

認識游離輻射 及其 應用與安全防護

張 欽 然

2024.09.19 於台北科技大學

課程大綱 (Contents)

1. 認識游離輻射 (Overview of Ionizing Radiation)

- 1.1 游離輻射與非游離輻射之分野
- 1.2 游離輻射的產生
- 1.3 游離輻射的特性
- 1.4 游離輻射的應用
- 1.5 生活環境中的游離輻射

2. 游離輻射的生物效應 (Biological Effects of Ionizing Radiation Exposure)

- 2.1 輻射劑量的定義
- 2.2 輻射暴露之健康效應

3. X光機及其屏蔽考量 (X-ray Machine and Shielding)

4. 輻射度量與法規

(Radiation Measurement and Regulations)

- 4.1 基本的輻射偵檢器原理
- 4.2 人員體內放射性污染的偵測
- 4.3 人員體外劑量監測
- 4.4 環境輻射監測
- 4.5 放射性廢料管制
- 4.6 輻射劑量之法規限值

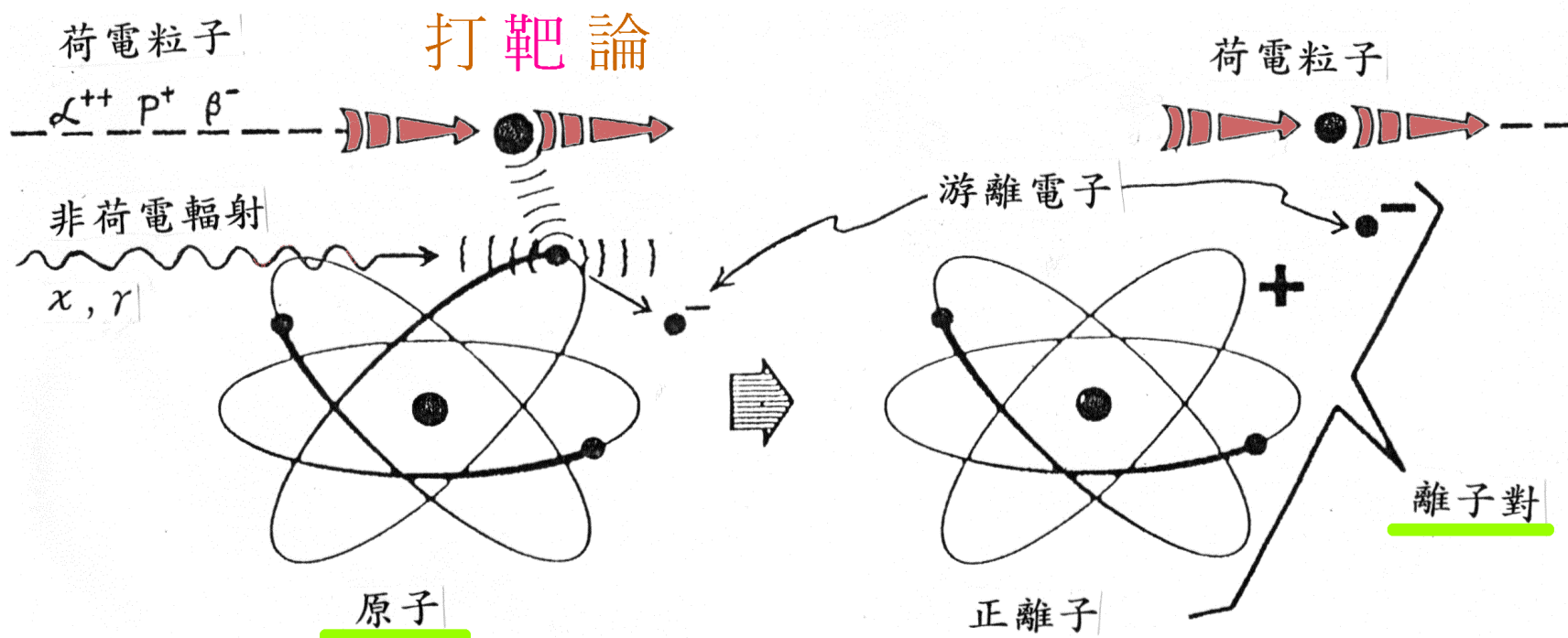
5. 游離輻射防護的要點 及 結語

Basic Principles of Radiation Protection and Conclusion

- 5.1 體外與體內輻射防護的原則
- 5.2 輻射源強度與加馬輻射場計算
- 5.3 校園內可能接觸到的游離輻射來源
- 5.4 結語

1. 認識游離輻射 (Overview of Ionizing Radiation)

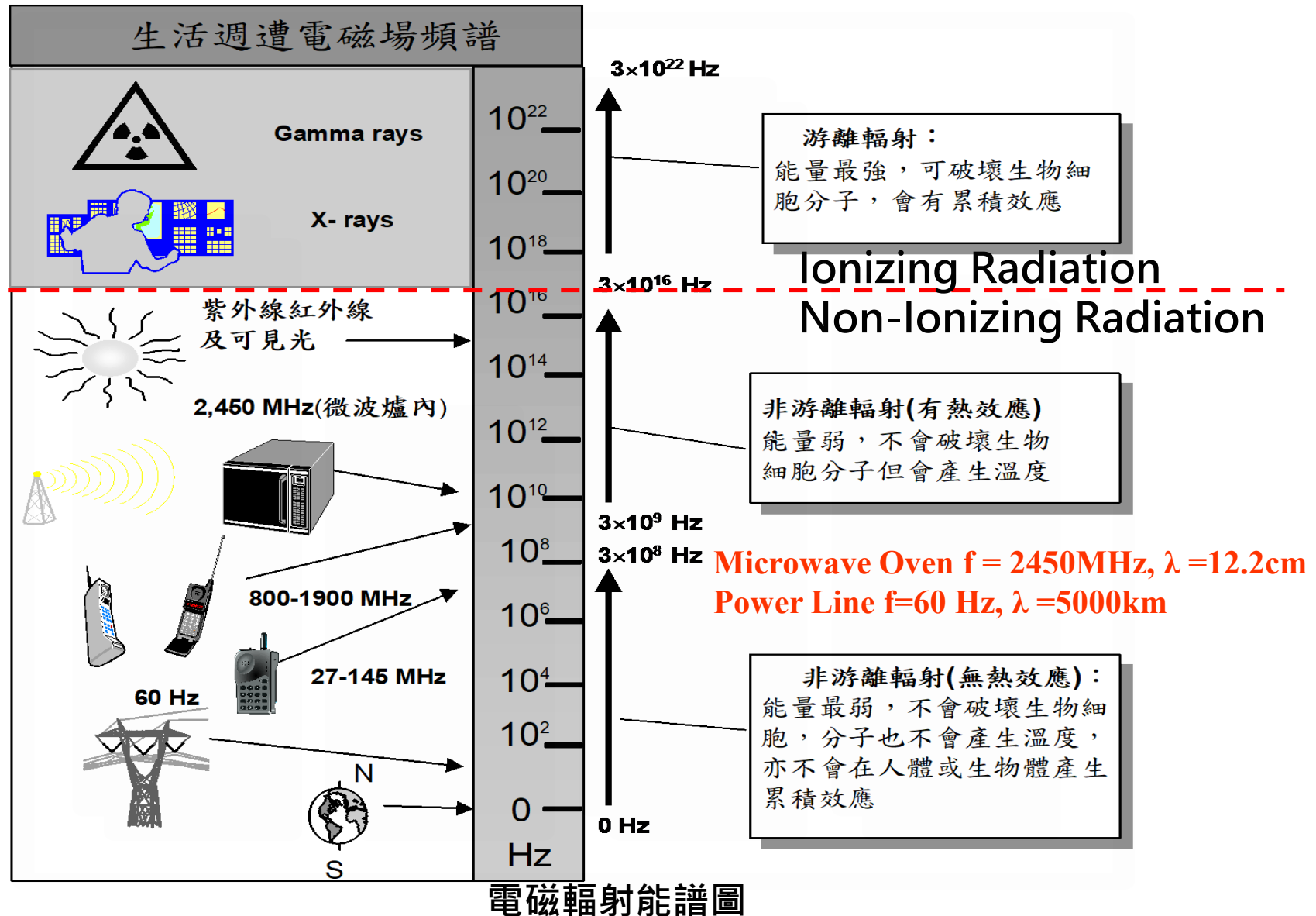
荷電粒子與非荷電輻射產生的游離現象



電子獲得足夠能量而脫離母原子核電場的控制，形成自由電子（游離電子）及帶正電荷的母原子（正離子）對

1.1 游離輻射與非游離輻射之分野

(Differentiation between Ionizing and non-ionizing Radiation)



➤ 游離輻射的定義 (Ionizing Radiation)

輻射與物質作用，使其由原為中性的狀態，變為分別帶有正與負離子對的現象，此即為游離。可以讓物質產生游離狀態的輻射，稱為游離輻射。

(Radiations with energy high enough to cause ionizing of a material)

➤ 非游離輻射的定義 (Non-Ionizing Radiation)

多屬於能量介於10eV(電子伏特)~10keV的電磁波輻射。由於此等輻射所具有的能量並不足以使與其作用的物質產生離子對，因此稱之為非游離輻射。

➤ 非游離輻射

□ 非游離輻射的種類 (Categories of Non-Ionizing Radiation)

- 紫外線(UV，主要是波長 $\lambda > 200$ nm(奈米)以上的部分)
- 可見光(visible light)
- 紅外線(infrared, IR)
- 雷射(Laser，包括紫外線、可見光和紅外線三種波段)
- 微波與射頻輻射(microwave and radio frequency)
- 極低頻電磁場(VLF)
- 靜電場(Electric field)

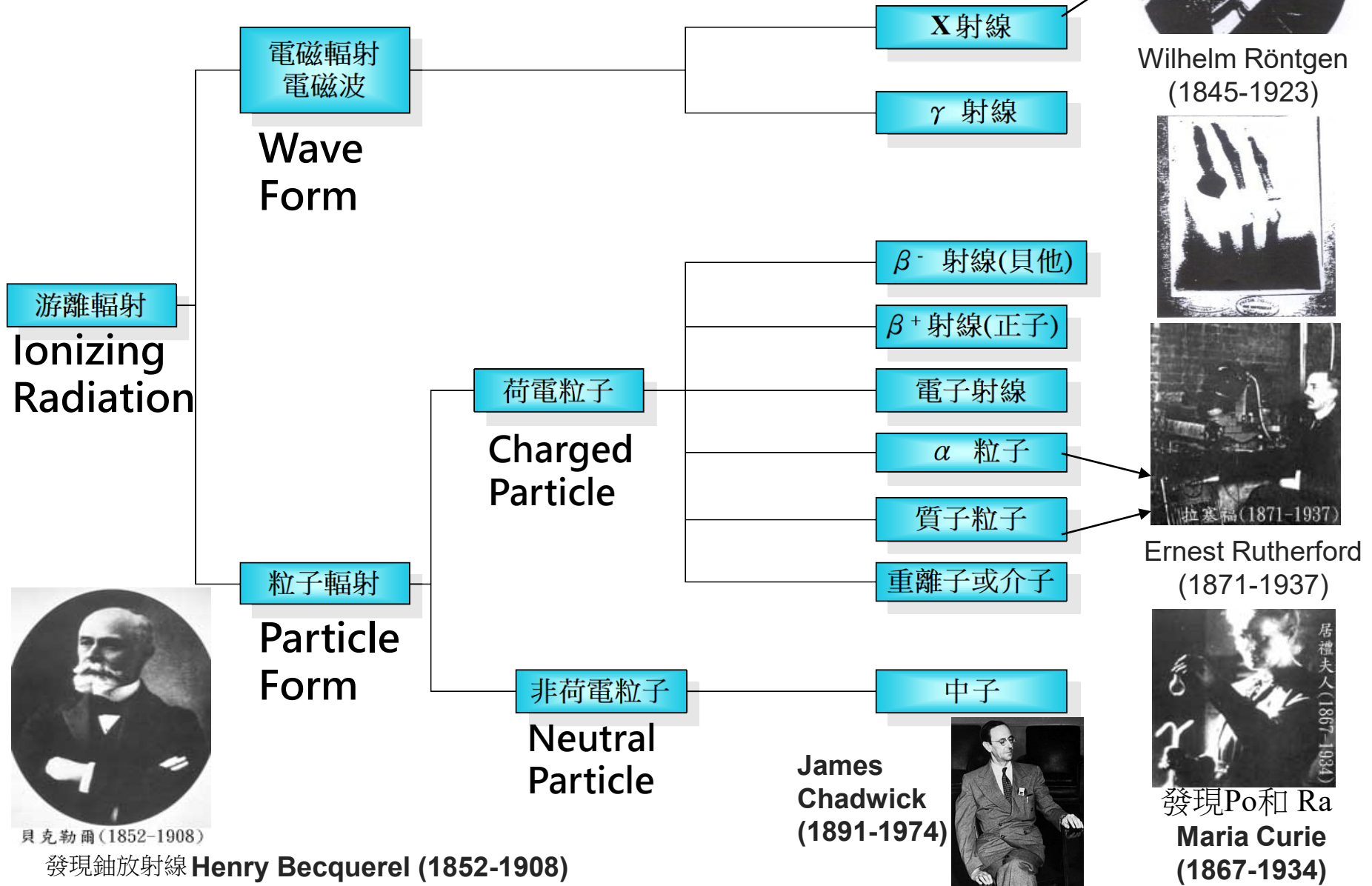
□ 非游離輻射的能量弱，不足以破壞生物細胞分子，但可能會有

(Possible Effects of Non-Ionizing Radiation :)

(1) 熱效應 (Heat Effect)

(2) 電磁感應 (Electromagnetic Effect)

➤ 游離輻射的分類

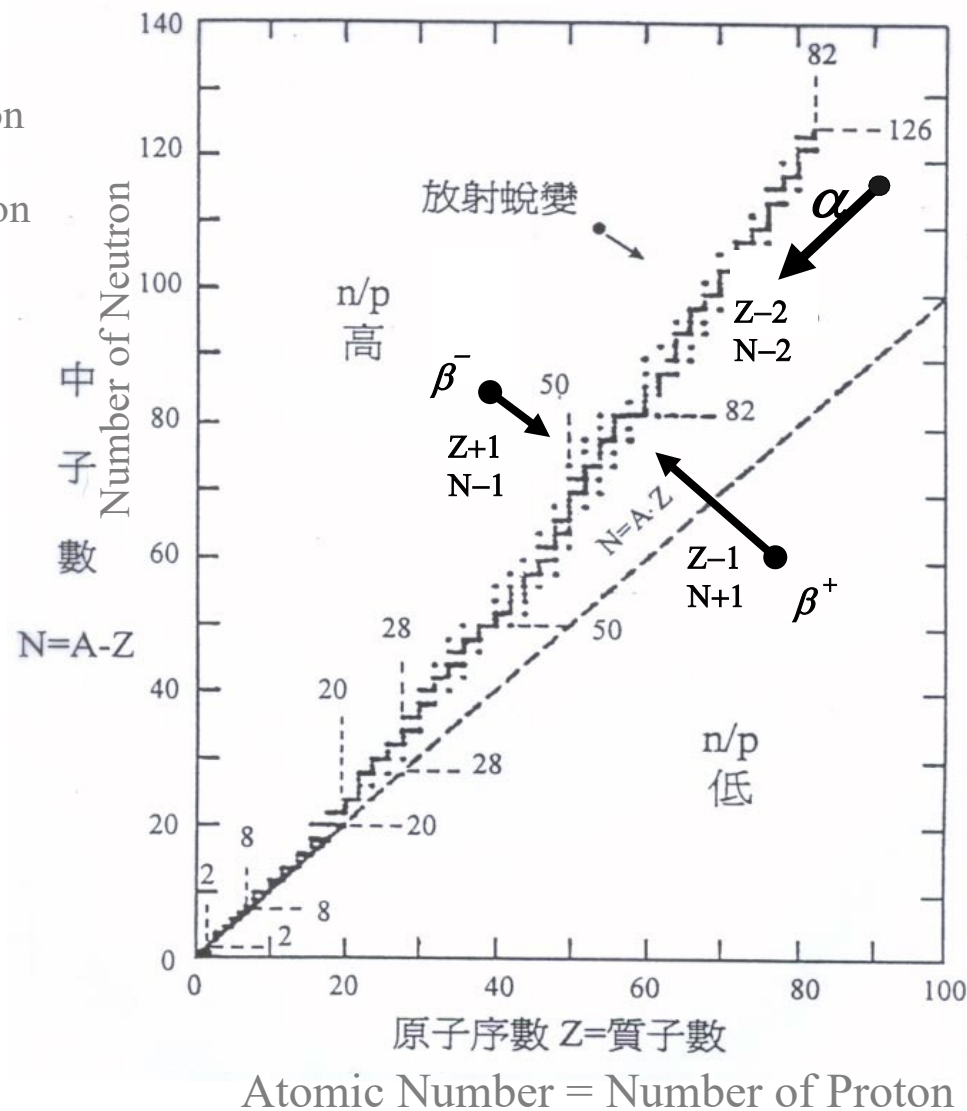
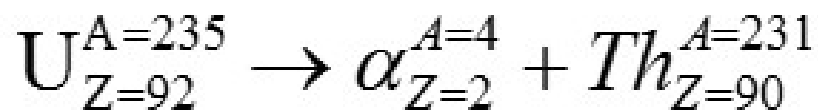
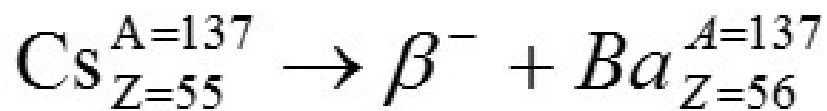
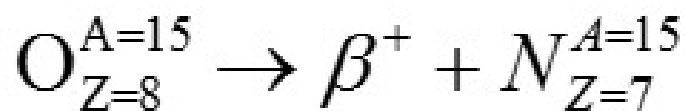
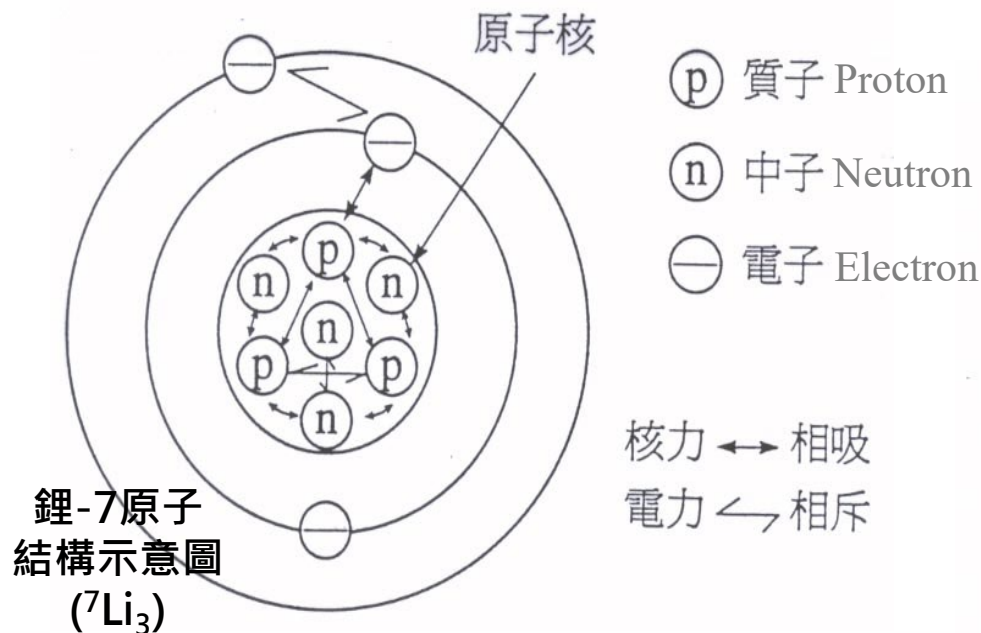


1.2 游離輻射的產生

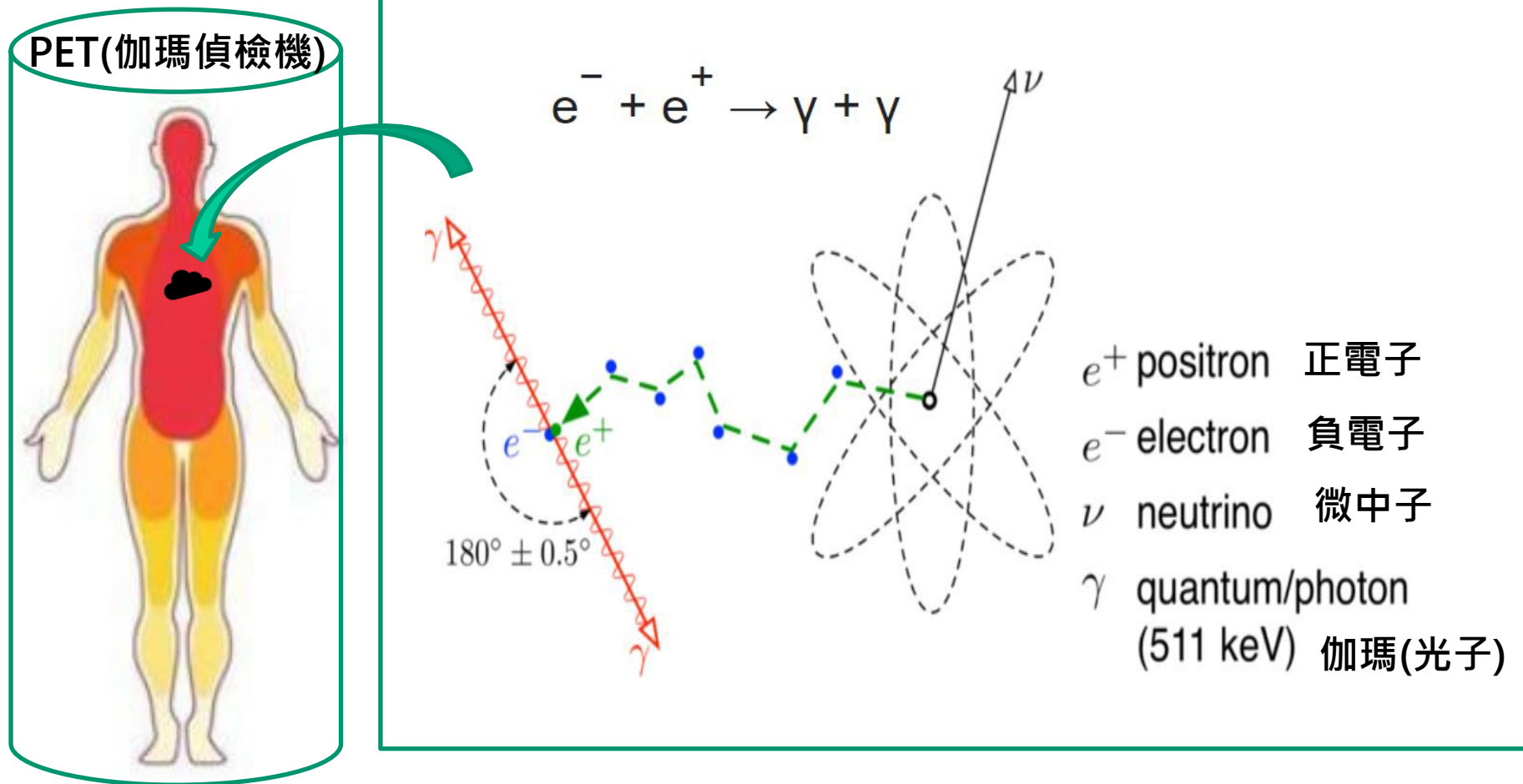
(Mechanisms of Producing Ionizing Radiation)

