



輻射防護導論

醫用游離輻射防護講習

陽明大學 生物醫學影像暨放射科學系
環境保護暨安全衛生中心

王信二

教授/中心主任/輻防師



內容

- 一、何謂輻射
定義、分類、產生、特性
- 二、游離輻射的來源
- 三、游離輻射與物質作用
- 四、游離輻射的生物效應
- 五、游離輻射防護
- 六、結語

一、何謂輻射-- 輻射定義與基本觀念



- 輻射是一種能量傳遞的形式，以電磁波或粒子發射方式傳遞能量
- (一)輻射的分類
 - 輻射種類： α (阿爾伐射線)， β (貝他射線)，質子、中子射線，重粒子射線， γ (加馬射線)， χ 光，紫外光，可見光，紅外光，微波
 - 粒子輻射；電磁波輻射
 - 帶電荷(直接游離)；不帶電荷(間接游離)
 - 游離輻射；非游離輻射



輻射定義與基本觀念

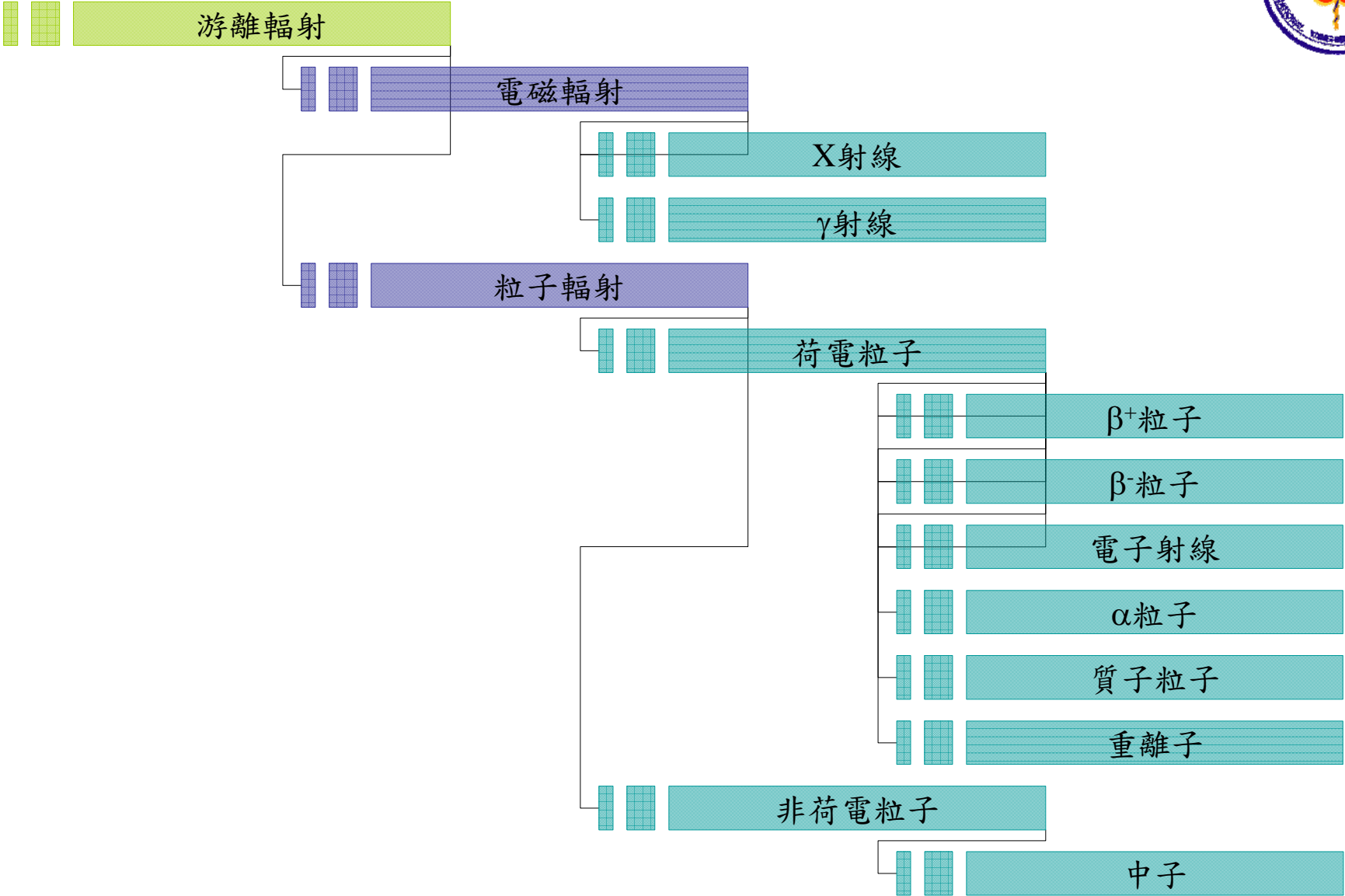
1. 游離輻射：

通過或照射物質能產生游離粒子的輻射。如阿伐射線，貝他射線(e^- 、 e^+)，質子、中子射線，重粒子射線，加馬射線及X光等。 電磁波能量 $> 10 \text{ KeV}$, $1\text{ev} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$)

2. 非游離輻射：

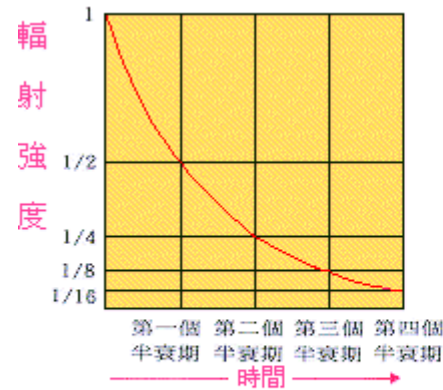
能量低，不足以產生游離粒子的電磁波輻射，如短波、微波、雷達波、紅外線、可見光、紫外線等。
(電磁波能量 $< 10 \text{ KeV}$)

游離輻射





游離輻射與非游離輻射



放射性核種的輻射強度
會隨時間之增加而衰減

放射性同位素半衰期



不同的輻射線有
不同的穿透能力



- (二) 輻射的特性

- 輻射源—輻射由輻射源產生

反應器，加速器，X光機，放射性同位素

- 輻射源被移走或關閉後，輻射也隨之消失

反應器 → 釋出中子

加速器 → 加速荷電粒子(電子、質子、重粒子)

