

游離輻射

張欽然 博士

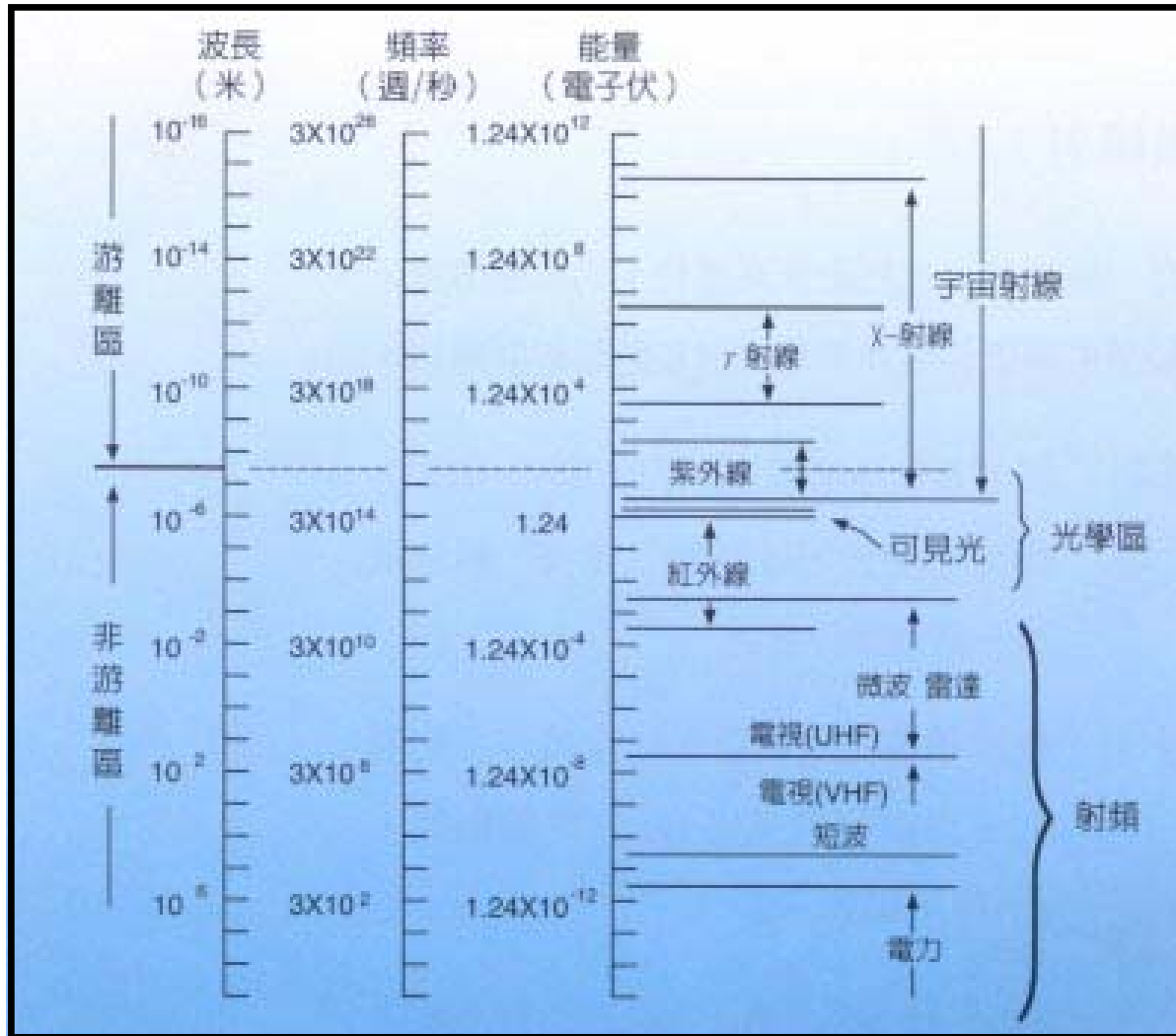
原子能委員會核能研究所

大綱

1. 認識游離輻射
2. 輻射的應用
3. 生活中的游離輻射
4. 輻射劑量與健康效應
5. 輻射劑量的量測與法規限值
6. 輻射防護的原則與輻射屏蔽
7. 結語

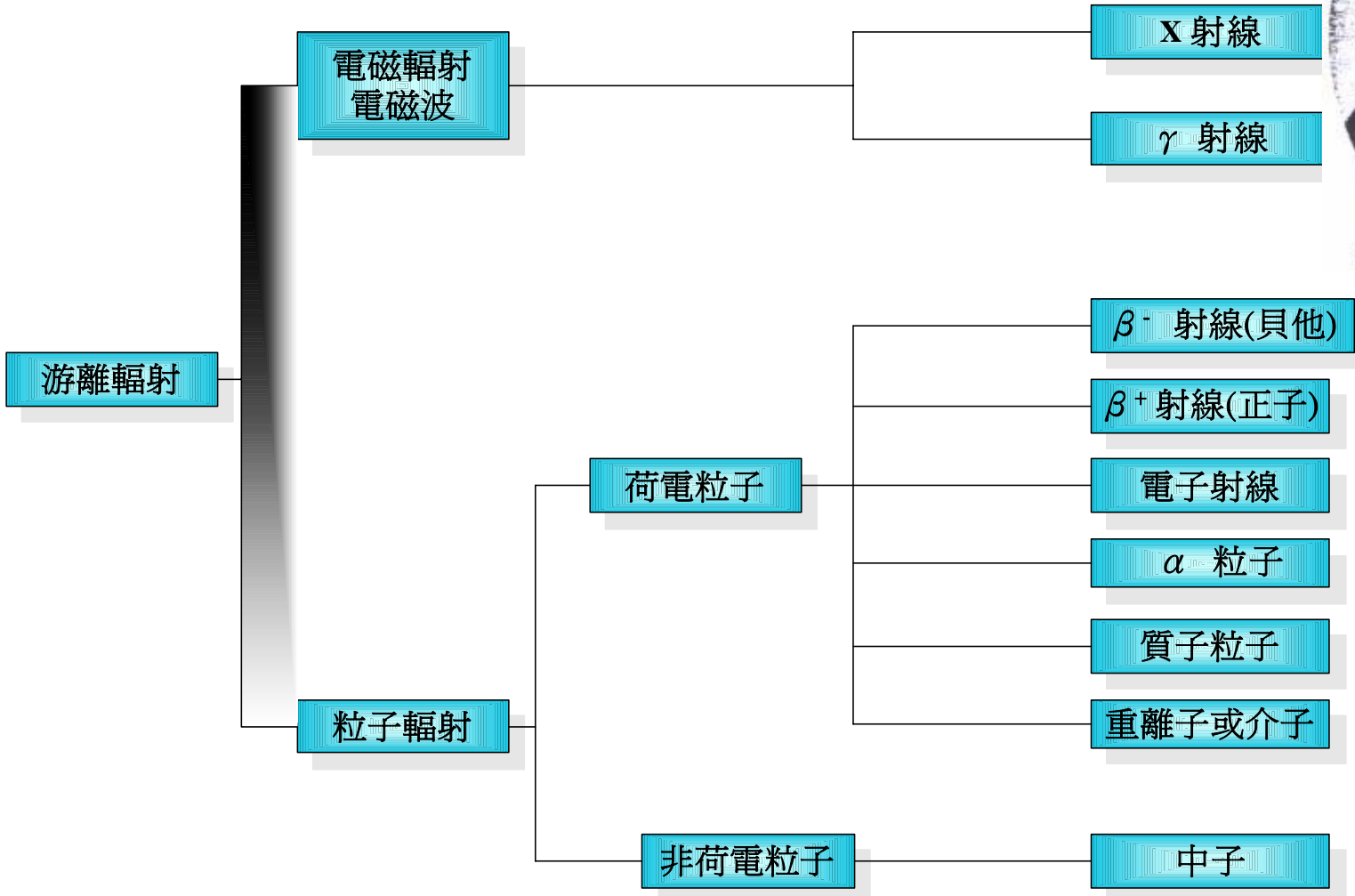
1. 認識游離輻射

1.1 游離輻射與非游離輻射之分野



電磁輻射能譜圖

1.2 游離輻射的分類



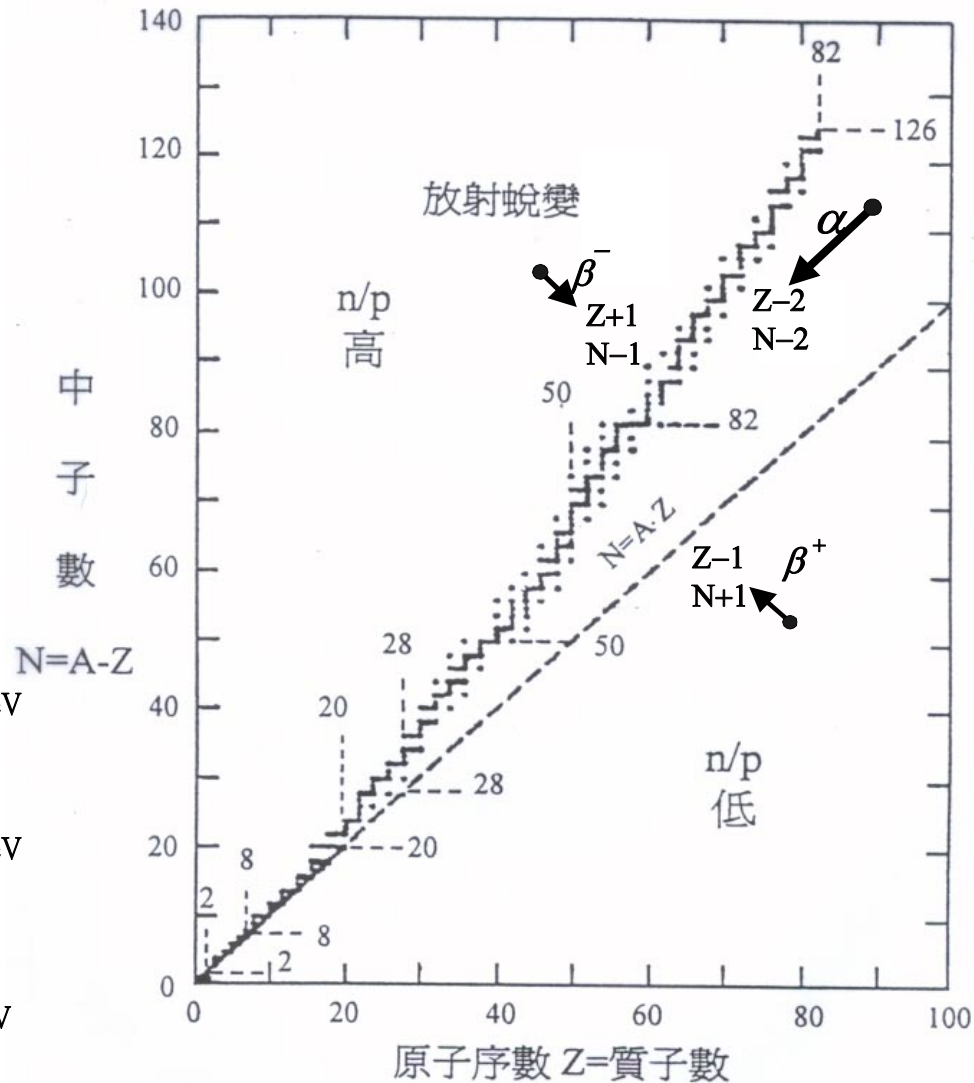
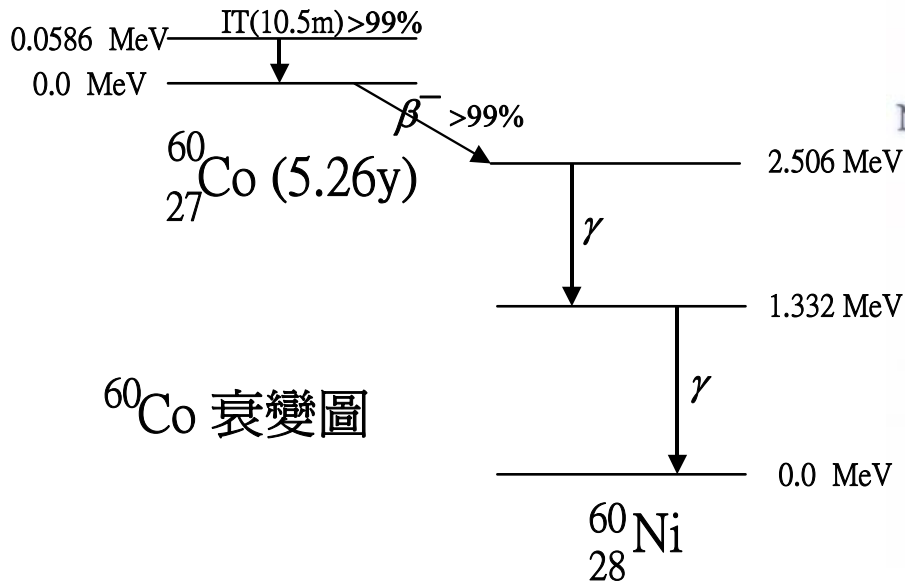
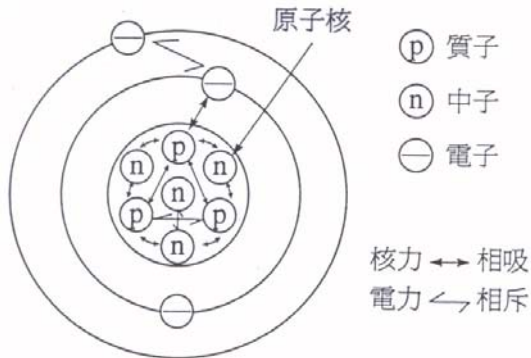
倫琴(Roentgen, 1845-1923)