- 核種衰變(Nuclear Decay)
- 電磁力作用(Electromagnetic Reaction)
- 核反應(Nuclear Reactions)

核種衰變(Nuclear Decay)



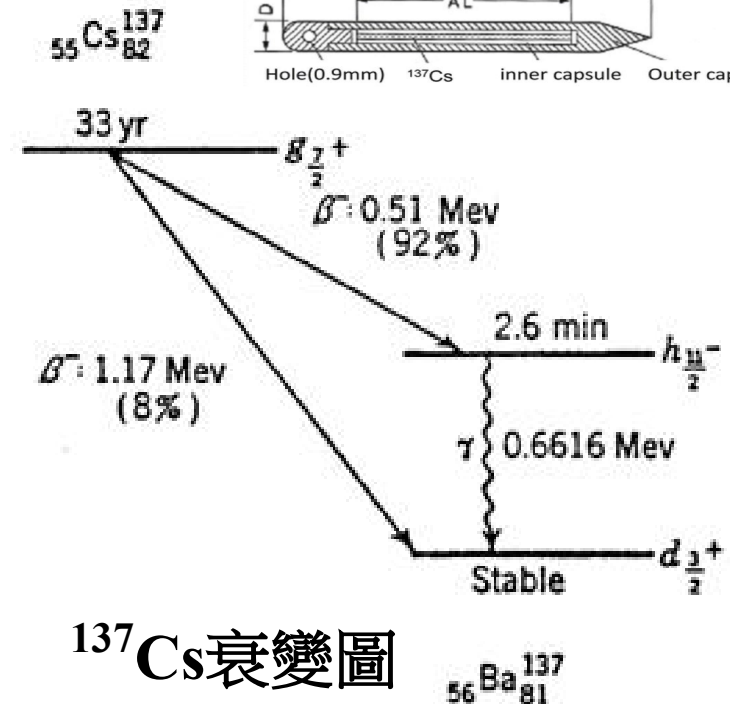
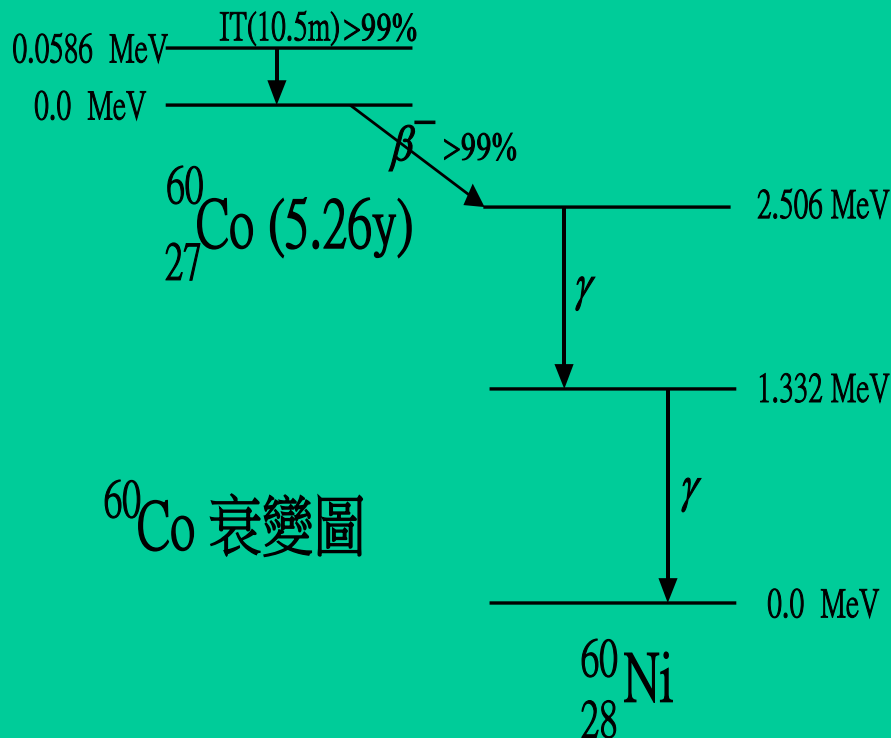
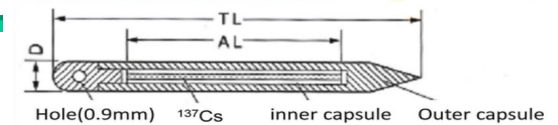
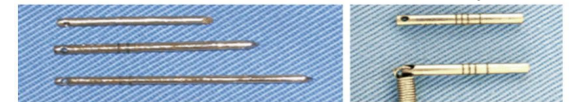
- 正電子(positron)與負電子(electron)的互毀效應
 - 應用於醫學上的正子電腦斷層攝影(PET)



- 核種衰變常會伴隨著帶有能量的輻射粒子或 γ 及 X 射線釋出

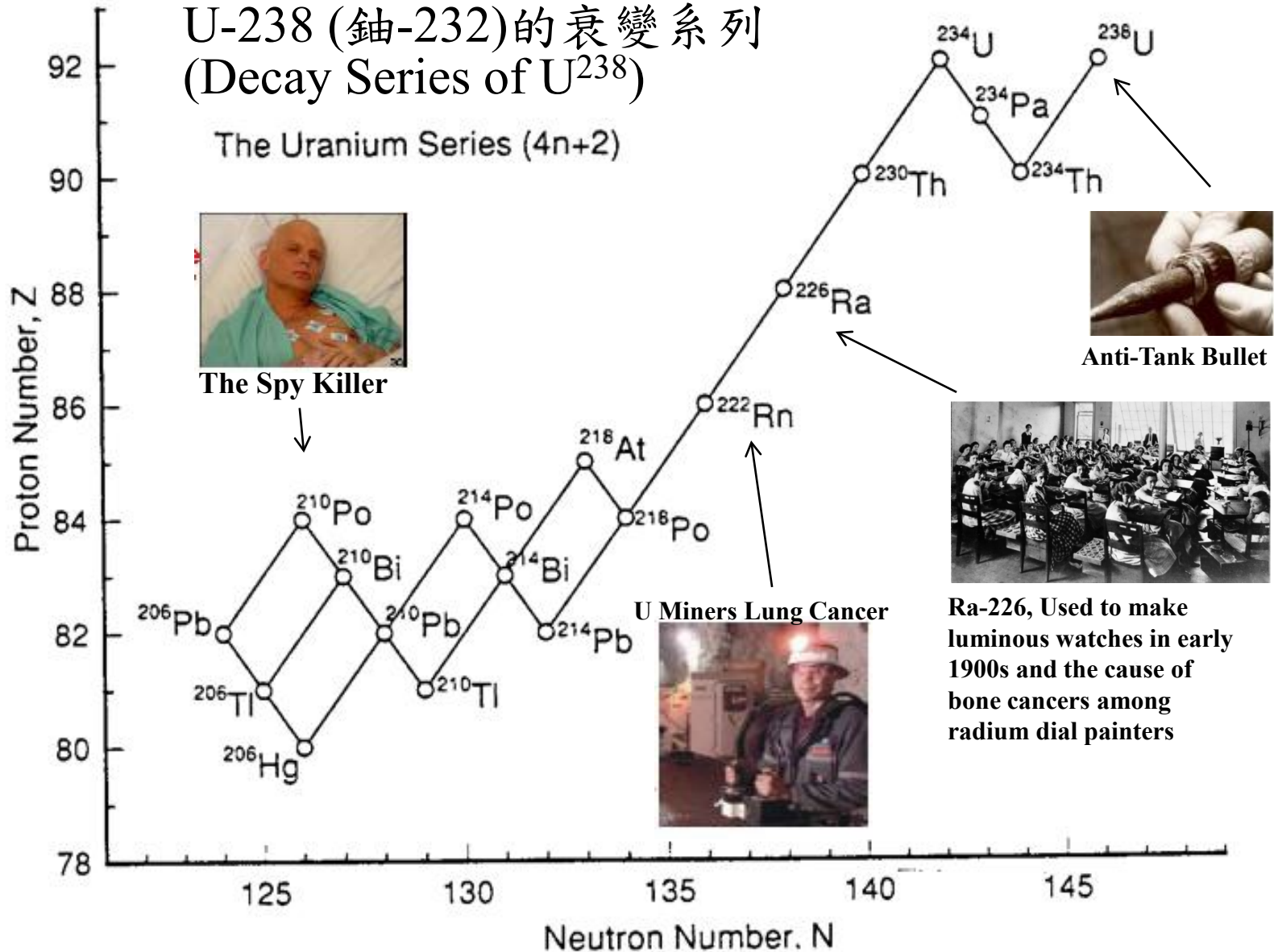
A nuclear decay (or called nuclear disintegration) usually accompanies with the emission of γ -ray and X-ray

Cs-137 needles used in Brachytherapy



U-238 (鈾-232)的衰變系列 (Decay Series of U^{238})

The Uranium Series ($4n+2$)

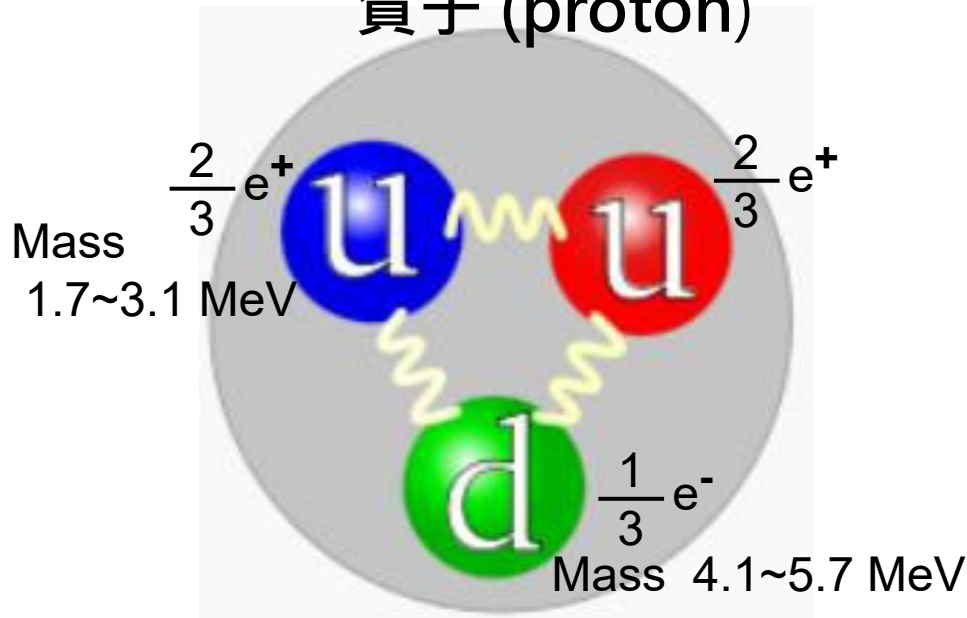


• 次原子的世界 (Sub-atomic World)

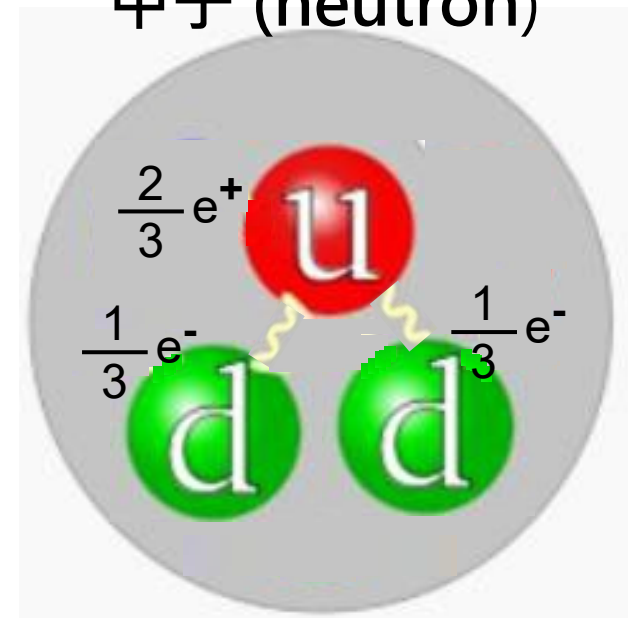
- 夸克 (Quark) (目前確認六種 u,d,s,c,b,t)

Six quarks identified

質子 (proton)



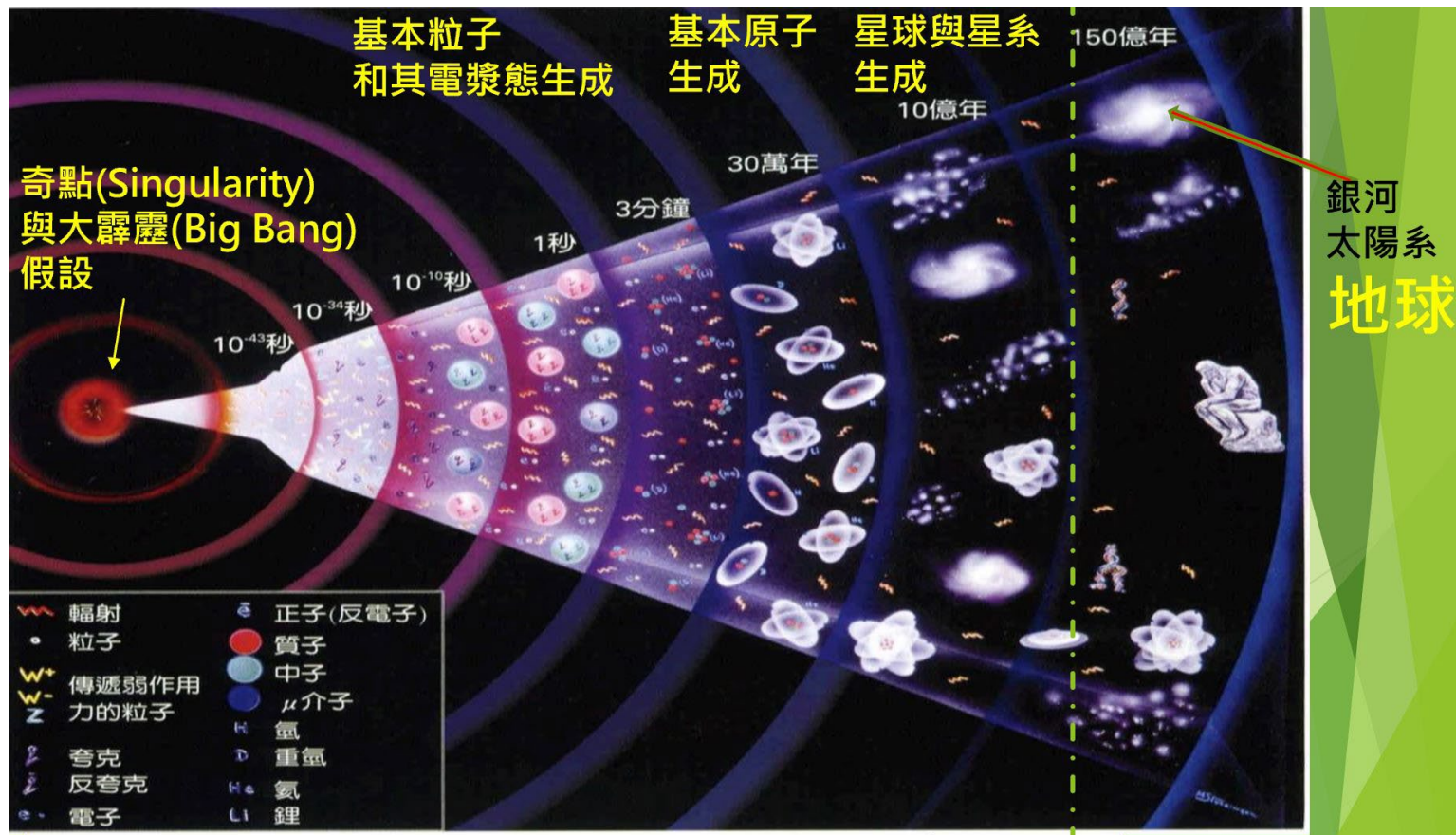
中子 (neutron)



- 其他 (others):

μ 介子, τ 介子, 電子微中子, μ 微中子, τ 微中子
以及上述各種粒子的反物質粒子

- 次原子的世界 (Sub-atomic World)
 - 宇宙間充滿了各種基本粒子
There are various sub-atomic particles existed in the universe



本圖取自 楊棋明 博士 - [www.aqua.ntou.edu.tw/tw/Course/files/%B2%C46B%C1%BF-%A6t%A9z%B8U%AA%AB%A4%A7%B0_%B7%BD\(44\).pdf](http://www.aqua.ntou.edu.tw/tw/Course/files/%B2%C46B%C1%BF-%A6t%A9z%B8U%AA%AB%A4%A7%B0_%B7%BD(44).pdf)

- 放射性核種的強度(Radioactivity) - 貝克(Bq) 或 居里(Ci)

number of disintegrations per second

$$C_0(Bq) = \lambda(\text{sec}^{-1}) \times N_0 \quad \begin{array}{l} \text{(原子數目)} \\ \text{Number of atoms} \end{array}$$

$$\lambda(\text{sec}^{-1}) = \frac{\ln 2}{T(\text{半衰期})}$$

decay constant half live

$$1 \text{ 居里}(Ci) = 3.7 \times 10^{10} \text{ 貝克}(Bq)$$

1g 的Cs-137 核種(其半衰期約 30 年),放射性核種強度為多少?? (Radioactivity of 1g Cs-137)

$$\begin{aligned} C_0(Bq) &= \frac{\ln 2}{30 \times 365 \times 24 \times 3600} \times \frac{1}{137} \times 6.02 \times 10^{23} \\ &= 3.22 \times 10^{12} Bq = 87 Ci \end{aligned}$$

亦即1g 的Cs-137 核種，其活度為 $3.22 \times 10^{12} Bq$ (相當於87居里)，亦即其每秒鐘有 3.22×10^{12} 次衰變，亦即其每秒鐘會放出 3.22×10^{12} 個帶有0.622MeV的光子

•放射性核種強度隨時間呈指數衰減

The radioactivity of a radionuclide follows the exponential decaying law

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

活度單位
居里(Ci)=3.7x10¹⁰ 貝克(Bq)

每秒衰變的次數
(disintegrations/sec)

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

衰減常數
Decay Const.

t : 衰減時間
Decay time

半衰期
Half Live

經過一個半衰期衰減成原來強度的1/2 ,
經過兩個半衰期衰減成原來強度的1/4 ,
經過三個半衰期衰減成原來強度的1/8 ,
.....依此類推

At t=0 , C=C₀

At t=T_{1/2} , C= $\frac{1}{2}$ C₀

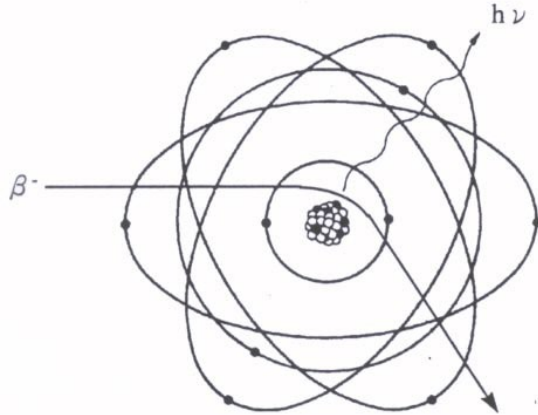
At t=2T_{1/2} , C= $\frac{1}{4}$ C₀

.....