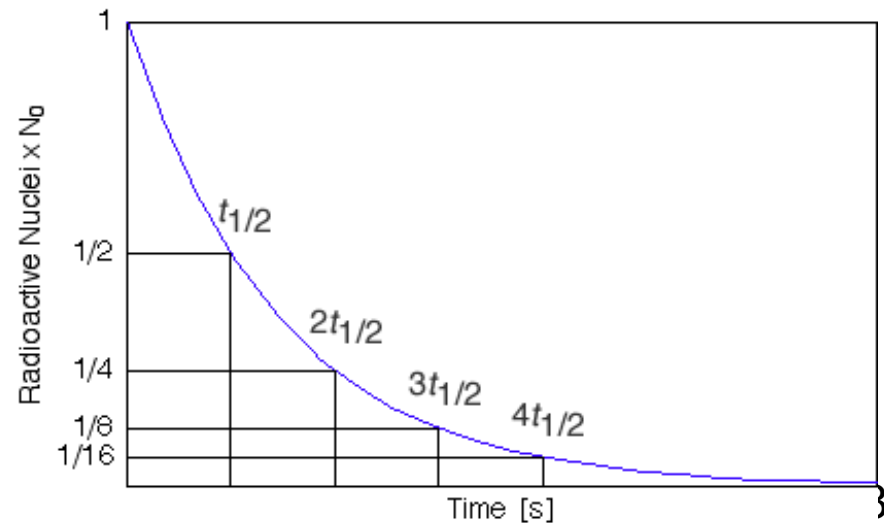
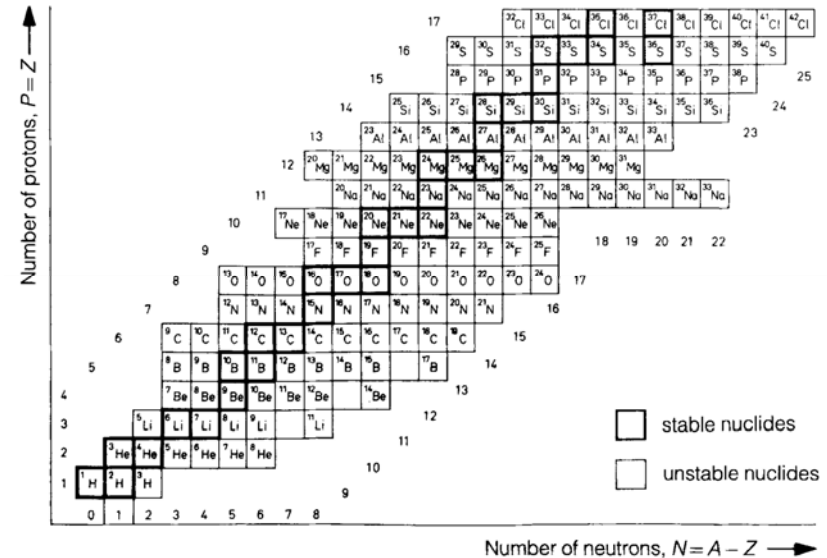
X光機 → 釋出電磁波

放射性同位素 → 釋出 α , β , γ , n

放射性同位素



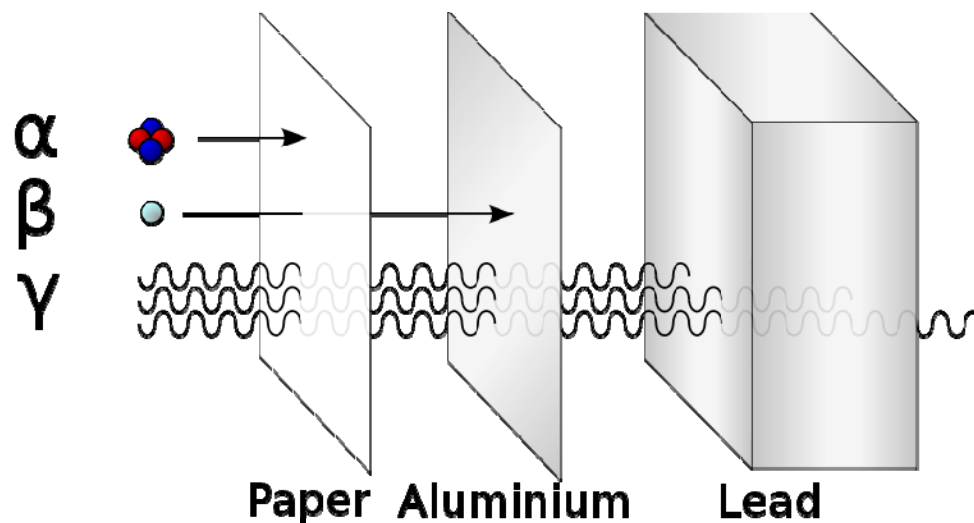
- 放射性同位素成因
原子核內質子數(Z)與中子數(N)的比值偏離穩定區，經蛻變後遷移至穩定區。
- 放射性同位素特性
 - 衰變：放射性同位素每秒自發衰變一次為一貝克(Bq)
 - 半衰期：放射性同位素衰變至原有數量的一半所需時間
 - 穿透性





輻射的穿透性

- (1) 阿伐最弱。因為「比游離度」(離子對數目/距離)甚高，極易釋出能量並造成物質的組成電子游離，但紙、皮膚等即可阻擋。例如 ^{241}Am 。
- (2) 貝他稍強。用鋁板作屏蔽。
- (3) 電磁波最強。因為「比游離度」低，能量不易給予物質。需用原子序較高的物質(如鉛)作屏蔽。



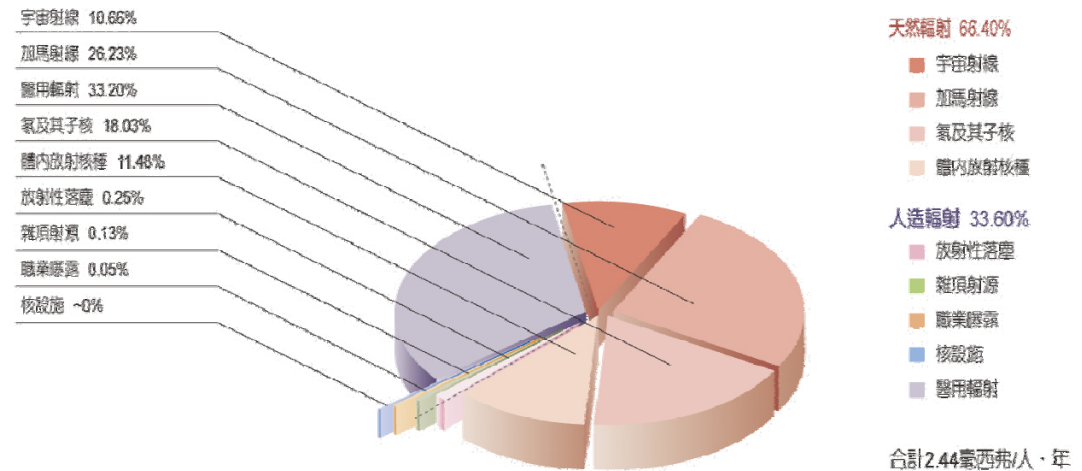
二、游離輻射的來源



• 天然輻射

- 來自外太空的輻射，又稱「宇宙射線」
- 來自土壤、岩石中微量天然放射性核種
- 水及空氣中天然放射性氬氣
- 人體中所含之鉀40

台灣地區國民輻射劑量評估結果分布圖



• 人造輻射

- 醫學診斷上的應用(如：核子斷層掃描及胸腔X光檢查等)
- 核子試爆及核能設施

台灣地區民眾所接受的輻射，天然輻射約佔66.4%，人造輻射約佔33.6% (其中醫療佔33.2%)，核能設施所造成之輻射值僅佔0.1%。



背景輻射

- 宇宙射線(cosmic ray)
- 天然存在於地殼或大氣中之天然放射性物質，例如釷(Th-232)、鈾(U-235, 238)、鉀(K-40)、銣(Rb-87)等釋出之游離輻射(體外)，空氣中含放射性氡(Rn-222, 吸入)
- 一般人體組織中所含天然放射性物質釋出之游離輻射(體內)
- 因核子試爆或其他原因而造成含放射性物質之全球落塵釋出之游離輻射
- 人造：醫用輻射、生活消耗品、核能發電。