倫琴夫人手部X光照片 (攝於1895年12月22日)

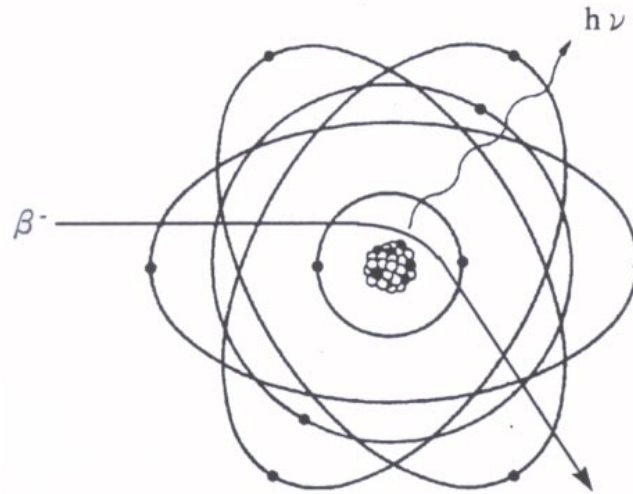
1.3 游離輻射的產生

►核種衰變(Nuclear Decay)



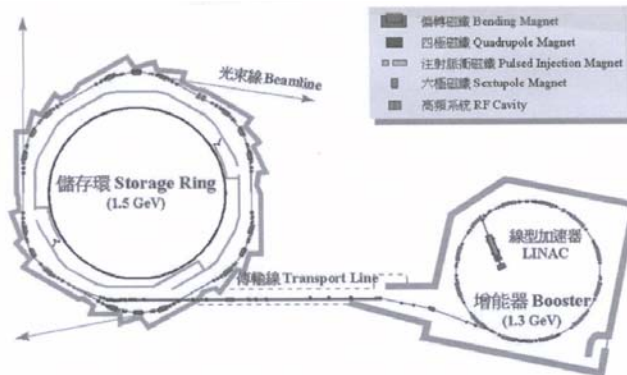
▶電磁力作用(Electromagnetic Reaction)

➤X-射線： 制動輻射

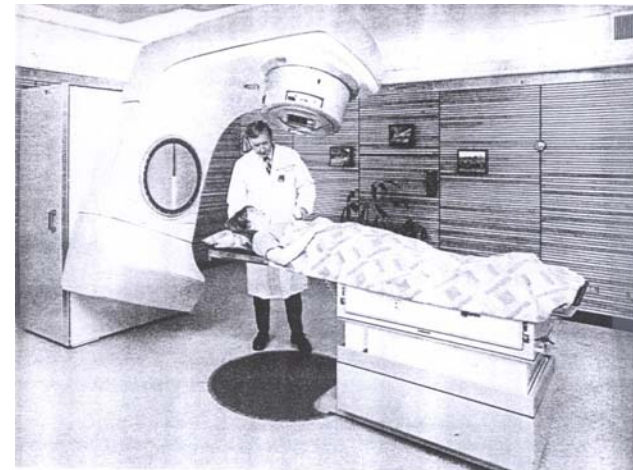


➤粒子加速器

同步輻射



線性加速器



►核反應(Nuclear Reaction)

包括：核分裂、核融合、(n,p)、
(n,α)、(n,γ)、(α,n)、(γ,n)...

►核分裂：



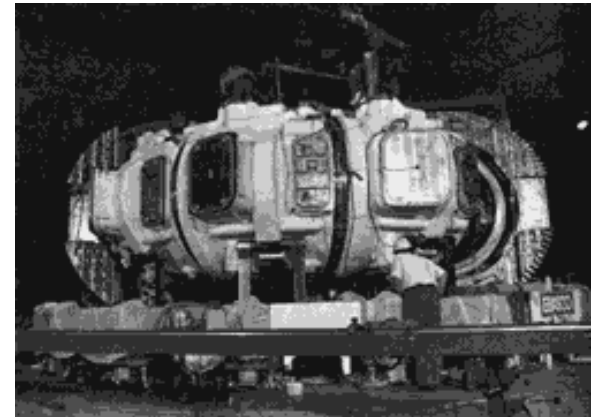
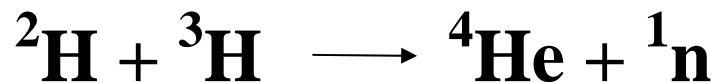
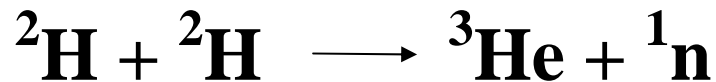
中子

放射性分裂核種： ${}^{85}\text{Kr}$ 、 ${}^{90}\text{Y}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 、 ${}^{137}\text{Cs}$ 、.....

台灣核三廠圖



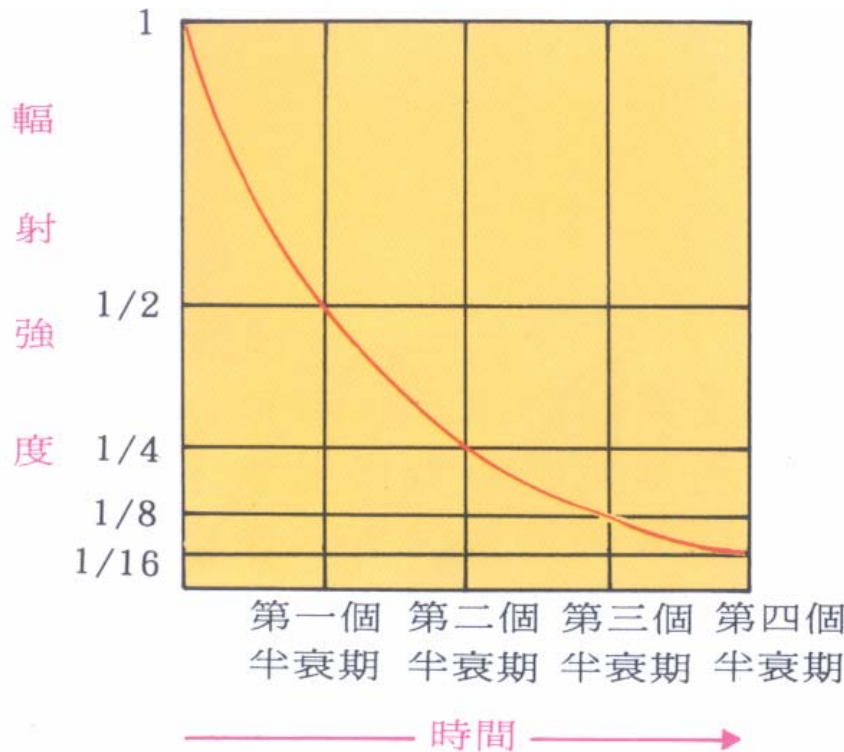
►核融合：



美國普林斯頓大學的Tokamak
核融合測試反應器

1.4 游離輻射的特性 - 衰變 與 衰減

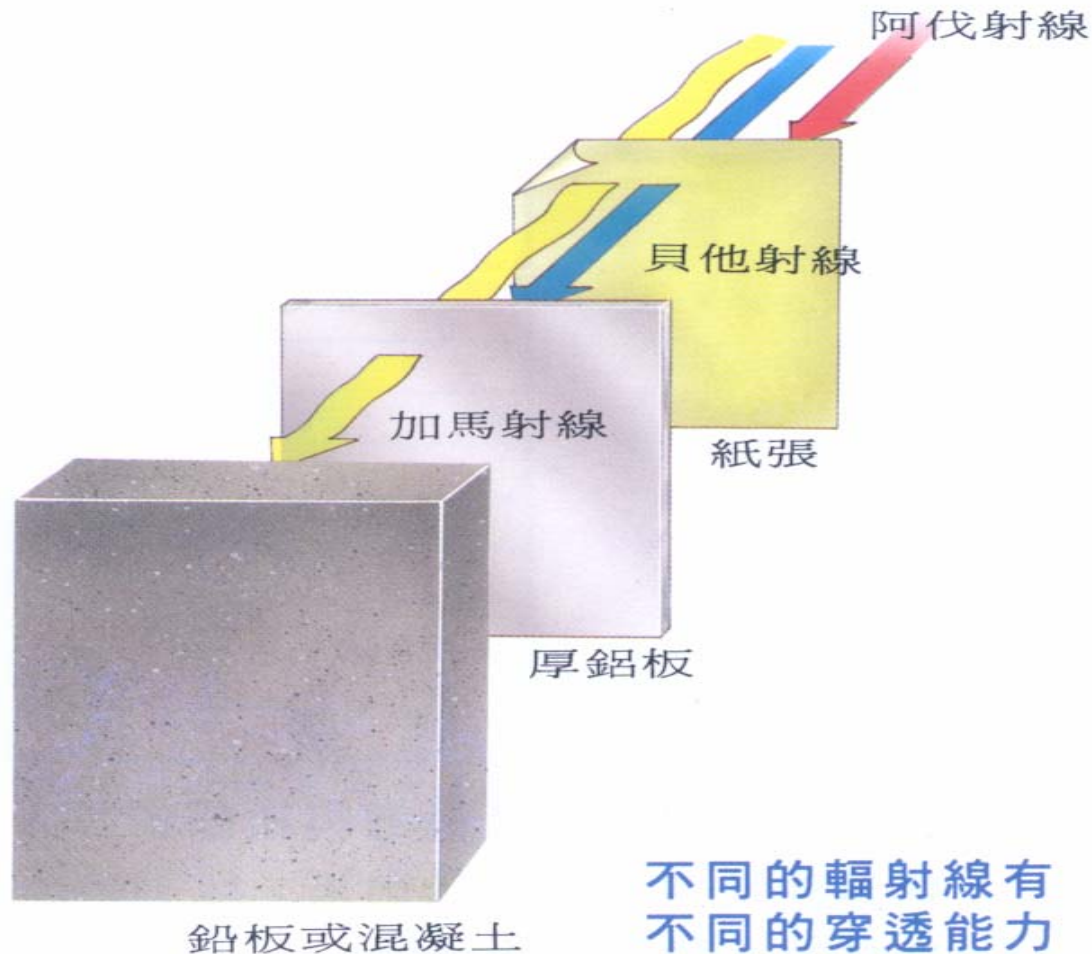
►衰變(Decay) - 放射性的物質皆有隨時間而逐漸減少的現象 (指數衰減定律)



常用射源	半衰期
^{60}Co	5.3 年
^{137}Cs	30.0 年
^{90}Sr	28.1 年
^{192}Ir	73.8 天

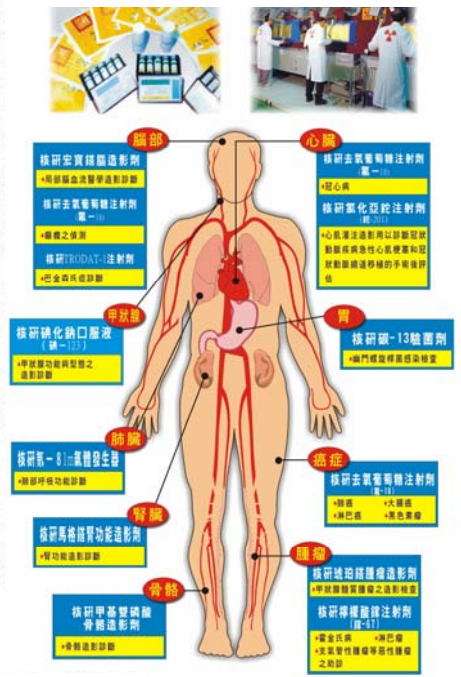
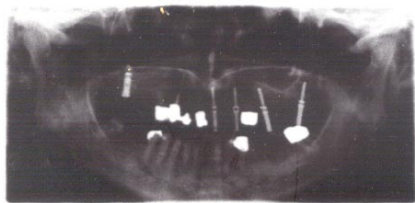
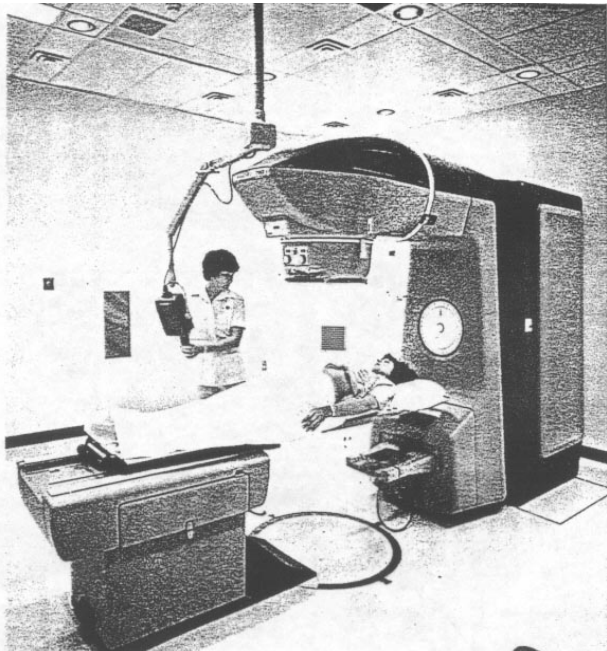
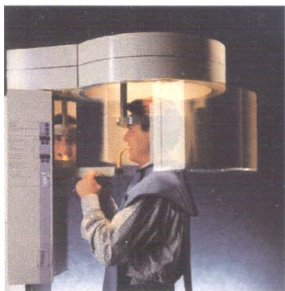
放射性核種的輻射強度
會隨時間之增加而衰減

►衰減(Attenuation) – 游離輻射都可以經由選定之屏蔽物質達到衰減其強度或完全阻擋其穿透之目的



2. 輻射的應用

2.1 醫療應用- 醫用X光、放射性治療、核醫藥物.....