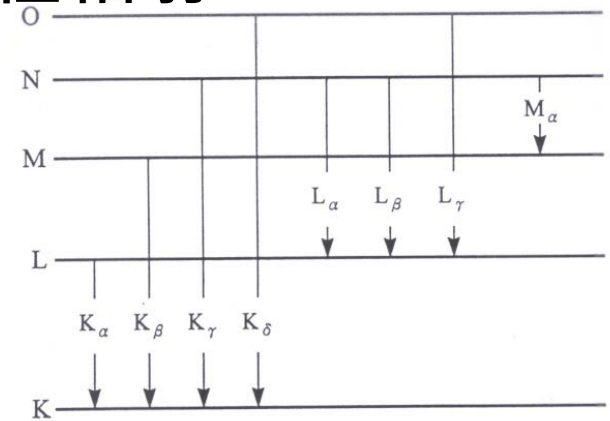
➤ 電磁力作用(Electromagnetic Reaction)

• X-射線 (X-ray Machine)

制動輻射 Bremsstrahlung X-ray

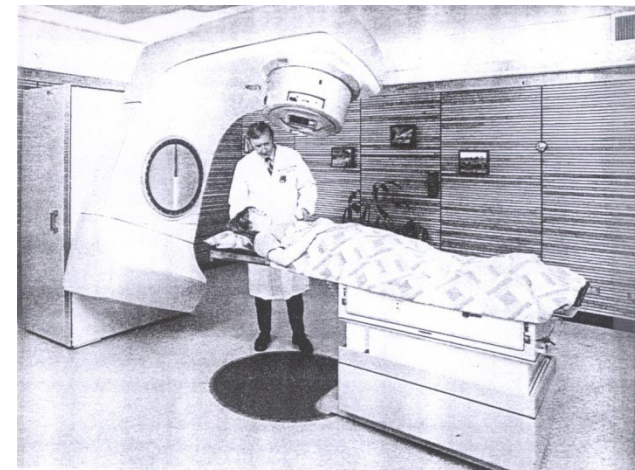


特性輻射 Characteristic X-ray

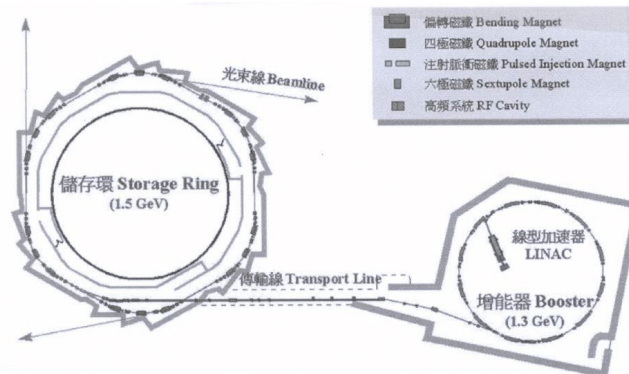


• 粒子加速器 (Particle Accelerator)

線性加速器



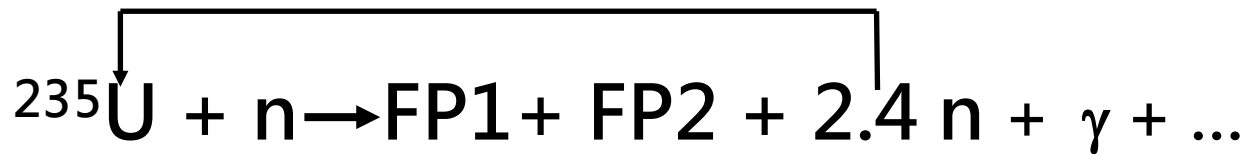
同步輻射



➤ 核反應(Nuclear Reactions)

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

• 核分裂 (Fission)：



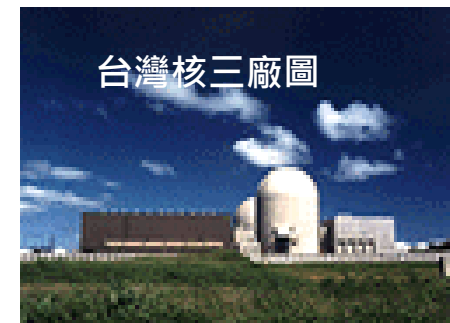
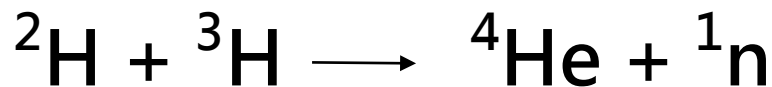
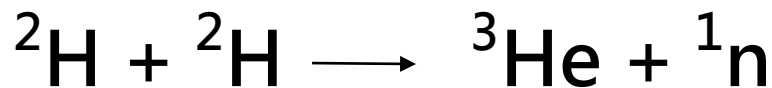
Neutron
中子

Fission Fragments
放射性分裂核種

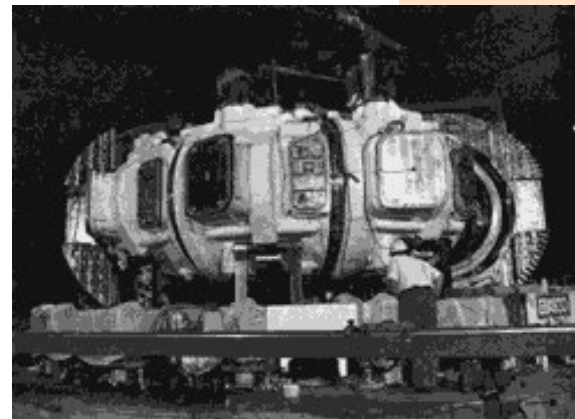
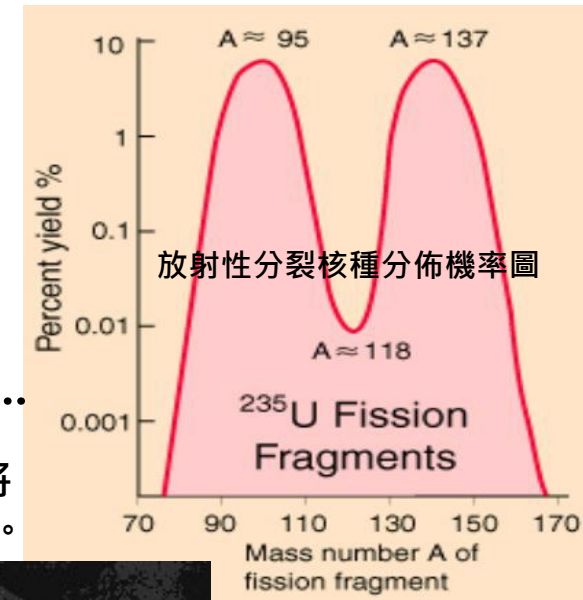
： ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{85}Kr 、 ^{90}Y 、.....

每一個 ^{235}U 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。

• 核融合 (Fusion)：



台灣核三廠圖

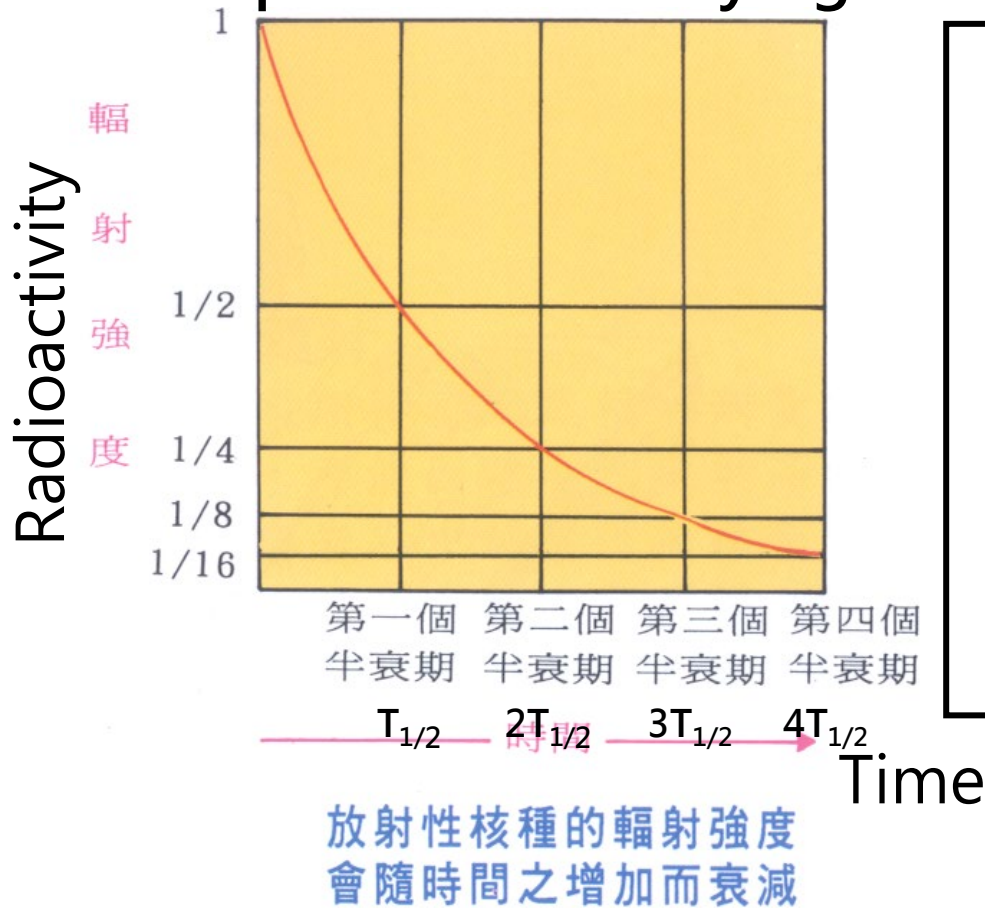


美國普林斯頓大學的Tokamak
核融合測試反應器

1.3 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)

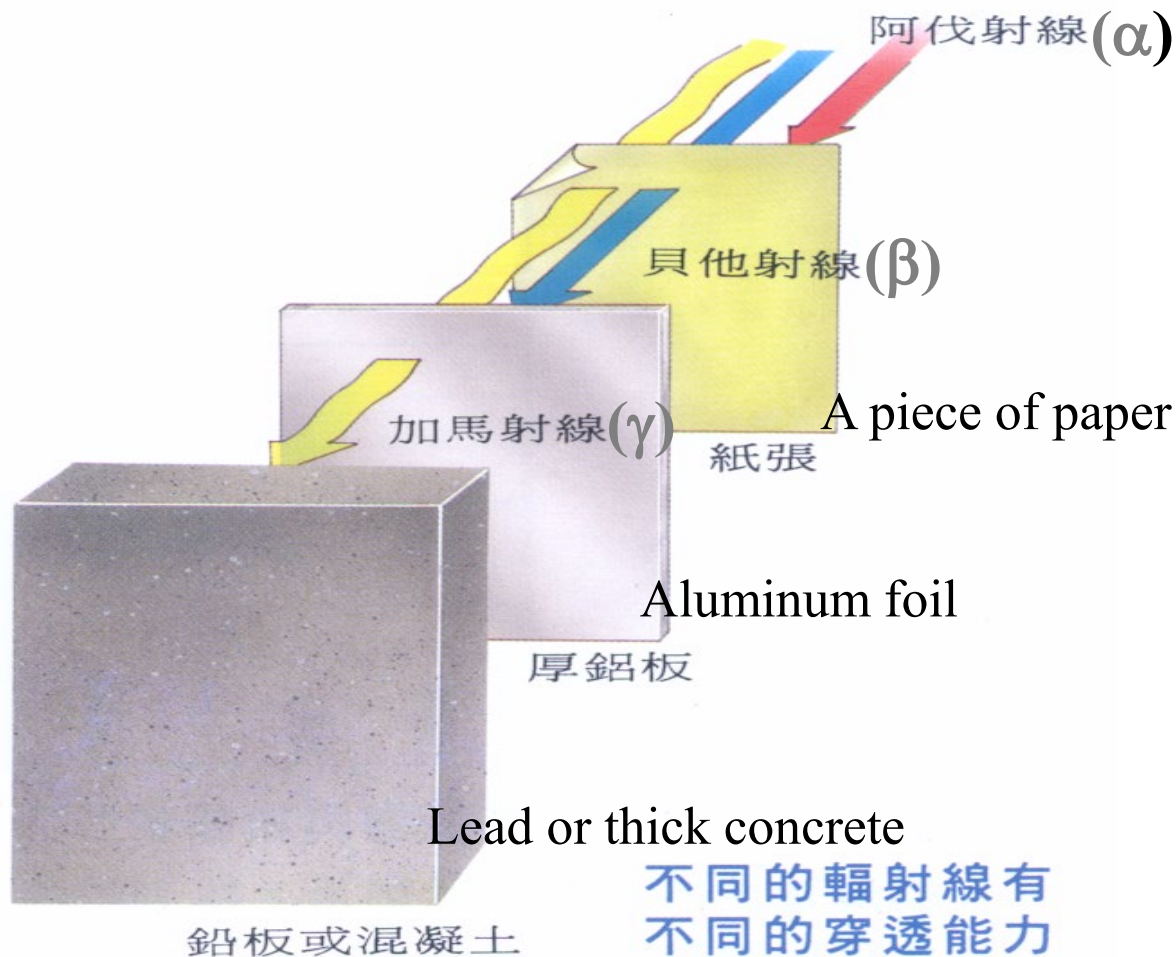
Exponential Decaying Law



常用射源 Radio-nuclides	半衰期 Half Live
^{60}Co	5.3 years
^{137}Cs	30.0 years
^{90}Sr	28.1 years
^{192}Ir	73.8 days

➤ 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



1.4 游離輻射的應用(Applications of Ionizing Radiation)

1.4.1 醫療應用(Medical Applications)

醫用X光、電腦斷層攝影(CT、SPECT、PET..)、
放射性治療(Radio-therapy)(近接植入、遠隔照射)、
核醫藥物(Nuclear medicine)(顯影劑、核醫藥物治療...)

.....

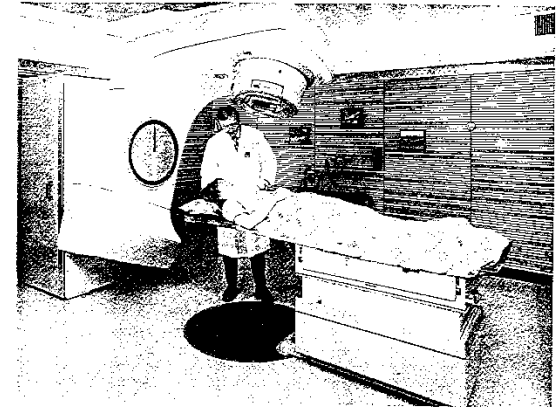
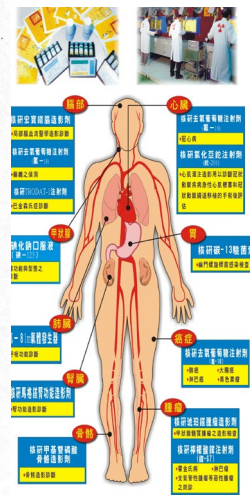
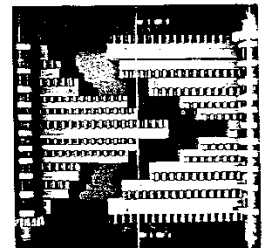
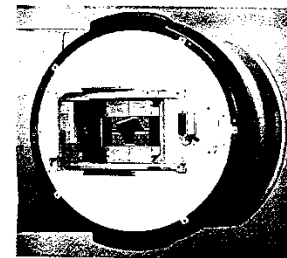


Figure 4.9. Photograph of a linear accelerator, isocentrically mounted. Courtesy of Varian Associates, Palo Alto, California.

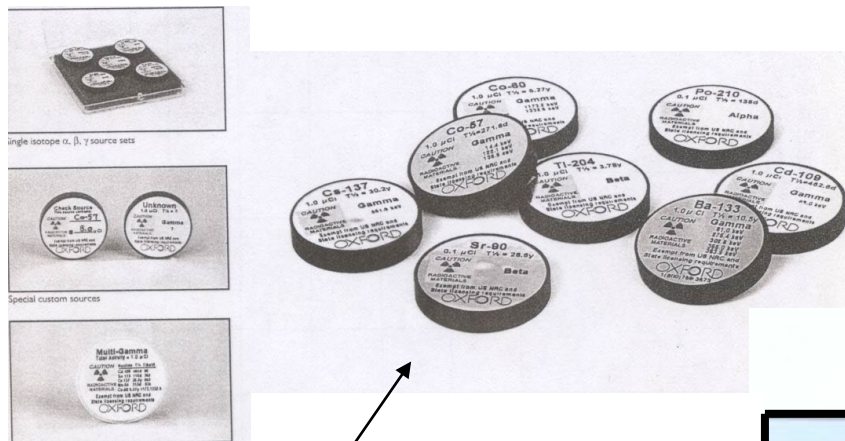


1.4.2 輻射照射應用(Irradiation Applications)

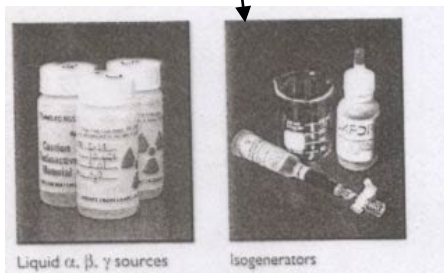


Irradiation technology for applications in medical, agricultural, and industrial products





實驗室常用的標準射源
(Check Sources)



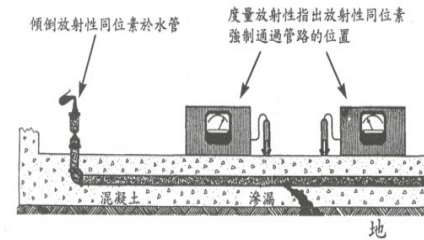
工業上常用的輻射源及其半衰期
(Typical Check Sources Used by
Lab. and Industry)

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
	^{192}Ir	73.8d
非破壞檢驗	^{60}Co	5.3y
	^{192}Ir	73.8d

註：y 為年，d 為日

1.4.3 各種工業及科研上之輻射應用.....

(Other Industrial and Scientific Applications)



測漏計 Leakage meter

PANTAK SEIFERT
X-ray Systems

General Information:

The ERESO MF2 line of portable X-ray units are designed for reliability in some of the world toughest conditions. Using modern compact electronics to minimize weight and provide a high power output with extremely low ripple, together with a sturdy metal ceramic X-ray tube, the ERESO MF generates a high X-ray dose which allows the shortest exposure time, resulting in higher productivity.

Weight is further reduced with the use of gas insulation making transportation and handling in the field safe and convenient, especially with the optional stands and carriages that make positioning of the ERESO MF easy for set up of exposure techniques. For additional protection of the tube head, optional carrying/standing rings are available.

The universal ERESO MF2 microprocessor control can operate any X-ray generator in the ERESO MF product line and is ruggedly constructed to withstand heavy use in field. The control features a clear four line liquid crystal display that can be viewed in the most difficult light conditions and which provides system status in up to sixteen (16) languages.

Entry of voltage, current and exposure parameters, or retrieval of up to 250 preprogrammed exposure settings is by a keypad conveniently located on the splash proof control panel.

The MF control features a fully automatic warm up, with an integrated real time clock that monitors time since last use and sets warm up speed accordingly. The last 128 data sets of operating parameter are recorded in an internal history memory and can be downloaded via the serial interface. Two safety circuits are included in the control together with a serial interface and a power connection for a closed loop water cooler, necessary with a water cooled X-ray generator.

For field applications, a fail-safe warning strobe lamp is available.

Typical characteristics:

- High voltage range from 5 to 300 kV
- Constant potential
- Metal ceramic x-ray tube
- Medium frequency technology
- Shortest exposure times of all portables worldwide
- Power mode operation
- Lightweight
- Easy adapts to different mains supplies including portable generators
- Automatic identification of tube head connected
- Fully automatic warm-up program
- Real-time clock
- Display of clear text messages
- History memory
- Programmable operation
- Both standard and non-standard accessories are optionally available

Special features:

- Power mode starting at 5 kV for efficient work, even with low-density materials such as aluminum or composite materials.
- Automatic mode, automatic warm-up program depending on the nonoperative interval through a real time clock. 250 exposure techniques can be stored in a non-volatile memory for recall.
- Highly legible four-line LCD enables the display of clear text messages in up to 16 languages, including Cyrillic characters.

