

大學叢書

輻射防護度量

翁寶山編

臺灣商務印書館發行

大學叢書

打

輻射防護度量

翁寶山編

臺灣商務印書館發行

中華民國六十四年一月初版

大學叢書
輻射防護度量 一册

定價新臺幣一百元正

編者 翁寶山

發行者 臺灣商務印書館股份有限公司

印刷及發行所 臺灣商務印書館股份有限公司

臺北市重慶南路一段三十七號

登記證：內版臺業字第〇一三號

版權所有
翻印必究

參與執筆者

(以姓氏筆畫爲序)

- 朱鐵吉 國立清華大學保健物理組
邱志宏 核能研究所保健物理組
林友明 行政院原子能委員會技術處
林宏輝 國立清華大學保健物理組
林朝元 核能研究所保健物理組
陳爲立 核能研究所保健物理組
陳敏男 國立清華大學保健物理組
黃呈元 行政院原子能委員會技術處
許彬杰 國立清華大學保健物理組
許清水 臺灣電力公司原子動力處
傅應凱 核能研究所保健物理組
張鴻讚 臺灣電力公司原子動力處
曾家亮 國立清華大學保健物理組
葛家祥 核能研究所保健物理組
蔡昭明 核能研究所保健物理組
潘國郎 臺灣電力公司原子動力處
藍釗業 國立清華大學保健物理組
蘇獻章 核能研究所保健物理組

序

我國自四十四年開始發展原子能技藝與原子科學，迄今已歷十八年。前十年偏重於人才的訓練與儲備，近八年來則逐漸偏重於實際的應用與建設。輻射防護技藝的需求，日益迫切。近年來環境污染問題的嚴重已逐漸引起國人的重視，而輻射防護亦為環境學重要的一環。基於實際上的需要，乃邀請國內從事於保健物理和輻射防護的學者、專家、專業技術人員等十九位，撰寫此書，其要旨如下：(一)提供高工程度的技術人員一本技術手冊。許多有關輻射防護的度量可依本書所提供的實驗步驟，逐步操作。(二)提供大專程度的技術人員一本參考手冊。(三)提供在學的理工科系學生一本參考書籍。為符合此三大要旨，用字、措詞、解釋力求淺顯，避免用微積分表達物理意義。偶爾應用微積分作為計算工具，均屬次要或獨立的章節，不會影響全書的要點。

本書所提供的度量和實驗步驟，均為全體參與執筆者多年從事於輻射防護工作所獲得的實際經驗，以免流於形式或抄襲。參考文獻盡量取自全體參與執筆者的著作。本書的完成，蒙蔡昭明先生在活性度量，朱鐵吉先生在核種分析，林友明先生在生物鑑定提供許多寶貴資料，陳敏男先生校閱化學分析步驟，錢景台先生校閱數據分析，謹致謝忱。

翁實山 謹識
民國六十二年九月三日完
稿於國立清華大學原子
科學研究所保健物理組

輻射防護度量

目 錄

第一章 游離輻射與物質的互相作用	
一、物理方面	2
二、生物方面	10
三、游離輻射對細胞的影響	13
第二章 劑量測定與計算	
一、膠片佩章的校正與計數	18
二、熱發光劑量測定術	22
三、袖珍劑量計	25
四、徑迹蝕刻劑量術	26
五、輻射測量鏡讀術的校正	27
六、快中子劑量測定術	28
七、化學劑量計	31
八、由呼吸攝入體內的照射劑量	33
第三章 活性的測定	
一、放射性落塵式樣的收集	43
二、環境試樣的收集	46
三、試樣的製備原則	47
四、放射性落塵試樣的製配	48
五、環境試樣的製備	49
六、試樣的計測	52
七、計測結果的計算	55
八、環境試樣總 α 的測定	61
九、一般分析 α 的萃取法	63

