

## 輻防考試複習課程

姚學華

yaohsuehhu@gmail.com

1

## 1 專用名詞

- 活度
- 半化期與指數減少
- 累積活度(發射輻射)
- 放射性核種製造
- 連續衰變與孳生器
- 飽和成長曲線
- 輻射計測統計

2

## 物質的量

- **莫耳(mole)**：1莫耳指 $6.02 \times 10^{23}$ 個原子。即1 mole =  $6.02 \times 10^{23}$  atoms。莫耳數、原子數，通常均不寫單位。
- **原子量**：1莫耳原(分)子的質量。常用單位為g或 $\text{g mole}^{-1}$ 。1莫耳某原子之原子量，其數值近似於其**質量數**，例如 $^{12}\text{C}$ 之原子量近似於12  $\text{g mole}^{-1}$ 。

3

## 放射性核種穩定性

- **衰變常數(decay constant,  $\lambda$ , 單位為  $\text{s}^{-1}$ )**：指單位時間內放射性核種進行衰變的機率；故可用以代表一**放射性核種穩定性**的程度，即單位時間內衰變機率高者穩定性差，反之則優。
- **半化期(half-life, T或 $t_{1/2}$ )**：放射性核種衰變至原有數量一半所需的時間，稱為該放射性核種的半化期， $\lambda = 0.693/T$ 。

4

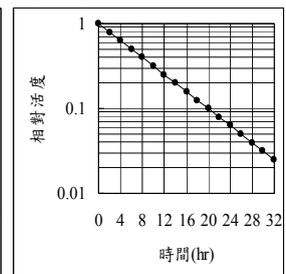
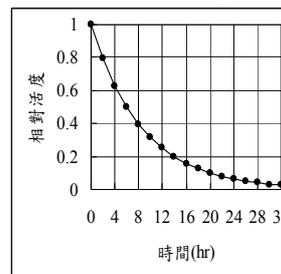
## 活度(Activity)

- **活度**：定量放射性物質的危險性。為放射性物質**量**的表示法。
- **活度(A)**： $A = N\lambda$ ，其中 $\lambda$ 為衰變常數，N為放射性核種的原子數。
- **活度**：指一定量之放射性核種在某一時間內發生之自發衰變數目。某射源一秒內若有一放射性原子衰變，其活度稱為**1貝克(Becquerel, Bq)**。

5

## 活度隨時間成指數減少

$$A/A_0 = e^{-\lambda t} = (1/2)^N$$



6

## 發射輻射

- 發射輻射(emitted radiation,  $\tilde{A}$ 或U)：指一段時間(t)內放射性核種的衰變次數，也稱為**累積活度(cumulated activity)**。無單位，也可以使用Bq s或 $\mu\text{Ci h}$ 作為發射輻射的單位。
- 長半化期核種或時間很短時， $\tilde{A} = A_0 t$ 。
- $\tilde{A} = A_0(1 - e^{-\lambda t})/\lambda$ 。

7

## 放射性核種的製造(1/3)

- 迴旋加速器(cyclotron)**：利用迴旋加速器所加速的正荷電粒子，例如質子、氦核、 $^3\text{He}$ 或其他原子核，撞擊穩定的靶核，由於原穩定靶核添加了能量與/或核子，可能成為放射性核種。
- 反應器(reactor)**：可直接純化反應器內核分裂反應的產物；可利用反應器或其他核反應生成的中子，以中子捕獲反應產生放射性核種。

8

## 放射性核種的製造(2/3)

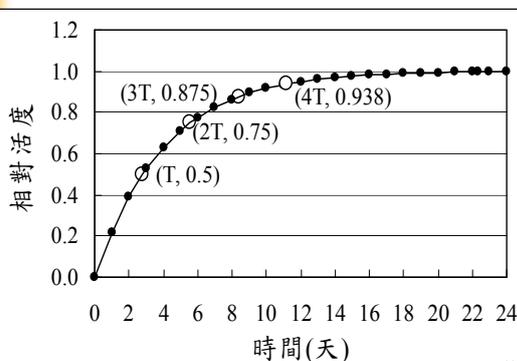
- 迴旋加速器：  
 $^{111}\text{Cd} + p (12\sim 15 \text{ MeV}) \rightarrow ^{111}\text{In} + n$
- 反應器：
  - 核分裂(n, f)反應：  
 $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow ^{131}\text{I} + ^{102}\text{Y} + 3n$   
 $\rightarrow ^{99}\text{Mo} + ^{135}\text{Sn} + 2n$   
 $\rightarrow ^{137}\text{Cs} + ^{97}\text{Rb} + 2n$
  - 中子捕獲(n,  $\gamma$ )反應：  
 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ ,  $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$

9

## 放射性核種的製造(3/3)

- $A = \dot{\Phi} \sigma N(1 - e^{-\lambda t})$   
A = 子核的活度，單位為Bq  
 $\dot{\Phi}$  = 入射粒子通量率，單位為 $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
 $\sigma$  = 核反應機率(截面)，單位為邦(b, barn),  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$   
N = 母核(即靶核)的原子數  
 $\lambda$  = 子核的衰變常數  
t = 照射時間
- 飽和活度( $A_{\text{sat}}$ )** =  $\dot{\Phi} \sigma N$

10



11

## 連續衰變

- 釷系( $4n, ^{232}\text{Th}$ )、鈾系( $4n+2, ^{238}\text{U}$ )、錒系( $4n+3, ^{235}\text{U}$ )，原子序小於83、離核種圖中穩定帶較遠的放射性核種，常需要經過**連續衰變**才能成為穩定核種。
- 由於加速器與反應器並不普遍，若已知某**衰變系列(decay series)**中某子核適合醫用，可取得其長半化期母核，再利用**孳生器(generator)**原理，於臨床使用此子核。
- Ex.  $^{99}\text{Mo}(T=66.7 \text{ h}) \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}(T=6 \text{ h}) \rightarrow ^{99}\text{Tc}$

12

## 放射性子核的成長(1/2)

- $A \rightarrow B \rightarrow C$
  - 母核(衰變常數與原子數分別為 $\lambda_1$ 與 $N_1$ )、第一子核(衰變常數與原子數分別為 $\lambda_2$ 與 $N_2$ )、第二子核分別以A、B、C表示, 則
- $$N_1 = N_{10}e^{-\lambda_1 t} \quad (N_{10}: \text{最初母核原子數目}, t: \text{時間}) \text{-----}(1)$$
- $$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \text{-----}(2)$$
- 由此二式可解得:
- $$N_2 = [N_{10}\lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)](e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \text{-----}(3)$$

13

## 放射性子核的成長(2/2)

- 將(3)式原子數目改以活度表示, 得
- $$A_2 = [N_{10}\lambda_1\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)](e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$
- $$= [A_{10}\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)](e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \text{---}(4)$$
- 將(4)式結果左邊中 $A_{10}$ 乘以 $e^{-\lambda_1 t}$ , 右邊 $(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ 除以 $e^{-\lambda_1 t}$ , 得
- $$A_2 = A_1[\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)][1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \text{---}(5)$$

14

## 衰變平衡

- 由母核與子核半化期的比較, 可將衰變系列是否會形成平衡之特性, 區分為以下三類:
  - ◆ **不平衡(no equilibrium)**: 母核半化期小於子核者, 不會產生平衡現象。
  - ◆ **長期或永久平衡(secular equilibrium)**: 母核半化期遠大於子核者, 長時間後, 母核與子核的活度近似相等。
  - ◆ **瞬時或短暫平衡(transient equilibrium)**: 母核半化期數或數十倍大於子核者, 長時間後, 母核與子核活度的比值為一常數。

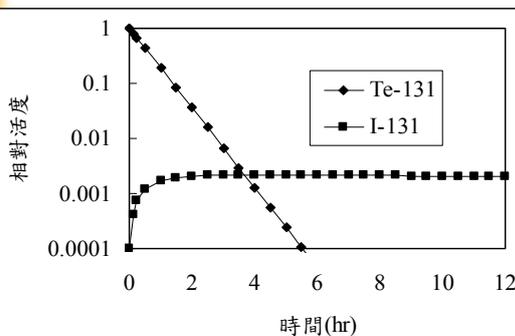
15

## 不平衡(1/2)

- 若母核的半化期小於子核者, 一段時間後, 母核將完全衰變成為子核, **無母核與子核間的平衡現象**, 稱為**不平衡**。
- 隨時間(t)增加,  $A_2 = A_1[\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)][1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]$ 中,  $A_1$ 漸趨近於0,  $A_2$ 則以自己的衰變速率繼續衰變。
- $^{131}\text{Te}(T=25 \text{ min})/^{131}\text{I}(T=8.04 \text{ d})$ 即為一不平衡的例子。

16

## 不平衡(2/2)



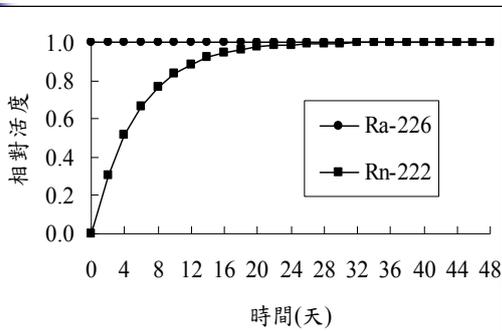
17

## 長期平衡(1/2)

- 若母核的半化期遠大於子核者, 一段長時間( $t \rightarrow \infty$ 或約7倍子核半化期)後,  $[1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \rightarrow 1$ , **母核與子核的活度將近似相等**。
- 即當 $t \rightarrow \infty$ 時,  $A_2 \doteq A_1[\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)]$ ,  $\because \lambda_2 \gg \lambda_1$ ,  $\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1) \doteq 1$ ,  $\therefore A_2 \doteq A_1$ 。
- $^{226}\text{Ra}(T=1600 \text{ y})/^{222}\text{Rn}(T=3.8235 \text{ d})$ 即為典型長期平衡的例子。

