

# 原子能的醫農工業應用

## 游離輻射防護講習

陽明大學 生物醫學影像暨放射科學系  
環境保護暨安全衛生中心

王信二 教授/中心主任/輻防師



原子能：原子核發生變化所放出之一切能量

重工業：核能發電，核武器（ $E = \Delta m \cdot c^2$ ）

輕工業：放射性同位素應用

1. 做為輻射源，發出放射能--密封射源

(1) 物質對輻射--穿透效應

(2) 輻射對物質--分解與殺傷效應

(3) 能與熱源--動力與能源

2. 做為放射性示蹤劑--非密封射源

(1) 醫學應用      (2) 農業與水文應用

(3) 工業應用      (4) 基礎研究



# 核能發電

## 核分裂

- 輕水式(安全性高)
- 滋生式(breeding reactor)
- 無CO<sub>2</sub>、有核廢料 (a.低階 b.高階)

## 核融合

- 仍在研發階段，尚未商業運轉



# 原子能民生應用--核能發電

## \* 核分裂 ( $E = \Delta m \cdot c^2$ )

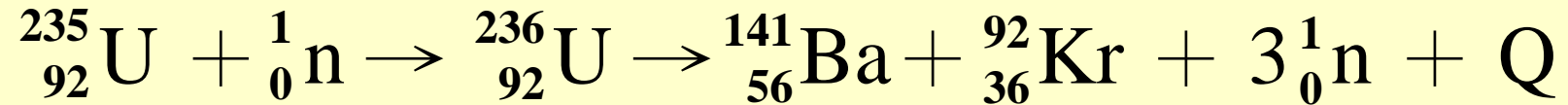
- ⊙ 輕水反應爐：現有多少商業運轉核能反應爐均為此型式，安全性高
  - 沸水式反應爐
  - 壓水式反應爐
- ⊙ 重水反應爐
- ⊙ 滋生式反應爐(breeding reactor)
- ⊙ 無CO<sub>2</sub>、有核廢料 (a.低階 b.高階)

## \* 核融合：仍在研發階段，尚未達商業運轉



# 核分裂

- 以中子轟擊某些重原子核，使其分裂成二個較輕元素的原子核，同時釋出2~3個自由中子。典型核分裂反應如

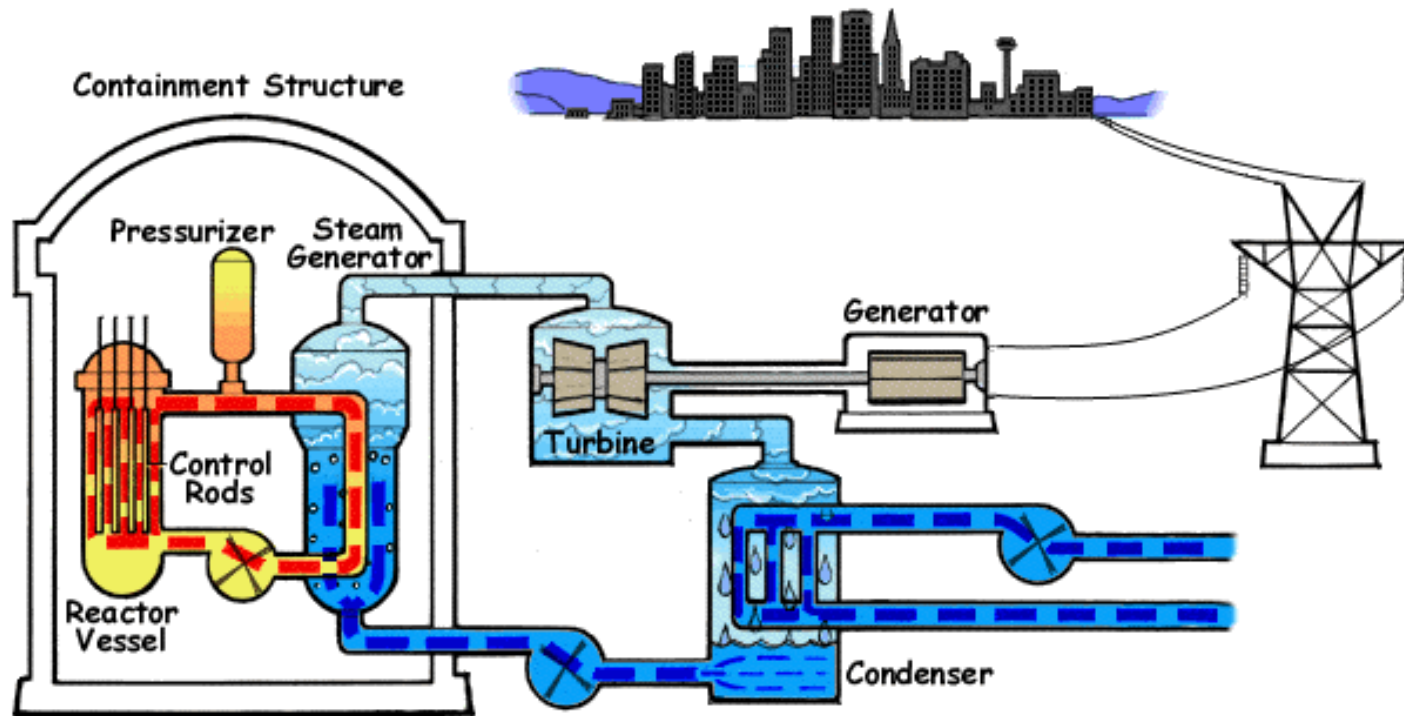


- 核分裂放出的能量可利用  $E=\Delta m \cdot c^2$  來計算，主要以核分裂產物動能及電磁波(加馬射線)形式釋放。每一個鈾-235原子核(235 amu)分裂平均可放出超過200 MeV的能量。
- 自由中子經緩和劑減速後可引發新的核分裂，若核燃料達臨界質量以上，則產生自續連鎖反應。核分裂反應燃料限於重原子核物質，如鈾-233、鈾-235、鈾-239及鈾-241等；其作用環境，在常溫與常壓下即可達成核反應。



## 核電廠發電原理

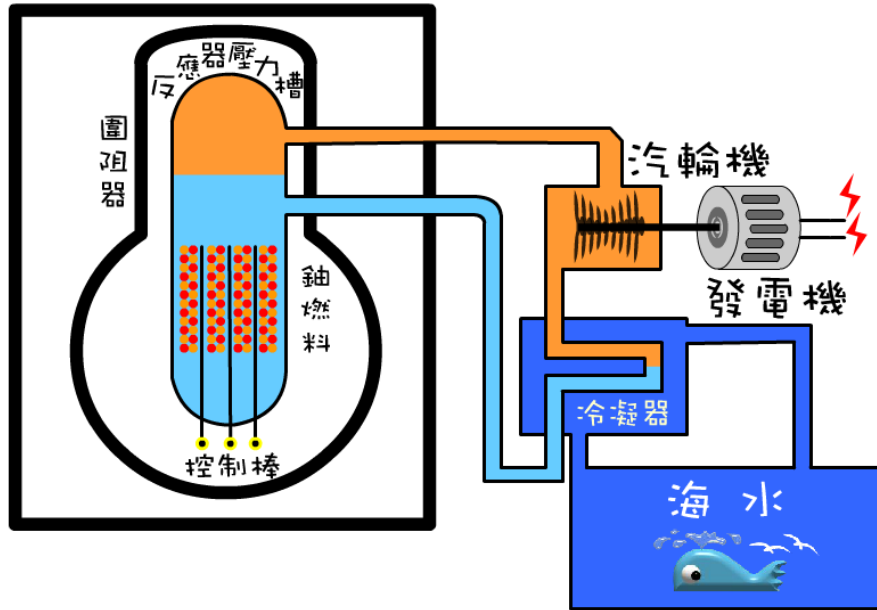
- ※ 目前世界上數量最多的是壓水式核電廠，其次是沸水式。發電原理是：用鈾製成的核燃料在反應爐內進行核分裂釋出大量熱能；高壓下的循環冷卻水把熱能帶出，在蒸汽發生器內生成蒸汽；高溫高壓的蒸汽推動汽輪機，進而推動發電機旋轉。