十、擦拭試驗	64
十一、光峰活性的計算	65
第四章 核種分析	
一、水中鐳 226 的分析方法	71
二、海水中銻 P5、銻 P5 的分析方法	72
三、鈾 210 的分析方法	74
四、釷 106 的分析方法	76
五、鈾 144 的分析方法	77
六、海水中釷 106、鈾 144 的分析方法	79
七、環境試樣中鈾 239 的分析方法	87
八、碘 131 的分析方法	90
九、放射性鐳的分析方法	94
十、銻 137 的分析方法	117
十一、氫 41 的分析方法	126
十二、氬 85 的分析方法	127
十三、氫的分析方法	129
第五章 生物鑑定	
一、尿中總 α 活性的分析方法(一)	142
二、尿中總 α 活性的分析方法(二)	143
三、尿中總 α 活性的分析方法(三)	143
四、尿中鈾的分析方法(一)	145
五、尿中鈾的分析方法(二)	147
六、尿中鈾的分析方法(三)	148
七、尿中氫的分析方法	149
八、尿中鈾的分析方法	150
九、尿中鈾 239 的分析方法	151
十、尿中鈾 210 的分析方法(一)	152
十一、尿中鈾 210 的分析方法(二)	153

十二、尿中總 β 活性的分析方法	156
十三、尿中磷 32 的分析方法	157
十四、尿中碘 131 的分析方法	158
十五、尿中銻 137 的分析方法	160
十六、尿中放射性銻 89 銻 90 的分析方法	161
第六章 人口與環境的輻射防護	
一、調查環境的項目	164
二、一般人的劑量限度	165
三、核子設施周圍地區的劑量限制	166
四、核能電廠運轉前的環境輻射調查	167
五、核能電廠運轉後的環境輻射調查	181
六、放射廢料的管理	184
第七章 測定誤差與實驗數據的整理辦法	
一、有效數字、測量差度、相對差度的用法	193
二、化學實驗的測定誤差與數據整理	203
三、迴歸分析	225
四、計數的統計誤差	235
索 引	

第一章 游離輻射與物質的互相作用

一、物理方面

(一)游離輻射的類型

(二)輻射劑量與單位

二、生物方面

三、游離輻射對細胞的影響

一、物理方面

(一)游離輻射的類型

1.1. 輻射是能的發射和能的轉移的一種方法。所謂游離輻射是指 α 、 β 、 γ 、 X 等射線，中子以及一切發生於宇宙線的各式輻射。它們與物質發生相互作用時都直接、間接產生一個共同的現象，就是游離作用。游離作用就是使中性的原子和分子損失電荷或增加電荷，因此變成帶負電荷或帶正電荷的原子和分子，在這過程中分子可能分離，析為帶正負電荷的碎片。帶電荷的原子、分子或分子的碎片，稱為離子。

1.2. X 和 γ 射線是電磁波，與光相同；其他輻射則為個別質點組成的質點流。在核蛻變時有 α 、 β 和 γ 射線發射出來，有時還有其他輻射發出。經過一度或一連串的此等蛻變以後，不穩定核就轉變為穩定核。一連串蛻變中的中間核種稱為放射子核。

1.3. 原子核是構成原子中心的複雜構造，由帶正電荷的質子和中性的中子組合而成。質子和中子俱為基本質點，質量約與氫原子的質量相同。核種是原子的一種，其特徵是核內所含的質子數目和中子數目為一定的。帶正電荷的核為若干帶負電荷的電子環繞，循軌道而運行。電子的電荷量和質子的相同，但正負號剛相反，因此在中性原子中，軌道上運行的電子數等於核裏的質子數。這些軌道電子，參與構成化學鍵。原子所屬的化學元素係由質子數決定。就某一元素而言，可以辨出有若干不同的核種，其化學性質都相同，祇有中子數不同，因此它們的核質量各不相同。此等核種稱為該元素的同位素。

1.4. 不穩定同位素的核蛻變，並不在一切的原子內同時發生。這些蛻變，係無規則或任意事件，在每單位時間內，依某種機率發生。某一核種的原子蛻變百分之五十所需的時間，可以表示蛻變率的高低，稱為半化期。這半化期是不變的，乃是核種的特徵。

1.5. 一種放射性樣品的活性，決定於每單位時間內發生的蛻變數目。活性單位通常以居里表示。一居里相當於每秒 3.7×10^{10} 蛻變。一毫居里等於每秒 3.7×10^7 蛻變，一微居里等於每秒 3.7×10^4 蛻變，一微微居里等於每秒 0.037 蛻變。倘若憶及一微微居里約為每分鐘兩個蛻變，似頗便利。半化期甚長的放射核種，每單位質量的放射度甚微。半化期為 4.5×10^8 年的鈾 238，一居里重 3 噸；而半化期為 1.62×10^4 年的鐳 226，一居里則重一克；半化期為 8.04 日的碘 131，一居里重 8 微克。