18

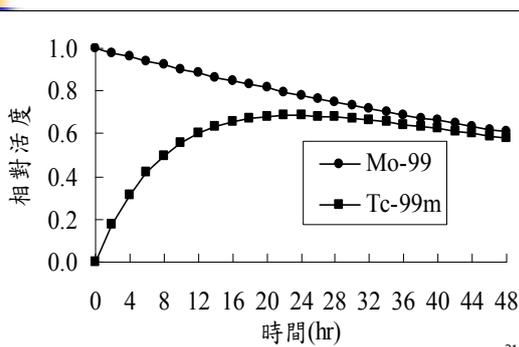
### 長期平衡(2/2)



### 瞬時平衡(1/2)

- 若母核的半化期大於(數或數十倍)子核者，一段長時間後，母核與子核的活度將達成**瞬時平衡** [子核與母核活度的比值 $A_2/A_1$ 為一常數 $\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)$ ]。
- 將 $A_2 = A_1[\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)][1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]$ 式微分，取斜率為0，可知時間為 $t_{max}$ 時，第一子核活度有極大值： $t_{max} = [\ln(\lambda_2/\lambda_1)]/(\lambda_2 - \lambda_1)$ 。
- $^{99}Mo(T=66.7 \text{ h})/^{99m}Tc(T=6 \text{ h})$ 即為一瞬時平衡的典型例子。

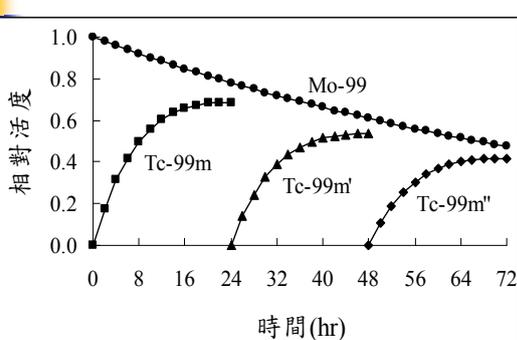
### 瞬時平衡(2/2)



### 瞬時平衡與孳生器

- $A \rightarrow B \rightarrow C$
- $\lambda_1$ 與 $A_1$ 分別為母核(A)的衰變常數與活度， $\lambda_2$ 與 $A_2$ 分別為第一子核(B)的衰變常數與活度。
- 流洗後(時間 $t$ 為0時)， $A_2$ 為0；流洗後經時間 $t$ ， $A_2 = A_1[\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)][1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]$ 。
- 上式中， $A_2$ 為此次可流洗出第一子核的活度， $A_1$ 為此次流洗時母核的活度， $t$ 為上次流洗至此次流洗的間隔時間。

### $^{99}Mo/^{99m}Tc$ 孳生器



### 劑量與劑量率、飽和成長

- 短半化期核種造成物質的**劑量率**( $\dot{D}$ )為時間的函數，若初劑量率為 $\dot{D}_0$ ，衰變常數為 $\lambda$ (或有效排除常數 $\lambda_E$ )， $t$ 時間後的累積劑量( $D$ )的計算式為
- $$D = \frac{\dot{D}_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$
- $\tilde{A} = A_0(1 - e^{-\lambda t})/\lambda$ 。
  - $A = \dot{\Phi} \sigma N(1 - e^{-\lambda t})$
  - $A_2 = A_1[\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)][1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]$

## 常態分布特性

輻射計測值( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )的分布符合常態(或高斯)分布，分布特性如下(平均值以 $u$ 表示，標準偏差以 $\sigma$ 表示)：

- $u = (\sum x_i)/n = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$
- 標準偏差( $\sigma$ )代表 $x$ 與 $u$ 間的離散情形。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u)^2}{n}}$$

- 將常態分布機率函數作圖時，橫座標為計測值 $x$ ，縱座標為該計測值出現之機率 $f(x)$ 。此曲線的最高點是平均值 $u$ 的位置，是一以 $u$ 為對稱中心的鐘形曲線。

25

## 常態分布機率函數

某一樣本計測值為 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，平均值為 $u$ ，標準偏差為 $\sigma$ ，任一計測值 $x$ 出現之機率 $f(x)$ 為

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}}$$

例：平均計測值為100，標準偏差為5，則計測值為101的機率為

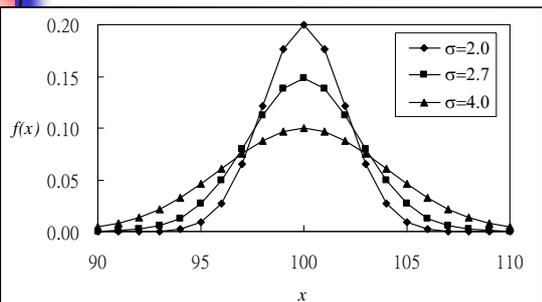
$$f(101) = \frac{1}{5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(101-100)^2}{2 \times 5^2}} = 0.0782$$

例：計測值為平均值( $u$ )出現之機率為 $1/[\sigma\sqrt{(2\pi)}]$

例：計測值為半高處出現之位置為 $u \pm 1.177\sigma$

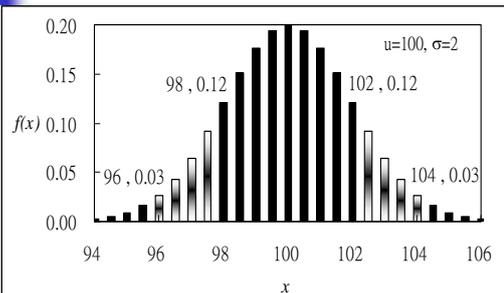
26

## 常態分布機率函數圖



27

## 標準偏差與機率函數



28

## 標準偏差與機率函數

計測值為平均值( $u$ ) $\pm n$ 標準偏差( $\sigma$ )	出現機率
$f(u - \sigma \leq x \leq u + \sigma)$	68.27%
$f(u - 2\sigma \leq x \leq u + 2\sigma)$	95.45%
$f(u - 3\sigma \leq x \leq u + 3\sigma)$	99.73%
$f(u - 1.645\sigma \leq x \leq u + 1.645\sigma)$	90%
$f(u - 1.96\sigma \leq x \leq u + 1.96\sigma)$	95%
$f(u - 2.58\sigma \leq x \leq u + 2.58\sigma)$	99%

29

## 單次輻射計測的標準偏差

- 若單次輻射計測時，計測值為 $x$ ，標準偏差為 $\sqrt{x}$ ，百分標準偏差為 $[(\sqrt{x})/x] \times 100\%$ 。
- 若計測值為 $x$ ，計測時間為 $t$ ，標準偏差為 $(\sqrt{x})/t$ 。例如測10分鐘，計測值分別為10000與40000，計測率分別為 $1000 \pm 10$  cpm ( $\pm 1\%$ )與 $4000 \pm 20$  cpm ( $\pm 0.5\%$ )。
- 若計測率為 $x$ ，計測時間為 $t$ ，標準偏差為 $\sqrt{(x/t)}$ 。例如分別測1與10分鐘，計測率均為1000 cpm，標準偏差分別為31.7與10 cpm。

30

## 輻射計測誤差擴展

- 若計測樣品與背景時，計測值分別為 $x \pm \sigma_x$ 與 $y \pm \sigma_y$ ，此二計測值和或差(u)的標準偏差為 $\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}$ 。
- 若計測二不同樣品時，計測值分別為 $x \pm \sigma_x$ 與 $y \pm \sigma_y$ ，此二計測值積或商(u)的標準偏差( $\sigma_u$ )計算方式為：

$$\left(\frac{\sigma_u}{u}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$$

31

## 輻射計測時間最適化

- 放射樣品的總計數率與背景計數率若分別略知為S與B，此時若僅有固定時間可完成樣品與背景的計數，欲以最佳的時間分配，分別計數樣品與背景，使計數標準偏差為最小，則樣品計數所需時間 $T_S$ 、背景計數所需時間 $T_B$ 、S、B間的相關方程式為：

$$\frac{T_S}{T_B} = \sqrt{\frac{S}{B}}$$

32

## 2 光子定量

- 光子(X、 $\gamma$ )基礎特性
- 光子的應用
- 光子的衰減(係數)
- 微觀與巨觀截面
- 能量轉移、能量吸收
- 能量轉移係數、能量吸收係數
- 通量、能(量)通量
- 克馬、吸收劑量

33

## X光之發現(1895)

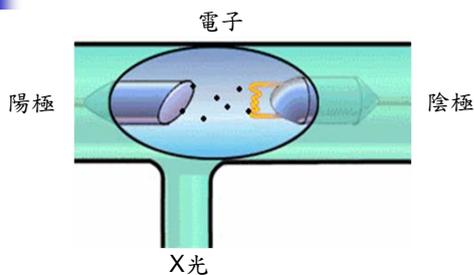
discovery of the X-rays

Wilhelm Conrad Röntgen  
Nobel prize 1901



34

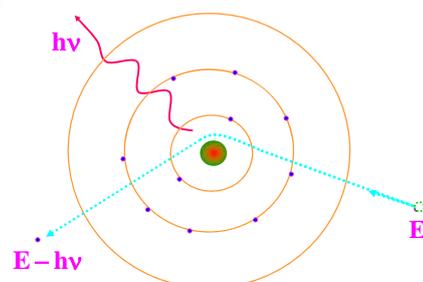
## X光的產生



From: U. of Wash. Environmental Health and Safety

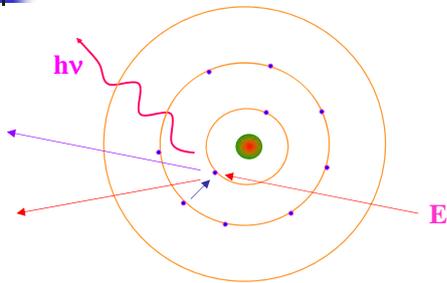
35

## X光-制動輻射



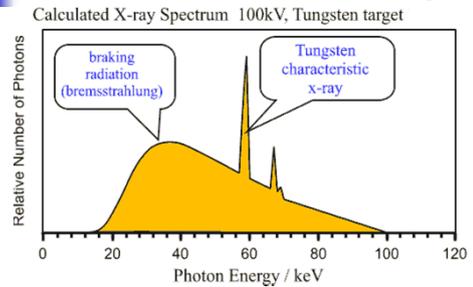
36

## X光-特性輻射



37

## X光的能譜



<http://www.arpansa.gov.au/images/basics/x-spec.gif>

38

## 放射性之發現(1896)

the discoverer of radioactivity along with [Marie Skłodowska-Curie](#) and [Pierre Curie](#)

