

# 輻射劑量學基礎

龍門核能發電廠 梁天瑞

中華民國110年03月12日



# 輻射劑量學基礎

---

- 輻射與物質作用
- 輻射生物效應
- 輻射劑量學觀念
- 低劑量輻射健康效應

The background is a deep blue with intricate, glowing patterns that resemble light trails or energy flows. A prominent feature is a large, dark, diamond-shaped outline in the center. The overall aesthetic is futuristic and scientific.

# 輻射與物質作用

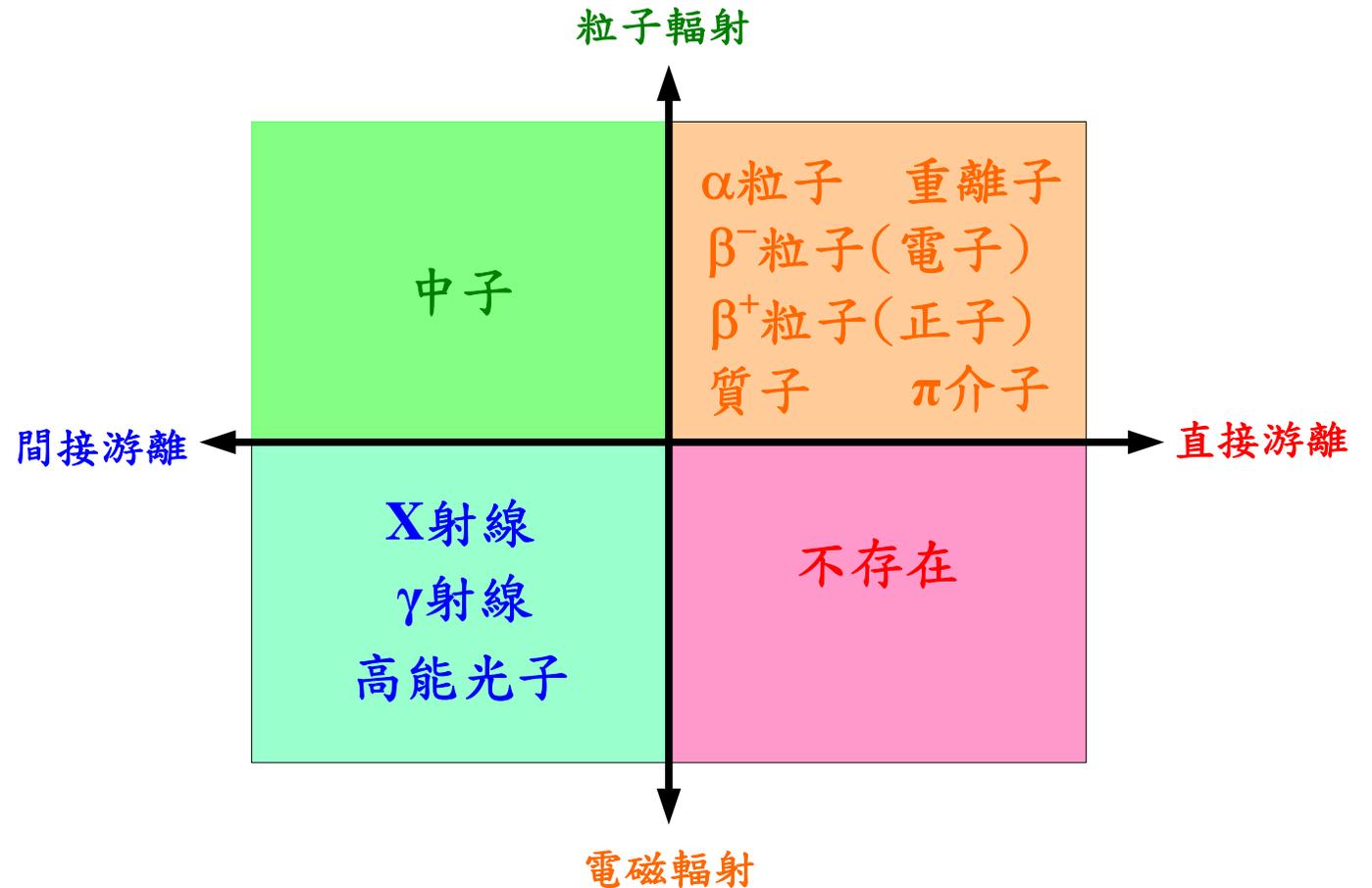
# 輻射與物質作用

---

- 游離輻射
- 直接游離粒子輻射( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p$ )與物質作用
  - 作用機制
  - 阻擋本領(stopping power)
- 間接游離電磁輻射( $x$ ,  $\gamma$ )與物質作用
  - 作用機制
  - 衰減(attenuation), 轉移(transfer), 吸收(absorption)

# 輻射與物質作用 – 游離輻射

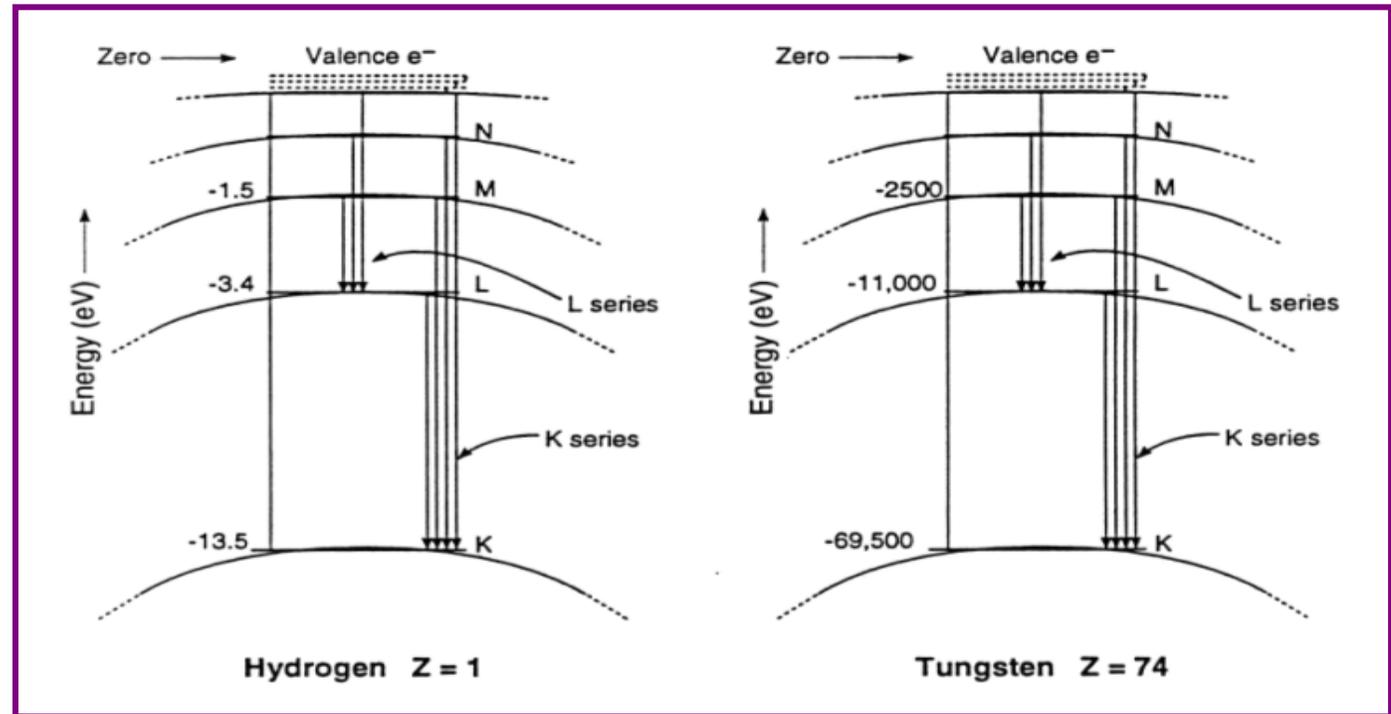
- 游離輻射：直接或間接使物質發生游離作用之電磁輻射或粒子輻射



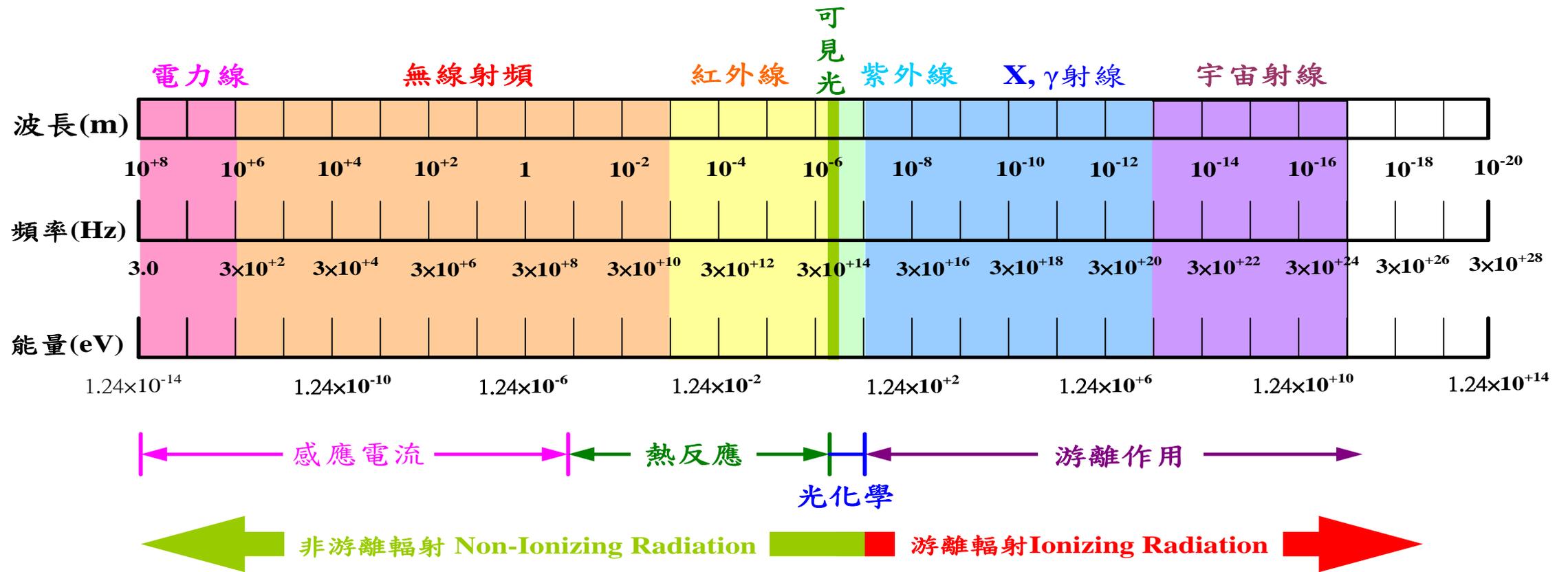
# 輻射與物質作用 – 游離輻射

- **游離能** (Ionization energy,  $E_I$ ) : 指將一個電子從孤立的原子、離子或分子移至無限遠處所需能量

$$E_{I,H} = -\frac{13.6 \cdot Z^2}{n^2} [\text{eV}]$$



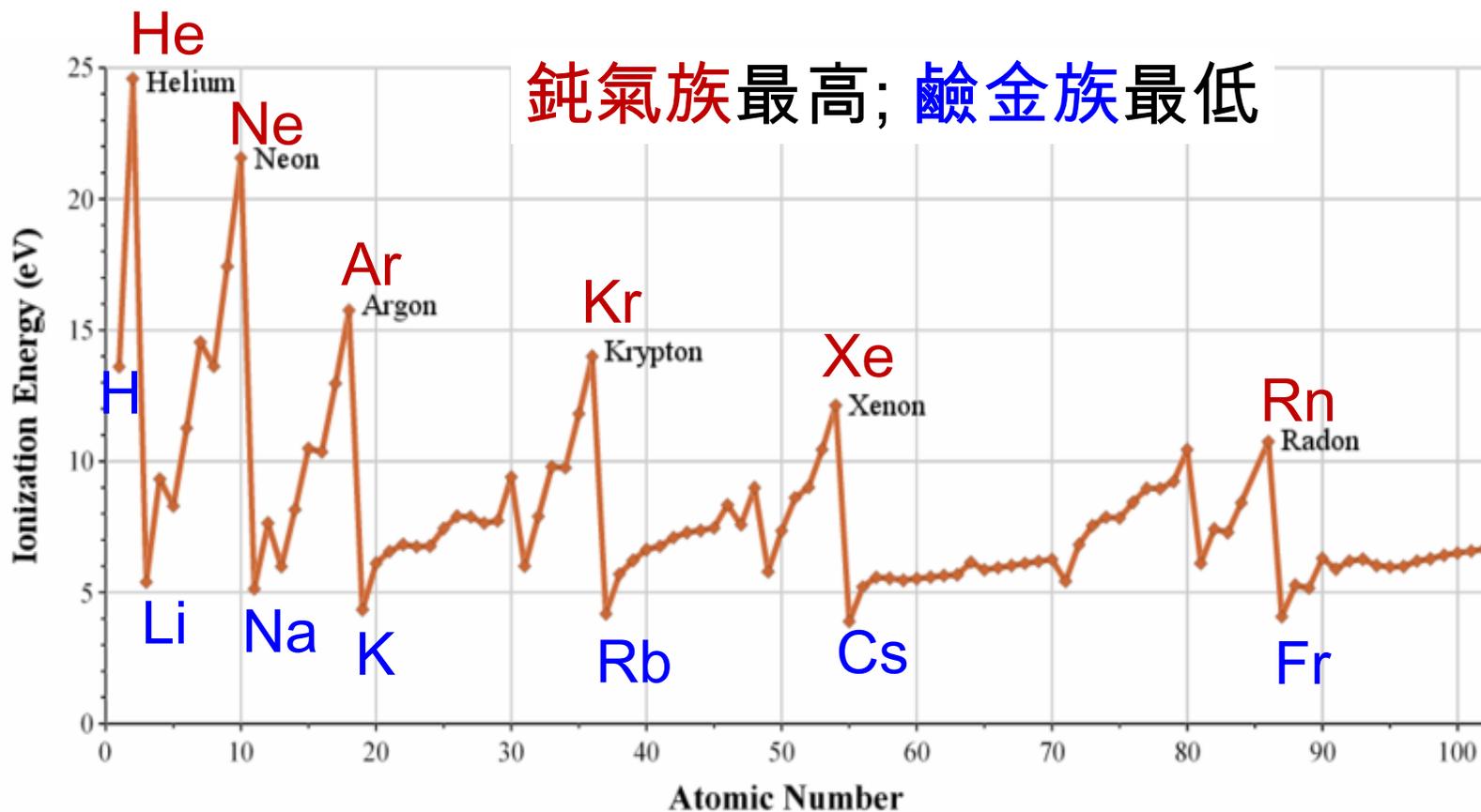
# 輻射與物質作用 – 游離輻射



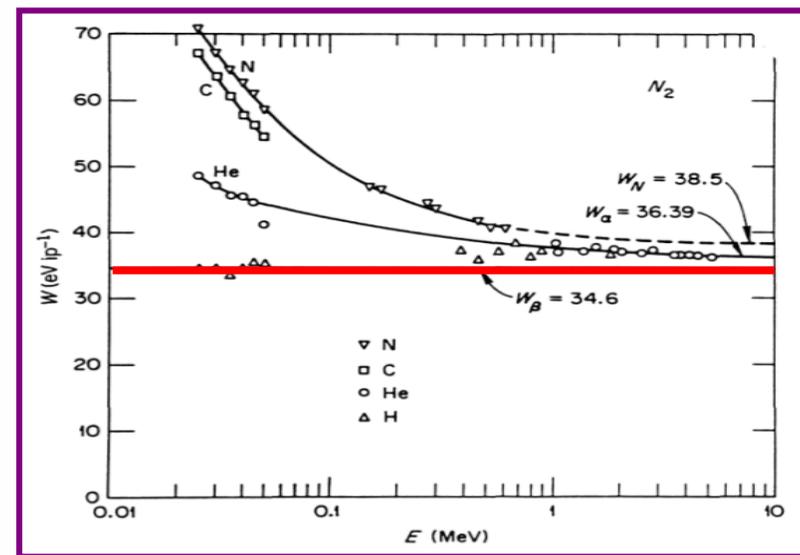
EUV (10-121nm)即屬游離輻射

# 輻射與物質作用 – 游離輻射

## ■ 游離能與元素週期性有密切關聯



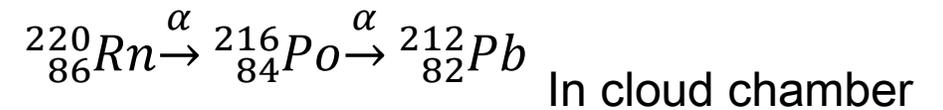
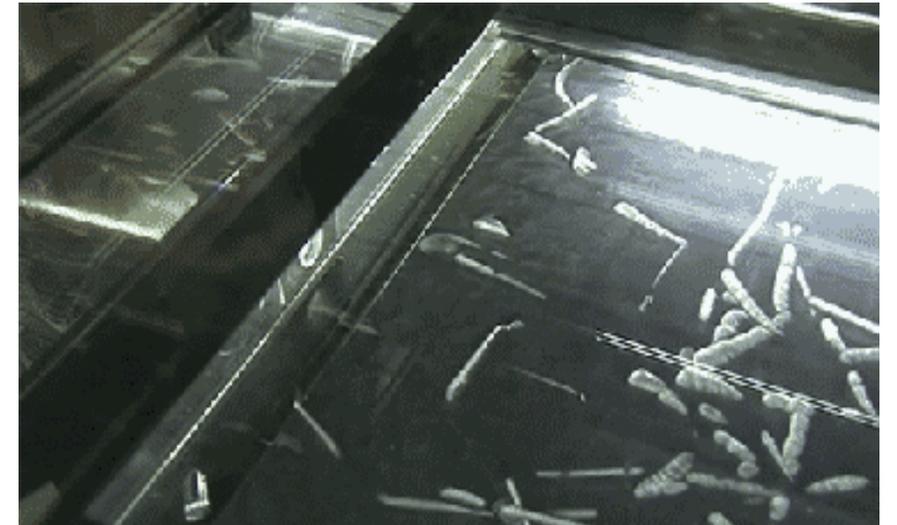
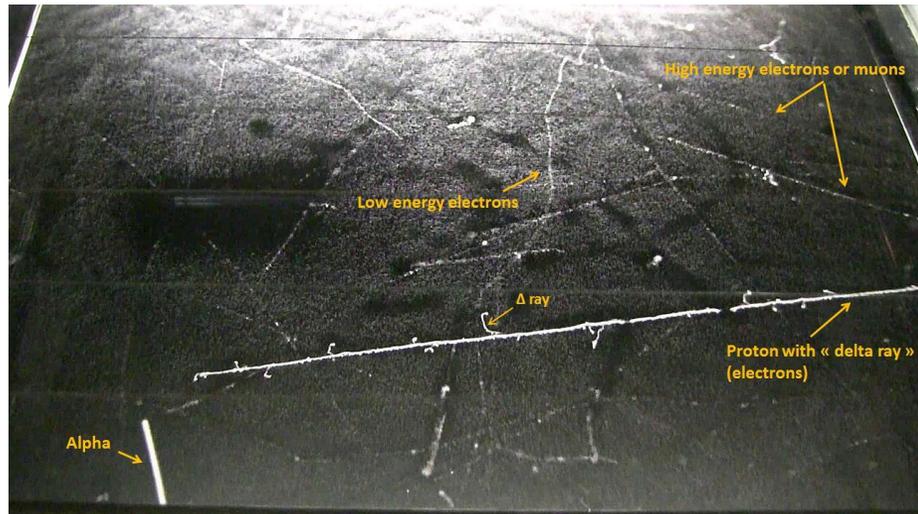
空氣游離能  $\approx 34 \text{ eV}$



# 輻射與物質作用 – 游離輻射

## ■ 帶電粒子的游離作用 ➡ 庫倫力 ➡ 直接游離

- 重帶電粒子( $\alpha$ , HI) ➡ 軌跡粗直
- 輕帶電粒子( $e^-$ ) ➡ 軌跡細, 末端受電磁場影響而曲折變形



# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 1.作用機制

- 重帶電粒子與物質作用有5種：
  - 與外圍電子產生彈性碰撞：Coulomb Force → Ionization, 主要能量轉移機制
  - 與外圍電子產生非彈性碰撞：粒子能量與外圍電子 binding energy 接近時, 無能量損失
  - 與原子核產生非彈性碰撞：bremsstrahlung
  - 與原子核產生彈性碰撞：路徑偏移, 無能量損失
  - Transmutation： $^{14}\text{N}(\alpha, ^2\text{H})^{16}\text{O}$

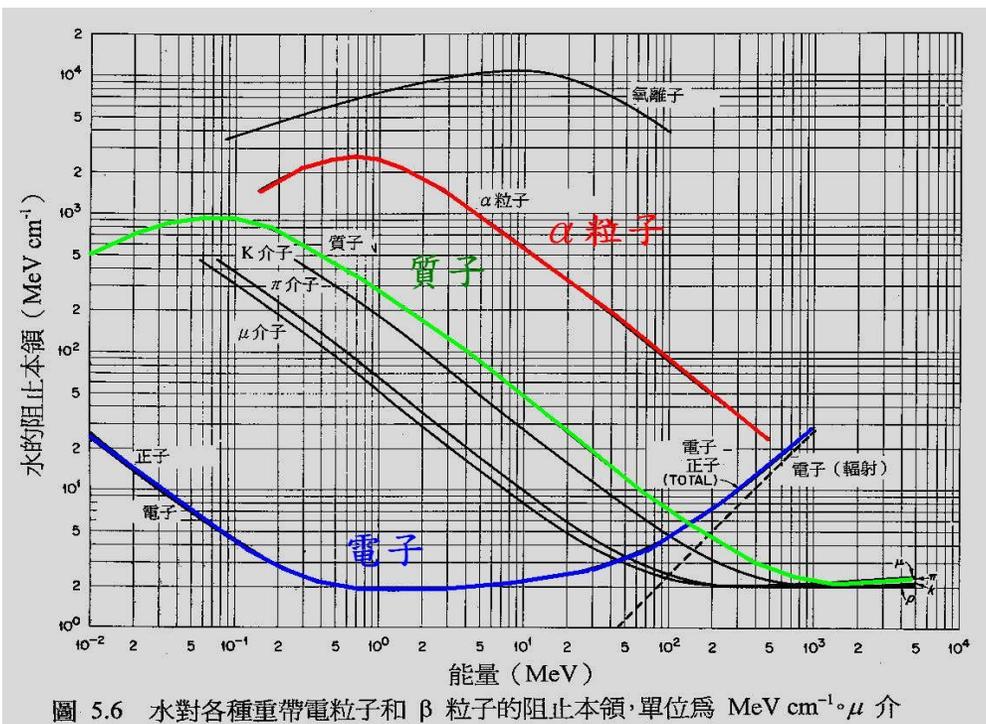
## 直接游離粒子輻射與物質作用 – 2.阻擋本領

- 直接游離輻射→帶電粒子
- 阻擋本領(Stopping power,  $S$ )

$$S = dE/dl$$

- $dl$  = 單位物質厚度[cm]
- $dE$  = 電子能量損失[MeV],  $dE$  不包括電子與介質作用所產生的二次電子( $\delta$ -ray)
- 阻擋本領不包括 $\delta$ -ray的局部能量吸收

# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 2.阻擋本領



- 阻止本領：帶電粒子在介質中單位距離的能量轉移
- 帶電粒子與介質原子序越高, 阻止本領越大

## 水對各種粒子的阻止本領

# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 2.阻擋本領

- 總質量阻擋本領(Total mass stopping power,  $S/\rho$ )
- 直接游離粒子輻射( $\alpha, \beta$ )在密度 $\rho$ 物質穿越 $d$ /距離內發生作用, 受介質阻擋而損失能量的分率 [ $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ]

$$\frac{S}{\rho} = \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{rad}} = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{col}} + \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{rad}}$$

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE_{\text{col}}}{dl}\right) = \frac{4\pi k_0^2 z^2 e^4 n}{mc^2 \beta^2} \left[ \ln\left(\frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{rad}} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{rad}} = \frac{4r_0^2 N_e Z}{137} \left[ \ln\left(\frac{2(E + \mu_0)}{\mu_0}\right) - \frac{1}{3} \right]$$

## 直接游離粒子輻射與物質作用 – 2.阻擋本領

- 帶電粒子與物質最主要作用：彈性碰撞產生能量轉移，將沿行進軌跡附近物質直接游離
- 用Bethe Formula for Stopping Power 描述在均勻介質對重帶電粒子的阻止本領：

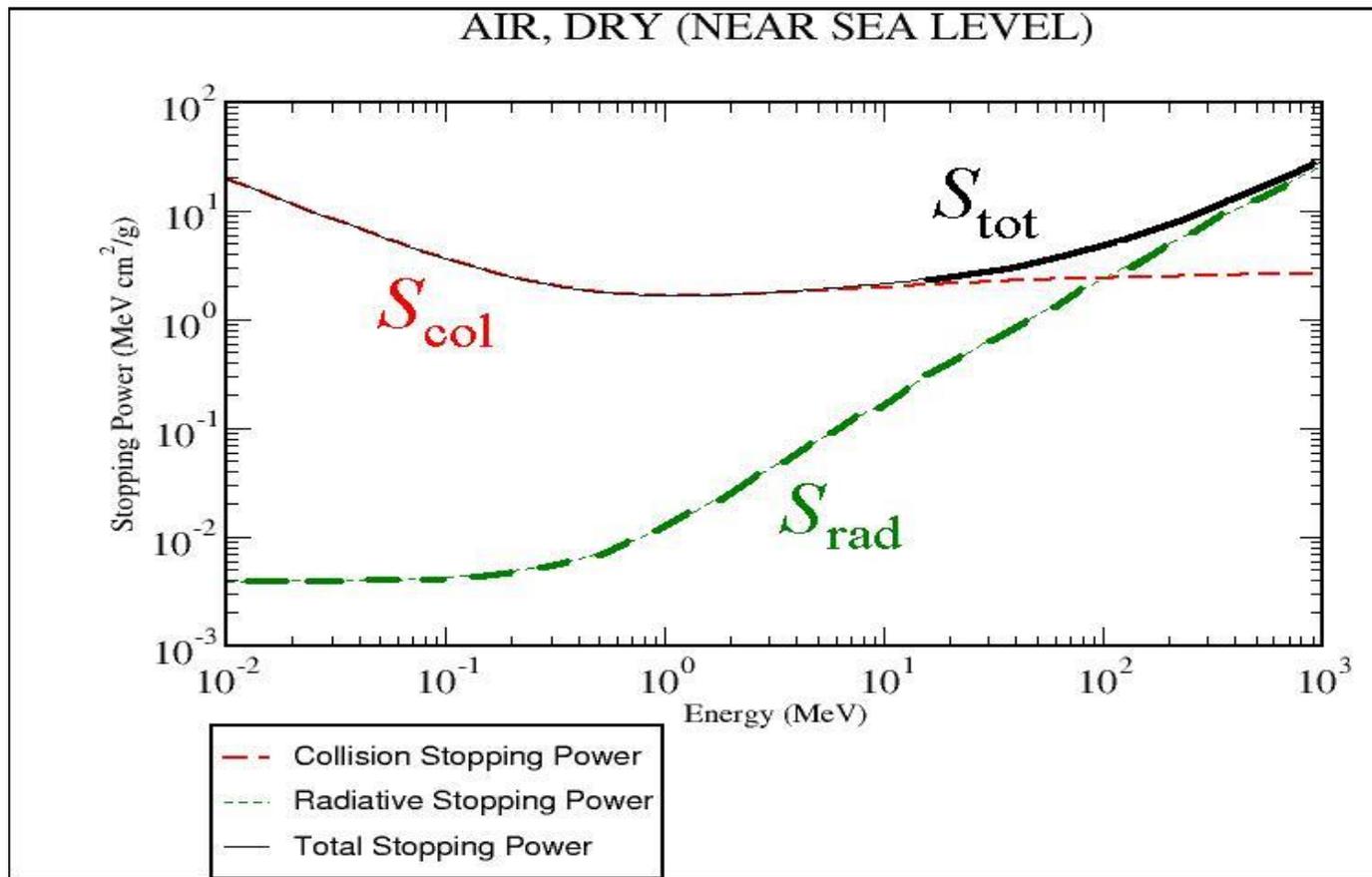
$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE_{\text{col}}}{dl}\right) = \frac{4\pi k_0^2 z^2 e^4 n}{mc^2 \beta^2} \left[ \ln\left(\frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2 \right], \beta = v/c \text{ (MeV/cm)}$$

- 帶電粒子在介質中射程(range), 與能量成正比

$$R_{\text{air}} = 1.24E_{\alpha} - 2.62, \text{ cm}$$

# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 2.阻擋本領

## ■ 電子在空氣中Stopping power



# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 3.α粒子射程

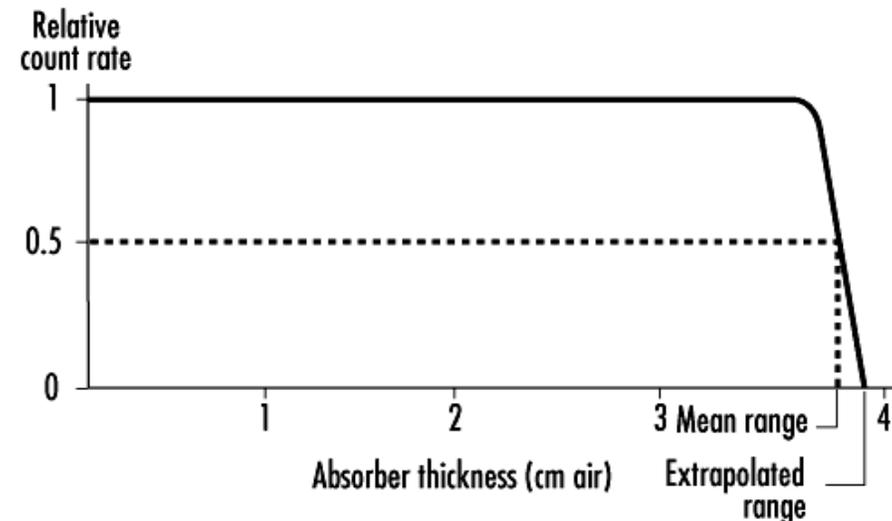
## ■ α粒子在空氣中射程

■  $R_{\alpha}$  (cm) =  $0.56 \cdot E_{\alpha}$  ( $E_{\alpha} < 4$  MeV)

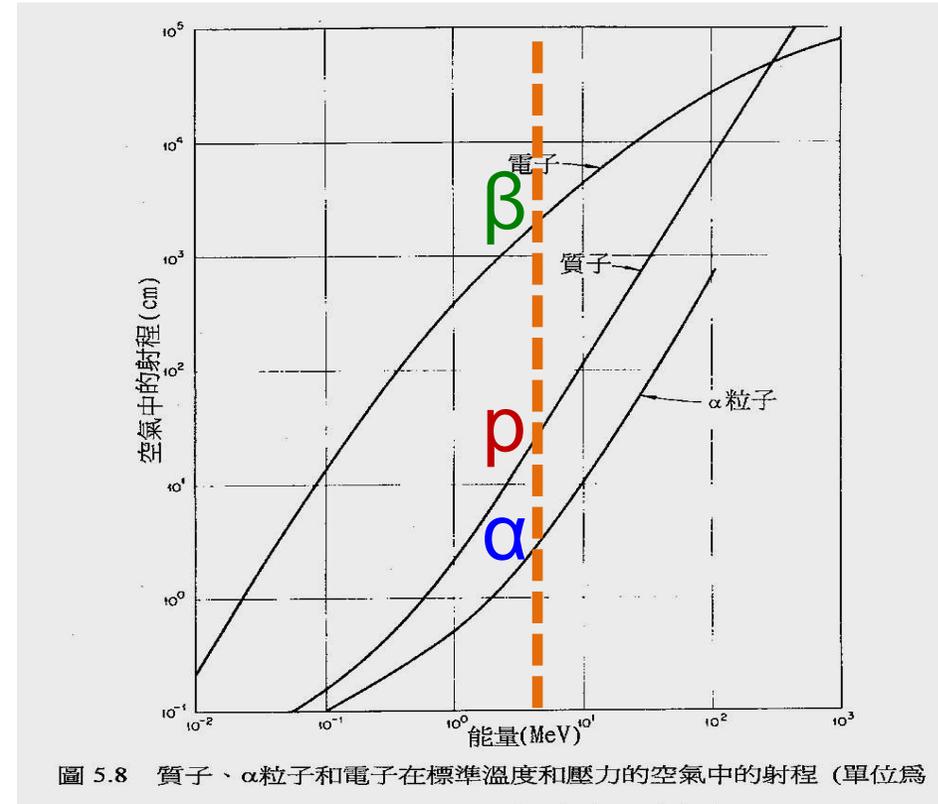
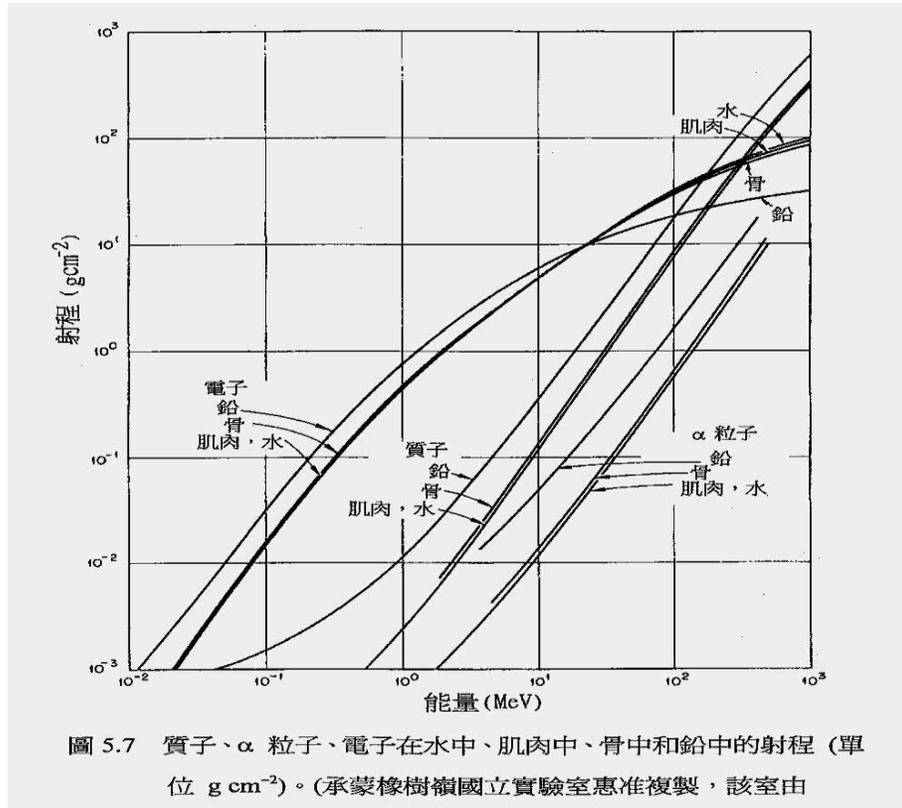
■  $R_{\alpha}$  (cm) =  $1.24 \cdot E_{\alpha} - 2.62$  ( $4 < E_{\alpha} < 8$  MeV)

## ■ α粒子在其他介質中射程

$$R_m = \frac{\rho_{air}}{\rho_m} \times R_{air}$$



# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 3.α粒子射程



70 GSM紙張厚度 =  $70\ g\cdot m^{-2} \cong 0.09\ mm$

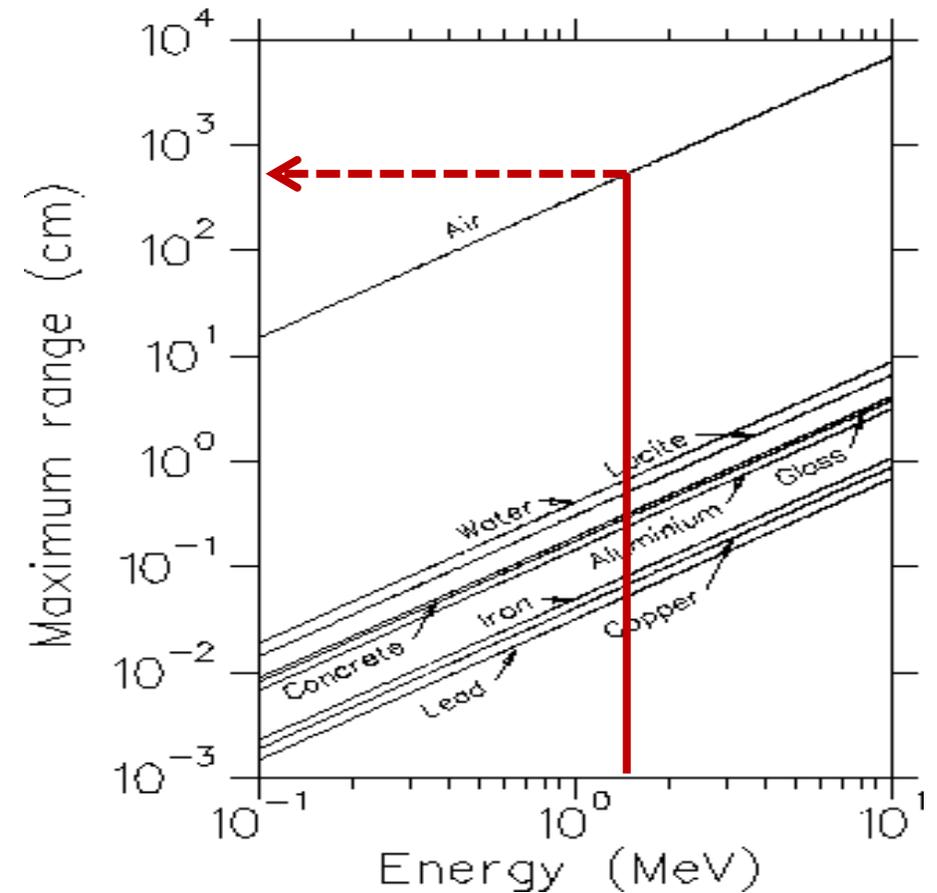
α在空氣中射程數公分

# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 4.β射程

## ■ β粒子射程

■  $R_{\beta} = 412 \cdot E_{\beta}^{1.265-0.0954 \cdot \ln E_{\beta}}$   
 $R_{\beta}$  (mg·cm<sup>-2</sup>) [0.01 <  $E_{\beta}$  < 2.5 MeV]

■  $R_{\beta} = 530 \cdot E_{\beta} - 106$  ;  
 $R_{\beta}$  (mg·cm<sup>-2</sup>) [ $E_{\beta}$  > 2.5 MeV]



# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 5.制動輻射

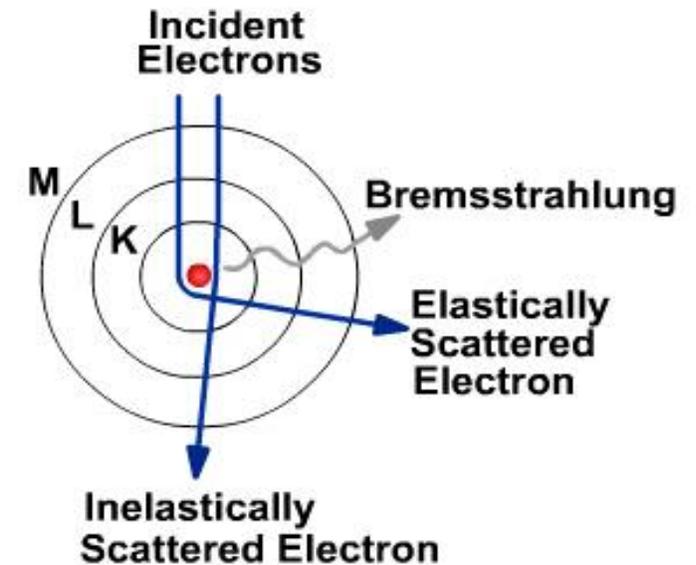
## ■ 制動輻射 ( Bremsstrahlung)

■ 高能電子接近原子核時，發生非彈性碰撞所釋放之連續能量  
電磁輻射

■ 高原子序介質、高能電子主要能量轉移機制

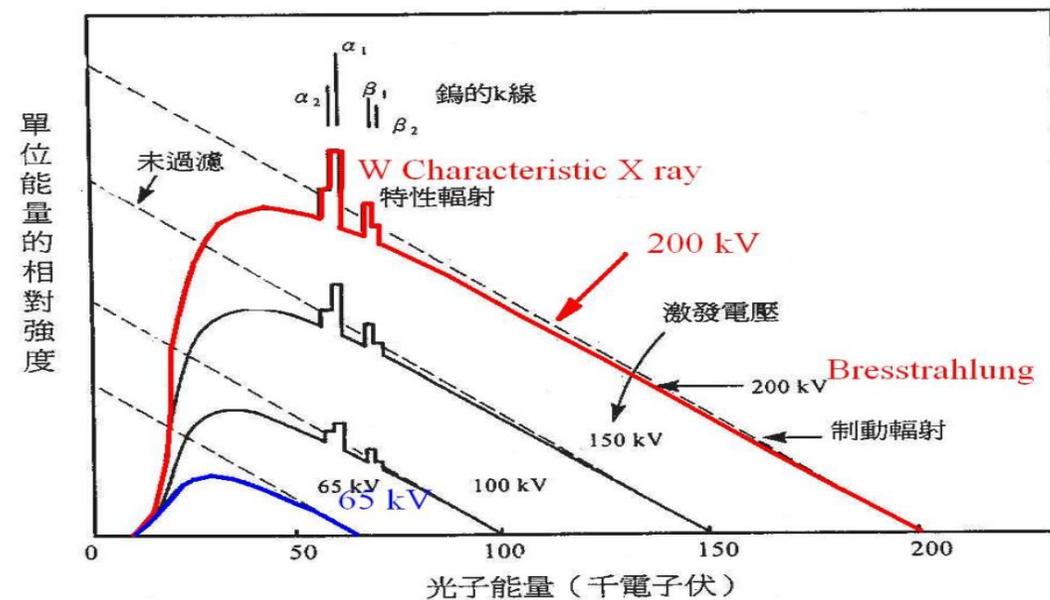
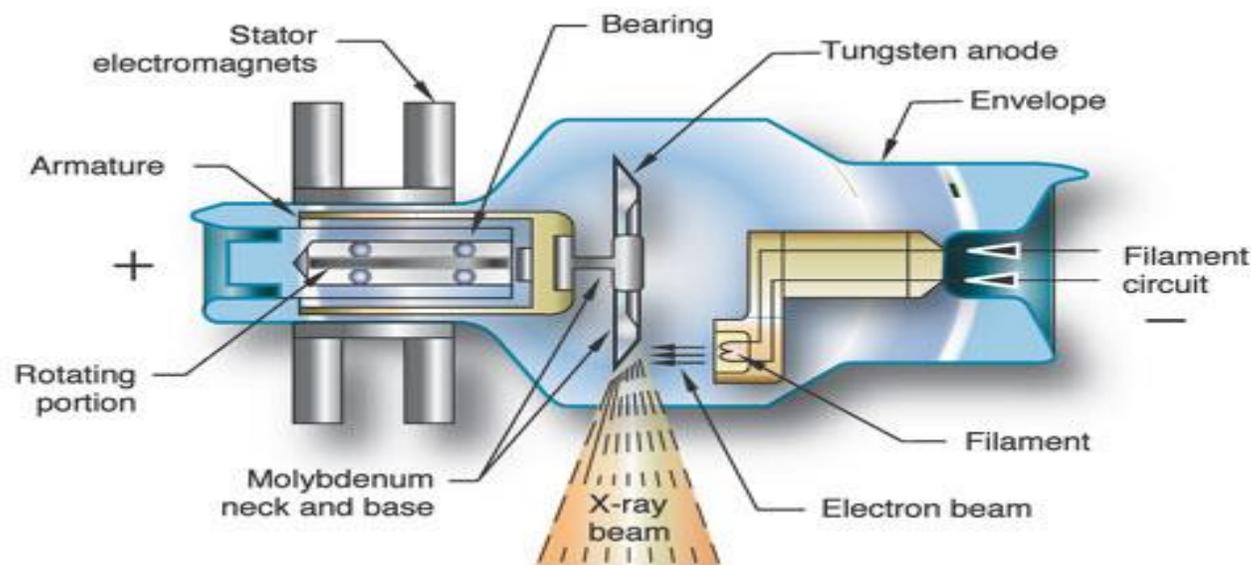
$$\frac{\text{制動輻射損失能量}}{\text{游離作用損失能量}} \propto \frac{(E + m_e c^2)Z}{1600 \cdot m_e c^2} \approx \frac{E_{\text{avg}} \cdot Z}{800}$$

$$\frac{\text{制動輻射損失能量}}{\beta\text{粒子最大能量}} \propto 3.5 \times 10^{-4} E_{\text{max}} \cdot Z$$



# 直接游離粒子輻射與物質作用 – 5.制動輻射

- X光機運作機制來自高能電子撞擊W靶減速,產生制動輻射 (bremsstrahlung),並非特徵X射線; 因此呈連續能譜而非特徵譜線.