1.6. 游離輻射的類型可分為下列數種：

1. α 射線是帶正電的質點（氦核），由某些放射核種的核於蛻變時以明確而特殊的動能發射出來。 α 射線在物質中產生濃厚的游離，但其射程甚短，通常在水和活組織中祇達 0.1 毫米。

2. β 射線是由某些放射核種的核發射出來的電子。 β 射線亦可由質量與電子相同而電荷與電子相反的質點組成。這種射線也在所穿過的物質中產生游離。但是 β 射線的射程卻比 α 射線大得多。放射核種所能發射的 β 質點在水中及活組織中的射程，沒有多少是大於 2 厘米的，更無達 8 厘米以上的。

3. γ 射線是某些放射核種的核所發射的電磁輻射；它們各有明確的能量，為發射它們核種的特徵。 γ 射線其作用為使吸收射線的物質能射出高速電子，藉此間接使物質游離，此等電子可能在物質深處射出；射出後每一個電子就在短距離（自一微米以下至數厘米不等，視它的能量大小而定）以內把它的能量耗散。 γ 射線的射程不能指定，因為它可以貫穿任何厚度的物質，祇是強度逐漸遞減而已。使 γ 射線減至原有強度的一半的物質厚度，稱為半值厚度。

4. X 射線也是電磁輻射，與物質相互作用及產生生物效應的情形，亦與 γ 射線同。它和 γ 射線的唯一差別，就在它是核外發射，而非核發射。實際上，產生 X 射線的通常辦法是使 X 射線管陽極裏的高速電子減速。使上述電子獲得高速的方法乃是先以電勢差加以 X 射線管。所產生 X 射線的最高能量以及它的貫穿本領便由這電勢差的大小決定。

5. 中子是原子核的組成成分，係經分裂一類的核反應過程衝射出來。中子不帶電，不能直接產生游離，快中子（能量大於 10 千電子伏）能量的消失，主要係由於它和輕原子核（特別是氫原子核）碰撞所致。這些原子核起回跳作用，並且因為帶電的關係，所以在它們把從中子轉移過來的能量耗散的時候，便產生離子。能量由中子傳遞到回跳核的過程，可能是在組織深處發生。像 X 射線和 γ 射線一樣，快中子沒有確定的射程。慢中子並沒有多少能量可在它們與原子核碰撞時消失。它們和物質相互作用，主要係經由核反應，結果是發射出帶電的質點或 γ 射線，同時也產生新核種，有些是放射性的。物質被此等質點或 γ 射線促致發生游離，也被誘發所生放射同位素在後來蛻變時所發射的輻射，促致發生游離。

6. 宇宙線自外太空達到地球；由複雜的一組能量不同的重質點所組成，來源是星系和太陽（原宇宙輻射）。原輻射的高能部分和大氣上層的原子相互作用而生副宇宙輻射，所含為質點及電磁輻射。副輻射的每一成分，都產生游離，且方式不同，各具其本身的特徵。原宇宙輻射的低能量部分，為地球的磁場所捕獲，變成兩不同高度上環繞着地球的內外兩帶的一部分。

1.7. 輻射能量通常是以電子伏（eV）和它的倍數一千電子伏（keV）及百萬電子伏（MeV）量度。各種輻射來源可能對生物產生體外照射和體內照射。體外照射是輻射從體外來源達到身體。體內照射是放射物質經過食入、吸入、注射入等類過程而併合於身體內所發的輻射。若係曝露於體外照射通常以貫穿力高的一類輻射為最重要。不過在某些情形下，來自體外的硬性亦即較高能量的 β 輻射也可能達到重要組織，例如雄性腺或眼晶狀體之屬。若係曝露於內照射通常以 α 射線及 β 射線為較重要，因為放射物質可能進入機體的代謝系統。偏擇某些特殊器官，進行沉積，而不均勻分布於全身。在這情形下，即射程最短的質點，亦能損害上述器官或其鄰近器官。所謂危急器官就是在某種曝露的條件下，由於放射敏感性，或由於輻射曝露的程度，又