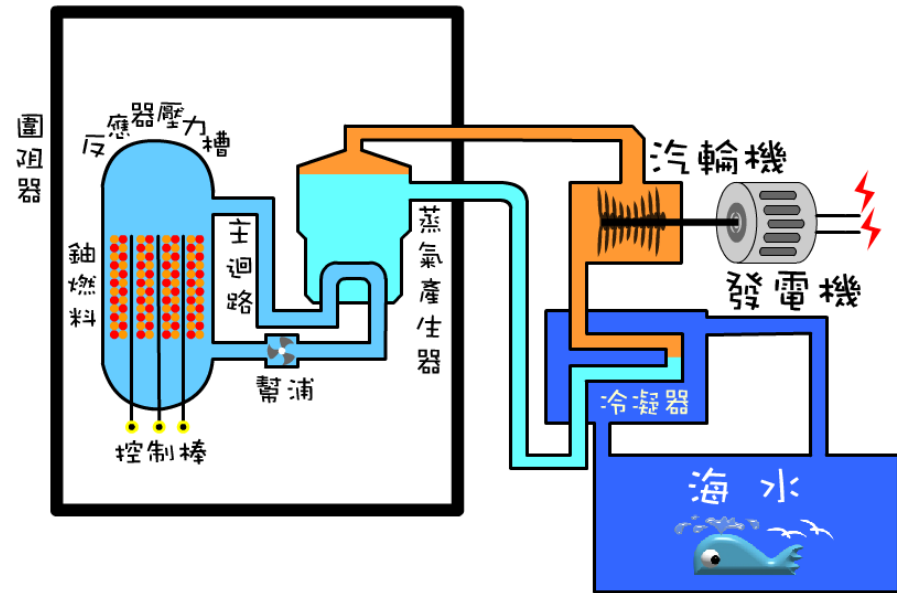
壓水式核電廠

# 輕水反應器示意圖

## 沸水式反應器



## 壓水式反應器

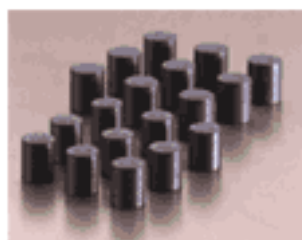


兩者最大的差別是壓水式反應器在水加熱成蒸汽的過程中採用了兩套迴路。壓水式反應器中主迴路裏冷水經過爐心加熱後只增加溫度但不變成蒸汽，熱水送至蒸汽產生器把熱量傳給次迴路的水，降溫再送回爐心；次迴路的水被加熱成蒸汽去推動汽輪機，用過的蒸汽再經海水冷卻後重複使用，這種設計可以確保汽輪機使用的蒸汽無核分裂反應所產生的放射性物質，但因系統較為複雜，運轉與維護也較沸水式反應器費事。

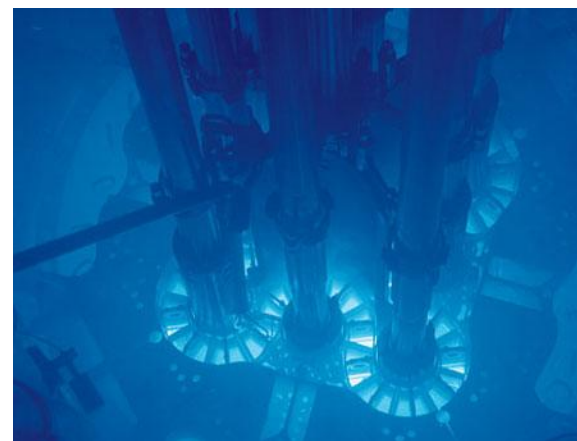
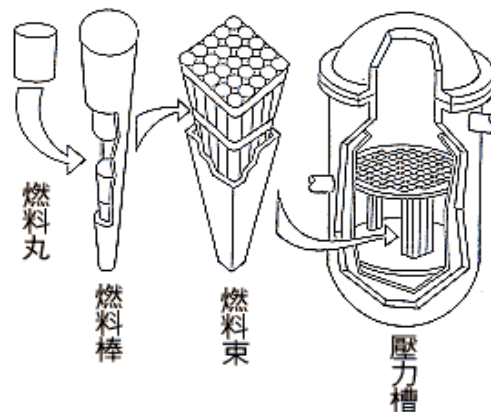


## 輕水反應器燃料棒

- ※ 核能電廠使用的鈾燃料是3%的U-235 和97%的U-238 混合比例。鈾經過濃縮，製成大約指頭大小的燃料丸。之後這些燃料丸就被裝填在中空金屬管，讓丸固定在正確位置上成為燃料棒。
- ※ 每支燃料棒都裝著大約200 顆的燃料丸，長約3.6 到4.2 公尺。只用單獨一支燃料棒並不足以提供生產大量電力所需的熱量。燃料棒要被小心地固定在一起，安置在燃料組件中，每個燃料組件大約包含240支燃料棒。燃料組件讓每支燃料棒彼此保持適當距離，當它們浸泡在反應爐心時，水可以從它們中間流過。



UO<sub>2</sub> 燃料丸





# 輕水反應器控制棒

- ※ 控制棒由反應爐心的上方進入，在爐心裡的燃料棒或燃料組件之間滑上滑下，掌控核分裂反應速率。控制棒裡有例如中子吸收材料如鎳或硼等。中子撞擊鈾-235原子誘發核分裂，而鎳和硼會吸收中子，可是不會分裂。控制棒的作用像海綿一樣，用來吸收多餘的中子，當吸收較多的中子時，連鎖反應速率就會下降。

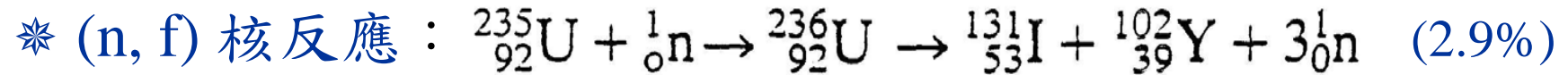


# 輕水反應器冷卻劑/緩和劑

- ※ 反應爐的第三項基本裝備就是冷卻劑/緩和劑。緩和劑用來減緩中子的速度。就像一顆球輕輕拋擲時較容易被接住，慢速移動的中子(熱中子)比較容易被核燃料(如鈾-235、鈾-239等)原子核捕捉並造成分裂。
- ※ 核燃料分裂釋出的中子必須用緩和劑減速，才能使周遭核燃料可以捕捉到足夠的中子來發生連鎖反應。輕水/重水反應器用 $H_2O/D_2O$ 作為緩和劑，重水減速效果較佳，孳生反應器即使用重水。台灣的核能電廠，冷卻劑/緩和劑就是經過處理的純水。爐心的冷卻水同時也被用來把反應爐的熱能運送到發電區。高溫可能會損害爐心，反應爐裡隨時都要有冷卻劑，才不會讓它過熱。



# 反應器燃料棒中的核分裂反應產物



自然界安定同位素：

${}_{30}\text{Zn}$ : 64-68,  ${}_{37}\text{Rb}$ : 85-87

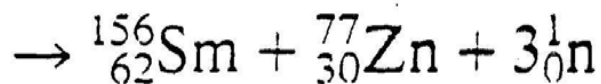
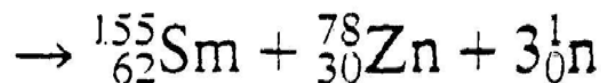
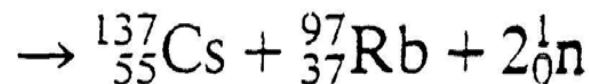
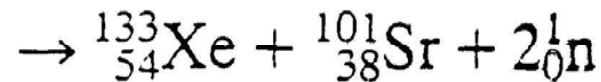
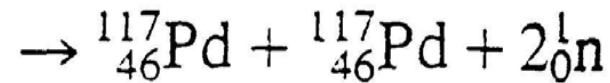
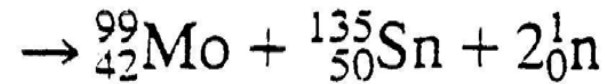
${}_{38}\text{Sr}$ : 86-88,  ${}_{39}\text{Y}$ : 89

${}_{42}\text{Mo}$ : 92-100,  ${}_{46}\text{Pd}$ : 104-110

${}_{50}\text{Sn}$ : 116-124,  ${}_{53}\text{I}$ : 127

${}_{54}\text{Xe}$ : 129-136,  ${}_{55}\text{Cs}$ : 133

${}_{62}\text{Sm}$ : 147-154



and more.....