# 直接游離粒子輻射與物質作用 – $\beta$ 輻射屏蔽

## ■ $\beta$ 輻射屏蔽原則

- $\beta$ 粒子造成的體外劑量來源，主要為 $\beta$ 粒子本身與其產生的制動輻射： $\beta$ 粒子射程短且有固定射程易於屏蔽；制動輻射為低能光子，應注意其體外劑量
- 兩層屏蔽：第一層(接近射源)為低原子序物質→阻擋 $\beta$ 粒子、降低制動輻射產率；第二層為高原子序物質→屏蔽制動輻射
- $\beta^+$ 粒子須特別注意互毀輻射、制動輻射

# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 1.作用機制

- 光電效應 (photoelectric effect)

$$E_{\gamma} = h\nu - \varphi$$

- 康普頓散射 ( Compton scattering )

$$E_{r'} = \frac{E_r}{1 + (E_r / mc^2)(1 - \cos \theta)}$$

- 合調散射 ( coherent scattering )

$$\frac{d\sigma_{\text{coh}}}{d\theta} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) \cdot F(x, z)^2 2\pi \sin \theta$$

- 成對反應 ( pair production )

$$E_p + E_{p'} = h\nu - 1.022$$

- 光蛻變反應 ( photodisintegration )

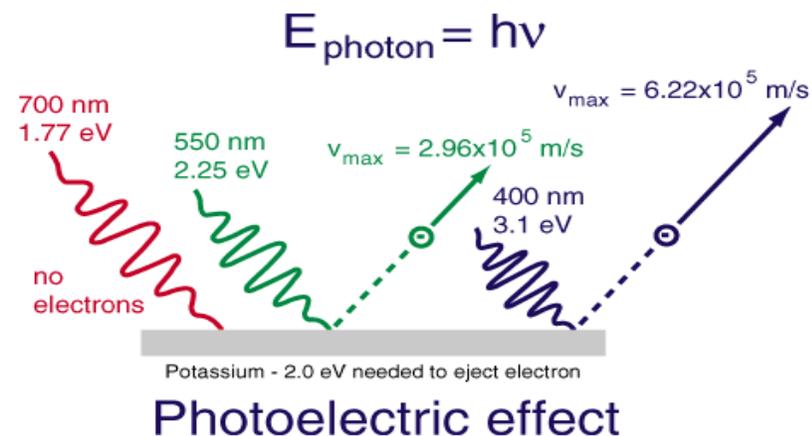
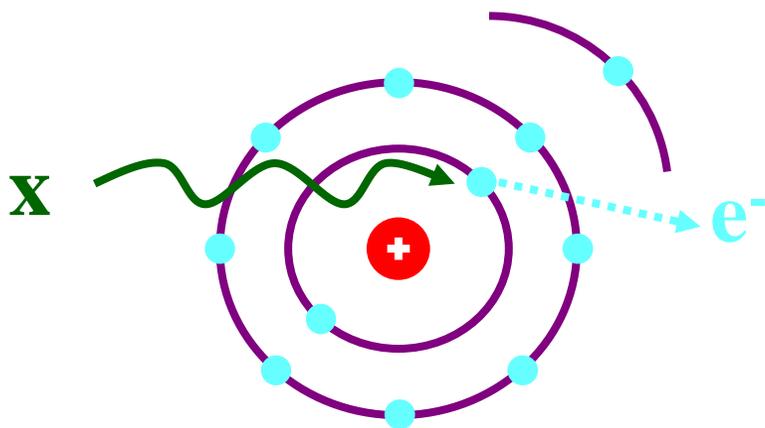
# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 1.作用機制

## ■ 光電效應 (photoelectric effect)

- 光電效應：物質吸收光子並激發自由電子。
- 入射光波長需小於某一臨界值時方能發射電子，其臨界值即極限頻率和極限波長。

$$E_{\gamma} = h\nu - \phi$$

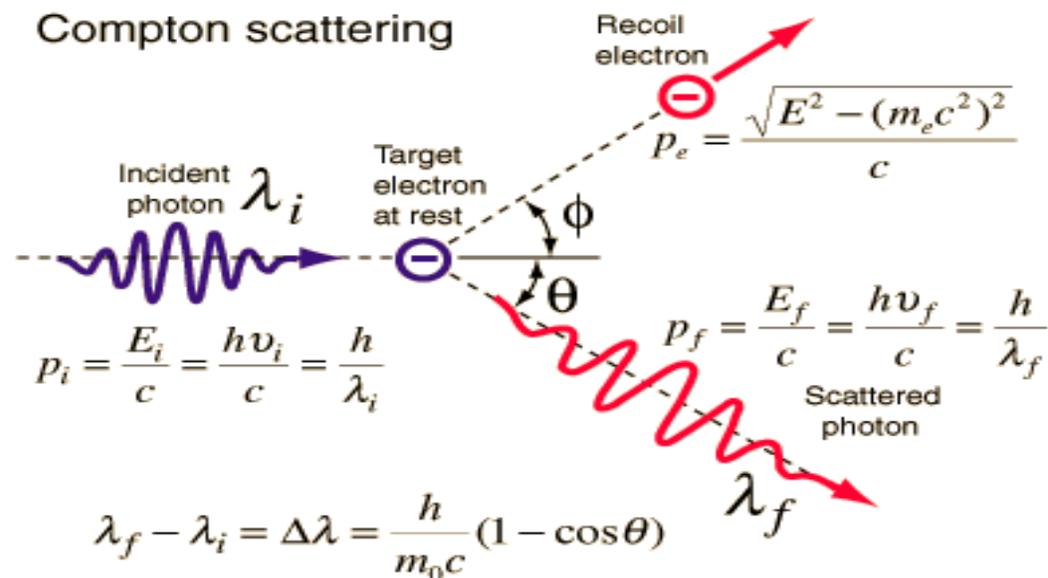
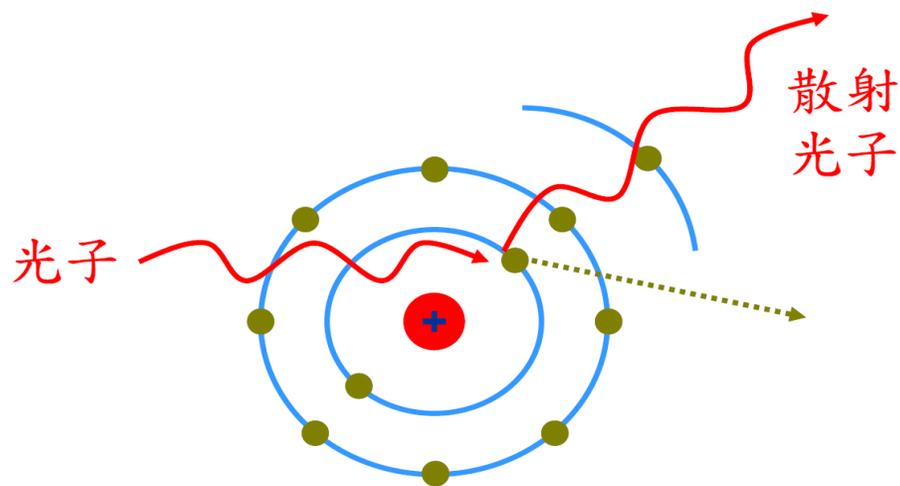
- 1867年Heinrich Rudolf Hertz發現



# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 1.作用機制

## ■ 康普頓散射 (Compton Scattering)

- A. H. Compton (1923)發現
- 光子與物質作用損失能量, 致波長變長的現象
- 波長變化幅度( $\Delta\lambda$ )稱為Compton Shift

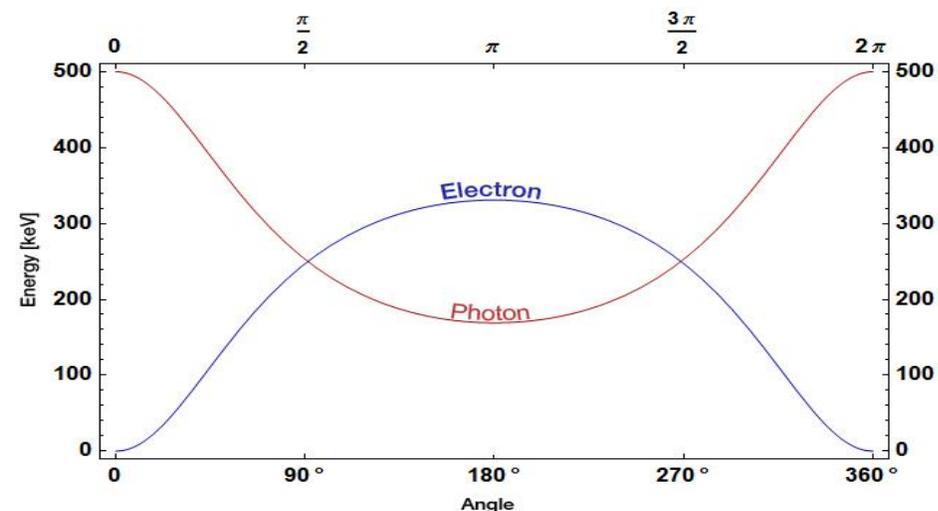
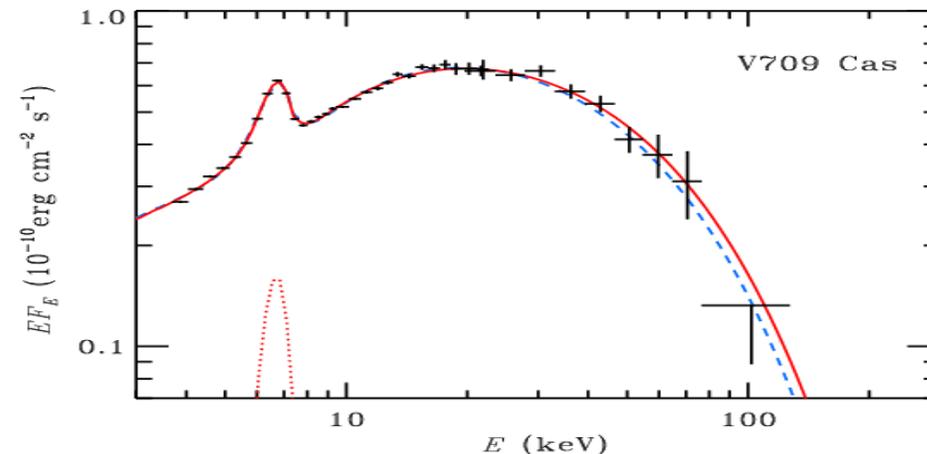


# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 1.作用機制

$$\text{碰撞後光子能量 } E_{r,f} = \frac{E_{r,i}}{1 + \frac{E_r}{mc^2} (1 - \cos\theta)}$$

$$\text{碰撞後電子能量 } E_{e,f} = \frac{E_{\gamma,i}^2 (1 - \cos\theta)}{mc^2 + E_{r,i} (1 - \cos\theta)}$$

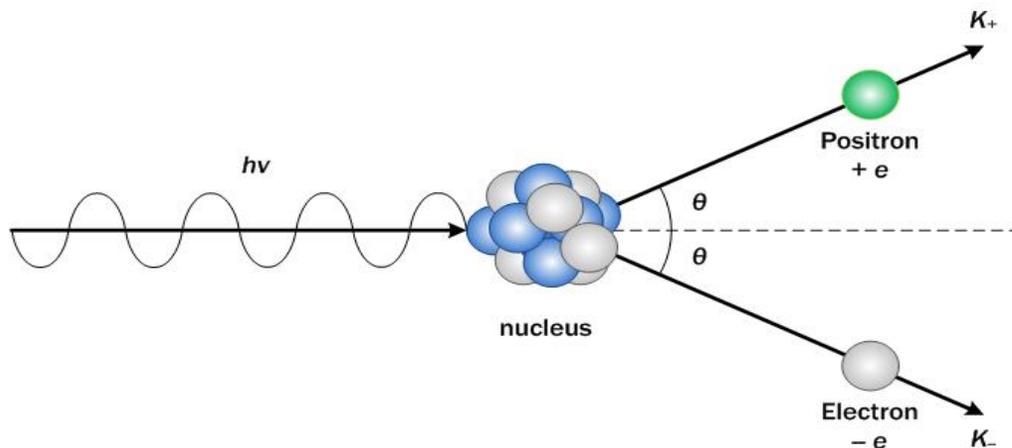
散射角( $\theta$ )	光子能量	電子能量
0	$E_{\gamma,f} = E_{\gamma,i}$ <b>光子能量最大</b>	$E_e = 0$
180	$E_{\gamma,f} \approx \frac{E_{\gamma,i}}{1 + 4E_{\gamma,i}}$	$E_{e,f} \approx \frac{E_{\gamma,i}}{1 + (4E_{\gamma,i})^{-1}}$ <b>電子能量最大</b>



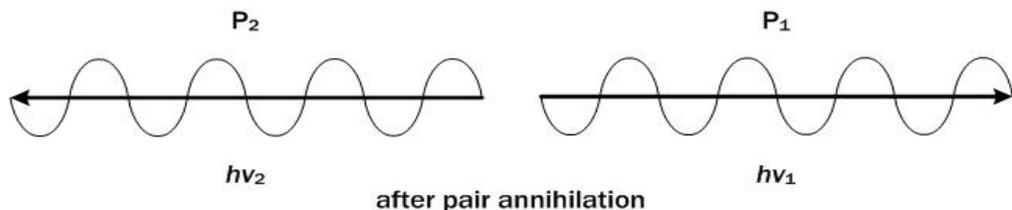
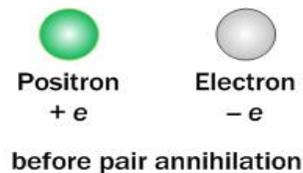
# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 1.作用機制

- 成對生成效應 (Pair production effect)
  - Patrick Blackett (1932)發現 → 能量轉換為質量
  - 由光子(或另外中性的玻色子)產生基本粒子與其反粒子, 遵守4大守恆 (能量, 動量, 角動量, 電荷)
    - 光子能量低限  $> 1.022 \text{ MeV}$
    - 產物為電子( $e^-$ ) – 正子( $e^+$ )對
  - $E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 1.022$
  - 能量足夠也可產生其他基本粒子-反粒子對：  
 $\mu^+ - \mu^-$  ;  $\tau^+ - \tau^-$
  - 逆反應為互毀反應(Annihilation effect)

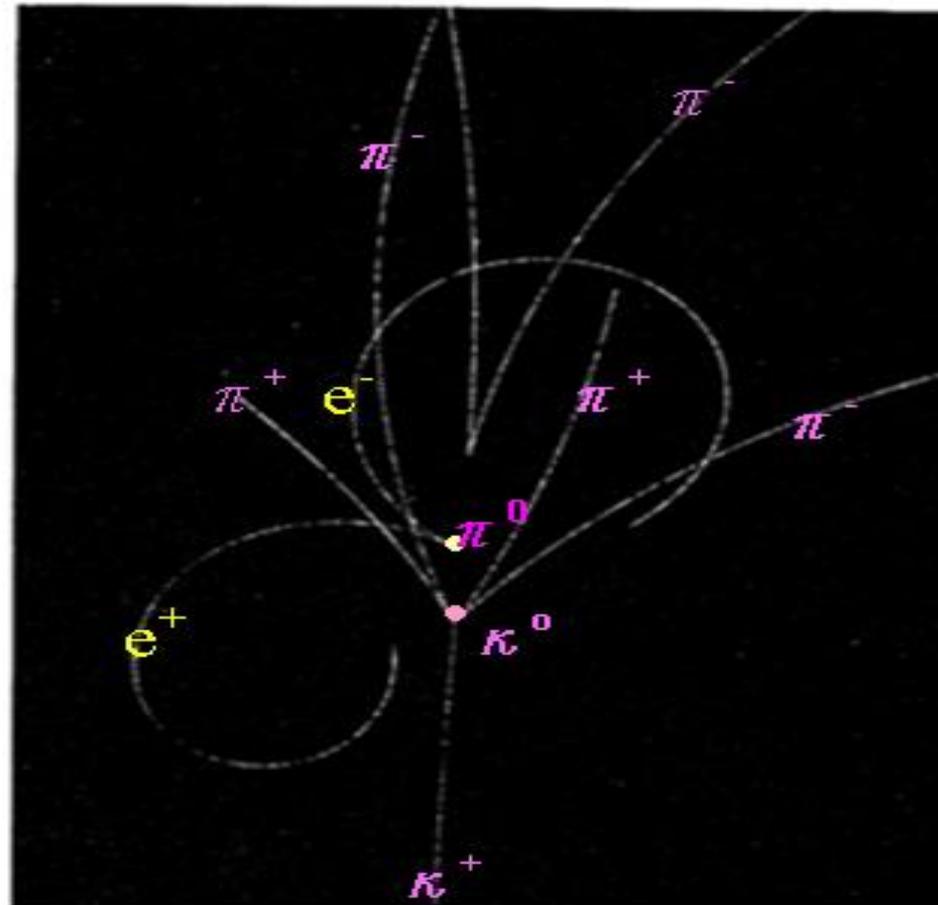
# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 1.作用機制



成對生成反應(Pair Production)



互毀反應(Annihilation)



雲霧室中 $e^+ - e^-$ 對軌跡

# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 1.作用機制

## ■ 光蛻變效應 (Photodisintegration effect)

- 高能光子與原子核作用，使原子核進入受激態，因 $p$ 或 $n$ 被擊出原子核，誘發子核衰變的過程。
- 輕於鐵核→吸熱；對於重於鐵核→放熱
- $\gamma + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n}, E_\gamma \geq 18\text{MeV}$
- 高能加速器屏蔽，超新星(supernova)-黑洞
- 光子能量越高，蛻變子核越重

# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 2. 截面

## ■ 截面 (cross section, $\sigma$ )

- 入射粒子與靶互應作用機率  $P$ ，除以入射粒子通量  $\Phi$  所得商值 [ $\text{cm}^2$ ]

$$\sigma = P / \Phi$$

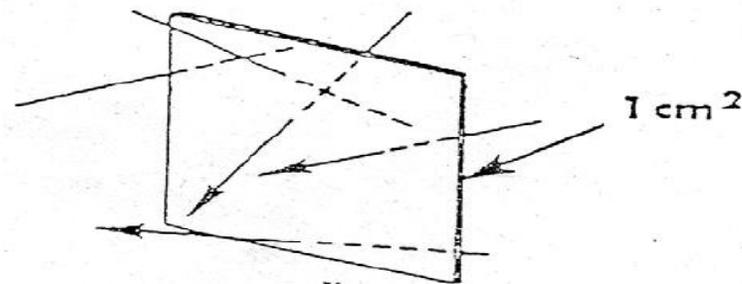
- 間接游離電磁輻射：

$$\sigma_{\text{tot}} = \tau + \sigma_c + \sigma_{\text{coh}} + K$$

- 間接游離粒子輻射：

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} &= \sigma_{\text{absorption}} + \sigma_{\text{scattering}} \\ &= (\sigma_{\text{cap}} + \sigma_{\text{fis}} + \sigma_{\text{rx}}) + (\sigma_{\text{elastic}} + \sigma_{\text{inelastic}}) \end{aligned}$$

$$\phi (\text{neutrons} / \text{cm}^2 / \text{sec}) = n \left( \frac{\text{neutrons}}{\text{cm}^3} \right) \bar{v} \left( \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right)$$



# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 3.衰減係數

## ■ 質量衰減係數(mass attenuation coefficient, $\mu / \rho$ )

■ 間接游離輻射( $\gamma, x, n$ )在密度 $\rho$ 物質穿越 $d/$ 距離時, 發生作用之分率

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho d/} \cdot \frac{dN}{N} = \frac{N_A}{M} \cdot \sigma$$

- $\mu$  = 線性衰減係數(linear attenuation coefficient,  $\text{cm}^{-1}$ )
- $1/\mu$  = 間接游離輻射平均自由徑(mean free path, cm)
- $N_A$  = Avogadaros' Number =  $6.02 \times 10^{23}$  (1/mol)
- $\sigma$  = 微觀作用截面 (microscopic cross section,  $\text{cm}^2$ )
- $M$  = 靶物質mole質量 ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

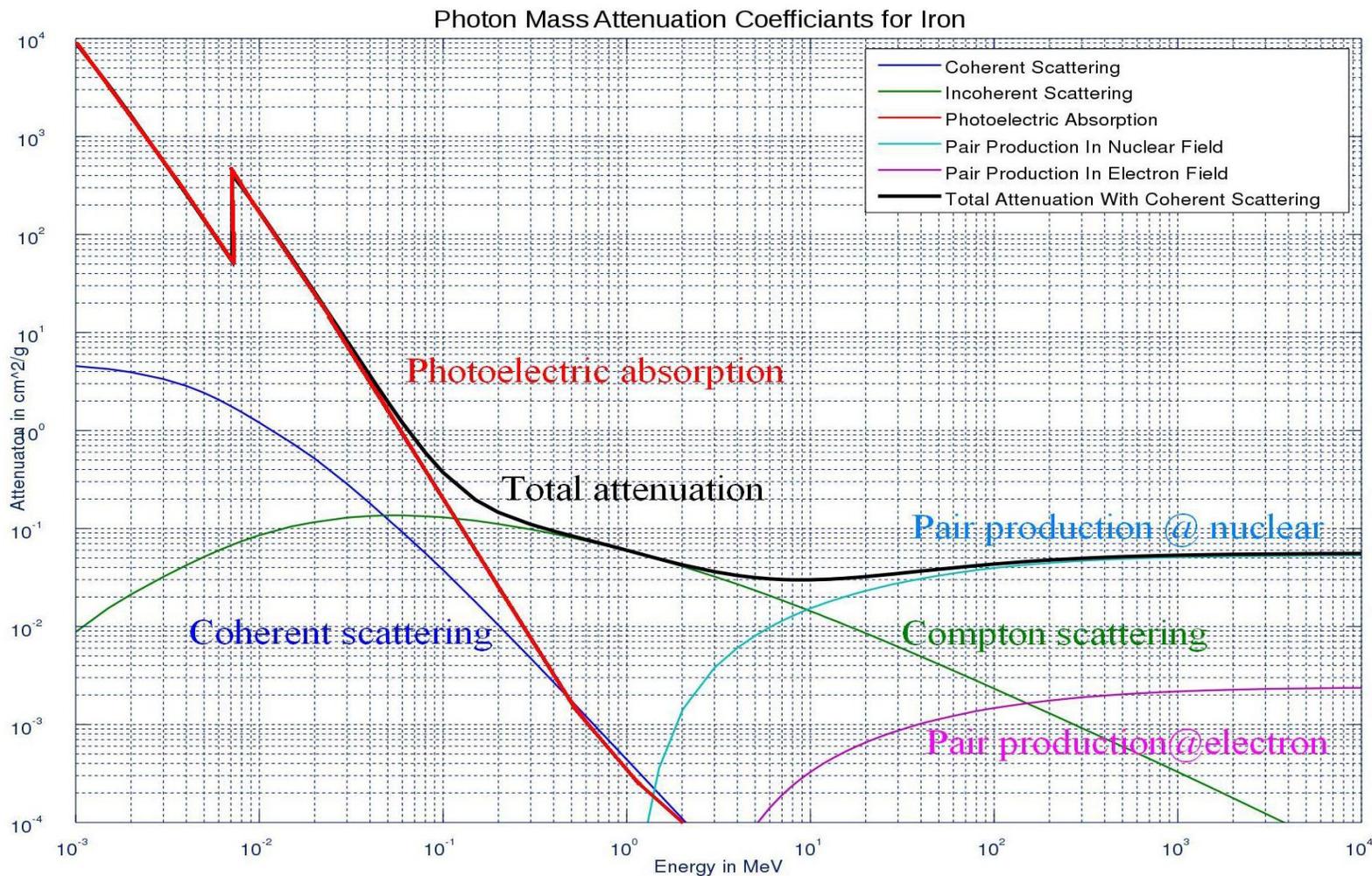
## 間接游離電磁輻射與物質作用 – 3.衰減係數

### ■ 間接游離電磁輻射( $\gamma, x$ )在介質密度 $\rho$ 的質量衰減係數

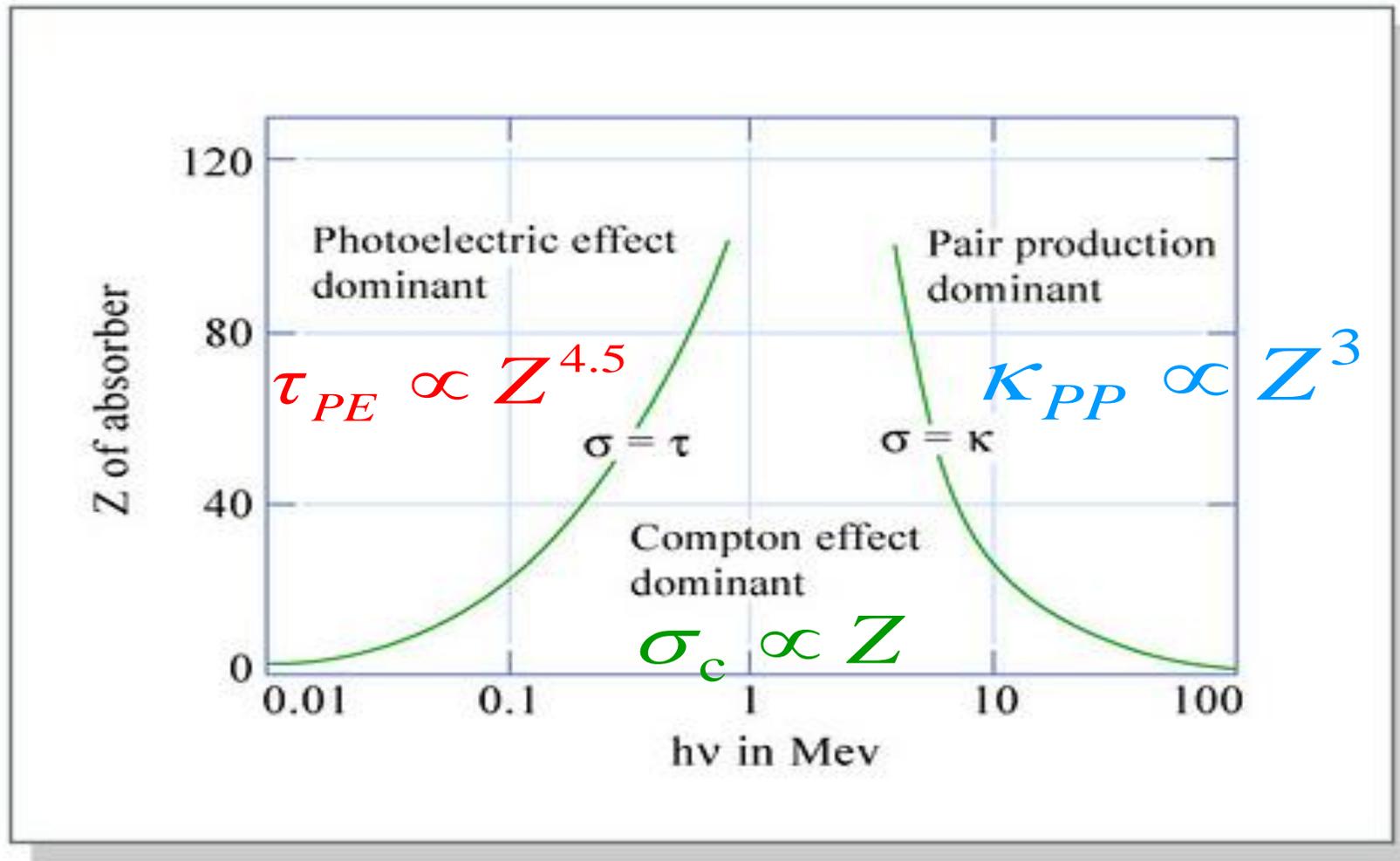
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\sigma_{coh}}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$$

