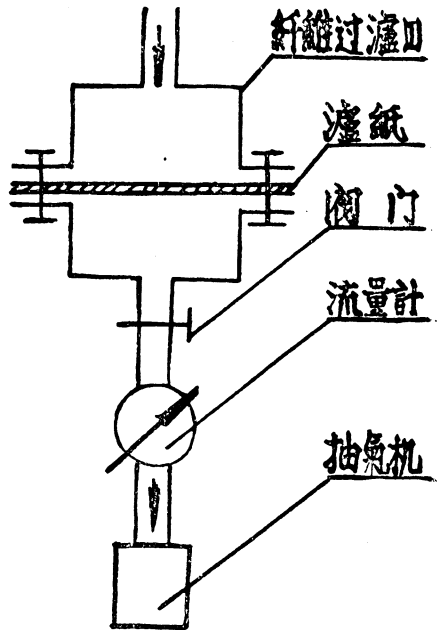


图 5—14 纤维过滤器法抽气系统示意图

(1) 纖維过滤器法：用抽气机以一定的抽速使空气通过纖維过滤器而将微尘收集在特制的纖維过滤紙上（见图）。以后将滤紙取下进行放射性测量。根据抽气所用的時間（数十分钟）及空气的流速（借仪表讀出）就可知道通过过滤器的空气体积。它也可直接由流量表讀出。

过滤器的形状和結構可根据具体情况設計。一般要求：密封好、收集效率高、更換滤紙方便以及制造容易、經濟耐用等。所用滤紙的牌号很多，可用下面几个主要指标說明：允許通过的流速、收集效率、在滤紙上压降（阻力）等。常用的有两种牌号： $\Phi\Pi\Pi-15$ 、 $\Phi\Pi\Pi-25$ 。当空气流速为 $1\text{cm}^3/\text{sec}\text{-cm}^2$ 时， $\Phi\Pi\Pi-15$ 的阻力为 $1.5\sim 1.9\text{mm}$ 水柱， $\Phi\Pi\Pi-25$ 阻力为 $0.3\pm 0.2\text{mm}$ 水柱。油雾試驗当流速为 $1\text{cm}/\text{sec}$ 时， $\Phi\Pi\Pi-15$ 的通过系数不大于 0.1% （即收集效率为 99.9% ）， $\Phi\Pi\Pi-25$ 的通过系数不大于 0.001% 。

(2) 电过滤器法：电过滤器中有一組針形电极和一个板状电极，电极間加了很高的电压（8000 伏左右）。从針状电极上有电子发出（由于电量放电），它們在电极間被加速并引起空气的游离而产生了大量的正负离子。抽入的空气通过电过滤器时，空气中微尘就带上了电荷，在电场作用下能聚集在一个薄的鋁箔上（在平板电极上）因而就收集了微尘。这种方法有很多优点但比較复杂，在目前还没有纖維过滤器应用得广泛。

微尘的监察可以用取样分析的方法，也可用連續测量的方法（連續監察）。后者可以得到空气中微尘濃度随時間变化的情况。其原理如下（见图5—15）：

抽气系統 b 将空气抽过滤紙带 f ，同时滤紙带为一套拖动机机构 a 所拖动，作緩慢移动。放射性物质沉降在滤紙上，而在离开过滤口不远处有一計数管 c 作探测用。其計数由測量設備 d 所记录。設備上的讀数經过定标后可直接刻成放射性濃度的数值。

2. 空气中放射性气体濃度的监察 同上面情况相似，可以采用取样分析法和連續監察法。若用电离室进行取样測量时，先在电离室內充滿所要測量的空气，然后測量出电离室的电流。該电流（飽和情况

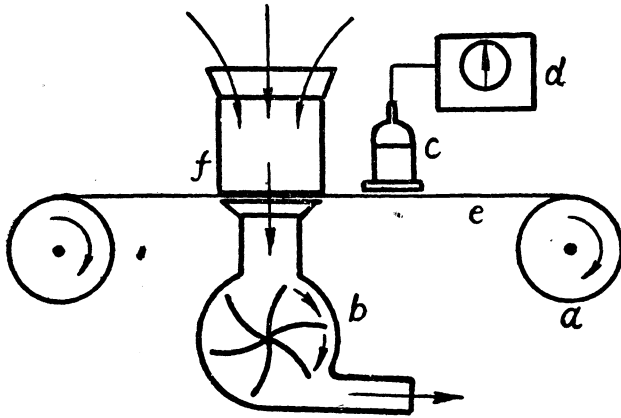


图 5—15 連續監察裝置原理圖

下) 大小和气体放射性濃度間有一定关系, 可以由下面的考虑得出: 令 C 表示电离室充气后 t 瞬时的气体放射性濃度 (居/升); E 表示每次衰变放出的能量 (Mev); V 表示电离室体积 (升)。1 秒钟內在电离室內发生的总衰变数則为 $3.71 \times 10^{10} CV$ 。又設 η 为粒子在电离室体积內平均消耗的能量份額; ϵ 为平均游离功 (e.v.); e 为 1 个离子的电荷 (用 C.G.S.E 单位表示), $1e = 3.3 \times 10^{-10}$ 庫倫。

則电离室产生的饱和电流 i_H 等于:

$$i_H = \frac{3.71 \times 10^{10} C V E \eta \times 10^6}{\epsilon} \times e \times 3.3 \times 10^{-10} \text{ (安)} \quad (5-12)$$

可以看出饱和电流 i_H 正比于气体的放射性濃度 C 。由这时的濃度 C 可以推算出在 $t=0$ 时的, 也就是大气中原来的放射性濃度值 C_0 。若在被測量气体的衰变中, 不产生放射性子代产物, 則 $C_0 = C e^{-\lambda t}$, 其中 λ 是衰变常数。

連續監察可以用一个抽气机让空气連續地經過一个电离室而实现。同样可以得到气体的放射性濃度和电离室饱和电流間一定的关系, 由此, 可以确定放射性濃度。

为了有較高的灵敏度 (能測量較低濃度的放射性气体) 电离室体积要适当地大些, 濃度愈低, 体积就要愈大。此外, 輻射类型也影响

选用的电离室体积大小。对 β -粒子，射程长，电离室体积就应更大一些，对 α -粒子，体积可小些。

3. 水中放射性浓度的监察 废水放射性浓度的监察基本上有两种方法：

(1) 直接测量法：把探测器（如计数管）直接插入水中或放在水面上进行放射性测量。这种方法比较简单，能立刻给出测量结果。但是它的灵敏度较低，只适用于测量较高浓度的废水。这因为能被探测器所探测到的只是围绕探测器周围一层液体中的放射性（如对 β 沾污测量时，这一层厚度 $\leq \beta$ 粒子最大射程），辐射能量愈小，灵敏度愈低。这种方法只能测量水中 β 和 γ 放射性物质的浓度，对 α 放射性是不适用的。现在能测到的浓度可达 10^{-9} 居/升（对 1 Mev 的 β 辐射）。要由测量的计数求出废水的浓度，整套测量设备应预先进行定标。

(2) 蒸发浓缩法：取一定体积的废水，蒸发烘干，做成放射性样品，然后测量出样品的放射性强度，根据所测得的放射性和所取水样的体积经过换算而得出废水放射性浓度。这种方法的灵敏度由取水的体积和测量设备的灵敏度决定，可在很大范围内变动，可以测量出水中较低的放射性浓度。一般说，这种方法对于 β 、 γ 或 α 放射性都是适用的，不受辐射类型的限制。蒸发过程中，要正确选择蒸发温度以防止放射性物质随蒸气而散失；同时要减少容器壁上粘附的放射性（为此在水中可加少量的稀硝酸）。最后的数据处理中要作关于这些因素的修正。这种方法不能连续工作和很快地得出结果，在测低浓度废水时，化费时间很长。目前用这种方法可以解决水中 β 放射性的最大允许浓度的测量问题。使用低本底高效率的测量设备可以测出天然水中的本底浓度。

§5—6. 中子剂量的安全监察 要测量中子的剂量存在着两方面的問題：(1) 在实际情况下中子和 γ -射线往往是同时存在的，纯中子流很少；而对中子灵敏的探测器又往往对 γ -射线也是灵敏的，因此要求探测器在测量中子时能够除去或者区分 γ -射线引起的计数。(2) 能量不同的中子对人体引起的生物效应也不同，因此在遇到多种能量的中子同时存在的情况下，最理想的是希望探测器能够测量出以生物偷琴

当量为单位的剂量来，而不是只测出通量数。这个要求现在还不能做到，目前做出的探头只能测出以物理伦琴当量为单位的剂量来（如中子“组织当量”探测器），它们在安全监察方面也很少应用。

目前在安全监察方面，中子是按照能量区域分为热（慢）中子和快中子，它们的最大允许剂量标准常用相应的通量来表示。各种探测仪器也只是分别地探测热中子和快中子的通量，并不直接测出以生物伦琴当量为单位的剂量来。

快中子的探测主要是根据对氩核发生的弹性散射所产生的反冲质子引起游离而被记录的，常用闪烁方法测量。闪烁体用有机晶体做成，它含有大量的氢原子，因此对快中子具有高的探测效率。为了除去 γ -射线引起的计数，在记录线路里装有甄别单元，以便甄别掉 γ -光子所产生的较小的脉冲。为了更容易地分开中子和 γ 的脉冲，闪烁体常用有机物质（含有大量的氢原子）和无机晶体（ZnS(Ag)）混合做成，ZnS(Ag)可涂在有机玻璃片上或分层排列。这样从有机物质内打出的反冲质子，由于它的射程很短，在ZnS中可以全部损失掉自己的能量，产生了一个很大的脉冲而被记录； γ -射线所产生的次级电子，射程长因而就穿过了颗粒状或层状的ZnS物质，不能引起足够大的脉冲，很易甄别掉。闪烁探头对快中子的探测效率高，有较大的灵敏度，如对20Mev的快中子，现在做出的探头能够测量出最大的允许照射通量，即20快中子/сек·cm²。用硫化锌粉末与有机玻璃做成的厚度为1.25cm、直径为2.5cm的闪烁体，测量Po—Be中子源的流强时（En=4.4Mev），强度为20快中子/сек·cm²的中子流能引起的读数为70脉冲/分。

也有用充入含氢物质的电离室和计数管做为快中子的探测元件，但用在安全监察方面不够理想。

热（慢）中子的探测可以利用 $B^{10}(n, \alpha) Li^3$ ， $Li^6(n, \alpha) H^3$ 这一类反应进行。应用较多的探头是含硼或含锂的闪烁体，也有用BF₃计数管的。

工作地区中子流辐射通量的监察方法和 γ -射线情况类似。也有固定式和流动式两种监察方法。中子辐射仪也分作固定式和可携带式

的两种。苏联出产的 PH—3 和 PH—4 型号的中子辐射仪可以作为这类仪器的例子。

固定式的 PH—3 中子辐射仪有一对閃爍探头，能在 γ -本底存在的情况下同时测量出快中子和慢中子的通量。仪器里有一套警报系统。当热中子或快中子通量超过预先规定数值时发出警报信号。它有两种信号方式：预报的和紧急的。探头和测量控制部分可以相隔 150 米，满足远距离测量要求。仪器由交流电源供电。

可携带式的 PH—4 中子辐射仪能够测量出快中子（能量由 0.5 到 14Mev）和热中子的通量。仪器有三个可更换的閃爍探头：一个用来记录快中子，另外两个记录热中子，它们在 200Mkp/сек 的 γ -射线本底下还能工作。仪器由乾电池或交流电源供电。

PH—3 中子辐射仪测量部分线路简图如下：

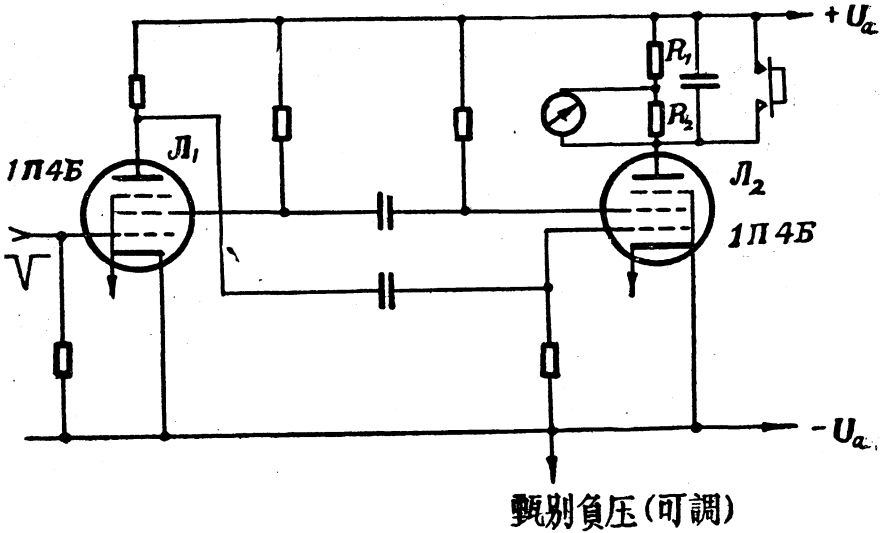


图 5—16 PH—3 中子辐射仪线路简图

测量线路由一个简单的计数率计做成。多諧振蕩器做为成形线路，在成形线路第二个管子的板极里接入了积分电路和测量仪表。调节甄別器負栅压的大小，可以不记录 γ -射线所产生的小脉冲。

个人中子剂量的监察可使用专门的乳胶片进行。借助于中子在乳胶片中所产生的次级粒子的径迹可以测量中子的通量。乳胶片中的径迹在显影和定影后可以用显微镜来观测。对快中子，径迹是由反冲质子所产生的；对于热中子，径迹是由和氮起 $N^{14}(n, p)C^{14}$ 反应所放出的质子产生的。

使用时，乳胶片有部分用 Cd 片包住。Cd 是热中子很好的吸收剂，只有快中子能穿过它。因此有 Cd 片包住的乳胶片上的径迹是由快中子产生的；没有 Cd 片包住的乳胶片上的径迹是由快中子和热中子所产生的。这样可以区分开快、热中子的照射通量。对于一般受到照射的工作人员每三个月或更长时间才察看胶片上的径迹；对受到强烈照射的人才需要每周查看的必要。

§5-7. 剂量的绝对测量

1. 测量的原理 我们知道，剂量是表示辐射转交给某确定体积内空气的电子的能量。这些电子的能量可以通过测量它所产生的离子对数目来确定。怎样测量所产生的离子对数目呢？是否用任何一个电离室就能测量呢？这是我们下面要讨论的问题。

可以按下面两种原理进行离子对数的测量：

(1) 测出在确定的体积内形成的次级电子所产生的全部离子对数，也就是说要知道：①次级电子是那一部分体积内产生的，这个体积称为测量体积；②这些次级电子所产生的离子对数目是多少。由于电子可以跑出测量体积外，所以所产生的离子对可以分布在一个更大的体积内，这个体积称为电离体积。第②点就是要测量出在电离体积内的离子对数，其中不包括由在测量体积外的次级电子所产生的离子对数。这种测量方法称为以仑琴为单位的剂量的绝对测量。

设 V_r 为形成次级电子的测量体积，其半径为 r ； V_R 为产生离子对电离体积，其半径为 R ； q_R 为在 V_r 内形成的次级电子所产生的而分布在 V_R 内的离子对数；绝对测量就是要求知道 V_r 的大小和测量出 q_R 。

(2) 但是，也可以有另一种办法：设辐射照射着整个球体 V_R 上，现在来考虑在 V_r 内的离子对数，它可以是在 V_r 内形成的次级电子所

产生的，也可以是在 V_r 外形成的次级电子进入 V_r 内所产生的。用 q_r 表示这两部分次级电子在 V_r 内所产生的总离子对数。

若有这样的情况存在： $q_r = q_R$ ，
(5-13)

则测量出在 V_r 内的离子对数也就可以了。

$q_r = q_R$ 的情况称为电子平衡。

若在辐射照射着的一块介质中，圈出一个半径为 R 的球，在球的中心圈出一个半径为 r 的另一小球（见上图）。大球体积以 V_R 表示，小球体积以 V_r 表示。若有下列条件成立：(i) 射线在介质内（大球范围内）的吸收可以忽略；(ii) 半径 R 很大，大于次级电子的最大射程，则可以证明电子平衡是存在的，即 $q_r = q_R$ 。上两条件称为电子平衡条件（证明见附录）。