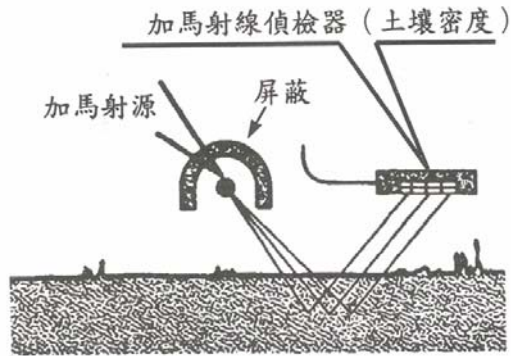
2.2 輻射照射應用



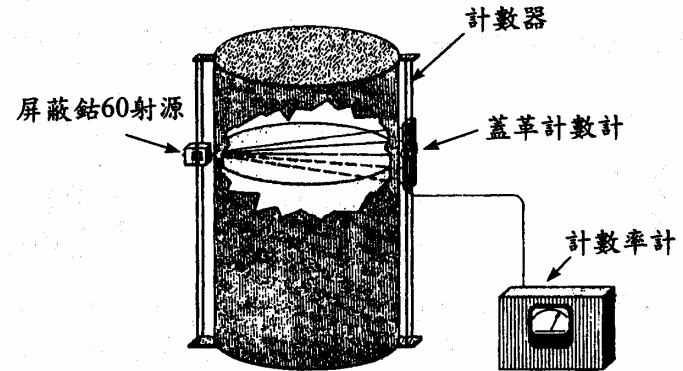
Irradiation technology for applications in medical, agricultural, and industrial products



2.3 各種工業上之輻射應用.....



3b



3a

密度計

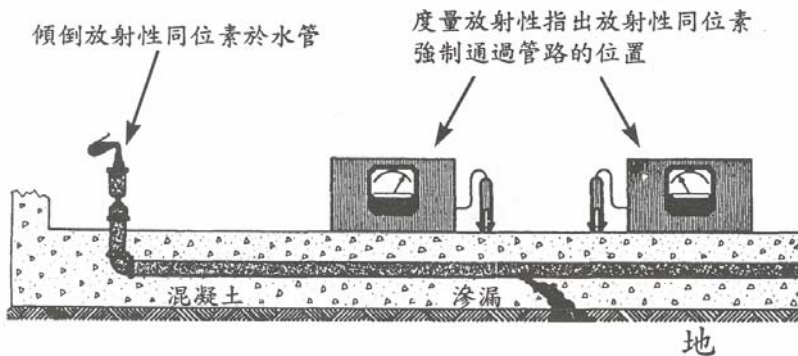
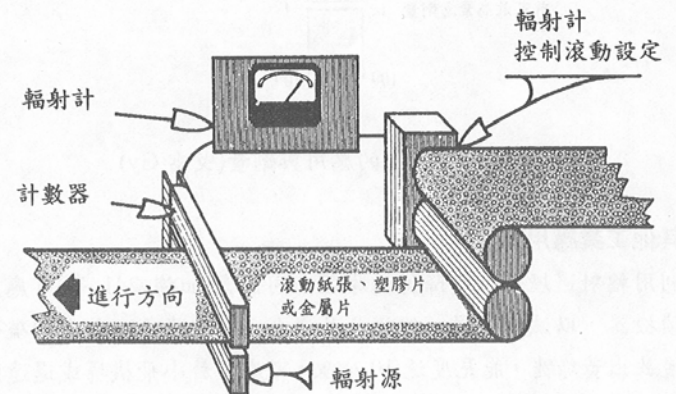


圖4 測漏計

測漏計

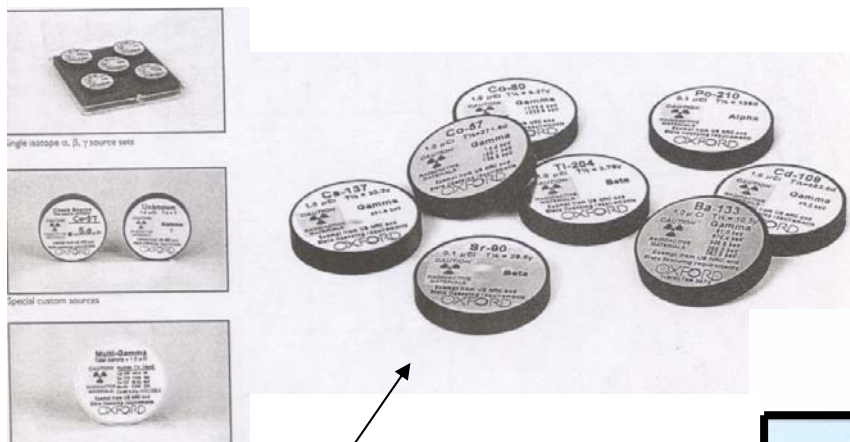
液位計



5b

厚度計

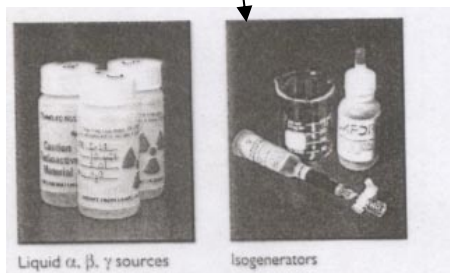
實驗室及工業上常用的輻射源及其半衰期



工業上常用的輻射源

用途	放射核種	半衰期
輻射照射處理 (消毒、滅菌)	^{60}Co	5.3y
	^{137}Cs	30.0y
輻射計測儀(厚度計、液位計、密度計等)	^{60}Co	5.3y
	^{90}Sr	28.1y
	^{137}Cs	30.0y
非破壞檢驗	^{60}Co	5.3y
	^{192}Ir	73.8d

實驗室常用的標準射源

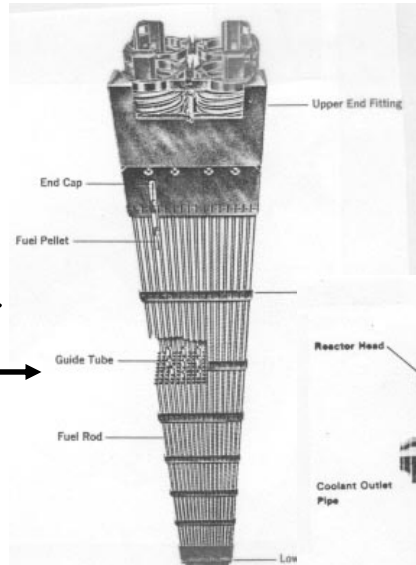


註：y 為年，d 為日

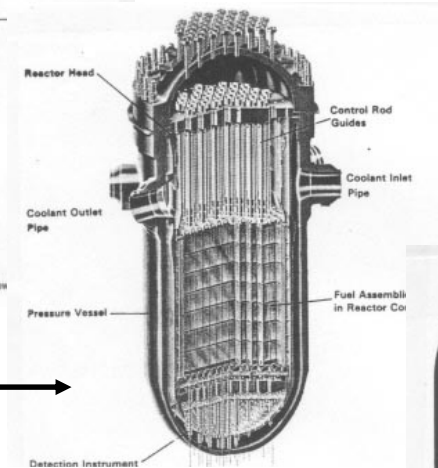
2.4 核能發電



UO₂燃料丸

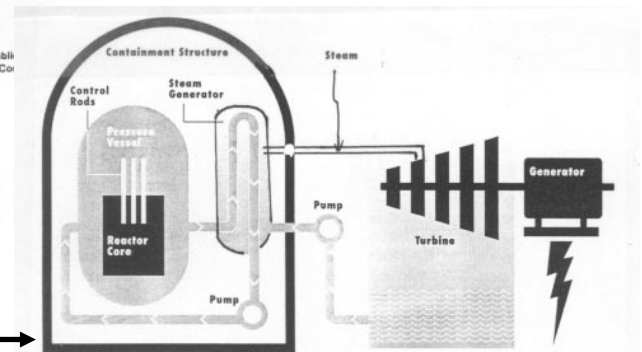


燃料束



核反應爐

每一個²³⁵U分裂反應的中子淨產生率為約1.4個中子，若不加以控制將成(1.4)ⁿ級數成長，控制中子淨產生率是核能發電中重要的控制原理。



核能電廠

2.5 民生消費性產品

手錶和時鐘
的光源
(早期 ^{226}Ra ，
近期 ^3H ， ^{147}Pm)

陶瓷器皿
(天然的 U、
Th、K)

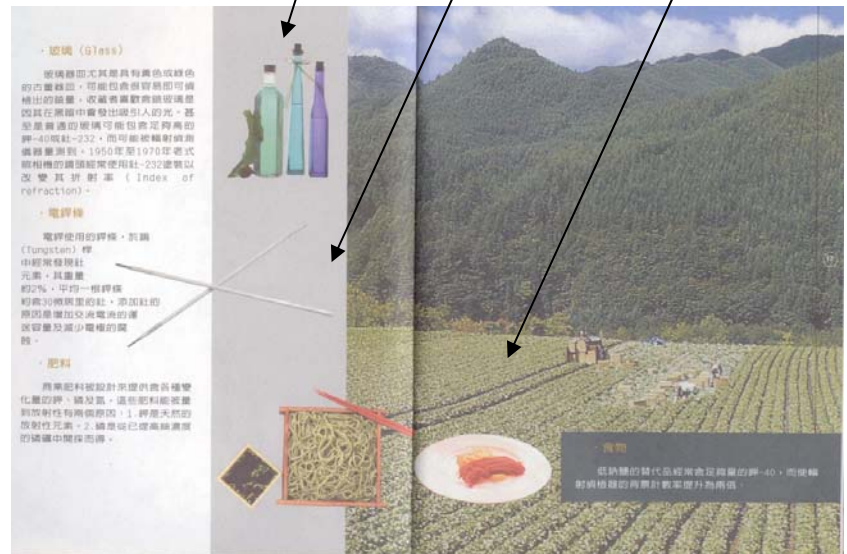


煙霧偵檢器
(^{241}Am)

黃綠古董玻璃
(天然的U、Th、K)

電焊條
(鎢桿中的 Th)

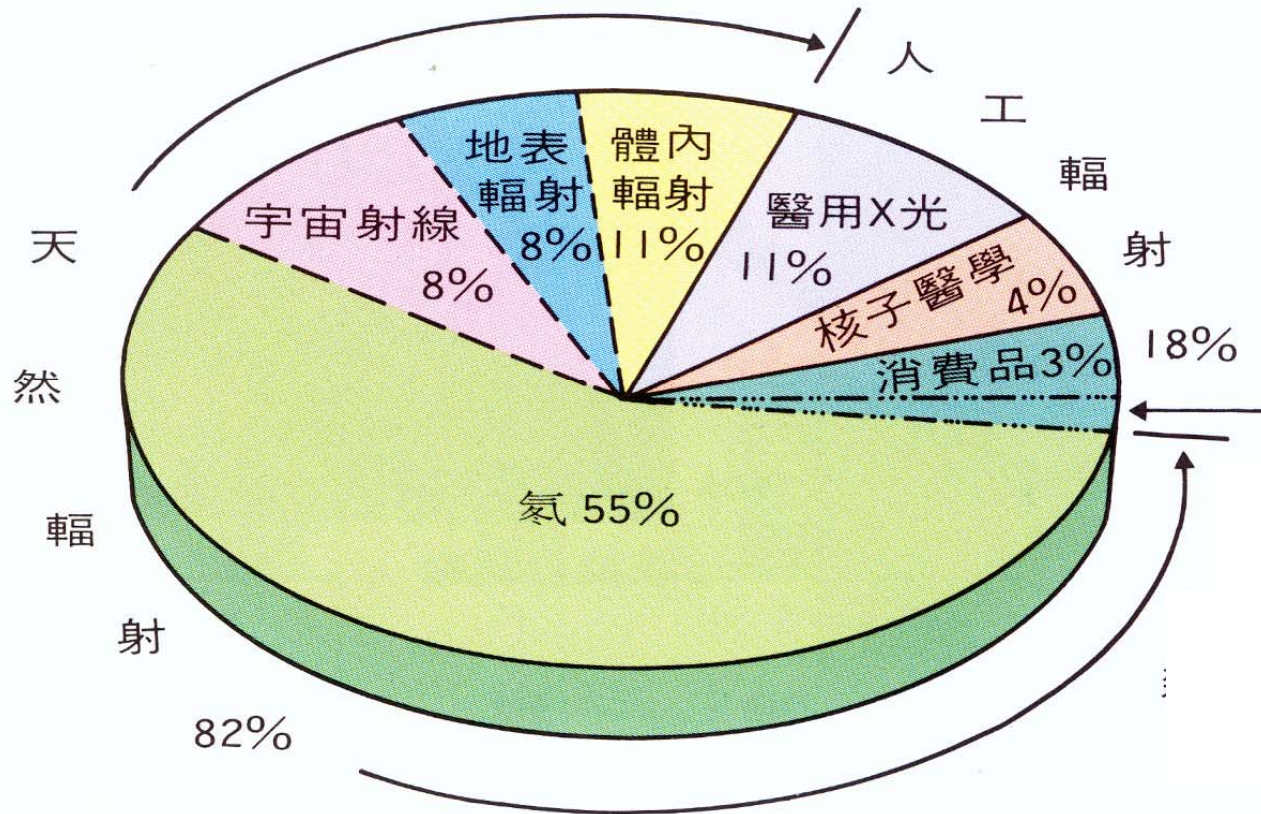
肥料
(K, P, U)