體內之天然輻射

在人體和食物內最主要的天然放射性核種為鉀-40，一般國民主要消費食物，均含有鉀-40存在，而人體由於吸入與食入因素，因此鉀-40也會存在於體內中。香煙與動物內臟中亦含有天然放射性核種釷-210 (^{210}Po , 半衰期138.4天，鈾-238子核種)，釷-210會經由土壤吸收存積於煙草中或經由動物食用牧草而進入動物內臟中存積。



背景輻射的來源

正常背景輻射，對人類造成的年有效劑量評估值(mSv)

射源		體外照射	體內照射	總值(mSv)
宇宙射線(外太空)		0.300	0.015	0.315
地球放射性元素				
⁴⁰ K	人體內	0.120	0.180	0.300
⁸⁷ Rb	人體內		0.006	0.006
²³⁸ U系	土地中	0.090	0.950	1.040
²³² Th系	環境中	0.140	0.190	0.330
總值		0.650	1.341	1.991

- 台灣地區人民年有效劑量約1.62 mSv(32張X-ray)

三、游離輻射與物質作用



輻射與物質作用模式

- Ionization
- Molecular and atomic excitation
- Kinetic energy transfer
- Nuclear reaction
- Radiative process

游離作用-ionization



- (一)直接游離：荷電粒子輻射 (α 、 β) 直接與原子核外的電子產生庫倫作用，傳遞能量給予電子，使電子爭脫束縛而游離。

- (二)間接游離：光子和中子必須先與物質作用 (光電效應、康普吞效應、成對發生效應；核反應、非彈性散射)，產生荷電粒子後，再由此荷電粒子去產生游離作用。

間接游離--光子與物質作用

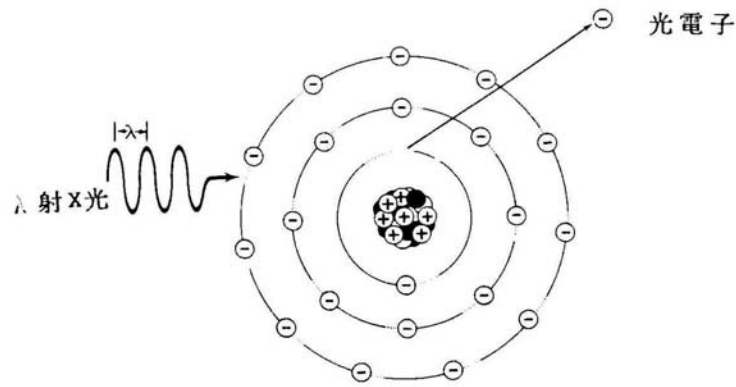


圖1.10 光電效應示意圖

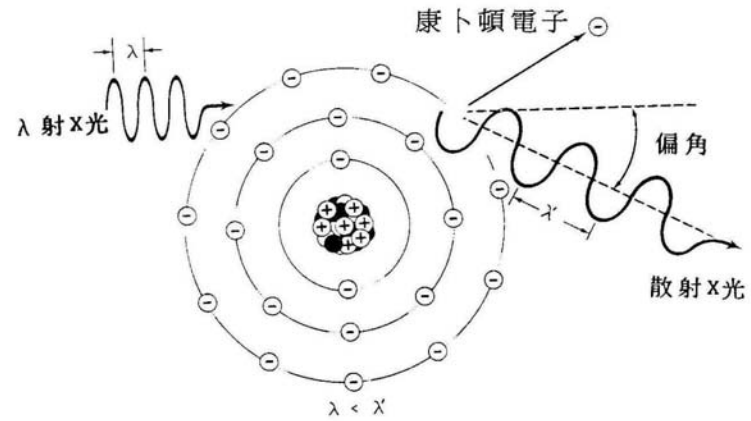


圖1.11 康卜頓效應示意圖

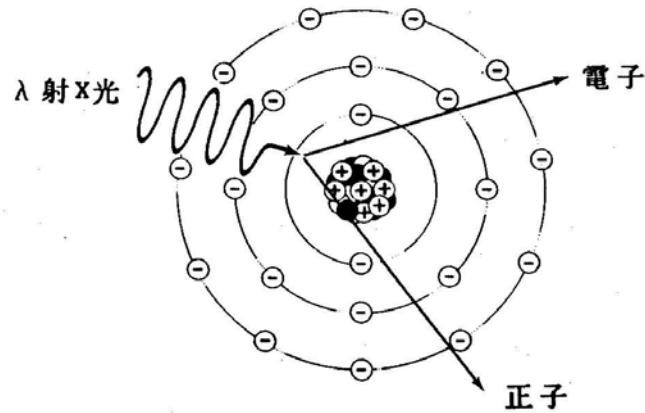
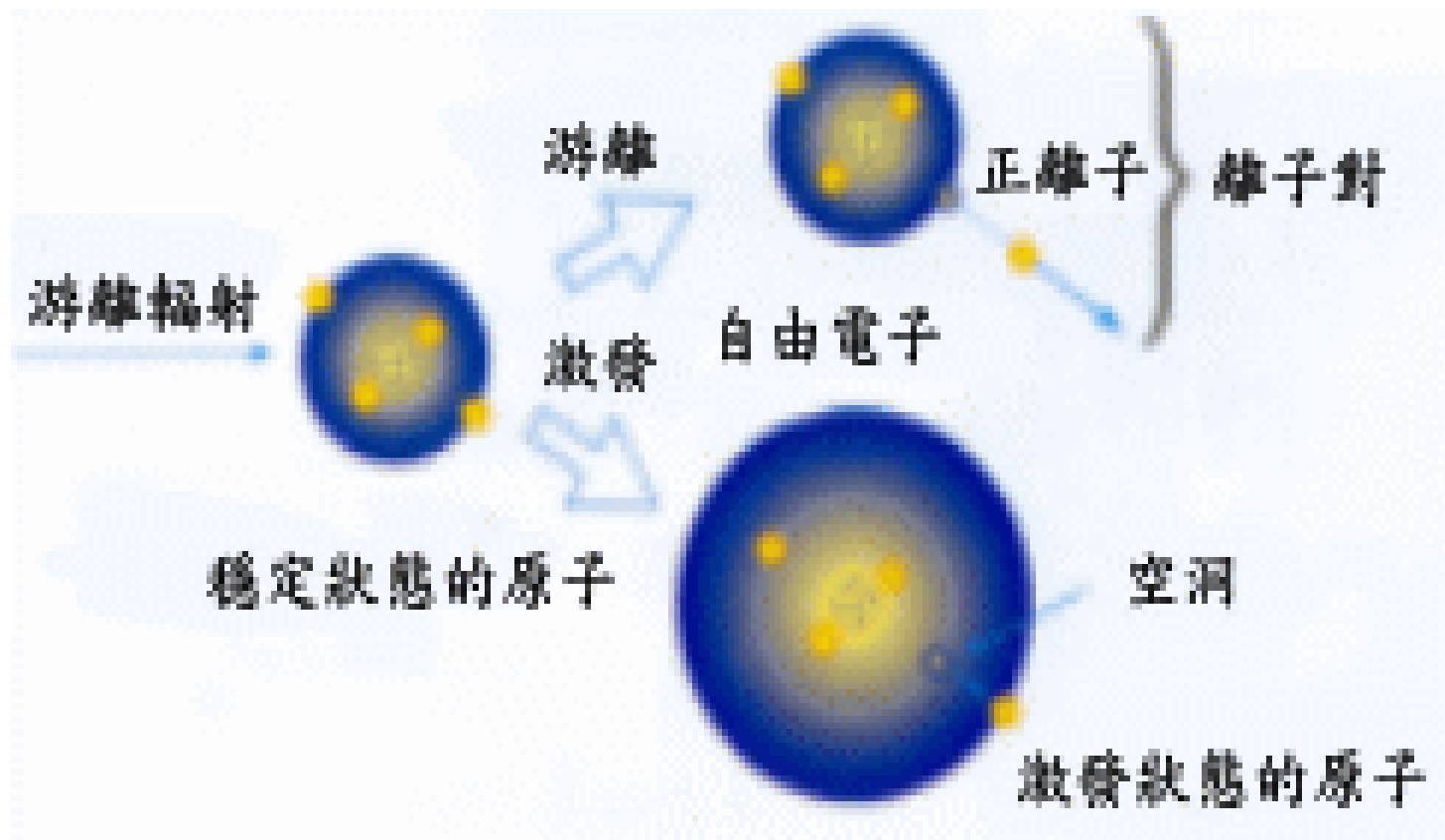