一般讲，任意一个电离室，其体积内产生的离子对既可以是空气中形成的次级电子所产生的（称“气体作用”），也可以是在室壁中形成的次级电子进入空气中所产生的（称“室壁作用”）。因为这种电离室体积

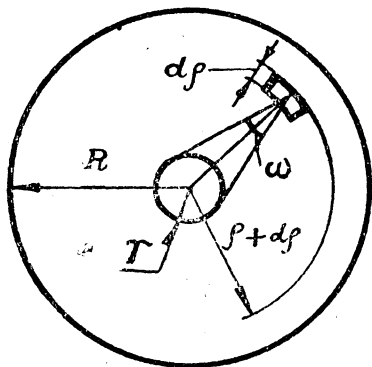


图 5-18 电子平衡的证明

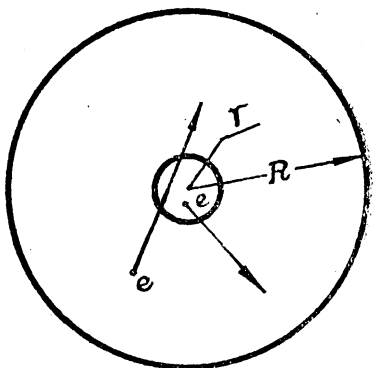


图 5-17 剂量的绝对测量

内的离子对不能确定地代表辐射转交给那一部分体积电子的能量，所以这种电离室不能直接用来进行剂量的测量。但可以按照上面两种原理，设计出两种类型的电离室用作剂量的测量。基于第一种原理工作的电离室，室壁完全不起作用，称为标准电离室；基于第二种原理工作的电离室，其离子对的产生或者主要是由于室壁作用，或者是处于电子平衡情况下的室壁和气体都起

作用，称为頂針式电离室或空气当量电离室。

附录：证明在下面两个条件下，电子平衡情况存在。

(i) 若允許忽略射綫在介质中的吸收；

(ii) 所考虑的介质厚度大于电子最大射程；

此外，为簡單起見我們作下面假定：（它并不影响問題的普遍性）

(i) 次級电子的射程都一样，并等于 R ；

(ii) 次級电子在每单位路程上产生的离子对数目一样。

設： n ——单位体积內形成的次級电子数；

k ——次級电子单位路程上产生的离子对数；

N ——在 V_R 球內形成的次級电子穿过 V_r 球的数目；

l_{cb} ——次級电子穿过 V_r 球的平均长度；

q_r ——在 V_r 內产生的离子对数；

q_R ——在 V_R 內产生的离子对数。

根据条件 (i) 忽略了射綫的吸收，因而各处产生的次級电子是一样的，即 n 是一常数。

我們先計算 q_r 的大小，显然可用下式表示 $q_r = kNl_{cb}$ 。

N 可計算如下：在体积元 dv 內形成的次級电子是 ndV （见图），它穿过 V_r 的几率是 $\frac{\omega}{4\pi}$ ， ω 为 dV 对 V_r 所張的立体角，

$$\omega = 2\pi \left(1 - \frac{\sqrt{\rho^2 - r^2}}{\rho} \right),$$

則
$$N = \int_V n \frac{4\omega}{4\pi} dV$$

$$= \int_r^R \frac{n}{4\pi r} 2\pi \left(1 - \frac{\sqrt{\rho^2 - r^2}}{\rho} \right) 4\pi r^2 \cdot dq = \pi n R r^2,$$

l_{cb} 可认为是弦的平均值， $l_{cb} = \frac{4}{3}r$ 。将 N 和 q_r 的表示式代入上式后得到

$$q_r = k \frac{4}{3} \pi n R r^3.$$

另一方面，在 V_r 內形成的次級电子是 $V_r \cdot n$ ，每个电子的射程为 R ，所以

$$q_R = knV, R = k \frac{4}{3} \pi n R r^3.$$

$$q_r = q_R.$$

2. 标准电离室 基于第一种原理设计出来的, 用作剂量绝对测量的电离室称为标准电离室, 结构示意图见图 5—19。电离室有二个光栏 F_1 和 F_2 。被测量的射线束沿着轴綫从光栏 F_1 射入, 无阻挡地从光栏 F_2 射出。射线束经过 F_1 后, 其截面为 F_1 大小所限制, 使形成次级电子的体积只局限在轴綫附近的一个区域内。

电离室有三个电极——一个收集电极 A_1 , 两个保护电极 A_2 和 A_3 。 A_1 和测量綫路相連, 收集产生的离子对。 A_2 、 A_3 和 A_1 相隔开但具有和 A_1 相同的电位, 用来消除 A_1 的边缘效应, 使得电场均匀, 电力綫都垂直于电极。

电极和轴綫间的距离要相当大, 大于电子的最大射程, 保证次级电子不会冲击电极, 其能量能完全地消耗在游离上。

此外, 从光栏 F_1 、 F_2 到收集电极的距离也要足够大, 大于次级电子最大射程, 以保证电子平衡条件。

我们来考虑次级电子的形成和离子收集的情况。在电离室内, 划出两块体积: ①体积 $abcd$; 其底面积和电极 A_1 大小相同; ②体积 $efgh$; 其截面为射线束截面, 其长度为电极 A_1 的长度。(见图)。

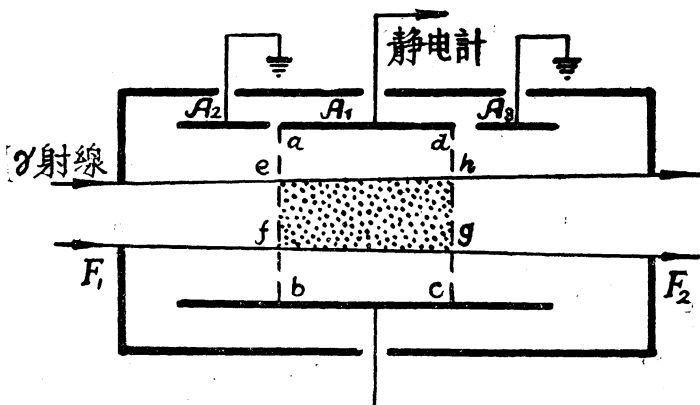


图 5—19 标准电离室原理图

从体积 $efgh$ 內形成的电子，其能量全部地消耗在电离上，所产生的离子对既可在 $abcd$ 內，也可在 $abcd$ 外。但后一情况并不影响测量，因为次級电子固然可以从一面跑出去，但是也有从另一面跑入的。若忽略了空气对射綫束的吸收，可以认为它們互相补偿（电子平衡）。所以可以认为在 $efgh$ 內形成的次級电子所产生的全部离子对数都在 $abcd$ 內。

因为电場方向都是垂直于电极的，离子对是沿着电場方向运动的，所以在 $abcd$ 內的离子对不会跑出，将全部为电极 A_1 所收集；而 $abcd$ 外的离子对也不会跑入，不能为电极 A_1 所收集。

因此我們可以看出，为电极 A_1 所收集的离子对完全是在一个确定体积內形成的次級电子所产生的。体积 $efgh$ 就是测量体积，体积 $abcd$ 就是电离体积。因而能够用来进行绝对测量。

設测量体积为 $V(\text{cm}^3)$ ；收集的饱和电流为 $i_H(\text{a})$ ；剂量率为 $P(P/\text{сек})$ ，下式将严格成立（見 §5—1）：

$$i_H = 3.3 \times 10^{-10} PV \quad (5-1)$$

$$P = 3 \times 10^9 \frac{i_H}{V} \quad (5-14)$$

設光栏 F_1 面积为 $S(\text{cm}^2)$ ；电极 A_1 长度为 $l(\text{cm})$ ，若认为射綫束是平行入射的并略去空气吸收的影响，則

$$V = S \times l$$

$$P = 3 \times 10^9 \frac{i_H}{Sl} \quad (5-15)$$

随着 γ -光子能量不同，标准电离室的形状尺寸、材料都有所不同，每一标准电离室只适用于一定的能量范围，当 γ -光子能量较高时，为了满足电子平衡标准电离室将做得很大。

标准电离室只用来作为标准的定标仪器。一般的使用是很不方便的。

3. 頂針式电离室 · 頂針式电离室是基于上述第二种测量原理工作的电离室，不論在实用上或者在理論上它都有很重要的意义。頂針式电离室的理論表明了这样一点： γ -射綫轉交给物质中电子的能量可以根据在該物质中一个空腔中所产生的离子对数推算出来。

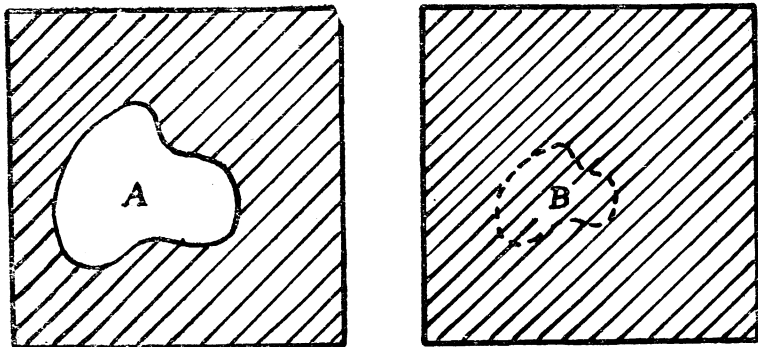


图 5—20 頂針式电离室关系式的推导

下面来介绍頂針式电离室的测量原理：

設电离室的室壁为某种材料做成，室壁內有一充滿了气体的小空腔 A （见图）。在輻射作用下，空腔 A 中产生了离子对，离子对可以是空腔中形成的次級电子所产生的（“气体作用”），也可以是由室壁打出的次級电子进入空腔中所产生的（“室壁作用”）。

为了了解空腔 A 中所产生的离子对数目和室壁材料所吸收輻射能量的关系，用另一介质（形状、大小、材料与上述电离室相同）和电离室来比較，在其內相应于 A 处圈出一块小体积 B （也称作空腔），其形状和空腔 A 相似，但綫性尺寸只有空腔 A 的 $\frac{1}{\rho}$ ，在 B 內所充的介质与室壁材料相同。 ρ 为次級电子通过室壁材料和气体时单位路程上所損失能量 $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ 的比值，也即为单位路程上所产生离子对数 $\left(\frac{dQ}{dx}\right)$ 的比值。

$$\rho = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{室壁}} / \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{气体}} = \left(\frac{dQ}{dx}\right)_{\text{室壁}} / \left(\frac{dQ}{dx}\right)_{\text{气体}} \quad (5-16)$$

显然当一个电子通过空腔 A 和空腔 B 的几何相似的路徑时，在空腔中电子所損失的能量将是相同的（产生的离子对也相同）。

我們假設空腔 A 和空腔 B 的尺寸很小，远远小于次級电子的最大射程，以致由于“气体作用”形成的次級电子在空腔中所損失的能量和由于“室壁作用”形成的次級电子在空腔中所損失的能量相比較的

話，前者可以忽略，因而我們只考慮“室壁作用”形成的次級電子。

我們來比較一下在相同的輻射照射下，空腔 A 和空腔 B 中所產生的離子對數目。空腔 A 很小，它的存在並不影響次級電子原來在室壁中的空間分布和能量分布。由於空腔 A 的表面積比 B 大 ρ^2 倍，因此在相同時間內進入空腔 A 的次級電子將比進入 B 的大 ρ^2 倍；因為每一個相似的（位置和方向）電子在這兩個空腔中能量損失是一樣的，所以在空腔 A 中次級電子總的能量損失比在空腔 B 中大 ρ^2 倍。但空腔 A 的體積比空腔 B 大 ρ^3 倍，所以在單位體積內，次級電子在空腔 A 中的能量損失將比空腔 B 中小 ρ 倍。

設 ΔE_a 和 ΔE_b 為單位時間內次級電子在空腔 A 和 B 中的單位體積內所損失的能量； q_a 和 q_b 為單位時間內次級電子在空腔 A 和 B 中的單位體積內所產生的離子對數；

根據上面的討論：

$$\Delta E = \frac{1}{\rho} \Delta E \quad (5-17)$$

或
$$q_a = \frac{1}{\rho} q_b \quad (5-18)$$

另一方面，對空腔 B 來說，它和周圍材料是一樣的，是電子平衡的情況（只要室壁材料的厚度大於電子的最大射程，並且忽略室壁對射線的吸收），因而空腔 B 的單位體積中所吸收的能量等於輻射所交給電子的能量，即 $\Delta E_b = \Delta E$ ； ΔE 為單位時間內輻射轉交給室壁材料的單位體積中電子的能量。

代入上式：

$$\Delta E = \frac{1}{\rho} \Delta E \quad \therefore \Delta E_a = q_a \varepsilon \quad (5-19)$$

$$\therefore \Delta E = \rho q_a \varepsilon \quad (5-19)$$

ε 為平均游離功。

此式表明了頂針式電離室一個重要的關係：輻射轉交給室壁材料單位體積中電子的能量只和電離室單位體積內產生的離子對數有關，因此測出電離室電流的大小可以推算出室壁材料的單位體積中所吸收輻射的能量。

从討論中我們看出要使上面关系式成立，电离室必須滿足一定条件：

(i) 空腔 A 的綫度要很小，要远小于次級电子在气体中的最大射程，因而“气体作用”可以忽略。

(ii) 室壁厚度要大于次級电子的最大射程。

(iii) 要忽略室壁对射綫的减弱，即室壁也不能太厚以致于显著地减弱了射綫强度。

后两条件保证空腔 B 的电子平衡。

上面的討論中，我們忽略了“气体作用”，这在空腔体积很小情况下是可以的，因此頂針式电离室一般要做得很小。但可以证明室壁材料和空腔中气体为同一物质时(相同的原子序数)，則考虑到“气体作用”，上式 $\Delta E = \rho q_a \varepsilon$ 仍然成立，因而这种电离室体积大小就不会受到限制，空气当量电离室就是这种情形。

要研究某种材料在輻射作用下所吸收能量的話，可以用这种材料作为电离室的室壁材料，知道电离室体积和測定饱和电流的大小，就可以知道材料所吸收的能量。

若室壁材料用空气当量物质做成，則电流大小代表空气当量物质所吸收的能量。所以原則上讲，用頂針式电离室能够进行以侖琴为单位的剂量的絕对測量。其剂量率和电流的关系和标准电离室一样用下式表示：

$$P = 3 \times 10^9 \frac{i_H}{V} \quad (5-14)$$

式中 P 为剂量率 ($P/\text{сек}$)； i_H 为饱和电流 (a)； V 为电离室体积 (cm^3)。实际上严格的空气当量物质不存在，所以一般并不用頂針式电离室来作为剂量絕对測量的标准仪器。

图5-21表示了頂針式电离室构造的一般示意图：

室壁为空气当量物质或所研究的材料做成。室壁厚度的确定要保证电子平衡，对輕元素及 1MeV 左右的 γ -射綫約几 mm ；电极也应选用相同的材料做成，对射綫吸收要小。电离室外形通常为圓柱形的，四面最好对称。其体积通常不大，不超过几个立方厘米。

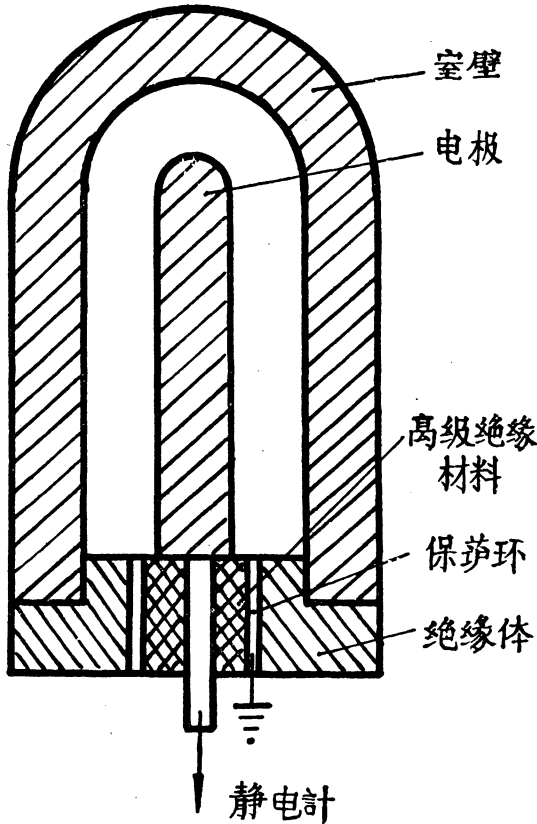


图5—21 顶针式电离室构造示意图

针式电离室的例子。

§5—8. 大剂量的测量 在生产和科学研究中有时会遇到很大的辐射剂量。例如要研究材料在受到辐射照射后物理或化学性质所发生的变化时，必须用很大剂量的辐射来照射材料。为了这样的目的需要进行大剂量的测量。