[Henri Becquerel](#)

**Nobel prize 1903**



<http://reich-chemistry.wikispaces.com/file/view/antione-henri-becquerel.jpg/31422587/antione-henri-becquerel.jpg>

39

## 放射性、鐳與釷之發現

the discoverer of radioactivity along with [Antoine Henri Becquerel](#) and [Pierre Curie](#)

the discovery of the elements radium and polonium

[Marie Skłodowska Curie](#)

**Nobel prizes 1903, 1911**



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/Marie\\_Curie\\_c1920.jpg/330px-Marie\\_Curie\\_c1920.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/Marie_Curie_c1920.jpg/330px-Marie_Curie_c1920.jpg)

40

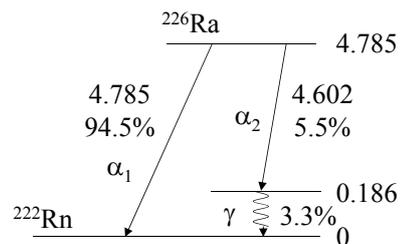
## 核種

- 核種(nuclide)：指原子之種類，由核內之**中子數**、**質子數**及核之**能態**區分之。
- 核種的表示法： ${}^A_ZX$ 。
- X為元素符號，由週期表可查得X的原子序(Z)，Z=質子數=電子數。
- A為質量數，等於質子數加中子數。
- 核種能態分為**基(ground)**態與**介穩(meta-stable)**態，基態以 ${}^AX$ 或 ${}^{Ag}X$ 表示，介穩態以 ${}^{Am}X$ 表示。

41

## 核種衰變圖(1/3)

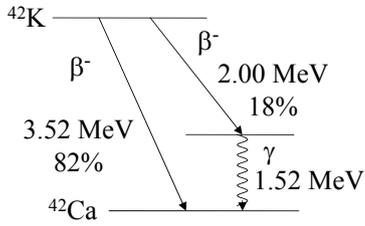
- 原子序>83、 $\alpha$ 衰變



42

### 核種衰變圖(2/3)

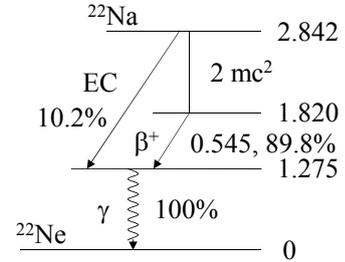
- 中子比例過高、 $\beta^-$ 衰變



43

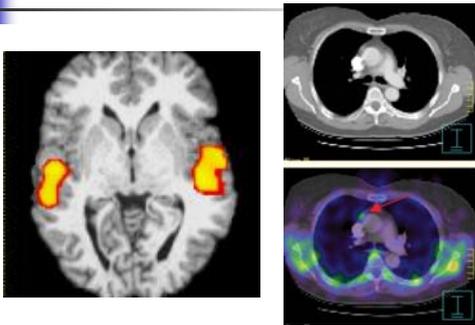
### 核種衰變圖(3/3)

- 質子比例過高、 $\beta^+$ 衰變或電子捕獲(EC)



44

### 單光子攝影SPECT



45

### 正子之發現(1932)

discovery of the positron

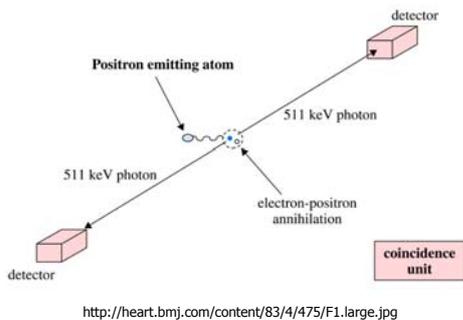
Carl Anderson

Nobel prize 1936



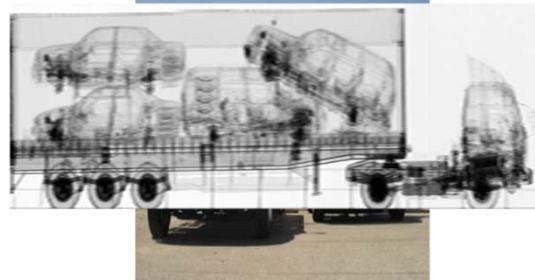
46

### 互毀



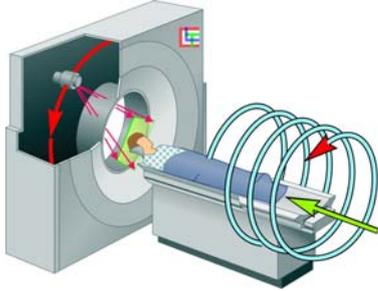
47

### X光貨櫃掃描儀



48

## 電腦斷層掃描(CT)



<http://www.imaging.sbes.vt.edu/wp-content/uploads/2010/09/scbct-ge.jpg>

49

## X光繞射 (1/2)

molecular structure of nuclear acids

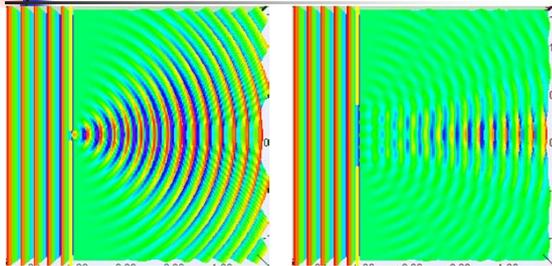
James Dewey Watson

**Nobel prize 1962**



50

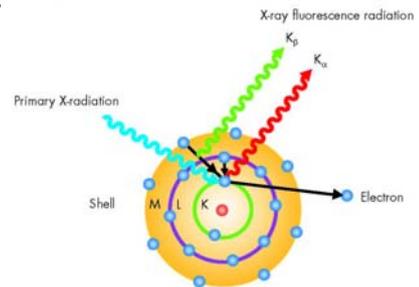
## X光繞射 (2/2)



Left: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Wavelength%3Dslitwidthspectrum.gif>  
 Right: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0a/5wavelength%3Dslitwidthspectrum.gif>

51

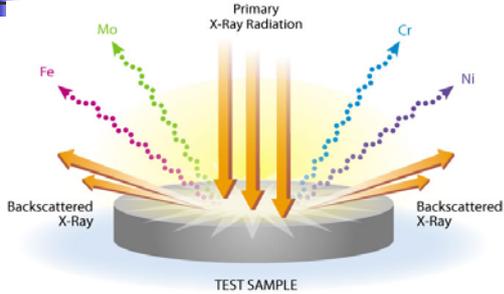
## X光螢光分析 (XRF) (1/2)



<http://xrf-spectroscopy.com/wp-content/uploads/2014/02/XRF-principle-1024x776.jpg>

52

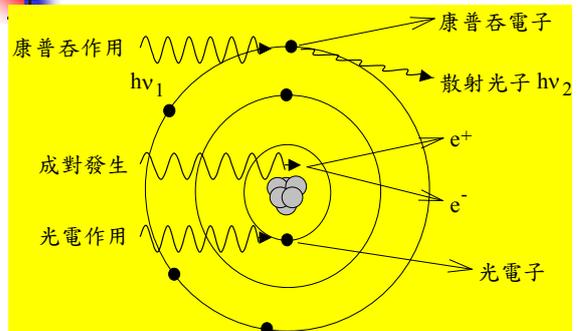
## X光螢光分析 (XRF) (2/2)



<http://www.tawadascientific.com/images/technology/primary-x-ray-radiation.jpg>

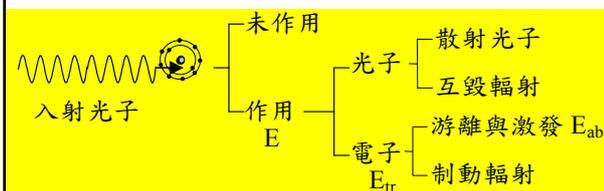
53

## 電磁輻射與物質的作用



54

## 能量轉移( $E_{tr}$ )與能量吸收( $E_{ab}$ )



55

## 光子的衰減

- **衰減係數**(attenuation coefficient,  $\mu$ )：單位物質厚度(例如cm或g cm<sup>-2</sup>)內某能量光子與某物質作用的機率。
- $I = I_0 e^{-\mu x}$ ；其中， $I_0$ 與 $I$ 分別代表最初與進入物質某深處 $x$ 的窄射束光子強度(例如cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)。
- **半值層**(half-value layer, **HVL**)：光子衰減至原有數目一半所需的物質厚度，稱為該物質屏蔽該光子的半值層， $\mu = 0.693/\text{HVL}$ 。