3. 生活中的游離輻射

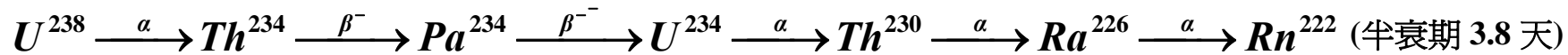
3.1 生活中的輻射來源

一般民眾接受天然與人造輻射來源分佈圖



3.2 天然輻射

A. 氡氣- 天然放射性氣體(α 放射性核種) ,
為鈾和釷的子核種。



- ▶ 地表土壤及岩石中都含有少量的鈾和釷，
建材亦多為土壤和岩石之製品，氡氣因此
長存於居住環境中，為天然輻射之最大來源。
- ▶ 密閉坑道、通風不良之居處環境，易造成氡
氣濃度之累積。富含鈾或釷礦床之地區，氡
氣濃度也較高。

B. 體內的天然輻射-主要為鉀-40(K^{40})

▶ 人體體重約含0.2%的鉀，其中0.012%的鉀-40(半衰期 1.27×10^9 年)為 β 放射性核種。

▶ 人類的食物來源中，魚、蔬果、牛奶、肉類和五穀也或多或少含有鉀-40。



C. 宇宙射線

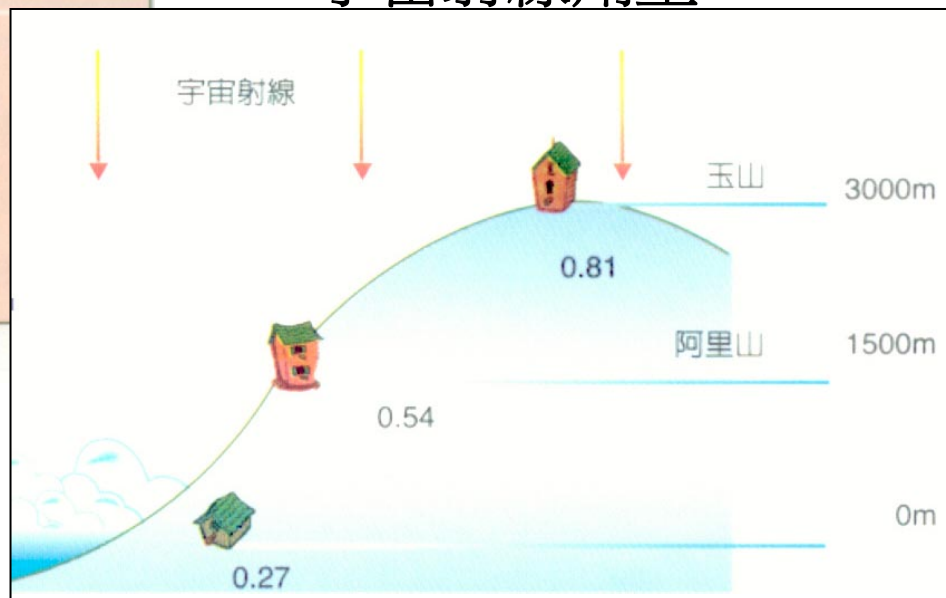
高空飛行可能接受之宇宙射線劑量



航線 (往返)	接受劑量 (微西弗)
台北 = 紐約	156
台北 = 阿姆斯特丹	99
台北 = 洛杉磯	93
台北 = 約翰尼斯堡	72
台北 = 雪梨	48
台北 = 新加坡	15
台北 = 金門	0.67
台北 = 高雄	0.48
台北 = 台南	0.23
台北 = 蘭嶼	0.13
高雄 = 馬公	0.07

註：1000 微西弗 = 1 毫西弗

平地與高山可能接受之宇宙射線劑量

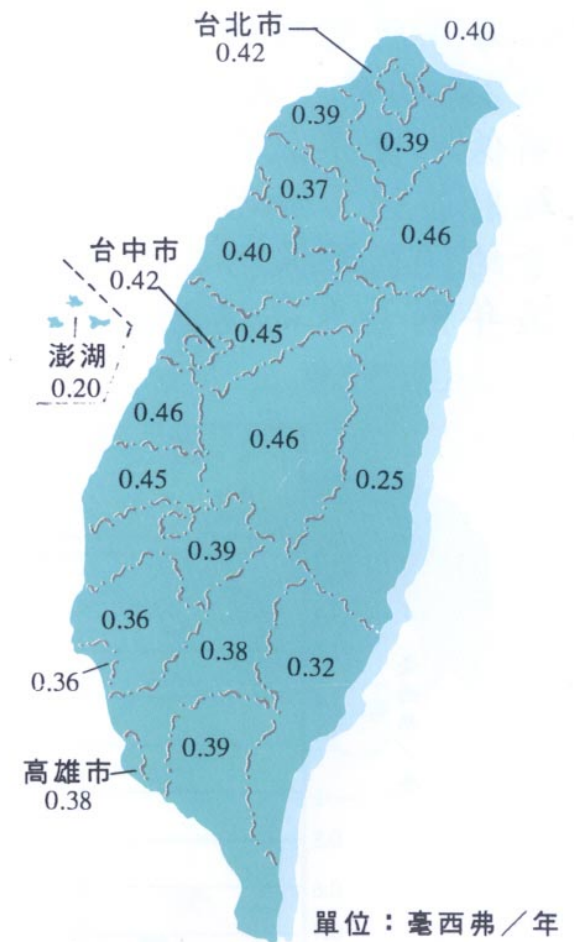


D. 地表輻射

- ▶ 地表的土壤及岩石含有天然放射性核種- 鈾、鈾、鉀-40、及鈾、鈾之衰變核種。
- ▶ 不同地區可能因地質型態之不同，而具有度不同的地表輻射背景劑量。

台灣地區建材之放射性含量

建材種類	放射性核種活性(3.7×10^{-2} Bq/g)		
	鉀-40	鈾-238系列	鈾-232系列
紅磚	14.89	0.80	1.21
鑽磚	18.16	1.12	1.62
磁磚	29.76	1.93	2.47
空心磚	13.51	0.35	0.78
磁磚	10.78	0.48	0.85
石棉瓦片	12.11	1.45	1.51
白砂	0.71	0.11	0.10
黑砂石	3.90	0.11	0.29
黏土	1.97	0.17	0.21
混凝土	5.58	1.06	0.46
水泥(A)	10.00	1.73	0.78
水泥(B)	6.01	1.87	0.65



台灣地區地表輻射年劑量

▶ 世界各國及其各區域可能因地域或生活習慣不同而有不同的背景劑量水平

類 別	世界平均	美 國	日 本	臺 灣
宇宙射線	0.36	0.28	0.38	0.27
地表及建物	0.41	0.28	0.29	0.55
小計(體外輻射)	0.77	0.56	0.67	0.82
氫 等	1.26	2.00	0.56	0.83
鉀40等	0.36	0.39	0.47	0.33
小計(體內輻射)	1.62	2.39	1.03	1.16
合 計	2.40	3.00	1.70	2.00

UNSCEAR：聯合國原子輻射效應科學委員會(1993) 年劑量(毫西弗)

地區或國家名稱	年劑量(毫西弗)	2毫西弗的倍數	說 明
伊朗 Ramsar市	6~360	3~180	此等地區民眾癌症發生率與一般地區無明顯差異
印度 Kerala區十個村莊	平均 13	6.5	
巴西 Espirito Santo	0.9~35	17.5	
大陸 福建鬼頭山區	平均 3.8 最高 120	1.9 60	

3.3 人造輻射

A. 醫療輻射

醫用X光、放射性治療、核醫藥物.....

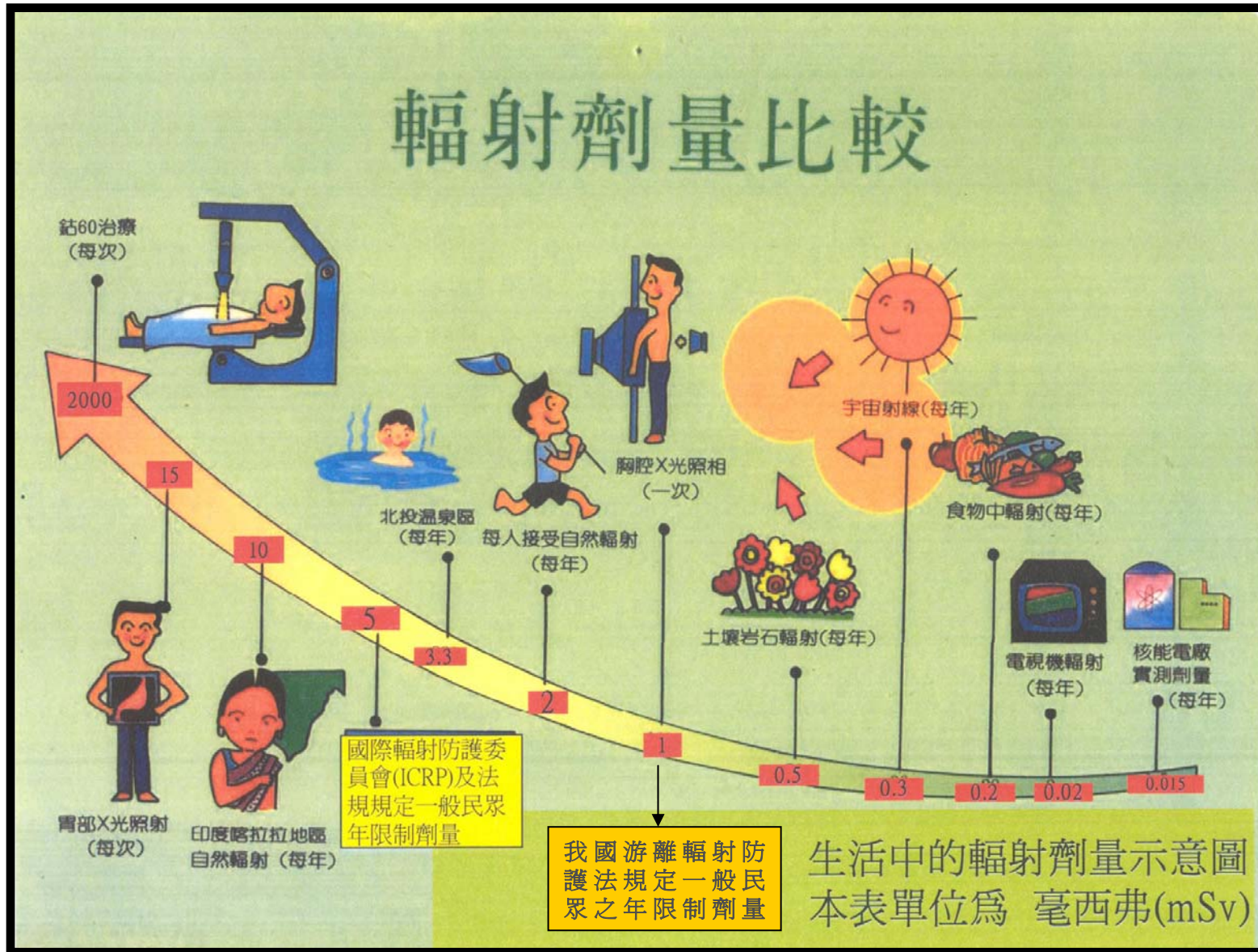
B. 工業輻射

核能發電、非破壞性檢驗、厚度計、
密度計、液位計...