1. 化学剂量测量方法 当带电粒子、 γ -射线和中子通过物质时常会引起一些化学反应，使得物质某方面性质或者成分有了变化。变化的程度和辐射的性质、数量有关。基于这样的原理来测量剂量叫化

根据顶针式电离室的特点，它可以有下列一些用处：1. 测量各种材料在辐射作用下所吸收的能量；2. 测量在空气中比较大的剂量率；3. 测量某些其他电离室难于放入地方的辐射剂量，如医学中测量机体组织中的照射剂量；4. 用在要求较精确地测出空间某点的剂量大小的地方。在安全监察中，由于体积小，灵敏度低（产生的电流小），用来进行辐射水平（剂量率）的监察是不适宜的，但是可以用来测量累计的剂量。笔型的个人剂量计就是使用顶

学剂量测量方法。用来作为剂量测量的物质，希望其变化的程度和吸收的剂量成正比，并且容易观察出来。目前已发现了很多种物质及很多的化学反应可以用作大剂量的测量。现在举一例子说明：

硫酸亚铁剂量计： FeSO_4 的水溶液在辐射作用下，2价的铁离子(Fe^{+2})能被氧化成3价的铁离子(Fe^{+3})。形成(Fe^{+3})离子的数量是与溶液所吸收的辐射能量成正比的。对标准剂量计的溶液，每吸收100ev的辐射能量，形成的 Fe^{+3} 离子的数量平均为15.6个(称为产额)。标准剂量计溶液成分如下：①2克 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ；②0.3克 NaCl ；③在5升蒸馏水中有浓硫酸110 cm^3 。

3价铁离子(Fe^{+3})的数目可以根据照射到溶液的光线强度变化来测定，为此利用特殊的光分光光度计。利用一种别克曼(Бекман)光度计测量时， Fe^{+3} 离子的浓度 C ，可以根据下式确定：

$$C = 4.57 \times 10^{-4} \lg \frac{I_0}{I} \quad (5-20)$$

离子的浓度的单位用克分子量/升表示， I_0 和 I 分别为对厚度1cm的溶液层，波长为3050A的入射和通过后的光强度。

由溶液的成分看来，主要组成是水，加入的重元素在百分比上是很小的，对吸收辐射的能量来说，溶液的有效原子序数近于水的有效原子序数，因此硫酸亚铁剂量计可以认为是空气和组织当量的。

硫酸亚铁剂量计广泛地用于辐射化学和辐射生物学的研究中以测量1000伦琴以上的大剂量。对测定小剂量是不适用的。

化学剂量计的种类很多，可以列出很多种。它们根据下面一些反应： Ce^{+4} 离子还原成 Ce^{+3} 离子；某些染料在辐射照射下变色；玻璃在辐射照射下变暗；慢中子照射 N_2O_4 时，它被分解成 N_2 、 O_2 、 NO 等。化学剂量测量方法的特点除能测量很大的剂量外，它还能测量 γ 和中子混合场的剂量。

2. 卡计测量方法 若在绝热物体内部，在辐射的作用下没有不可逆的化学反应产生，则在该物体内部所吸收的游离辐射的能量最终都转化为物体的发热。因此，可基于辐射的热效应测量射线的剂量，这种方法称卡计方法。

令 C ——吸收体的比热；

M ——吸收体的质量；

ΔQ ——相当于被吸收的辐射能量的热量；

ΔT ——絕热吸收体的温度变化；

那么
$$\Delta Q = CM\Delta T \quad (5-21)$$

因此測量物体温度的变化可以确定出剂量的大小。实际上在一段时期內，物体吸收的辐射能量所发生的热量一方面使得物体的温度升高，另一方面不可避免地要损失掉。温度的变化和吸收剂量的关系可从下面的考虑中得到：

設 S ——吸热体的表面积； σ ——傳热系数（和相邻介质温度差为 1°C 时，单位時間內通过单位表面积损失的热量）； T ——吸热体的温度； T_0 ——吸热体初始温度（即周圍介质的恒定温度）； t ——吸收辐射能量的時間； ΔT ——在 dt 時間內物体温度的变化； P ——物体单位時間內吸收的辐射能量；則有下式成立： $Pdt = CM\Delta T + \sigma S (T - T_0)dt$ ，等式左边为在 dt 內物体吸收的辐射能量；等式右边第一項为物体温度升高 $\Delta T^\circ\text{C}$ 所需要的热量，第二項为在 dt 時間內物体能失掉的热量。

积分整理后，得到物体温度随時間的变化規律：

$$T - T_0 = \frac{P}{\sigma S} \left(1 - e^{-\frac{\sigma S}{CM}t} \right) \quad (5-22)$$

由上式可以看出：

① t 很小时， $T - T_0 = \frac{P}{CM}t$ ，即在开始时刻，温度的升高和 Pt 成正比，也就是說和吸收的能量（剂量）成正比。

② 在 $t \rightarrow \infty$ ， $T - T_0 = \frac{P}{\sigma S}$ ，即最后物体达到热平衡时，温度高到一定的限度为止，最終的温度只和剂量率大小有关，

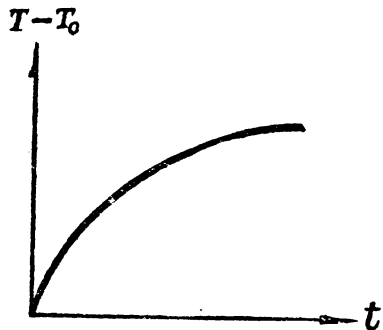


图 5—22 温度改变随時間关系

因此，卡計可以做成是測量劑量的，也可以做成是測量劑量率的。

現在已有多種不同形式的卡計，它們應用了不同的量熱方法滿足不同的測量要求。下面舉出一種用來測量 X 或 γ 射綫強度的卡計。在卡計的中央部分有一吸熱體 A ，它用四根支架固定在一個密封的壳体 B 內。為了防止熱量的損耗，支架用絕熱的塑料做成；壳體的內壁鍍了一層銀，可以減少熱輻射的損失；為了防止對流方式損失熱量，將壳体內抽成真空整個壳体 B 又放在一個恒溫槽 C 內，它保持着恒定的溫度 T_0 。

在輻射作用一定時刻後，吸熱體溫度升高。溫度的變化用熱電偶來量測。熱電偶的一端在吸熱體內，另一端在恒溫槽

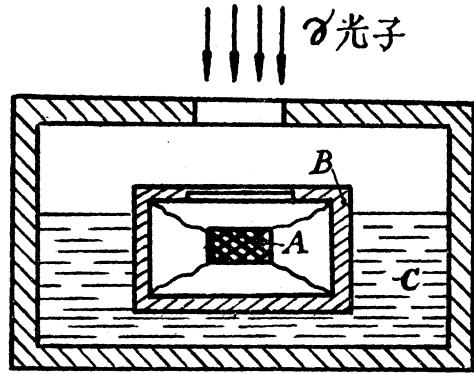


圖 5—23 卡計的示意圖

內，當兩端溫度不同時，熱電偶迴路中有電流產生，此電流大小說明吸熱體溫度變化情況，由此可以決定輻射的劑量或劑量率。

在吸熱體內還有一個可通電流的加熱綫圈，它是為了校正和定標卡計用的。

卡計方法是絕對測定以能量單位表示的被吸收劑量的唯一方法。它不需要知道平均游離功的數值，在測量時它可以避免像自吸收、反散射這些因素帶來的誤差。

用卡計方法可以測量 α 、 β 放射源的強度， X 或 γ 射綫的輻射強度及加速器出來的電子通量等。其相應的靈敏度都很低，所以只適用於測量大劑量。現在對 γ 射綫能測出的劑量率下限為 10^3 ir/сек。

第 六 章

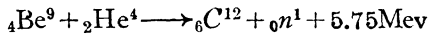
中子的防护 反应堆及加速器的防护

中子的穿透本领很强。它和 γ -射线一样，也是形成外部照射的一种主要辐射。中子穿入人体里能与人体中的氢核作用引起质子反冲，随后又可能与氮等元素的原子核起反应而放出质子、 α -粒子、或 γ -射线。那些被放出的带电粒子有很高的电离本领，电离密度很大，因此中子对人体有较大的危害作用，生物效应很高。

经常需要防护中子的地方主要有反应堆、加速器及一般常用的中子源等。要防护中子就需要知道它们的特性（强度、能量等）。关于反应堆和加速器将在以后专门论述。这里准备补充一些有关中子源的知识。

最常见的是 (α, n) 类型的中子源。其中子是用 α -粒子轰击某种低质量元素的原子核而产生的。 α -粒子一般是由天然 α -放射性同位素（如镭 (Ra)、钋 (Po) 等）放射出的；被轰击的低质量元素可以用铍 (Be)、锂 (Li)、氮 (N)、硼 (B) 等，其中以铍放出中子的能量最强，可达 $5\sim 12$ Mev，锂次之。当 α -粒子能量不同时，产生的中子的能量也不同。

(1) Ra—Be 中子源



通常是将铍研成粉末与镭（粉状）均匀混合，压紧盛于密闭的玻璃或金属容器中。一般铍与镭的重量比是 $3:1$ 到 $5:1$ ，其中子产额为 $1\sim 1.7 \times 10^7$ 中子/秒·克镭（注(i)）。Ra—Be 中子源放出的中子能量分布很广，从几百个 Kev 直到 $7\sim 8$ Mev，有效能量可以认为是 5.4 Mev。Ra—Be 中子源强度可以视为恒定的，因为 Ra 的半衰期很长（1620 年）。Ra—Be 中子源的优点主要是：体积小，强度大，寿命长。其缺

点是：价格昂贵，有较强的 γ -射线放出，并且使用不当时容易使有害的气体（氦气）漏出。

(2) Po—Be 中子源

由钋放射出的 α -粒子同样可打在 Be 核上产生中子，其产额为 $2.5 \sim 2.6 \times 10^6$ 中子/秒·居里。中子的有效能量为 $4 \sim 5$ Mev (注(ii))。Po—Be 中子源强度随时间而减弱，其半衰期就是钋的半衰期 ($T_{1/2} = 138.2$ 天)。它没有 Ra—Be 中子源的上述缺点。但是，与 Ra—Be 源相比，中子产额小，半衰期短。

下面列出几种(α -n)源的有关数据：

表 6—1 几种(α -n)中子源

源	有效能量 (Mev)	半衰期	产额 (中子/秒居)
Ra—Be	5.4	1620 年	}注(i)
Ra—B	2.9	1620 年	
Po—Be	4.5	138.2天	$2.3 \sim 2.6 \times 10^6$
Po—B	2.3	138.2天	$6.1 \sim 6.9 \times 10^6$

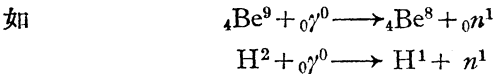
注(i)：如以 RaBr₂ 作为 α 源时，其中子产额可用下式计算：

$$\text{Ra—Be 源 产额} = 1.7 \times 10^7 \frac{\text{Be 的重量}}{\text{Be 的重量} + \text{RaBr}_2 \text{ 的重量}} \text{ 中子/秒} \cdot \text{克镭}$$

$$\text{Ra—B 源 产额} = 6.8 \times 10^6 \frac{\text{B 的重量}}{\text{B 的重量} + \text{RaBr}_2 \text{ 的重量}} \text{ 中子/秒} \cdot \text{克镭}$$

注(ii)：源的制作方法不同其产生的中子将有不同的能谱。

中子源的类型中还有一种是利用 γ -光子打在元素的核上而产生中子的，这种中子源称为光激中子源——(γ, n)源。



引起光激中子的 γ -射线必须大于一定的能量；对铍是 1.6Mev，对氘是 2.2Mev，实际上这个能量就是中子与铍、氘的结合能。铍、氘两元素的结合能最低，而反应截面也大，故光激中子源的靶核都是用这两个元素。 γ -光子能量不同，产生的中子的能量也就不同。一般可认为(γ, n)源放出中子的能量是单能的，

下面列出几种 (γ, n) 源的有关数据:

表 6—2 几种(γ, n)源

源	$E_r(\text{Mev})$	中子能量 (Mev)	半衰期	产额(中子/秒) (注)
Na ²⁴ —Be	2.76	0.83	15 小时	130000
Na ²⁴ —D ₂ O	2.76	0.22	15 小时	270000
Ra—Be	很多种	很多种	1620 年	30000
Ra—B ₂ O	2.42	0.1	1920 年	1000
Sb—Be	1.7	0.024	60 天	190000

注: 产额指 1 克的 Be 或 D₂O 在相距为 1 cm、强度为 1 居里的 γ -放射源的作用下, 每秒所放出的中子数。

为了研究的方便, 通常将中子按能量分为四类,

- (1) 热中子: 能量从十分之几 eV 到几个 eV;
- (2) 慢中子: 能量从几个 eV 到 20Kev;
- (3) 快中子: 能量从 20Kev 到 10Mev;
- (4) 超快中子: 能量大于 10Mev。

§6—1. 中子与物质的相互作用 为了说明中子的防护问题, 我们先简略地介绍一下中子与物质的相互作用。中子本身不带电, 穿过物质时和 γ 射线一样不能直接引起电离, 穿透本领很强。但是中子与物质相互作用的过程和 γ -射线却有很大的不同。中子与物质的一切相互作用, 都具有核的性质, 即中子只与原子核发生作用与核外电子几乎不起作用。相互作用截面往往只取决于核的质量数, 而和原子序数没有直接的关系。常有这样的情形, 原子序数相同而原子量不同的同位素与中子的作用有很大的不同。中子与物质的相互作用和中子的能量及物质原子量间的关系是很复杂的, 常常有共振的性质, 不像 γ -射线那样简单而光滑地变化。因此, 研究中子的屏蔽要比研究 γ -射线时复杂得多。

中子与物质的相互作用有两类型式: 1. 散射: 中子与原子核作用并损失部分或全部的能量, 作用后中子和核都未引起本质的改变。散射过程中中子能量降低了, 这现象称为中子的减速 (或称中子慢化); 2. 吸收: 中子进入核内而核放出其它粒子或 γ -射线 (有时称为中子

俘获)。以下对中子的散射和吸收分别说明之。

1. 散射 散射又可分作两种：

(1) 弹性散射：散射前后中子与散射核的动能和动量都是守恒的，其过程可以认为是中子与散射核间只是进行了类似两个弹性小球的碰撞。因而可以根据经典力学的定律来处理这种散射。每次弹性散射，中子把它动能的一部分转移给核，转移部分的大小和散射核的质量数及散射的角度有关。

设 E_n ——中子的入射能量； E_n' ——散射核得到的能量； A ——散射核的原子量； θ ——散射核运动方向与中子入射方向间夹角。可以证明， E_n' 可用下式表示：

$$E_n' \cong \frac{4A}{(1+A)^2} \cos^2 \theta \cdot E \quad (6-1)$$

从上式看到，对不同的散射角，核得到不同的能量，也就是中子损失的能量不同。当 $\theta=0^\circ$ 时，核得到的能量最大，也就是中子损失的能量最多。就一定的散射角而言，核的原子量愈小中子损失的能量愈多。

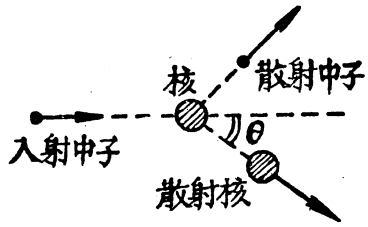


图 6-1 中子的弹性散射

发生弹性散射几率的大小是用截面来表示的。对一个原子的弹性散射微观截面 ($\sigma_{弹}$) 意义如下：通过垂直于射线束每单位面积上 1 个中子和物质单位体积内 1 个原子核发生弹性散射的几率，单位为巴 (10^{-24}cm^2)。对单位体积内的所有原子核发生弹性散射的几率称为弹性散射的宏观截面 ($\Sigma_{弹}$)。显然 $\Sigma_{弹} = n\sigma_{弹}$ ， n 为单位体积内原子的数目。

对轻元素来说，弹性散射有重要的意义。这因为一方面，正如上述，每次散射后中子损失的能量很多，另一方面，轻元素有较大的弹性散射截面，即是特别容易发生弹性散射。例如对氢来说，甚至一次散射中 ($\theta=0^\circ$ 时) 中子就可损失自己的全部能量；其弹性散射截面直到中子能量为 4Mev 时还很大 (约 2 巴)，随着中子能量的降低截