圖1.12 成對產生示意圖



原子的游離與激發-excitation





動能轉移-kinetic energy transfer

- 輻射能量部分轉移至新生成的 ion pair



核反應-nuclear reaction

熱中子或high energy charged particle較易
與物質發生核反應

- $^{235}\text{U}(n,f)$, $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$, $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$
 $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$, $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, $^{14}\text{N}(n,t)^{12}\text{C}$
- $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$, $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{O}$

放射程序-radiative process



高速帶電粒子『超光速運動』或進行加/減速度運動，放出電磁波

- Bremsstrahlung radiation (X-ray)
- Cerenkov radiation (blue light of pool reactor)

四、游離輻射的生物效應

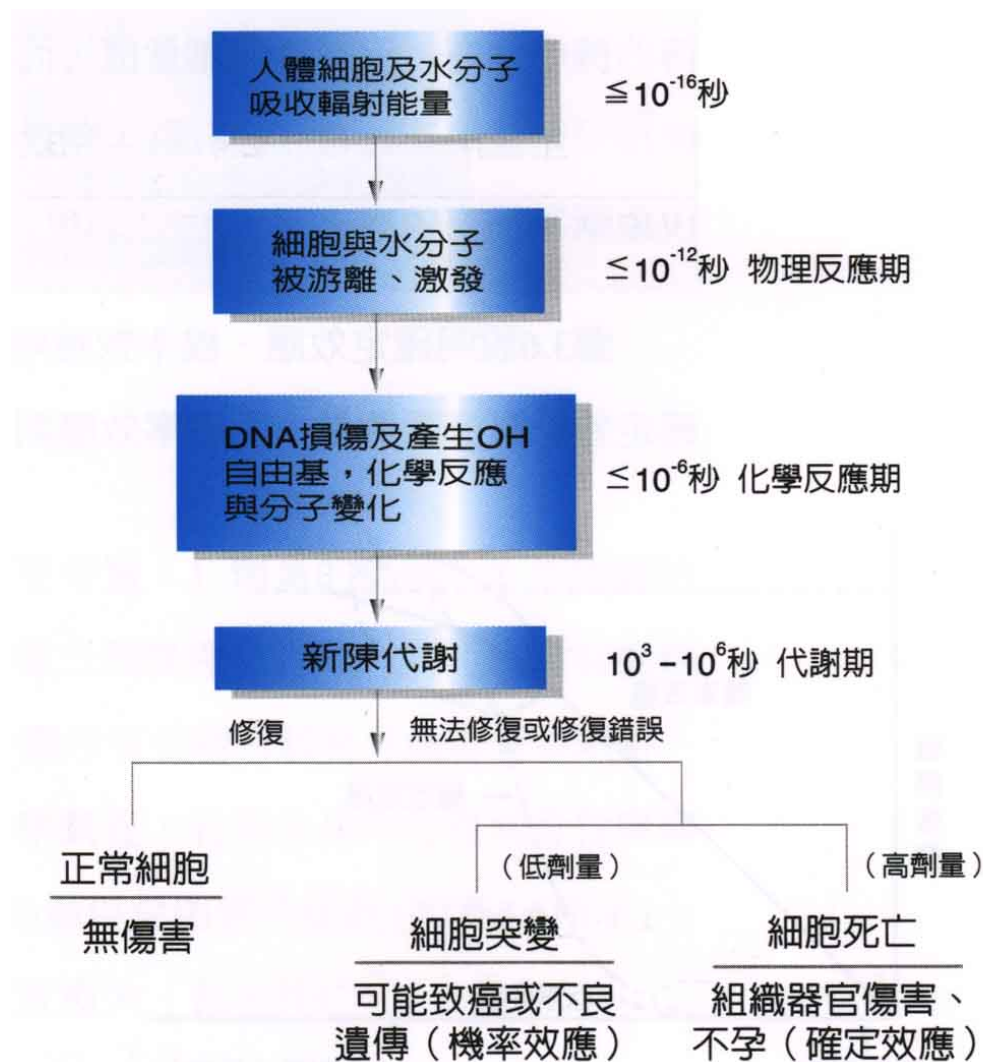
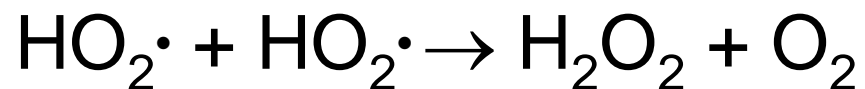


圖 3.5 輻射對人體健康效應之發展過程



游離激發 → 原始損害 → 新陳代謝 → 正常
(物理期) (化學期) (代謝期) ↘ 產生效應

自由基的傷害性(間接作用)為主要原因。





• 確定效應(非機率效應)

接受高劑量，人體組織器官受損，劑量愈高傷害愈嚴重，有低限值。

接受劑量與症狀如下表。

一次劑量(西弗, Sv)	一般症狀說明
0.1以下	無可察覺症狀，但遲延輻射病的產生仍可能發生。
0.10-0.25	能引起血液中淋巴球的染色體變異。
0.25-1.00	可能發生短期的血球變化(淋巴球、白血球減少)，有時有眼結膜炎的發生，但不致發生機能之影響。
1.00-2.00	有疲倦、噁心、嘔吐現象，血液中淋巴球及白血球減少後恢復緩慢。
2.00-4.00	24小時內會噁心、噁吐，數週內有脫髮、食慾不振、虛弱、腹瀉及全身不適等症狀，可能死亡。
4.00-6.00	與前者相似，僅症狀顯示較快，2-6週內死亡率50%。
6.00以上	若無適當醫護，死亡率為100%。