所有核分裂產物均為中子過剩，進行 $\beta$ -decay，具放射性



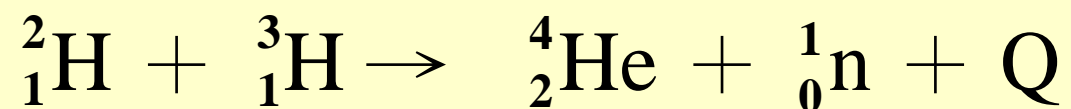
# 滋生反應器

- 鈾-235原子在吸收中子後分裂，同時釋出2~3個自由中子。自由中子(約1.5 MeV)經緩和劑減速後(0.025 eV)可引發新的分裂反應--鏈反應。但自由中子並非全部被分裂物質所吸收，部分會被反應器的結構材料、冷卻劑及各項控制元件吸收或消耗。
- 滋生反應器的設計就是儘可能利用這些中子，令其激發一些可孕材料(fertile material)成為可分裂的核燃料。可孕材料吸收中子後會轉變成可分裂材料，譬如鈾-238，吸收中子後會逐漸衰變成鈾-239，這是分裂元素可做反應器燃料，但需仔細設計核心燃料的排列與採用新的製造方法，使鏈反應剩餘的中子能用到製造燃料上。只要能做到每分裂一個核子就能製造多於一個新的可裂性核子，滋生燃料的效果就完全達到，目前可孕材料存量最豐富的就是鈾-238。



# 核融合

- 核融合可視為核分裂的逆反應，係指兩個輕元素或兩種不同輕元素的原子核，結合生成一個較重元素的原子核。核融合燃料限於輕原子核物質，如氫核、重氫核(氘)、三重氫核(氚)及鋰核等；典型核融合反應如



- 如同分裂能，融合能也可依  $E=\Delta m \cdot c^2$  來計算。如上式，每一對氘和氚原子核(5 amu)融合約釋出17.6 MeV能量。
- 二個原子核的結合首先須克服核間強大的庫倫斥力，之後賴短距核作用力誘發融合反應，因此須在極高溫度下 ( $>10^7\text{K}$ ，約為太陽內核溫度，此時物質型態為離子流，俗稱『電漿』)方能發生，故核融合亦稱為熱核反應。



# 游離輻射的應用

- Dr. Gordon Dean (Chief of AEC of U.S.) :

放射性可以用來診斷與治療疾病，改進工廠之工業生產效率，提高農作物與家畜之生產率，幫助人類瞭解其身體之生命科學與其周圍之自然科學。

- Application :

醫學、農業、工業、環保、生命科學

- 醫學應用 :

Ionizing radiation : 游離輻射的應用

Radiotracer technique in medicine : 核醫藥物應用



# 游離輻射的應用——放射示蹤劑技術

## 農業與水文應用

- 瞭解動植物新陳代謝和施肥後營養攝取過程
- 測定與瞭解地下水之水源分布、年代、流速、補充來源與流程
- 測定農藥等對環境之污染流程
- 利用碳-14的放射衰變計算史前時期古物的正確年代。



# 游離輻射的應用——分解與殺傷效應

## 農業與水文應用——輻射照射技術

- 用於防治病蟲害，抑制發芽，殺蟲、滅菌，品種改良及延長食品保存期限等，增加農作物和食物的產量，或提高農作物的經濟價值。利用輻射照射保存食物，既不會降低食物原有的天然養分，也不會有放射性殘留。



大蒜照射抑制發芽





# 游離輻射的應用

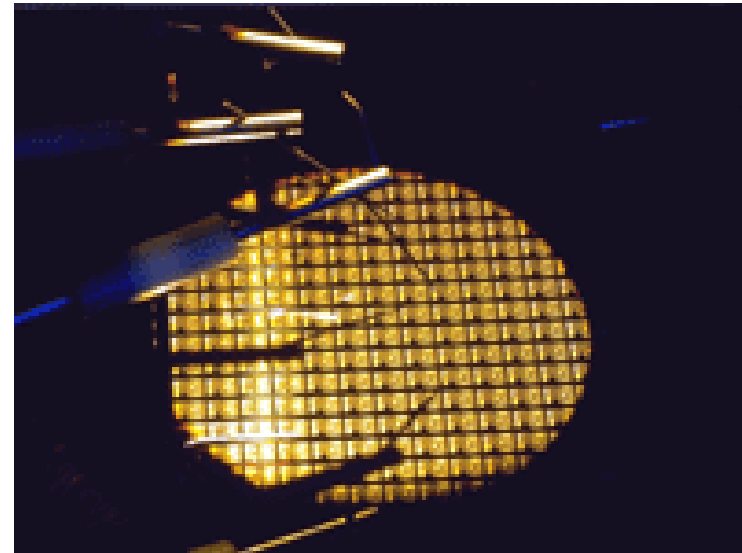
## 工業應用--放射示蹤劑技術

- 流動路徑、流速與流量測定
- 測洩漏、短路、旁路
- 測混合效率、滯留時間、通風設備效率
- 測腐蝕、機件磨耗



## 工業應用——輻射照射技術

- 高分子聚合、熟化、接枝等
- PTFE等固體廢料輻射分解
- 廢水處理污泥之輻射消毒
- 有機廢液、造紙廢水之促進分解
- 電子元件照射

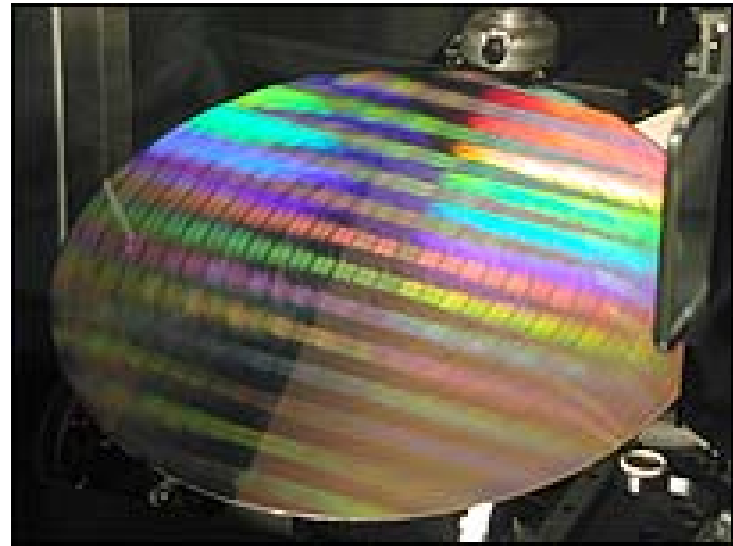


電子元件照射



## 工業應用--中子矽晶植磷技術

利用中子照射矽晶，使矽晶材料內矽的同位素轉變為磷，而形成n-型摻雜，由於中子具有良好穿透性，因此可以得到較化學摻雜方法更佳的均勻度。近年來中子矽晶植磷照射技術日益提昇，使矽晶之摻雜均勻度得到改善，進而提昇半導體產業能力。