面繼續增大。这在防护問題上用来减速快中子具有很大的意义。

(2) 非彈性散射：散射前后中子和散射核的动能不守恒，而动量是守恒的。散射的結果中子的能量降低了，同时还伴随着 γ -射綫发生。其过程这样：首先中子被核吸收而形成复核，然后复核放出一个能量較低的中子而本身处在受激状态，随后受激的核放出一个或几个 γ -光子而返回基态。中子損失的能量轉給散射核和 γ -光子。

要发生这样的过程，中子的能量必須大于散射核的最低激发态的能量。因此只有当中子能量大于一定数值时（最低的激发态能量），才能发生非彈性散射。此数值称为发生非彈性散射的閾能。当核的质量数由大減小时，一般核的最低激发态能級远离基态能級，因此对质量数大的元素（重元素）閾能較低，一般为 0.1—1Mev；对輕元素閾能就偏高，如对氧閾能为 6 Mev。不过对那些幻数核（即包含 2、8、20、52、82、126 个中子或质子的核）来說，非彈性散射的性质和輕核一样，閾能仍是很高的。

发生非彈性散射的几率大小也是用截面表示的。和其它作用情况不同，非彈性散射的截面是随中子能量增加而增加的。可以这样來說明：一般核的較高激发态能級总是多而密的，因此吸收了高能中子所形成的复核放出中子后，可处在較多的激发态能极上，这就是說更容易发生非彈性散射，因而截面要相应增加些。

因此可以看到，对那些較高能量的中子，并且对重元素物质来說（非幻数核）非彈性散射是主要的作用。

利用重元素的非彈性散射对减速高能量的中子在防护上有很重要的意义。这种散射能把中子能量降低到閾能数值。

2. 吸收 物质对快中子的吸收，除了少数几种元素或某些特殊情况外，其几率几乎近似等于零，我們不予討論。下面主要說明热(慢)中子的吸收反应。

能量低的中子被原子核吸收的几率很大，吸收了中子后的核总是处在激发状态中，这时它或者放出 γ -光子，或者放出带电粒子，或者分裂成质量数大致相等的两部分。亦即有下列一些吸收反应。

(1) (n, γ) 反应：受激的复核放出 γ -光子而返回基态。这种反应

最为常见，不论对于低质量数的或高质量数的元素都能发生。反应中放出的 γ —射线称俘获辐射。

对防护来讲，是不希望发生俘获辐射的，这是因为当中子被吸收后又发出了 γ —射线，并且 γ —光子的能量一般是很高的，因此就要另加的防护层来防护。

(2) (n, α) 或 (n, p) 反应：受激的复核放出一个带电粒子—— α 粒子或质子，而返回基态。这种反应比较少见，这原因在于一个带正电的粒子要能从核内逃出，除了具有必需的由核内分离的能量外，还必须有足够的能量来克服核力的作用。因此，只有极少数的几种低原子序数的元素，能看到这种反应。可以举出下面两个有用的例子：(i) $B^{10}(n, \alpha) Li^7$ ，(ii) $Li^6(n, \alpha) H^3$ 。 B^{10} 的 93% 的吸收反应中还放出 0.5 Mev 的软 γ —射线来。 B^{10} 的吸收反应截面很大，并且一直延伸到快中子能量范围中去。截面和能量的关系是满足所谓 $\frac{1}{v}$ 定律的。其截面如图 6—2 表示。 Li^6 的反应截面小一些。

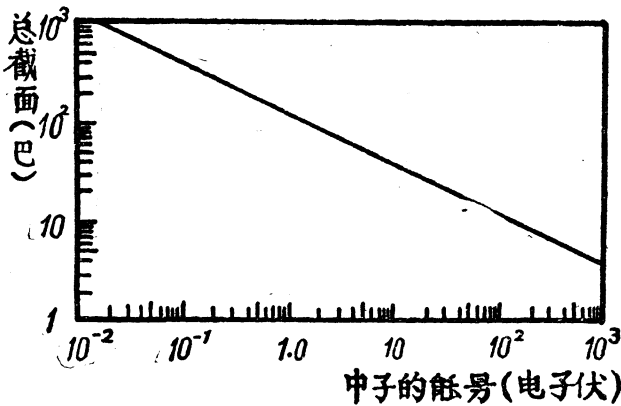


图 6—2 硼的截面与中子能量关系

在中子的防护上，为了减少俘获辐射，这两种反应有很大的意义。因为这两种反应的截面很大而且吸收热中子后仅放出极易被阻止的带电粒子，因此若防护材料中含有硼和锂元素（数量并不要很多）时，

就可大大地吸收热中子而并不产生很强的俘获辐射。

(3) 裂变反应：仅限于高质量数的几种元素，如 U^{235} 的裂变。

所有吸收反应的几率也是用截面表示的。中子与核相互作用的总截面是各种反应的截面之和。在很多情况下，总截面实际上只由一两种反应的截面决定，其它反应的截面近乎等于零。

从上面的讨论中可以看到：快中子与物质的主要作用是散射，热中子与物质的主要作用是吸收，因此快中子在物质中的减弱过程或多或少可分为两个阶段：(1)快中子减速阶段：快中子经过核的非弹性散射或弹性散射而减速；(2)热（慢）中子的吸收阶段，减速下来的中子被核吸收。

§6—2. 中子的防护及其计算

1. 中子的防护层 从上节的讨论中看出，中子的防护问题，实际上就归结为快中子的减速和热（慢）中子的吸收两个问题。因此，防护层的选择就应该从怎样最有效地减速快中子和吸收热中子来考虑。

实际上，快中子的穿透本领很强，因为几乎所有物质对快中子的吸收截面接近于零，快中子穿透物质时，只有在遭到了散射而降低能量后才能被物质吸收。热中子的吸收是不成问题的，因为很多物质都对热中子有很大的吸收截面，当快中子一经减速后，走不了多远就会被吸收。元素吸收热中子后，在某些情况下所产生的俘获辐射可能是很强的，它将引起对 γ -射线防护的问题，这将在下节讨论。

为了减速快中子，防护层的材料中必须有足够的轻元素，特别是希望含有大量的氢元素，通过和它们的弹性散射，能使快中子很快地减速下来。但若中子能量很高时，弹性散射截面就很小了，这时，防护层的材料中应该再含有一些有着较大非弹性散射截面的某些重元素，利用非弹性散射使高能中子降低到阈能下，再利用轻元素的弹性散射使中子减速到能被吸收为止。水、石蜡等是很好的藉弹性散射减速快中子的轻元素材料，铁、钨等可作为藉非弹性散射减速快中子的重元素材料。

有时为了减少俘获辐射，防护层中还加入一些含硼或含锂的材料，它们和减速材料均匀地混合或者分层地排列。

2. 中子強度的減弱計算 在上述的防護層中，中子減弱的防護計算可以這樣來考慮：若我們能夠認為中子和核的任何一次作用都使得中子離開了射綫束而再不能穿出防護層的話，也就是若能夠認為中子和核的任何一次作用都可看作中子被吸收的話，那麼中子束強度的減弱和窄束 γ 射綫一樣就可按照指數減弱規律來計算，即

$$N = N_0 e^{-\Sigma X} \quad (6-2)$$

式中， N_0 ——入射的中子通量； N ——在屏蔽材料中深度为 X 处的中子通量； Σ ——材料的宏观截面（見下面）。上式中假定射綫束是平行的。

实际上，快中子和屏蔽材料的任何一次作用，当然并不能引起中子的完全吸收，而只能引起中子能量的减少。但是如果屏蔽层中含有大量輕元素，尤其是氫元素，則由于下面两个原因：①中子經受散射后其能量可减少很多，而彈性散射截面又是随着能量减小而显著地增加的；②散射后，中子运动方向改变了，要穿出防护层就要走更长的路程，因而就使得中子进一步被散射以致随后被吸收的几率大大增加；——其結果使这些中子很难穿出防护层。因此，从最后的結果上看，可以认为，在这种情况下，快中子和屏蔽材料的一次作用就相当于吸收而不会穿出防护层，因而穿过防护层中子的減弱可按指數減弱規律來計算。这一推断对于不包含相当数量的含氫物质而只是包含像铁和鉛这样一些減速性质很坏且作用截面不是随着中子能量的减小而迅速增加的屏蔽层來說，自然是不正确的。究竟防护层中含氫量有多少才可用指數減弱規律來計算，而不致有很大誤差，这一精确数值还不知道。但若用水作为含氫的材料，水的数量大致不得少于全部防护层体积的 50%。

按指數減弱規律 (6-2) 式計算時，截面數值的選取是很重要的，因为毕竟不是所有与核作用的中子都可认为它被吸收。例如那些受到小角散射的中子，散射以后，能量損失很少，穿行路程的增加也很有限，它們和初始中子就沒有太大差別。这样的中子就不能考虑成相当于被吸收。所以指數項中截面的數值應比相互作用的總截面的數值來得小一些。在 15 Mev 以下的能量範圍內，截面數值近似地可以这

样来选取；对于轻元素，截面可取成与快中子相互作用的总截面（理论值是 $2\pi R^2$ ， $R \approx 1.4 \times 10^{-1} A^{1/3}$ (cm)， R 为核的半径， A 为核的原子量），这是因为在轻元素中，几乎快中子每一次与核的作用结果都能将快中子除去；对于重元素，弹性散射大约只能将半数的快中子除去，非弹性散射能将所有的快中子除去，因而截面可取成弹性散射截面的一半再加上非弹性散射截面（理论值为 $\frac{3}{2}\pi R^2$ ）；对于中等质量的元素，减弱截面可取成上面的两个数值之间。这样选取的截面数值称为有效减弱截面。

在计算中子屏蔽层时，截面数值最好通过实际测量得到，这样，才能给出正确的结果。使用资料上列出的截面数据应该注意截面得来的条件，因为有效减弱截面数值和中子能量、实验条件等因素是有关系的。表 6—3 列出某些元素对快中子的有效减弱截面，它是在反应堆上对应于裂变谱测量出来的数值。

表 6—3 某些元素的有效减弱截面

元 素	σ (巴)	元 素	σ (巴)
Li	1.01	Ni	1.89
Be	1.07	Cu	2.04
C	0.81	W	2.5
Al	1.31	Pb	3.5
Fe	1.98	Bi	3.49

某些元素的截面可用经验公式来计算，例如：

$$\sigma_H = \frac{5.13}{E_n 0.725} \quad (6-3)$$

式中， σ_H ：氢核的截面（巴/原子）

E_n ：中子能量 (Mev)，应用范围 $2 < E_n < 12$ Mev。

在非单能中子穿透物质时，较软的成份优先被阻止了，因而在屏蔽层深处，硬成份将占愈来愈大的份额。这一现象就使得所谓“中子硬度”逐渐增加。在减弱倍数很大时，辐射的穿透本领几乎只由初始射线束中最硬的成份决定，即使这些硬的成份在入射时只占一个很小的份额。这在计算中应该特别注意。

應該指出，中子的防护計算和 γ 射綫的計算比較起来，不是那样簡單和精确的。正如§6—1中所述，这是由于中子与物质有着多种的相互作用，并且其截面和中子的能量及物质的质量数間的关系很复杂。要作好中子的防护設計，只靠計算是不够的，还要进行一些实际的試驗与測量。

§6—3. 中子引起的次級輻射 中子与物质的相互作用中再引起的一些輻射称做次級輻射，例如俘获輻射、感生放射性等。在中子流很强时，需要考虑对它們的防护問題，在有些場合下，甚至这些次級輻射比初級輻射更值得注意 (§6—4)。

1. 俘获輻射 在§6—1中已讲到，很多物质吸收热中子产生 (n, γ) 反应的几率很大，放出的 γ -射綫称为俘获輻射， γ -光子能量很高，可达到6—8Mev。这个效应是很值得考虑的（例如在反应堆的防护設計中便是）。

下面的表中列出了某几种元素的俘获輻射的有关数据。更詳細的資料可見 Rockwell: Reactor Shielding Design Manual 表 11。

表 6—4 某些元素的俘获輻射

靶 核	俘 获 截 面 (巴)	100 个俘获中放出的光子数				
		0—1 Mev	1—3 Mev	3—5 Mev	5—7 Mev	>7 Mev
H ¹	0.33	0	100 (2.23 Mev)	0	0	0
Al ²⁷	0.215	?	>13	177	21	35
Mn ⁵⁵	12.6	?	?	>27	30	27
Fe ⁵⁶	2.43	?	>10	24	22	50
Cd ¹¹³	19500	>120	20	73	17	1
Pb ²⁰⁹	0.17	0	0	0	7 (6.73 Mev)	93 (7.38 Mev)

俘获輻射源强度的分布和热中子通量的分布是有关的。假若知道热中子的通量及其分布情况，可以根据下式計算俘获輻射源的强度

$$S = n \cdot \sigma \cdot \varphi \quad (6-3)$$

式中： S ——俘获輻射源强度 (光子/sec·cm³)； n ——单位体积內某种同位素的原子数； σ ——对一个原子的 (n, γ) 反应微观截面 (cm²)； φ ——热中子通量 (中子/sec·cm²)。

俘获辐射的防护计算是困难的，因为往往热中子的通量分布不知道，因而俘获辐射源的分布亦不能确定；此外，有时也会遇到数学上的困难。有几种近似地处理俘获辐射防护计算的方法：

当热中子照射在防护层上时，热中子在表面处很薄的一层中就被吸收了，可以相当准确地认为俘获辐射源就是分布在防护层表面上的一个面源，以此来计算防护层后面俘获辐射的剂量。当快中子穿透防护层时，俘获辐射的防护计算的困难在于因为它发生在整个防护层体积内。作为一种初步近似，可以认为快中子都在最初的一个自由路程中减速下来，自由路程等于 $\frac{1}{\Sigma}$ ， Σ 为快中子的有效减弱截面；同时假定热中子在 $X = \frac{1}{\Sigma}$ 的地方完全被俘获，因而俘获辐射源就是在 $X = \frac{1}{\Sigma}$ 处的一个面源。较准确一点的计算是考虑快中子按指数规律减弱，热中子通量的分布也是指数规律的分布。因而俘获辐射源也是按指数规律分布的，然后再作防护计算。这种处理方法忽略了这样一点：即当快中子减速后，慢中子还要穿行一段距离才被俘获。一般讲前一种方法的计算结果是偏安全的；后一种欠缺一点。

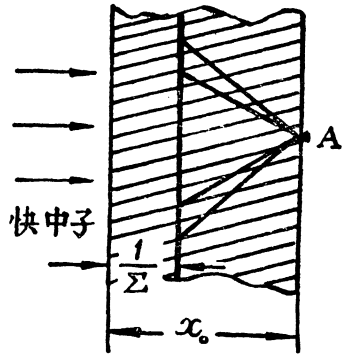


图 6—3 俘获辐射的防护计算

为了减少俘获辐射的强度，在防护层中可加入含硼的材料，例如使用含硼的石蜡、含硼的水泥等，但这样做有时会引起一些困难（见 §6—5）。合理的布置防护层对减少俘获辐射强度有很重要的意义。

2. 感生放射性 很多元素吸收了热中子后，除当时产生俘获辐射外，生成的复核往往是不稳定的，而成了放射性元素，可以是 β -放射性，也可以是 γ -放射性或 β, γ 放射性。这种效应称为活化，这种放射性被称为感生放射性。感生放射性经常会遇到，人工放射性同位素的制备就是利用这一事实的。但从防护上讲，感生放射性总是力求减少的，因为很明显，这引起了新的防护问题。例如，由于材料的活化，往往当已停止中子照射时，还不能够接近被照射的材料，需要等一段

時間或需要另外的防护。

材料的感生放射性强度和很多因素有关，計算方法如下：

元素吸收了中子后，质量数由 A 增加到 $A+1$ ，設 φ ——热中子通量（中子/sec·cm²）； n_A ——单位体积中质量数为 A 的原子数目； n_{A+1} ——单位体积中生成质量数为 $A+1$ 的放射性核的原子数目； σ ——活化反应的微观截面（cm²）； λ ——生成元素的衰变常数（sec⁻¹）； t ——照射時間（sec）。

$$\frac{dn_{A+1}}{dt} = \varphi \cdot n_A \cdot \sigma - \lambda \cdot n_{A+1}$$

又設 $t=0$ 时， $n_{A+1}(0) = 0$ ，則其解为

$$n_{A+1}(t) = \frac{\varphi \cdot n_A \cdot \sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (6-4)$$