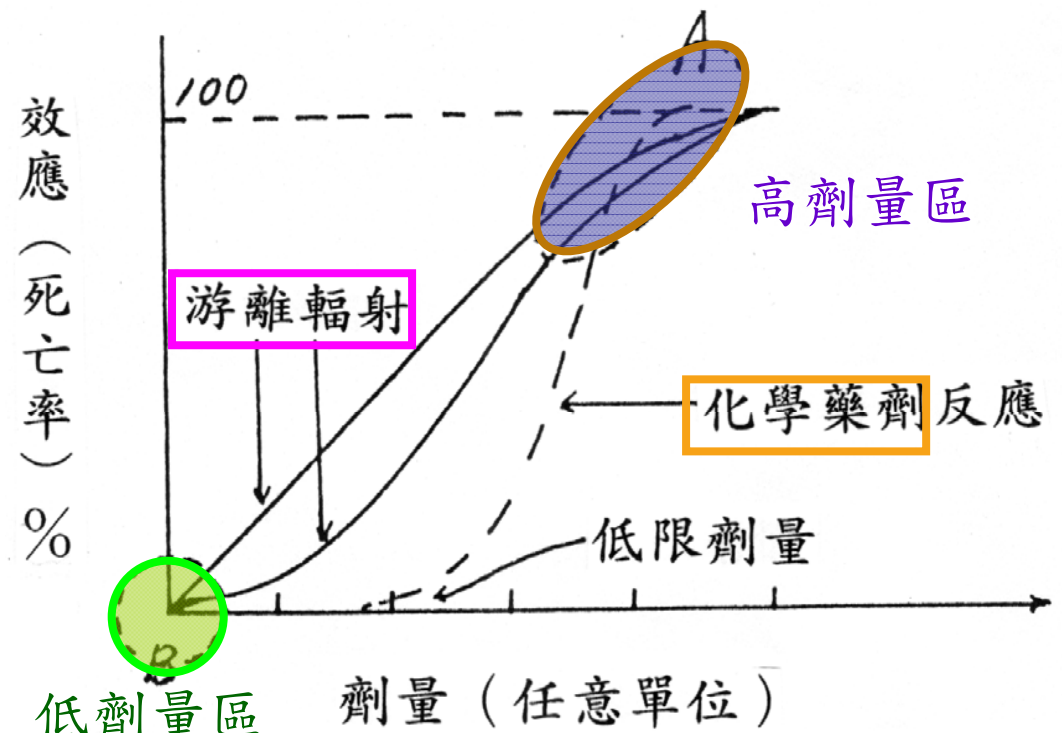
組織器官對輻射的敏感性（確定效應）

敏感度	組織名稱
高	胎兒、淋巴組織、生殖腺、骨髓、脾臟
稍高	皮膚、水晶體、消化道
普通	肝臟、血管
低	肌肉、骨骼、神經



• 機率效應

- 低劑量輻射對人體無任何傷害症狀。但假設只要接受輻射，就有得致死癌與不良遺傳的機率存在，故無低限值。接受劑量愈高，得癌與不良遺傳的機率愈大。輻射風險度即從事輻射工作導致生命損失的程度。
- 機率的正確性與取樣數目有關，取樣數目愈多，不確定性愈大(有隨機性)。
- 因時空的不同，不同的人對相同的機會率常有不同的看法(主觀性較強)。



游離輻射與化學藥劑的劑量反應曲線比較



游離輻射的機率效應係數（摘自1990年ICRP第60號報告）

受照人群	機率效應 (10^{-2}Sv^{-1})			
	致死癌	非致死癌	嚴重遺傳	總計
成年人口	4.0	0.8	0.8	5.6
全人口	5.0	1.0	1.3	7.3



各行工業之職業危險程度（每年每萬人之意外死亡人數）

危險程度	職業
0 ~ 1 *	貿易、製造、服務、公務員
1 ~ 2	礦陶產品、鋼鐵鑄造、非鐵金屬或其成品、石油、電氣事業、水泥
2 ~ 3	地表採礦
3 ~ 4	建築、伐木、鐵路車輛、鑿採石
10 ~ 12	地下採礦

*輻射工作者（包括癌症與遺傳效應在內）並未超過此值。



低劑量輻射對人體的效應

根據最近的研究結果得知，生物體對輻射的反應十分微妙。藥物到底是「毒」還是「藥」，乃是由劑量來決定，輻射的情形也是如此。目前，已確認高劑量與低劑量的輻射，對生物體所造成的影響(作用)全然不同。

低劑量輻射對人體的效應



現行的輻射防護法規，乃基於「再微量的輻射，仍可能有害，並無所謂的劑量低限值」假說為考量基準。這種考量的方式是將高劑量領域的相關數據，直接外插延伸至低劑量範圍，並非在低劑量領域實際驗證的結果。低劑量輻射對被曝露者的風險及其輻射生物效應，仍然是科學上有待究明的課題。

根據最近的研究顯示，生物對低劑量輻射具有巧妙的反應機制，人類對此等機制的產生條件（劑量、劑量率等）更為明瞭之後，相信將來應會依據科學實驗數據，重新制訂更為符合事實的輻射防護規範。



高輻射背景地區的健康調查

中國廣東省的陽江縣為高輻射背景地區，年劑量為 6.4 毫西弗（比一般高3倍）。研究結果發現高背景地區的癌死亡率較低，可能接受較高劑量背景輻射所致少量的傷害，刺激人體的活力反而提高抗癌效果。

表 1.年間癌死率（1970~1986）

癌病	HB	CA	HB: high background area--6.4 毫西弗/年 (m Sv/y) CA: Control area--2.4 毫西弗/年 (m Sv/y)
平均死亡率 (*1/100000)	46.29	53.56	
人·年	1,008,769	995,070	
死亡數/年	467	533	



世界高輻射背景地區與劑量率

地區	年劑量	台灣背景輻射 年劑量之倍數
伊朗 Ramsar 市	6 至 360	3 至 180
印度 Kerala 區 十個村莊	平均 13	6.5
巴西 Espirito Santo	0.9 至 35	17.5
大陸福建鬼頭山區	平均 3.8 最高 120	1.9 60

輻射劑量警示



項目	劑量
搭越洋航線飛機	1小時6微西弗
1天30根菸	1年13毫西弗
1張胸部X光	0.02~0.05毫西弗
1次電腦斷層	5~10毫西弗
^{18}F -FDG; $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HMPAO	7毫西弗
台灣每人每年的背景輻射值	1.6毫西弗
需躲在屋內掩蔽的輻射量	2天內達10毫西弗以上
需疏散到避難所的輻射量	7天內達50~100毫西弗
服用碘片時機	100毫西弗
暫時移居	預期輻射量30天內達30毫西弗以上
永久遷離	預期終生輻射量達1西弗以上

註1：一般民眾1年劑量限值為1毫西弗

註2：放射職業工作者1年劑量限值為平均20毫西弗

各種輻射劑量比較



全身輻射劑量 (毫西弗)