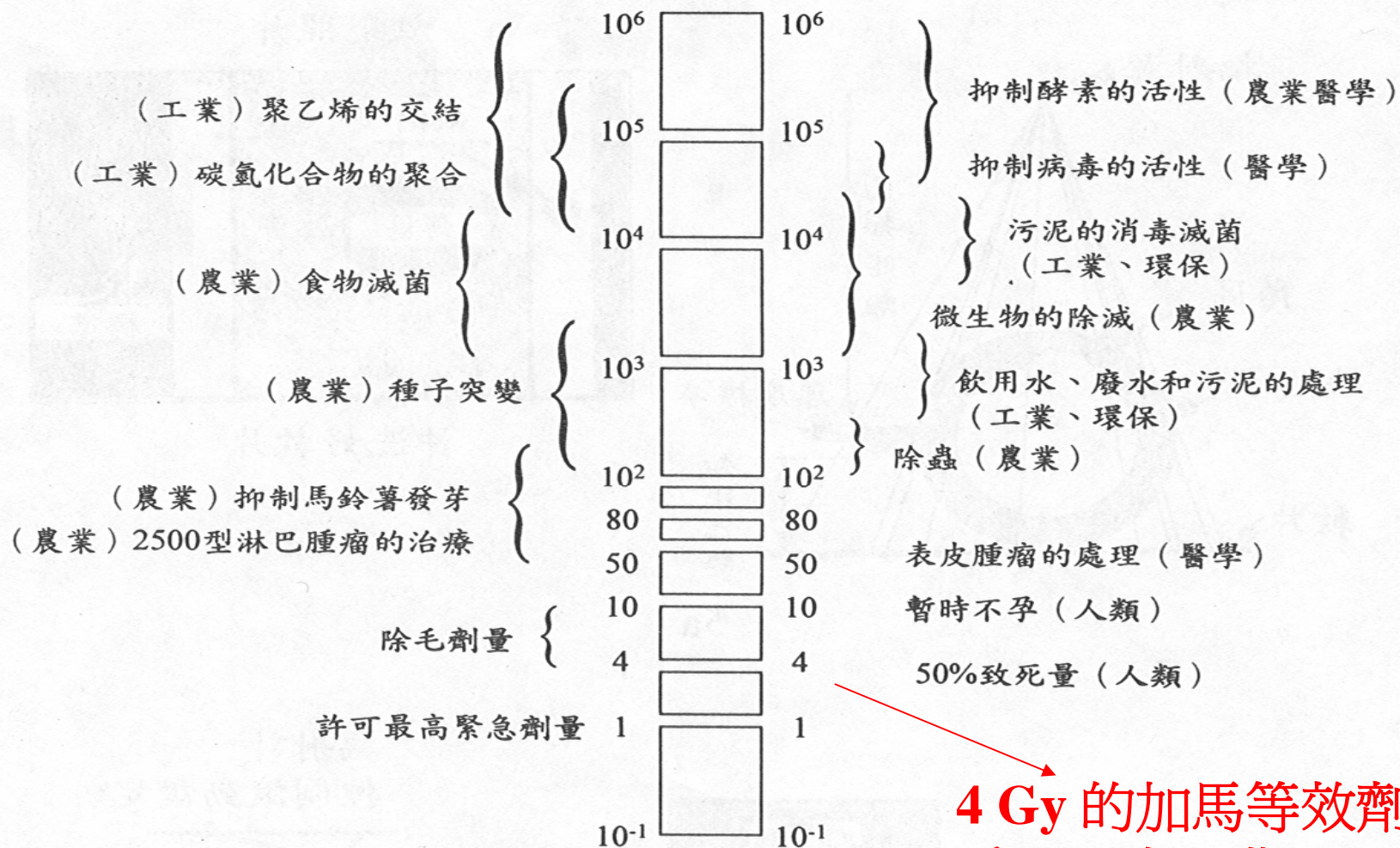
C. 民生用品輻射

夜光表、煙霧偵檢器、肥料...

3.4 生活中輻射劑量的比較



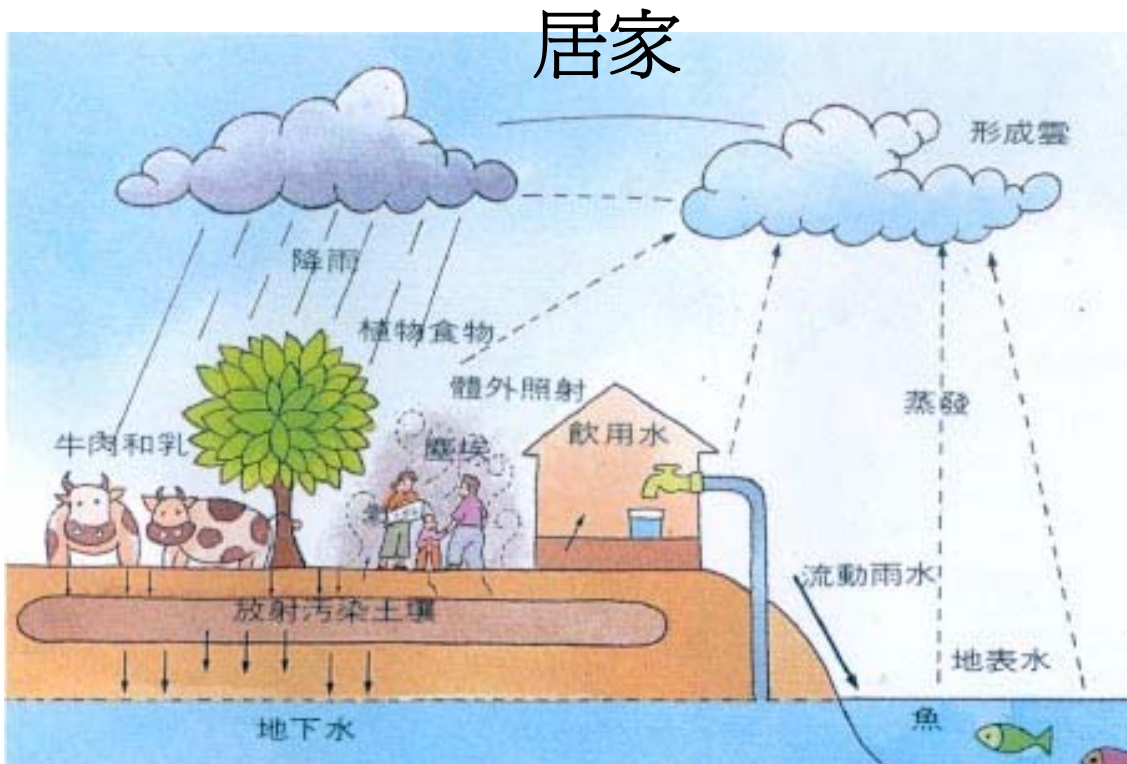
工業上各種輻射照射應用輻射劑量比較表



**4 Gy 的加馬等效劑量
為4000毫西弗(mSv)**

輻射照射的應用與劑量(戈雷 Gy)

3.5 生活環境與輻射曝露間的關係



醫療



消費



工作場所/實驗室

4. 輻射劑量與健康效應

4.1 輻射劑量的定義

吸收劑量 D_T : Absorbed Dose (joul / kg)

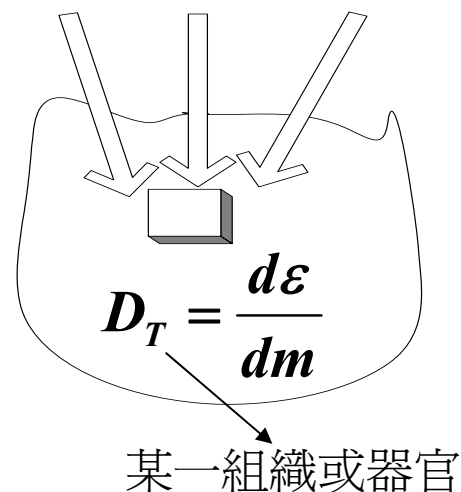
1 Gy (戈雷) = 1 joul /kg (焦耳/公斤)

等價劑量 H_T : Equivalent Dose (joul / kg)

$$H_T = \sum_R D_{T,R} \cdot W_R$$

1 Sv (西弗) = 1 Gy x W_R (W_R 輻射加權射質因數)

- $W_R = 1$ for X、 γ 、 β
- $= 5$ for high energy protons (質子)
- $= 20$ for α particles and multiple charged particles, fission fragments
- $= 5 \sim 20$ for neutrons with different energy (中子)



等效劑量 E(單位：西弗)：Effective Dose (joul / kg)

$$E = \sum_T H_T \cdot W_T$$

人體不同器官所接受到的等效劑量

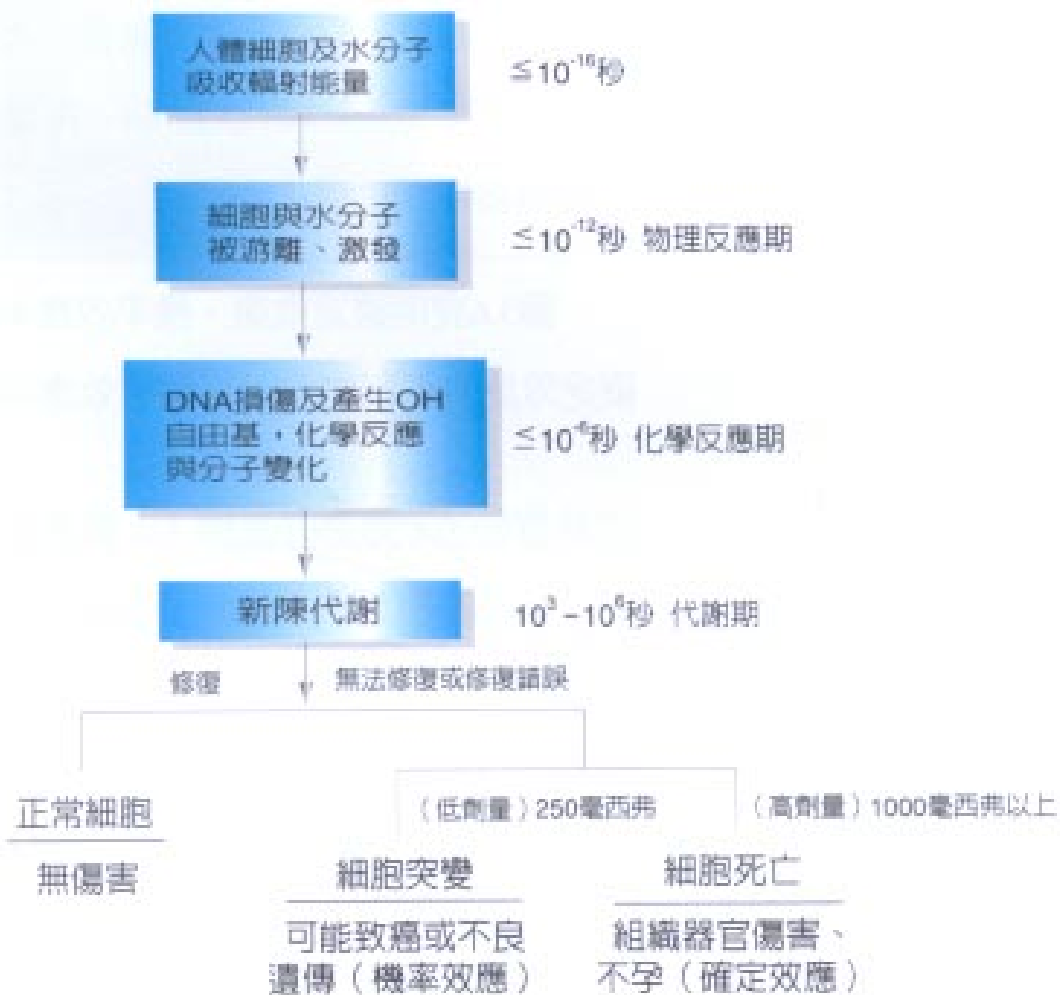
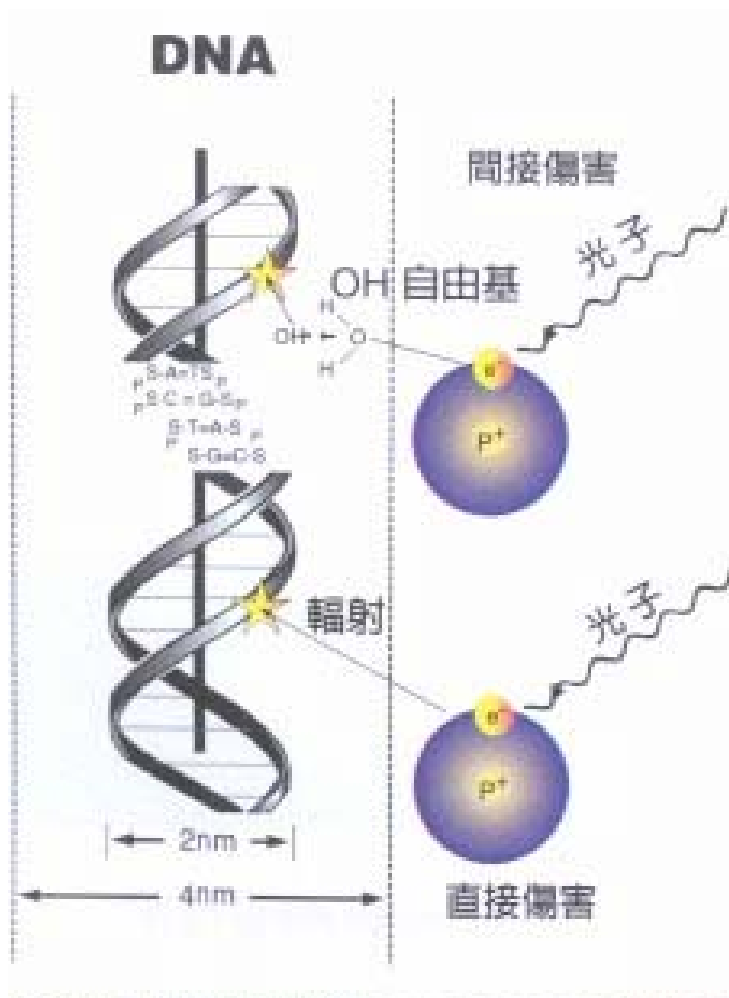
不同器官之組織加權因素