生成的放射性核单位時間內的衰变数是

$$F = \lambda n_{A+1}(t) = \varphi \cdot n_A \cdot \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \quad (6-5)$$

假若某种被活化的元素质量为 M 克，平均原子量为 \bar{A} ，质量数为 A 的同位素在天然元素中重量百分比含量是 f_A ，活化微观截面不用 cm² 而用巴表示时，則

$$F = \frac{\varphi \cdot f_A \cdot M \cdot \sigma \times 6.02 \times 10^{23} \times 10^{-24}}{\bar{A}} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (6-6)$$

若中子照射時間为 t_0 ，照射后又經過時間为 t_s ，則放射性为：

$$F = \frac{\varphi \cdot f_A \cdot M \cdot \sigma \times 6.02 \times 10^{23} \times 10^{-24}}{\bar{A}} (1 - e^{-\lambda t_0}) e^{-\lambda t_s} \quad (6-7)$$

若照射時間很长， $t_0 \gg \lambda^{-1}$ ， $e^{-\lambda t_0} \rightarrow 0$ ，則放射性强度会达到飽和值，只与中子通量大小有关，和照射時間 t_0 无关了。

下面的表中列出了某几种元素的感生放射性有关的数据。更詳細的資料可参考專門的著作，例如 Price etc; “Radiation Shielding” 附录 III。

为了减少材料的活化，原則上有两种办法：(i) 限制那些活化截面大的元素的含量；(ii) 增加材料中的含硼量。

在反应堆的防护中 (§6-4) 我們將遇到很多材料活化的例子。

表 6—5 某些元素的感生放射性

元 素	靶 核	半 衰 期	光子能量 (Mev) 及 一次衰变中产额	活 化 截 面 (巴)	对 1 克元素的活化 截面 cm^2/g
Na	Na^{23}	15 小时	2.78(100%) 1.38(100%)	0.56	0.015
Al	Al^{27}	2.27 分	1.78(100%) 0.82(100%)	0.21	0.0047
Mn	Mn^{55}	2.58 小时	2.06(20%) 1.77(30%)	13.4	0.148
Fe	Fe^{56}	46 天	1.1 (50%) 1.3 (50%)	2.8×10^{-3}	3.0×10^{-5}
Co	Co^{59}	5.3 年	1.17(100%) 1.33(100%)	36.0	0.37

注 (i) 所有的截面都是对热中子 (2200 米/秒) 而言的。

注 (ii) 截面数据中已考虑了靶核在天然元素中含量的重量百分比。

中子引起的次级辐射还有一种——中子非弹性散射引起的 γ -射线。在许多实际情况下, 这种辐射往往不是主要的, 所以, 有时可以不用考虑它。

§6—4 反应堆的防护 反应堆的防护实际上是个涉及面很广泛的问题, 反应堆从设计、建造一直到运转、使用有很多问题是与安全防护有关的。在这里, 主要对反应堆活性区(堆芯)的屏蔽问题作一介绍, 给予一个概括的说明。

1. 辐射源 核反应堆可以看作是一个强度巨大的放射性辐射源。辐射的来源是由于核燃料元素 (U^{235} , Pu^{239}) 的裂变反应。从反应堆发出的辐射可以分为初级辐射和次级辐射。核燃料元素 (U^{235} , Pu^{239}) 在裂变时及裂变后其产物所放出的辐射称为初级辐射, 而由初级辐射与物质作用所引起的辐射称为次级辐射。现就与屏蔽防护有关的中子和 γ -射线分别作一简述。

(1) 中子: 初级的中子辐射包括裂变的瞬发中子和缓发中子。

(i) 瞬发裂变中子: 这些中子是核燃料元素 U^{235} (或 Pu^{239} 等) 在裂变瞬间所放出的, 它占据了裂变中子的绝大部分 (>99%)。这些中子的能量分布在从热能到大约 15Mev 的相当大的范围内, 但绝大部分中子具有 1—2Mev 的能量。图 6—4 表示了瞬发裂变中子的能谱

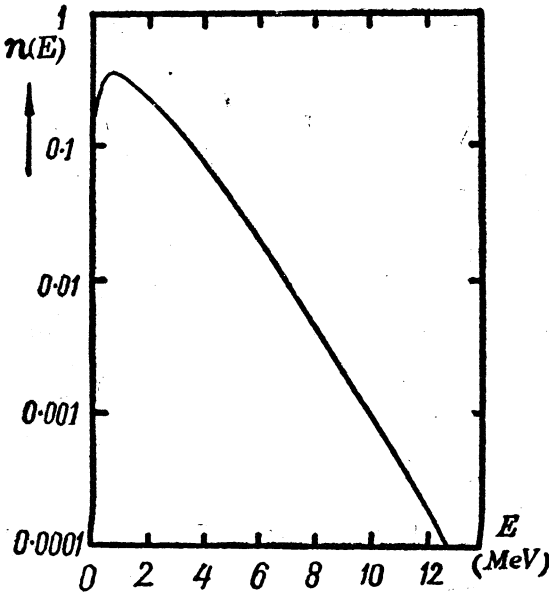


图 6—4 裂变中子能谱 (用对数坐标表示)

很小的份额 (不到 1%)，并且具有很小的能量 (不超过 0.7MeV)，故在大多数计算防护层的情况下可以不考虑。但是在那些循环燃料的反应堆中 (燃料离开了堆芯而进入堆外的热交换器)，应注意这些中子，因为除了它们有直接照射人体的可能外，还会被冷却材料所俘获而引起感生放射性。

在堆芯内有很大部分的裂变中子被慢化，故进入防护层的中子既有很强的快中子，又有很强的热中子。对于一个 1000 瓦功率的游泳池式研究用的反应堆来说，在其堆芯表面处的快中子通量大约为 10^{10} 快中子/秒·厘米²，热中子通量大约为 10^{11} 热中子/秒·厘米²。

次级的中子的辐射主要是由于 (γ, n) 反应产生的光中子。对低于 10MeV 的光子，一般元素的 (γ, n) 反应截面不大，故光中子的产生是可以忽略的。但如果堆芯中有 (γ, n) 反应截面很大的铍、氘元素在存时，那么光中子的强度还是很大的；此外在那些防护中子很好而

分布。

由于这些中子具有很高的能量，并且占据了绝大部分，因而中子的防护问题主要是由这些中子决定的，其中高能中子虽然占的份额不多，但对屏蔽防护很有影响。

(ii) 缓发裂变中子：这些中子，正如名称所表明的那样，是在裂变后 (主要在开始的数分钟里) 所放出的。它在裂变中子的总数中只占一个

防护 γ -射綫很坏的材料中，例如作为屏蔽层的水中，氫的同位素的氘的含量并不太小（0.016%），并且 γ -射綫能穿透很远，因而光中子强度仍相当可观，在距离較远的地方，它甚至有可能成为計算中子流的减弱倍数的最决定的因素。在这些場合下，光中子是必須考虑的。

(2) γ -射綫：初級的 γ -輻射有瞬发的裂变 γ -射綫和裂变产物的 γ -射綫。

(i) 瞬发裂变 γ -射綫：它是在裂变时就放出的光子。每次裂变放出的光子有 6—7 个，带走的裂变能量大約为 7Mev。这些光子中，除有些是低能光子外，在 2—3Mev 之間的光子占的比例还相当大。

(ii) 裂变产物 γ -射綫：裂变产物大約有二百种左右，它們都是 β 或 β, γ 放射性物质。裂变产物放出的 γ -射綫叫裂变产物 γ -射綫。它們总共带走的裂变能量約为 6Mev。由于各裂变产物的半衰期及放出的光子能量各不相同，因此这些 γ -射綫的能譜及强度随时间的变化是复杂的。其能量范围最大可到 2.8Mev， γ -光子的平均能量約为 1Mev。总放射性强度随時間而下降，但不能用一个简单的指数表达式来表示，常把它分成几个能組，分別考虑各組的輻射强度。

次級的 γ -輻射主要是俘获輻射——元素在吸收中子（主要是热中子）的反应中所放出的 γ -射綫。反应堆內这样一些元素能引起很强的俘获輻射，例如核燃料元件中的 U^{235} 、 Pu^{239} ，結構材料中的金屬鋁、不銹鋼，以及防护层中的氫、铁等。若知道这些有关元素的数量、吸收截面以及热中子的通量分布，則可以計算出俘获輻射的强度。

其他的次級輻射还有非彈性散射的 γ -射綫、輻致輻射、被活化材料的 γ -輻射等。它們与俘获輻射比較起来是可以忽略的，只在某些特殊情况下要考虑。

初級的两种 γ -輻射以及次級輻射中的俘获輻射是 γ -輻射的三种主要成分。随着反应堆的类型、結構等方面的不同，它們的相对强度是不同的。一般說来，裂变 γ -射綫强度最大，光子能量也較高；俘获輻射的光子能量很高（可达 7—8 Mev），并且在广泛的区域內产生（不仅在堆芯內，也在屏蔽层內）。在反应堆运轉时（工作时）这两种是組成 γ -輻射最主要的成分，屏蔽层厚度往往就由这两种輻射来

决定。裂变产物的 γ 射线强度随着堆运转的时间逐渐增加，最后达到饱和。那时，它的辐射强度有着和上面两种辐射相同的数量级，但光子能量较小，因此它是比较次要的。但在反应堆停止运转后，上述的两种辐射就停止产生了，那时裂变产物的 γ 射线就是主要的成分了。当需要维修反应堆时（堆当然停止了运转），人可能要靠近堆芯，主要的辐射照射就是裂变产物的 γ 射线造成的。活化材料引起的 γ 射线强度通常比裂变产物的 γ 射线弱些，一般也是略去而不考虑的，但在冷却回路中（见下面）或在堆停止运转后，人要接近活性区时，（例如要将活性区附近部件取出检修），活化材料的放射性就必须考虑了。

从堆芯发出的辐射可以按下面的考虑计算出来。设 S_v 是堆芯内上述某种 γ 辐射的体辐射强度（光子数/秒·厘米³），反应堆每1瓦的功率大约相当于每秒内发生 3.1×10^{10} 次核裂变。则

$$S_v = 3.1 \times 10^{10} \frac{W}{V} N(h\nu) \quad (6-8)$$

式中 V ——堆芯体积（厘米³）， W ——堆功率（瓦）， $N(h\nu)$ ——1次核裂变在每秒内所放出（或所引起的） γ 光子能量为 $h\nu$ 的光子数。

在堆芯表面上一点看来，可将堆芯视为一个无限大体积源，因而逸出堆芯表面的通量 φ 可按下列式计算：（证明见附录）

$$\varphi = \frac{S_v}{2\mu},$$

式中 μ 为堆芯内材料（作为一个均匀混合物）对 γ 射线的线性吸收系数，以 cm^{-1} 表示。

功率为1000瓦的反应堆，在堆芯表面处的裂变 γ 射线强度数量级约为 10^{16} 光子/秒·厘米²，其平均光子能量可视为2.5Mev；裂变产物的 γ 射线强度也有相同的数量级，但平均光子能量小一些，约为1Mev左右；俘获辐射强度要小些，但光子能量很高。

2. 屏蔽层 为了安全的目的，显然在堆芯外部必须要有适当的屏蔽层（防护层），以保证屏蔽层外表面的辐射水平降低到所要求的水平。对动力反应堆，屏蔽层外的辐射水平要求降低到一个最大允许剂

量。在人經常去的那些地方，輻射水平可以允許高一些。對那些科學研究用的反應堆，則要求屏蔽層外的輻射水平大大地降低。這是因為一方面人經常在那里工作，每天所受的劑量應該遠小於一天的最大允許劑量；另一方面也為了保持較小的本底，以便科研工作的順利進行，一般要求低於 0.1 個最大允許劑量。當然，要求輻射水平降低得越多，就越要求屏蔽層厚度更厚一些，因而堆的造價就相應地要提高一些。大約每降低一個數量級，造價要增加 15%。

屏蔽層的設計應該既考慮到中子的防護，又考慮到 γ -輻射的防護，即所謂中子和 γ -射線的聯合防護。顯然，這樣的屏蔽層應該既包含重元素又包含輕元素。並且為了達到最好的屏蔽效果應該合理地考慮防護層中輕重元素物質的比例及排列的次序。例如，假如屏蔽層簡單地由兩層組成：第一層是重元素物質，第二層是輕元素物質，那麼對於這種屏蔽層，中子就很容易穿過第一層而在第二層里產生很強的次級輻射——熱中子的俘獲輻射，第二層對 γ -射線的減弱能力又很弱，因而在屏蔽層外有可能給出很強的 γ -輻射劑量。如果排列的次序翻過來的話，用同樣的方法考慮，就會看到在第二層里可能產生另一種次級輻射—— (γ, n) 反應的光中子，因而在屏蔽層外產生較高的中子劑量。對於這種排列若要保證安全的話，除非用很厚的屏蔽層。這顯然是不經濟的。

屏蔽層通常是由混凝土做成的。屏蔽層厚度一般在 1.5—2.5 米之間，減弱倍數約 10^9 倍左右（相當於在 20 個平均自由程長度上的減弱）。混凝土中含有很多的輕元素（如氫等），也含有許多重元素（如鐵、硅等），並且排列得很均勻，因此既能很好地減速快中子，又能很好地減弱 γ -射線。混凝土的密度可在很大的範圍內變動（2.2—6.5 克/厘米³），這可以由加入不同種類和數量的填充料（如鐵礦石、鑄鐵塊、重晶石等）來實現。

，為了提高防護 γ -射線的能力，可以選擇較高密度的混凝土，但是也會受到一定的限制：有時這可能是要求太高密度的混凝土會給製造上帶來很大的困難，有時也可能是當混凝土密度進一步提高時（重元素成分占的份額相對地多了），防護中子的能力就弱了，這樣反而要

求更厚的屏蔽层。对后一种情况，混凝土的密度应当这样选择，使得屏蔽层外的中子和 γ 射线的剂量尽可能接近。应该根据具体的情况选用合适的密度。

为了减少屏蔽层俘获辐射的强度，在某些情况下混凝土中可以加入含硼材料。然而，这也有一定的缺点。例如，使混凝土不易凝固，故强度降低。同时成本也大大提高。因此，这样做不一定总是合理的。

如果我们知道辐射源强度及其能量分布，又知道有关材料的吸收系数和减弱截面，则可以根据以前所讲的一些屏蔽计算的方法计算出要将辐射剂量率减弱到任何数值所需要的屏蔽厚度。由于反应堆的辐射源很复杂，所以精细地计算屏蔽层厚度的工作量是很大的。在很多场合还需要进行某些实际测量和模拟试验。关于决定屏蔽层厚度的详细的知识可以参考专门的著作，例如 Rockwell: Reactor Shielding Design Manual 一书。

在屏蔽层中所吸收的辐射能量最后基本上都转化为热。由于中子和 γ 射线在物质中大致上是按指数规律减弱的。因此在靠近堆芯的屏蔽层部份产生的热量很大。这可能引起一些不良的结果，例如，由于混凝土过热，混凝土中的水分就会蒸发，这将降低对中子的防护能力；另外它也会引起混凝土出现裂缝。为了避免这种现象，有时在堆芯和屏蔽层（有时又称为生物屏蔽层）之间还加了一层屏蔽——热屏蔽层。它是由熔点较高的重元素材料（如铜）制成，并需要冷却装置。这样就可用来吸收大量的辐射能量，防止生物屏蔽层的损坏。这对于一些高功率的反应堆更是需要的。热屏蔽层当然也起着使堆外辐射水平减低的作用。

下图画出了一种类型反应堆（MTR）的剖面图，从图上可以看出它的屏蔽部份：

在反射层外面有一个由两层4吋厚的钢板构成的热屏蔽层，它们相距4吋，而冷却空气就从间隙中流过。堆芯的四周围有9呎厚的重晶石混凝土（含有93%的硫酸钡）作为生物屏蔽层。在芯部区域的上下方有水作为屏蔽，它们的两端还装有包着一层厚11吋的铅丸的钢塞子。控制棒驱动机构就装在上方的钢塞子上。