56

## 半值層、平均射程、什一值層

- **半值層**(half-value layer, **HVL**)：光子衰減至原有數目一半所需的物質厚度，稱為該物質屏蔽該光子的半值層， $\mu = 0.693/\text{HVL}$ 或 $\text{HVL} = 0.693/\mu$ 。
- **平均射程**或**平均自由行程**(mean free path)：我們可以求出某能量光子，於任一物質內的平均射程，即將所有光子射程的總和，除以光子總數即得。解得平均射程 =  $1.44 \text{ HVL} = 1/\mu$ 。
- **什一值層**(tenth-value layer, **TVL**)：光子衰減至原有數目十分之一所需的物質厚度，稱為該物質屏蔽該光子的什一值層， $\text{TVL} = 3.3 \text{ HVL}$ 或 $\text{HVL} = 0.3 \text{ TVL}$ 。

57

## 半值層數目與光子衰減

- $I/I_0 = e^{-\mu x} = (1/2)^N$ ；其中， $N$ 代表欲使窄射束光子強度降為 $I/I_0$ 所需半值層(HVL)數目。
- $I/I_0 = e^{-\mu x} = e^{-(0.693/\text{HVL}) x} = e^{-0.693 x/\text{HVL}}$   
 $\therefore I/I_0 = e^{-0.693 x/\text{HVL}} = e^{-0.693 N}$   
 $\ln(I/I_0) = -0.693 N$   
 $N = -\ln(I/I_0)/0.693$
- 令 $I/I_0$ 為降低因數 $B$ ，則所需半值層數目( $N$ )為 $-(\ln B)/0.693$ 。

58

## 衰減係數的換算

$\mu$ 之單位通常有四種表示方式：

- **直線衰減係數**( $\mu$ )，單位為m<sup>-1</sup>，即為光子與1 m物質作用的機率。
- **質量衰減係數**( $\mu_p$ )，單位為m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>， $\mu = \rho \mu_p$ ，其中， $\rho$ 表密度，即為光子與1 kg物質作用的機率。
- **原子衰減係數**( $\mu_a$ )，單位為m<sup>2</sup> atom<sup>-1</sup>， $\mu_a = \mu_p \div [(6.02 \times 10^{26}) \div A]$ ，其中， $A$ 表原子量，即為光子與一原子作用的機率。
- **電子衰減係數**( $\mu_e$ )，單位為m<sup>2</sup> ele<sup>-1</sup>， $\mu_e = \mu_a \div Z$ ，即為光子與一電子作用的機率。

59

## 能量轉移與能量吸收(1/4)

- **能量轉移**( $E_{tr}$ )指光子與物質作用時，光子能量轉移給電子(光電子、康普吞電子與成對電子等 $\delta$ 射線)的**動能**部份；**能量吸收**( $E_{ab}$ )則指光子與物質作用時，物質自 $\delta$ 射線動能所吸收的能量。

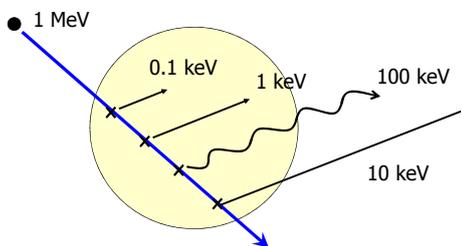
60

### 能量轉移與能量吸收(2/4)

- 荷電粒子的動能，經碰撞(游離)轉給二次電子射線( $\delta$ 射線)後，此 $\delta$ 射線的動能雖可能以制動輻射型式逸出靶外而未被吸收，但 $\delta$ 射線通常能量低(通常為10-70 eV)，不易形成制動輻射。
- 微劑量學中，靶通常很小，若 $\delta$ 射線的射程大於靶的大小，將使得 $\delta$ 射線部份動能逸出靶外而未被靶吸收。

61

### 能量轉移與能量吸收(3/4)



62

### 能量轉移與能量吸收(4/4)

- 前圖中，1 MeV電子通過一大小相當於2 keV電子射程的靶，共發生3次游離事件，入射電子分別損失0.1、1與10 keV能量，另發生1次生成制動輻射事件，損失100 keV能量。
- 此過程中，入射電子共損失了0.1 + 1 + 10 + 100 = 111.1 keV能量。
- 此過程中，靶不吸收制動輻射能量，也不吸收射程比靶大的二次電子能量(此例中指能量超過2 keV的二次電子)，於是，靶共吸收了0.1 + 1 = 1.1 keV能量。

63

### 光子作用於碳的能量轉移( $E_{tr}$ )與能量吸收( $E_{ab}$ )

E(MeV)	$E_{tr}$ (MeV)	$E_{ab}$ (MeV)	$E_{tr}/E$	$E_{ab}/E_{tr}$	$E_{ab}/E$
0.01	0.00865	0.00865	0.865	1	0.865
0.1	0.0141	0.0141	0.141	1	0.141
1	0.440	0.440	0.440	1	0.440
10	7.30	7.04	0.730	0.964	0.704
100	95.62	71.9	0.956	0.752	0.719

64

### 光子作用於鉛的能量轉移( $E_{tr}$ )與能量吸收( $E_{ab}$ )

E(MeV)	$E_{tr}$ (MeV)	$E_{ab}$ (MeV)	$E_{tr}/E$	$E_{ab}/E_{tr}$	$E_{ab}/E$
0.01	0.00955	0.00955	0.955	1	0.955
0.1	0.0362	0.0357	0.362	0.986	0.357
1	0.550	0.520	0.550	0.945	0.520
10	8.45	6.42	0.845	0.760	0.642
100	98.6	32.4	0.986	0.329	0.324

65

### 能量轉移係數

- 能量轉移係數：光子經過單位厚度(cm或g cm<sup>-2</sup>)物質後，入射光子能量中，轉給二次電子射線( $\delta$ 射線)動能之分率。入射光子能量中，有一部分將因未與物質作用而直接透射出去，另一部分與物質作用者，又可能以散射輻射(合調與不合調散射)或互毀輻射(成對發生)方式透射出去。

66

## 能量轉移係數、能通量與克馬

- 某能量光子與某物質的**能量轉移係數**通常以 $\mu_{tr}$  ( $\text{cm}^{-1}$ )或 $\mu_{tr}/\rho$  ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )表示。
- 若光子束之通量為 $\Phi \text{ cm}^{-2}$ ，每一光子之能量為 $E \text{ MeV}$ ，則光子束之能通量( $\Psi$ )為 $\Phi E \text{ MeV cm}^{-2}$ 。**能通量與質量能量轉移係數** [ $(\mu_{tr}/\rho) \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$ ]之乘積稱為**克馬(Kerma, K)**。

67

## 通量與能通量

- 間接游離輻射的強度以**通量(率)**或**能通量(率)**表示。
- 光子或中子**通量**(Fluence,  $\Phi$ )定義為 $dN/da$  ( $N$ : 光子或中子數,  $a$ : 光子或中子通過的面積; 單位為 $\text{cm}^{-2}$ )。
- 光子或中子**能通量**(Energy fluence,  $\Psi$ )定義為 $dN \cdot hv/da$  ( $N$ : 光子或中子的數目,  $a$ : 光子或中子通過的面積,  $hv$ : 每一光子或中子的能量; 單位為 $\text{MeV cm}^{-2}$ )。

68

## 克馬

- $K = dE_{tr}/dm$
- 式中 $dE_{tr}$ 是在質量為 $dm$ 的介質中，**光子或中子**轉移給**二次荷電粒子**( $\delta$ 射線或回跳核)的**動能**。即指光子或中子與物質作用時，光子或中子能量轉移給二次荷電粒子的動能。
- 前述動能可能因為產生**制動輻射**，或因為**介質**太小(小於二次荷電粒子的射程)，未被介質吸收。
- 克馬代表場所(介質)**間接游離輻射**的強度。

69

## 能量吸收係數

- 能量吸收係數**: 光子經過單位厚度( $\text{cm}$ 或 $\text{g cm}^{-2}$ )物質後，入射光子能量中，被物質吸收之分率。物質所吸收之能量，來自於 $\delta$ 射線能量中，因游離與激發(不含產生制動輻射)所損失能量之部分。亦即入射光子能量中，扣除未作用光子能量、散射輻射能量、互毀輻射能量與制動輻射能量之分率。

70

## 克馬與吸收劑量

- 克馬**:  $K = dE_{tr}/dm$ ，式中 $dE_{tr}$ 是單位質量物質( $dm$ )裡間接游離輻射(指光子或中子)轉移給二次粒子的動能。
- 吸收劑量(D)**:  $D = dE_{ab}/dm$ ，式中 $dE_{ab}$ 是單位質量物質裡接受輻射之平均能量。吸收劑量亦為**能通量**( $\Psi$ 或 $\Phi E$ )與**質量能量吸收係數**( $\mu_{ab}/\rho$ )之乘積。
- $D = K(1 - g) = \Phi E \text{ MeV cm}^{-2} \times (\mu_{ab}/\rho) \text{ cm}^2 \text{g}^{-1} \times 1.6 \times 10^{-10} \text{ Gy (MeV g}^{-1})^{-1}$   
 $g$ 為二次電子動能轉為制動輻射能量之分率

71

## 結語

- 光子( $X$ 、 $\gamma$ )基礎特性
- 光子的應用
- 光子與物質作用的係數
  - 衰減係數( $\mu$ )
  - 能量轉移係數( $\mu_{tr}$ )
  - 能量吸收係數( $\mu_{ab}$ )
- 通量、能(量)通量
- 克馬、吸收劑量

72

### 3 輻射劑量

- 輻射健康效應
- 水中非限定線性能量轉移、相對生物效應、射質因數、輻射加權因數、組織加權因數
- 吸收、等效、等價、有效劑量
- 體內劑量、年攝入限度、推定空氣濃度、排放物濃度、氣態瀰漫
- 暴露、空氣克馬
- 暴露率常數、曝露率常數

73

### 輻射健康效應

「游離輻射防護安全標準」第2條第9款定義，輻射之健康效應區分如下：

- ▶ **機率效應(stochastic effect)**：指**致癌效應及遺傳效應**，其發生之**機率**與劑量大小成正比，而與嚴重程度無關，此種效應之發生**無劑量低限值**。
- ▶ **確定效應(deterministic effect)**：指導致組織或器官之**功能損傷**而造成之效應，其嚴重程度與劑量大小成比例增加，此種效應可能有**劑量低限值**。