台北到紐約來回飛行	0.156
自然輻射/每年	2
收看電視每天1小時/每年	0.015
法規--職業工作者/每年	50

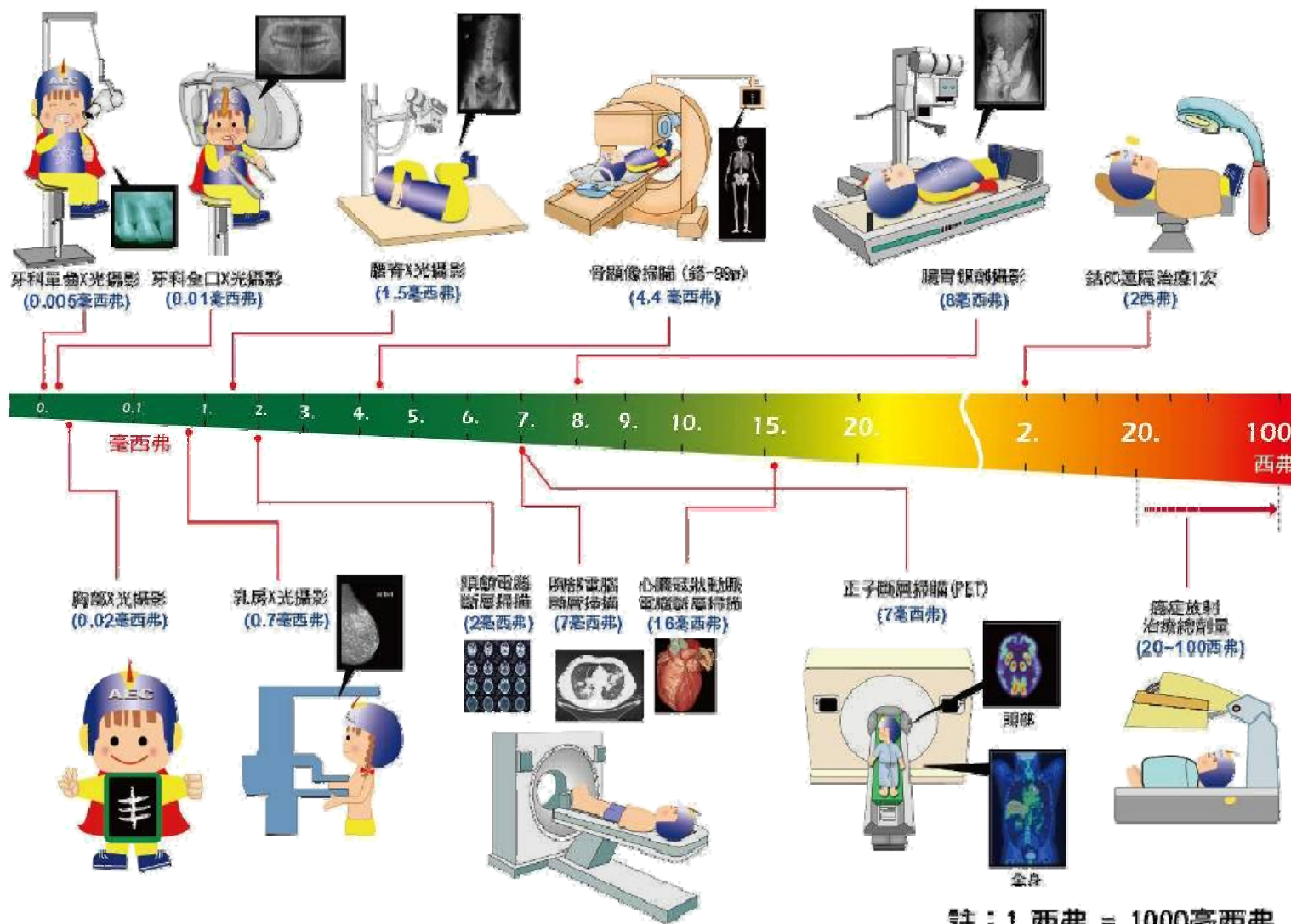
核子醫學檢查

F-18 FDG PET全身檢查	10
Tc-99m MDP骨造影	5
Tc-99m HMPAO腦造影	10.2
TL-201心肌檢察	21

放射線檢查

胸部X光檢查	0.05
胸腔X光電腦斷層	5.44
腹腔X光電腦斷層	4.02
放射性實驗	< 0.01

醫療游離輻射劑量比較圖





五、游離輻射防護

目的：

- (一) 須有明確獲益、防止不當行為、確保人的安全
(正當化)
- (二) 防止「確定效應」的發生（各器官等效劑量限值，
500 mSv /y）
- (三) 抑低「機率效應」的發生率（全身有效等效劑量
限值，50 mSv /y）（限制化）。
民眾的年劑量限值 = 5 mSv /y。

精神：

在考慮到經濟與社會因素之後，一切曝露應以合理抑低（ALARA）為原則（最適化）。



法規：

➤ 游離輻射防護安全標準(94.12.30修正發布，全文共21條)

(一) 人：年滿十八歲以上，接受相關講習，操作執照，劑量
佩章，其計讀值要保存至少30年以上。工作之前
須

體檢合格，之後須定期健康檢查。

(二) 事：正確的操作程序

(三) 物：要設備執照

(四) 地：輻射警告標誌及適當屏蔽、場地區隔

➤ 工作人員劑量超過限值，除送醫檢查外，還須檢討其工
作條件、性質及場所輻射狀況，且須報告原能會。



防護原理：

(一) 體外曝露防護

1. 時間：儘量縮短曝露時間
2. 距離：儘量遠離射源（遙控操作），劑量率與距離平方成反比。
3. 屏蔽：用屏蔽物質把輻射擋住。對貝他射源，內層用低原子序物質（玻璃、塑膠）減少制動輻射，外層用高原子序物質（鉛）。加馬射線用鉛屏蔽。
4. 衰變：等候射源活度衰減。

(二) 體內曝露防護

1. 減少吸入
2. 避免攝入
3. 增加排泄
4. 防止滯留



六、結語

- 火可取暖，亦可成災；
水可載舟，亦可覆舟。
- 善用輻射→利多於弊。
- 游離和非游離輻射均早已存在自然
界中，宜善加利用，無須恐慌。
- 了解輻射可以安心健康過日子。



人員劑量計

醫用游離輻射防護講習

陽明大學 生物醫學影像暨放射科學系
環境保護暨安全衛生中心

王信二 教授 / 中心主任 / 輻防師



一、需求

(一) 技術上

1. 對欲度量的輻射要有良好反應

對人員工作區域中所有可能存在的游離輻射有良好的反應，且不受環境因素的影響。人員劑量計係度量X、加馬及貝他輻射造成的體外照射劑量，因此人員劑量亦須有鑑別不同輻射的能力。



2. 靈敏度高、監測劑量的範圍廣

使用期一個月的劑量計，偵測低限應小於300微西弗。偵測的上限則以輻射工作發生意外事件時，人員可能接受的最高劑量為考慮基礎，通常偵測上限不得小於10戈雷。

3. 精密度和準確度

我國實驗室認證委員會(CNLA)及美國國家標準學會(ANSI)都規定，當監察低劑量時，其淺部和深部等效劑量評估結果，各別精密度和準確度之和不得大於50%。若劑量大於0.1戈雷且係急性照射，評估值不確定度不得超過30%。



(二) 管理上

1. 劑量計要易於識別：編號、姓名、身分證號碼等。
2. 大小及重量適當、堅固耐用。
3. 易於使用、測讀迅速確實。
4. 成本低。

(三) 法律上

萬一工作人員受輻射傷害而要求資方賠償或法律保障時，若能提供個人永久性劑量紀錄且有證據效力的劑量計，則較有勝算。

二、為何要佩帶人員劑量計



(一)法規的規定

我國「游離輻射防護安全標準」(民國94年12月)的相關規定:

1. 輻射作業依工作人員可能接受曝露之程度區分為
 - (1) 甲種狀況：工作人員一年之曝露可能超過年個人劑量限度十分之三者。
 - (2) 乙種狀況：工作人員一年之曝露不可能超過年個人劑量限度十分之三者。
2. 對工作人員之劑量偵測，依下列規定施行之
 - (1) 於甲種狀況下之工作人員，應實施個別人員偵測。
 - (2) 於乙種狀況下之工作人員，得以工作環境監測代替個別人員偵測。



- (二) 可鑑定某地區或某工作是否符合「合理抑
低」原則 (as low as reasonably achievable,
ALARA) 。
- (三) 為輻射工作人員提供防護與安全保障。
- (四) 提供病變與劑量關係之研究。