因人體不同器官遭受到不同輻射劑量所造成的整體人體輻射效應

器官或組織	W _T	
	ICRP-26	ICRP-60
性腺(生殖腺)	0.25	0.20
紅骨髓	0.12	0.12
結腸(大腸直腸)		0.12
肺	0.12	0.12
胃		0.12
膀胱		0.05
乳腺	0.15	0.05
肝臟		0.05
食道		0.05
甲狀腺	0.03	0.05
皮膚		0.01
骨髓表面	0.03	0.01
其餘部分	0.30	0.05

資料來源：ICRP-26(1977)及ICRP-60(1991)
我國目前之法規W_T係沿用ICRP-26

4.2 輻射對身體細胞傷害的機制



4.3 輻射之健康效應

▶遺傳效應：輻射可能導致染色體結構變異或基因突變，染色體分裂時如受嚴重照射將改變其特性。基因突變可能導致智能或身材的差異，如侏儒、智能減退、早產、多病或白痴等。

▶軀體效應

(1)急性全身效應如下表所列：

一次劑量(毫西弗)	一般症狀說明
小於 10	無可察覺症狀，但遲延輻射病的產生仍可能發生。
100~250	能引起血液中淋巴球的染色體變異。
250~1000	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，但不致產生機能之影響。
1000~2000	有疲倦、噁心、嘔吐現象，血液中淋巴及白血球減少後恢復緩慢。
2000~4000	24小時內會噁心、嘔吐，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。
4000~6000	與前者相似，僅症狀顯示的較快，在2~6週內死亡率為50%。
6000以上	若無適當醫護，死亡率為100%。

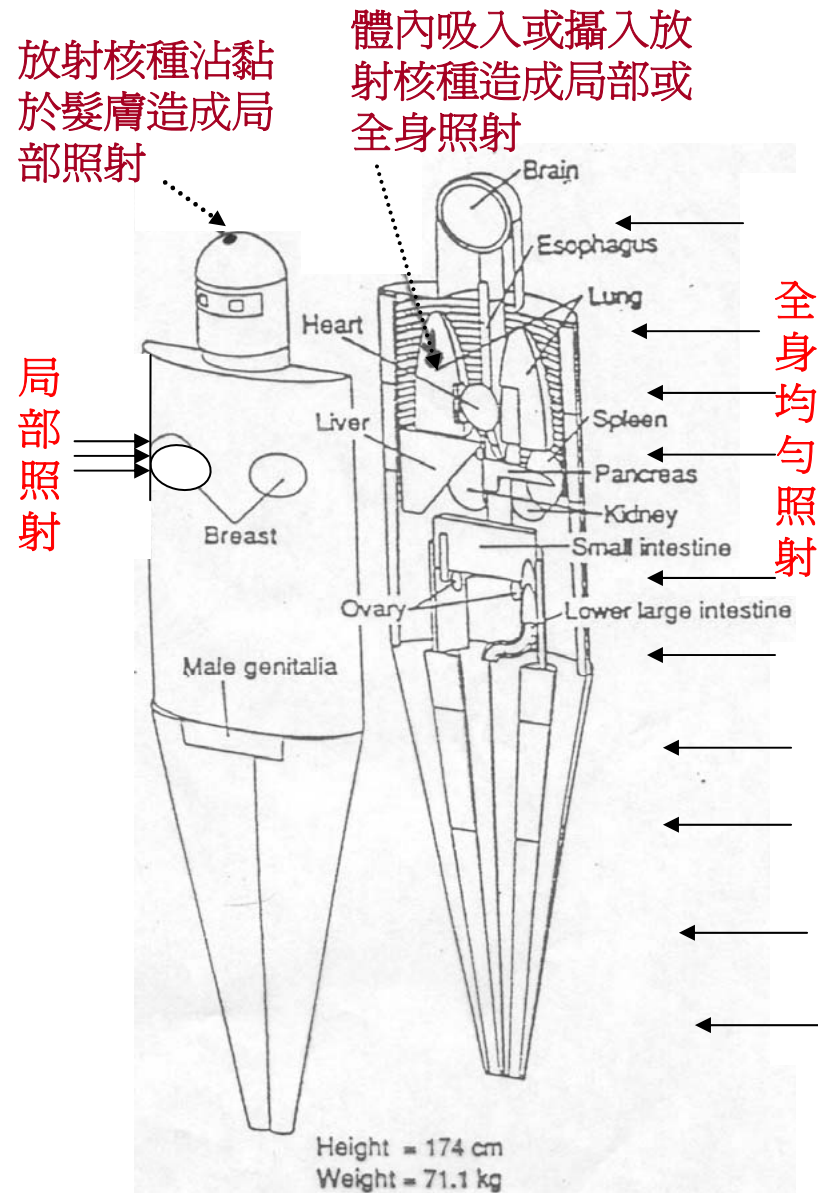
(2)局部或遲延效應

皮膚	紅斑、脫毛、嚴重者會紅腫、起泡、潰瘍，有如一般燒傷。
眼睛	水晶體受 5 西弗以上之輻射劑量破壞後透明性喪失，出現雲絲狀物(俗稱翳)，是為白內障，嚴重者可能失明。
造血機	紅骨髓為造血器官，對輻射極為敏感，受破壞後將減弱血液之殺菌，運輸及凝血功能，且可能導致血癌(俗稱白血病)。
消化器官	受輻射傷害之主要症狀為噁心、嘔吐、腹瀉及食慾不振。小腸內壁最為敏感，受損後易致潰瘍，大量出血(不易凝結止血)，且不易消化吸收，造成體弱及貧血，並易感染併發症。
甲狀腺	位於喉部，分泌荷爾蒙控制新陳代謝。碘-131侵入人體後，即被吸收，集中於此，減少生產荷爾蒙，以致減低新陳代謝而損及健康，或可能導致甲狀腺癌。
生殖機能	男子睪丸一次接受 5 西弗以上時可能導致永久不孕，劑量較低或慢性累積者均可恢復，女子不孕劑量約為 3 西弗。遭受高劑量損害之精子或卵子，如成孕則可能造成流產、死胎、畸形或智能遲鈍等現象。胎兒於細胞分裂生殖期中最易受輻射影響，故孕婦懷孕初期宜特別注意。孩童對輻射亦遠較成人為敏感。

5. 輻射劑量的量測與法規限值

5.1 輻射照射與輻射污染

- ▶ 照射：人曝露於體外輻射場中受到輻射之照射，不會造成輻射之擴散。
- ▶ 污染：人的髮膚附著或體內吸入或攝入放射核種而受到輻射之照射，污染通常會造成輻射之擴散。
- ▶ 造成人體之輻射曝露，其輻射源來自於體外者稱為體外曝露，來自於體內者稱為體內曝露。



5.2 人員體內放射性污染的偵測

全身計測法

可直接自體外計測體內含核種及活度，對體內污 χ 或 γ 核種的測量甚為方便，高能量 β 核種也可能測量。



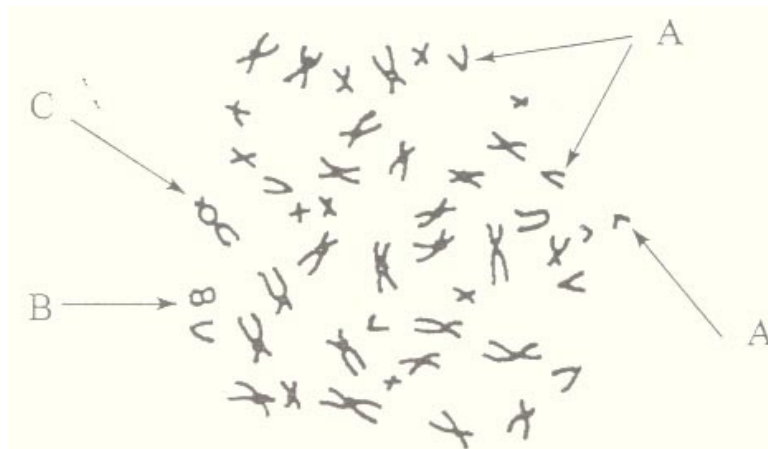
全身計測

全身計數器

生化分析法

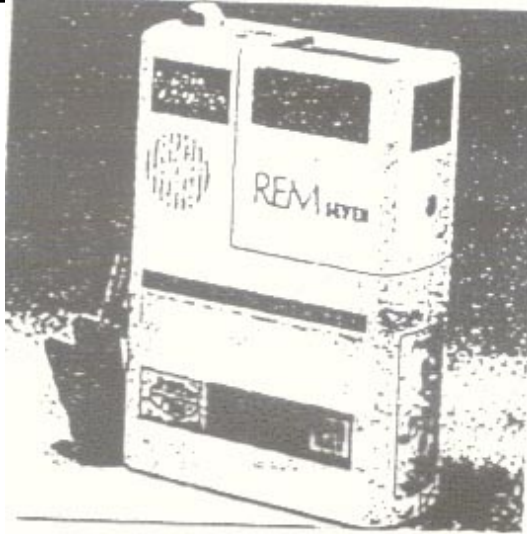
藉由取人的排泄物(糞便、尿、血液等)，經過適當處理後加以偵測，據以推算全身污染的活度，此方法適於偵測發射任何輻射(α 、 β 、 γ 、 χ)的放射性核種。