- $\tau/\rho$  : 光電效應質量衰減係數
- $\sigma_c/\rho$  : 康普頓散射質量衰減係數
- $\sigma_{coh}/\rho$  : 調和散射質量衰減係數
- $\kappa/\rho$  : 成對產生反應質量衰減係數

# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 3.衰減係數



# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 3.衰減係數



# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 4. 能量轉移係數

## ■ 質能轉移係數(mass energy transfer coefficient)

- 間接游離輻射在密度 $\rho$ 物質穿越 $dl$ 距離內發生作用, 將輻射能量移轉予帶電粒子動能的分率

$$\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} = \frac{1}{\rho dl} \cdot \frac{dR_{\text{tr}}}{R} = \frac{N_A}{M} \sum_j f_j \cdot \sigma_j = \frac{\mu}{\rho} \cdot f$$

- $R$  = 輻射能(radiant energy), 發射, 轉移或接受的粒子能量
- $f_j$  = 不帶電粒子在  $j$  型交互作用, 將能量轉移予帶電粒子動能平均分率
- $f = \sum_j f_j \cdot \sigma_j / \sum_j \sigma_j$

# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 4. 能量轉移係數

## ■ 初始能量 $h\nu$ 的間接游離輻射之質能轉移係數

$$\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} = \frac{\tau_a}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\kappa_a}{\rho}$$

■  $\frac{\tau_a}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} \left(1 - \frac{\delta}{h\nu}\right)$  : 光電效應質能轉移係數,  $\delta$  為光電效應後, 發射螢光輻射的平均能量

■  $\frac{\sigma_c}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{E_c}{h\nu}$  : 康普頓散射質能轉移係數,  $E_c$  為康普頓散射後, 康普頓電子平均能量

■  $\frac{\kappa_a}{\rho} = \frac{\kappa}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{2m_0c^2}{h\nu}\right)$  : 成對產生反應質能轉移係數,  $m_0c^2$  為電子的靜止質量

# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 5. 能量吸收係數

- 質能吸收係數(mass energy absorption coefficient,  $\mu_{en}/\rho$ )
  - 間接游離輻射在密度 $\rho$ 物質穿越 $d/l$  距離內將輻射能量移轉而被介質吸收的分率

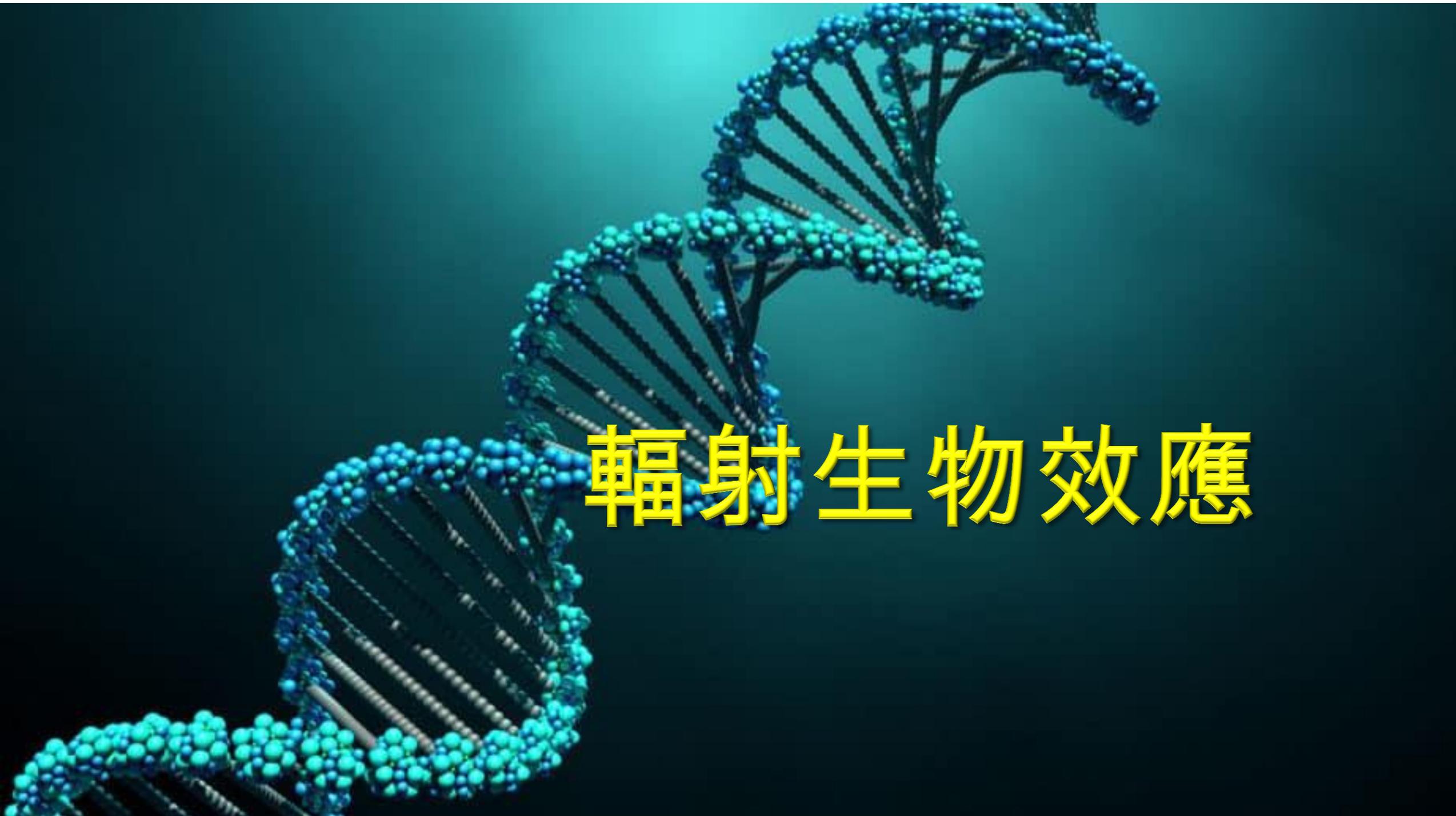
$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g)$$

- $g$  = 次級荷電粒子在介質中以制動輻射形式損失的能量分數

# 間接游離電磁輻射與物質作用 – 作用三部曲

## ■ 間接游離電磁輻射與物質作用三部曲

交互作用	衰減 (Attenuation)	能量轉移 (Energy Transfer)	能量吸收 (Absorption)
物理意義	游離輻射與介質作用機率	游離輻射能量轉移至帶電粒子動能	帶電粒子動能被介質吸收
關係式	$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\sigma_{coh}}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$	$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} \left(1 - \frac{\delta}{h\nu}\right) + \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{E_c}{h\nu} + \frac{\kappa}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{2m_0C^2}{h\nu}\right)$ $K = \Phi \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \bar{E}_{tr}$	$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g)$ $D = \Phi \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \bar{E}_{ab}$



# 輻射生物效應

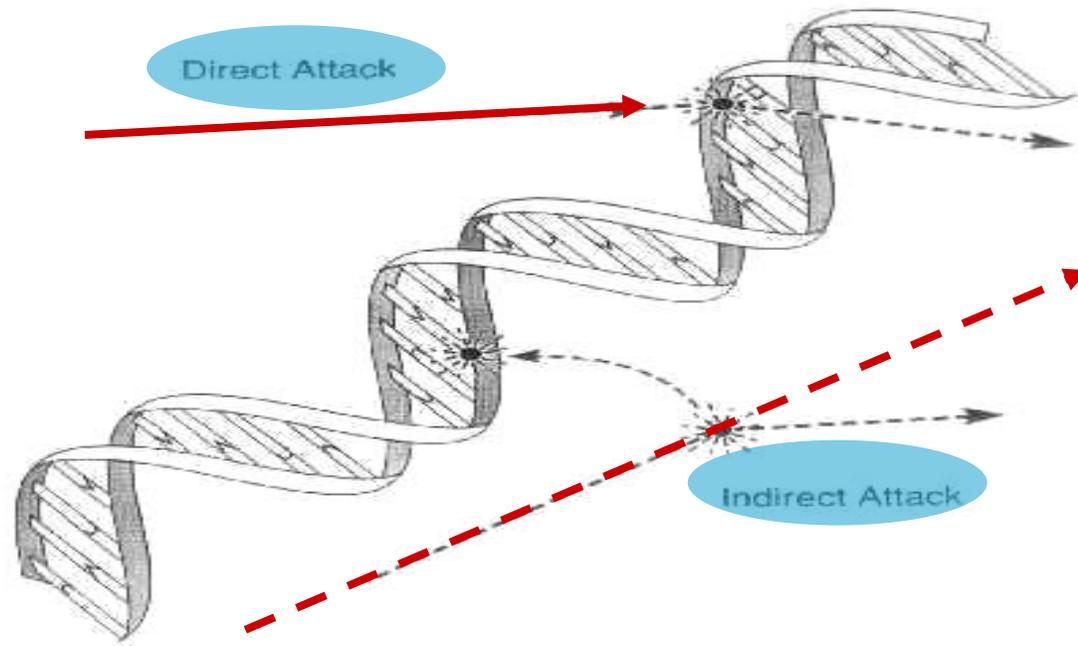
# 輻射生物效應

---

- 輻射生物效應
- 影響輻射生物效應因素-物理/化學/生物
- 輻射健康效應 – 機率效應與確定效應
- 我國核能電廠附近居民健康調查結果



# 游離輻射的生物效應 - 傷害DNA



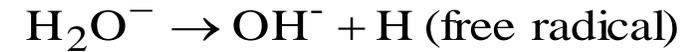
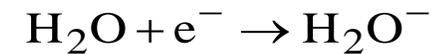
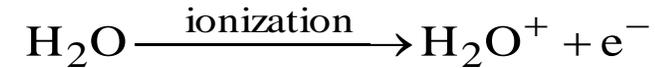
## 直接作用(1%)

輻射直接擊中(游離)靶分子

## 間接作用(99%)

輻射先產生自由基,能量再傳遞給靶分子

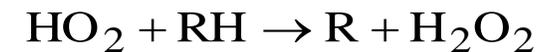
### Free Radical Production



### Free Radical Transport



### Free Radical and Target Reaction



# 游離輻射的生物效應 – 反應時間架構

作用時間	作用事件
1.物理階段(<10 <sup>-15</sup> s)	自由基(H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , OH·, H·, e <sub>aq</sub> )產生
2.化學階段(10 <sup>-12</sup> -10 <sup>-6</sup> s)	自由基(H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , OH·, H·, e <sub>aq</sub> )移動
3.生物階段	
< 10 <sup>-3</sup> s	自由基與生物分子作用
< 1 s	生化變化
~ min	細胞分裂影響
~ day	腸胃,中樞神經變化
~ week	肺纖維化
~ year	白內障, 腫瘤,遺傳效應



# 影響輻射生物效應因素

## ■ 物理因素

- 輻射形式：高LET輻射： $\alpha$ ,  $n$ , 核分裂碎片；低LET輻射： $\beta$ ,  $\chi$ ,  $\gamma$
- 輻射劑量：劑量 $\uparrow$   $\Rightarrow$  效應越明顯
- 時間分配：分段、分次照射可降低危害效應
- 提升溫度： $T \uparrow \Rightarrow$  DNA修復 $\downarrow \Rightarrow$  危害 $\uparrow$

## ■ 化學因素

- 氧含量： $[\text{氧含量}] \uparrow \Rightarrow$  阻礙細胞修復  $\Rightarrow$  細胞生存率 $\downarrow$

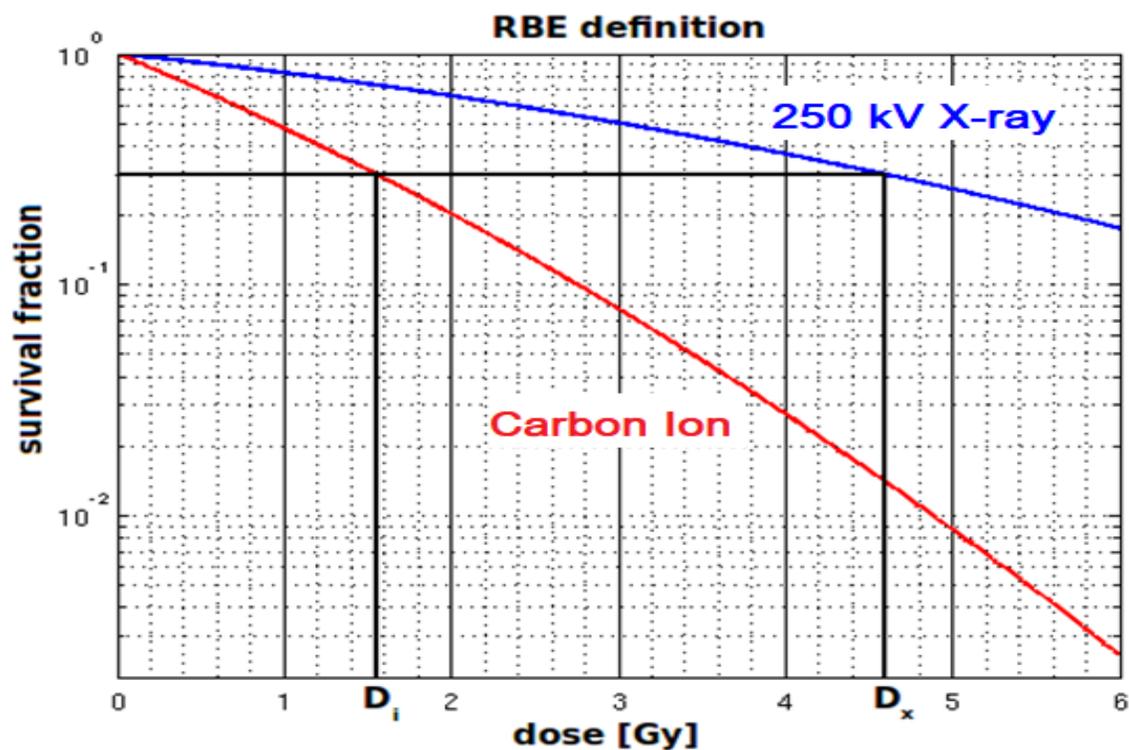
## ■ 生物因素

- 細胞敏感度
- DNA修復機制

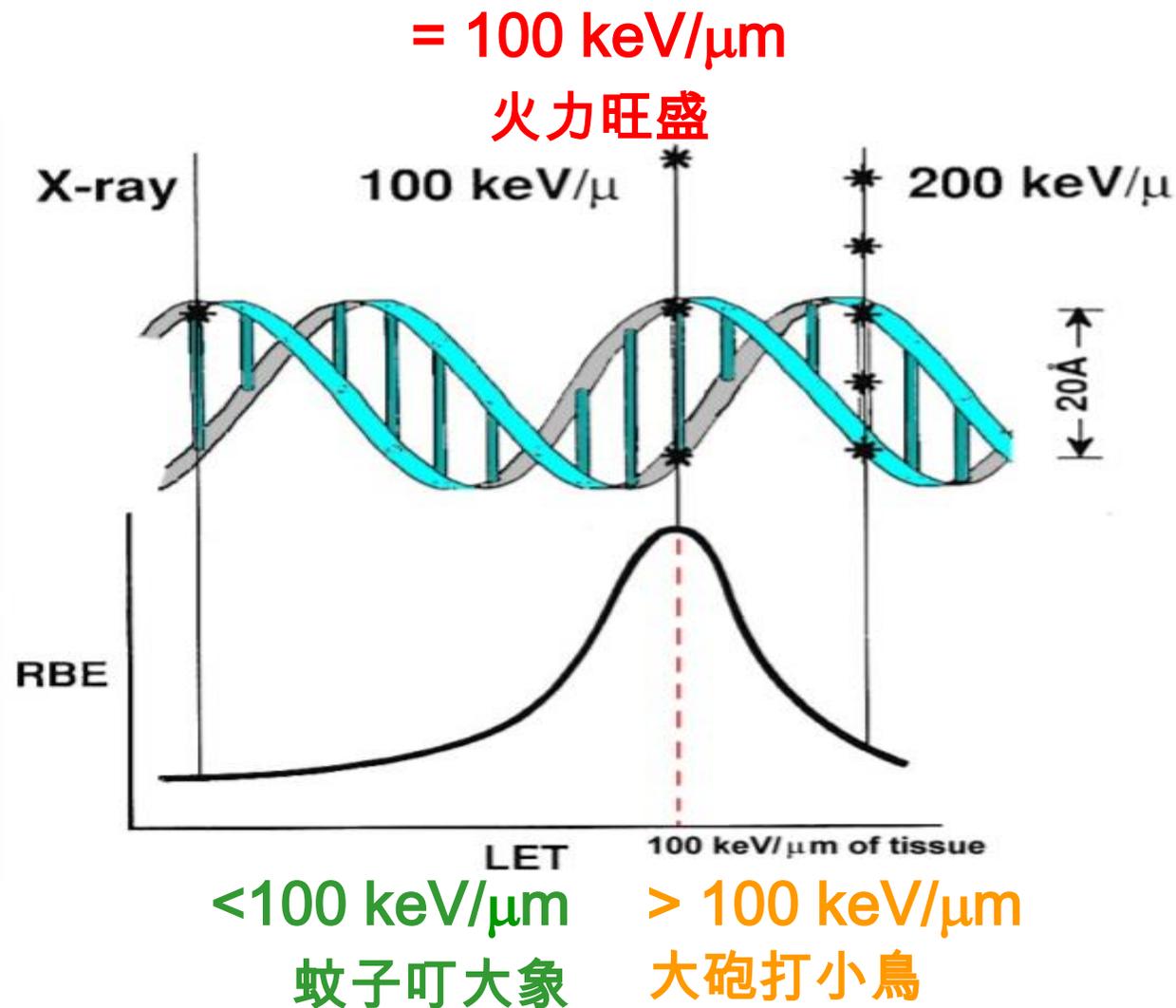


# 影響輻射生物效應因素 – (1)物理因素-LET

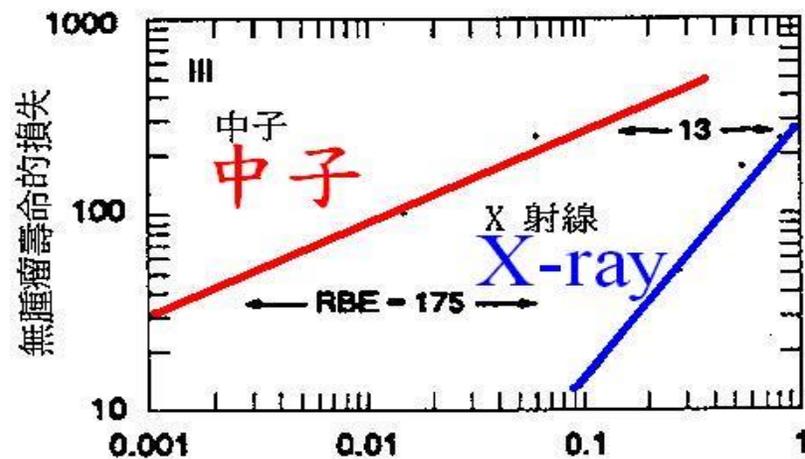
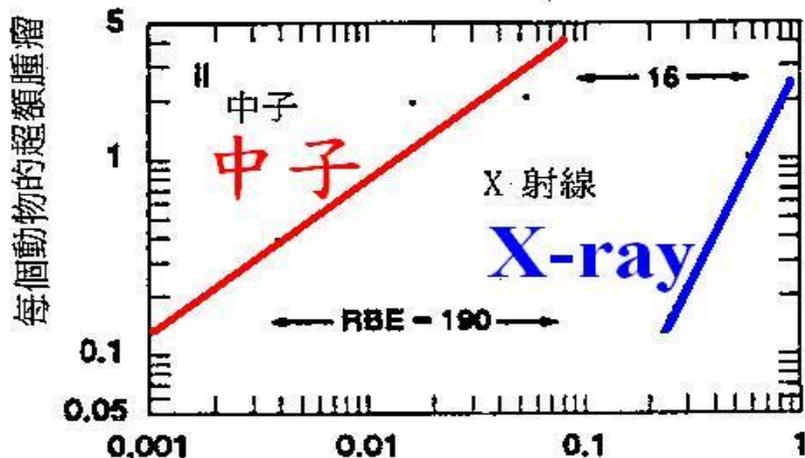
## RBE