三、人員劑量監測的量與觀念



由於有效等效劑量之評估甚為複雜困難，因此我國法規規定人員劑量之度量簡化為評估強穿輻射及弱穿輻射個人等效劑量兩類：

1. 個人等效劑量 $H_p(10)$ ：強穿輻射適用於人體表面下10毫米深度軟組織體外曝露之等效劑量。
2. 個人等效劑量 $H_p(0.07)$ ：弱穿輻射適用於人體表面下0.07毫米深度軟組織體外曝露之等效劑量。

四、人員劑量計種類與其特性



蓋格輻射偵測器

- 可同時偵測 $\beta/\gamma/X$ -ray
 - 輻射強度 ($\mu\text{Sv/h}$)
 - 輻射污染 (cpm) 三機一體
 - 污染總量 (counts)
- 輕便、簡易、快速偵檢
- 數位型大顯示幕
- 具有聲響及靜音控制





個人警報器

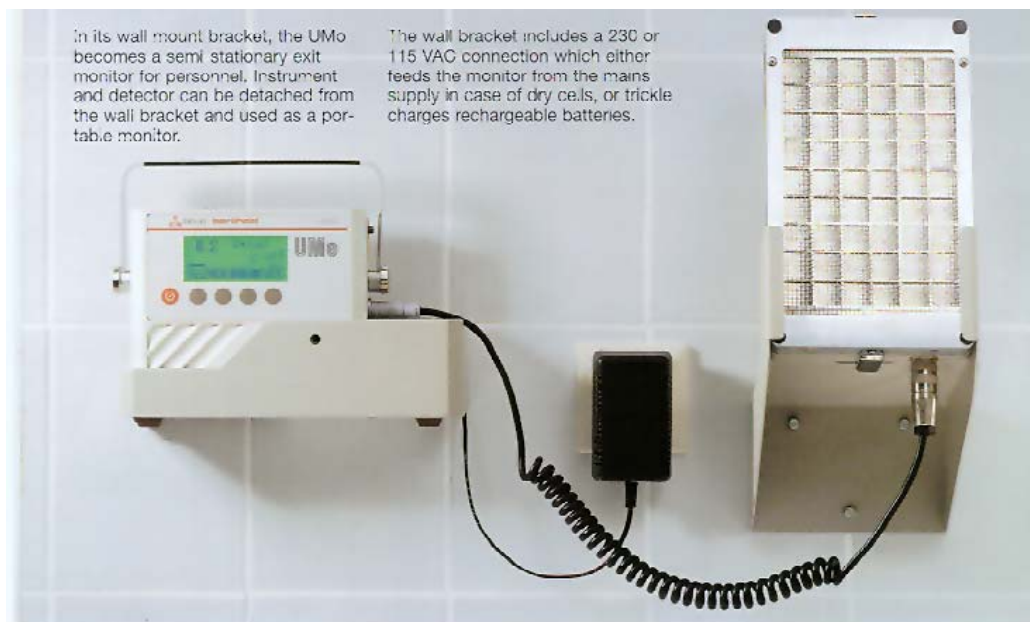
此警報器適於度量X及加馬射線，大小如香煙盒，可隨身攜帶，若超過設定之累積劑量或劑量率時，能發出示警聲，並有數字顯示劑量率及累積劑量。偵檢器為蓋格管或半導體，大都以度量深部等效劑量為主。應經常保養檢查及定期校正，並於每次使用前確定其功能正常。





人身表面快速污染偵檢儀

- 比例式大面積偵檢器 (220 cm²)，反應快速
- 可量測附著性輻射污染及固著性污染
- 可顯示污染總量 (cps) 及核種比活度 (Bq/cm²)
- 可設定污染警報值及記憶存取列印
- 固定式(手、衣)偵檢
手提式偵檢
地板大區域除污後之偵檢





劑量筆

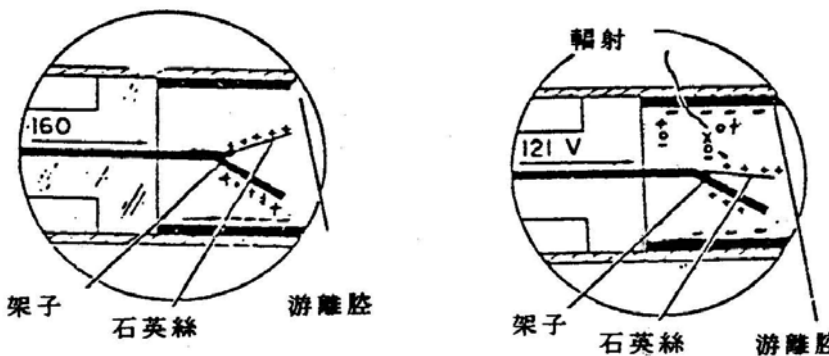
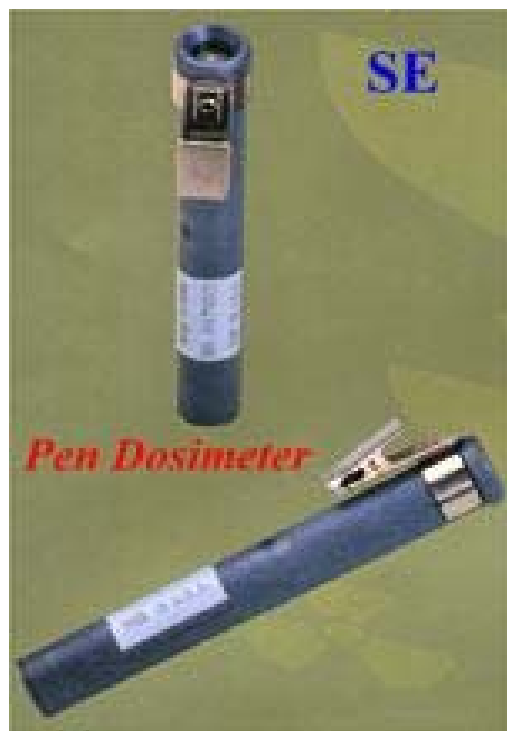
劑量筆適用於度量X及加馬射線，外形似鋼筆的小型游離腔，如左下圖所示。陽極末端為二條鍍金石英絲，使用前先充電使石英絲帶正電而張開形成刻度表上零的位置，稱為「歸零」。如遇輻射線穿過游離腔，則腔壁及空氣被游離產生離子對，中和了陽極上的正電荷，而使石英絲閉合，如圖5.4。內部刻度的變化直接正比於所受總劑量，所圖5.5所示。

常用的袖珍劑量筆適用於度量30 keV以上之光子，可設計成不同的劑量偵測範圍(滿刻度)，最常用的有1 mSv和2 mSv兩種。

劑量筆僅適於作輔助性劑量計，適用於強輻射區工作人員進出的即時劑量管制，或訪客、短期或特殊工作人員進入管制區佩用，「正規(法定)人員劑量監測仍以熱發光劑量計為主」。劑量筆受撞擊或受潮都易造成電荷之滲漏而產生計測誤差，故須存放於乾燥皿內以免受潮，使用時應避免激烈的振動。