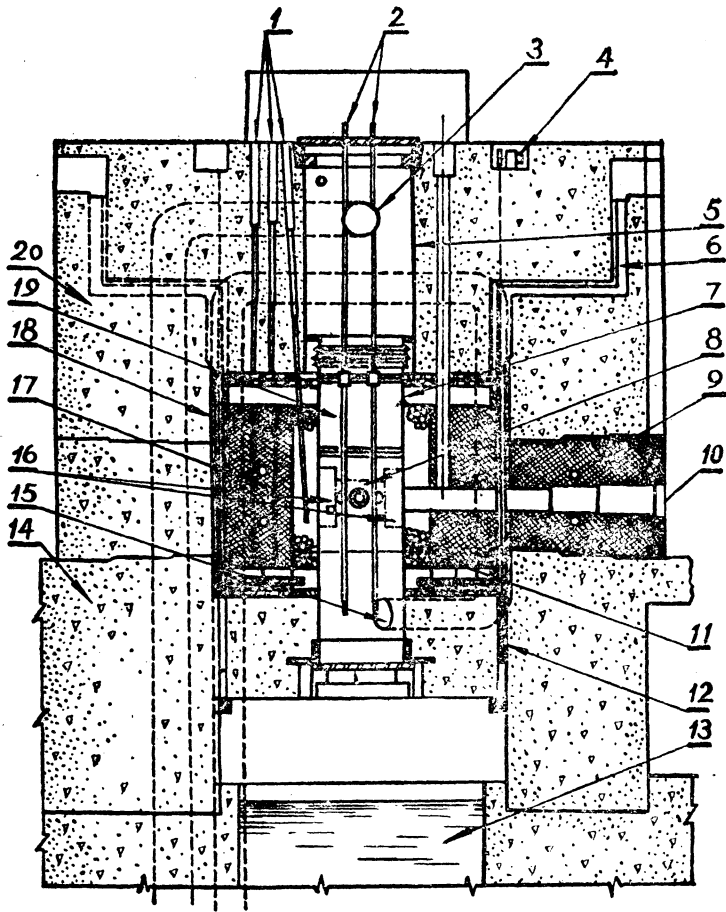


图 6—5 反应堆的剖面图(爱达荷州阿尔柯(Arco)地方的MTR)

1. 典型垂直实验孔道 2. 控制棒 3. 水入口 4. 中子带升降机
5. 不锈钢 6. 空气入口 7. 铝罐 8. 堆芯 9. 热中子柱
10. 水平实验孔道 11. 颗粒层 12. 中子带 13. 水槽 14. 重晶石混凝土屏蔽
15. 水出口 16. 铍反射层 17. 石墨反射层 18. 热屏蔽
19. 水 20. 重晶石混凝土屏蔽

反应堆的屏蔽除混凝土屏蔽的一种类型外，还有一种金属—水(例如铁—水)类型的屏蔽。即堆芯放在一个充满水的水槽里，里面大约相等间隔地放着一些平行的铁板，水中可以加入一种溶解的硼化合物。

这样的屏蔽层对中子和 γ -射线都有很好的屏蔽能力,能够具有較小的体积和重量,虽然其成本和制造技术上要昂贵和复杂些。在可移动式的反应堆中(用在潜水艇、輪船等交通工具上),这种屏蔽有着非常重要的意义。

3. 一些其它的防护問題

(1) 冷却迴路的防护: 为了解决反应堆的散热問題,堆蕊需要冷却。有所謂单一式的冷却和循环式的冷却。前者,冷却剂只通过堆蕊一次而直接排走;后者,冷却剂反复循环地經過堆蕊和在堆蕊外的热交換器。冷却剂可以用水、空气、液态的金属鈉和金属鉀等。

在設計反应堆时,冷却迴路的放射性是一个重要問題,因为它决定了外面冷却管的防护层厚度、貯存池的大小及冷却剂所必須淨化的程度。

冷却迴路的放射性有四个来源: (i) 冷却剂經堆蕊受中子照射后被活化(例如用水冷却, O^{18} 吸收热中子及 O^{16} 吸收快中子而分別成为放射性的 O^{19} , N^{16}); (ii) 杂质的活化,杂质可以是冷却剂带来的,也可以是由管壁材料、堆蕊內結構材料腐蝕下来的(例如水中的杂质 Na^{23} , 不銹鋼冲刷物 Fe^{58} , Mn^{55} 等被活化); (iii) 当发热元件外壳被腐蝕或破裂时,核燃料或裂变产物进入冷却剂中; (iv) 管壁材料俘获中子时进入冷却剂中的放射性反冲核。

現將冷却剂中常見的活化元素列表于下:

表 6-6 某些元素的活化数据

冷却剂	活化元素和它在天然元素中的含量(重量%)	反应后生成的元素	半衰期	活 化 截 面	辐射能量 (Mev) 及一次衰变中放出的分数(%)
鈉	$Na^{23}(100)$	Na^{24}	15小时	0.56巴	2.78(100) 1.38(100)
水	$O^{16}(\sim 100)$	N^{16}	7.35秒	14微巴 (对裂变中子) 0.21毫巴	6.2(85)
	$O^{18}(0.204)$	O^{19}	29.4秒		1.6(70)
空 气	* $Ar^{40}(100)$ 氧的活化同上	Ar^{41}	109分	0.53巴	1.37(100)

* Ar^{40} 在空气中的含量为 1.3%(重量)

** 未特殊注明的活化截面都是对热中子而言的。

图 6—6 画了一种典型的循环冷却系统的示意图。冷却剂通过堆芯后，经过净化器被去除一部分放射性，然后又流入贮存池内存放一段时间，使短半衰期的放射性元素衰变掉很多。

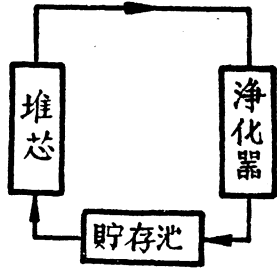


图 6—6 循环的冷却系统

在一定强度的中子流照射下，冷却剂中的放射性最后会达到平衡。那时，在一次循环中，放射性生成数目和损失数目是相等

的。设 P ——平衡时 1cm^3 冷却剂中含有的放射性原子数； λ ——衰变常数； φ ——照射的平均中子通量； σ ——生成放射性核的活化截面； n —— 1cm^3 内被活化元素的原子数目； t_i ——冷却剂在堆芯内被照射的时间，它等于在堆芯内的冷却剂的体积 (cm^3) 除以流速 (cm^3/sec)； t_c ——冷却剂在堆芯外传输的时间；以及 F ——通过净化器后还保留的放射性份额。

$$F = 1 - \frac{\text{留在净化器上的放射性}}{\text{流入净化器的总放射性}} \quad (6-9)$$

在通过堆芯时，放射性增加速度由下式决定：

$$\frac{dP}{dt} = \varphi \sigma n - \lambda P$$

其解为：

$$\varphi \sigma n - \lambda P_2 = (\varphi \sigma n - \lambda P_1) e^{-\lambda t_i}$$

这里 P_1 , P_2 分别为冷却剂在流入和流出堆芯时的放射性浓度。

在平衡时，放射性由于本身衰变和净化损失的速度等于受中子照射后生成的速度。即 $P_1 = F P_2 e^{-\lambda t_c}$ 。

代入上式，并假定 $t_c \gg t_i$ ，则在平衡时，由堆芯流出时的放射性浓度 P 可写成

$$P = \frac{\varphi \sigma n (1 - e^{-\lambda t_i})}{\lambda (1 - F e^{-\lambda t_c})} \quad (6-10)$$

在 λt_i 很小时， $e^{-\lambda t_i} = 1 - \lambda t_i + \dots$ ，则

$$P = \frac{\varphi \sigma n t_i}{1 - F e^{-\lambda t_c}} \quad (6-11)$$

若放射性元素半衰期远大于循环周期，则放射性衰变实际上不影响平衡时放射性原子数目，主要的损失是由于净化，在这种情况下：

$$P = \frac{\varphi \sigma n t_i}{1 - F} \quad (6-12)$$

为了减少冷却迴路的放射性，可以通过下列一些途径：若用水来冷却，(i) 所使用的冷却水应该经过过滤或蒸馏，以大大降低其中杂质的含量；(ii) 在水中加入适当的物质（如使氘气溶入水中）或控制水的酸鹼度（PH 值），以减少管壁材料腐蚀；(iii) 在冷却迴路中装有高效率的净化设备或建造较大的貯存池等。

(2) 在使用反应堆中子束进行实验时的一些安全措施：

实验时，中子束通常是经由装置在反应堆的屏蔽层中的准直管引出的。准直管最好是由钢管和含氢含硼材料组合而成。在准直管靠着堆芯部分可以用铅遮盖起来，以降低准直管壁的活化。在准直管末端引出中子束的地方放置了实验仪器，当准直管打开进行实验时，实验

处的剂量水平（特别在轴綫附近）是很高的。为了实验人员的安全，可使用各种防护屏。若条件许可的话，最好远离射綫束。对刚由堆芯取出的活化物质，可以等一段时间使放射性强度减少一些后进行研究。在很多情况下，我们不愿意把防护屏放在射綫束的路徑上（实验仪器的后面），因为被防护屏反散射的中子可以使实验结果

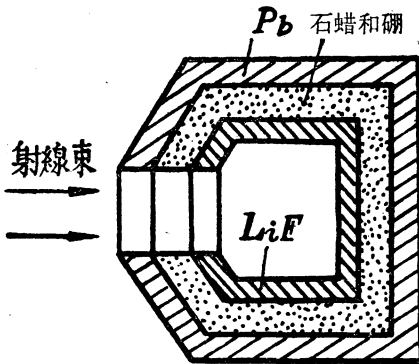


图 6-7 用来吸收辐射而不在实验室内产生散射辐射的“射綫束捕集器”

发生严重的畸变。在这种情况下通常让射綫束穿过工作室而射到“射綫捕集器”中去(图 6-7)。它是由重元素和轻元素材料做成的，能很有效地减弱中子和 γ -射綫，并且引起的散射中子很少。它占的地方也不大，约 $50 \times \Phi 33\text{cm}$ 。

附录：关于非点源的剂量及防护计算

实际遇到的辐射源有时不能看成是点源，关于这类源的剂量及防护计算必须考虑它们的形状和体积大小。例如计算在放射性液体的管道附近点的剂量，就必须考虑管道的长度，这时就可把它看成一个线状源。又如一个放射性废水池，计算其外面的剂量就必须考虑它的形状和体积，这时就可将它看成是一个圆柱状的体源或者一个无限大的体源等。计算中，把考虑有一定体积（线度）和形状的来源统称为非点源。

1. 考虑的因素：非点源的剂量和防护计算比点源的情况需要多考虑几方面的影响，这些方面如下：

(1) 几何因素：考虑了源的形状和线度，例如有线状的、球状的、圆柱状的、平面状的等情况。计算中原则上没有困难，一定大小和形状的来源总可分成若干小块源。每一小块源按点源情况考虑，总的辐射强度就是这些小块源造成的辐射强度之和。但是，有时在数学计算上会遇到一些困难。

(2) 自吸收：辐射体的一部分发出的射线为其另一部分所减弱，这种情况称自吸收。考虑了自吸收后在辐射体外任一点处的剂量计算值将有某些减小。自吸收的多少和辐射体的线度、形状、发出光子的能量及组成辐射体的材料有关。有时使用自吸收系数 f 来说明自吸收的影响，它定义如下：

$$f = \frac{P_f}{P_0} \quad f \ll 1 \quad (1)$$

此处 P_f 为考虑了自吸收影响所计算出的剂量； P_0 为未考虑自吸收影响所计算出的剂量。

(3) 多次散射：辐射源发出的射线在源内受到多次散射（源内的宽束影响），这样就使得剂量计算值要比不考虑它时大一些。同样，可以用积累因子 B 来表示多次散射影响的大小。

$$B = \frac{P_H}{P_0} \quad B \geq 1 \quad (2)$$

这里 P_H 为考虑了源内多次散射的影响计算出的剂量； P_0 为未考虑多次散射的影响计算出的剂量。

在非点源的計算中，以上几方面影响是綜合考虑的，有时也可以忽略一些次要的影响或把它考虑到安全系数中去。

2. 几种情况举例：下面举几个例子来说明是如何考虑这几方面影响的：

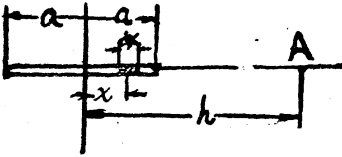


图1 綫状源的輻射

例1 設有一长度为 $2a$ 的綫状源，其綫强度为 S_l (光子数/sec/cm) (即每秒每厘米长度上发出的 γ -光子数)，求在軸綫上距离源中心为 h 的 A 点之輻射通量 (图1)。

(1) 不考虑自吸收时：

綫源上长度为 dx 的一段在 A 点产生的通量 $d\varphi$ 可以按点源公式計算出来：

$$d\varphi = \frac{S_l \cdot dx}{4\pi(h-x)^2}$$

$$\text{則} \quad \varphi = \int_{-a}^a \frac{S_l \cdot dx}{4\pi(h-x)^2} = \frac{S_l \cdot a}{2\pi(h^2 - a^2)} \quad (3)$$

上式可以写成 $\varphi = \frac{2a \cdot S_l}{4\pi(h^2 - a^2)}$ ， $2a \cdot S_l$ 为綫源的总放射性强度。和点源的輻射 $\left(\frac{S_0}{4\pi R^2}\right)$ 比較，則可看出綫源的輻射比点源(放射性集中在0点)要来得强些。只有当 $h \gg a$ (即离綫源較远处) 其輻射强度才和点源一样。有时称 $\frac{1}{h^2 - a^2}$ 为綫源 (在軸綫上) 的几何因子，可以和点源几何因子 $\frac{1}{R^2}$ 比較。

(2) 考虑自吸收时：

$$d\varphi = \frac{S_l \cdot dx}{4\pi(h-x)^2} \cdot e^{-\mu(a-x)}$$

μ 为源本身材料的綫性吸收系数，因子 $e^{-\mu(a-x)}$ 为自吸收所引起的减弱。

$$\text{則：} \quad \varphi_f = \int_{-a}^a \frac{S_l \cdot dx}{4\pi(h-x)^2} e^{-\mu(a-x)}$$

在一般情况下，上式结果不能用初等函数表示。只有当 A 点离源很远时 ($h \gg a$)，分母中的变数 x 可略去时，上式可得到简单的数学表示式：

$$\varphi_f = \varphi_0 \frac{1}{2\mu a} (1 - e^{-2\mu a}) \quad (4)$$

式中 $\varphi_0 = \frac{2aS_1}{4\pi h^2}$ 为当所有放射性集中在中心点时在距离为 h 处产生的通量。这种情况下的自吸收系数 f 可写为：

$$f = \frac{\varphi_f}{\varphi_0} = \frac{1}{2\mu a} (1 - e^{-2\mu a}) \quad (5)$$

对不同的 μa 值算出的 f 已做出了表格，见 H. Г. 古雪夫著：“放射性辐射防护手册”表 38

例 2 设有一无限大平面源，其面强度为 S_a (光子数/sec·cm²) (即每秒从每平方厘米面积上发出的光子数)，求在厚度为 X_0 的平板防护层后面离平面源为 X 的 A 点的辐射通量 φ 。

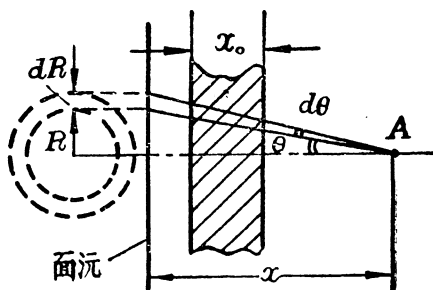


图 2 无限大平面源的辐射

(1) 不考虑在防护层中的多次散射：

半径为 R 宽度为 dR 的环形源在 A 点产生的通量可以按点源公式算出：

$$d\varphi = \frac{(2\pi R \cdot dR) S_a}{4\pi \left(\frac{X}{\cos\theta}\right)^2} e^{-\mu \frac{X_0}{\cos\theta}}$$

式中 θ 是由环到 A 点的连线与源平面法线的夹角。

将 $R = X \operatorname{tg}\theta$, $dR = X \sec^2\theta d\theta$ 代入上式得

$$\varphi = \int_0^{\pi/2} \frac{(2\pi R \cdot dR) S_a}{4\pi \left(\frac{X}{\cos}\right)^2} e^{-\mu \frac{X_0}{\cos\theta}} = \frac{S_a}{2} \int_0^{\pi/2} \operatorname{tg}\theta e^{-\mu X_0 \sec\theta} d\theta$$

令 $t = \mu X_0 \sec\theta$, $dt = \mu X_0 \sec\theta \operatorname{tg}\theta d\theta$

代入上式得到:

$$\varphi = \frac{Sa}{2} \int_{\mu x_0}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt = \frac{Sa}{2} E_1(\mu X_0) \quad (6)$$