# 游離輻射的應用--穿透效應

## 工業應用--核子計測儀技術

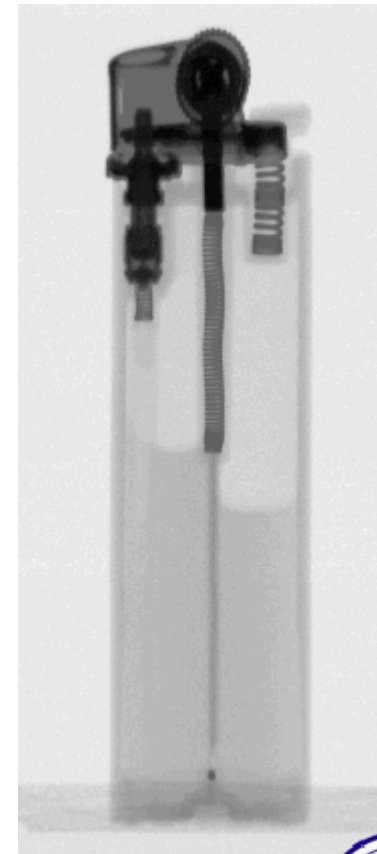
- 核子計測儀主要是基於不同物質對放射性同位素(如鈷-60、銫-137、銦-90、釷-241/鈹與鈾-252等)所放出加馬、貝他與中子放射線的吸收、穿透與散射程度的不同，以核子儀器計測放射線強度的變化，從而偵知物質之厚度、密度、均勻度、液位、界面、觸媒床高度與溼度等(只需計測儀，不需呈現影像)。



# 游離輻射的應用--穿透效應

## 工業應用--放射線照相技術

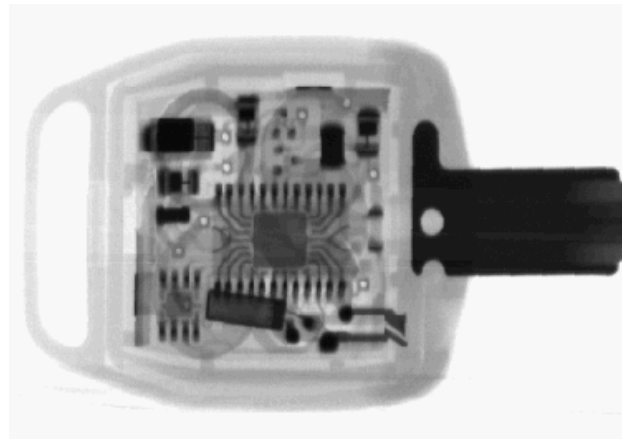
- 加馬射線、X射線或中子射束照相，都是基於放射線遇不同密度、厚度之物質被吸收而產生不同強度變化的原理，來內視物質之特性，並以影像方式呈現，一般稱之為非破壞性檢驗（NDT）
- 鈷-60：高穿透能力
- 銥-192：中等穿透能力，高靈敏度
- 中子：適於對質量輕的物體及有機物的照相



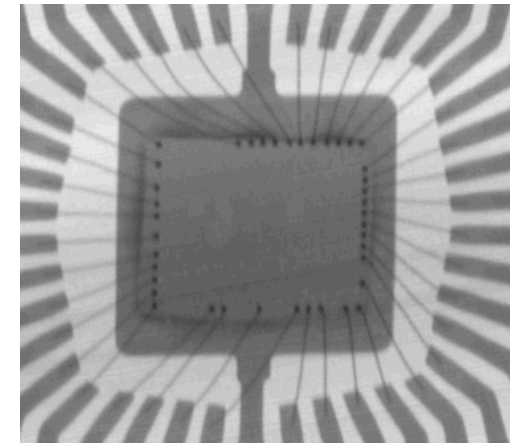
# 游離輻射的應用--穿透效應

## 工業應用--放射線照相技術

Circuit check

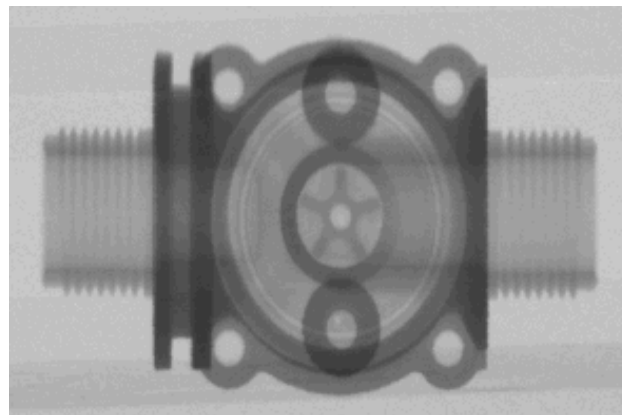


Car key of Benz

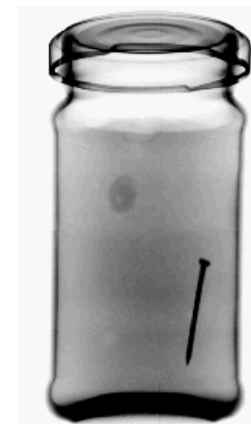


IC chip

Quality check



Gas valve



Dark liquid



# 游離輻射的應用

## 醫學應用

醫療器材消毒滅菌 (分解與殺傷效應)

生醫材料研製 (輻射對物質效應)

疾病診斷 (穿透效應)

腫瘤治療：遠距治療、近接治療、  
插種治療 (分解與殺傷效應)



# 醫療器材消毒滅菌

輻射可應用在醫學器材的消毒。由於一般的高溫消毒會損害針筒、藥膏和繃帶的品質，而輻射本身不具高熱，因此輻射消毒滅菌的應用已日趨廣泛。



輻射照射場



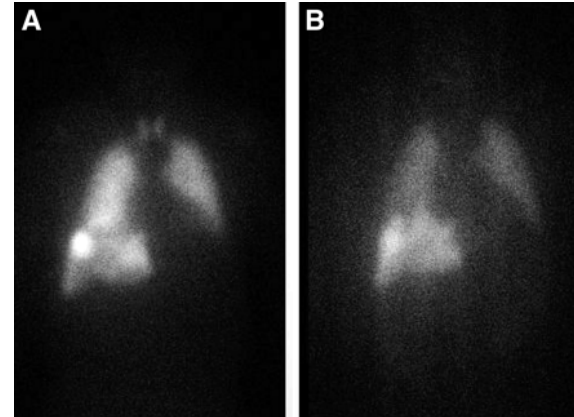
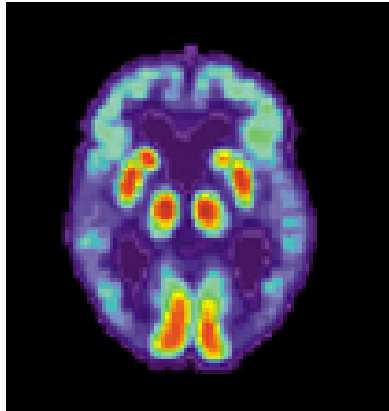
醫療器材照射滅菌