劑量筆作用原理



充電：使石英絲帶電而充分張開
 游離電荷中和石英絲的正電荷而使石英絲閉合

圖5.4 劑量筆內石英絲張開與閉合

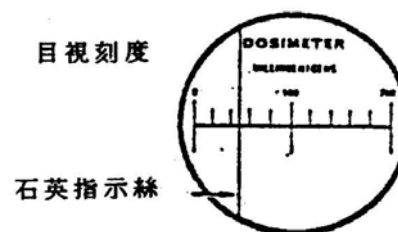


圖5.5 劑量筆刻度表

劑量筆及二款充電器





熱發光劑量計(TLD)(法定劑量計)

熱發光劑量(thermoluminescent dosimeter, TLD)是一種固態晶體，受輻射照射時晶體內「共價帶」之電子被激發至「傳導帶」，部份之電子在激發時被陷阱捕獲而以「介穩態」暫存於晶體內。適當加熱後，將暫存於介穩態之電子提升到傳導帶，然後與電洞復合放出可見光，其總放光量與所接受之輻射劑量成正比，利用光電倍增管度量放光量，即能評估輻射劑量。下圖左為熱發光能階機轉圖。放光量與加熱溫度之關係稱為劑量計之輝光曲線(glow curve)，可據以設定計讀儀之加熱條件，不同的TLD劑量計材料有不同的輝光曲線，圖5.8為常用的LiF熱發光劑量計之輝光曲線。



熱發光劑量計之輝光曲線

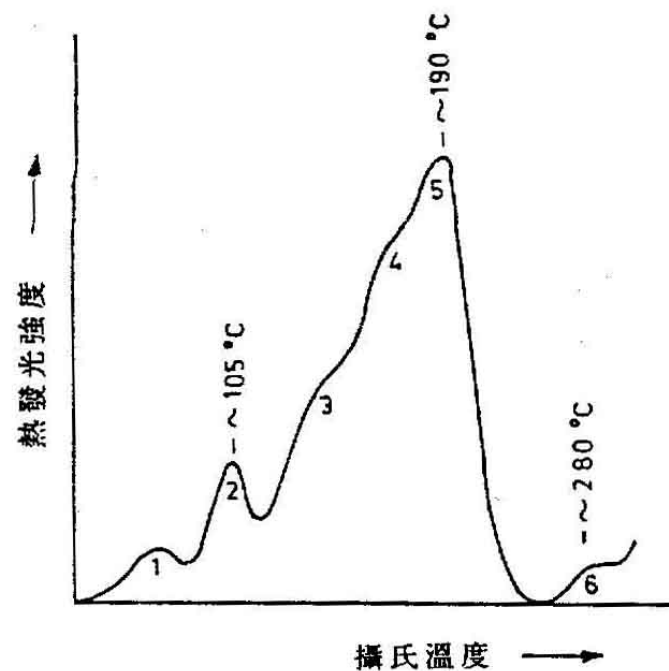
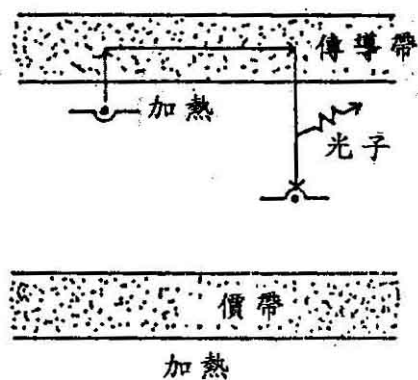
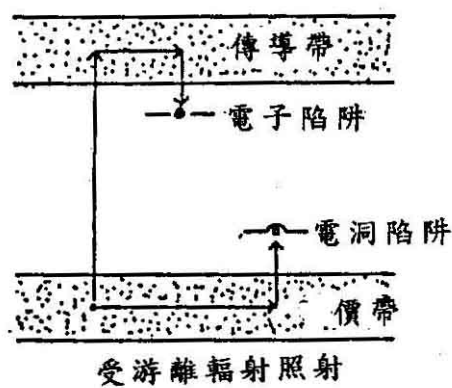


圖5.8 TLD-LIF (TLD-100) 之輝光曲線



熱發光劑量計

熱發光劑量計之靈敏度比膠片高，偵測範圍廣(約為數十微西弗至 10^4 西弗)、誤差小、體積小、可塑性高、操作方便、測讀時不易受人為因素影響、可迴火後重覆使用等優點，又有多種材料和形狀可供選擇，用途極廣。目前人員劑量計都以TLD為主流。其缺點是測讀後熱光訊號即消失，須將輝光曲線作為紀錄保存。熱發光劑量計對各種游離輻射都有反應，如欲鑑別輻射種類及能量，須加上適當的濾器，藉不同之輻射及能量對不同材料的濾器有不同的穿透能力加以區分。

提供劑量計測讀的機構必須先通過實驗室認證(ISO-Guide-25)及原能會核可。



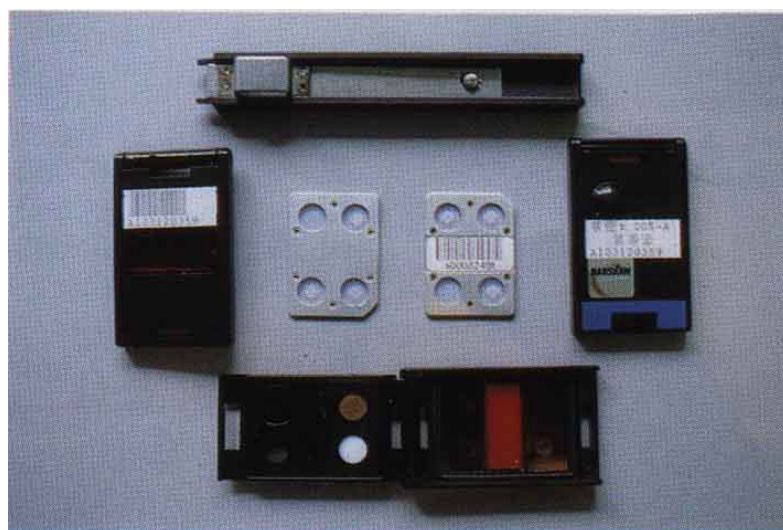
人員劑量佩章種類

1. 光子/貝他劑量佩章：

(1) 偵檢器：3片片狀TLD-⁷LiF:Mg,Ti

1片片狀TLD-⁶LiF:Mg,Ti

(2) TLD與佩章規格如下圖：



劑量配章

用於累計場所環境輻射劑量，或由輻射工作人員隨身佩帶，以便得知固定期間內所累積之輻射劑量。



人員劑量佩章種類

2. 指環劑量計：

- (1) 偵檢器：粉狀 $\text{TLD-CaSO}_4 : \text{Dy}$
- (2) 偵測輻射種類：手部之加馬射線、X-射線
- (3) 可偵測之劑量範圍：約0.03毫西弗-10西弗

五、使用人員劑量計應注意事項



1. 工作時將佩章戴於胸前，如果穿著防護衣，應佩戴於防護衣內。
2. 不得轉借或與他人交換使用
3. 不得任意打開或故意曝露輻射。用後置於定位。
4. 置背景佩章及佩章架於不受輻射影響之處。
5. 接受輻射診斷或治療時，不得戴佩章。



6. 工作人員所接受之劑量應定期評定，並經場所主管審查後公告。
7. 場所主管應查明新進人員之劑量紀錄，並於工作人員離職時提供證明。
8. 經原能會核可之機構，始得從事人員劑量評定工作。工作人員之劑量紀錄，自其停止參與輻射工作之日起，至少應保存三十年。