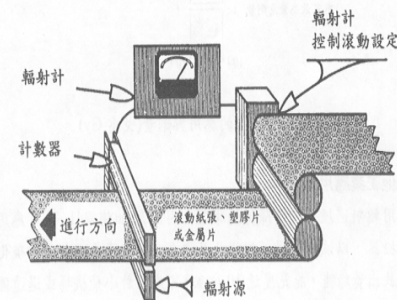
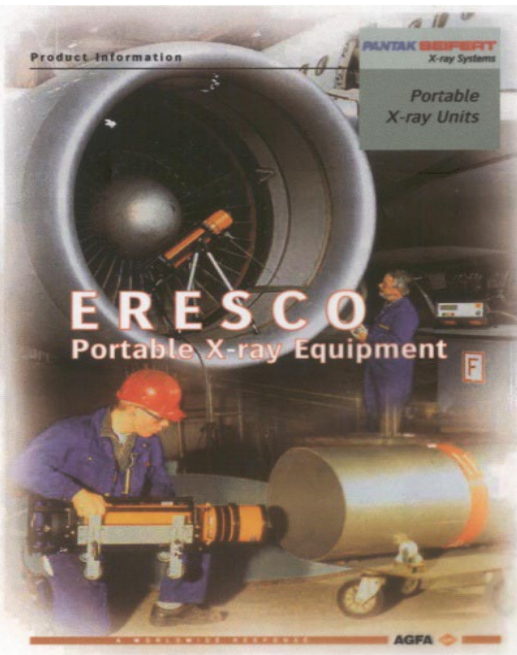


Agfa NDT Pantak Seifert
Gerdell & Co. KG
22626 Alvensleben, Germany
Tel: +49 (0)4102/807-0
Fax: +49 (0)4102/807-189
E-mail: sales@nvgemmer.de

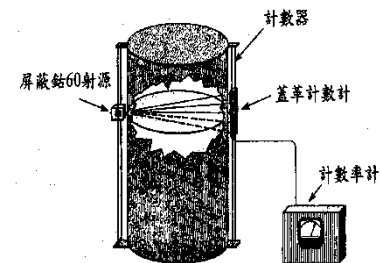
Agfa NDT Inc.
223 Silver Sands Road
East Haven, CT 06512
USA
Tel: +1(203) 468-3011
Fax: +1(203) 468-3017
E-mail: nvgemmer@AgfaNDTInc.com

Product Information

ERESCO
Portable X-ray Equipment



厚度計 Thickness meter



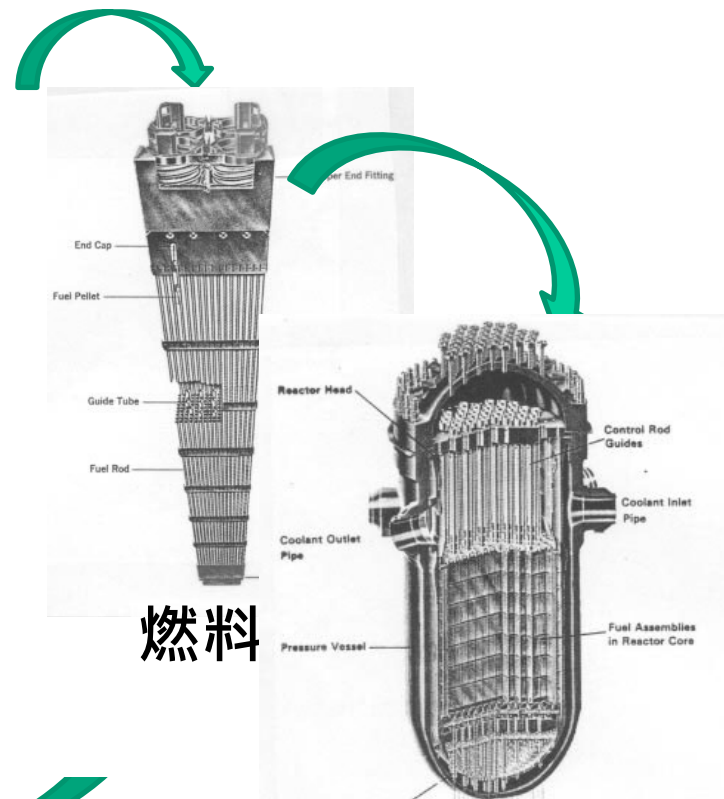
液位計 Level meter

1.4.4 核能發電 (Nuclear Power Generation)

燃料數量	產生電力
一公噸煤	2400度
一公噸石油	4400度
一公噸天然氣	6500度
一顆核燃料丸	2200度



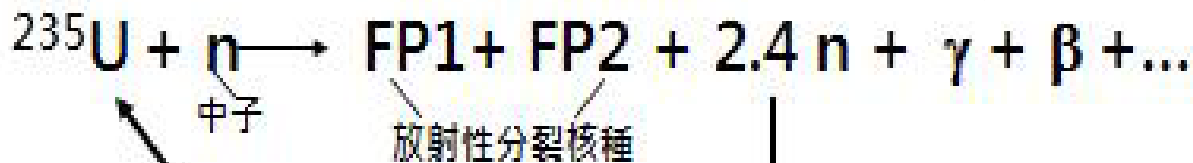
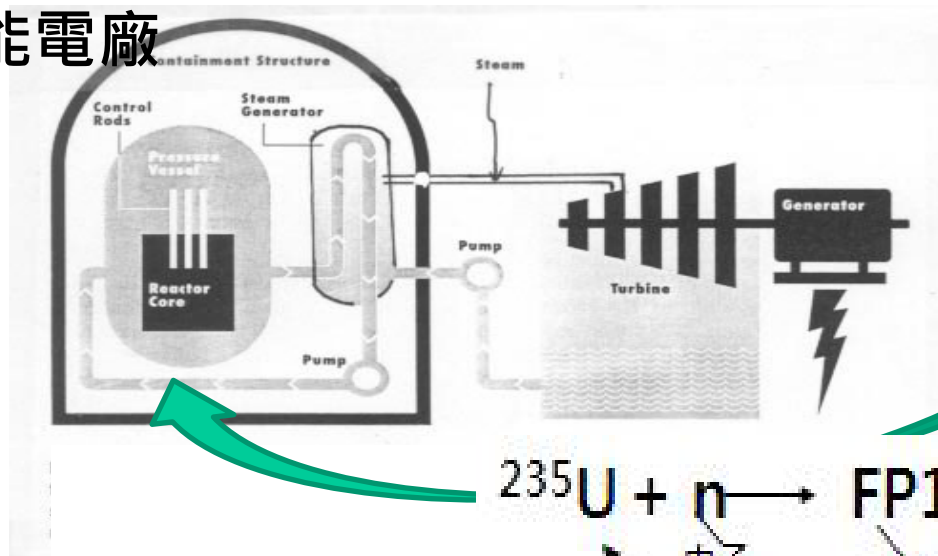
UO₂燃料丸



燃料

核反應爐

核能電廠



- 控制系統重要部件溫
- 控制乏燃料池水位/溫度
- 控制各項緊急冷卻和輔助電源

- 控制中子的反應速率
- 控制爐心水位/溫度/壓力

Ref : <https://www.nei.org/resources/statistics/world-nuclear-generation-and-capacity>

國家	反應爐數目	裝置容量(MW)	發電量(GWh)	核能占比(%)
美國	94	96,952	779,186	18.5
法國	56	61,370	323,773	64.8
中國	56	54,152	406,484	4.9
俄羅斯	36	26,802	203,957	18.4
南韓	26	25,825	171,640	31.5
印度	20	6,920	44,646	3.1
加拿大	19	13,699	83,465	13.7
烏克蘭	15	13,107	0	0
日本	12	11,046	77,539	5.5
英國	9	5,883	37,278	12.5
西班牙	7	7,123	54,371	20.3
瑞典	6	6,944	46,648	28.6
巴基斯坦	6	3,262	22,382	17.4
其他國家反應爐座數 查德(6)、比利時(5)、芬蘭(5)、斯洛伐克(5)、匈牙利(4)、瑞士(4)、阿拉伯大公國(4)、阿根廷(3)、白俄羅斯(2)、巴西(2)、巴加利亞(2).....				
台灣	2	1,874	17,154	6.9
世界總計	438	393,351	2,552,067	

1.4.5 民生消費性產品 (Consumer Products)



含放射性物質的消費性產品

煙霧偵檢器 smoke detector (^{241}Am)

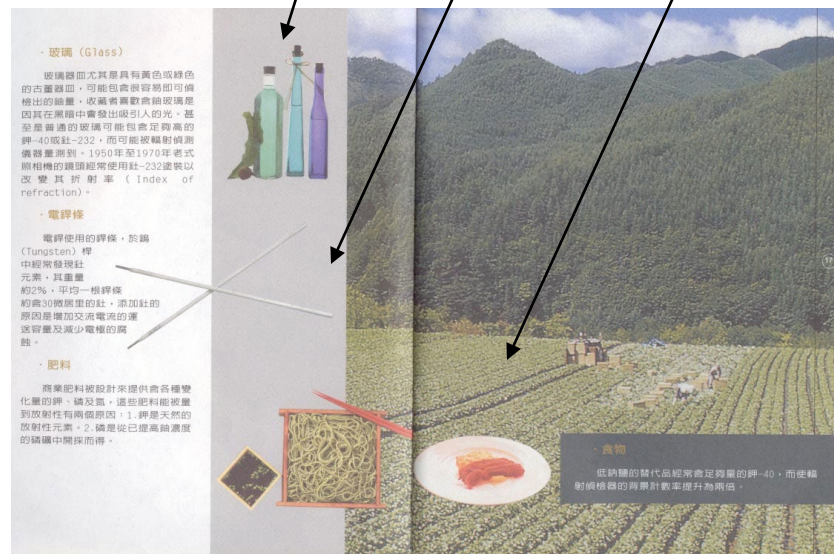
黃綠古董玻璃
(天然的U、Th、K)

電焊條
(鎢桿中的 Th)

肥料
(K, P, U)

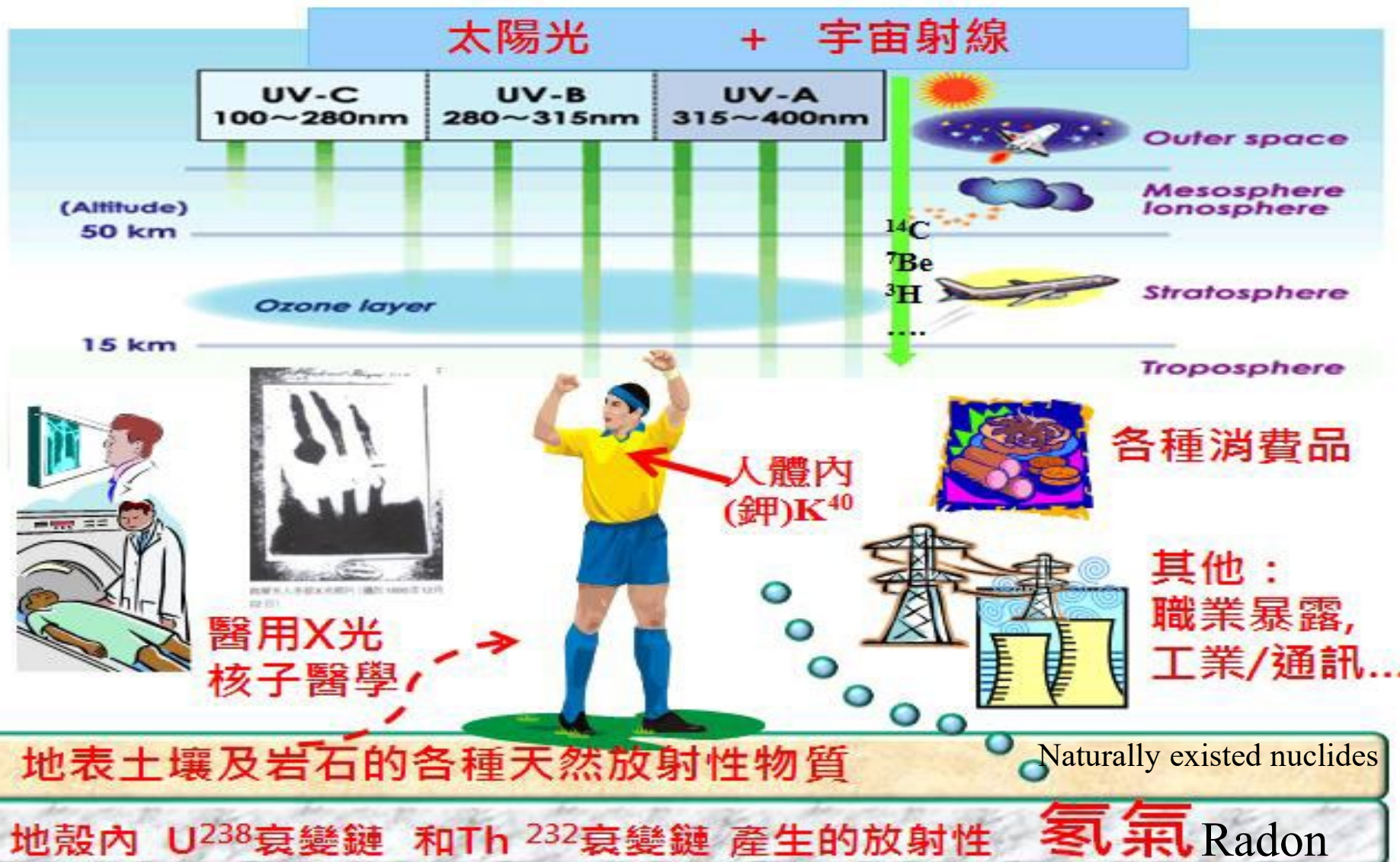
手錶和時鐘的光源
(早期 ^{226}Ra ，近期 ^3H ， ^{147}Pm)

陶瓷器皿
(天然的 U、Th、K)



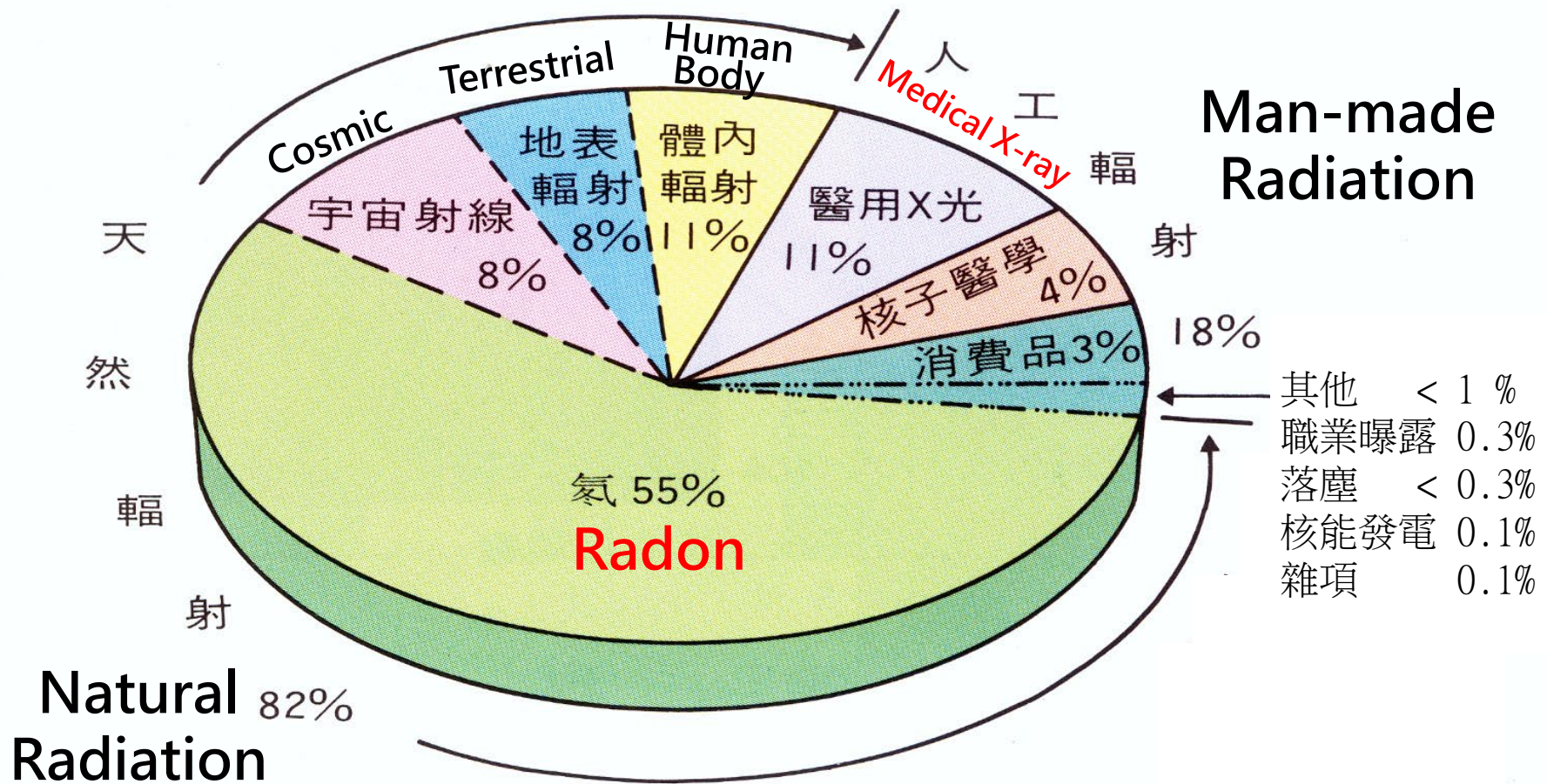
1.5 生活環境中的游離輻射

(Sources of Environmental Ionization Radiation)



一般民眾接受天然與人造輻射來源分佈圖

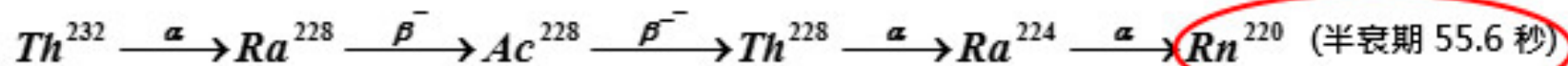
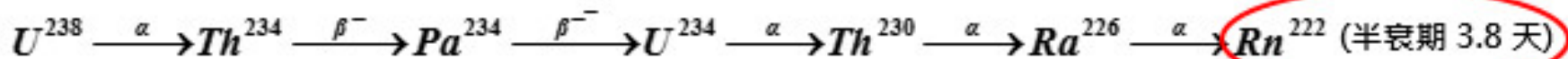
The distribution of the averaged annual radiation dose from natural and man-made ionizing radiations for human



1.5.1 天然輻射 (Natural Radiation)

A. 氡氣 (Radon)– 天然放射性氣體(α 放射性核種) , 為鈾和釷的子核種。

Radio-Radon - ^{222}Rn 、 ^{220}Rn daughters of ^{238}U and ^{232}Th decay chains



- ▶ 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})

A commonly existed radionuclide inside the human body – K^{40} (Potassium -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 (Cosmic Radiation)

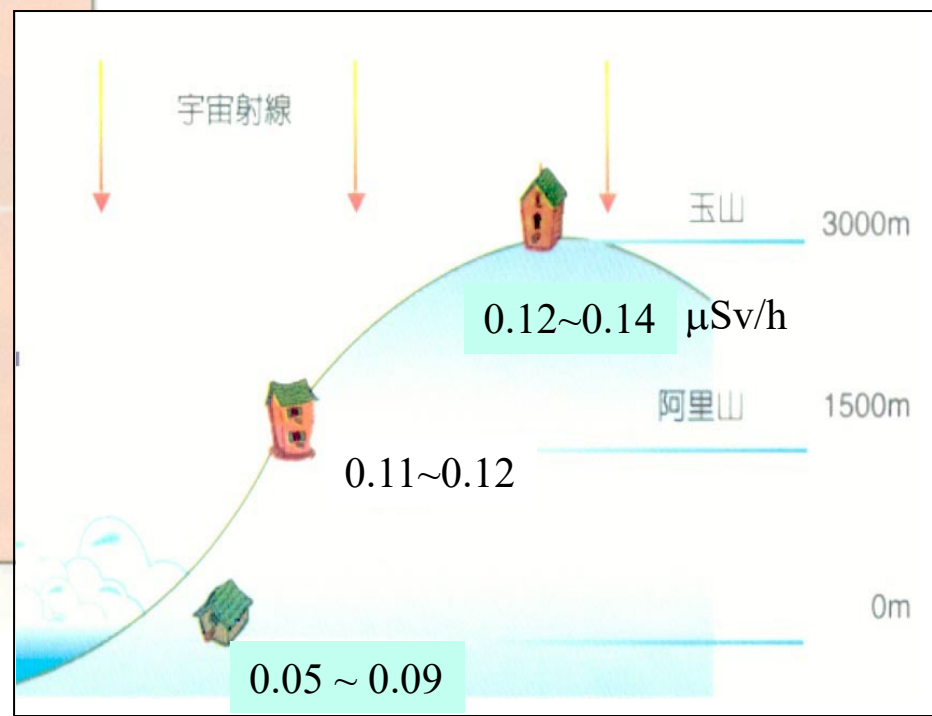
高空飛行可能接受之宇宙射線劑量 High-altitude Flight

航線 (往返)	接受劑量 (微西弗)
台北 = 紐約 Taipei - New York	156 μSv
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 Taipei - Sydney	48
台北 = 新加坡	15
台北 = 金門	0.67
台北 = 高雄 Taipei - Kaohsiung	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

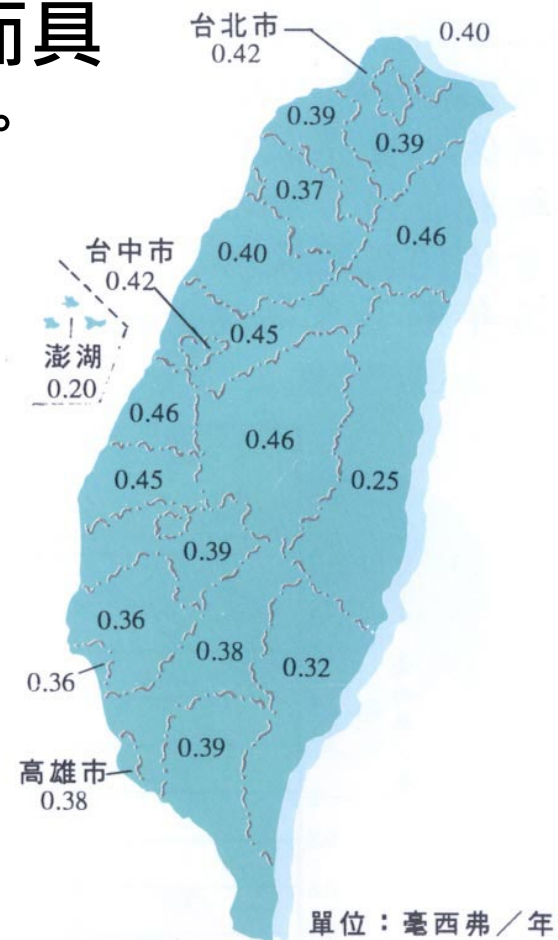


D. 地表輻射 (Terrestrial Radiation)

- ▶ 地表的土壤及岩石含有天然放射性核種- 鈾(^{238}U)、鈾(^{232}Th)、鉀-40(^{40}K)、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強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
砗	礮	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每人每年接受天然輻射之劑量水平

Natural Radiation dose (per year per person) vs. countries)

	World Ave.	USA	Japan	Taiwan*
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
氡 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) mSv(毫西弗)
- 依據原子能委員會的網頁資料，我國每人每年接受天然輻射約為 1.6 mSv

地區或國家名稱	年劑量(毫西弗) mSv / Yr	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	

1.5.2 人造輻射 (Man-made Radiation)

A. 醫療輻射 (Medical)

醫用X光、放射性治療、核醫藥物

B. 工業及研究用輻射 (Industry)

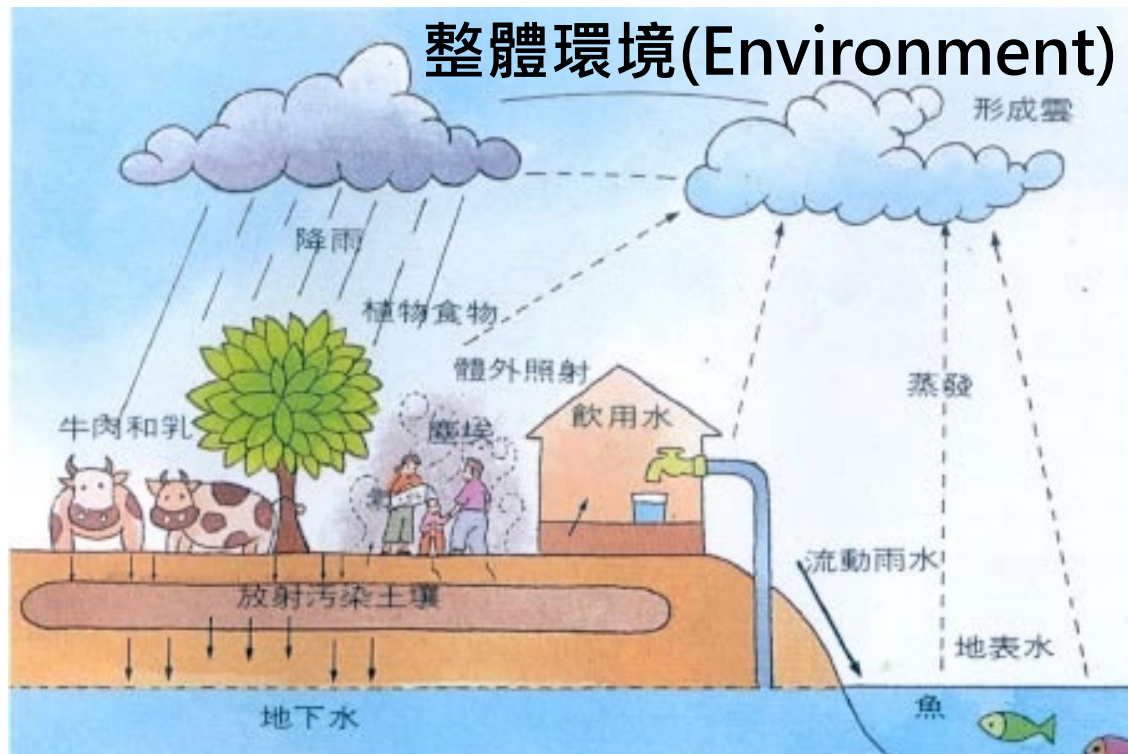
核能發電、非破壞性檢驗、厚度計、
密度計、液位計、非醫用X光...