$RBE_c = 4.6 / 1.55 = 3$



# 影響輻射生物效應因素 – (1)物理因素-LET

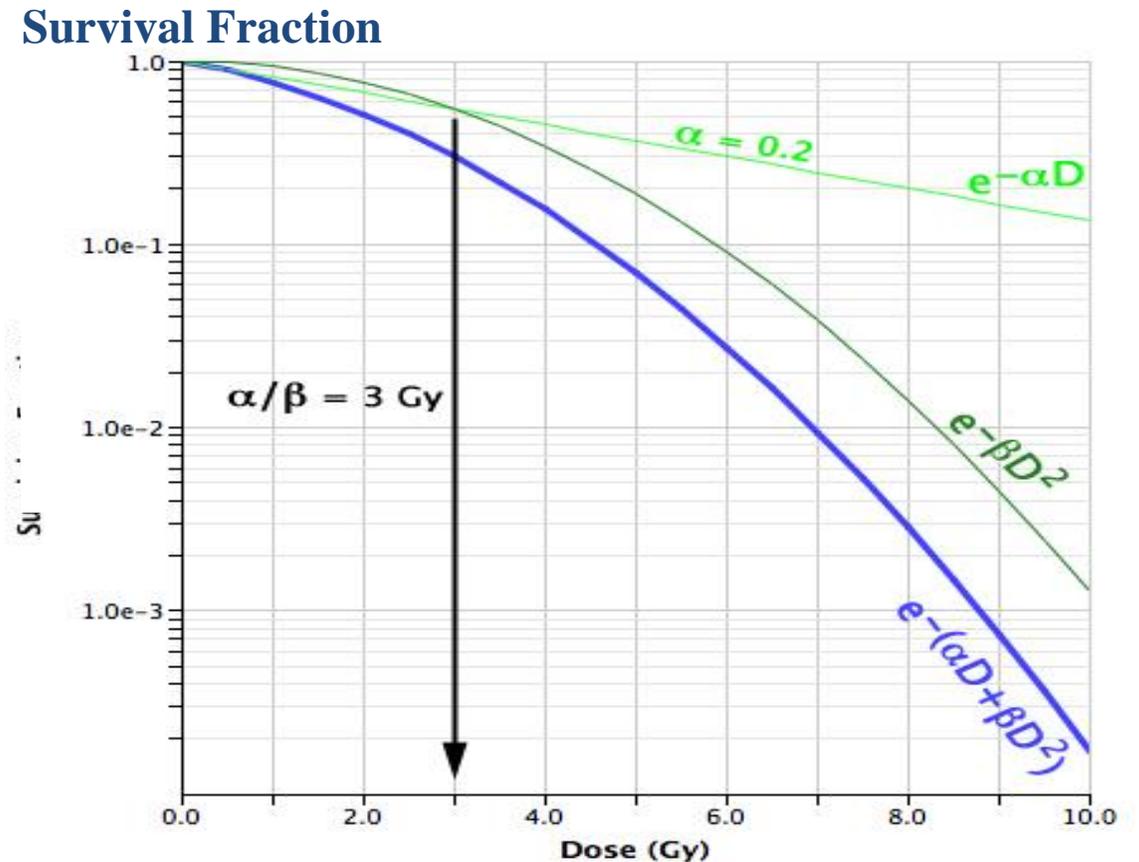


$Q(L)=1$	$L < 10$
$Q(L)=0.32L-2.2$	$10 \leq L \leq 100$
$Q(L) = 300/\sqrt{L}$	$L > 100$

輻射類別	射質因數
$x$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$ 及 $e^-$	1
$n$ 、 $p$ 及靜質量 $> 1$ 原子質量單位之帶 1 電荷粒子	10
$\alpha$ 及帶多電荷粒子	20

# 影響輻射生物效應因素 – (1)物理因素 – 輻射劑量

- 細胞生存分率(Survival fraction, SF)與輻射劑量(D)有密切關係
  - 線性  $SF = 1 - \alpha D$
  - 單純指數  $SF = e^{-\alpha D}$
  - 二次指數  $SF = e^{-(\alpha D + \beta D^2)}$
- 單位劑量生物效應分率(biological effect fraction per fractional dose,  $E_n$ ),  $E_n = (\alpha D + \beta D^2)$



# 影響輻射生物效應因素 – (1)物理因素-劑量分配

■ 分次照射增加耐受劑量

■ 細胞損害

■ 致死性損害(LD)

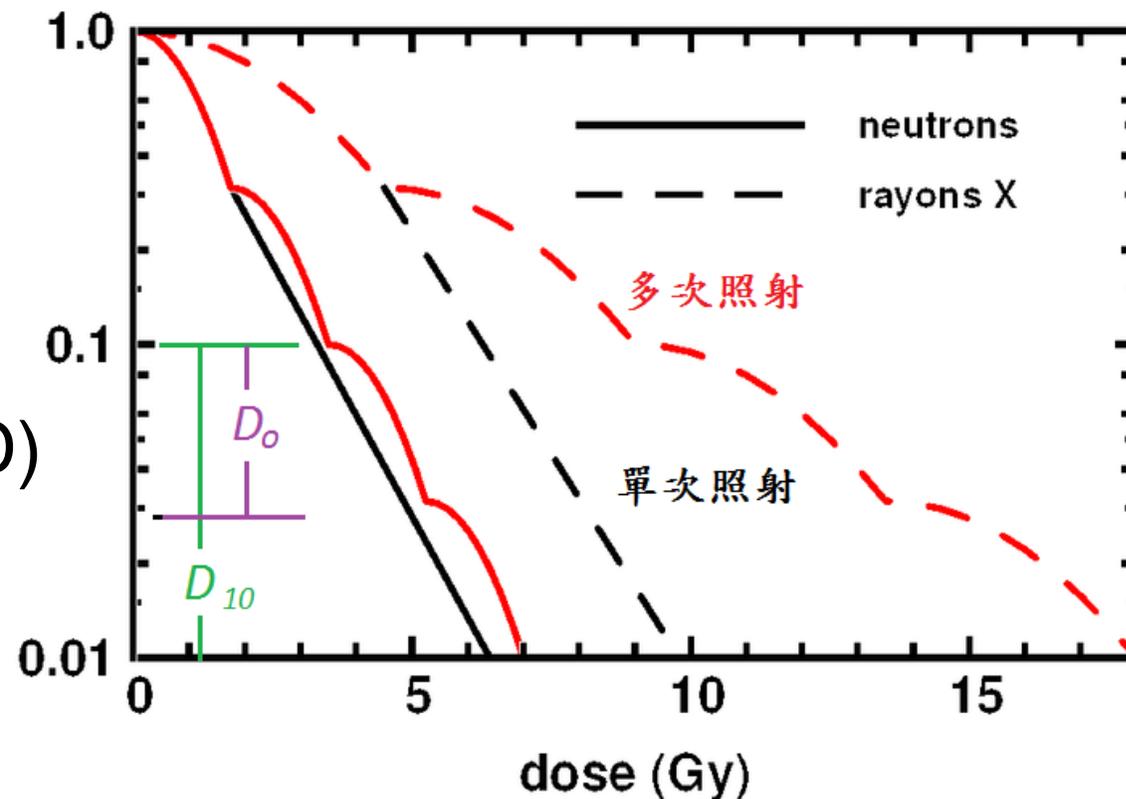
■ 次致死性損害(Sub-LD,)

■ 潛在致死性損害(Potentially LD)

■  $D_0$  : 細胞存活率37%劑量

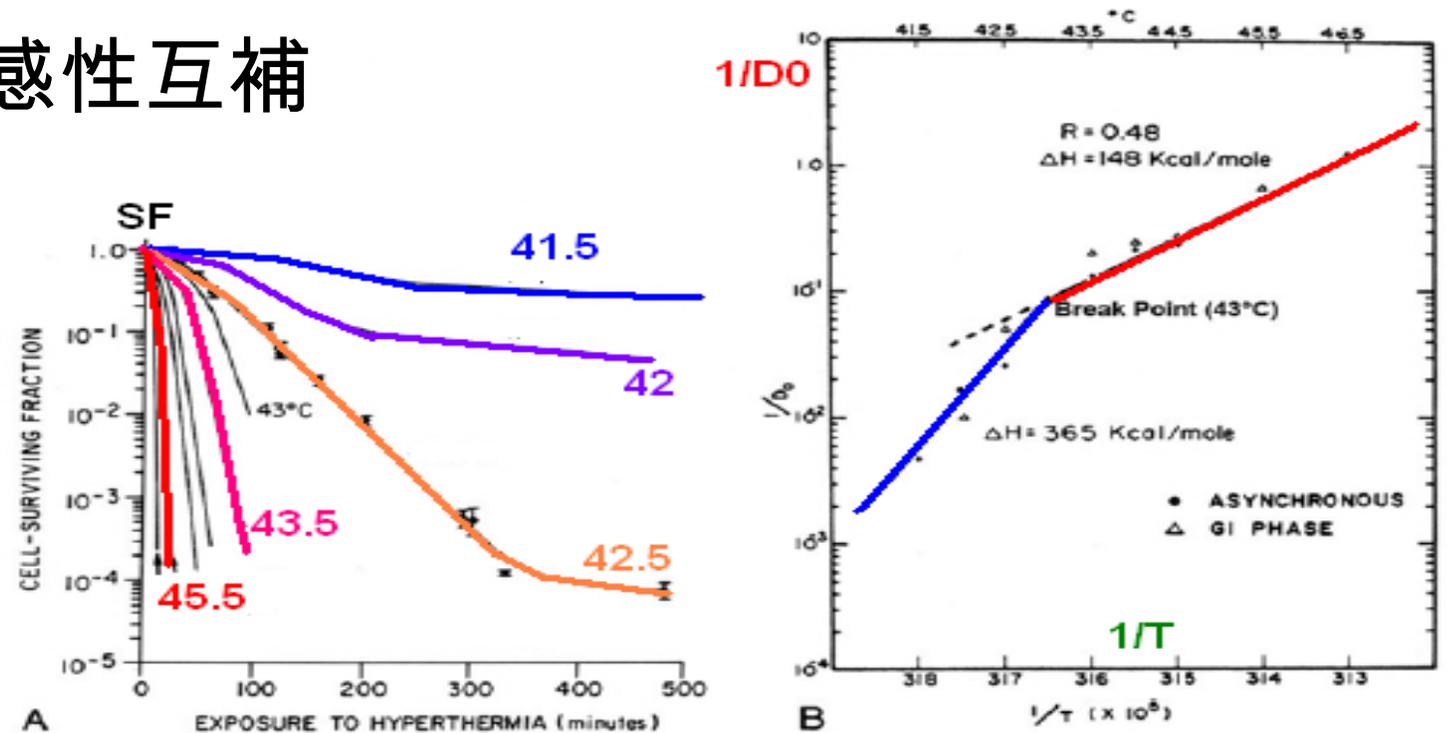
■  $D_{10}$  : 細胞存活率10%劑量

$$D_{10} = 2.3 \cdot D_0$$



# 影響輻射生物效應因素 – (4)物理因素- 溫度效應

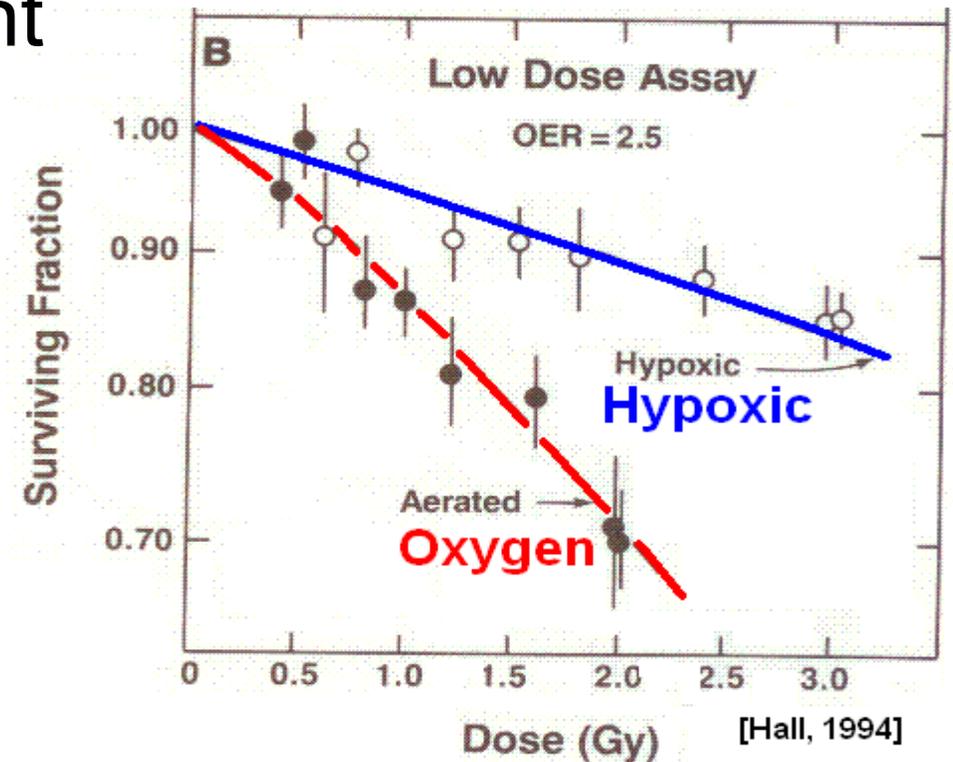
- $T \uparrow \rightarrow$  蛋白質降解(degradation)與輻射傷害DNA機制不同, 但會阻擾DNA修復  $\rightarrow$  SF  $\downarrow$
- 輻射敏感性與增溫敏感性互補
- 酸性環境, 缺乏營養, 與缺氧細胞對溫度變化較敏感



# 影響輻射生物效應因素 – (2)化學因素- 氧含量

- 高氧狀態下, 易形成過氧化物自由基( $RO_2$ ) ➔ 阻礙修補
- 氧增強比(Oxygen Enhancement Ratio, OER)

輻射	OER
X, $\gamma$	2.5-3.5
$n$	1.6
$\alpha$	1.0



- 腫瘤細胞週邊富氧, 內部缺氧

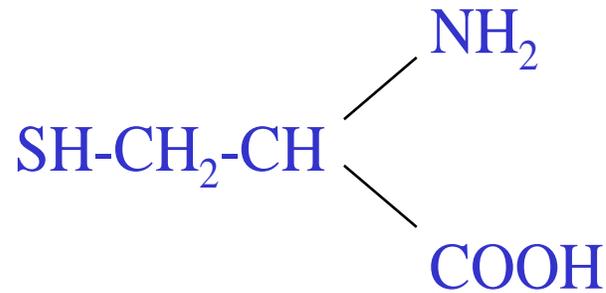
$[O_2] \uparrow \rightarrow$  存活率  $\downarrow$

## 影響輻射生物效應因素 – (2)化學因素- 氧含量

- $O_2$ 是強力的氧化劑：有2個未成對電子 → 穩定的雙自由基
- $O_2$  可迅速與有機自由基發生反應
  - $DNA\cdot + O_2 \rightarrow DNA-O-O\cdot$  (DNA過氧化態自由基)
  - $DNA-O-O\cdot + H\cdot \rightarrow DNA-O-OH$  (DNA過氧化氫)
- 若DNA自由基在修復前就與氧發生反應，則傷害加重，甚至無法由化學復原來修復 ➡ 身體氧含量高，輻射傷害加重

# 影響輻射生物效應因素 – (2)化學因素- 消耗自由基

- 硫氫化物可消耗自由基, 或與氧結合 ➡ 減少輻射傷害(穀胱甘肽, GSH) → Radioprotector



- 劑量抑減係數 (Dose reduction factor, DRF)

$$\text{DRF} = \frac{\text{有防護劑時致死效應劑量}}{\text{無防護劑時致死效應劑量}}$$

器官	DRF
骨髓	2.4 - 3.0
免疫系統	1.8 - 3.4
肺臟	1.2 - 1.8
肝臟	2.7
小腸	1.8 - 2.0

# 影響輻射生物效應因素 – (3)生物因素- 細胞敏感度

■ 細胞受傷效應與輻射劑量有關

■ 部分傷害會自行修復

■ 影響程度

■ 正比於分裂增殖能力/階段  
與代謝狀況

■ 反比於細胞分化程度

■ 與性別, 年齡, 受暴露器官與組織有關

敏感度	細胞名稱
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 (已分化成熟)

## 影響輻射生物效應因素 – (3)生物因素- DNA修復

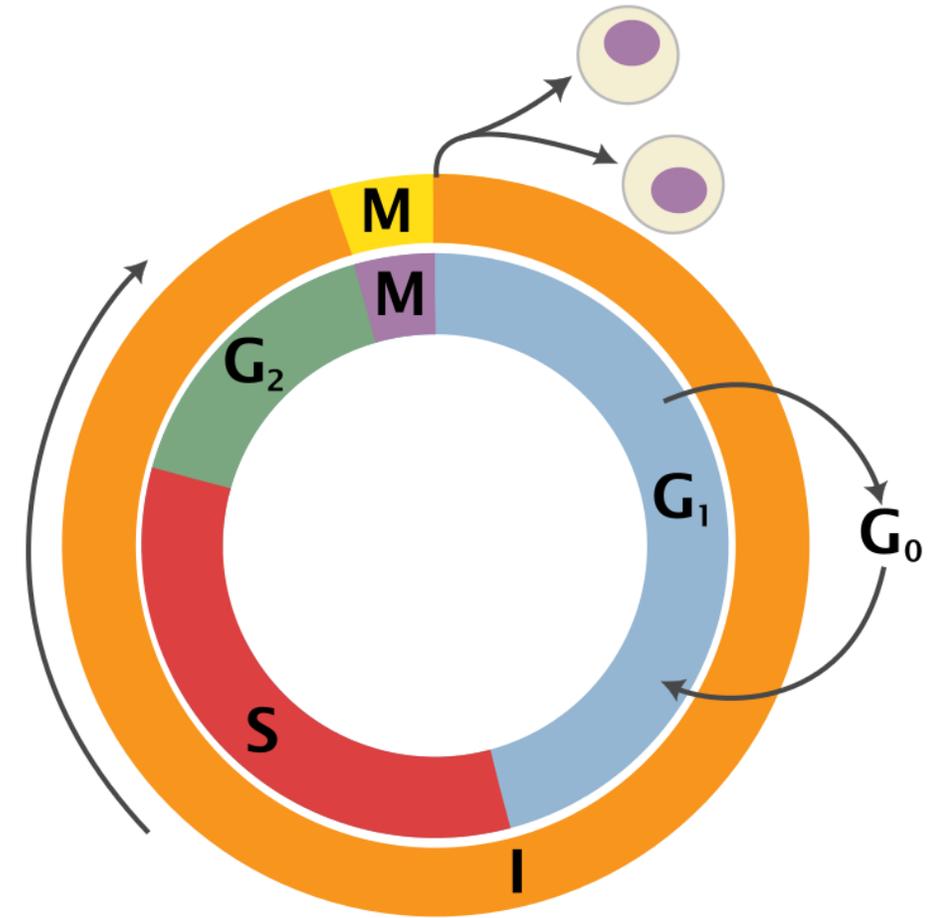
- **再復合(Recombination)**：DNA自由基與鄰近自由基反應再產生原先的DNA, 時間  $< 10^{-11}$ 秒
- **再歸還(Restitution)**:無酵素參與DNA化學復原機制
  - 細胞內還原劑可與自由基反應, 最重要的是穀胱甘肽 (GSH)
  - GSH的硫氫基提供H· 給DNA, 協助DNA復原, 並將能量轉移至反應性較低的硫自由基, 時間 $< 10^{-3}$ 秒
  - $\text{DNA}\cdot + \text{GSH} \rightarrow \text{DNA} + \text{GS}\cdot$
- **修復(Repair)**：細胞酵素可辨識與修復DNA損傷, 時間是幾分鐘到幾小時

# 影響輻射生物效應因素 – (3)生物因素- 細胞週期敏感度

## ■ 分裂間期(I期)：物質準備和積累階段

- DNA合成前期( $G_1$ , gap 1)：DNA、RNA與蛋白質合成的準備期
- DNA合成期(S, synthesis)：染色體複製為2倍
- DNA合成後期( $G_2$ , gap2):分裂準備期
- 靜止期( $G_0$ )：不良生長環境或分化，使細胞進入靜止期，執行正常生理活動

## ■ 分裂期(M期)：細胞增殖



# 影響輻射生物效應因素 – (3)生物因素- 細胞週期敏感度

## ■ G2及M期對輻射最敏感

■ G2期對輻射最敏感 ➡ 分裂所需特異蛋白質和RNA合成障礙

■ M期亦很敏感 ➡ 細胞即刻死亡或染色體畸變 (斷裂, 粘連, 碎片); 即使不影響分裂, 但使下一周期推遲, 或下次分裂時子代細胞夭折

## ■ G1期次之

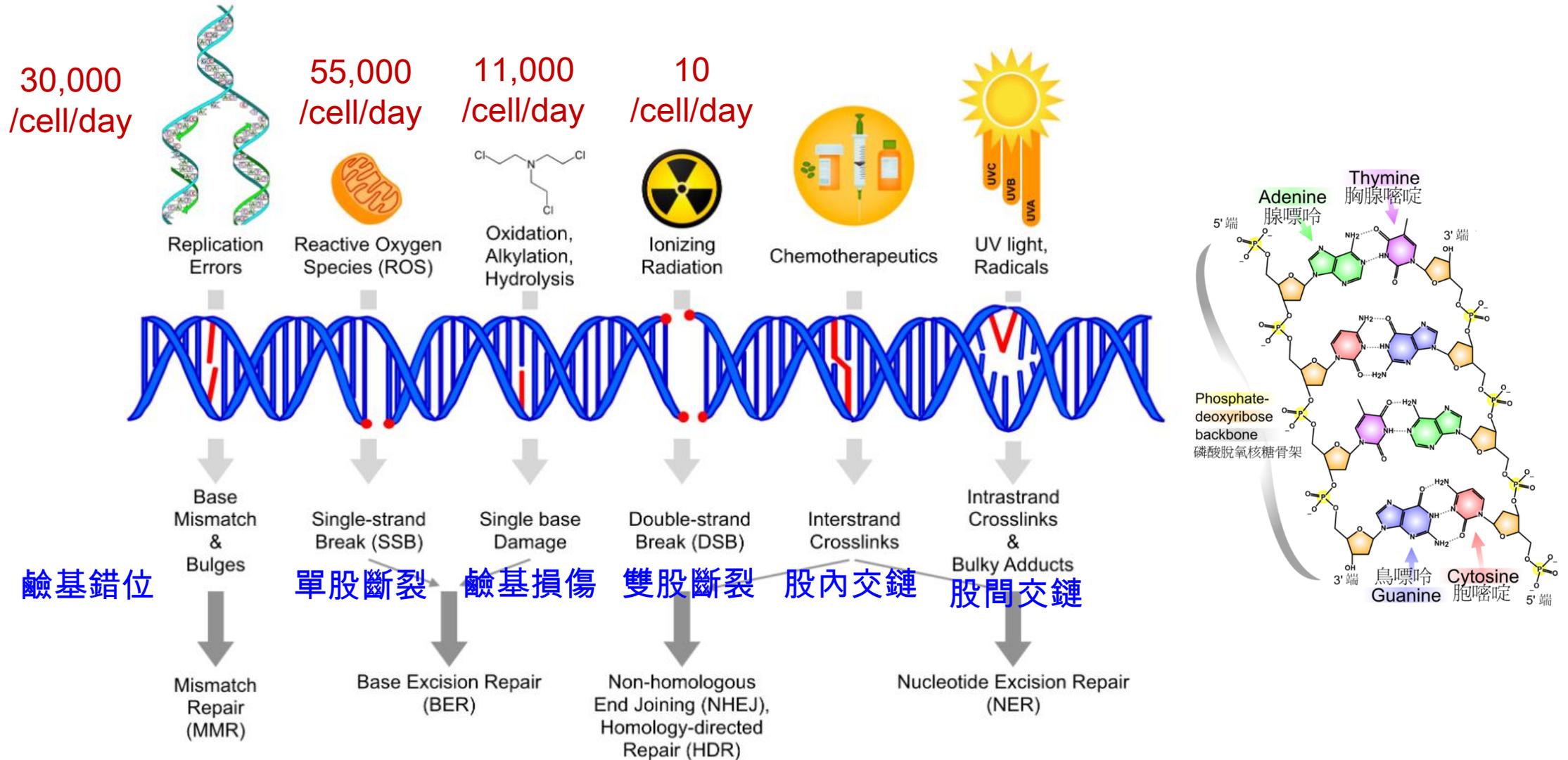
■ 早期對輻射不敏感, 後期較敏感 ➡ 抑制RNA, 蛋白質和酶合成, 延遲進入S期