$\int_{\mu x_0}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$ 是积分下限 μX_0 的函数, 此函数不能表示成初等函数的形式, 把它写成 $E_1(\mu X_0)$ 。 $E_1(\mu X_0)$ 随 μX_0 的增加而迅速减小, 减小的速度比 $e^{-\mu x_0}$ 更快些。当 μX_0 很大时, 函数 $E_1(\mu X_0)$ 的展开式近似等于 $\frac{e^{-\mu x_0}}{\mu x_0}$

那时,
$$\varphi = \frac{Sa}{2\mu X_0} e^{-\mu x_0} \quad (7)$$

(2) 考虑在防护层内的多次散射, 并取线性积累因子(即 $B = \mu X_0$):

则
$$d\varphi = \frac{(2\pi R \cdot dR) Sa}{4\pi \left(\frac{X}{\cos\theta}\right)^2} \cdot e^{-\frac{\mu x_0}{\cos\theta}} \cdot \mu \left(\frac{X_0}{\cos\theta}\right)$$

$$\varphi = \int_0^{\infty} \frac{(2\pi R \cdot dR) Sa}{4\pi \left(\frac{X}{\cos\theta}\right)^2} \cdot e^{-\frac{\mu x_0}{\cos\theta}} \cdot \mu \left(\frac{X_0}{\cos\theta}\right)$$

作和上面同样的变换, 即得到:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{Sa}{2} \int_0^{\pi/2} \mu X_0 \sec\theta \operatorname{tg}\theta e^{-\mu X \sec\theta} d\theta \\ &= \frac{Sa}{2} \int_{\mu x_0}^{\infty} e^{-t} dt \\ &= \frac{Sa}{2} e^{-\mu x_0} \end{aligned} \quad (8)$$

比较(7)和(8)两式可看出, 考虑了宽束影响后, 通量计算值增大 μX_0 倍。一般讲, 线性积累因子比实际的积累因子要来得大些, 因此由(8)式算出的通量要比实际的通量大些; 另外不考虑多次散射($B=1$)算出的结果(7)比实际的又要小些。所以, 实际的通量数值在上面两者数值之间。为了安全起见, 可用(8)式进行防护计算。

当探测点离源很近时, 有限大小的面源就可近似地看作是无限大的平面源。

例 3 設有一半无限大的体源，其体强度为 S_V 光子数/sec·cm³，求其表面处的通量。

距离 A 点为 ρ 到 $\rho+d\rho$ 夹角为 θ 的一个环状体积源在 A 点产生的通量：

$$d\varphi = \frac{(2\pi\rho \cdot \sin\theta)(\rho d\theta) \cdot d\rho \cdot S_V e^{-\mu\rho}}{4\pi\rho^2}$$

式中 μ 为体源的綫性吸收系数。于是，

$$\begin{aligned} \varphi &= \int_{\rho=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \frac{2\pi\rho^2 \cdot \sin\theta \cdot S_V \cdot e^{-\mu\rho}}{4\pi\rho^2} d\theta d\rho \\ &= \frac{S_V}{2\mu} \end{aligned} \quad (9)$$

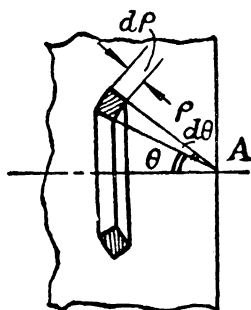


图 3 无限大体源的辐射

若 A 点在无限大体源内，则其通量应为上式的两倍，

$$\text{即 } \varphi = \frac{S_V}{\mu} \quad (10)$$

当体源外有一平板防护层时，防护层外的通量可以这样来计算：

先算出体源表面处通量（ $\varphi = \frac{S_V}{2\mu}$ ），而后，就可将此体源用一位于体源表面处的等效面源来代替，（其面源强度为 $S_a = 2\varphi = \frac{S_V}{\mu}$ ，然后再按面源的计算公式（8）计算。

3. 常用的非点源计算公式：在下面公式中源强的单位是用每秒发出的光子数表示的，给出的结果是辐射通量的大小。若使用中源强用毫居等其它单位时，要注意换算。由通量要求出剂量率的话，可按下式换算： $P = 1.45 \times 10^{-5} \varphi \cdot h\nu \cdot \gamma$ 伦/秒

其中 φ : γ -光子的通量 (光子/sec·cm²)

$h\nu$: γ -光子的能量 (Mev)

γ : γ -光子在空气中的綫性电子转换系数 (cm⁻¹)

以下公式中所用的符号规定如下：

S_0 : 点源每秒发出的光子数 (光子数/sec)。

S_l : 浅源每秒每厘米长度上发出的光子数 (光子数/sec·cm)。

S_a : 面源每秒每平方厘米面积上发出的光子数 (光子数/sec·cm²)

S_V : 体源每秒每立方厘米体积上发出的光子数 (光子数/sec·cm³)

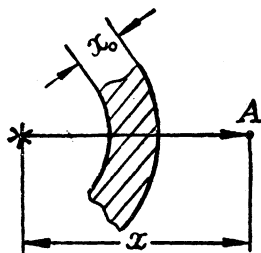


图4 点状源情况

φ : 辐射通量 · (光子数/sec·cm²)

μ : 綫性吸收系数。(cm⁻¹)

R 、 a 、 X : 半徑或距离 (cm)

$$(1) \text{ 点状源: } \varphi = \frac{S_0 e^{-\mu x_0}}{4\pi x^2} \quad (11)$$

(2) 綫状源:

i) 垂直于綫源的面上的任一点:

$$\varphi = \frac{S_l}{4\pi x} (\psi_1 + \psi_2) \quad (12)$$

ψ_1 , ψ_2 以弧度为单位。

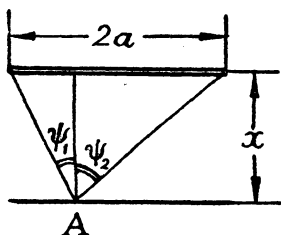


图5 綫状源(在垂直綫源的面上)

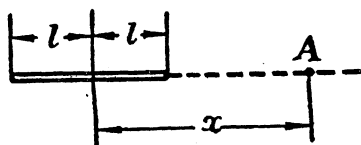


图6 綫状源(在沿着軸綫上)

ii) 通过綫源中心的垂直綫上的一点:

$$\varphi = \frac{S_l}{2\pi x} \psi_1 = \frac{S_l}{2\pi x} \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{a}{x}\right) \quad (7)$$

iii) 当綫源无限长时($a \rightarrow \infty$)垂直綫上一点:

$$\varphi = \frac{S_l}{4x} \quad (8)$$

若确定防护层厚度, 可按万用表方法进行, 但要注意斜射綫的校正。

iv) 綫源延长綫上的一点:

不考虑自吸收:

$$\varphi = \frac{S_l \cdot l}{2\pi(x^2 - l^2)} \quad (9)$$

若考虑自吸收, 在离源很远时, 可按点源公式計算,

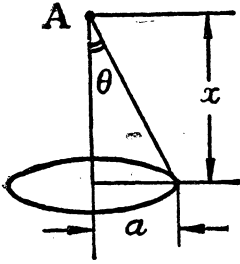


图7 圆盘状源

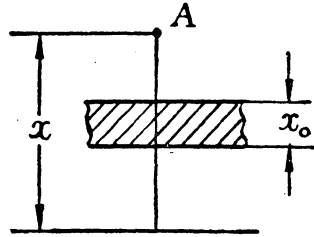


图8 无限大平面源

其結果再乘以自吸收系数（見 H.Γ. 古雪夫著：“放射性輻射防护手册”表 38）

(3) 面状源:

i) 圆盘軸綫上的一点:

$$\varphi = \frac{S_a}{4} \ln \left(1 + \frac{a^2}{x^2} \right) \quad (10)$$

ii) 无限大平面源:

有防护层时:

取 $B=1$

$$\varphi = \frac{S_a}{2} \int_{\mu x_0}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt = \frac{S_a}{2} E_1(\mu x_0) \quad (11)$$

取

$$B = \mu x_0$$

$$\varphi = \frac{S_a}{2} e^{-\mu x_0} \quad (12)$$

无防护层时:

$$\varphi = \infty \quad (13)$$

$E_1(\mu x)$, $E_2(\mu x)$ 函数值見 Theodore Reckwell:

Reactor Shielding Design Manual 图 183—195

(4) 体源:

i) 半无限大体源表面上一点:

$$\varphi = \frac{S_V}{2\mu} \quad (14)$$

ii) 无限大体源內一点:

$$\varphi = \frac{S_V}{\mu} \quad (15)$$



图 9 半无限大体源表面上

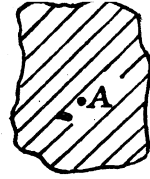


图 10 无限大体源内

iii) 半无限大体源且有屏蔽层时, 可先转换成等效的面源,

$$S_a = 2\varphi = \frac{S_V}{\mu},$$

再按公式 (14) 计算。

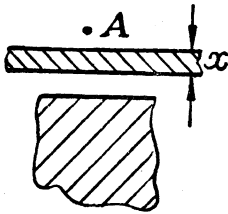


图 11 半无限大体源表面上 (有屏蔽层)

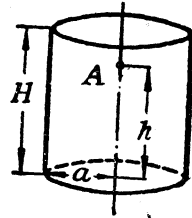


图 12 圆柱状面源

(5) 圆柱源及球体源:

i) 圆柱状面源对圆柱轴线上的一点造成的通量 (不包括上、下底)

$$\varphi = \frac{S_a}{\pi} \left(\text{tg}^{-1} \frac{h}{a} + \text{tg}^{-1} \frac{H-h}{a} \right) \quad (16)$$

ii) 圆柱体及球体:

在远处: 可按点源情况加以计算, 而后求出自吸收系数来加以校正 (见 H.F. 古雪夫著: “放射性辐射防护手册”表 38)

在近处: 计算较复杂, 可参看专门资料。



图 13 圆柱体及球体源

§6—5 关于加速器的輻射防护

加速器在目前是应用得較广泛的产生輻射的重要工具之一。它在核物理，輻射化学，輻射物理，輻射生物（例如用电子加速器产生致輻射照射植物种子促进生长）等方面的研究中是很有用的。此外，有时还用它来制造用反应堆生产不出的某些人工同位素。因此，簡要地讲一讲加速器輻射防护問題，可能是有意义的。

設計加速器的防护要考虑許多因素。例如，加速器类型、被加速粒子的种类、能量、产生輻射的反应类型以及加速器的用途，等等。

大致讲来，对几百 Mev 以下的加速器，防护問題較为簡單。而对于高能加速器，情况就显得复杂得多，防护层可能很厚，屏蔽結構可能很复杂，造价也很高，因而就成为整个加速器設計中的一个极重要組成部分。

例如，英国在 1957 年設計了一个 70Mev 的质子同步稳相加速器，加速器放在直徑为 60 米的鋼筋混凝土建筑的加速器室中，其墙为 1.35 米混凝土，屋頂上鋪了 3 米厚的土层；为了降低本底輻射，在加速器室与測量室間用厚达 8.4 米的可拆的混凝土墙隔开。工作人員出入的門作成可轉动的铁水結構，它具有中子及 γ -射綫联合防护本領，有电动連鎖装置，当加速器正在运行时門总处于关闭状态，使人員不致誤入室內（图 6—8）。

一个設計得好的防护层应当是对加速器所有可能的工作情况都是安全的，如果这加速器既能产生中子射綫又可能产生 γ -射綫，則防护应能同时满足对中子与 γ -射綫的防护。还应按該加速器可能运行的最大可能流强及能量来設計固定屏蔽装置。

一般說来，屏蔽墙厚度的計算是粗略的，对高能加速器尤其如此。这是因为，第一，較高能

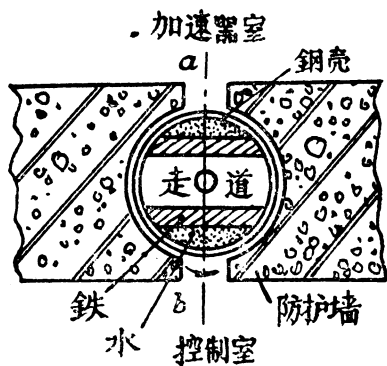


图 6—8 大型加速器实验室的防护門可轉动，当走道轉至 ab 方向时，人員可进出實驗室

量的射綫与屏蔽物质的相互作用知識，或者本身比較复杂，或者我們很少知道；第二，除了加速器的主要輻射源——受到加速了的粒子轰击在靶子上产生的輻射之外，还有一系列其它輻射源(属于这类源的，例如电子在迴旋加速过程中发出的轆致輻射；被加速的电子因聚焦不好打在加速器其它部件上而发生的輻射等等——有时这种情况视为有虛靶子存在)。它們的輻射强度有时可能比由靶子发出的輻射强度还大。其具体数量与加速器結構及工作状况有关，无法准确計算。因此，精确計算屏蔽厚度有时不但不可能而且必要性也不是很大的。防护墙大多数是用混凝土做成的(普通混凝土或含鉛粒、铁粒的重混凝土等)。为了經濟一些普通黃土也可使用，只是要求更厚一些。在加速器的防护中，活动屏蔽墙或屏蔽块是用得很广泛的。

还要注意，对作物理实验用的加速器不但要考虑对人員的防护，还要考虑如何降低工作室的放射性“本底”。室内本底可以是那些在墙壁、地面等物体散射的射綫引起的也可以是那些比如说虛靶子輻射源所引起的。为了减少室内本底，加速器室四周墙壁、地面要离輻射源远一些，墙壁材料要合理选择等等。在某些情况下，合理地改变加速器的結構及工作情况可大大减少那些所不希望存在的“虛靶子”，而并不破坏加速器的正常工作。

电子加速器和高气压靜电加速器是目前最常遇到的两种加速器，我們說一說它們的屏蔽防护問題。

1. 电子加速器 对加速器中射出的电子束进行防护是比較简单的，只要采用足够厚的靶子，不让电子穿出就可以了。問題在于加速了的电子轰击靶子时将引起轆致輻射，它是防护中的主要对象。

轆致輻射是一种具有連續能譜的电磁輻射，其最大能量等于被加速电子的能量 E_e ，其强度决定于 $E_e Z$ (对厚靶而言)，这里 Z 是靶子的原子序数。轆致輻射有一定的角分布：在电子束进行的方向上轆致輻射的强度最大；垂直于电子束的方向上輻射强度要小得多；逆平行于电子束方向的强度比垂直于电子束方向的大一些。防护时要考虑这种角分布。

通常設計电子加速器轆致輻射的屏蔽也可分为三个步骤：

第一步：确定相距靶子一定远、一定方向处轫致辐射的剂量率。用计算方法得到剂量率是困难的，一般可以利用一些实际测量的资料或者参考类似加速器的一些有关数据，本节后所列之文献中的某些数据可供参考。

图 6—9 给出了一个 15Mev 的电子加速器在距靶子 1 米远处剂量率的分布情况 [2]。从图中可以看到：对于这一类加速器来说，轫致辐射最强的地方主要在电子束轴线附近一个区域内（张角 30° 左右的圆锥体中）。要得到其它距离的剂量率时，可以按照平方反比定律来计算。

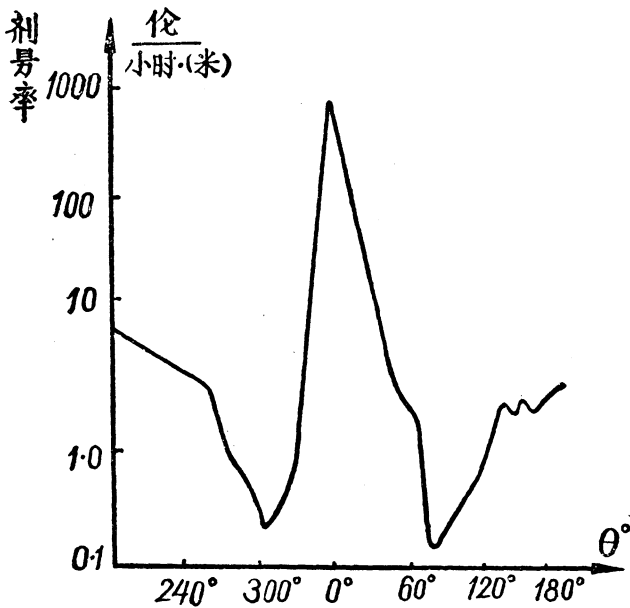


图 6—9 15Mev 电子加速器轫致辐射强度的角分布

第二步：根据每日工作时间、允许剂量标准以及合理的安全系数确定出所必须的减弱倍数。

第三步：根据被加速电子的能量及减弱倍数，利用现成的表格 (H. Γ. 古雪夫著：“放射性辐射防护手册”表 27) 求出防护层厚度来，现成表格是根据宽束轫致辐射在混凝土中减弱的实验数据编成的，与通