C. 民生用品輻射 (Consumer Products)

夜光表、煙霧偵檢器、肥料...

1.5.3 生活環境與輻射曝露間的關係

(Radiation Exposure vs. Living Environment)



醫療
(Medical)



消費
(Consumer Products)



工作場所/實驗室
(Laboratories, Industries, ...)

工業汙染產品的輻射異常事件

(Radioactive Contamination of Industrial Products)



表1 鋼鐵廠歷年發現輻射異常物件數統計表

年度	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	合計
國內	8	4	5	3	13	15	7	14	16	22	20	33	51	211
國外	1	1	4	9	5	25	14	17	13	7	14	26	65	201
合計	9	5	9	12	18	40	21	31	29	29	34	59	116	412

表2 鋼鐵廠歷年發現輻射異常物種類統計表

異常物種類	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	合計
污染鋼筋	5	2	4	1	3	8	1	4	2	2	3	5	32	72
射源*1	1	1	1	1	2	4	0	4	3	2	2	4	7	32
其他*2	3	2	4	10	13	28	20	23	24	25	29	50	77	308
合計	9	5	9	12	18	40	21	31	29	29	34	59	116	412

註：*1.射源含校正射源

2.其他指含天然放射性物質之廢鐵等

大規模的惡意輻射傷害也是我們所擔心的

(Dispersions of Radiation are of Great Concerns Against Terrorism)



911後最被擔心的可能大規模恐怖攻擊事件

■ 放射性汙染散佈

- 放射性汙染物 散佈 (髒彈 : Dirty Bomb)
- 核廢料 散佈
- 小型原子武器

放射性物質及可產生游離輻射設備的嚴格管控

■ 生物及化學武器

- 細菌/病毒 散佈
- 毒性化學物質 散佈

2. 游離輻射的生物效應

Biological Effects
of Ionizing Radiation Exposure

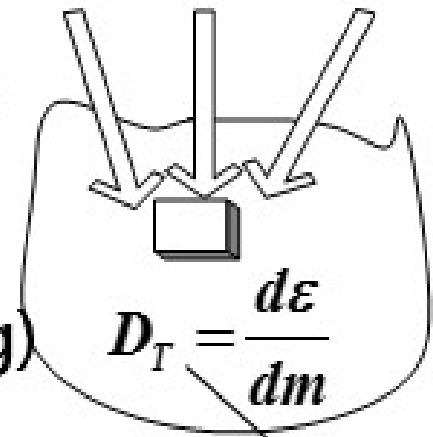
2.1 輻射劑量的定義(Definitions of Radiation Dose)

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)

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



某一組織或器官

1 Sv (西弗) = 1 Gy x W_R (W_R : 輻射加權射質因數 Radiation Weighting Factor)

輻射種類	ICRP 60/ W_R
光子	1
所有能量之電子及m介子	1
中子	
<10 keV	5
10 ~ 100 keV	10
100 keV ~ 2 MeV	20
2 ~ 20 MeV	10
>20 MeV	5
質子	5
阿伐、分裂產物碎片、重核粒子	20

有效劑量 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

Equivalent Dose

不同器官之組織加權因素

Tissue Weighting Factor

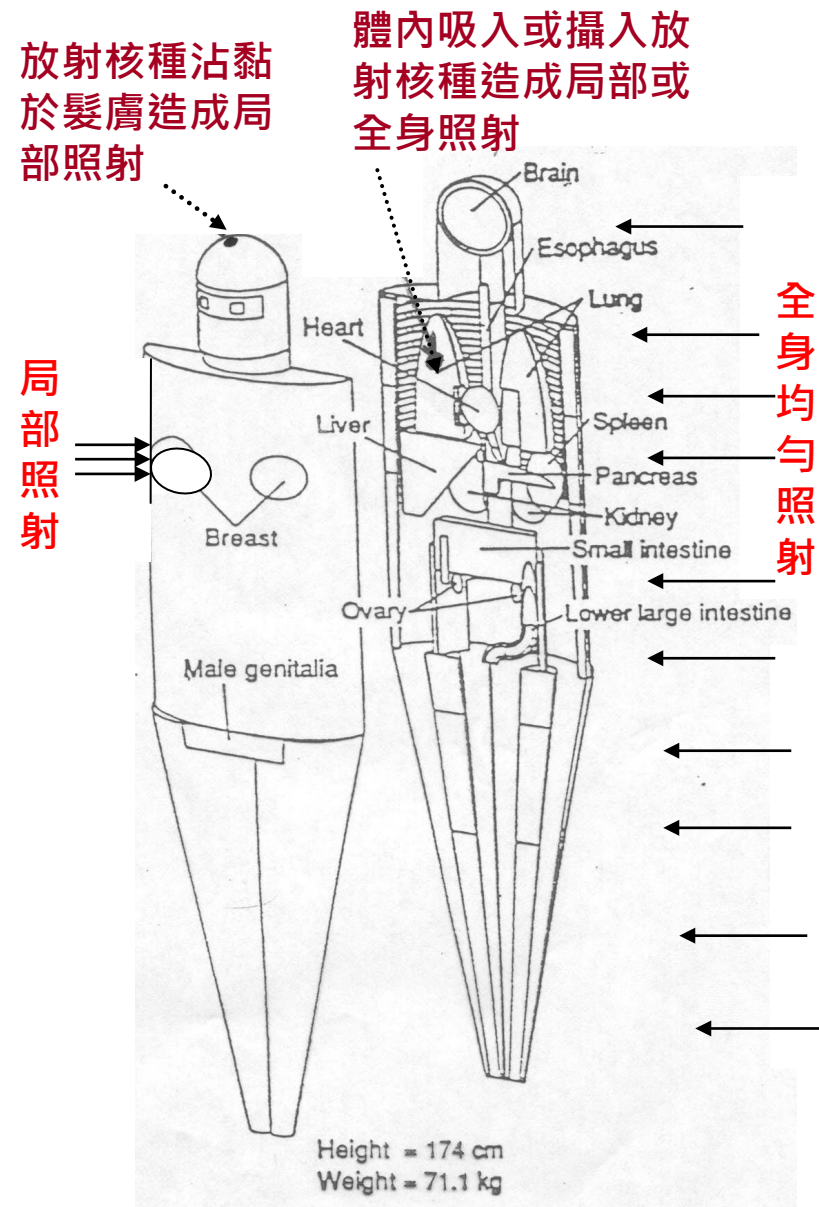
因人體不同器官遭受到不同輻射劑量所造成的整體人體輻射效應

器官或組織 (Organ or Tissue)	ICRP-60 W_T
性腺(生殖腺) Gonads	0.20
紅骨髓 Red Bone Marrow	0.12
結腸(大腸直腸) Colon	0.12
肺 Lung	0.12
胃 Stomach	0.12
膀胱 Bladder	0.05
乳腺 Breast	0.05
肝臟 Liver	0.05
食道 Oesophagus	0.05
甲狀腺 Thyroid	0.05
皮膚 Skin	0.01
骨髓表面 Bone Surface	0.01
其餘部分 Remainder of Body	0.05

資料來源：ICRP-60(1991)

我國目前之法規 W_T 係沿用ICRP-60

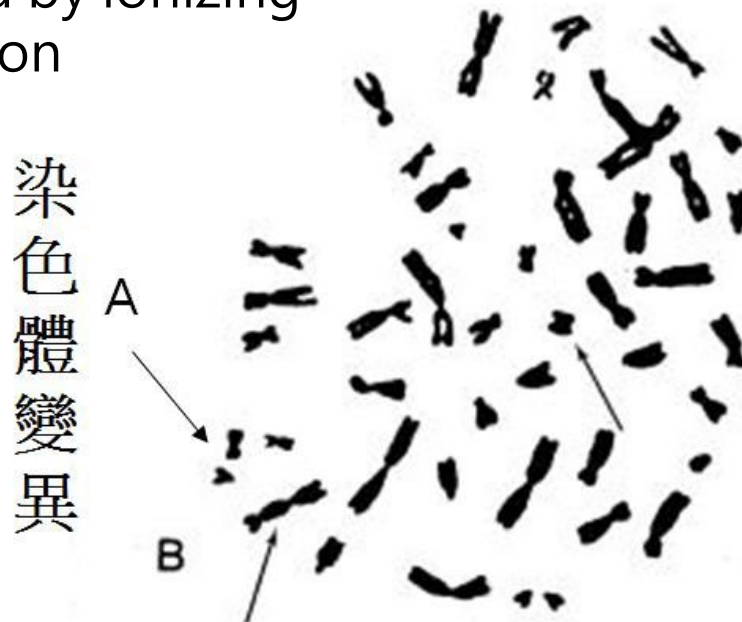
- ▶ **照射(Irradiation)**：人曝露於體外輻射場中受到輻射之照射，不會造成輻射之擴散。
- ▶ **污染(Contamination)**：人的髮膚附著或體內吸入或攝入放射核種而受到輻射之照射，污染通常會造成輻射之擴散。
- ▶ 造成人體之輻射曝露，其輻射源來自於體外者稱為**體外曝露(External Exposure)**，來自於體內者稱為**體內曝露(Internal Exposure)**。



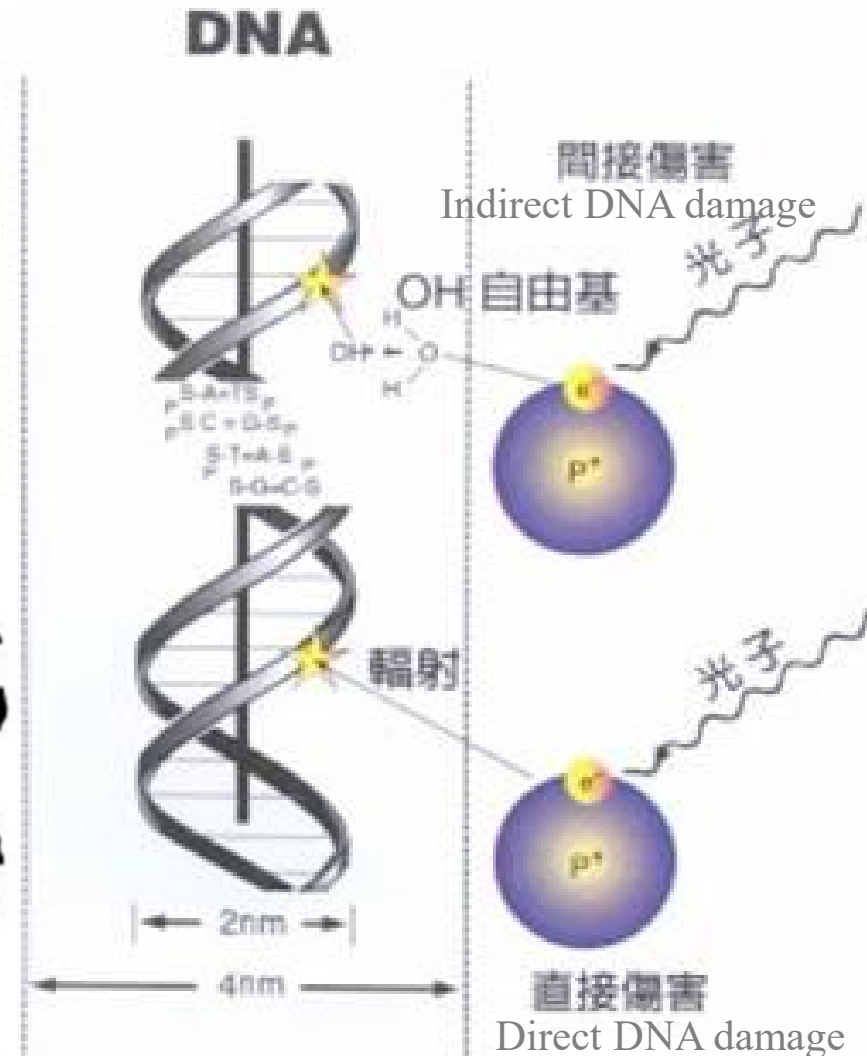
2.2 輻射暴露之健康效應 (Health Effect of Radiation Exposure)

游離輻射其能量足以破壞生物細胞分子，造成組織或遺傳基因的DNA破壞，以及進一步的染色體變異等等

Chromosome Variations
caused by ionizing
radiation



雙中結染色體變異 Dicentric chromosome variations



► **遺傳效應(Genetic Effect)**：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(Somatic Effect)**

(1)急性全身效應(Whole body acute response)如下表所列：

一次劑量(毫西弗)	一般症狀說明 (symptom)
< 10 mSv	無可察覺症狀，但遲延輻射病的產生仍可能發生。
100~250 mSv	能引起血液中淋巴球的染色體變異。
250~1000 mSv	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 mSv	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 mSv	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 mSv (Lethal Dose)	與前者相似，僅症狀顯示的較快，在2~6週內死亡率為50%。(50% probability dying within 2~6 weeks)
>6000 mSV	若無適當醫護，死亡率為100%。

►局部或遲延效應(Local tissue acute or delayed response)

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。
造血機能	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。

► 生活中輻射劑量的比較(毫西弗mSv)

100,000



腫瘤放射治療總劑量

Typical cancer treatment total dose

20,000 ~ 100,000

20,000

全身一次急性曝露4000~6000mSv

50%機率兩週內死亡(Lethal Dose)

6,000



鈷60一次照射2000

2,000



1,000

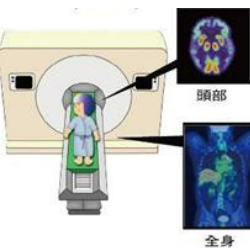
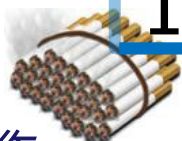


20

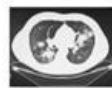
心臟冠狀
動脈掃描 16



10



正電子斷層攝影(PET) 7



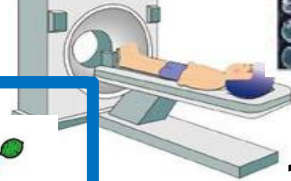
胸部掃描 7

電腦斷層攝影



頭顱掃描 2

5



1



乳房X光攝影 0.7

胸部X光一次 0.02

全口牙X光 0.01

0.1

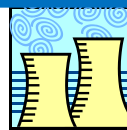


0.01



單齒 0.005

核電廠運轉 0.015/年



自然背景

Natural Background
1.6~2.0
/Yr/Person

民眾劑量限值

Annual dose limit for general
public 1.0 /Yr/person



輻射工作
人員劑量
限值

Occupational
Dose limit
20 /Yr

3. X光機及其屏蔽考量

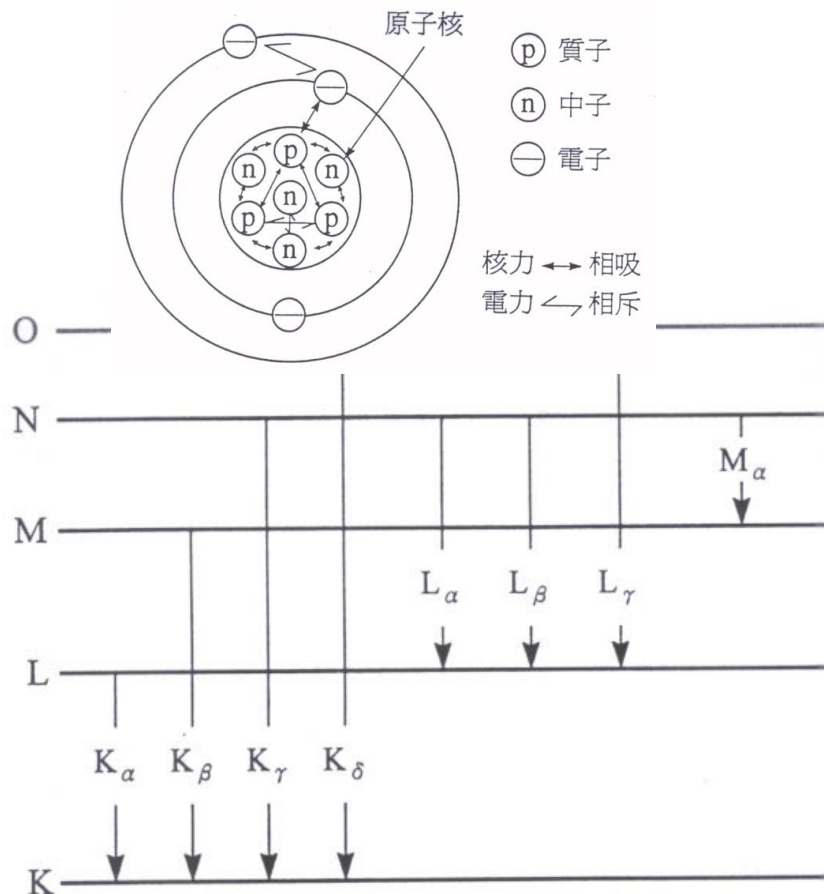
X-ray machine and shielding

產生X-射線的兩種機制

(Two Mechanisms Producing X-ray)

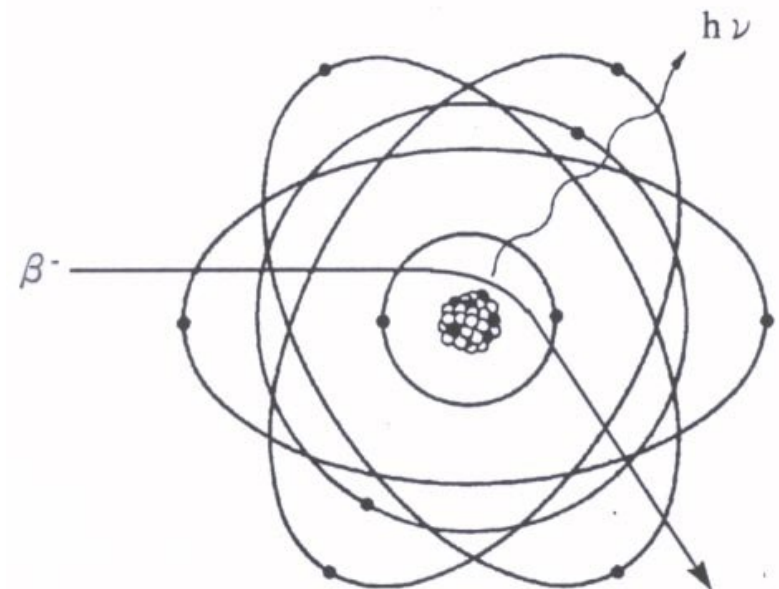
特性輻射 (Characteristic X-Ray)