## ■ S期(特別是晚期)對輻射最不敏感

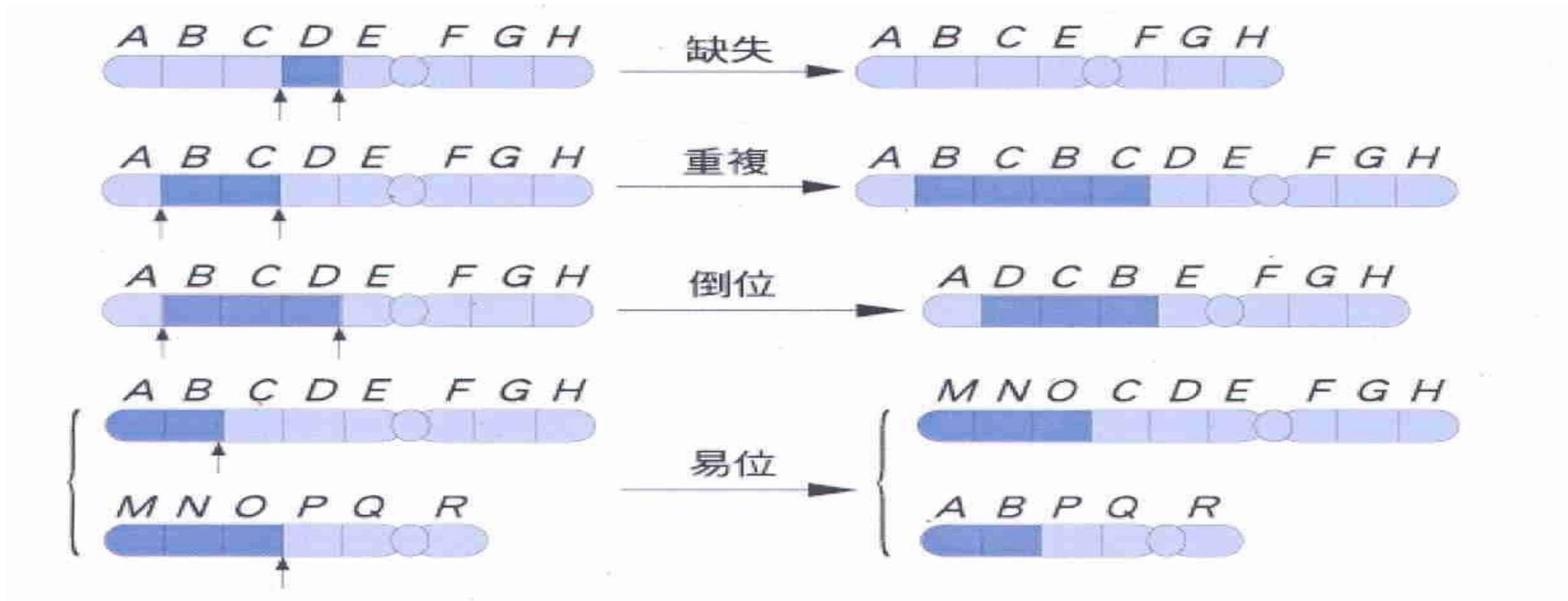
■ S前期較敏感 ➡ 直接阻止DNA合成。

■ S後期敏感性降低 ➡ 已完成DNA合成, 即使DNA受損亦可修複

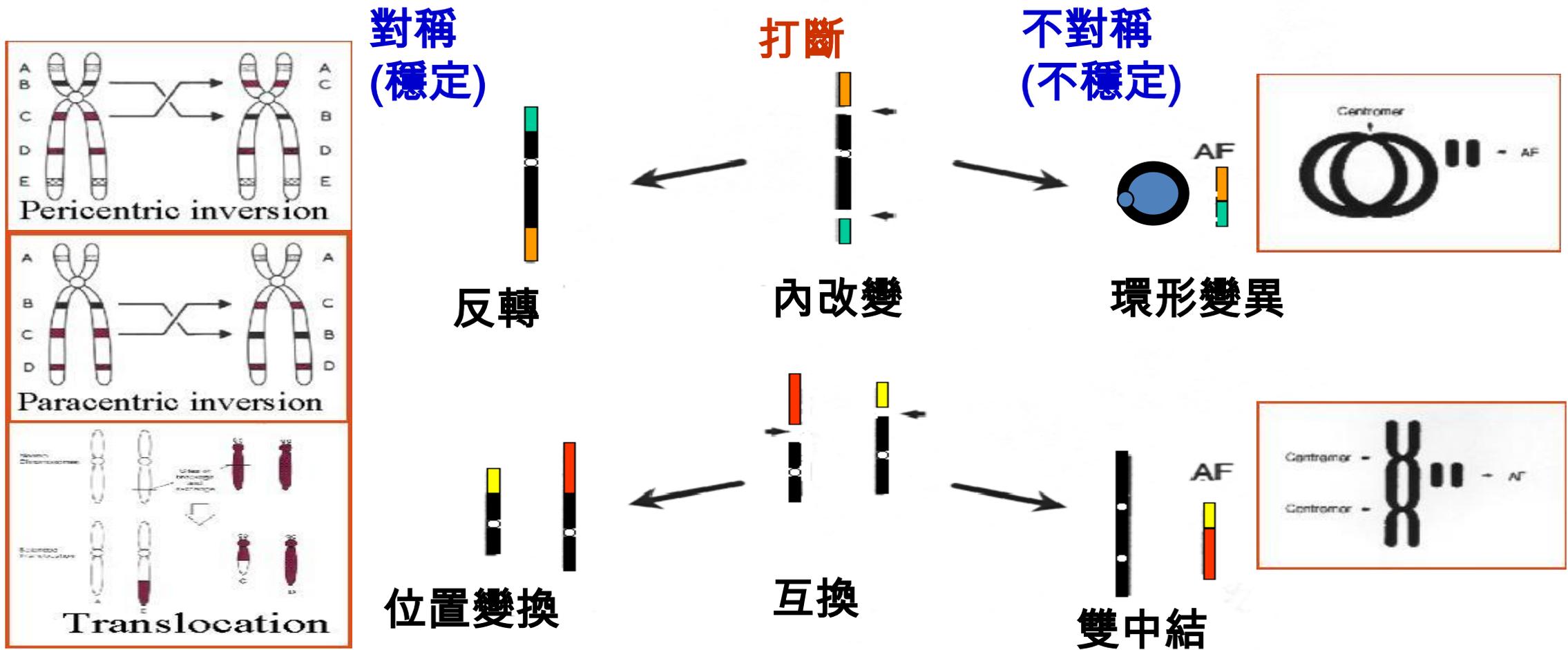
# 輻射對細胞傷害機制 - DNA傷害



# 輻射對細胞傷害機制 - 基因突變

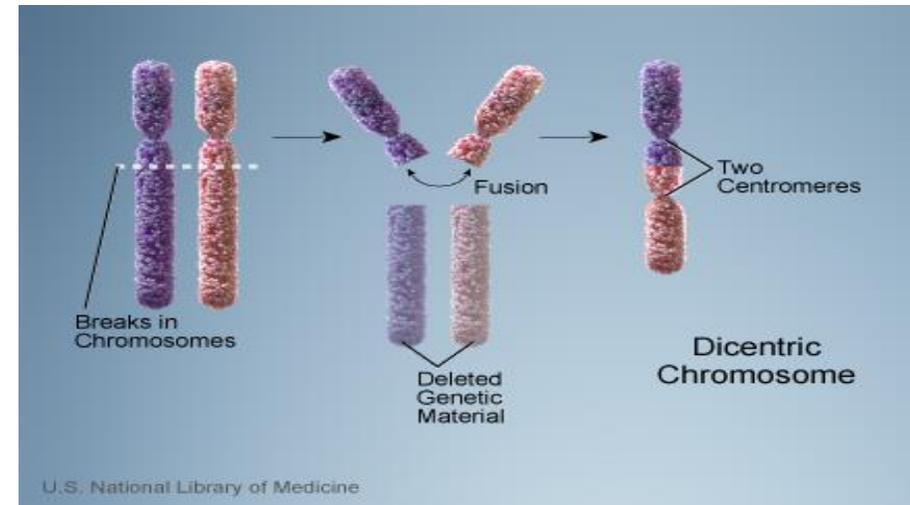
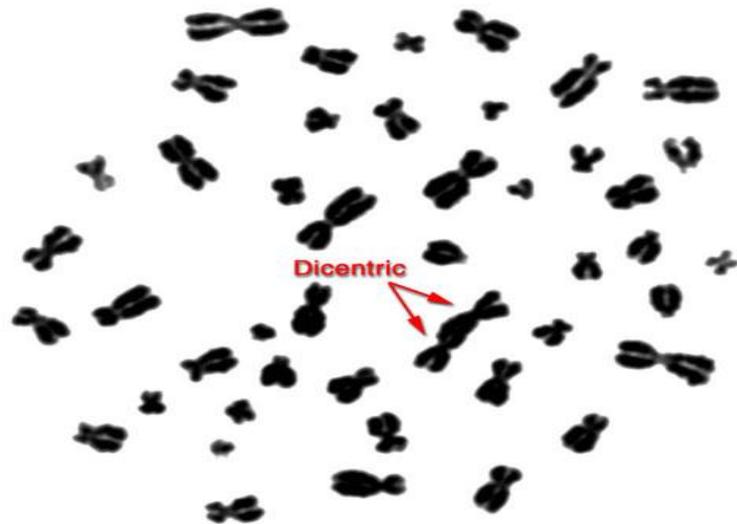
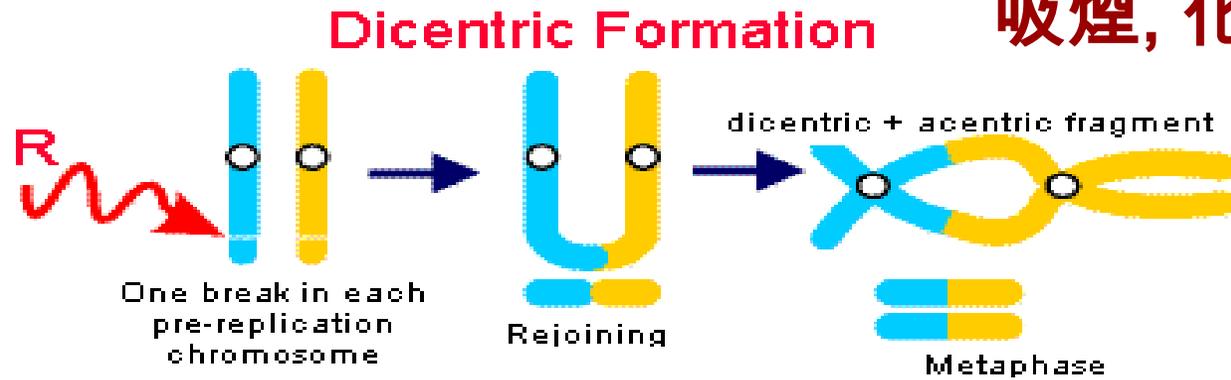


# 輻射對細胞傷害機制 – 染色體變異

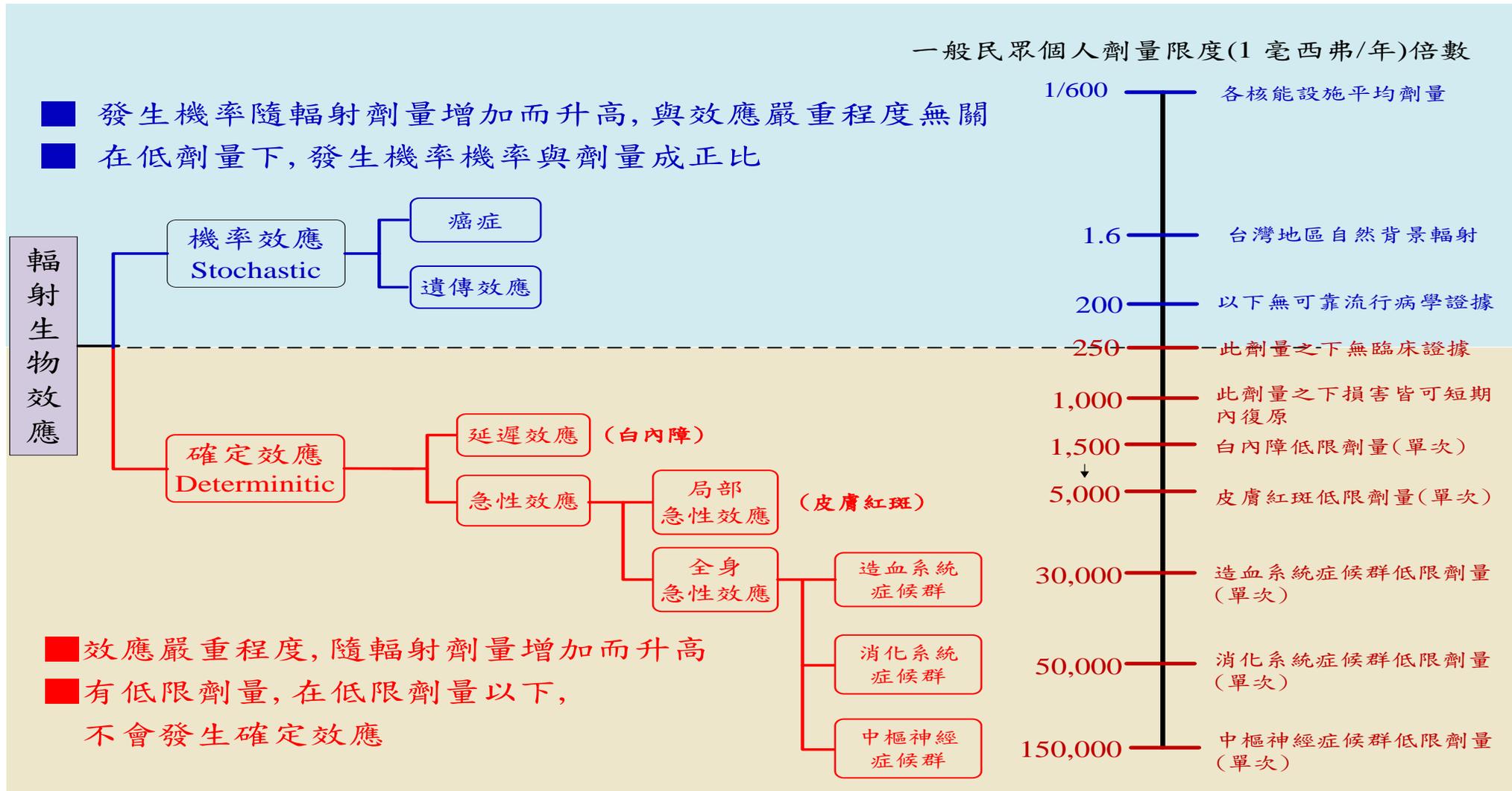


# 輻射對染色體傷害指標 – 雙中結

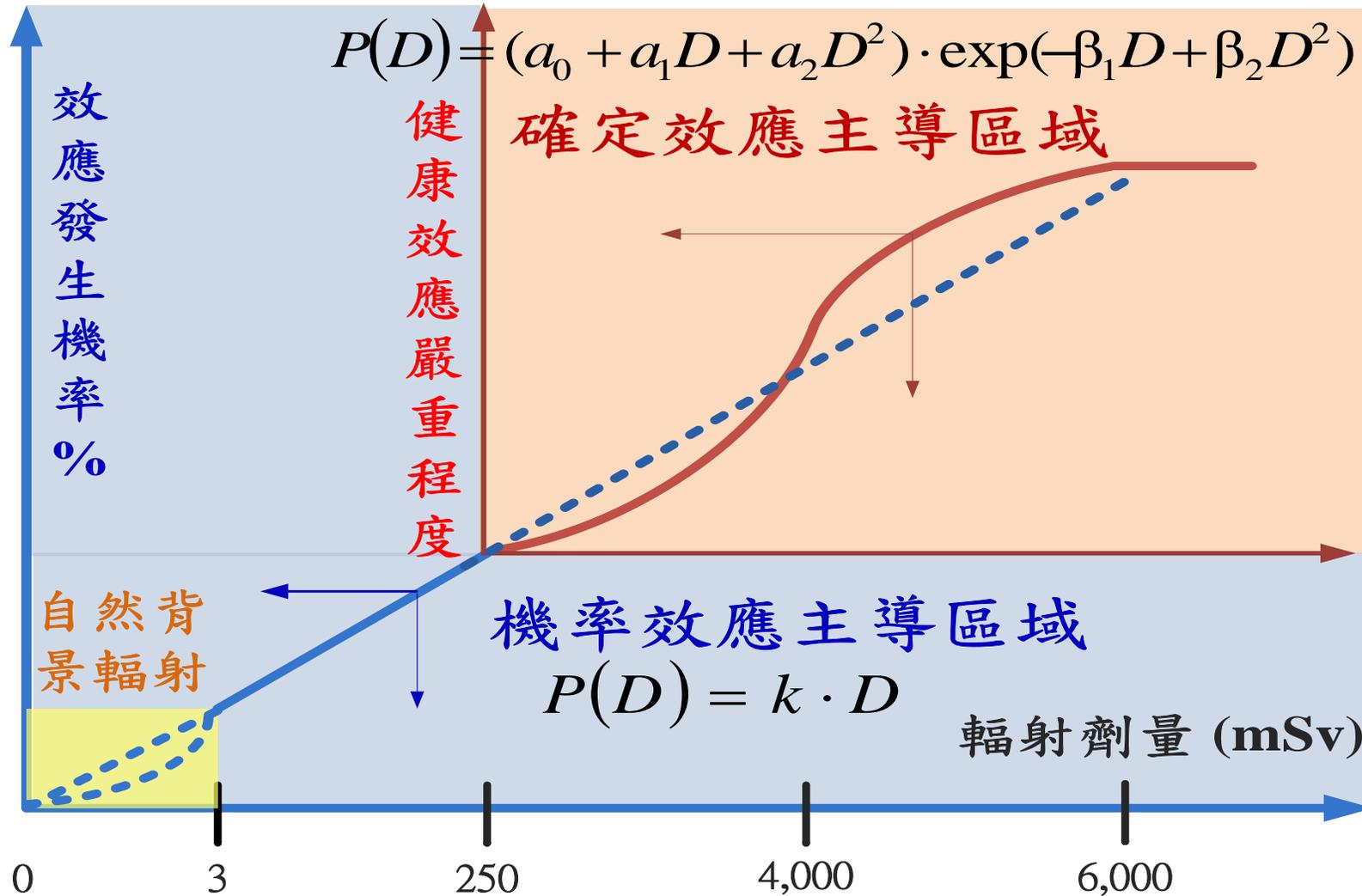
吸煙, 化學藥品也會產生



# 輻射健康效應



# 輻射健康效應- 機率效應與確定效應



# 輻射健康效應- 機率效應(Stochastic effect)

- 游離輻射的致癌效應及遺傳效應
- 發生機率隨輻射劑量增加而升高，與效應嚴重程度無關
  - 基於輻射防護的目的，ICRP假設：低劑量下(年劑量或單次劑量100mSv以下)，發生機率與劑量大小成正比，而且效應發生沒有劑量低限值(Linear Non-threshold, LNT)假設 [ICRP-103]
- 健康效應是否有劑量低限？
  - 劑量低於 200 mSv，沒有癌症及遺傳效應發生率增加的流行病學證據 [UNSCEAR]
  - 每年低於50毫西弗接受輻射劑量；或終生除自然背景輻射之外，累積劑量低於100 mSv，並無明顯健康效應。 [美國保健物理學會]

## 輻射健康效應- 機率效應- 遺傳效應

- 動物實驗：輻射會傷害生殖細胞進而誘發突變(基因突變和染色體變異)
- 高輻射劑量群體流行病學調查 (核爆,高自然輻射地區,核醫人員)：遺傳疾病的發生率並未增加
- 即使輻射有遺傳效應,亦僅發生於胎兒或具有生育能力的個人,且其生殖腺接受某種程度以上劑量

調查對象	調查項目
廣島,長崎核爆後代(日本)	流產,早產,死產,畸形,嬰兒死亡,性別比,染色體變異,遺傳基因突變(細胞,DNA),癌症發生率,死亡率
高天然輻射區群體(中,印)	唐氏症,畸形,死產,性別比,嚴重精神異常
放射醫師後代(英,美)	性別比



# 輻射健康效應- 機率效應- 遺傳效應

遺傳疾病分類	自然發生率	1,000 mSv/1,000,000後代風險	
		第一代	第二代
孟德爾疾病			
常染色體顯性+X連鎖	16,500	750 - 1,500	500 - 1,000
常染色體隱性	7,500	0	0
染色體疾病	4,000	0	0
多因性疾病			
慢性疾病	650,000	250 - 1,200	250 - 1,200
先天性異常	60,000	2,000	400 - 1,000
總數	738,000	3,000 - 4,700	1,150 - 3,200
每接受1,000 mSv佔自然發生率(%)		0.41 - 0.64	0.16 - 0.43

1. 後代危險度係指 :每1,000,000人口, 每人接受1,000 mSv (相當於年輻射劑量限度1,000倍或住在核電廠旁625,000年累積劑量) 暴露後, 每1,000,000後代發生遺傳疾病機率
2. UNSCEAR-2001, ICRP-103



## 輻射健康效應- 機率效應- 致癌效應

- 游離輻射屬Group1致癌物質，與酒精飲料，太陽光(UV)，鹹魚，油漆，烤香腸(Benzo[a]pyrene)同級 [IARC]
- 低劑量致癌是機率效應，接受輻射只是使致癌的機率增加，但並非人人一定會致癌
- 日本核爆生存者長期調查顯示，低於250 mSv劑量者，並無任何臨床症狀，白血病或其他實體癌的發生率都和一般人相同 [BEIR-V]
- ICRP估計:接受1,000 mSv全身暴露(相當於年劑量限度1,000倍)，可能增加5%罹癌機率 (自然罹癌機率約20%) [ICRP-60]



## 確定效應 (Deterministic effect)

- 指因游離輻射曝露導致組織或器官之功能損傷而造成之效應
- 存在劑量低限值。
  - 低限劑量以下, 不會發生確定效應
  - 低限劑量之上, 效應嚴重程度隨輻射劑量增加而升高
- 在低劑量下(100 mSv或每年100 mSv以下), 並沒有任何組織被認為會表現出臨床上相關的功能損傷。[ICRP-103]