染色體變異分析



5.3 人員體外劑量監測

個人劑量計

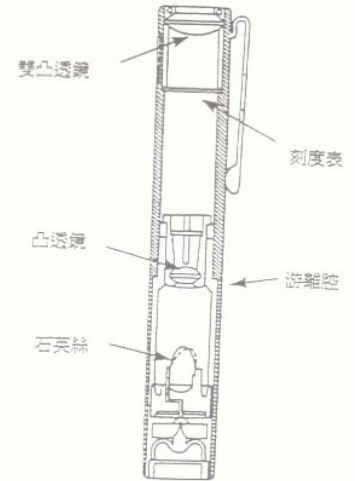


個人警報器

劑量筆

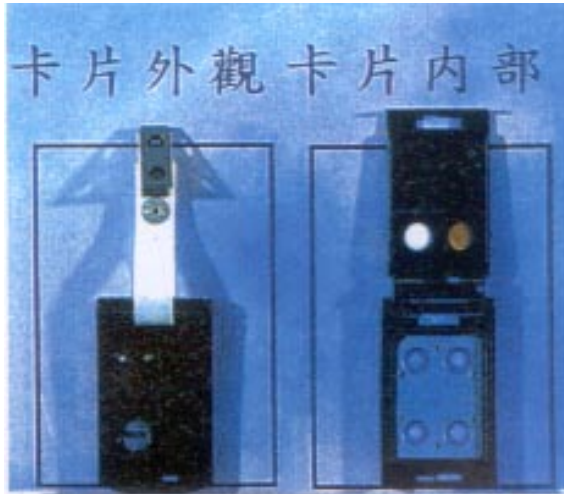


袖珍劑量筆



直讀式劑量筆

人員劑量配章



人員輻射劑量佩章

手提輻射偵檢器

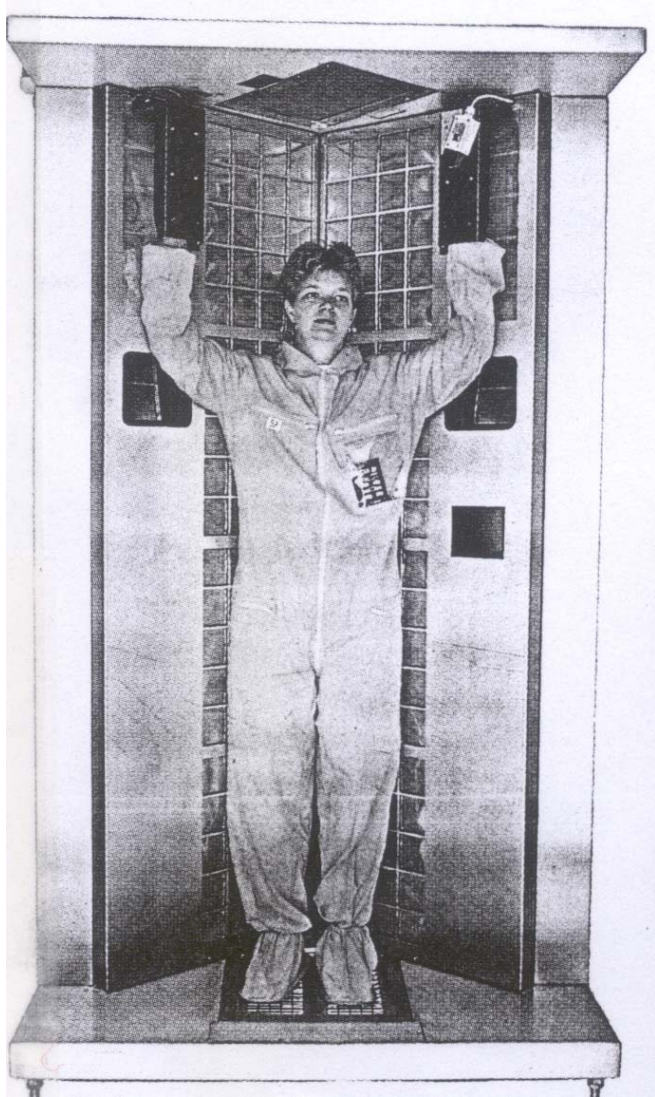


手提輻射偵檢器

手提污染偵檢器

核能研究所 SM-99 輻射偵測器

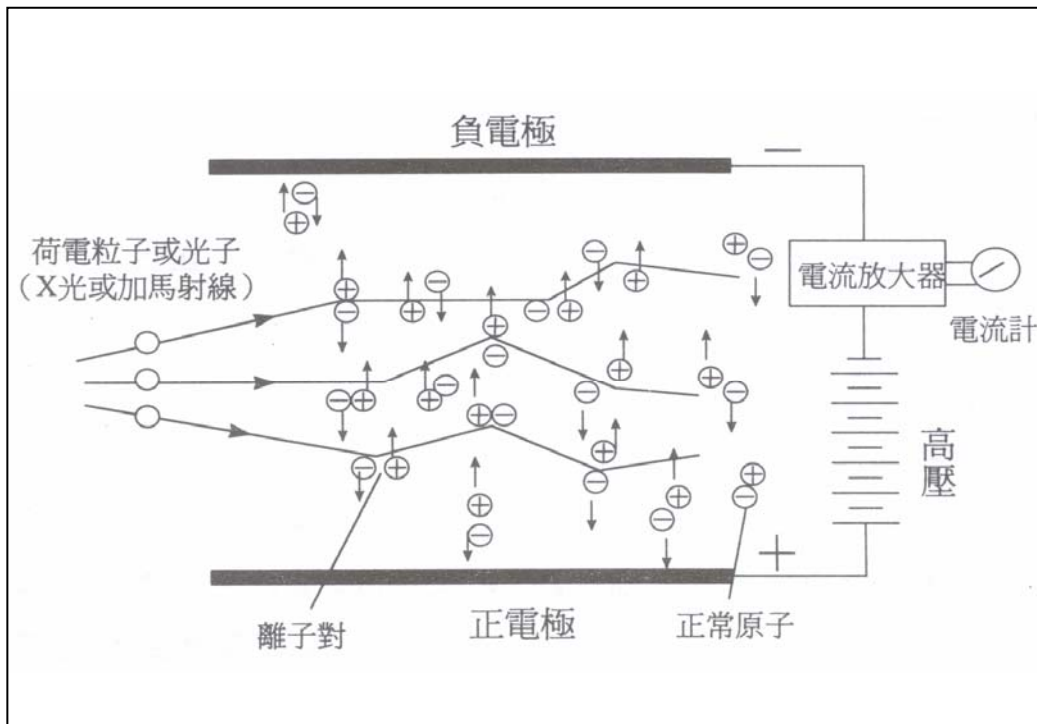
進出輻射管制區之門型偵檢器



進出海關碼頭之門型偵檢器

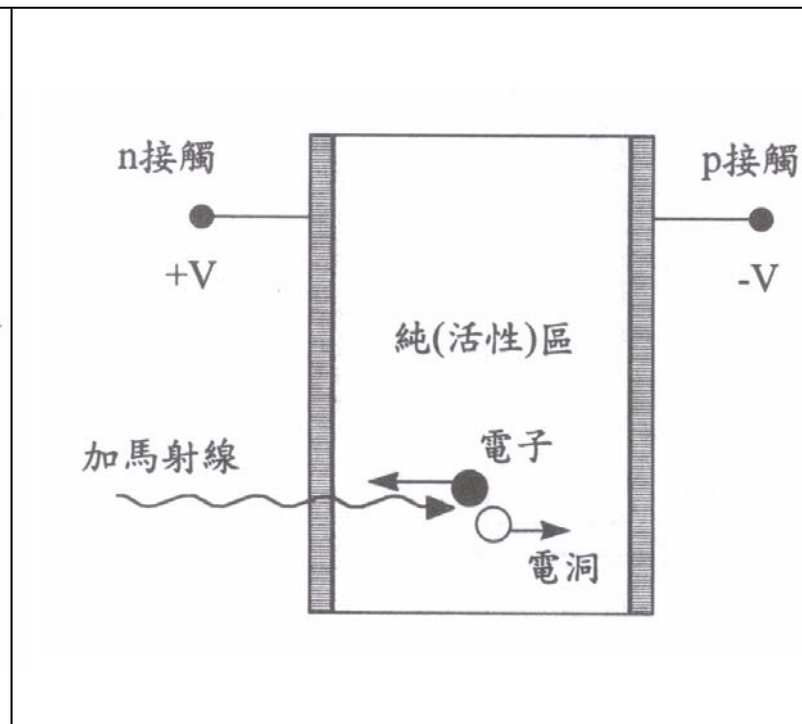


5.4 簡單的輻射偵檢器原理



充氣式偵檢器

輻射游離充氣式偵檢器中的氣體，造成與游離度相當的電子與離子對，形成可度量之電流或脈衝。

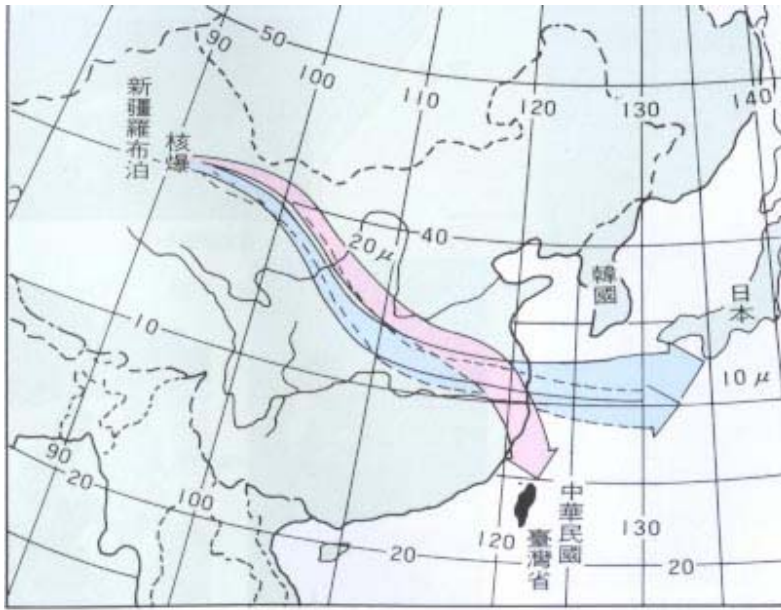


半導體偵檢器

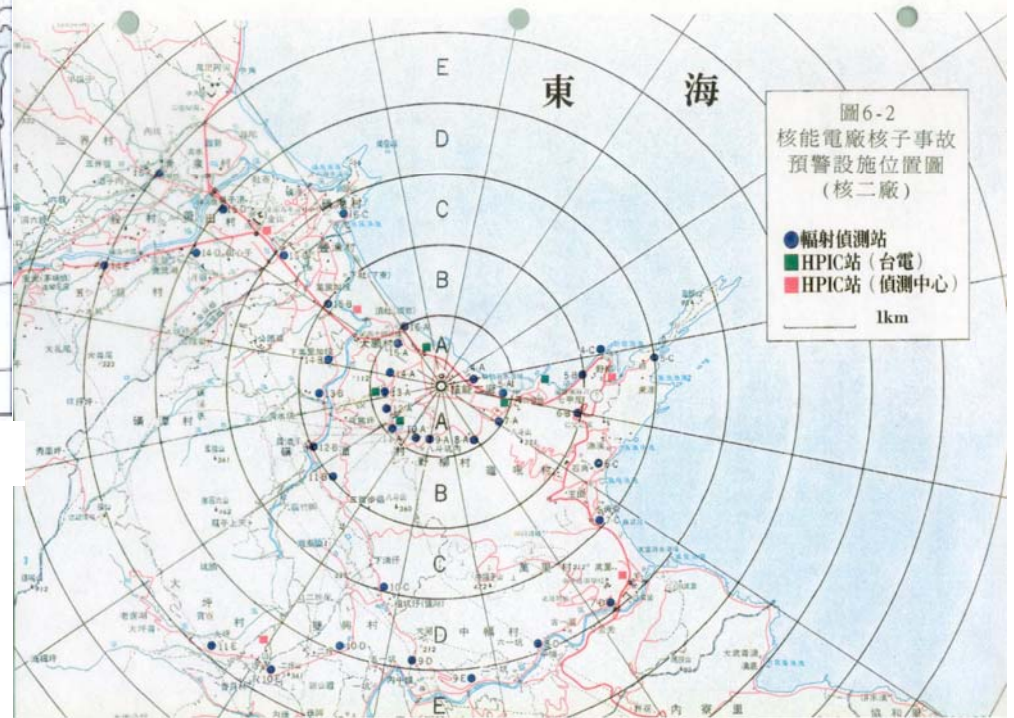
輻射游離半導體偵檢器中的半導體介質，造成與游離度相當之電子與電洞對，形成可度量之電流或脈衝。

5.5 環境輻射監測

地球整體大氣之流動影響著我們的環境輻射背景



核二廠附近之輻射偵測站位置圖



5.6 輻射劑量之法規限值

▶ 游離輻射防護法 → 游離輻射防護法施行細則
游離輻射防護安全標準(92.02.01開始施行) ←

▶ 年劑量限值

目的	組織器官	劑量限度(毫西弗/年)	
		輻射職業人員	一般民眾
抑低機率效應至可接受水平	全身 (有效等效劑量)	50 (連續五年之年平均小於20)	1
防止確定效應發生	眼球水晶體	150	15
	個別組織或器官	500	50

▶ 合理抑低原則 --- ALARA (As Low As Reasonably Achievable)

輻射防護應考慮合理抑低原則，指盡一切合理之努力，以維持輻射曝露在實際上遠低於法規之劑量限度。其要點為：

- (1) 須與原許可之活動相符合。
- (2) 需考慮技術現狀，改善公共衛生及安全之經濟效益，以及社會與經濟因素。
- (3) 須為公共之利益而用輻射。

▶ 佩帶人員劑量計之規定

我國於民國九十一年十二月二十五日公布的「游離輻射防護法」第十五條，及其「游離輻射防護法施行細則」第六條與人員劑量監測有關的規定如下：

- (1) 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(通常稱為甲種狀況)，其有效等效劑量 6 毫西弗，眼球水晶體之等效劑量為 50 毫西弗，皮膚及四肢之等效劑量為 150 毫西弗) ，雇主應對輻射工作人員實施個別劑量監測。——→ 進入工作場所應佩帶人員劑量計
- (2) 雇主評估其工作人員曝露可能低於年個人劑量限度十分之三者(通常稱為乙種狀況)，得以工作環境監測代替個別人員偵測。——→ 工作場所應配備輻射劑量(率)監測器

▶ 輻射作業教學或工作訓練之規定

依據游離輻射防護安全標準第九條定：

「十六歲至十八歲接受輻射作業教學或工作訓練者，其個人劑量限度，依下列之規定：—————→ 乙種狀況

- (1) 一年內之有效等效劑量不得超過 6 毫西弗。
- (2) 眼球水晶體之等效劑量於一年內不得超過 50 毫西弗。
- (3) 皮膚或四肢之等效劑量於一年內不得超過 150 毫西弗。」

▶ 對於女性保護之特別之規定

依據游離輻射防護安全標準第十條：

「雇主於接獲女性輻射工作人員告知懷孕後，應即檢討其工作條件，以確保妊娠期間胚胎或胎兒所受之曝露符合第十一條一般人之劑量限度。對告知懷孕之女性輻射工作人員，其腹部表面之等效劑量於剩餘妊娠期間不超過 1 毫西弗，且攝入體內之放射性核種不超過年攝入限度之百分之 2，視為不超過前項胎兒之劑量限度。」

6. 輻射防護的原則與輻射屏蔽

6.1 體外輻射防護的原則

- ▶ 時間：縮短於輻射場中的逗留時間
- ▶ 衰減：注意射源原始強度與衰減時間
(瞭解你的射源)

$$C=C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

- ▶ 距離：加馬射源強度隨距離平方成反比
- ▶ 屏蔽：使用各種有效的屏蔽材料



6.2 體內輻射防護的原則

- ▶阻絕：阻絕放射性物質經由飲食、呼吸、皮膚吸收、傷口侵入進入入體內的途徑。因此，個人體內曝露的防護方法就是避免在污染地區逗留，避免食入、減少吸入、增加排泄。
- ▶稀釋：對受輻射污染的空气或水以未受污染的空气或水加以大量稀釋，使其達到可以排至大氣或水域中之排放規定。
- ▶分散：對受輻射污染的物質藉由空氣或水域加以分散。
- ▶除污：加強污染管制及除污的工作，利用各種除污方法對受輻射污染的人體或物體進行除污，使其所附著的放射性污染減少。



6.3 輻射源強度之衰減及加馬輻射場

▶ 輻射強度之衰減- 指數衰減定律：

確定所拿到的純射源或儀器中射源之出廠輻射活度，計算到實際應用時所剩餘之輻射活度：

$$C_t = C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

t：衰減時間

活度單位
居里(Ci)= 3.7×10^{10} 貝克(Bq)

衰減常數

半衰期

常用射源

^{60}Co

^{137}Cs

^{90}Sr

^{192}Ir

半衰期

5.3 年

30.0 年

28.1 年

73.8 天

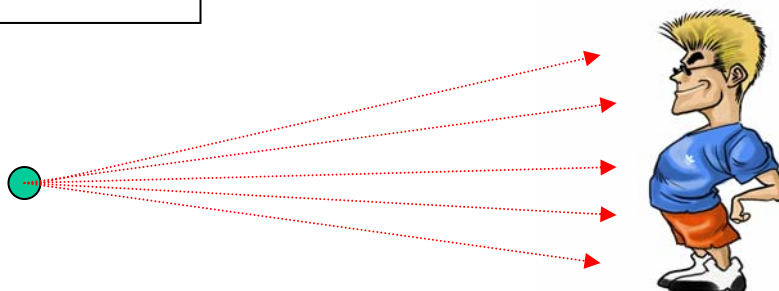
▶加馬輻射場之簡易估算

$$H(10^{-2} Sv/h) \approx \frac{0.53 \cdot C \cdot E}{d^2}$$

γ 射源活度(Ci：居里) $\rightarrow C$
 γ 射源能量(MeV) $\rightarrow E$
離射源之距離(公尺) $\rightarrow d^2$