原子軌道電子變遷所放出的光



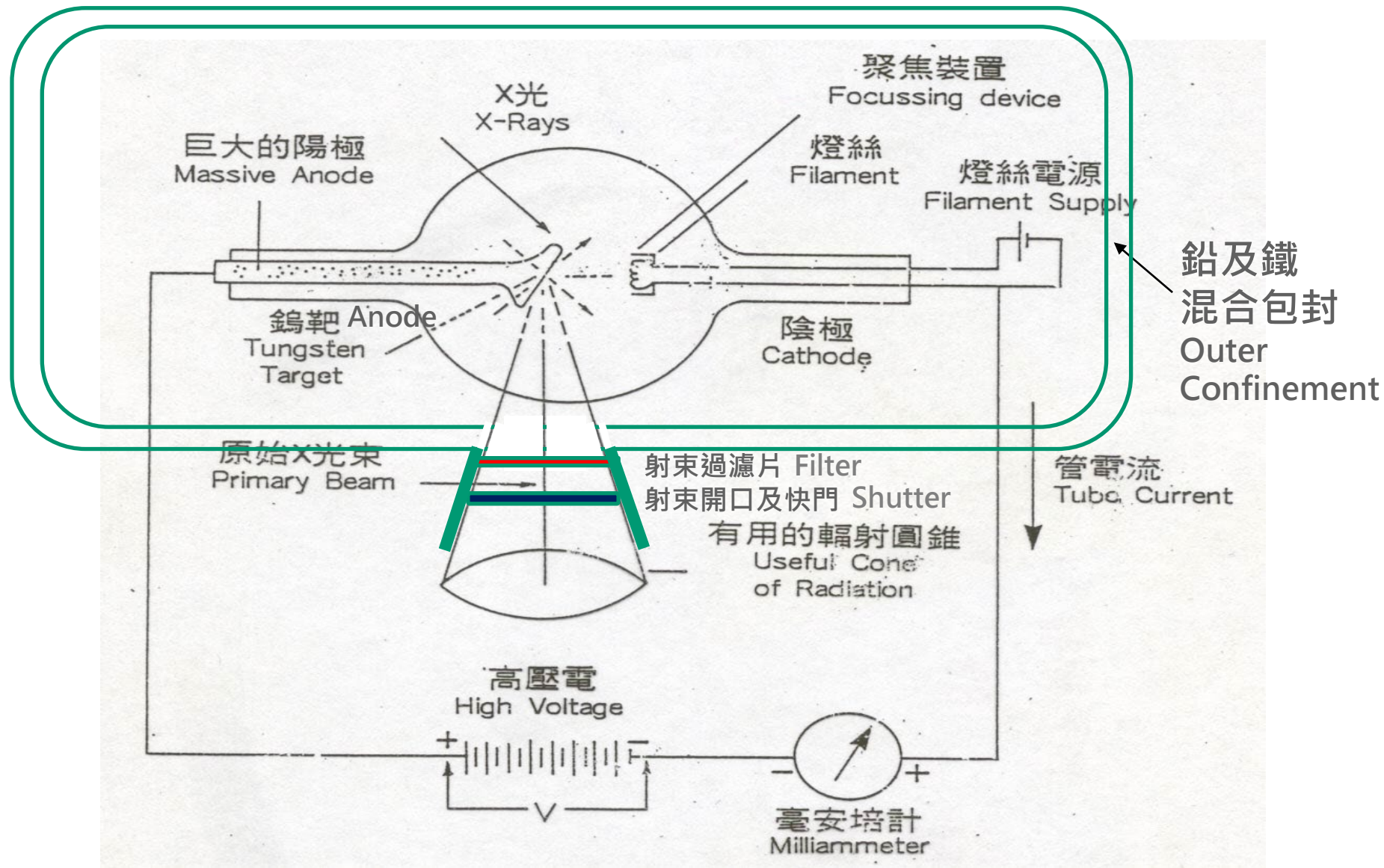
制動輻射 (Bremsstrahlung X-Ray)

加速帶電粒子往一個重原子核撞擊所放出的光

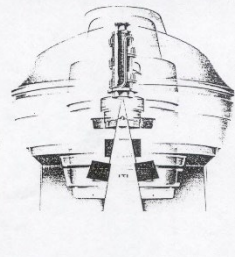
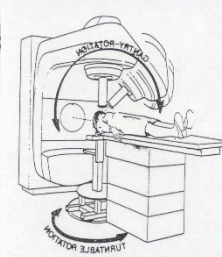
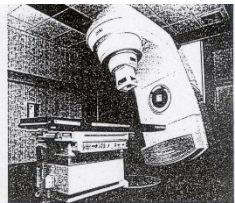
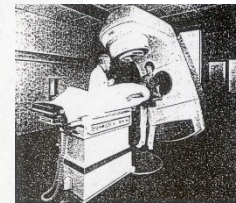
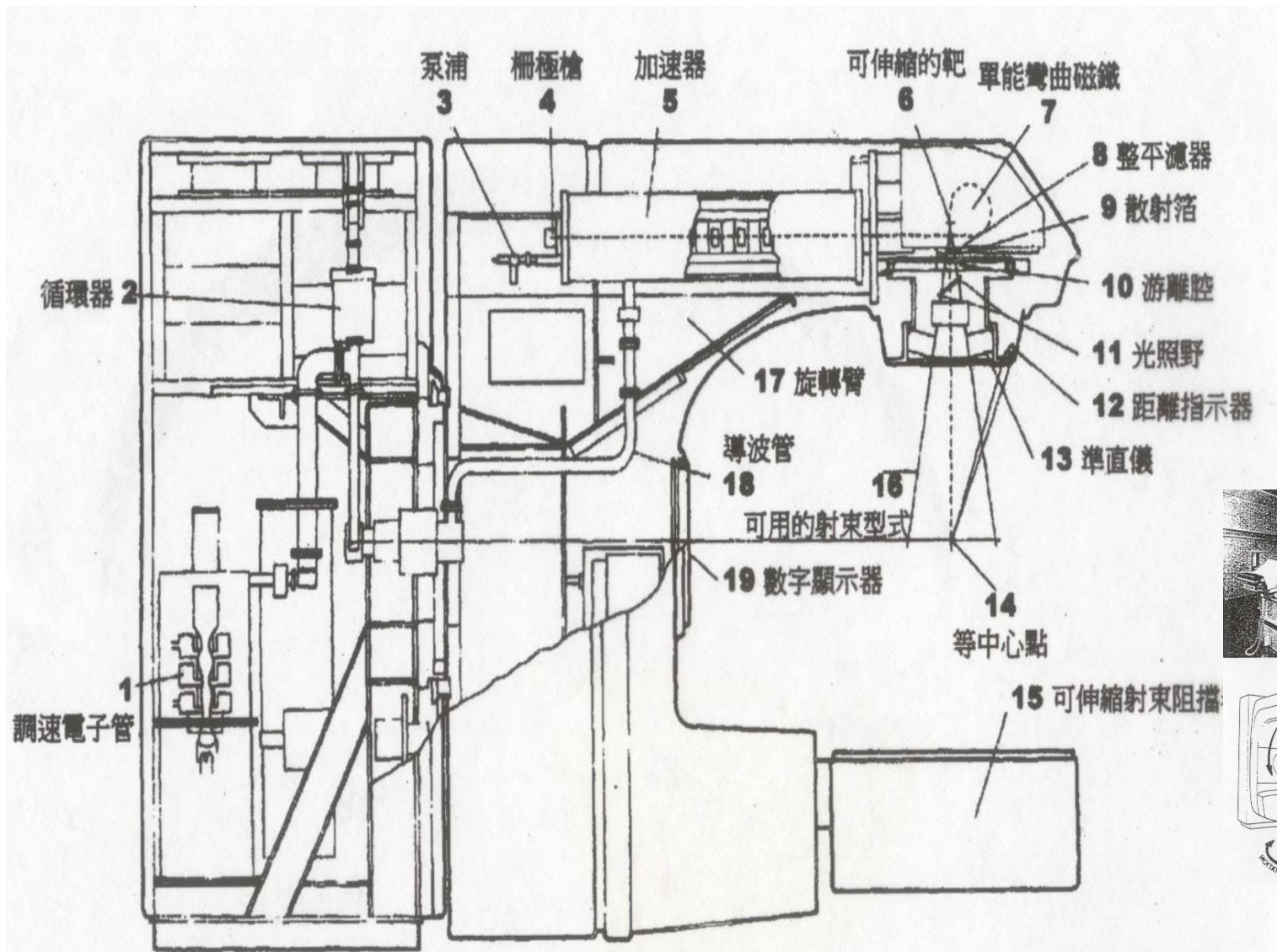


X光機內部示意圖

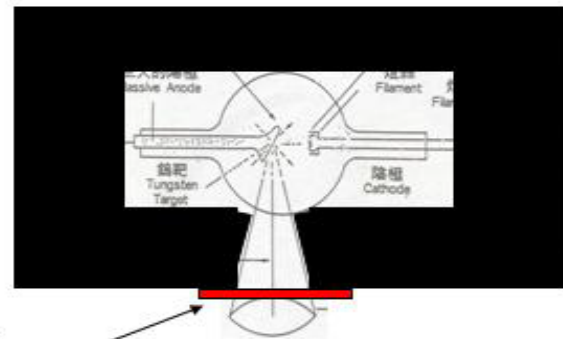
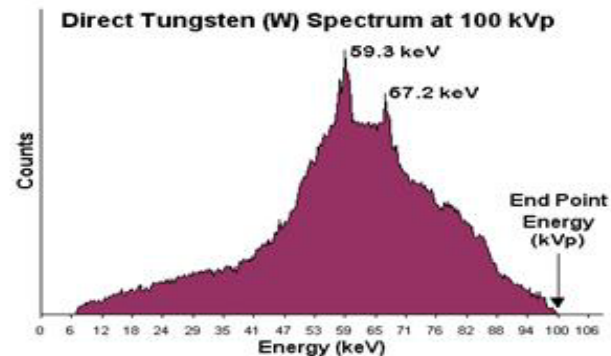
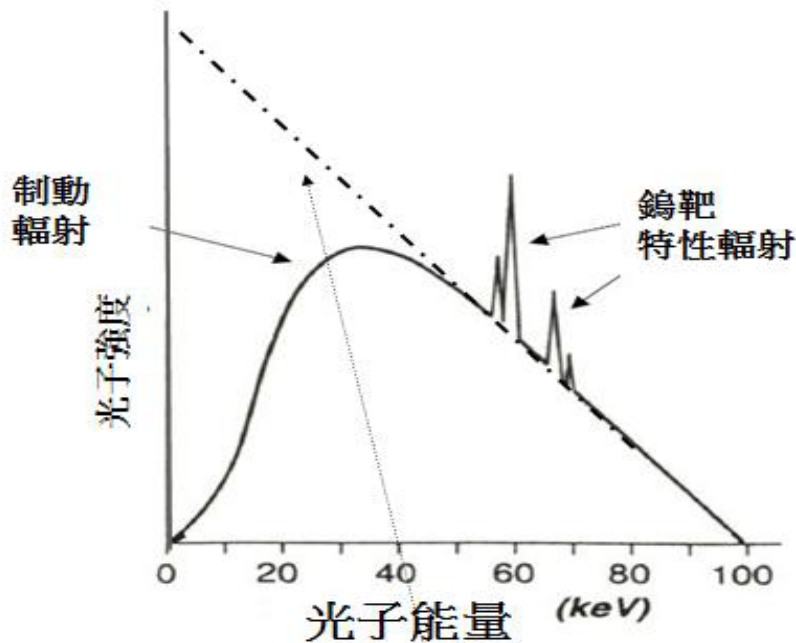
(Inside of a Typical X-ray Machine)



線性加速器可以產生相當高能量 X 光 (Inside of a Typical High Energy X-Ray Linear Accelerator)

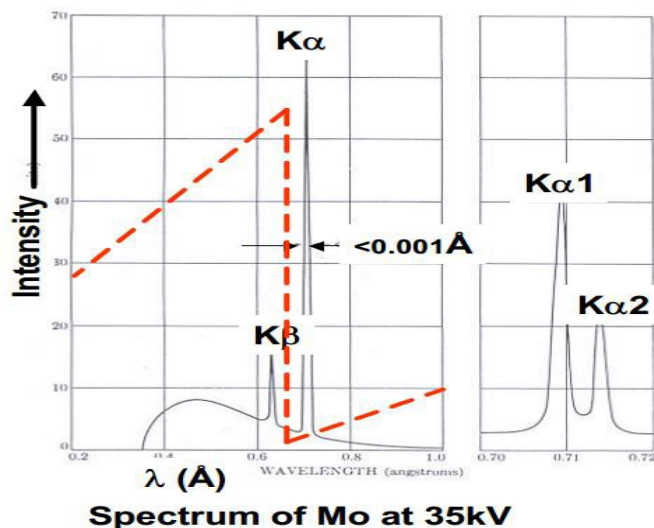


典型鎢靶 光譜 Tungsten Target Spectrum



利用薄的銅或鋁片吸收不必要的低能量X光

典型鉬靶 光譜 Molybdenum Target Spectrum

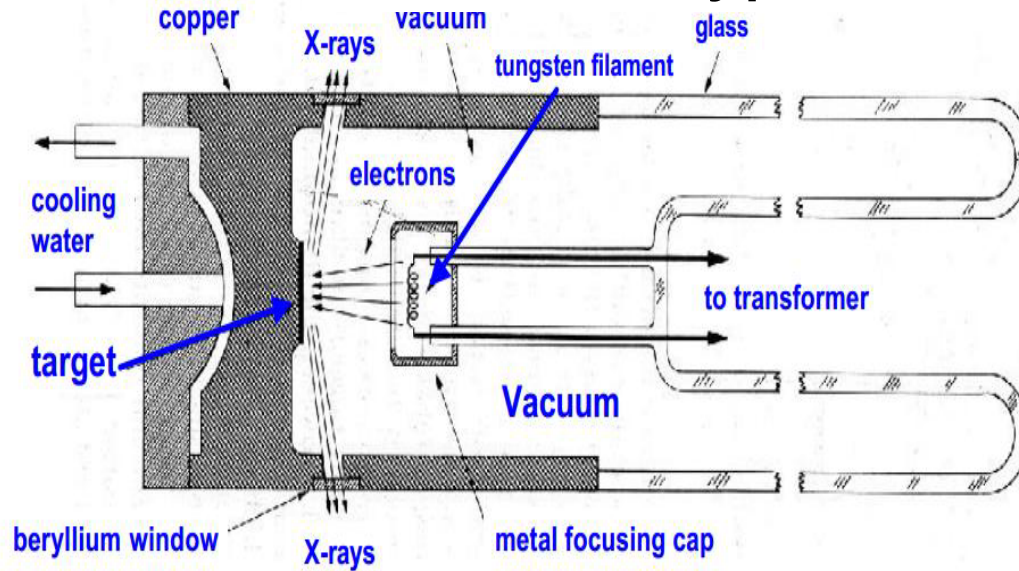


$K\beta$ and $K\alpha_2$ will cause extra peaks in XRD pattern, and shape changes, but can be eliminated by adding filters.

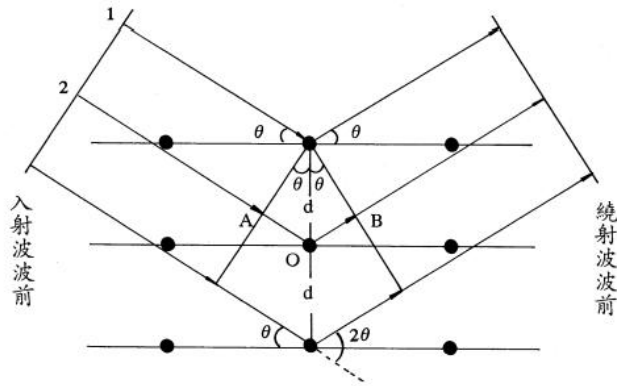
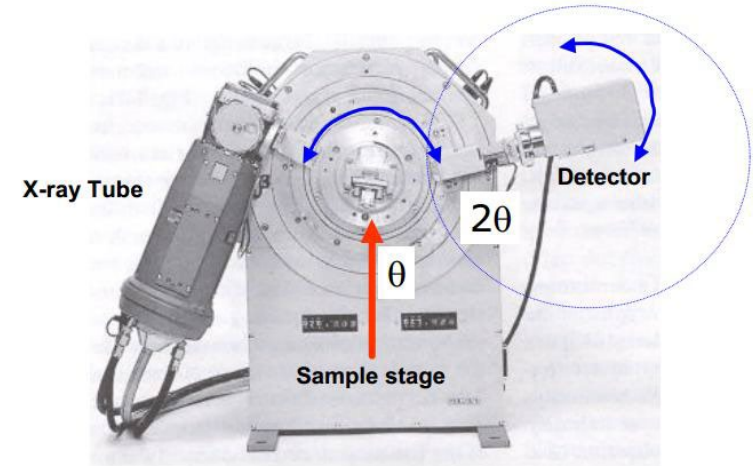
--- is the mass absorption coefficient of Zr.

典型X光繞射儀內部示意圖

(Inside of a Typical X-ray Diffractometer)

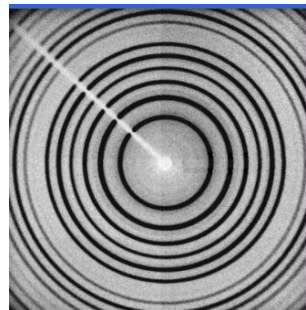


典型X光繞射儀

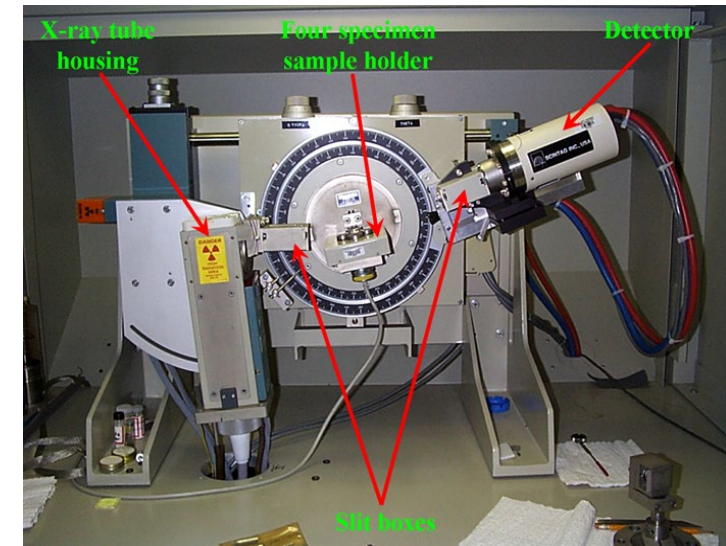


Braggs' Law

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$



d: 反射原子面(hkl)之間距
 θ: 入(反)射光與原子面之夾角
 n: 繞射階次
 λ: X光波長

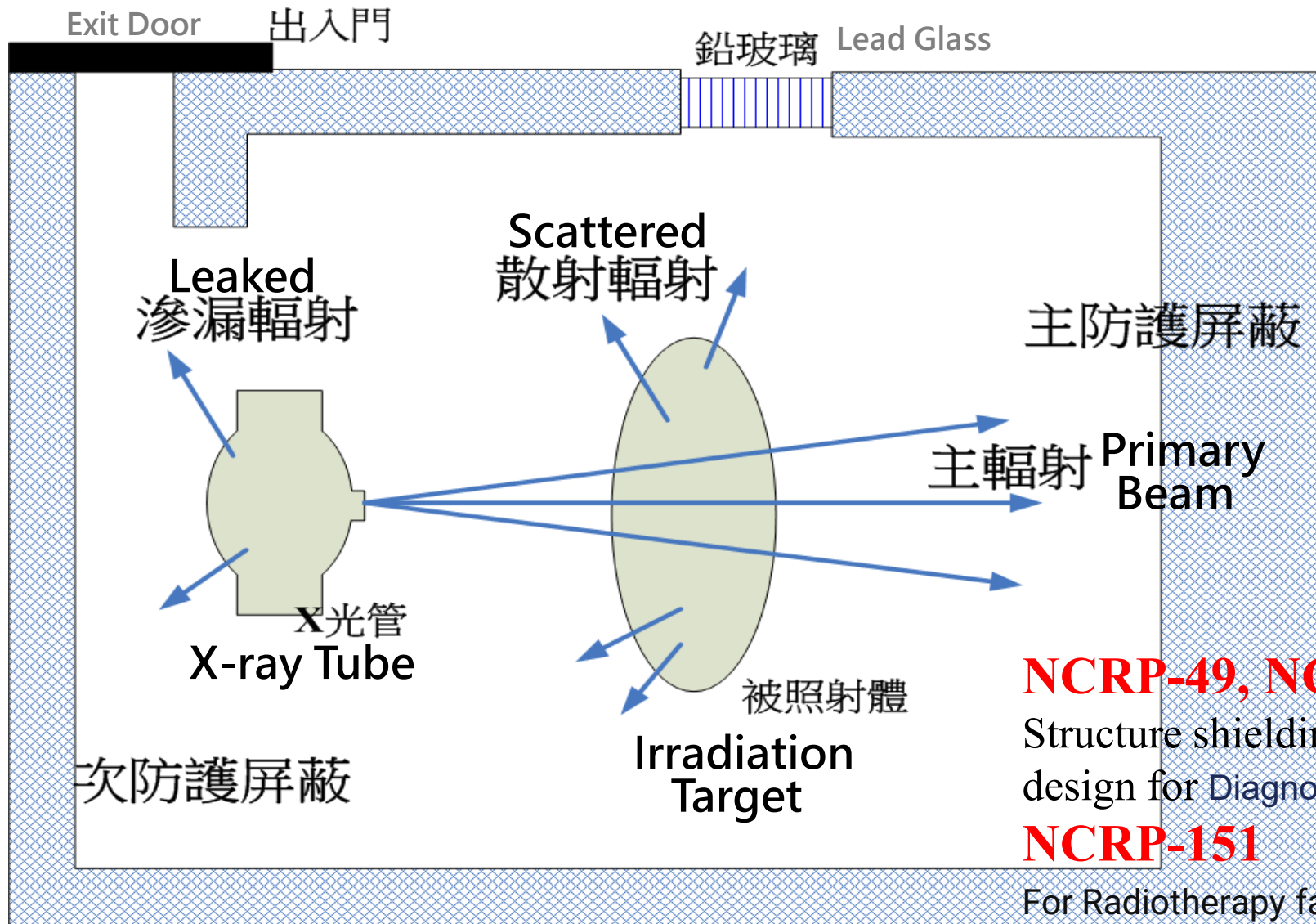


常用的X光繞射儀陽極金屬靶 及其 特性輻射X光波長 (Typical Anode Material of X-ray Diffractometer)

Copper Anodes	Bearden (1967)	Holzer et al. (1997)		Cobalt Anodes	Bearden (1967)	Holzer et al. (1997)
Cu K α 1	1.54056Å	1.540598 Å		Co K α 1	1.788965Å	1.789010 Å
Cu K α 2	1.54439Å	1.544426 Å		Co K α 2	1.792850Å	1.792900 Å
Cu K β	1.39220Å	1.392250 Å		Co K β	1.62079Å	1.620830 Å
Molybdenum Anodes				Chromium Anodes		
Mo K α 1	0.709300Å	0.709319 Å		Cr K α 1	2.28970Å	2.289760 Å
Mo K α 2	0.713590Å	0.713609 Å		Cr K α 2	2.293606Å	2.293663 Å
Mo K β	0.632288Å	0.632305 Å		Cr K β	2.08487Å	2.084920 Å

- Often quoted values from Cullity (1956) and Bearden, *Rev. Mod. Phys.* **39** (1967) are incorrect.
 - Values from Bearden (1967) are reprinted in *international Tables for X-Ray Crystallography* and most XRD textbooks.
- Most recent values are from Hölzer et al. *Phys. Rev. A* **56** (1997)
- Has your XRD analysis software been updated?