# 確定效應 – 特定器官確定效應之低限劑量

組織與效應	低限劑量	
	急性曝露 (mSv)	慢性曝露(mSv/年)
睪丸		
暫時不孕	150	400
永久不孕	3,500 - 6,500	2,000
卵巢		
不孕	2,500 - 6,000	200以上
水晶體		
混濁	500 - 2,000	100 以上
白內障	5,000	150 以上
骨髓		
造血障礙	500	400 以上
發育不全	1,500	1,000 以上
胚胎與胎兒畸形	100	
皮膚		
紅斑症	3,000 - 5,000	
乾性脫板	3,000 - 5,000	
濕性脫板	20,000	
甲狀腺		
功能降低	2,500 - 30,000	
急性發炎	小孩1,000 - 10,000	

ICRP-41, 60, 103



# 確定效應 – 急性輻射癥候群

部位	最終效應	病程時間	劑量 (Gy)
全身	死亡	1~2天	>20
中樞神經(CNS)	死亡	7天	10~20
消化道(GI)	死亡	12天	4~10
造血系統(HE)	不會死亡	30天	2~3

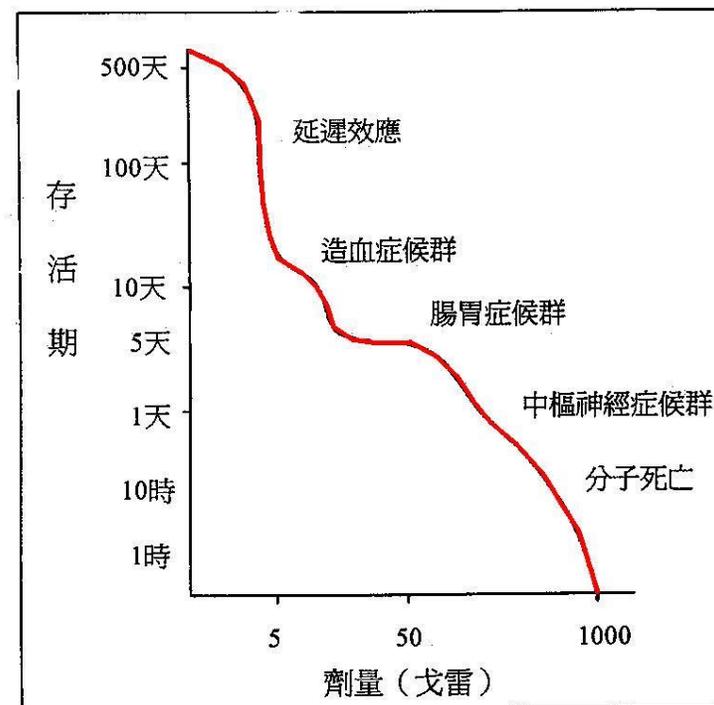


圖 5 急性傷害存活期與劑量的關係



輻射劑量學觀念

# 輻射劑量學觀念

## ■ 輻射劑量學觀念

- 曝露
- 吸收劑量
- 等價劑量
- 輻射加權因數
- 有效劑量
- 組織加權因素
- 輻射風險度
- 約定等價劑量
- 約定有效劑量
- 劑量限度

# 輻射劑量學觀念 – 曝露

■ 曝露(exposure,  $X$ ),  $X=dQ/dm$

■  $dQ$ 是光子在質量 $dm$  空氣中,釋放或產生的電子與正子完全停止在空氣中時,在空氣中產生相同電性的離子中全部電荷之絕對值。 [ $C \cdot kg^{-1}$ ]

■ 不包含因吸收該電子發射的致動輻射所產生的游離

■ 國際單位： $C \cdot kg^{-1}$

■ 慣用單位：侖琴(Roentgen, R)  $1 R = 1 \text{ esu} \cdot \text{cm}^{-3}$

$$\text{■ } 1R = \frac{1 \text{ esu}}{0.001293 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ C}}{3 \times 10^9 \text{ esu}} \cdot \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

# 輻射劑量學觀念 - 吸收劑量

## ■ 吸收劑量(absorbed dose, $D$ )

■ 單位質量的物質吸收輻射的平均能量

■ 游離輻射授予質量 $dm$  物質的平均能量  $d\bar{\varepsilon}$

$$D \equiv \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} = \Phi \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \bar{E}_{ab} = \Phi \cdot E \cdot \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

■ 國際單位(SI 制) : **Gy**,  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

■ 慣用單位 (cgs制) : **rad**,  $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1}$

■  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$  ( $1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$ )

# 輻射劑量學觀念 - 暴露與吸收劑量

## ■ 吸收劑量與曝露關係

$$D = \frac{\Delta E}{m} = \frac{\Delta Q}{m} \cdot W = \frac{\Delta Q \cdot W}{\rho \cdot V}$$

- $D$  = 吸收劑量 [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $\Delta Q$  = 輻射導致充氣式劑量計產生之電量 [C]
- $W$  = 比游離能 [ $33.85 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1}$ ]
- $\rho$  = 劑量計內充氣密度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $V$  = 劑量計空腔體積 [ $\text{m}^3$ ]

# 輻射劑量學觀念 – 等價劑量

## ■ 等價劑量(equivalent dose, $H_{T,R}$ )

- 指器官劑量與對應輻射加權因數乘積之和。輻射R 在組織或器官T中產生的等價劑量 $H_{T,R}$ ，是組織或器官T中的平均吸收劑量 $D_{T,R}$ 與輻射加權因數 $w_R$  的乘積。

$$H_{T,R} = \sum_R w_R \times D_{T,R}$$

- $H_{T,R}$  = 輻射R 在組織或器官T所產生的等價劑量[Sv]
- $w_R$  = 輻射R 的輻射加權因數
- $D_{T,R}$  = 輻射R 在組織或器官T 內的平均吸收劑量 [Gy]

# 輻射劑量學觀念 – 輻射加權因數(1)

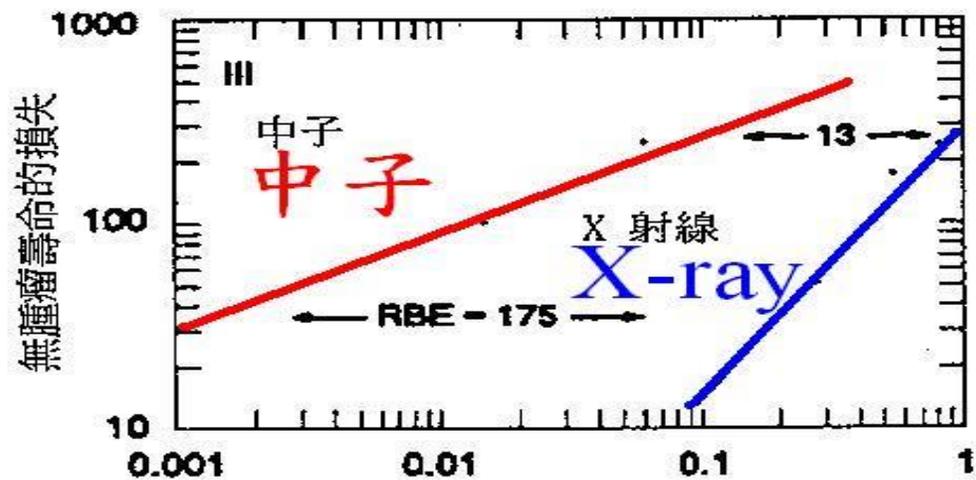
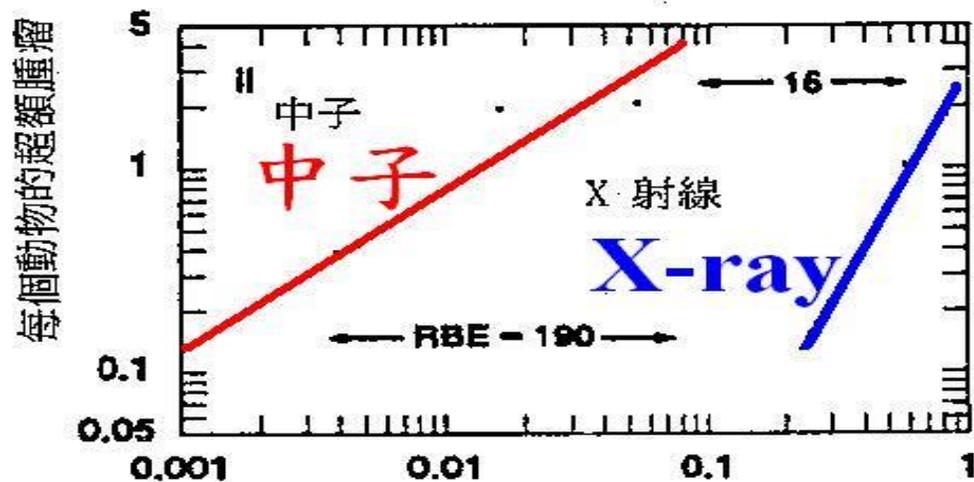
輻射種類與能量區間	ICRP-26	ICRP-60	ICRP-103
1. 所有能量光子	1	1	1
2. 所有能量電子及 $\mu$ 介子	1	1	1
3. 所有能量質子與 $\pi$ 介子	10	5	2
4. 中子			
4.1. $En < 10$ keV		4	連續 方程式
4.2. $10$ keV $< En < 100$ keV		10	
4.3. $100$ keV $< En < 2$ MeV	10	20	
4.4. $2$ MeV $< En < 20$ MeV		10	
4.5. $En > 20$ MeV		5	
5. $\alpha$ 粒子, 分裂碎片, 重核	20	20	20

## 輻射劑量學觀念 – 輻射加權因數(2)

- ICRP-60<sup>+</sup>：輻射加權因數(Radiation Weighting Factor,  $w_R$ )
- 相對生物效應(relative biological effectiveness, RBE)而來 ⇒  
輻射生物效應的性質

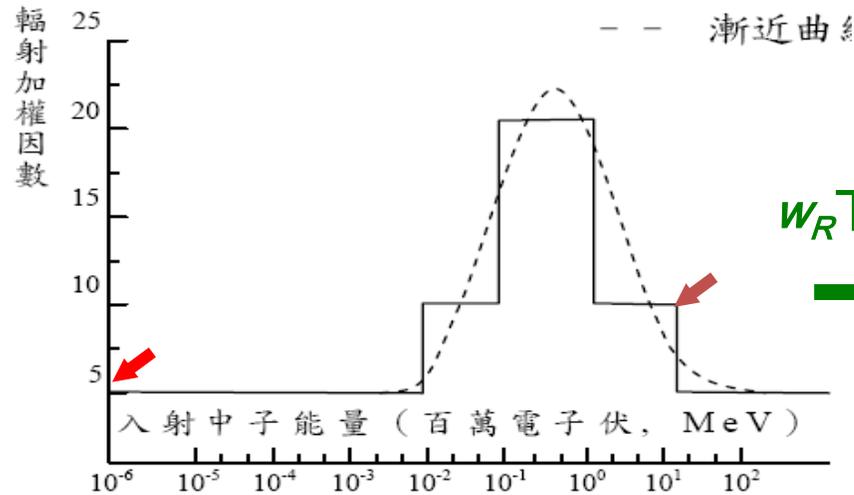
$$\text{RBE} = \frac{\text{250 kVp X光造成某生物效應所需劑量}}{\text{其他輻射產生相同效應所需劑量}}$$

# 輻射劑量學觀念 – 輻射加權因數(3)

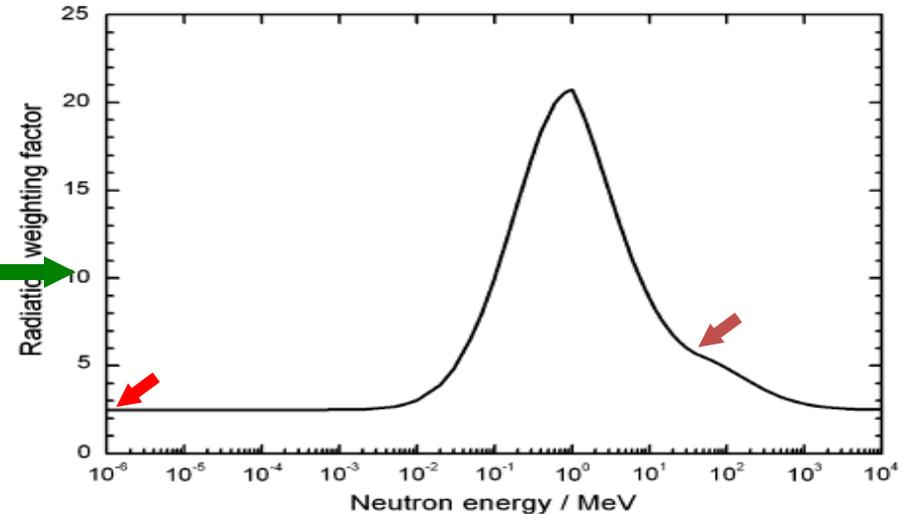


輻射種類	RBE
200 keV X-ray	1
γ-ray	1
β-particle	1
Proton	10
α-particle	10-20
Neutron (Slow)	2
Neutron (Fast)	10

# 輻射劑量學觀念 – 輻射加權因數(4)



ICRP-60  $w_{R,n}$  模型



ICRP-103  $w_{R,n}$  模型

	$w_R = 2.5 + 18.2 \times \exp(\ln(E_n)^2 / 6)$	$E_n < 1 \text{ MeV}$
ICRP-60	$\longrightarrow 5.0 + 17.0 \times \exp(\ln(2E_n)^2 / 6)$	$1 \text{ MeV} < E_n \leq 50 \text{ MeV}$
	$2.5 + 3.25 \times \exp(\ln(0.04E_n)^2 / 6)$	$E_n > 50 \text{ MeV}$

# 輻射劑量學觀念 – 有效劑量

## ■ 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乘積之和

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \times \sum_R w_R \times D_{T,R}$$

- $E$  = 有效劑量 [Sv]
- $H_T$  = 組織或器官T 所受的等價劑量 [Sv]
- $w_T$  = 組織或器官T 的組織加權因數
- $D_{T,R}$  = 輻射R 在組織或器官T 內的平均吸收劑

# 輻射劑量學觀念 – 組織加權因數(1)

器官或組織	ICRP-26	ICRP-60	ICRP-103
性腺(Gonad)	0.25	0.20	0.08
紅骨髓 (Bone marrow)	0.12	0.12	0.12
→ 結腸 (Colon)	-	0.12	0.12
→ 肺 (Lung)	0.12	0.12	0.12
→ 胃 (Stomach)	-	0.12	0.12
→ 膀胱 (Bladder)	-	0.05	0.04
→ 乳房 (Breast)	0.15	0.05	0.12
→ 肝 (Liver)	-	0.05	0.04
→ 食道 (Oesophagus)	-	0.05	0.04
→ 甲狀腺 (Thyroid)	0.03	0.05	0.04
→ 皮膚 (Skin)	-	0.01	0.01
→ 骨表面 (Bone surface)	0.03	0.01	0.01
→ 腦 (Brain)	-	-	0.01
→ 唾液腺 (Salivary glands)	-	-	0.01
其餘組織或器官	0.30	0.05	0.12

# 輻射劑量學觀念 – 組織加權因數(2)

## ■ 性腺比重漸低

- 遺傳效應不確定性降低 (BEIR-V → BEIR-IIV)

## ■ 器官/組織健康效應明確化

- ICRP-26 : 「其餘組織或器官」指取5個影響最顯著器官, 每個0.06
- ICRP-60 : 「其餘組織或器官」指副腎, 腦, 小腸, 腎, 肌肉, 胰臟, 脾, 胸腺, 子宮。
- ICRP-103 : 「其餘組織或器官」指腎上腺, 外胸(ET), 膽囊, 心臟, 腎, 淋巴結, 肌肉, 口腔黏膜, 胰, 前列腺, 脾, 胸腺, 子宮/子宮頸

# 輻射劑量學觀念 – 輻射風險度(1)

標稱風險 係數	報告編號	受曝露族群	
		成年族群	全體民眾
癌症風險 ( $\times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ )	ICRP-26	1.25	-
	ICRP-60	4.80	6.00
	ICRP-103	4.10	5.50
遺傳風險 ( $\times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ )	ICRP-26	0.40	-
	ICRP-60	0.80	1.30
	ICRP-103	0.10	0.20
總風險 ( $\times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ )	ICRP-26	1.65	-
	ICRP-60	5.60	7.30
	ICRP-103	4.20	5.70

## 輻射劑量學觀念 – 輻射風險度(2)

### ■ ICRP-26輻射風險評估基準：BEIR III (1979)

- 罹患癌症 + 嚴重遺傳損害(所有子代)

### ■ ICRP-60輻射風險評估基準：BEIR V (1990)

- [致死癌症致死率+非致死癌症發生率+相對壽命損失]  
+ 嚴重遺傳損害(前2代但保守)

### ■ ICRP-103輻射風險評估基準：BEIR VII (2005)

- [致死癌症致死率+相對壽命損失] + 嚴重遺傳損害(前2代但精確)

# 輻射劑量學觀念 – 約定等價劑量

## ■ 約定等價劑量 (committed equivalent dose, $H_T$ )

- 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 [Sv]

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

- $t_0$  = 攝入放射性物質的時刻
- $\dot{H}_T(t)$  =  $t$  時刻組織或器官T的等價劑量率
- $\tau$  = 攝入放射性物質之後經過的時間; 年滿17歲,  $\tau = 50$ 年; 年未滿17歲, 攝入計算至70歲

# 輻射劑量學觀念 – 約定有效劑量

## ■ 約定有效劑量 (committed effective dose, $E$ )

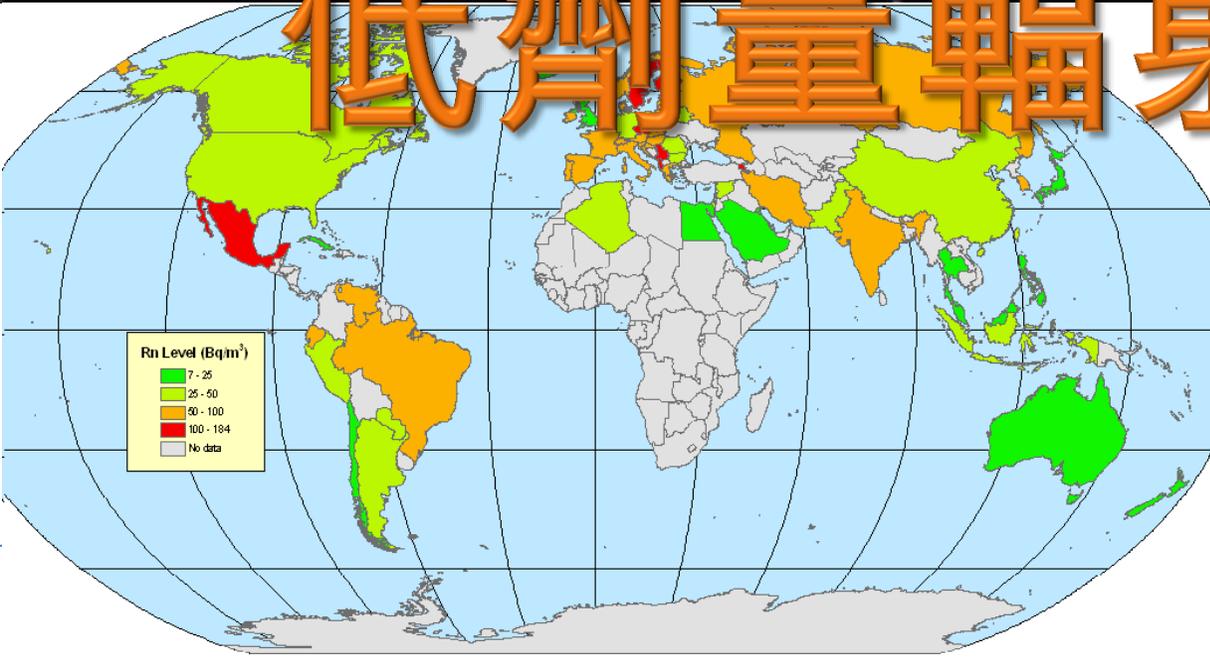
- 指各組織或器官之約定等價劑量與組織加權因數乘積之和 [Sv]

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

- $E(\tau)$  = 約定有效劑量
- $H_T(\tau)$  = 積分至 $\tau$ 時間時, 組織或器官T的約定等價劑量
- $w_T$  = 組織或器官T 的組織加權因數

# 輻射劑量學觀念 – 劑量限度

	ICRP60
防護量	有效劑量 $E$ 等價劑量 $H_T$
定義	$E = \sum_T w_T \cdot H_T$ $H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$ <p><math>w_T</math> : 組織或器官加權因數  <math>w_R</math> : 輻射加權因數  <math>D_{T,R}</math> : 輻射<math>R</math>在組織<math>T</math>中平均吸收劑量</p>
職業劑量 限度	$E \leq 50$ mSv/年; $\leq 100$ mSv/5年 $H_T \leq 500$ mSv/年 (四肢,皮膚) $\leq 150$ mSv/年 (眼球水晶體)
民眾劑量 限度	$E \leq 1$ mSv/年 $H_T \leq 50$ mSv/年 (皮膚) $\leq 15$ mSv/年 (眼球水晶體)