用表有相似的形式。表中给出电子能量最大值为 38Mev。当被加速的电子能量超过 38Mev 时, 可用对应于 38Mev 所需要的防护层厚度, 因为对能量为 38Mev 的 γ 光子来说, 普通混凝土具有最小的吸收系数, 与此相应所要的防护层的厚度是最大的。

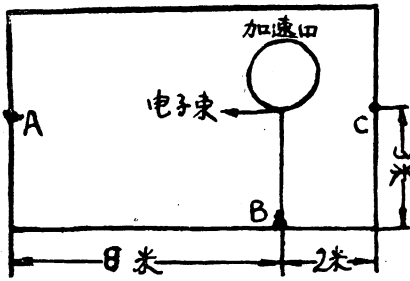


图 6-10

可以举一个实例: 计算一个 25Mev 电子加速器室防护墙的厚度, 假如室内布置如图 6-10 所示。根据图 6-9 所给的数据可以认为与 25Mev 的

电子加速器的有关剂量数值为: (这里认为轫致辐射强度与被加速电子能量成正比)

取电子束进行方向为 0° 方向

在 0° 方向: $P_0 = 1700$ 伦/时.(1 米)

在 90° 方向: $P_0 = 0.5$ 伦/时.(1 米)

在 180° 方向: $P_0 = 5$ 伦/时.(1 米)

A、B、C 各点的剂量数值为:

$$P_A = 26.5 \text{ 伦/时}$$

$$P_B = 0.055 \text{ 伦/时}$$

$$P_C = 1.25 \text{ 伦/时}$$

如果按八小时工作日制考虑, 最大允许剂量率为 0.006 伦/时, 假定取安全系数为 2.5 倍则各防护墙所必须的减弱倍数为

$$k_A = \frac{26.5}{0.006} \times 2.5 = 1.1 \times 10^4$$

$$k_B = \frac{0.055}{0.006} \times 2.5 = 23$$

$$k_C = \frac{1.25}{0.006} \times 2.5 = 5 \times 10^2$$

查表得防护墙厚度为: (密度为 2.3 克/厘米³ 的混凝土)

$$T_A = 190\text{cm}$$

$$T_B = 70\text{cm}$$

$$T_C = 130\text{cm}$$

2. 高压静电起电加速器 静电起电加速器常用来作为产生中子的装置。中子是由加速粒子打到靶核上而产生的。这种中子源的优点是，除了强度远大于一般 Ra-Be、Po-Be 等中子源的强度外，并且可以获得能量在相当大的范围内改变而且近于单能的中子。从防护上讲，有两种辐射需要考虑：

(1) 中子

最经常应用 $D(d,n)H^3$ 、 $T(d,n)He^4$ 反应来获得中子，考虑中子防护计算时，必须了解有关中子的产额，能量等情况。关于它们详细的资料可以参考专门的书籍（例如 H. A. 伏拉索夫著“中子”一书）。下面以 $D(d,n)H^3$ 反应为例说明：被加速的氘核轰击氘靶时，中子的产额是相当大的，产额随氘核的能量 E_d 而改变。当 E_d 由 0.1 Mev 增加到 1 Mev 时，每微安的氘核流打在氘靶上所产生的中子约从每秒 10^7 个增加到每秒 10^8 个。从氘靶上各个方向上飞出的中子数（角分布）是不同的，沿着氘核的方向上强度最大，垂直方向上最小。当 E_d 愈大，这种差别也愈大；而当 $E_d < 500\text{Kev}$ 时，可近似认为是各向同性的。飞出中子的能量 E_n 在各个方向上也不一样，在 0° 方向（氘核流方向） E_n 最大，它近似可用下式表示：

$$E_n = E_d + Q \quad (6-13)$$

Q 为反应能量，其值为 3.28Mev。

中子的防护计算可按 §6-2 所述方法进行，对几百个 Kev 的加速器（流强为几十微安时）来讲，不需要特殊的防护设计。例如一个 400Kev 的加速器，氘核流为 $10 \div 15 \mu\alpha$ ，靶用重氢或重水冰做成，通常可产生的中子约为 10^8 个/sec。在离靶一米处，中子强度为：

$$\frac{10^8}{4\pi R^2} = \frac{10^8}{4\pi 100^2} = 1000 \text{ 个/sec}\cdot\text{cm}^2$$

在离靶 5 米外工作（中子强度为 40 个/sec·cm²），没有任何危险。

若是 $T(d,n)He^4$ 反应，那时中子能量可达 13Mev 以上，就要很好

地防护。如果需要屏蔽；可以按下公式进行计算。

$$I = I_0 e^{-X/\lambda} \quad (6-14)$$

式中 λ 数值根据实验结果 [5] 得到。对水, $\lambda = 22\text{cm}$ (当 $X < 50\text{cm}$ 时); 对含 Fe28.5% 的 Fe-水混合物 $\lambda = 17\text{cm}$

(2) 轫致辐射

应当指出的是: 这种源是不可忽视的, 有时甚至是我们对这种加速器防护的主要对象。在真空的加速管与离子源连接的地方遮盖着高压端的部件 (见图 6-11.1) 是一个经常的轫致辐射源。由于被加速

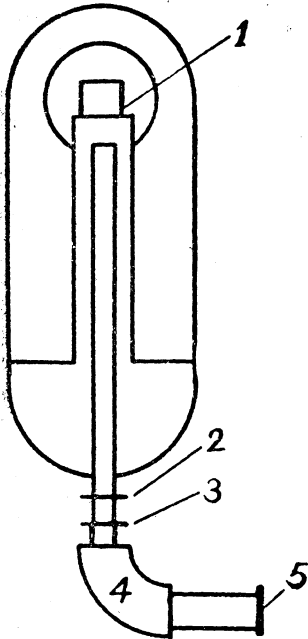


图 6-11 静电起电加速器

1. 离子源 2. 阻止电位
3. 障板 4. 磁铁 5. 靶子

离子轰击在加速管的电极及加速管开口处的障板上就产生出电子来。这些电子被加速, 并可能级联地增殖起来, 打到遮盖着加速管的高压端的部件上, 就产生出轫致辐射来。根据实验数据, 轫致辐射的平均能量约为被加速电子最大能量的一半。轫致辐射强度除了和加速粒子能量、强度有关外, 还与加速管结构、材料、调整情况等有很大关系。对 2.5Mev 的加速器, 在正对着离子源外壳的表面上, 轫致辐射的剂量率可超过允许剂量率的数百倍。为了减少轫致辐射的强度, 常采用下列措施:

(i) 选择产生最少数量的次级电子的加速管结构,

(ii) 在加速器的接近出口地方加上阻止电位, 这样防止离子束轰击障板及磁分析器时产生的电子进入加速管。

(iii) 在朝着加速管内部的表面上用轻元素 (石墨或铍) 遮盖起来, 减少轫致辐射的产额。

(iv) 在某些情况下, 可以在产生轫致辐射的地方采用铅的局部防护。

要計算防护层必須知道輻射强度分布，但对一个新建的加速器，这是不可能事先知道的，因而通常是参考已建成的同类型加速器的实测数据，防护层进行偏于安全的估算。

我們举一个实际例子来看一看，例中給出的一些数量級是可作为参考的。一个 1.6Mev 的加速器，根据測量結果，在鍋形外壳（半徑 = 100cm）表面上最强的輻射强度不超过 87.5mkp/сек。現在求距它表面处 $H=220\text{cm}$ 处要不超过允許剂量率所必須的防护墙混凝土厚度。

可以假設，輻射源位于鍋形外壳的軸綫上。根据平方反比定律， B 点的輻射剂量率为：

$$P = \frac{P_{100}R^2}{(R+H)^2} = \frac{87.5 \times 100^2}{(100+220)^2} = 8.5\text{mkp/сек}$$

設輻射平均能量为 0.7Mev，取安全倍数为 10，則在 B 处需要的减弱倍数

$$K = \frac{8.5}{2.5} \times 10 = 34$$

由万用表查出防护墙厚度为 37.2cm（混凝土的密度为 2.3克/cm³）。

在建成加速器以后，通常要測量加速器附近区域的剂量分布，作出等剂量的曲綫图。

图上表示出安全和危險的区域，

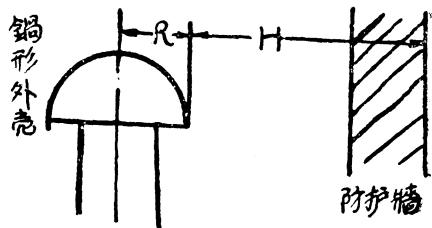


图 6—12

来，这样就非常便于进行剂量监察工作。

[1] W. Buecher, etc: Phys Rev 74, 1348, (1948)

[2] Nucleonics 119(1953)

[3] Nucleonics 8, 4 (1951)

[4] Price. G. A. etc: Phys Rev 77 806 (1950)

[5] 第二次日內瓦會議文献 A/conF, 15/P/2147

§6—6. 屏蔽材料

1. 考虑的一些因素 用于屏蔽的材料是多种多样的，它们适用于不同屏蔽任务的要求。在选用材料时，可以提出下面几个主要的考虑因素：

(1) 防护性能：是指材料对辐射的减弱本领怎样，也就是说将辐射减弱一定倍数所需要的材料的厚度、重量怎样。有时还包括考虑辐射在材料内的减弱过程中所引起的次级辐射的情况。例如，作为中子的防护材料，一方面要考虑它对中子的减弱效果，另一方面要考虑所引起的次级辐射（活化、俘获辐射等）情况。作为 β —射线的防护材料也有类似的考虑。

(2) 结构性能：选用的材料要能起屏蔽的任务，必须满足一定的结构上的要求。而且，一块材料常常不仅作为屏蔽材料，它又同时是建筑和结构材料的一部份。因而要考虑所选用的材料的结构性能。这些性能包括材料的物理形态、力学性质、机械强度和加工工艺等等。

(3) 稳定性能，指材料这样一些性能：抗辐射性——在辐射作用下性能有否改变；抗腐蚀性——遇到了水汽或酸碱的作用性能改变如何；耐高温性——对温度的反应怎样。这些性能关系到材料是否经久耐用。

(4) 经济成本：包括材料来源、获得可能性和加工工艺的复杂程度等因素的考虑。

究竟选用什么材料，考虑什么因素，对材料每一方面要求程度如何，那要根据具体的屏蔽对象，屏蔽任务来定。下面就常见的 γ 射线和中子的屏蔽材料作一说明。

2. γ 射线的屏蔽材料 从屏蔽性能上来说，原子序数大的、密度高的材料都是 γ 射线屏蔽的材料。可以用吸收系数或质量吸收系数来比较各种材料屏蔽性能的好坏。对重元素来说，吸收系数要大得多。因而达到同一减弱倍数由重元素组成的屏蔽层的厚度当然要比轻元素的厚度薄得多；从屏蔽层的总重量上来说，也是由重元素组成的要稍轻一些，因为一般重元素有较大的质量吸收系数，虽然大得并不很多。但假若屏蔽层是球形的话，由于体积和半径是立方的关系，那么肯定讲，由重元素组成的屏蔽层总重量一定要比轻元素的轻得多。对

柱形的屏蔽层情况也类似。

常用的 γ -屏蔽材料是铅、铁、混凝土。

铅：由于它的原子序数大 ($Z=82$)，密度高 ($\rho=11.3\text{ g/cm}^3$)，对于低能的或高能的 γ -射线都有很大的吸收系数，因而是 γ -射线屏蔽的很好材料。铅的抗腐蚀性、抗辐射性也很好。铅的缺点在于结构性能不好；硬度很低，机械强度很差，不能承受什么负荷；熔点也很低，不能耐受高温影响；价格也比较贵；此外若处理得不好也会有毒性。

铅常用来作为一些需要移动的防护装置的屏蔽材料。例如做成可移动的防护屏、放射源的容器、经常改变的临时防护屏。因为在这些装置中屏蔽材料的体积和重量应该是最小的。在固定的防护装置中，若屏蔽材料所占体积不允许很大的话也应该用铅做成。

铅常做成板状或块状的形式。为了保护和承载较大的强度，铅板外面可包一层钢板。铅也可做成小铅丸的形式，填充在防护装置中，这时它有整块铅密度的65%—85%。

铁：其原子序数为56，密度为 7.8 g/cm^3 。也有相当好的屏蔽性能。与铅比较起来，大约同样的减弱倍数下重量要多出30%。铁有很好的结构性能，机械强度很好。当既需要良好的结构性能，又需要很好的屏蔽性能时，使用铁（钢）是比较理想的。铁的价格也比较便宜。

铁常和铅合用，辅助铅结构性能的不足。在固定的防护设备中采用铁较多。铁块常掺在水泥中以提高水泥的密度，从而提高屏蔽 γ -射线的能力。

铁容易生锈。在射线作用下生锈会加快。在必要的地方建议铁的外表面涂以不易脱落的油漆，或使用不锈钢。

在同时有中子的照射时，为了防止材料的活化，应该注意和限制一些杂质的含量。例如用在反应堆的屏蔽层里，靠近堆芯地方，含钆量要少（建议不超过0.2%），镍与铀的含量也要尽可能降低，因为铀中常含有钷，镍中常含有钴，这些元素都是容易活化的。

混凝土：它是很多元素的混合物。便宜，易浇注，良好的结构性

能是它的主要优点，适宜作为固定辐射源的屏蔽材料，只要那些地方对屏蔽层的重量和体积不是要求太小的話。

为了提高屏蔽 γ -射綫的能力，加以适当的填料（铁矿石、鑄铁块、重晶石等）可以做成不同密度的混凝土。最經濟的密度应该这样来决定：一方面混凝土密度較低时会使屏蔽层占有較大的面积，同时也使穿过屏蔽层的机械装置及管道加长；另一方面混凝土密度增加会引起造价的提高。将这二方面相比較后决定最經濟的密度。

应该指出，当有中子同时存在的情况下，混凝土是很好的屏蔽材料。它既含有很多的重元素，也含有很多の輕元素，故能很好地屏蔽 γ -射綫又能很好地减速中子。这一性质在§6—4在中已提到过。

3. 中子的屏蔽材料 前已指出，用原子量小的材料来防护中子最为有效。最适宜使用含氢的材料。可以证明，一定重量的物质对于快中子的屏蔽性能将近似地反比于 $A^{\frac{1}{3}}$ ， A 为物质的原子量。因而輕元素减弱快中子到一定程度所需要的屏蔽材料的重量比重元素材料的重量要少些。然而在有高能量的中子存在时，重元素的材料也是很有效的，因为可藉非彈性散射使快中子很快减速到阈能以下。为了慢中子被吸收而不发生俘获辐射，或者为了减少材料的活化，含硼材料也經常使用。

下面提出几种防护中子的材料：

水：由于水的氢原子含量很高(6.7×10^{22} 氢原子/cm³)，故常用来防护中子。水的最大优点是价格便宜并且容易得到。它沒有毒性，在很多情况下是稳定的。

在很强的辐射作用下（例如在反应堆中），会引起水的分解而生成有害的气体。当水中含有溶解的盐类时，更易引起分解。为此应使用蒸餾水来作防护层。用蒸餾水还有个好处就是减少了杂质的活化，否则会增加放射性污水处理的困难。

在水中产生的俘获辐射可以用水中加入少許硼的方法来减弱。

聚乙烯：它是一种塑性材料，分子式为 $(CH_2)_n$ ，分子量很大，为18000—20000。它单位体积中氢原子含量較水为多，故减速中子比水更为有效。此外，聚乙烯很容易加工，能做成各种形状，化学性能

也很穩定。聚乙烯的熱膨脹係數很高，在安裝時必須考慮，否則由於受熱，熱膨脹很大，其軟化點又低(104.4°—115.6°C)，就會產生防護層厚薄不均造成防護上的不均勻性。聚乙烯的缺點是會燃燒以及惰性很強不易粘合。

含硼材料：有幾種很易溶解的普通硼化合物，可以加在水中或其它材料中，以增加對熱中子的俘獲率。這樣可減少俘獲輻射強度及材料的活化。常見的含硼物質有：硼酸、硼砂和各種其它硼化物。含硼的材料一般會引起工藝上一些困難或其它問題。例如鋼中含硼會增加焊接的困難，另外，抗腐蝕性也變差了；混凝土中含硼會增加攪拌和澆注的困難。含硼材料的造價成本當然也要提高些。