74

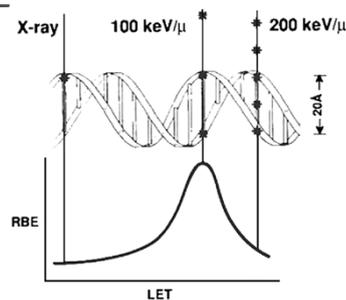
### 劑量的種類

「游離輻射防護安全標準」第2條第5款定義：

- **吸收劑量**：指單位質量物質吸收輻射之平均能量，其單位為**戈雷**，一千克質量物質吸收一焦耳能量為一戈雷。
- **器官劑量**：指單位質量之組織或器官吸收輻射之平均能量，其單位為**戈雷**。
- **等效劑量**：指人體組織或器官之吸收劑量與**射質因數**之乘積，其單位為**西弗**，射質因數依附表一之一(一)規定。

75

### 射質因數(1/2)



<http://www.nature.com/onc/journal/v22/n45/images/1206900f1.gif>

76

### 射質因數(2/2)

「游離輻射防護安全標準」附表一定義：

**射質因數**  $Q(L)$  為以國際放射防護委員會(ICRP)60號報告中規定之**水中非限定線性能量轉移**  $L$  表示之。

$$1 (L \leq 10)$$

$$Q(L) = 0.32L - 2.2 (10 < L \leq 100)$$

$$300/\sqrt{L} (L \geq 100)$$

式中  $L$  之單位為  $\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$

77

### 劑量的種類

「游離輻射防護安全標準」第2條第5款第5與第7目定義：

- **等價劑量(equivalent dose,  $H_T$ )**：指器官劑量與對應**輻射加權因數**(radiation weighting factor,  $W_R$ )乘積之和，其單位為西弗，輻射加權因數依附表一之一(二)規定。
- **有效劑量(effective dose,  $E$ )**：指人體中受曝露之各組織或器官之等價劑量與各該組織或器官之**組織加權因數**(tissue weighting factor,  $W_T$ )乘積之和，其單位為西弗，組織加權因數依附表一之二規定。

78

## 輻射加權因數

「游離輻射防護安全標準」附表一之一(二)：

- 輻射加權因數 $W_R$ 指為輻射防護目的，用於以吸收劑量計算組織與器官等價劑量之修正因數，係依體外輻射場之種類與能量或沉積於體內之放射性核種發射之輻射之種類與射質訂定者，能代表**各種輻射之相對生物效應**。

79

## 輻射加權因數[附表一之一(二)]

輻射種類與能量區間	輻射加權因數 $W_R$
所有能量之光子	1
所有能量之電子及 $\mu$ 介子	1
中子能量<10千電子伏(keV)	5
10千電子伏(keV) - 100千電子伏(keV)	10
>100千電子伏(keV) - 2百萬電子伏(MeV)	20
>2百萬電子伏(MeV) - 20百萬電子伏(MeV)	10
>20百萬電子伏(MeV)	5
質子(回跳質子除外)能量>2百萬電子伏(MeV)	5*
$\alpha$ 粒子，分裂碎片，重核	20

\*ICRP-103報告(2007年)建議值為2

80

## 組織加權因數

「游離輻射防護安全標準」附表一之二：

- 組織加權因數 $W_T$ 指為輻射防護目的，用於以各組織或器官等價劑量 $H_T$ 計算有效劑量之修正因數。此一因數係考慮**不同組織或器官對輻射曝露造成機率效應之敏感度**而訂定。

81

## 組織加權因數(附表一之二)

組織或器官	組織加權因數 $W_T$	組織或器官	組織加權因數 $W_T$
性腺	0.20	肝	0.05
骨髓	0.12	食道	0.05
結腸	0.12	甲狀腺	0.05
肺	0.12	皮膚	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
膀胱	0.05	其餘組織	0.05
乳腺	0.05	或器官	

82

## 組織加權因數(ICRP-103)

組織或器官	組織加權因數 $W_T$	組織或器官	$W_T$
胃	0.12	食道	0.04
肺	0.12	肝	0.04
結腸	0.12	膀胱	0.04
紅骨髓	0.12	皮膚	0.01
乳腺	0.12	骨表面	0.01
其餘組織或器官	0.12	腦	0.01
性腺	0.08	唾液腺	0.01
甲狀腺	0.04	全身	1

83

## ICRP-60號報告的危險度

健康損害	輻射工作人員 ( $10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ )	一般人 ( $10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ )
致命癌症	4.0	5.0
非致命癌症	0.8	1.0
嚴重遺傳變異	0.8	1.3
總計	5.6	7.3*

\*ICRP-103報告建議值為 $5.742 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

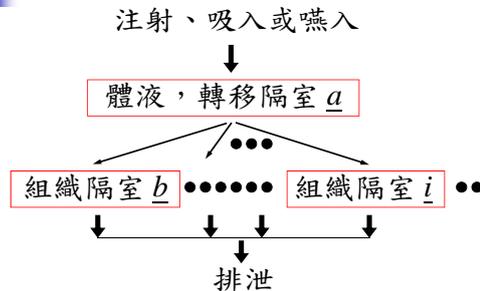
84

## 體內劑量(1/4) - 約定劑量

- 體內由呼吸或飲食等方式攝入放射性物質時，體內劑量值為時間之函數，為達成輻射劑量限制之目的，必須預先約定一計算體內劑量值之時間，此時之劑量即為**約定劑量(committed dose)**。
- 「游離輻射防護安全標準」定義：
  - ◆ **約定等價劑量**：指組織或器官攝入放射性核種後，經過一段時間所累積之等價劑量，其單位為西弗。一段時間為自放射性核種攝入之日起算，對17歲以上者以50年計算；對未滿17歲者計算至70歲。
  - ◆ **約定有效劑量**：指各組織或器官之約定等價劑量與組織加權因數乘積之和，其單位為西弗。

85

## 體內劑量(2/4) - 隔室模型



86

## 體內劑量(3/4)

- $H_T(50) = \sum_S U_S \hat{H}(T \leftarrow S)$   
 $H_T(50)$ : 約定等價劑量  
 $U_S$ : 計算約定等價劑量時，50年內源器官(S)中的衰變次數，即發射輻射或累積活度  
 $\hat{H}(T \leftarrow S)$ : 源器官(S)中每次衰變對靶器官(T)造成的平均等價劑量，即比等價劑量( $T \leftarrow S$ )
- $E(50) = \sum_T w_T H_T(50)$   
 $H_T(50)$ : 約定有效劑量  
 $w_T$ : 組織加權因數

87

## 體內劑量(4/4) - 例題

- 含2 mCi C-14的葡萄糖均勻分布在50克軟組織中，試問造成的吸收劑量率有多大？(C-14 β粒子的  $E_{max} = 0.156$  MeV)。
- ◆  $7.4 \times 10^7 \text{ s}^{-1} \times 0.156 \text{ MeV} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J MeV}^{-1} / (3 \times 0.05 \text{ kg}) = 6.157 \times 10^{-7} \text{ J s}^{-1} / 0.05 \text{ kg} = 12.3 \text{ mGy s}^{-1} = 44.3 \text{ mGy h}^{-1}$
- 一鈷60射源造成空間內某點處的吸收劑量率為15  $\mu\text{Gy/h}$ ，鈷60半化期為5.27年，請問該點處連續接受曝露10.54年累積的吸收劑量為何？

88

## 職業性體內曝露之管制(1/2)

- 個人體外曝露，可由熱發光劑量計(TLD)之紀錄進行管制；個人體內曝露，則無法每月以全身計測或生化分析等方式紀錄，於是必須管制放射性物質的年攝入量。
- 依據「游離輻射防護安全標準」第2條第7款定義，**年攝入限度(annual limit of intake, ALI)**指參考人在一年內攝入某一放射性核種而導致五十毫西弗之約定有效劑量或任一組織或器官五百毫西弗之約定等價劑量兩者之較小值。

89

## 職業性體內曝露之管制(2/2)

- 放射性物質的攝入量，仍然無法每月以全身計測或生化分析等方式紀錄，於是必須根據參考人在輕微體力之活動下，一年中將吸入**2400 m<sup>3</sup>**之空氣，推算出工作環境中放射性物質的最大許可濃度。
- 依據「游離輻射防護安全標準」第2條第8款定義，**推定空氣濃度(derived air concentration, DAC)**：為某一放射性核種之推定值，指該放射性核種在每一立方公尺空氣中之濃度。參考人在輕微體力之活動中，於一年中呼吸此濃度之空氣**2000小時**，將導致年攝入限度。

90

## 推定空氣濃度(1/2)

- 對以**攝入**(約定有效劑量)為主要限制之核種：由輻射工作人員之年有效劑量限度50 mSv除以 $DCF \times 1000 \times 2400$ 。其中劑量轉換因數(DCF)為附表三之一輻射工作人員吸入每單位攝入量放射性核種產生之約定有效劑量 $h(g)_{5 \mu m}$ (註：單位為 $Sv Bq^{-1}$ )；1000—調整mSv至Sv之單位轉換；2400—輻射工作人員參考人在輕度工作情況下每年吸入 $m^3$ 之空氣體積。

91

## 推定空氣濃度(2/2)

- 對以**氣態瀰漫**(體外曝露)為主要限制之核種：由輻射工作人員之年有效劑量限度50 mSv除以 $DCN \times 1000 \times 83.3$ 。其中惰性氣體劑量轉換因數(DCN)為附表三之十成年人受惰性氣體曝露之有效劑量率[註：單位為 $Sv d^{-1} / (Bq m^{-3})$ ]；1000—調整mSv至Sv之單位轉換；83.3—調整天至年職業曝露時間2000小時。
- 附表三之十所列氣態瀰漫核種為氫(Ar)、氬(Kr)、氙(Xe)3類核種。