曝露於輻射場中之劑量率
(10^{-2} 西弗每小時)

離射源之距離(公尺)



註：以工作人員年劑量限值 $50mSv = 0.05Sv$ 而言，
年工作時數為 $8 h/day \times 5 day/week \times 50 week/yr$
 $= 2000 h$

劑量率限值為 $0.05 Sv/2000h = 2.5 \times 10^{-5} Sv/h = 25 \mu Sv/h$

6.4 輻射屏蔽之考量

▶ α 粒子之屏蔽考量：

α 粒子因其穿透力甚弱，人體皮膚之死層(Dead Layer)可有效阻止 α 粒子(α 至少需具有7.5MeV以上之能量，才可能穿透皮膚)，因此 α 粒子在體外將不會構成傷害。故 α 粒子之屏蔽問題可以不考慮。但 α 粒子如進入體內，則其輻射加權因數(W_R)值為20，對身體構成很嚴重的傷害，故該特別小心防護 α 粒子進入體內。

▶ β 粒子之屏蔽考量：

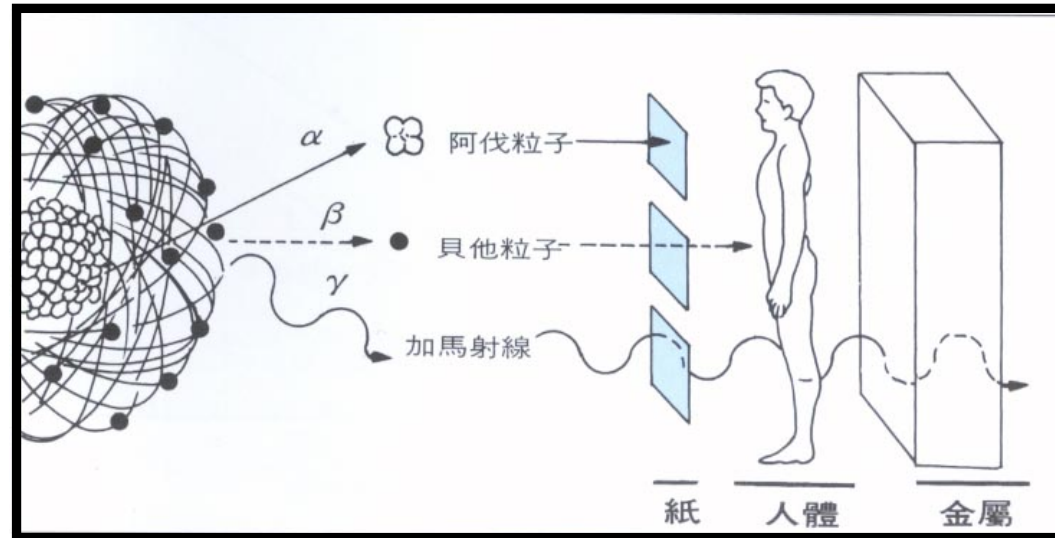
β 粒子之穿透力較 α 強，通常 1 MeV 之 β 粒子在空氣中可通行3.3公尺，故 β 粒子可穿過皮膚之死層，對人體之皮膚具有傷害力，但通常無法穿透深層體下組織。

► 中子之屏蔽考量：

一般非核能或非核燃料循環之實驗室，均極少有機會接觸到中子輻射場。屏蔽中子的最好方法是使用含低原子序較多的物質(如水、塑膠)來減速中子，然後用強中子吸收體(如硼-10)來吸收中子。

► γ 或 X 射線之屏蔽考量：

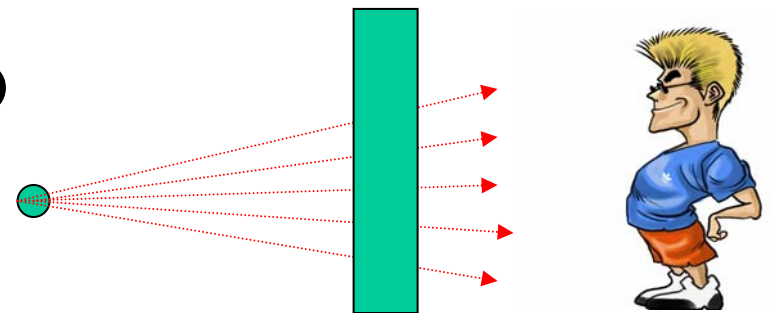
γ 或 X 射線對物質之穿透力很強，必須使用密較高的物質為屏蔽(如鐵或鉛)，才能有效阻擋 γ 或 X 射線。



6.5 簡易的 γ 或 X 射線之屏蔽估算

▶ 半值層法：衰減一半 γ 或 X 射線輻射場強度之屏蔽材質厚度，稱爲此材質之半值層 (HVL；Half Value Layer)

輻射源	鉛(cm)	混凝土(cm)	鐵(cm)
^{137}Cs (0.662MeV)	0.65	4.8	1.6
^{60}Co (1.25MeV)	1.2	6.2	2.1
50kV X-ray	0.006	0.43	
100kV X-ray	0.027	1.6	
250kV X-ray	0.088	2.8	

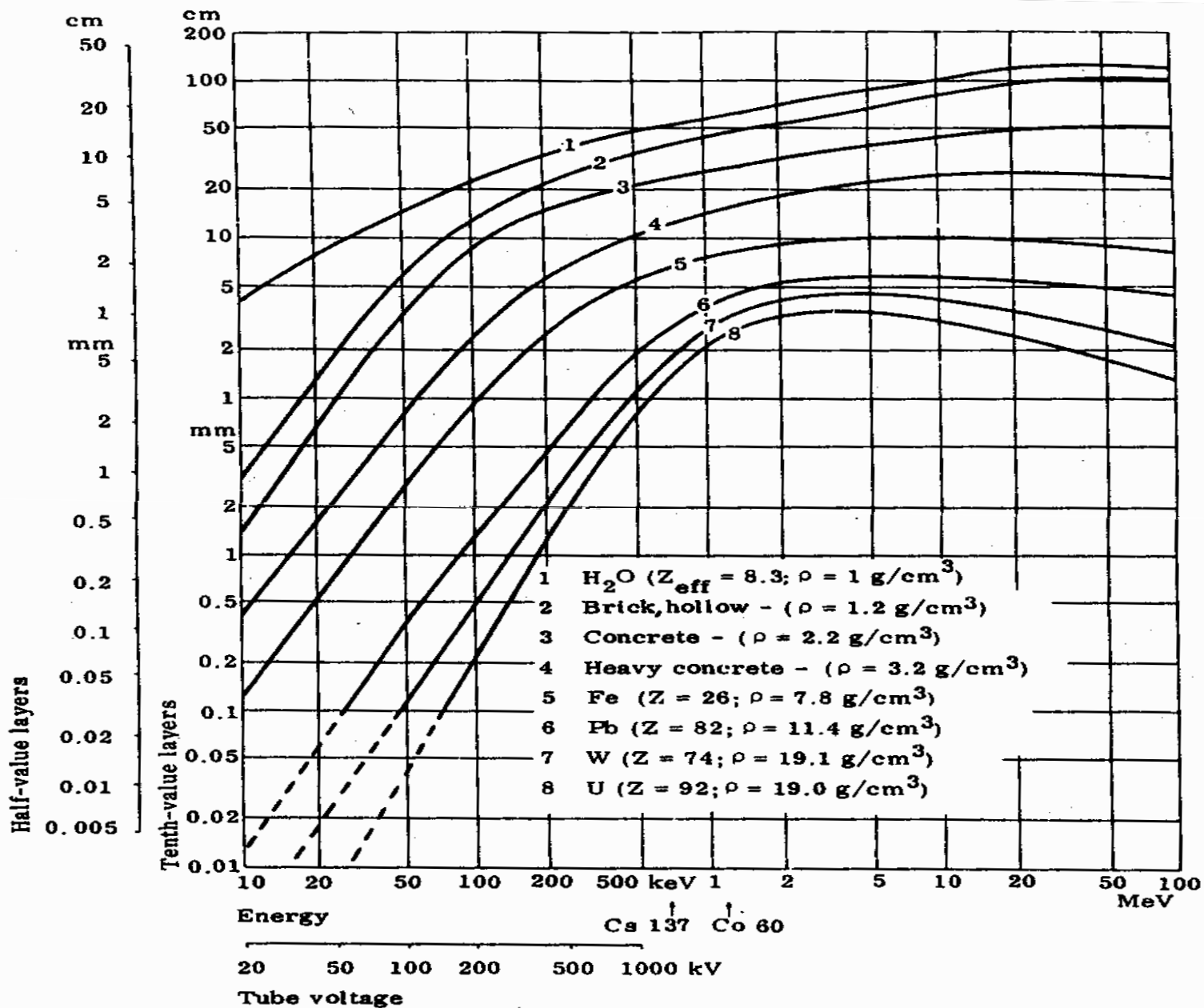


H_0 ：未加屏蔽前的輻射場 (Sv/h)

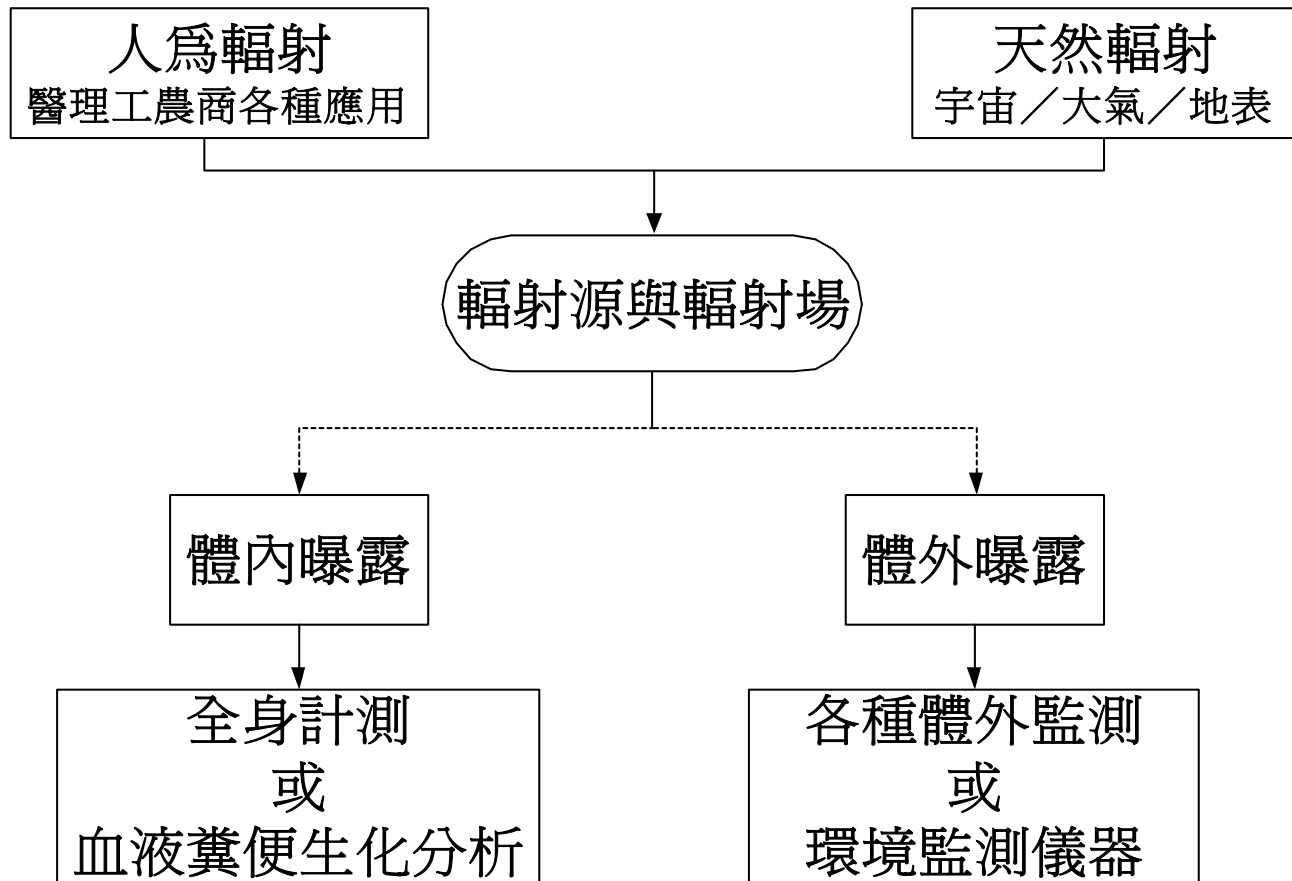
H_t ：加屏蔽後的輻射場 (Sv/h)

$$H_t = H_0 \times \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{HVL}}$$

半值層(HVL) 及什一值層(TVL ; Tenth Value Layer)實驗數據圖



7. 結語



個人體外輻射防護原則：時間

衰減

距離

屏蔽

個人體內輻射防護原則：阻絕

稀釋

分散

除污

設施輻射防護原則：安全

管理

法規

應變