或由於這種器官對身體功能的重要性，輻射所生影響最容易損及身體的基本功能的那種器官。

1.8. 放射物質自然地出現於環境中，但人類最近復在此種天然放射以外，增加人為方法所產生的放射原子，規模亦相當大，所用的方法主要是兩種反應過程，一為核分裂，一為核融合。

1. 分裂是一個重原子核分裂為兩部分而同時放出能量的現象。就少數原子核而論分裂可能自然發生。但是在一部分重原子核裏，也可藉中子的相互作用，用人為方法誘導分裂。分裂結果有兩個較輕的核產生，並有一個或更多的中子伴隨。這些中子，有些可以跟着再使與鄰近的核發生相互作用而續生分裂，在適合條件下，便可以發動鏈反應。如果鏈反應幾乎同時發生，便產生核爆炸。分裂過程都有大量放射性的分裂產物伴隨產生。

2. 融合過程是使較輕的兩原子核發生反應產生一顆較重的原子核。由此獲得的總能量甚高；很少放射原子核是直接產生的，但它們直到形成的時候，通常同時必跟着有中子發射。在融合或分裂中發射出的中子，可能和它們周圍的原子核發生反應，由此產生放射性的核種（誘發活性）。特別是中子在大氣中放出時，常易與氮核發生反應而產生放射性核種碳 14。

(二) 輻射劑量與單位

1.9. 曝露 X 為 dQ 除以 dm 的商。 dQ 為空氣中在質量為 dm 的體積單元內，由光子放出所有的電子（正、負）完全為空氣阻擋時，所產生正（或負）離子總電荷的絕對值，亦即

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1.1)$$

換言之， X 或 γ 輻射的曝露，是指某一地點的 X 或 γ 輻射依此等輻射產生游離作用的能力對此等輻射的量度，曝露的特別單位為侖琴(R)。一侖琴為 X 或 γ 輻射的曝露量，其大小等於由此照射關係，每0.001293

克空氣的締合微粒發射，在空氣中產生一靜電單位 (esu) 的正號或負號電量的離子。標準狀態 (氣溫 0°C，氣壓 760 毫米汞柱) 的空氣密度為 0.001293 克 / 立方厘米。

$$1 \text{ 倫琴} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ 庫倫 / 仟克 (整)}$$

曝露率是每單位時間的曝露。曝露率的特別單位為倫琴或其倍數或其次倍數，除以適當時間的商。例如

$$\text{倫琴 / 秒, 倫琴 / 分, 毫倫琴 / 小時。}$$

1.10. 吸收劑量 (D) 為 $d\bar{\epsilon}$ 除以 dm 的商。 $d\bar{\epsilon}$ 為一體積單元內游離輻射對物質的平均能量付與，而 dm 為此體積單元內物質的質量，亦即

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1.2)$$

換言之，吸收劑量是指游離質點在關係地點，對每一單位質量的受照射物質所給予的能量。吸收劑量的特別單位是雷得 (rad)。

$$1 \text{ 雷得} = 10^{-2} \text{ 焦耳 / 仟克}$$

吸收劑量率是每單位時間的吸收劑量。吸收劑量率的特別單位是雷得或其倍數或其次倍數，除以適當時間的商。例如

$$\text{雷得 / 秒, 雷得 / 分, 毫雷得 / 小時。}$$

1.11. 比較生物效應 (RBE)。種類不同與能量各異的游離輻射，雖然它們與生活物質所發生的相互作用基本相似，可是產生某一種生物效應，例如使細胞死亡或使眼晶狀體不透明，所需的劑量則可能各異。因此，實有差別。一種輻射對另一種輻射的比較生物效應的定義，乃是此兩種輻射產生某一效應所需劑量的反比。如果就某生物系統而言， α 射線的比較生物效應為 10，這就是說，就此系統而言，0.1 雷得 α 射線所產生的生物效應，與參照輻射 1 雷得所產生的效應相同。傳統辦法係以能量在某一大小內的 X 射線作為參照輻射。嚴格地說，比較生物效應值祇適用於測時的那種條件，因為兩種任定的輻射，可能由於許多因素，例如所要觀察的效應、劑量大小和劑量率等，致發生差異。