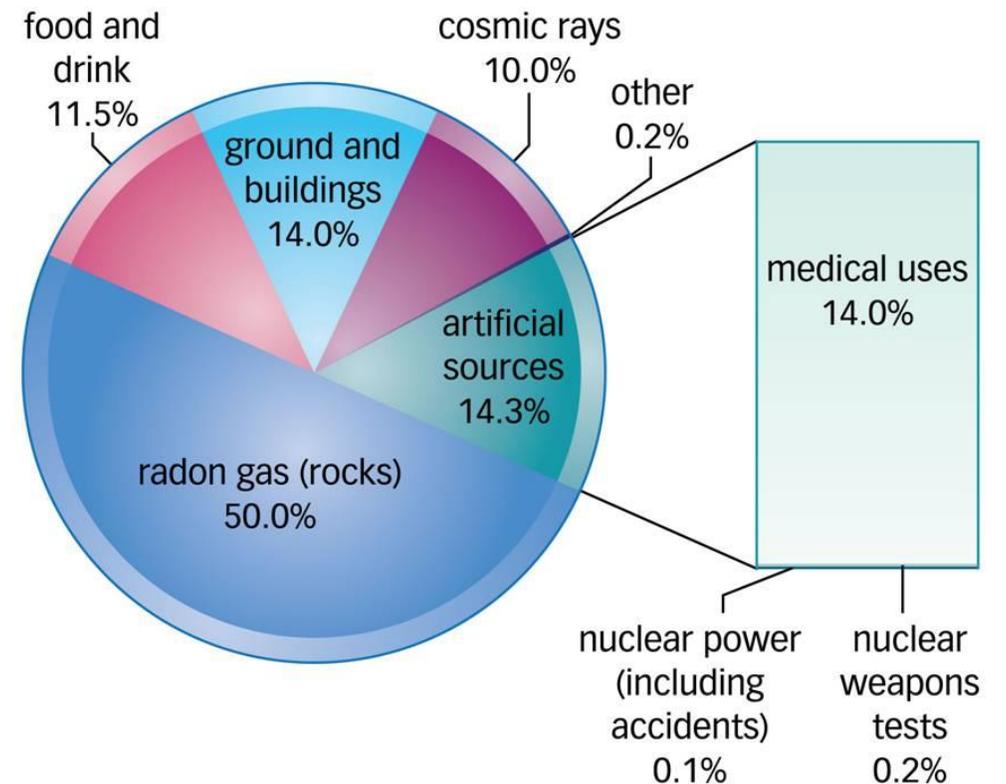
# 低劑量輻射健康效應



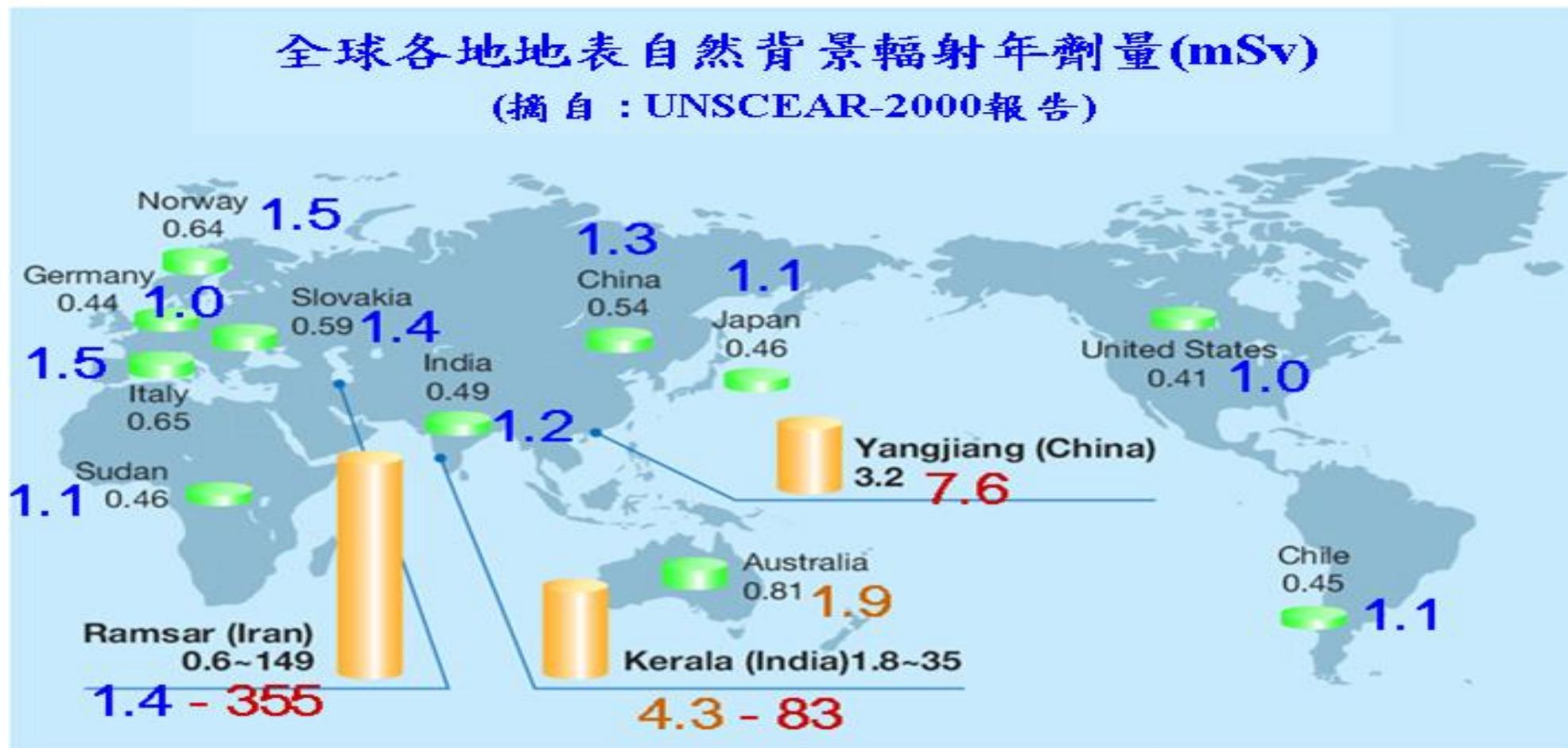
人類自古至今生存在一個陽光、空氣、水與輻射的自然環境中

# 低劑量輻射健康效應 – 自然背景輻射無所不在

來源	台灣	全球	高輻射區
宇宙射線	0.25	0.38	2.0
宇宙射線衍生核種	0.01	0.01	0.01
體外曝露	0.64	0.48	4.3
體內曝露(氡除外)	0.28	0.23	0.6
氡劑量	0.44	1.26	10
合計	1.62	2.4	



# 低劑量輻射健康效應 – 高背景輻射區域



台灣地表平均輻射劑量率 = 0.42 mSv/年, 數字為當地與台灣年輻射劑量率比值

# 低劑量輻射健康效應 – 高背景輻射區域民眾健康未受影響

地區	廣東陽江	印度Kerala
調查期間	20年	4年
調查人數	12.5萬人	15.5萬人
背景輻射劑量		
1. 平均劑量(毫西弗/年)	6.4	4.2
2. 高輻射區/對照區劑量倍數	<b>2.6</b>	<b>3.7</b>
3. 高輻射區/台灣劑量倍數	<b>4.0</b>	<b>2.6</b>
標準化癌症死亡率(100,000 <sup>-1</sup> )		
1. 高輻射區	58	97
2. 對照區	66	115
高輻射區/對照區癌症致死率比值	<b>0.88</b>	<b>0.84</b>

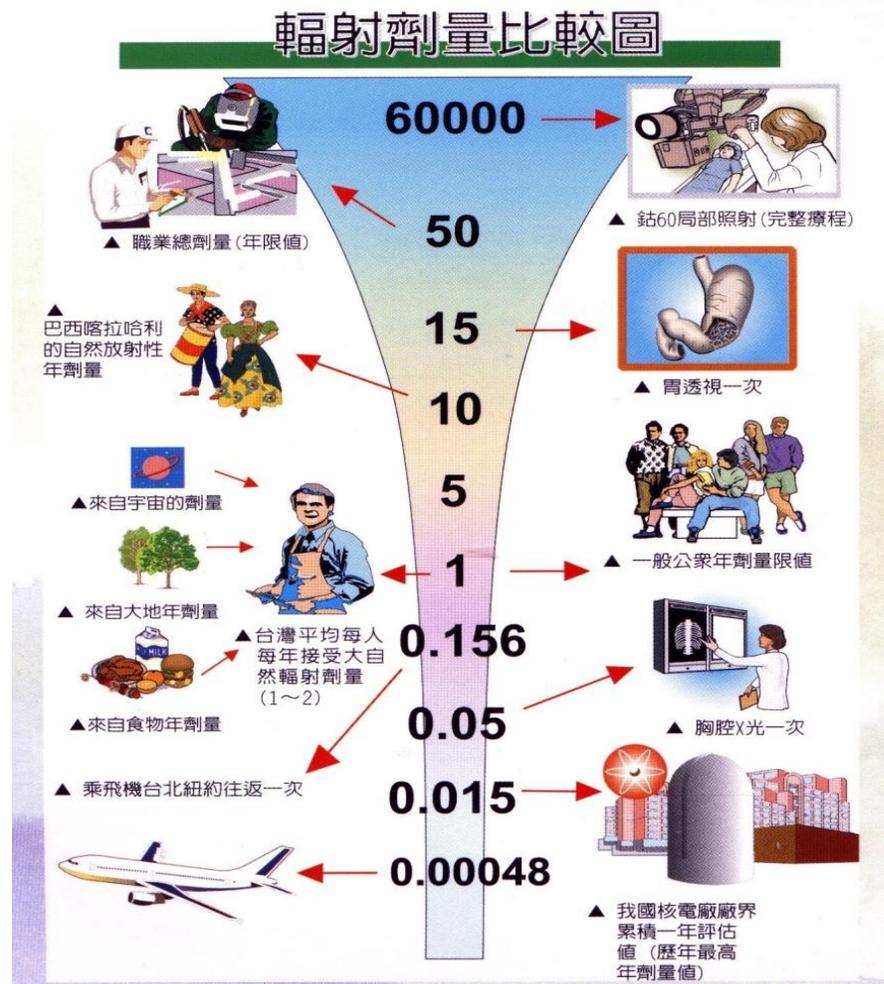
1. 台灣地區自然背景輻射劑量率：1.62毫西弗/年；台灣地區全癌症標準化死亡率；270/100,000 @95年

2. T. Iwasaki (2009), Trying to elucidate the Effects of Low Dose Radiation, CRIEPI News No. 451

# 低劑量輻射健康效應 – 醫療輻射劑量也很驚人

## 某醫學中心“菁英健檢”項目; 全套輻射劑量：37.2毫西弗

41		腹部超音波 (肝膽胰脾腎)
42		經直腸攝護腺超音波
43	超音波檢查	甲狀腺超音波
44	X光檢查	胸腔X光檢查 0.02毫西弗
45		左側胸部X光 0.2毫西弗
46		脊椎X光檢查 1.5毫西弗
47		腹部X光檢查 1.5毫西弗
48	特殊檢查	低輻射劑量胸部電腦斷層 7毫西弗
49		全身核磁造影掃描 (頭頸部)
50		全身核磁造影掃描 (軀幹部)
51		全身核磁造影掃描 (肌肉骨骼)
52		骨質密度檢查 (腰椎)
53		骨質密度檢查 (右寬關節)
54	10毫西弗	全身氣去氧葡萄糖正子造影檢查
55	17毫西弗	鉅-201心肌灌注攝影
56		心律變異性分析 (自律神經檢查)
57	內視鏡檢查	上消化道泛內視鏡檢查
58	內視鏡檢查	全大腸鏡檢查
59	麻醉科	無痛麻醉
60	其它項目	C - 13 尿素呼氣檢查幽門桿菌
61		健檢報告匯整 (含光碟片)
62	其它項目	健檢諮詢門診 (解說報告)

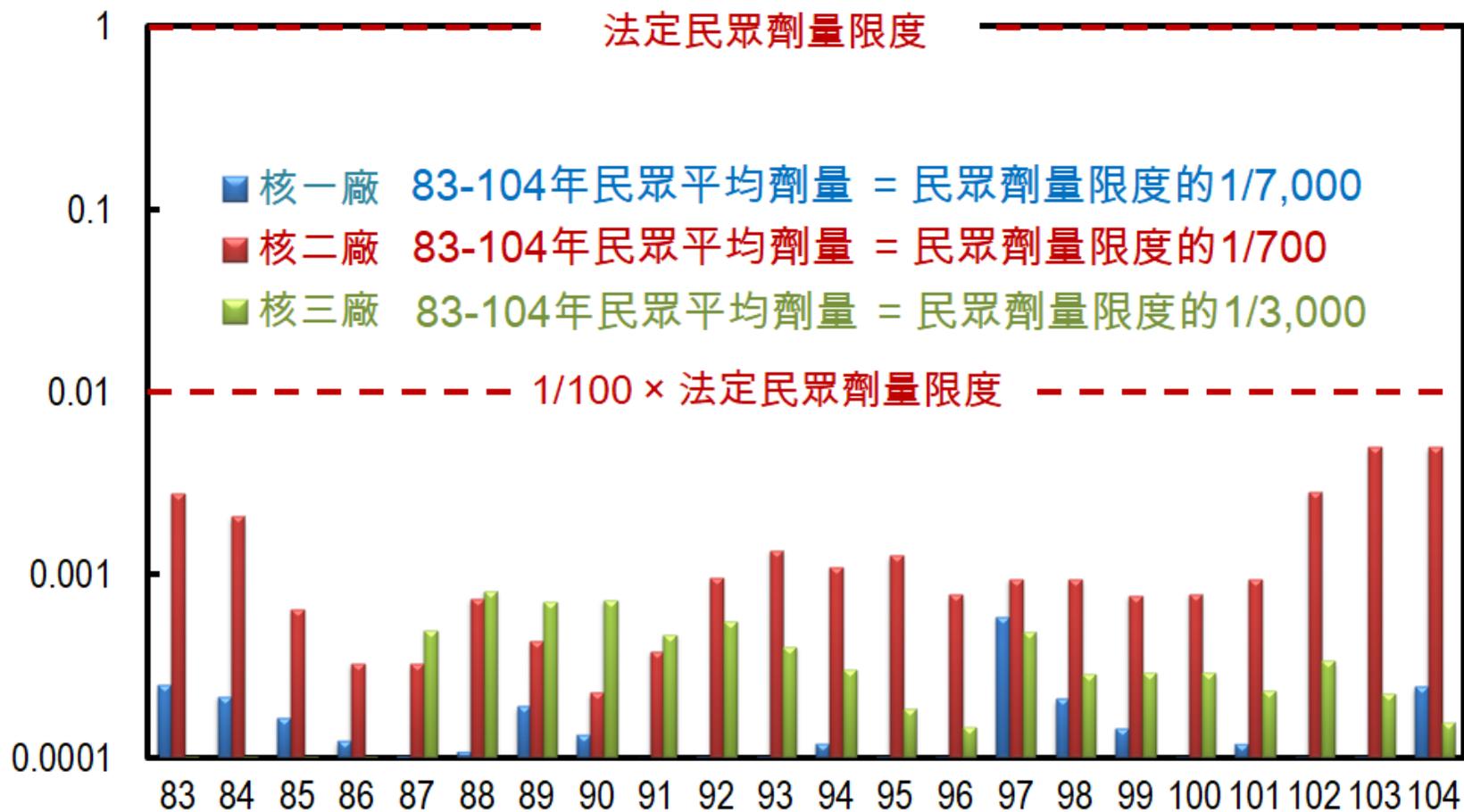


# 低劑量輻射健康效應 – 研究結論

輻射劑量 倍數(約)	劑量 (毫西弗)	事件	結果
156,000	250	日本原爆生存者(單次)	無任何臨床症狀, 白血病或實體 癌發生率都和一般人相同
125,000	200	UNSCEAR-1993	全球長期流行病學調查, 仍未找 出具體有害的輻射傷害證據
8,700	14	車諾堡事故所有暴露族群平均劑量(累積)	額外增加自然癌症死亡率0.4%
4,000	6.4	廣東陽江高自然背景輻射區劑量(每年)	1. 無顯著健康效應 2. 癌症死亡率比對照組低20%
1,500	2.4	全球自然背景輻射平均劑量(每年)	
1,000	1.62	台灣自然背景輻射平均劑量(每年)	
600	1	我國法規民眾個人劑量限度(每年)	1. 不致確定效應發生 2. 抑低機率效應致可接受範圍
1	0.0016	我國核設施廠外個人最大劑量(每年)	7項調查一致結論為"無顯著健 康效應"

# 低劑量輻射健康效應 – 核能電廠運轉輻射劑量

各廠廢氣+廢液造成廠外民眾最大劑量(毫西弗/年)



# 我國核能電廠附近居民健康調查結果 (1993-2007)

調查者	調查項目					
	癌症發生率 與死亡率	血液檢驗	健康狀況	孕婦與 新生兒	個人輻射 劑量	與電廠距離
楊冠洋(1993)	廠附近組較低	-	-	-	-	-
李源德(1994)	-	有正面效益	-	-	-	Hb, HCT, PLT, WBC, RBC 有正面效益
林瑞雄(1997)	無顯著差異	無顯著差異	-	-	-	-
林瑞雄(1999)	-	無顯著差異	無顯著差異	-	無顯著差異	Hb, HCT, PLT, WBC, RBC 有正面效益
鍾相彬(1998)	無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異	-	-	-
楊志良(2007)	無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異	廠附近組劑 量較低	-

# 我國核能電廠附近居民健康調查結果 (1993-2007)

- 心血管疾病, 癌症, 損害與中毒為死亡原因前3位, 死亡率在電廠運轉前後並無明顯差異[楊冠洋]
- 無可靠客觀資料顯示金山社區各地可能遭受到的低劑量輻射值 [李源德]
- 研究地區食道癌, 胃癌, 肺癌偏高, 可能是來自社經地位, 飲食, 喝酒及抽菸等生活習慣所造成, 與核能設施無關 [林瑞雄]
- 民國60至83年調查組與對照組之全死因與各部位癌症標準化死亡率及標準化死亡比(SMR)均無差異。「核三廠附近居民之健康狀況與對照組間相比並無差異。」 [鍾相彬]



# 我國核能電廠附近居民健康調查結果 (1993-2007)

- 在無法有效測量出個人的暴露劑量及控制飲食,生活型態,職業等干擾因子之前,便不宜遽下結論認為因核子設施所產生之低劑量輻射,可能會造成癌症死亡率增高 [林瑞雄]
- 核電廠附近產婦在懷孕健康情形,活產率或新生兒出生健康狀況,均與對照組婦女無顯著差異 [楊志良]
- 不論是主要死因或相關癌症的死亡率,二組都沒有顯著不同,表示核能電廠的存在對當地居民並未造成明顯的健康衝擊 [楊志良]

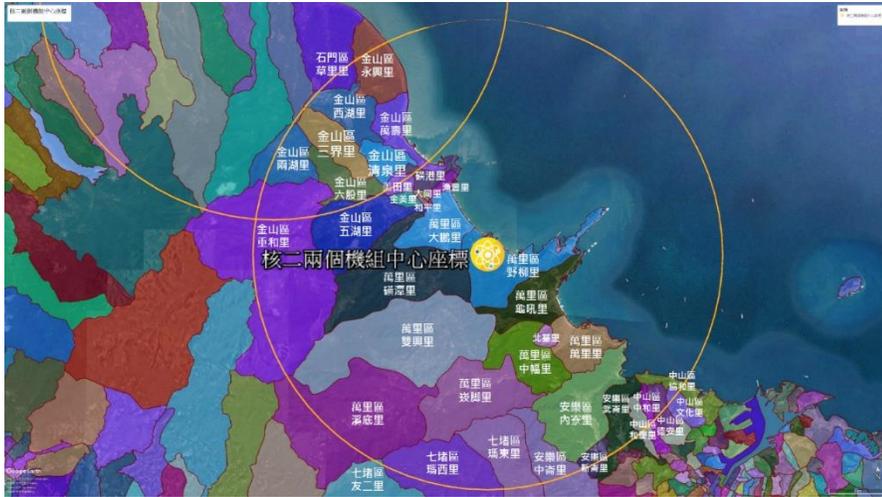
# 我國核能電廠附近居民健康調查 (2020)

## ■ 研究特色

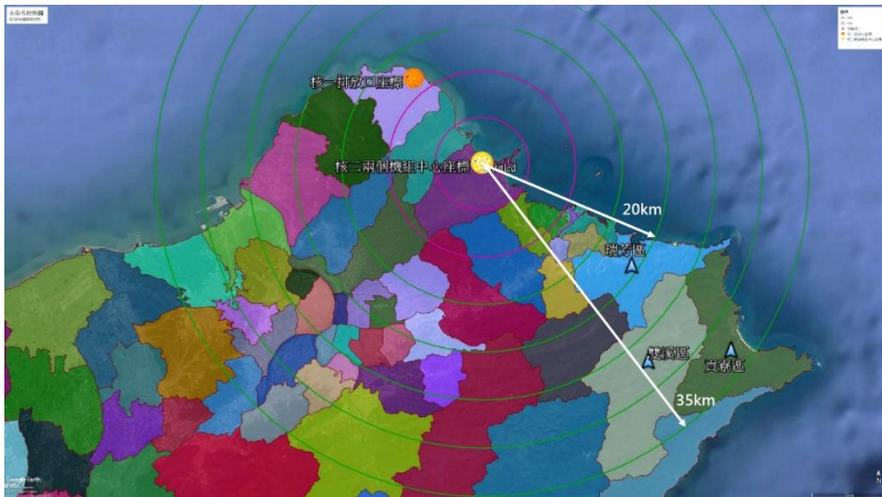
- 調查方法嚴謹 → 2014-2016先進行方法論研究：“完成核子設施鄰近民眾癌症流行病學調查研究方法指引” → 世代研究法(cohort study)
- 研究方法可信度高 → 使用流行病學界公認高可信度的“回溯世代研究法”(大多數研究採用之“生態研究法”可信度較低)
- 調查規模龐大 → 追溯1978-2017年電廠半徑8公里內21.5萬人(470萬人·年)為“廠附近組”(實驗組)；以距電廠較遠25.8萬人(628萬人·年)為“非廠附近組”(對照組)
- 研究項目完整 → 輻射劑量評估、29種癌症罹患風險評估
- 干擾因子鑑別 → 自然背景輻射, 醫療輻射, 飲食習慣, 距離-劑量關係



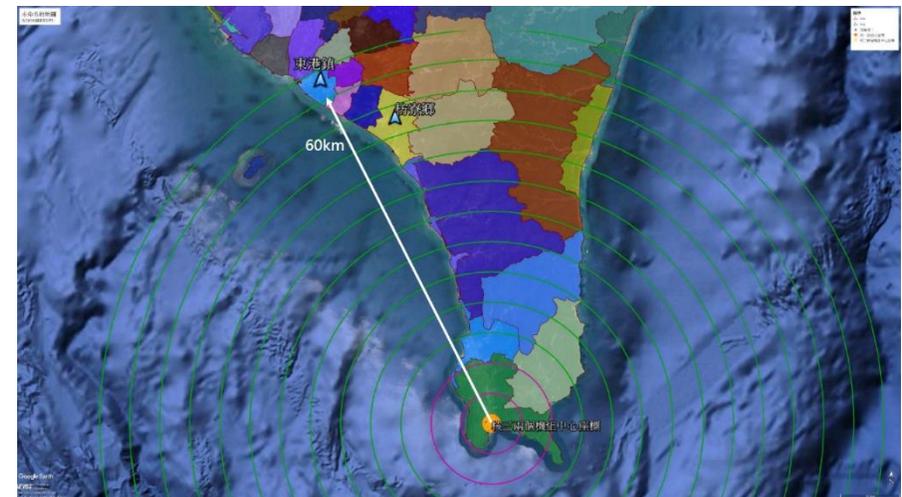
# 我國核能電廠附近居民健康調查 (2020)



廠附近組



非廠附近組



核一、二廠

核三廠

# 我國核能電廠附近居民健康調查 (2020)

- 研究單位立場超然：國家衛生研究院
- 雙重獨立同儕審查機制
  - 諮詢委員會(17人)：由權責機關與利害關係人推薦代表
  - 顧問委員會(5人)：邀請專業保健物理學家，環境與職業病學家，流行病學家，生物醫學統計專家，腫瘤代謝專家，核醫專科醫師
- 研究結論(1)
  - 廠附近組居民平均居留時間22年，累積有效劑量約為 $6.26 \times 10^{-5}$  ~  $1.97 \times 10^{-3}$  mSv (25%-75%分位)。相當於醫療輻射劑量(7.69 mSv)的1/4,000至1/123,000。或環境背景輻射(6.57 mSv)的1/3,330至1/105,000。



# 我國核能電廠附近居民健康調查 (2020)

## ■ 研究結論(2)

- 調查29種癌症罹患風險，考量癌症最短潛伏期、職業輻射曝露、自然背景輻射與醫療輻射等影響後，發現只有距離核三5-8公里居民口腔癌(HR=1.83；95%CI：1.55-2.16)、食道癌(HR=1.65；95%CI：1.25-2.18)風險較顯著，其他癌症風險都不顯著。
- 核三5-8公里居民有咀嚼檳榔與飲酒習慣者，分別是非廠附近組的2.7倍與1.6倍。其他研究：嚼食檳榔習慣者，罹患口腔癌風險是正常人12.5倍、罹患食道癌風險是正常人5.64倍；同時有飲酒與咀嚼檳榔習慣者，罹患食道癌風險為正常人13.7倍。
- 合理推論核三口腔癌，食道癌風險稍高是生活習慣所致。