92

## 空氣中排放物濃度

- 「空氣中排放物濃度」對以**攝入**(約定有效劑量)為主要限制之核種：由一般人之年有效劑量限度1 mSv除以 $DCA \times 1000 \times 22.2 \times 365$ 。其中劑量轉換因數(DCA)為附表三之五一般人之個人(>17歲)吸入每單位攝入量放射性核種產生之約定有效劑量(註：單位為 $Sv Bq^{-1}$ )；1000—調整mSv至Sv之單位轉換；22.2—一般人之個人(>17歲)每天吸入 $m^3$ 之空氣體積；365—調整天至年。
- 「空氣中排放物濃度」對以**氣態瀰漫**(體外曝露)為主要限制之核種：由一般人之年有效劑量限度1 mSv除以 $DCN \times 1000 \times 365$ 。其中惰性氣體劑量轉換因數(DCN)為附表三之十成年人受惰性氣體曝露之有效劑量率[註：單位為 $Sv d^{-1} / (Bq m^{-3})$ ]；1000—調整mSv至Sv之單位轉換；365—調整天至年。

93

## 水中排放物濃度

- 「水中排放物濃度」由一般人之年有效劑量限度1毫西弗除以 $DCW \times 1000 \times 1.095$ 。其中水劑量轉換因數(DCW)為附表三之四一般人之個人(>17歲)吸入每單位攝入量放射性核種產生之約定有效劑量(註：單位為 $Sv Bq^{-1}$ )；1000—調整毫西弗至西弗之單位轉換；1.095—一般人之個人(>17歲)每年吸入 $m^3$ 之水體積。
- 「污水下水道月平均排放濃度」為游離輻射防護安全標準第十四條所訂之濃度，其值由一般人之年有效劑量限度1毫西弗除以 $DCW \times 1000 \times 1.095 \times 0.1$ 。其中水劑量轉換因數(DCW)、1000、1.095如「水中排放物濃度」之說明；0.1為誤飲污水下水道水量修正因數。

94

## 暴露(1/2)

- 暴露**(exposure, X)：電磁輻射在單位質量空氣中因游離所產生之電荷量。
- 暴露代表場所電磁輻射的強度。
- 傳統單位(倫琴, Röntgen, R)：使 $1 cm^3$ 空氣產生電量(目前電量單位為庫侖, Coulomb, C)為1靜電庫侖(1 SC)之電磁輻射強度為1 R。

95

## 暴露(2/2)

- $X = dQ/dm$
- dQ是光子在質量為dm的空氣中釋放出來的所有電子，完全被阻止在空氣時所產生的所有電荷值。
- 1倫琴(R) =  $2.58 \times 10^{-4} C kg^{-1}$
- 暴露的概念只適用於**電磁輻射**；定義中所述的電荷與質量，僅只針對**空氣**。

96

## 暴露、克馬、空氣克馬

- $K = dE_{tr}/dm$
- $dE_{tr}$  為不帶電(間接)游離輻射在質量為  $dm$  的某一物質內釋出的全部帶電游離粒子的初始動能的總和。
- 克馬無暴露的使用限制性。
- **空氣克馬** 可取代暴露的定量觀念，已被廣泛使用於法規，代表場所間接游離輻射的強度。

97

## 放射性物質的暴露率

- 放射性物質對場所暴露的貢獻主要源於加馬。
- 計算放射性物質對場所造成暴露時，通常忽略射源自吸收(點射源)、忽略空氣衰減等。
- 空氣對60 keV至2 MeV光子之質量能量吸收係數 ( $\mu_{ab}/\rho$ ) 約為  $0.027 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 。
- 一活度為  $C \text{ Ci}$  之某射源(每次衰變可釋出能量為  $E \text{ MeV}$  之  $\gamma$ )，距離此射源  $r \text{ m}$  外之暴露率 ( $\dot{X}$ ) 計算方式如後：

98

## 放射性物質的暴露率

- $C \text{ Ci} = C \times 3.7 \times 10^{10} \text{ (Bq s)} \text{ s}^{-1}$
- 能通率： $\times E \text{ MeV (Bq s)}^{-1}$
- 能量通量率： $\div [4 \pi (r \times 100 \text{ cm})^2]$
- 吸收劑量率： $\times (\mu_{ab}/\rho \div 0.027) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$
- $\times 1.6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} / (\text{MeV g}^{-1})$
- 暴露率： $\times 1 \text{ C (34 J)}^{-1}$
- $\times 3600 \text{ s h}^{-1} \times 1 \text{ R} / (2.58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1})$

99

## 放射性物質的暴露率

- 承前，一活度為  $C \text{ Ci}$  之某射源(每次衰變可釋出能量為  $E \text{ MeV}$  之  $\gamma$ )，則距離此射源  $r \text{ m}$  外之暴露率 ( $\dot{X}$ ) 計算公式(假設空氣對光子之  $\mu_{ab}/\rho$  為  $0.027 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ )：

$$\dot{X} \text{ (R h}^{-1}\text{)} = 0.52 \frac{CE}{r^2}$$

100

## 暴露率常數

- 為了計算上的方便，定義距離  $1 \text{ Ci}$  某核種  $1 \text{ m}$  之暴露率為 **暴露率常數** 或 **比加馬發射** ( $\Gamma$ , specific gamma emission)。
- $\therefore \Gamma = 0.52 E$  (單位為  $\text{R m}^2 \text{ Ci}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )
- 暴露率 ( $\dot{X}$ ) 計算方式如下：

$$\dot{X} = \frac{0.52 CE}{r^2} = \Gamma \frac{C}{r^2}$$

101

## 暴露率常數

- 若使用國際單位(活度使用  $\text{MBq}$ ，暴露率使用  $\text{C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )，則距離  $1 \text{ MBq}$  某核種(每次衰變將釋出總能量為  $E \text{ MeV}$  之光子能量)  $1 \text{ m}$  處之暴露率為  $3.65 \times 10^{-9} E \text{ (C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}\text{)}$
- $\therefore \Gamma = 3.65 \times 10^{-9} E$  (單位為  $\text{C kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )
- $^{131}\text{I}$  的  $\Gamma$  值為  $1.53 \times 10^{-9} \text{ C kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ，則距  $10 \text{ MBq}$  射源  $3 \text{ m}$  處的暴露率為  $1.53 \times 10^{-9} \times 10 \div 3^2 = 1.7 \times 10^{-9} \text{ C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$

102

## 部分核種之暴露率常數

核種	暴露率常數, $\Gamma$	
	R m <sup>2</sup> Ci <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	C kg <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> MBq <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
<sup>24</sup> Na	1.84	12.8×10 <sup>-9</sup>
<sup>42</sup> K	0.14	1.39×10 <sup>-9</sup>
<sup>60</sup> Co	1.32	9.19×10 <sup>-9</sup>
<sup>137</sup> Cs	0.33	2.3×10 <sup>-9</sup>
<sup>192</sup> Ir	0.48	3.34×10 <sup>-9</sup>
<sup>226</sup> Ra	0.825	5.75×10 <sup>-9</sup>

103

## 暴露率常數中曝露的種類

- **暴露**：R或C kg<sup>-1</sup>。
- **空氣克馬**：rad或Gy。以W值進行暴露與空氣克馬之轉換。
- 制動輻射忽略不計，空氣克馬≡**空氣吸收劑量**。
- **人體吸收劑量**：rad或Gy。以Bragg-Gray原理進行空氣吸收劑量與人體吸收劑量之轉換。
- **等價劑量或有效劑量**：rem或Sv。以輻射加權因數、組織加權因數進行吸收劑量與等價劑量、有效劑量之轉換。

104

## W值

- 輻射線平均造成介質游離一次所需能量，稱為W值。
- 每游離一次，即造成一對離子對(或電子電洞對)，ion pair，簡寫為i.p.或ip。產生1.6×10<sup>-19</sup> C電量。
- W值單位通常以eV或eV ip<sup>-1</sup>表示。例如α與β造成空氣游離一次約各需36與34 eV。造成水游離一次則約需22 eV。造成半導體游離一次約需3 eV。

105

## 暴露—吸收劑量

- 暴露為1 C kg<sup>-1</sup>時，空氣克馬為33.85 Gy。
- 克馬與吸收劑量差別於制動輻射的產率。由於空氣為低原子序物質，一般δ射線與空氣作用時，制動輻射的產率趨近於0，可忽略不計，因此，空氣克馬≡空氣吸收劑量。
- 組織的吸收劑量則須利用**布拉格-戈雷原理**中組織與空氣的相對質量阻擋本領比值(≡1.1)計算。

106

## 4 輻防法規

- ◆ 游離輻射防護安全標準
- ◆ 放射性物質安全運送
- ◆ 輻射防護人員
- ◆ 輻射源、輻射作業危險度分類
- ◆ 操作人員分類
- ◆ 輻射作業管理
- ◆ 罰則

107

## 游離輻射防護法

- 第1條 為防制游離輻射之危害，維護人民健康及安全，特依輻射作業必須**合理抑低**其輻射劑量之精神制定本法...
- 第5條 為限制輻射源或輻射作業之輻射曝露，主管機關應參考**國際放射防護委員會**最新標準訂定**游離輻射防護安全標準**，並應視實際需要訂定相關導則，規範輻射防護作業基準及人員劑量限度等游離輻射防護事項。

108

## 輻射防護哲學

- 游離輻射防護安全標準第6條
- 輻射作業應防止確定效應之發生及抑低機率效應之發生率，且符合下列規定：
  - 一. 利益須超過其代價。(正當化)
  - 二. 考慮經濟及社會因素後，一切曝露應合理抑低。(最適化)
  - 三. 個人劑量不得超過本標準之規定值。(限制化)