典型醫用X光機照射室示意圖 (Typical Medical X-ray Irradiation Room)



NCRP-49, NCRP-147
Structure shielding
design for Diagnosis X-ray
NCRP-151
For Radiotherapy facilities

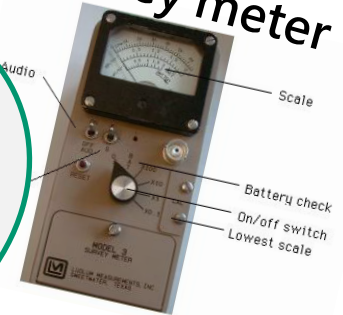
個人劑量計
Personal
Dosimeter



舊型開放式X光繞射儀 Open System X-ray Diffractometer



輻射偵檢器
Radiation
survey meter



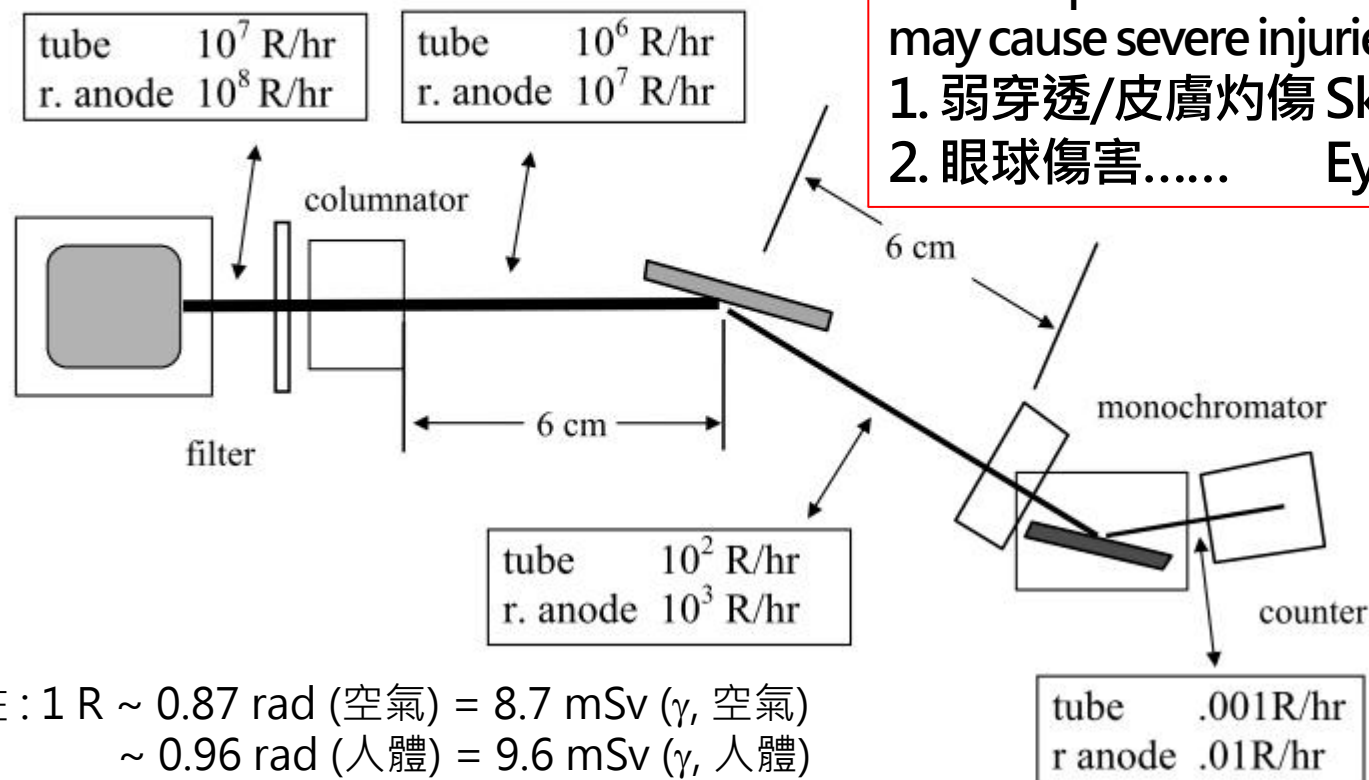
新型封閉式X光繞射儀 Cabinet X-ray Diffractometer



X光繞射儀內部的可能劑量率

(Possible Radiation Dose Rate Inside a Powder Diffractometer)

powder diffractometer



直接暴露於儀器內部X光

Direct exposure inside a X-ray machine may cause severe injuries

1. 弱穿透/皮膚灼傷 Skin burn
2. 眼球傷害..... Eye injuries...

註：1 R \sim 0.87 rad (空氣) = 8.7 mSv (γ , 空氣)
 \sim 0.96 rad (人體) = 9.6 mSv (γ , 人體)

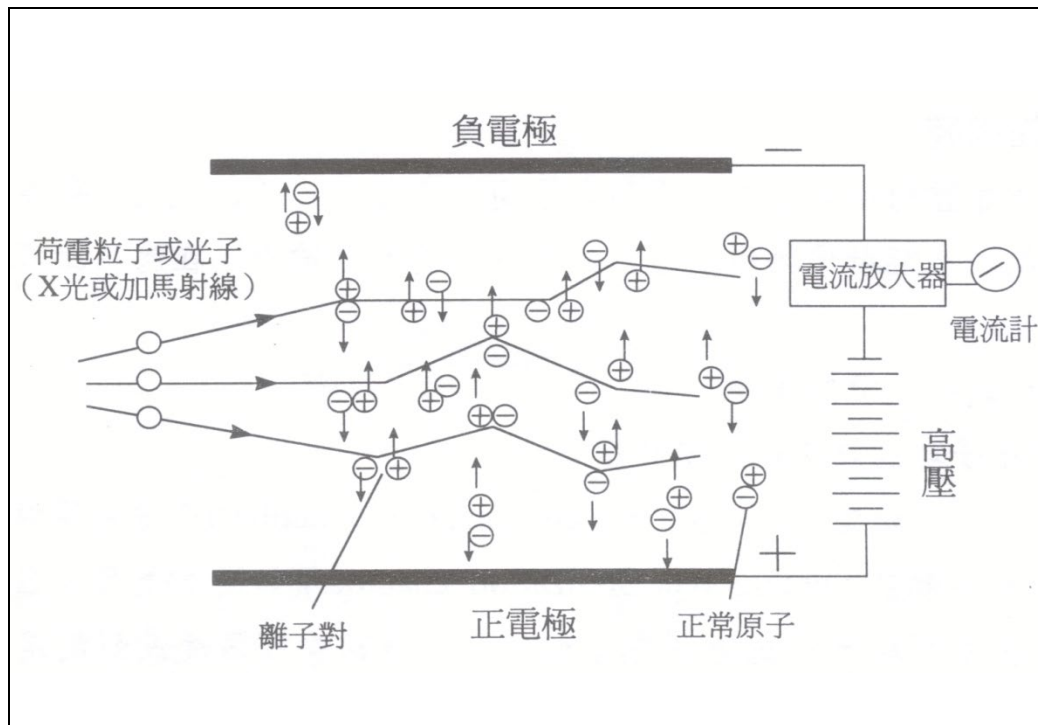
儀器外劑量 \sim 背景值 2 mSv/yr \sim 200 mR/yr \sim 0.02 mR/hr

4. 輻射度量與法規

(Radiation Measurement and Regulations)

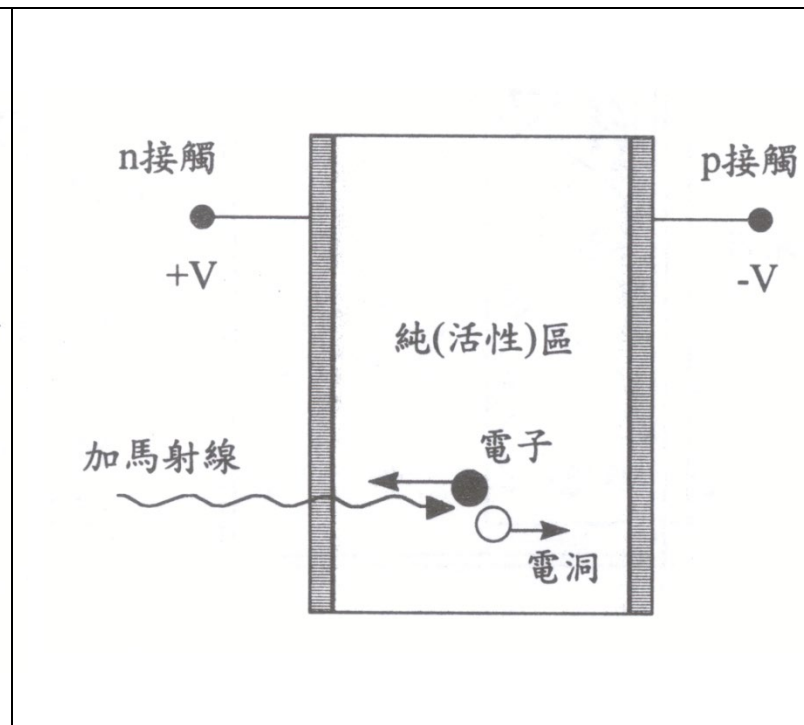
4.1 基本的輻射偵檢器原理

(Basic Principles of Ionizing Radiation Detection)



充氣式偵檢器
Gas Detectors

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
Semi-conductor detectors

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。

4.2 人員體內放射性污染的偵測

(Detections and Measurements of Internal Contaminations)

全身計測法

(whole body counting)

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



全身計數器

全身計測

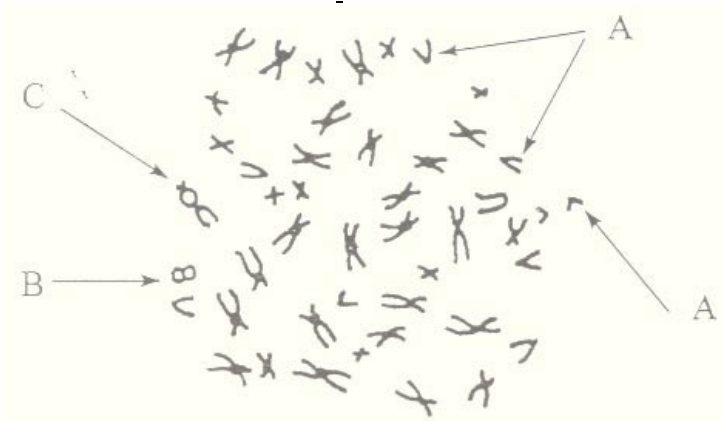
生化分析法

(biochemical analyses)

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

(chromosome variation)



4.3 人員體外劑量監測

(Detections and Measurements of External Radiations)

個人劑量計



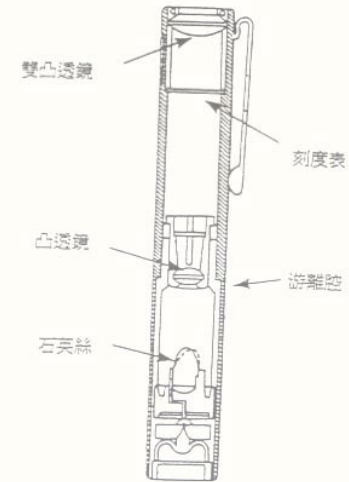
Personal Dosimeter

個人警報器

劑量筆

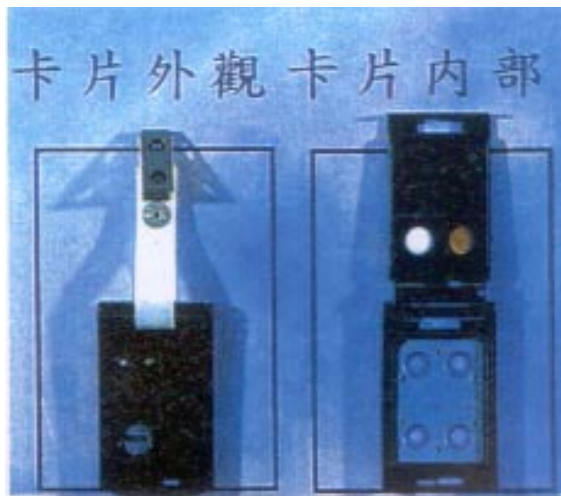


Pen Dosimeter



直讀式劑量筆

人員劑量配章



Film Badge

人員輻射劑量佩章

手提輻射偵檢器



Radiation Survey Meter

Automation und Messtechnik GmbH

automess

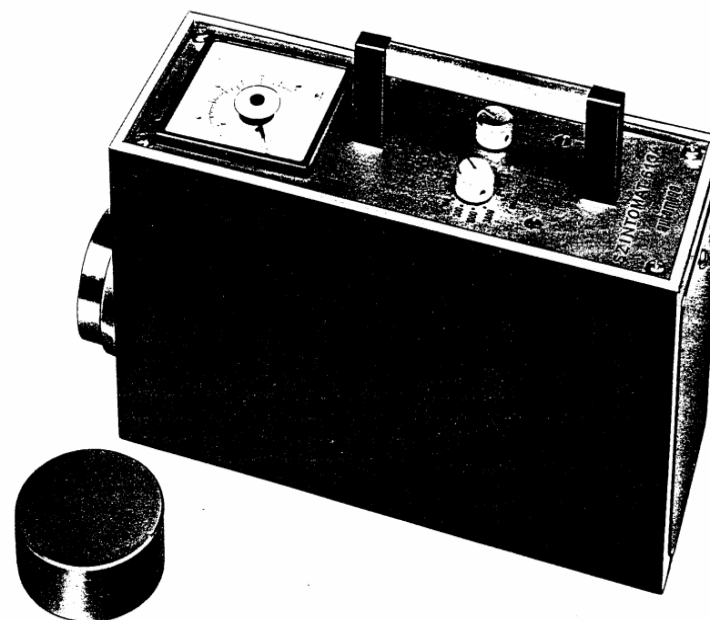
Automation und Messtechnik GmbH

automess

- Dose rate measurement from 1 μ R/h to 1500 R/h automatic or manual range switching
- Dose measurement from 1 μ R to 1000 R
- Dose rate warning from 1 mR/h to 10 R/h
- Dose warning from 1 mR to 10 R
- Energy range 20 keV to 3 MeV
- Detection probe removable from unit: easy operation in all usual applications
- Modern electronic circuitry using CMOS microprocessor: reliable, low power consumption, rapid and problem-oriented evaluation of the measured data

SZINTOMAT 6134 A

UNIVERSAL, PORTABLE
SURVEY METER
FOR GAMMA RADIATION

Scintillator

- WIDE RANGE OF 0.002 mR/hr TO 3000 mR/hr
- EXCELLENT ENERGY RESPONSE OF 20 keV TO 3 MeV
- SMALL SIZE - LIGHT WEIGHT
- VARIABLE METER RESPONSE TIME
- LARGE SCALE - 270° DEFLECTION
- FOUR STANDARD D CELLS - QUICKLY REPLACEABLE

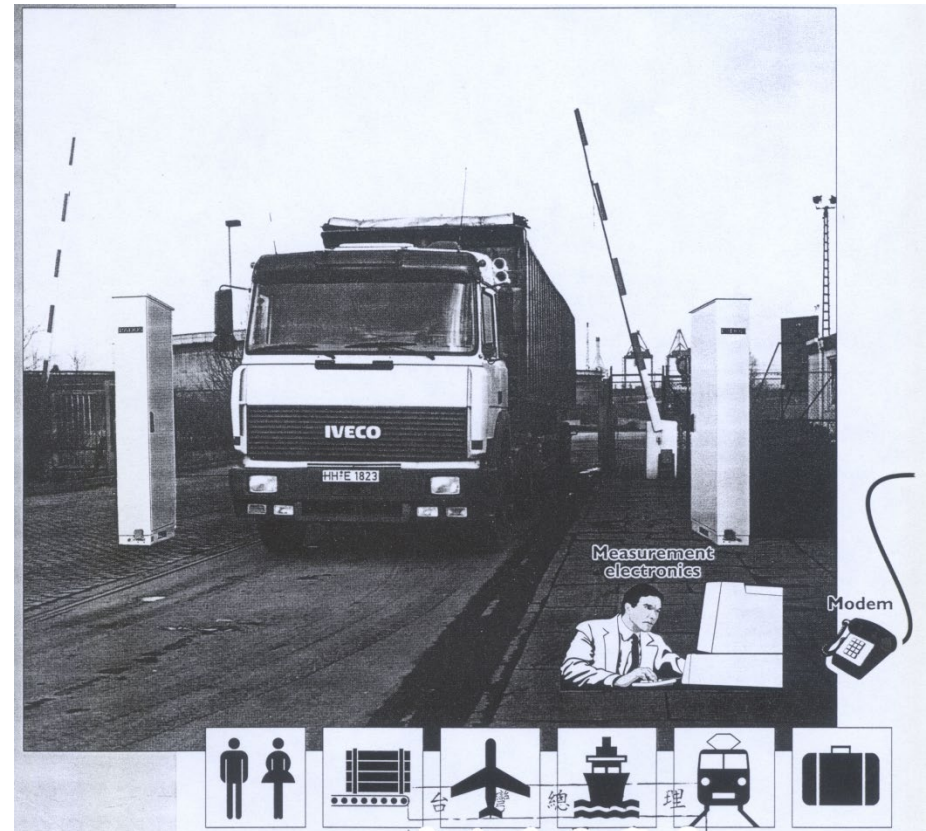
SZINTOMAT 6134
DOSE
RATE METER

scintillator

進出輻射管制區之門型偵檢器
The Gate Detector installed at
a gate of a radiation control
area



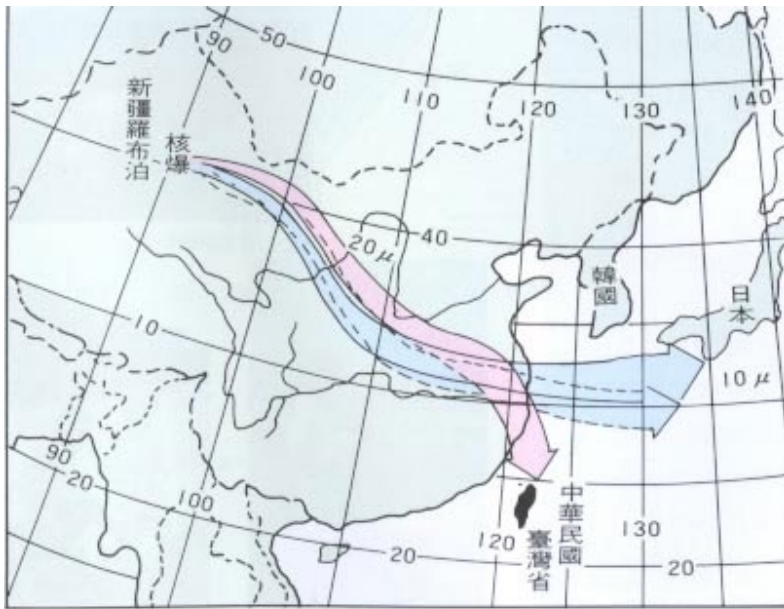
進出海關碼頭之門型偵檢器
The Gate Detector installed at
harbor, airport, industrial
park...



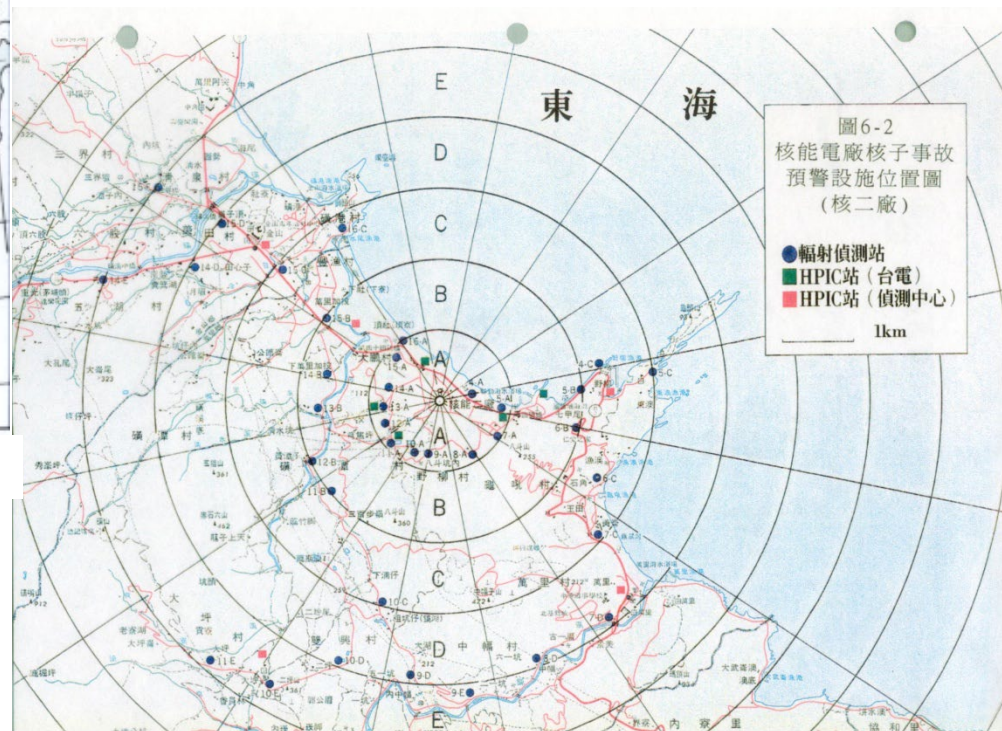
4.4 環境輻射監測

Atmospheric and Environmental Detectors

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



4.5 放射性廢料管制 (Control of the Radioactive Waste)

► 放射性廢料的緣起- 原子武器

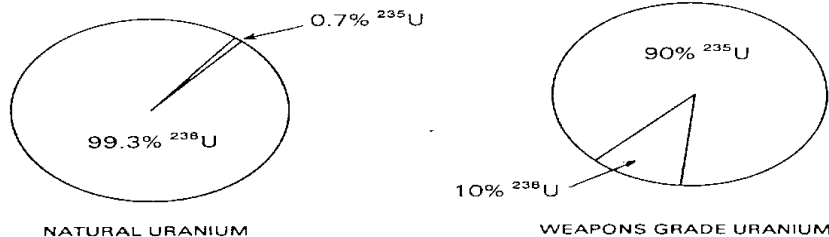
Radioactive Wastes were originally from weapon development

The Story of Atomic Bomb

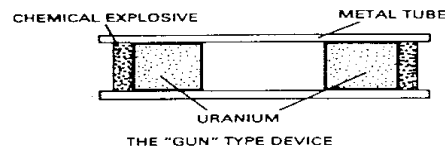
World War-II → German Discovered Fissions

→ Albert Einstein urged U.S. President Franklin D. Roosevelt

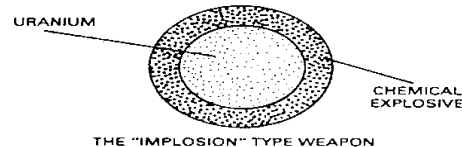
→ **Manhattan Project** & J. Robert Oppenheimer



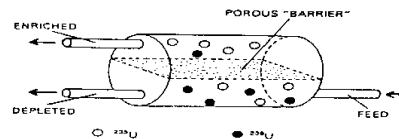
Composition of different enrichments of uranium.