# 同位素的應用—放射性示蹤劑

## 核醫藥物體內、外診斷與治療

- 體外診斷：放射免疫分析(RIA)
- 核醫藥物診斷：探討人體生理功能、生化動態功能或組織（腫瘤）形態（SPECT、PET）
- 核醫藥物治療



核醫藥物體內、外診斷與治療部分另有課程介紹

# 疾病診斷—X-光攝影



一般攝影檢查



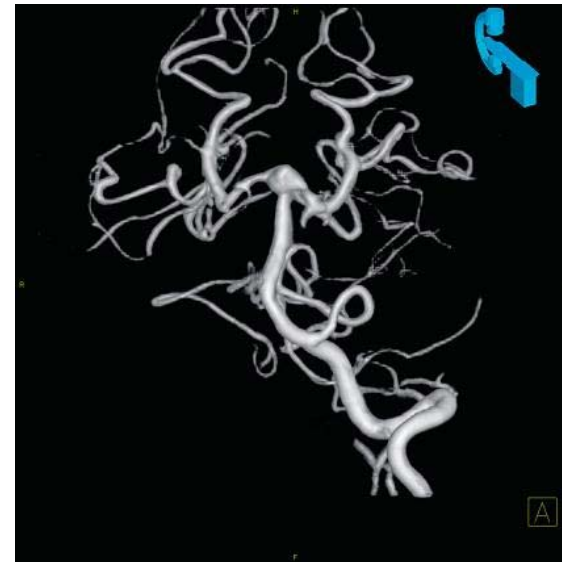
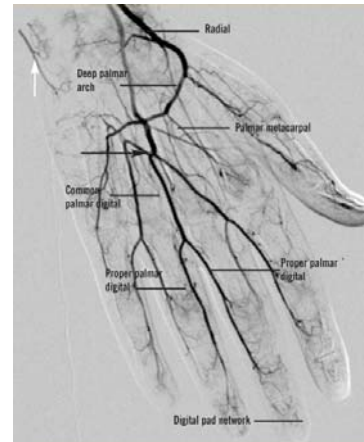
# 疾病診斷--X-光攝影

## 透視攝影檢查



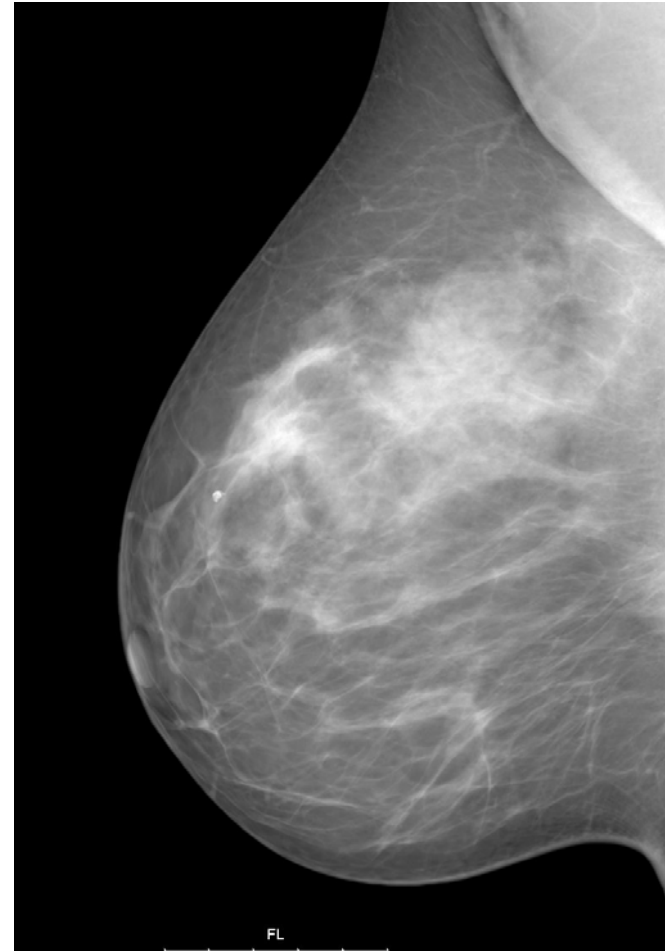
# 疾病診斷--X-光攝影

## 血管攝影



# 疾病診斷—X-光攝影

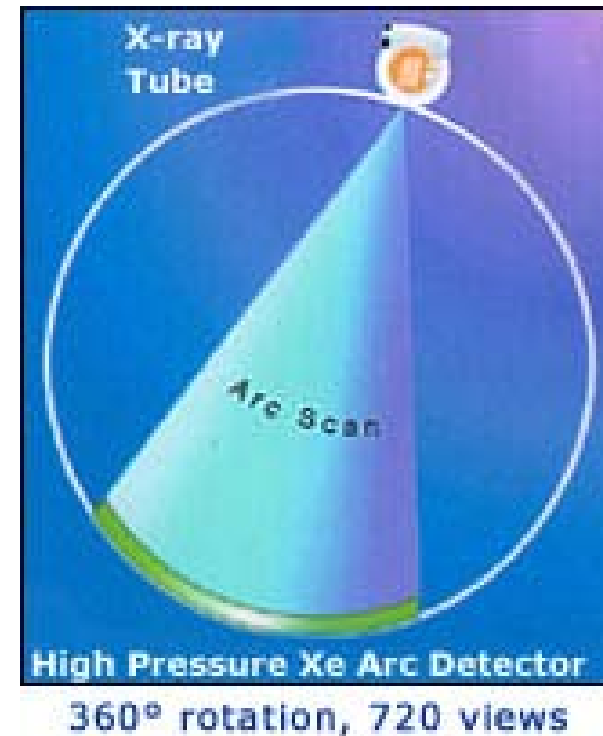
## 乳房攝影



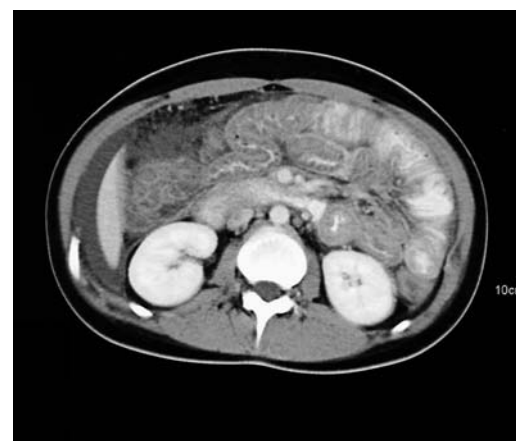
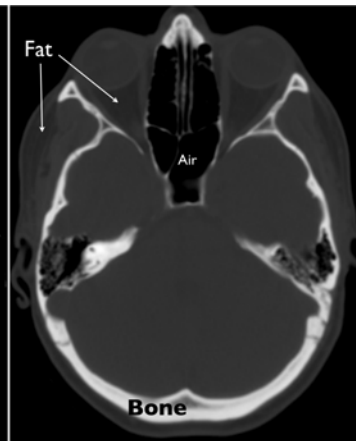
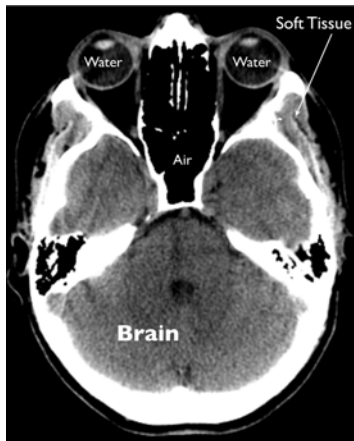
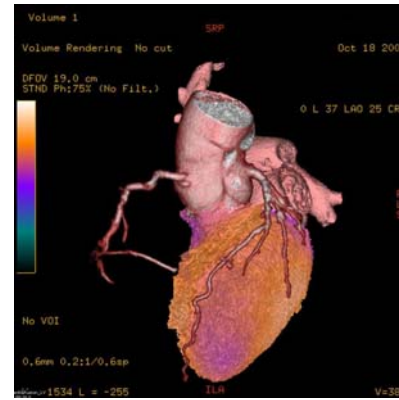
# 疾病診斷--電腦斷層攝影