109

## 正當化判斷(1/2)

Doctor, don't you think I should have a new chest CT scan? Just to be on the safe side



No Ms Williams, I really think that this examination will not add something to the correct assessment of your condition

**Resist patient wishes to be examined when you feel it is not necessary**

資料來源：The Radiation Protection of Patients (RPOP), the International Atomic Energy Agency (IAEA)

110

## 正當化判斷(2/2)

CT scans are among the most common radiation dose burdening examinations for patients

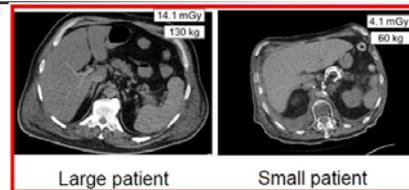


The effective dose from one chest CT scan may be equal to the corresponding dose of about 500 PA chest X rays

資料來源：The Radiation Protection of Patients (RPOP), the International Atomic Energy Agency (IAEA)

111

## 最適化判斷(1/2)

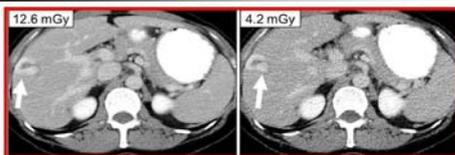


**Adjust exposure parameters according to patient and body part**

Images courtesy of: MK Kaira, S. Singh, MGH Webster Center for Advanced Research and Education in Radiation

112

## 最適化判斷(2/2)



High quality /Crisp images may look nice but they impart higher radiation dose to patients

Start using images with some noise without loss of diagnostic information

Images courtesy of: MK Kaira, S. Singh, MGH Webster Center for Advanced Research and Education in Radiation

113

## 限制化

劑量限度—「游離輻射防護安全標準」

第7條 輻射工作人員

第10條 16歲以上未滿18歲者接受輻射作業教學或工作訓練

第11條 告知懷孕之女性輻射工作人員

第12條 一般人

第13條 設施經營者—輻射作業時對一般人

第18條 緊急曝露

114

## 游離輻射防護法第6條 放射性物質安全運送規則

- 第6條 本規則所使用之專用名詞，其定義如下：
  8. **污染**：指在物體表面每平方公分面積上之貝他、加馬及低毒性阿伐發射體在**0.4貝克**以上，或其他阿伐發射體在**0.04貝克**者以上。
  14. **包件**：指交運之包裝及其放射性包容物。
  25. **運送指數**：指為管制輻射曝露配賦予單一包件、外包裝、罐槽或貨櫃，或未包裝之第一類低比活度物質或第一類表面污染物體之單一數值。
  31. **A<sub>1</sub>值**：指允許裝入**甲型包件**之特殊型式放射性物質之最大活度。**A<sub>2</sub>值**：指允許裝入甲型包件之特殊型式以外其他放射性物質之最大活度。A<sub>1</sub>及A<sub>2</sub>值之規定，見附表七。

115

## 放射性物質安全運送規則

■ 第9條 放射性物質之運送，應依工作人員所受輻射曝露之大小及其可能性，採取下列輻射防護措施：

- 一. 所接受之**年有效劑量**不可能超過**1毫西弗**者，毋需規定其特別工作模式及劑量之偵測或分析。
- 二. 所接受之**年有效劑量**可能大於1毫西弗，**未達6毫西弗**者，應定期或必要時對輻射作業場所執行環境監測及輻射曝露評估。
- 三. 所接受之**年有效劑量**可能**大於6毫西弗**，除應定期或必要時對輻射作業場所執行環境監測及輻射曝露評估外，並應執行個別人員偵測及醫務監護。

116

## 放射性物質安全運送規則

- 第43條 託運物品除以專用運送外，其他個別包件或外包裝之**運送指數均不得超過10**。
- 第44條 包件或外包裝除以專用運送，或作專案核定運送外，其外表面上之任一點，最大**輻射強度不得大於每小時2毫西弗**。
- 第45條 以**專用運送**之包件，其外表面上任一點之最大**輻射強度不得大於每小時10毫西弗**。
- 第71條 ...車輛核定載人座位，其**輻射強度不得超過每小時0.02毫西弗**。但配戴個人偵測設備之人員，不在此限。

117

## 包件及外包裝之分類

狀 況		類 別
運送指數(TI)	外表面任一點之最大輻射強度	
0	在每小時0.005毫西弗以下	I—白
0 < TI ≤ 1	大於每小時0.005毫西弗 但在每小時0.5毫西弗以下	II—黃
1 < TI ≤ 10	大於每小時0.5毫西弗 但在每小時2.0毫西弗以下	III—黃
10 < TI	大於每小時2.0毫西弗 但在每小時10毫西弗以下	III—黃 並為專用

118

## 游離輻射防護法

- 第7條 設施經營者應依其輻射作業之**規模及性質**，依主管機關之規定，設**輻射防護管理組織**或置**輻射防護人員**，實施輻射防護作業。
 

前項輻射防護作業，設施經營者應先擬訂**輻射防護計畫**，報請主管機關核准後實施。未經核准前，不得進行輻射作業。

第一項輻射防護管理組織及人員之設置標準、輻射防護人員...之管理辦法，由主管機關會商有關機關定之。

119

## 輻射防護管理組織及 輻射防護人員設置標準(1/3)

- 沿革：中華民國91年12月11日行政院原子能委員會令發布全文17條。
- 第4條 設施經營者具有附表一所列設備、業務或規模者，應設立**輻射防護管理組織**，並依表列名額配置輻射防護業務單位之各級**輻射防護人員**。
- 第5條 設施經營者具有附表二所列設備、業務或規模者，應依表列名額配置各級**輻射防護人員**。

120

## 輻射防護管理組織及 輻射防護人員設置標準(2/3)

- 應設置輻射防護管理**組織**、輻射防護**業務單位**、**輻射防護人員**：
  - 放射診斷、核子醫學、放射治療三項診療業務：輻射防護師1名、輻射防護員2名。
  - 放射診斷、核子醫學、放射治療任二項診療業務者：輻射防護師1名、輻射防護員1名。
- 應配置**輻射防護人員**：
  - 僅從事放射治療業務：輻射防護師1名。
  - 僅放射診斷或核子醫學：輻射防護員1名。

121

## 輻射防護管理組織及 輻射防護人員設置標準(3/3)

- **可發生游離輻射設備** 巔值電壓達500 kV以上，未達30 MV者：輻射防護員一名。30 MV以上者：輻射防護管理組織、輻射防護業務單位、輻射防護師一名、輻射防護員一名。
- **放射線照相檢驗業** 使用或持有可發生游離輻射設備或放射性物質之機具：10(含)部以下、11至15部、16至20部-輻射防護員1、2、3名。21部以上-輻射防護管理組織、輻射防護業務單位、輻射防護師1名、輻射防護員3名。

122

## 輻射防護人員管理辦法

- 第2條 本法第7條所稱之輻射防護人員分為**輻射防護師**、**輻射防護員**。

輻射防護專業測驗分輻射防護師、輻射防護員兩級測驗。
- 第3條 輻射防護人員申請認可之資格如下：(略)
- 第6條 輻射防護人員認可證書有效期限為**6年**。
- 第7條 ...**學術活動**或**繼續教育**之積分，輻射防護師至少**96點**以上，輻射防護員至少**72點**以上。

123

## 游離輻射防護法

- 第17條 為**提昇輻射醫療之品質**，減少病人可能接受之曝露，醫療機構使用經主管機關公告應**實施醫療曝露品質保證**之放射性物質、可發生游離輻射設備或相關設施，應依醫療曝露品質保證標準擬訂醫療曝露品質保證計畫，報請主管機關核准後始得為之。

...

第1項**醫療曝露品質保證標準**與前項**醫療曝露品質保證組織、專業人員設置及委託相關機構之管理辦法**，由主管機關會同中央衛生主管機關定之。

124

## 輻射醫療曝露品質保證組織與專業 人員設置及委託相關機構管理辦法

- 第2條 醫療機構使用下列之放射性物質、可發生游離輻射設備或相關設施時，應設置醫療曝露品質保證組織及專業人員或委託符合規定之相關機構，實施醫療曝露品質保證計畫相關事項：
  - 一. 醫用直線加速器。
  - 二. 含鈷六十放射性物質之遠隔治療機。
  - 三. 含放射性物質之遙控後荷式近接治療設備。

125

## 輻射醫療曝露品質保證組織與專業 人員設置及委託相關機構管理辦法

- 四. 電腦斷層治療機。
  - 五. 電腦刀。
  - 六. 加馬刀。
  - 七. 乳房X光攝影儀。
  - 八. 診斷用電腦斷層掃描儀、核醫用電腦斷層掃描儀及電腦斷層模擬定位掃描儀。
  - 九. X光模擬定位儀。
- 前項專業人員資格、人數、委託之相關機構及相關事項依附表之規定。

126

## 輻射醫療曝露品質保證標準

- 第4條 醫用直線加速器應實施之校驗項目、頻次及結果或誤差容許值依附表一之規定。
- 第10條 第4條至前條設備校驗結果偏離誤差容許值或功能異常時，醫療曝露品質保證專業人員應即報告醫療曝露品質保證組織主管，並...
- 第12條 本標準規定之各項紀錄，應保存三年。

127

## 游離輻射防護法

第29條 ...放射性物質、可發生游離輻射設備或輻射作業，應依主管機關之指定申請許可或登記備查。...

置有高活度放射性物質或高能量可發生游離輻射設備之高強度輻射設施之運轉，應由合格之運轉人員負責操作。...