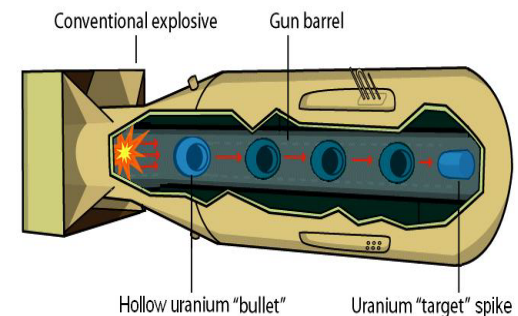
Nuclear weapons of the fission type.



Separation of uranium isotopes by gaseous diffusion. The uranium-235 atoms pass through the "barrier" more readily than do the uranium-238 atoms. Thousands of such units are connected.



提煉濃縮鈾的過程產生了很多高階廢料及超鈾廢料



Uranium for "Little Boy" was enriched in calutrons and by gaseous diffusion at Oak Ridge, Tennessee.

Little Boy (廣島原子彈)

the first nuclear weapon used in warfare. It exploded approximately 1,800 feet over Hiroshima, Japan, on the morning of August 6, 1945, with a force equal to 13,000 tons of TNT. Immediate deaths were between 70,000 to 130,000. the first nuclear weapon used in warfare. It exploded approximately 1,800 feet over Hiroshima, Japan, on the morning of August 6, 1945, with a force equal to 13,000 tons of TNT. Immediate deaths were between 70,000 to 130,000.



Fat Man (長崎原子彈)

the second nuclear weapon used in warfare. Dropped on Nagasaki, Japan, on August 9, 1945, *Fat Man* devastated more than two square miles of the city and caused approximately 45,000 immediate deaths.

► 原子能和平用途 (Nuclear Power Generation)

- 核能發電 產生

- 高及中階廢料

High Level Waste (HLW)

and Medium Level Waste (MLW)

- 低階廢料

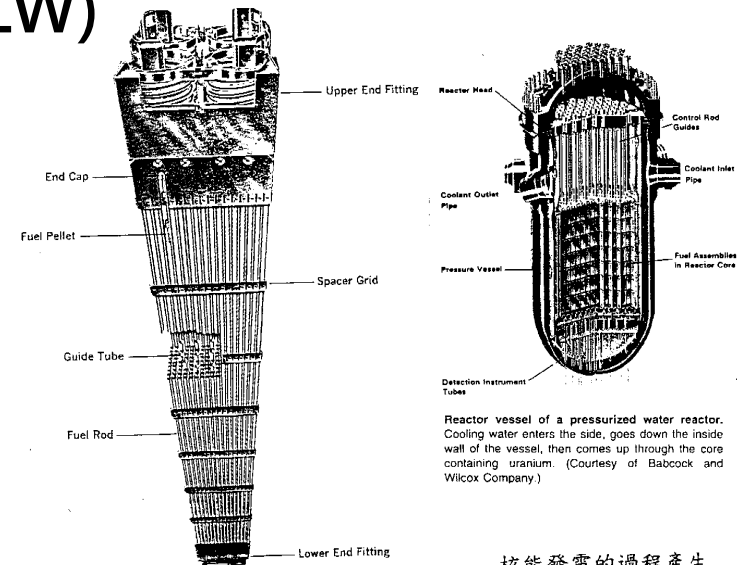
Low Level Waste (LLW)

- 其他理工農商醫及研究單位均可能 產生

- 中階 及 低階廢料

(多數為低階廢料)

Fuel pellets for a pressurized water reactor. The uranium oxide contains ^{235}U at 3 percent enrichment. (Courtesy of AgipNucleare.)



Reactor vessel of a pressurized water reactor. Cooling water enters the side, goes down the inside wall of the vessel, then comes up through the core containing uranium. (Courtesy of Babcock and Wilcox Company.)

核能發電的過程產生

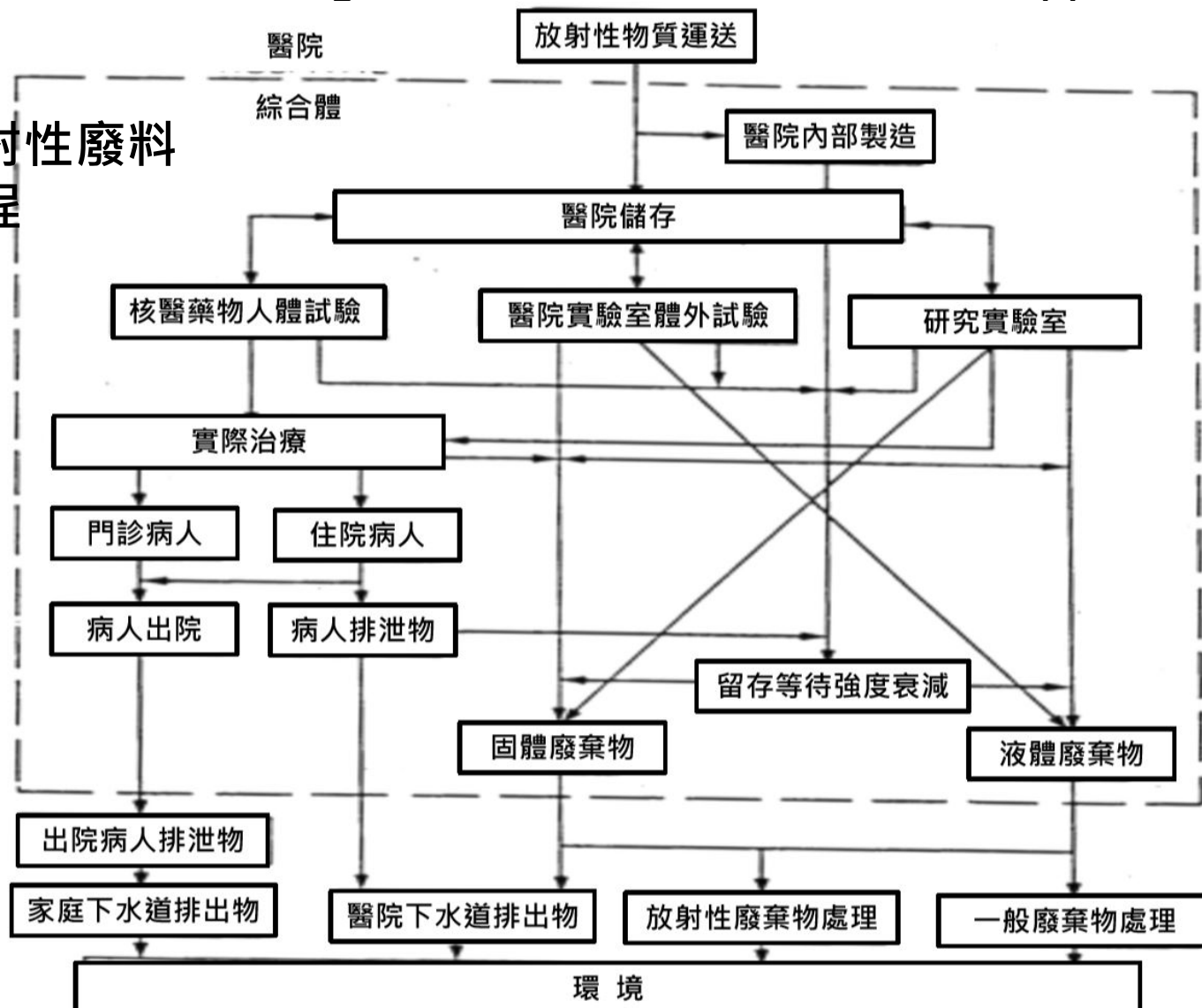
→ 高階廢料(用過燃料)

→ 中低階廢料

►放射性廢料的產生(Generations of Radioactive wastes)

理工農商醫各種應用及研究單位均有可能產生放射性廢
(Radioactive wastes are generated from various radiation applications)

醫用放射性廢料 產生流程



►我國的放射性廢料管制流程

(Radioactive wastes are controlled by the governmental level)

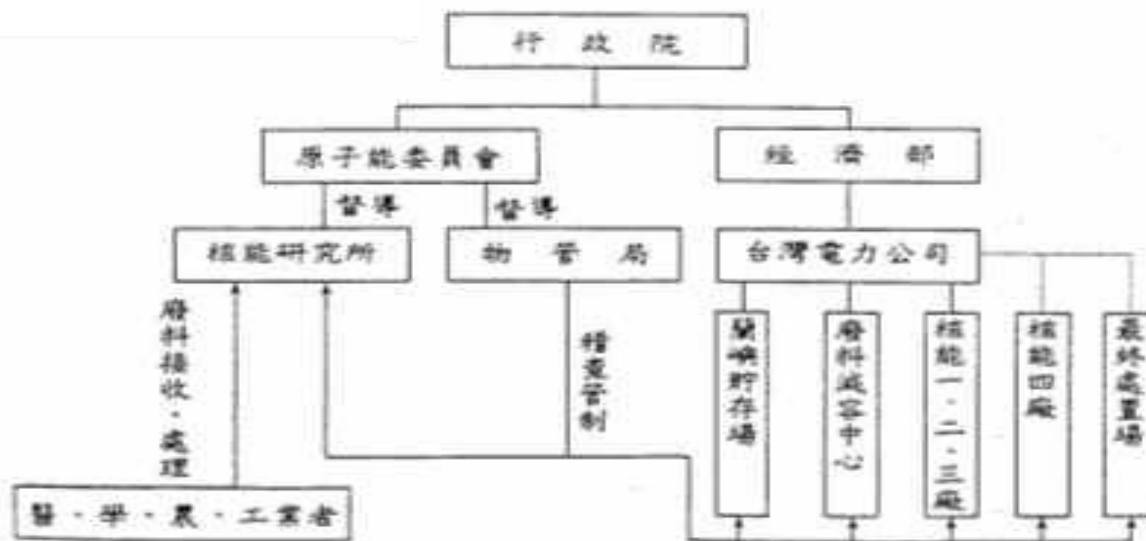


圖14.6 國內放射性廢料營運相關組織系統

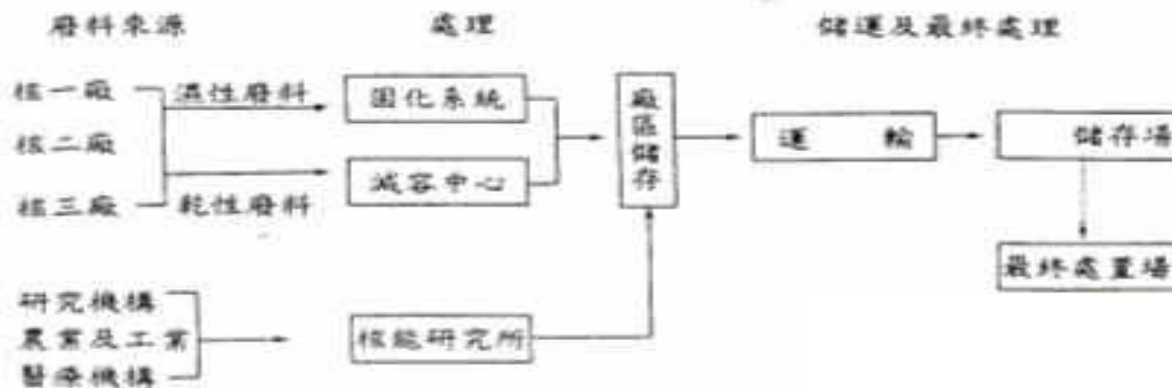


圖14.3 低放射性廢料營運流程圖

4.6 輻射劑量之法規限值

(Regulation Limit of ionizing radiation)

- ▶ 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(2003.02.01開始施行,
2005.12.30修訂)
- ▶ 年劑量限值(Annual Dose Limit)

目的	組織器官 Tissues	劑量限度(毫西弗/年) Annual limit (mSv/y)	
		輻射職業人員 (Occupation)	民眾 (Public)
抑低機率效 應至可接受 水平	全身 (有效劑量) Effective dose	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 Eye	150	15
	個別組織 或器官 Other Tissues	500	50

► 佩帶人員劑量計之規定

(Regulations w.r.t. Wearing Personal Dosimeters)

我國於2002年公布的「游離輻射防護法」第15條，及其於2008年修訂之「游離輻射防護法施行細則」第6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)，其有效劑量為 6 毫西弗，眼球水晶體之等價劑量為 50 毫西弗，皮膚及四肢之等價劑量為 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

►教學上游離輻射設備操作之規定

(Regulations w.r.t. Handling ionizing Radiation Device at Academies and Universities)

依據放射性物質及可發生游離輻射設備操作人員管理辦法
(2009年修訂版)第3條規定：

「基於教學需要在合格人員指導下從事操作訓練者，係指：

- 一、中等學校、大專校院及學術研究機構之教員、研究人員及學生。
- 二、主管機關認可之輻射防護訓練業務機構之學員。
- 三、接受臨床訓練之醫師、牙醫師或於醫院實習之醫學校院學生、畢業生。
- 四、接受職前訓練之人員。」

「...第一項人員於操作放射性物質或可發生游離輻射設備前，應接受合格人員規劃之操作程序及**輻射防護講習**。但操作主管機關核發許可證之移動式或無固定式屏蔽之放射性物質或可發生游離輻射設備時，仍應在合格人員直接監督下為之。...」

「...前項操作程序及輻射防護講習，**時數不得少於三小時**。...」

► 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(2005年修訂版)第10條規定：
(Special Rules for Protecting Young Trainees)

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

(1)有效劑量不得超過 6 毫西弗。

—————→ 乙種狀況

(2)眼球水晶體之等價劑量不得超過 50毫西弗。

(3)皮膚或四肢之等價劑量不得超過 150 毫西弗。」

► 對於女性保護之特別之規定

(Special Rules for Protecting Pregnant Workers)

依據游離輻射防護安全標準(2005年修訂版)第11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，使其胚胎或胎兒接受與一般人相同之輻射防護」。

「前項女性輻射工作人員，其剩餘妊娠期間下腹部表面之等價劑量不得超過 2 毫西弗，且攝入體內放射性核種造成之約定有效劑量，不得超過 1 毫西弗。」

5. 游離輻射防護的要點

Basic Principles of Radiation Protection

5.1 體外與體內暴露之防護原則

Principles of Protection for External and Internal Exposure

5.1.1 體外之防護原則

Principles of Protection for Internal Exposure

- ▶ 時間(Time)：縮短於輻射場中的逗留時間
- ▶ 衰減(Decay)：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(Distance)：加馬射源強度隨距離平方成反比
- ▶ 屏蔽(Shielding)：使用各種有效的屏蔽材料



5.1.2 體內暴露之防護原則

Principles of Protection for Internal Exposure

- ▶ **阻絕 (Blockage)：**阻絕放射性物質經由飲食、呼吸、皮膚吸收、傷口侵入進入人體內的途徑。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 (Dilution)：**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 (Dispersion)：**對受輻射污染的物質藉由空氣或水域加以分散。
- ▶ **除污 (Decontamination)：**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。



5.2 輻射源強度與加馬輻射場計算

(Calculation of Radioactivity and γ Field Strength)

► 輻射強度之衰減(Radioactivity Decay)

- 指數衰減定律 (Exponential Decaying Law) :

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

►加馬輻射場強度之簡易估算(更複雜的計算則使用計算機程式)

(Simplified Calculation of γ Field Strength)

$$H \approx \frac{0.0053 \cdot C \cdot E}{d^2} \text{ (Sv/h)}$$


γ 射源活度(Ci : 居里) $\rightarrow C$
 γ 射源能量(MeV) $\rightarrow E$
 d^2 \rightarrow 離射源之距離(公尺)
 H \rightarrow 曝露於輻射場中之劑量率 (西弗每小時)

註：以工作人員年劑量限值 $50 mSv = 0.05 Sv$ 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 $0.05 Sv/2000h = 2.5 \times 10^{-5} Sv/h = 25 \mu Sv/h$

5.3 校園內可能接觸到的游離輻射來源 (Potential Ionizing Radiation Sources at Campus)

➤ 操作放射性物質 (密封或非密封)

- 實驗用校正射源
- 儀器內的密封射源，如：
層析儀內的Ni-63：
($T_{1/2} \sim 100\text{y}$ ， $\beta^- \sim 67\text{keV}$)、
電荷中和器內的Kr-85：
($T_{1/2} \sim 10.7\text{y}$ ， $\beta^- \sim 687\text{keV}$)
液態閃爍計數儀內的 Cs-137
其他.....



工業上常用的輻射源及其半衰期
(Typical Check Sources Used by Lab. and Industry)

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
	^{102}Ir	73.8d
非破壞檢驗	^{60}Co	5.3y
	^{102}Ir	73.8d

註：y 為年，d 為日

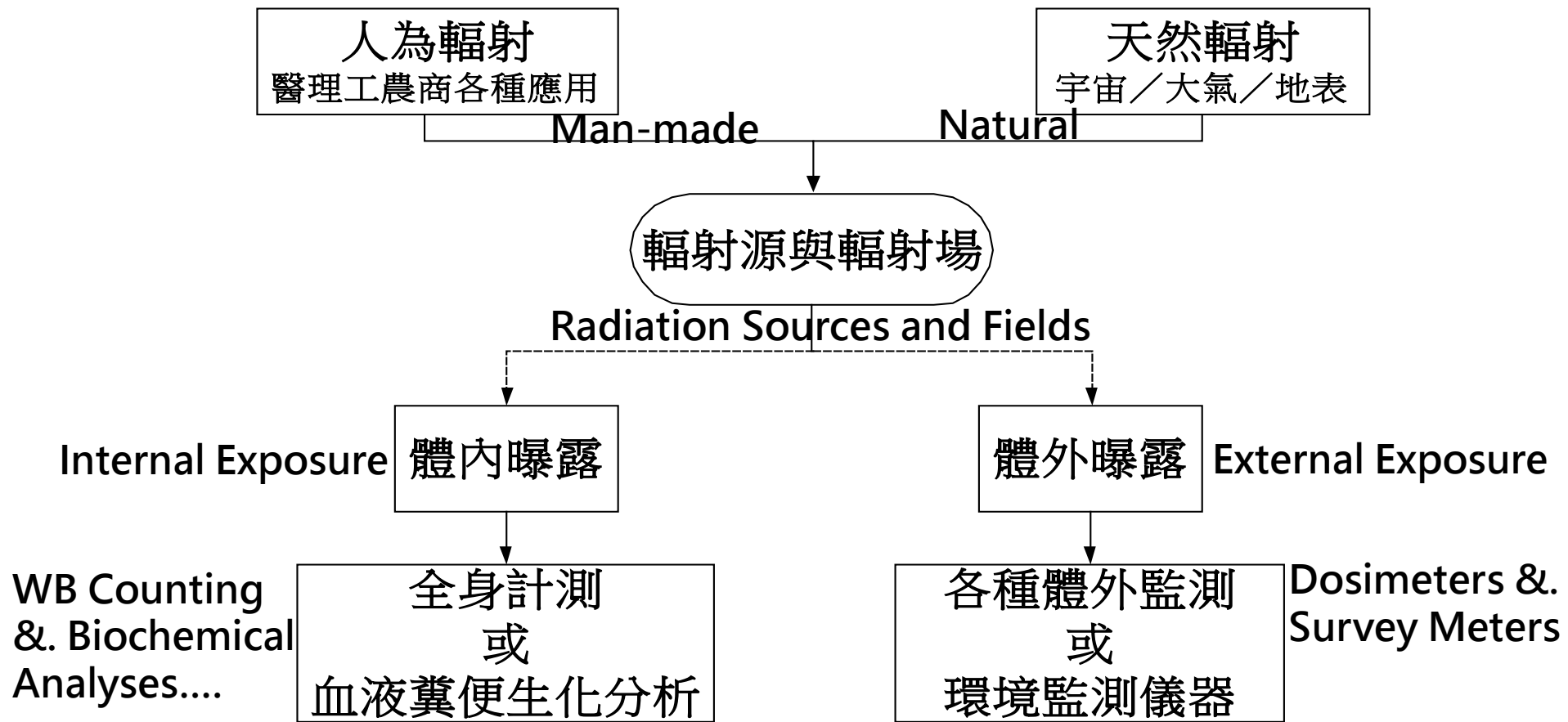
校園內的輻射防護計畫與組織

- 校園內射源和可發生游離設備之管理與管制
- 輻射偵檢儀器校正
- 放射性廢料收集(如有)
- 人員訓練
- 緊急處理與紀錄保存

➤ 操作可發生游離輻射設備

- 如: 教學用 X-光機，X光粉末繞射儀

5.4. 結語 (Conclusions)



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

Personal Protection Principles + Facility Management and Regulation Control