## (Computed Tomography)

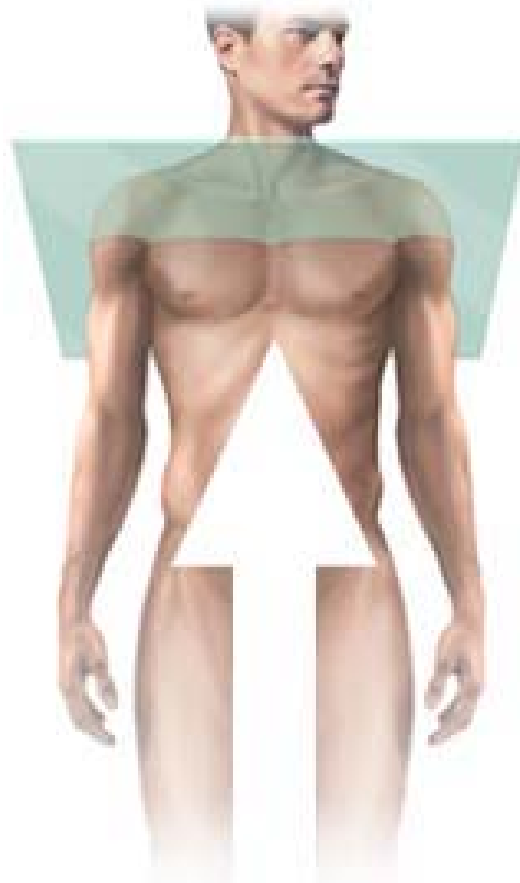
- 電腦斷層掃描攝影術是目前最被廣泛應用的影像診斷工具之一，其光感測器設計成 $360^\circ$ 的形狀。電腦斷層掃描攝影和X光機最大不同點為，X光底片為二維影像，電腦斷層掃描攝影則可提供剖面斷層的三維影像。



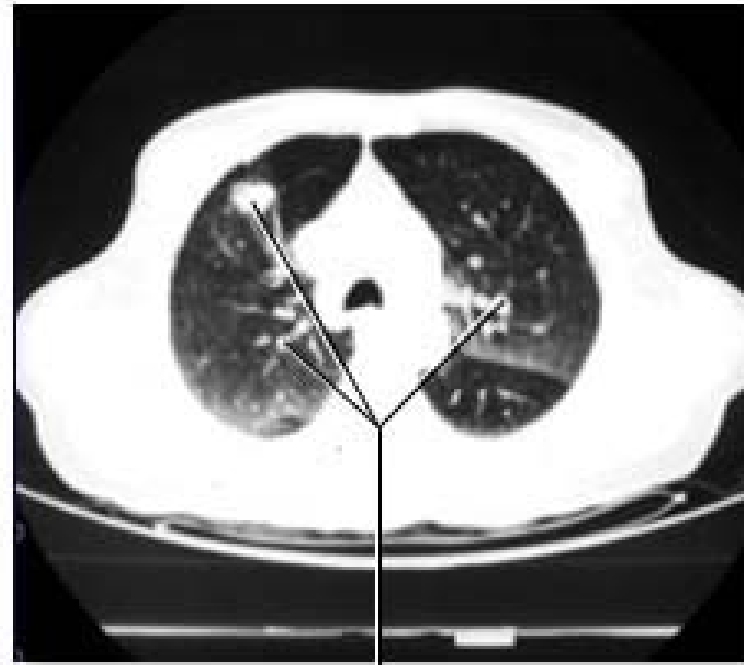
# 疾病診斷--電腦斷層攝影 (CT)



# 電腦斷層攝影 (CT)



Sectional view  
through chest  
seen from below

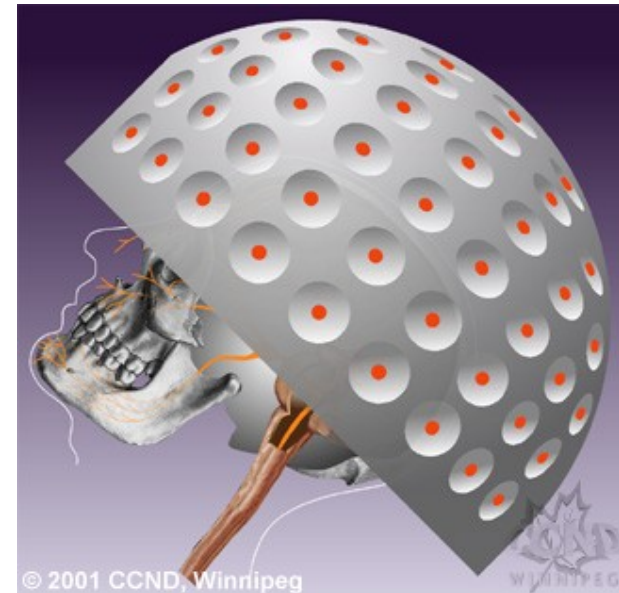


Bronchial cancer (white areas)  
in the lung (black area)



## 腫瘤治療--Gamma Knife

加馬刀為利用201顆鈷-60加馬射源，集中光束直接照射於腦內病灶予摧毀，由於其精準度很高--小於0.5 mm，有如手術刀之精準，故稱做加馬刀。

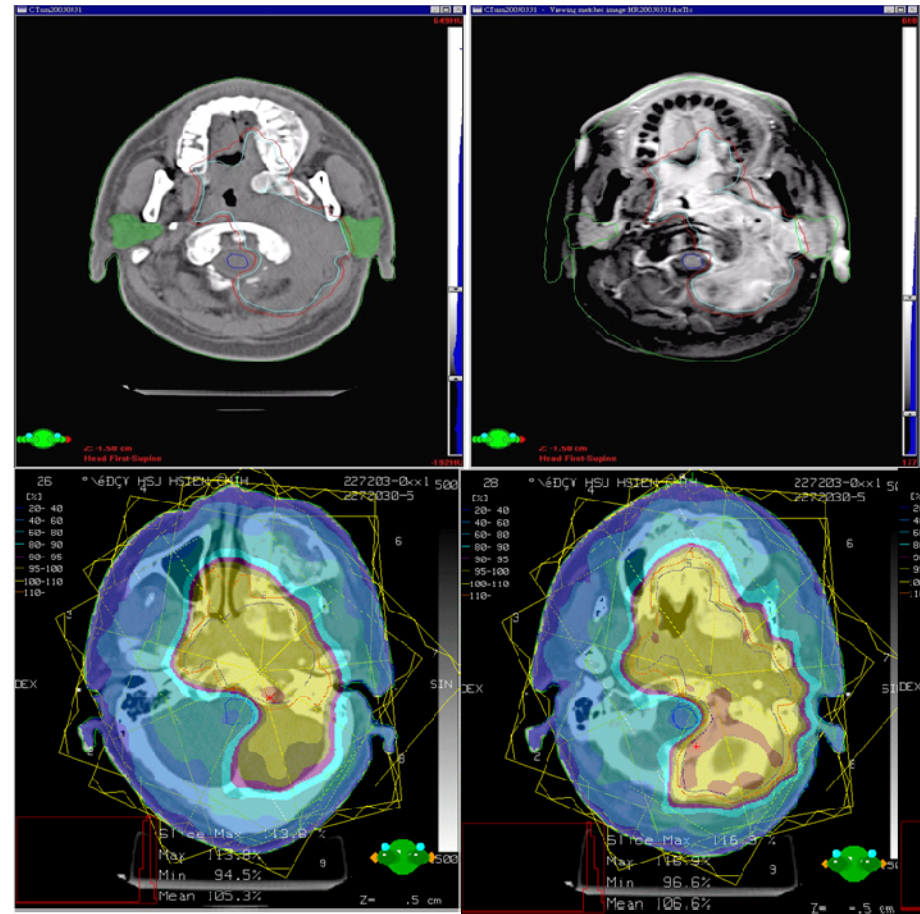
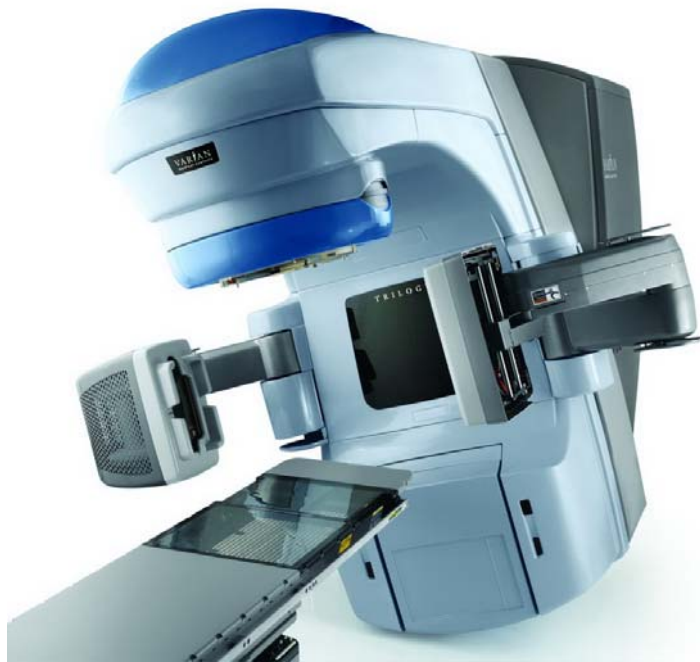