申請許可、登記備查之...與運轉人員...之辦法，由主管機關定之。

涉及醫用者，並應符合中央衛生法規之規定。

128

## 危險度分類(1/2)

危險度分類	設備電壓	表面劑量率
高強度輻射設施	>30MV	-
許可	150kV~30MV	5 cm處>5 μSv/h
登記備查	30kV~150kV	5 cm處<5 μSv/h 10 cm處>1 μSv/h
豁免管制	<30kV	10 cm處<1 μSv/h

129

## 危險度分類(2/2)

危險度分類	密封物質	非密封物質
高強度輻射設施	>10 <sup>15</sup> Bq	>10 <sup>15</sup> Bq
許可	I、II、III	>100 EL
登記備查	IV、V	EL~100 EL
豁免管制	<V類活度	豁免管制量(EL)

130

## 游離輻射防護法

第30條 放射性物質之生產與其設施之建造及可發生游離輻射設備之製造，非經向主管機關申請審查，發給許可證，不得為之。

放射性物質生產設施之運轉，應由合格之運轉人員負責操作；其...辦法，由主管機關定之。...

第1項放射性物質之生產或可發生游離輻射設備之製造，屬於醫療用途者，並應符合中央衛生法規之規定。

131

## 游離輻射防護法

■ 第31條 操作放射性物質或可發生游離輻射設備之人員，應受主管機關指定之訓練，並領有輻射安全證書或執照。...

前項證書或執照，於操作一定活度以下之放射性物質或一定能量以下之可發生游離輻射設備者，得以訓練代之；...

第1項人員之...管理辦法，由主管機關會商有關機關定之。

132

## 操作人員規範

類別	資格(小時(學分))	繼續教育	證照
操作訓練	3 (-)	3/年	-
登記備查	18 (2)	3/年	-
許可	36 (4)	36/6年	輻安證書
高強度	30 + 160 (-)	36/6年	運轉人員
醫用	醫學、牙醫、醫 放系畢業	120/6年	醫、牙醫 、醫放師

133

## 游離輻射防護法

- 第32條 ...核發之**許可證**，其有效期間最長為**5年**。期滿需繼續輻射作業，應於屆滿前，依主管機關規定期限**申請換發**。

...

...許可證有效期間內，設施經營者應對...可發生游離輻射設備或其設施，**每年至少偵測一次**，提報主管機關偵測證明備查，偵測項目由主管機關定之。

134

## 輻射安全測試

- 管制區內操作人員或工作人居佔位置之**劑量率**最高不超過10  $\mu\text{Sv/h}$ 。
- 管制區外距任何可以接近四週障壁外表面30 cm處之**劑量率**最高不超過0.5  $\mu\text{Sv/h}$ 。
- **登記類**(每5年)：「設備」正常使用時可接近表面5 cm處劑量率小於5  $\mu\text{Sv/h}$ 。

135

## 游離輻射防護法第34條(1/2)

- 第1項 放射性物質、可發生游離輻射設備之使用或其生產製造設施之運轉，其所需具備之安全條件與原核准內容不符者，設施經營者應向主管機關申請核准**停止使用或運轉**，並...
- 游離輻射防護法施行細則第19條  
一. ...**操作人員**離職，而未於**30日**內補足者。(待續)

136

## 游離輻射防護法第34條(2/2)

- 二. ...**輻射防護人員**離職，而未於**3個月**內補足者。
- 三. ...機具、...設備或其生產製造**設施損壞**，而未於**6個月**內修復者。
- 四. 放射性物質活度衰減至無法達成原申請目的之用途，而未於**6個月**內**更換**者。
- 五. 因外力不可抗拒因素致輻射作業場所**屏蔽**或防止輻射洩漏設施損壞，而未於**6個月**內修復者。
- 六. **其他**經主管機關認定之情形。

137

## 游離輻射防護法第35條

- 第1項 放射性物質、可發生游離輻射設備之**永久停止使用**或其生產製造設施之永久停止運轉，...處理期間不得超過**3個月**。但經主管機關核准者，得延長之。
- 第2項 ...高強度輻射設施永久停止運轉後**6個月**內，設施經營者應擬訂設施廢棄之**清理計畫**，報請主管機關核准後實施，應於永久停止運轉後**3年**內完成。

138

## 游離輻射防護法第36條

- 放射性物質、可發生游離輻射設備或其生產製造設施有下列情形之一者，視為永久停止使用或運轉，應依前條**(永久停止使用)**之規定辦理：
- 第1款 ...未依第34條第1項規定，報請主管機關核准停止使用或運轉，持續達**1年以上**。

139

## 放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法第54條(2/2)

- 第1項 設施經營者使用或持有半化期大於**30天**之**貝他**或**加馬核種**活度大於**370萬貝克**或**阿伐核種**活度大於**37萬貝克**之密封放射性物質者，應依第3項規定時間，實施密封放射性物質**擦拭測試**，並留存紀錄備查。
- 第3項 密封放射性物質之擦拭報告，設施經營者應依下列規定時間實施：
  - 一. 遠隔治療設備、遙控後荷式**治療設備**用之密封放射性物質為**半年**實施1次。(待續)

140

## 放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法第54條(2/2)

- 二. 其他用途之密封放射性物質為**每年**實施1次。
- 三. **毒氣偵檢器**中所含之**鐳241**為**每3年**實施1次。
- 四. 其他經主管機關公告者應於規定時間實施。
- 第4項 放射性核種為**鐳**者，其擦拭測試應包含**氫氣洩漏測試**。
- 第5項 **擦拭測試結果大於185貝克**者，設施經營者應即停止使用，並於**7日內**向主管機關申報。

141

## 游離輻射防護法罰則

### 第4章 第38-50條為罰則

- 對有下列情形者，處**3年以下有期徒刑、拘役**或**科或併科新臺幣3百萬元以下罰金**：
- (摘要)擅自或未依核准之輻射防護計畫進行輻射作業；擅自排放含放射性物質之廢氣或廢水；未依規定取得許可、許可證或經同意登記，擅自進行輻射作業；未依規定取得許可證，擅自進行生產或製造，致**嚴重污染環境**。
- 前項所定**嚴重污染環境之標準**，由主管機關會同有關機關定之。

142

## 嚴重污染環境輻射標準

- 一般人**年有效劑量**達10毫西弗者。
- 一般人**體外曝露**之劑量，於1小時內超過0.2毫西弗。
- **空氣**中2小時內之平均放射性核種濃度超過主管機關公告之年連續**空氣中排放物濃度**之1000倍。
- **水中**2小時內之平均放射性核種濃度超過主管機關公告之年連續**水中排放物濃度**之1000倍。
- 放射性核種超過附表**土壤**中放射性核種活度濃度嚴重污染標準規定，且污染面積達1000平方公尺以上。

143

## 游離輻射防護法第41、43條

- 第41條 (第5款)未依第29條第2項規定取得**許可**或**許可證**，擅自進行**輻射作業**，(第6款)未依第30條第1項規定取得許可證，擅自進行**生產、建造或製造**，處新臺幣**60萬元以上300萬元以下罰鍰**，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業；必要時，廢止其許可、許可證或登記。
- 第43條 (第4款)未依第29條第3項規定**同意登記**，擅自進行**輻射作業**，處新臺幣**10萬元以上50萬元以下罰鍰**，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業。

144

## 游離輻射防護法第42、43、45條

- 第42條 (第10款) 僱用無**運轉人員執照**人員操作或無運轉人員執照人員擅自操作者，處新臺幣**40萬元以上200萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業。
- 第43條 (第5款) 僱用無**輻射安全證書**人員操作或無輻射安全證書人員擅自操作者，處新臺幣**10萬元以上50萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業。
- 第45條 (第4款) 僱用**未經訓練**之人員操作或未經訓練而擅自操作，處新臺幣**4萬元以上20萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業。

145

## 游離輻射防護法

- 第18條 醫療機構對於協助病人接受輻射醫療者，其有遭受曝露之虞時，應**事前告知**及**施以適當之輻射防護**。
- 第42條 有下列情形之一者，處新臺幣**40萬元以上200萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次**連續處罰**，並得令其**停止作業**；必要時，**廢止其許可、許可證或登記**：...(第7款)違反第18條規定，未對協助者施以輻射防護。

146

## 游離輻射防護法

- 第45條 有下列情形之一者，處新臺幣**4萬元以上20萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其**停止作業**：...(第1款)依**第18條**規定有告知義務，未依規定告知。

147

## 游離輻射防護法

- 第43條 有下列情形之一者，處新臺幣**10萬元以上50萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業：...(第1款)違反第...17條第1項(擬訂與實施醫療曝露品質保證計畫)或第2項(設**醫療曝露品質保證組織、專業人員**或委託相關機構，辦理醫療曝露品質保證計畫相關事項)規定。

148

## 游離輻射防護法

- 第43條 有下列情形之一者，處新臺幣**10萬元以上50萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業：...(第1款)違反第7條第1項(設施經營者應依其輻射作業之規模及性質，依主管機關之規定，**設輻射防護管理組織或置輻射防護人員**，實施輻射防護作業)...規定。

149

## 游離輻射防護法

- 第15條 為確保輻射工作人員所受職業曝露不超過劑量限度並合理抑低，雇主應對輻射工作人員實施**個別劑量監測**。...
- 第43條 有下列情形之一者，處新臺幣**10萬元以上50萬元以下**罰鍰，並令其限期改善；屆期未改善者，按次連續處罰，並得令其停止作業：...(第3款)未依第15條第1項規定實施人員劑量監測。

150



## 游離輻射防護法

- 第7條第4項 雇主對在職之輻射工作人員應**定期**實施從事輻射作業之防護及預防輻射意外事故所必要之**教育訓練**，並保存紀錄。  
輻射工作人員對於前項教育訓練，有接受之**義務**。
- 第44條 輻射工作人員有下列情形之一者，處新臺幣**2萬元以下**罰鍰：(第1款)違反第14條第5項規定，**拒不接受教育訓練**。

151