1.12 一移動中帶電質點的游離強度，可藉游離比度表示。游離比度是指於介質中，帶電質點移動一厘米所形成的離子對的數目。而帶電質點在介質中的直線能量轉移 (L_{Δ}) 為 dE 除以 dl 的商。 dl 為質點穿越的距離， dE 為由於碰撞所引起的能量損失，其能量轉移小於某些特定值 Δ (電子伏)，亦即

$$L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\Delta} \quad (1.3)$$

換言之，直線能量轉移是使游離質點穿行一介質時的能量的直線損失 (局部吸收率)。直線能量轉移可簡便地以千電子伏 / 微米 ($keV / \mu m$) 為單位來表示。附表 1.1 與表 1.2 列有各種輻射的平均游離比度，比較生物效應以及平均直線能量轉移的值。

表 1.1 比較生物效應

平均游離比度 (每微米水的離子對)	比較生物效應	入於水的平均直線能量轉移 (每微米的千電子伏)
100 或以下	1	3.5 以下
100 至 200	1 至 2	3.5 至 7.0
200 至 650	2 至 5	7.0 至 23
650 至 1,500	5 至 10	23 至 53
1,500 至 5,000	10 至 20	53 至 175

註 1 任何游離比度的 X 射線、電子 (正、負) 的比較生物效應為 1。

註 2 為求切合實際起見，對全身照射或最敏感的危急器官而言，能量不超過 10 百萬電子伏的快中子及質子，比較生物效應用 10，若為重同跳核，則比較生物效應用 20。

表 1.2 比較生物效應與輻射的類型

輻射	生物效應	比較生物效應
X射線、 γ 射線、電子、一切能量的 β 射線	全身照射 (造血器官為危急的)	1.0
快中子與達 10 百萬電子伏的質子	全身照射 (形成白內障為危急的)	10
天然存在的 α 粒子	生癌	10*
重同跳核	形成白內障	20

*若無法與 0.1 微居里鐳的全身負擔作直接比較，則採用此值。

1.13. 因為某一種輻射的比較生物效應係決定於在一己知的實驗條件下，某一種有機體的真正生物效應，所以比較生物效應一詞宜用於輻射生物學。就保健物理的觀點，可就輻射（參照輻射除外）的某些最重要的效應，取其比較生物效應的上限，作為標準化的因數，以便求不同輻射的劑量的總和。此標準化的因數稱為射質因數（Q）。附表 1.3 與表 1.4 列有射質因數、直線能量轉移以及輻射、射質因素等關係。

表 1.3 射質因數與直線能量轉移的關係

入於水的直線能量轉移 (每微米的仟電子伏)	射質因數
3.5 以下	1
3.5 至 7.0	1 至 2
7.0 至 23	2 至 5
23 至 53	5 至 10
53 至 175	10 至 20

表 1·4 不同輻射的射質因數值

輻 射 類 型	射 質 因 數
X射線、 γ 射線、電子、 β	1.0
中子與質子能量達 10 百萬電子伏	10
天然存在的 α 粒子	10
重回跳核	20

註： β 的能量係指最大能量。

1.14. 等效劑量 (H)，為組織內關係地點的吸收劑量 (D)，射質因數 (Q)和其他任何修正因子 (N)的乘積，亦即

$$H = DQN \quad (1.4)$$

換言之，目前輻射防護的步驟所謂對於某一器官的效應，係指此一器官的吸收劑量，再由某些修正因子加權所得的值。等效劑量的特別單位為倫目 (rem)。當吸收劑量 (D)以雷得表示時，H則以倫目表示。

例 1.1. 反應器熱實驗管外的劑量率為 0.5 毫雷得/小時 (γ)，0.2 毫雷得/小時 (熱中子)，0.1 毫雷得/小時 (快中子)，求此混合輻射場的總劑量率。

$$\begin{array}{rcl}
 \gamma : & 0.5 \times 1 = & 0.5 \\
 \text{熱中子} : & 0.2 \times 3 = & 0.6 \\
 \text{快中子} : & 0.1 \times 10 = & 1.0 \\
 \text{混合輻射} & & = 2.1 \text{ 毫倫目/小時}
 \end{array}$$

中子的吸收劑量率，迄今尚無適當的公式作為計算的依據，唯藉儀器測量。中子通量為單位時間內所增加的中子流量，而中子流量係指進入處於該地點中心的小球體單位面積的中子數目。下列附表 1·5