## 腫瘤治療--Cyberknife

- 利用一個重285磅的輕型直線電子加速器，能產生6MV X射線。
- Cyberknife有一個三維機械臂，並把加速器依附在機械臂上。通過計算機運算(UNIX工作台)，採用圖像引導技術獲取的低劑量三維放射圖像，由CT scan來追蹤腫瘤位置，再以正確劑量的放射線來照射『切除』腫瘤，此技術的準確率非常高。
- Cyberknife完全沒有使用框架和頭盔，解除病人的憂慮，對病人進行高水平的腫瘤放射治療。



# 腫瘤治療—直線加速器



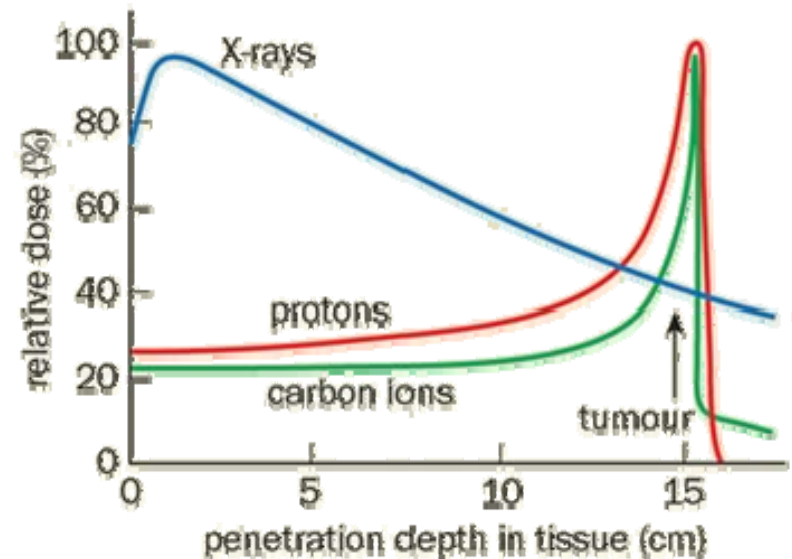
# 腫瘤治療--直線加速器



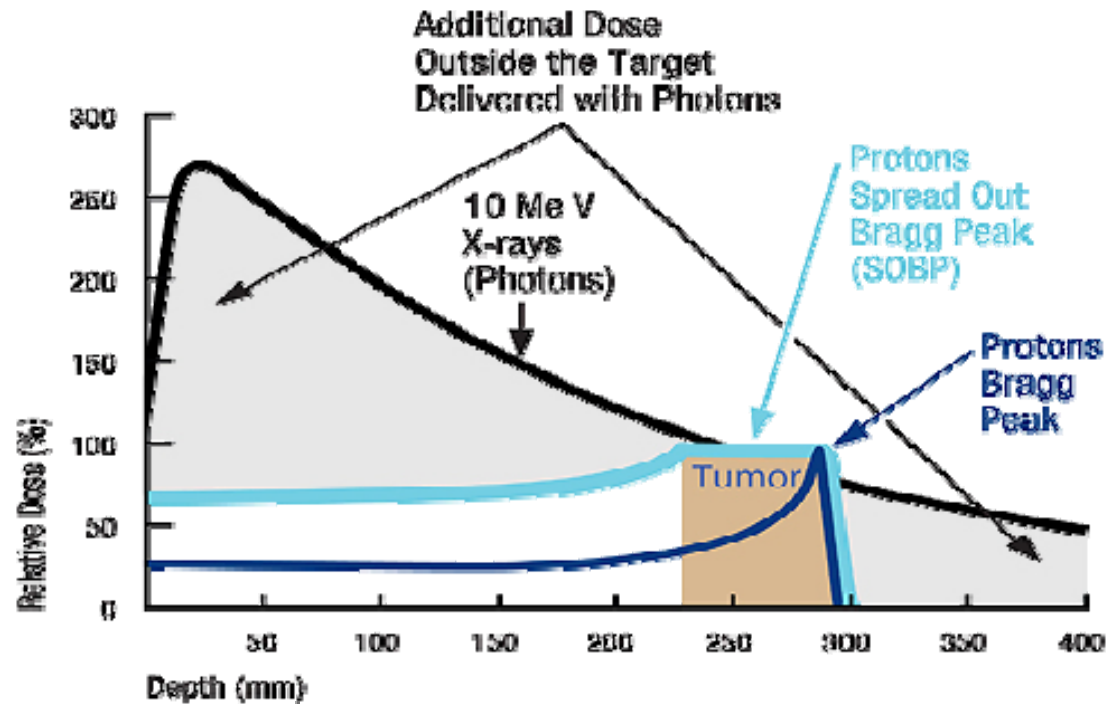
# 腫瘤治療--質子射束

- 質子射束的特性是其能量於放射軌跡中甚少釋出，大部分能量待抵達射程末端時才釋出（此為Bragg Peak的特性）。
- 以質子射束治療腫瘤，可根據腫瘤的深度，先將質子能量預先設定，使其在腫瘤處大量釋放以殺死癌細胞，但不破壞腫瘤周圍的正常組織（尤其是腫瘤後方的正常組織）。
- 質子射束的能量釋放特性(Bragg Peak)，使其在臨床使用上特別適用於某些癌症的治療。

例如在敏感組織附近的腫瘤（腦瘤，攝護腺腫瘤）、體積大的腫瘤，以及形狀很不規則的腫瘤。

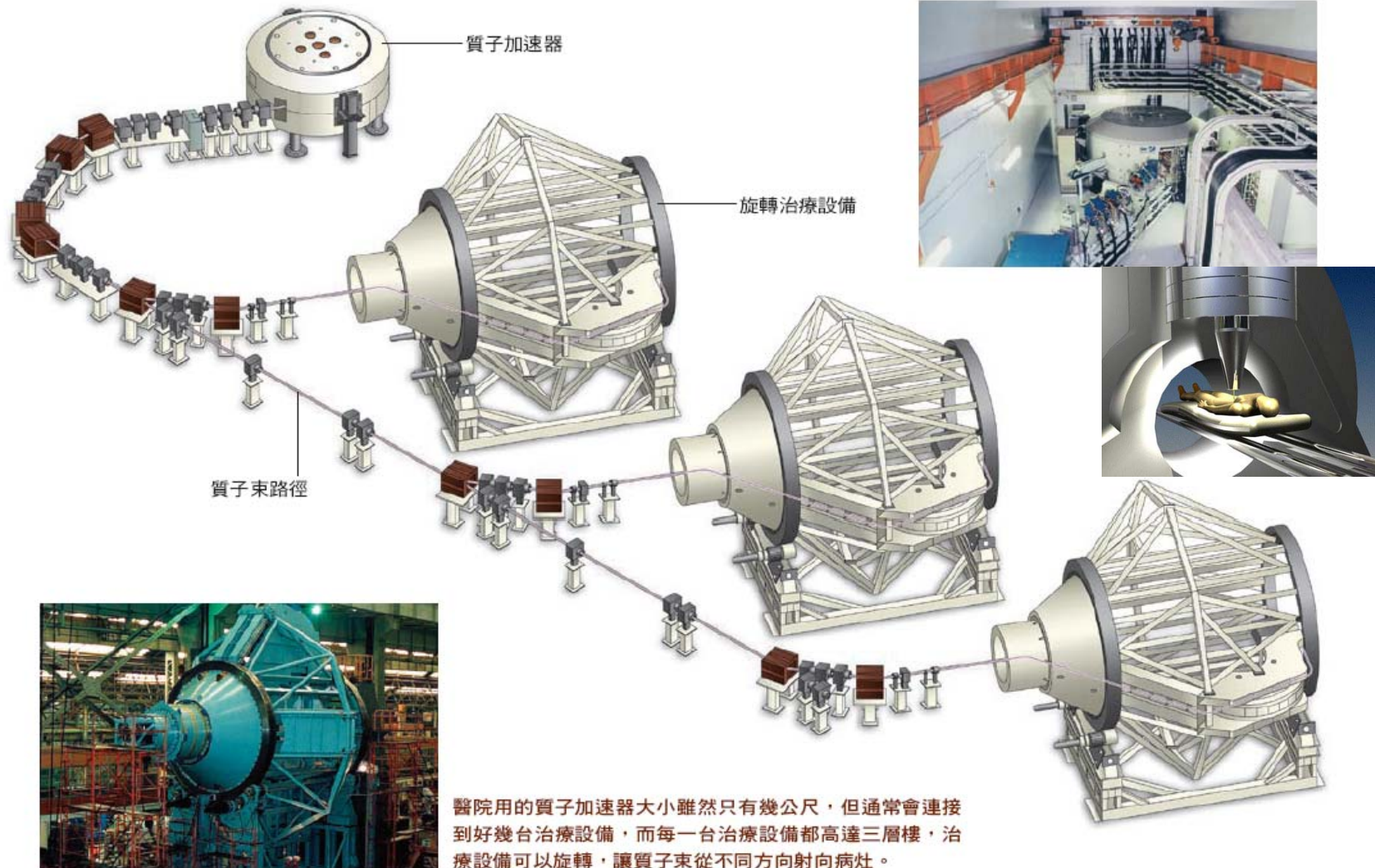


# 腫瘤治療--質子射束



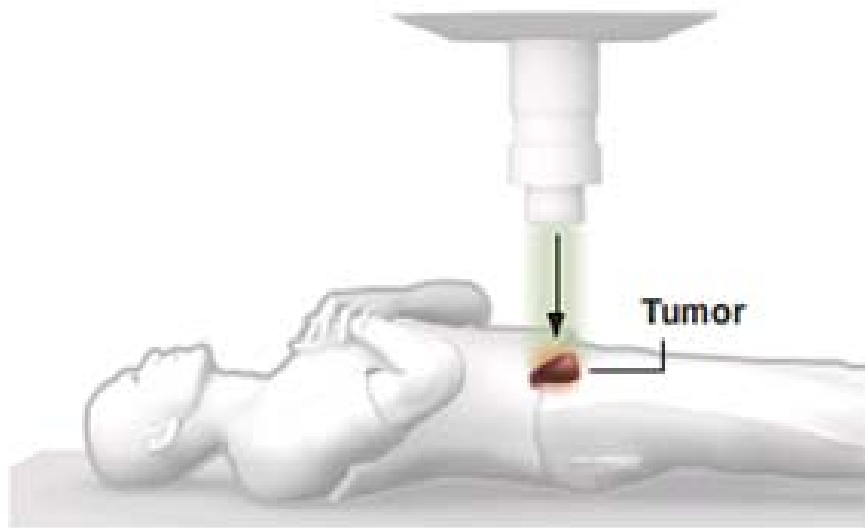
調控質子射束的能量可控制射束到達深度，確保射束於腫瘤病灶時，質子射線或重粒子射線可釋放出近100% 的能量。而腫瘤後面之正常組織，X射線還殘存60% 的能量，伽瑪射線及中子射線仍有40% 的能量，僅質子射線與重粒子射線幾無任何能量的釋放。

# 腫瘤治療--質子治療系統



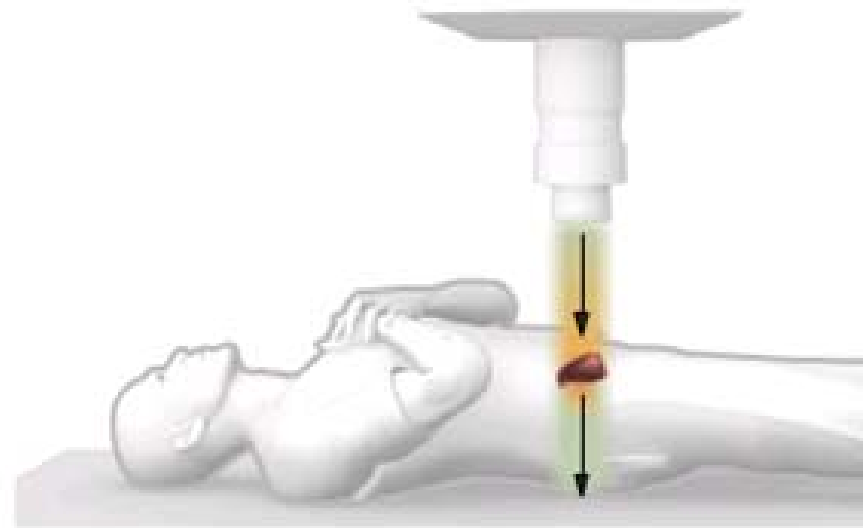
# 質子治療與傳統放射治療差異

Proton radiation therapy



By adjusting the speed of the protons, a physician can control how deep they will penetrate into the body. The protons then release their energy at the tumor and cause less damage to the surrounding tissue.

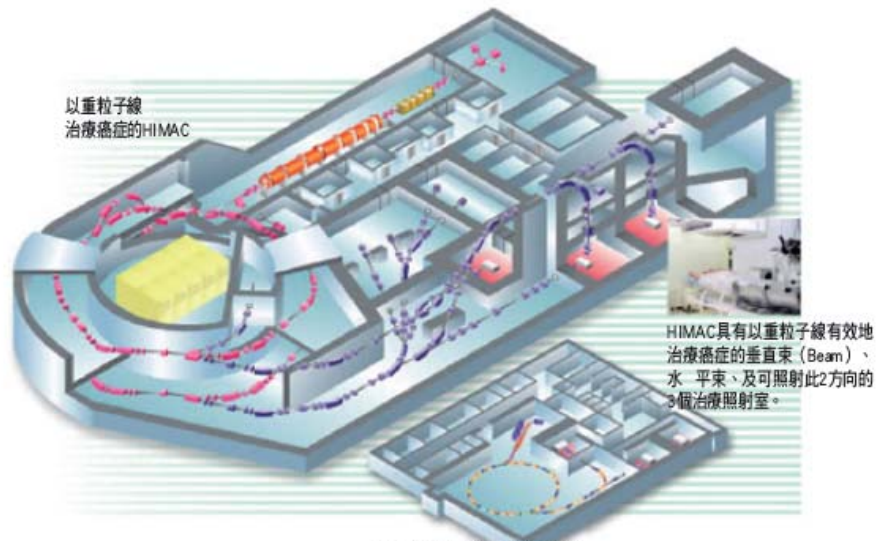
Conventional X-ray therapy



Because conventional radiation doesn't release its energy at a specified depth, as it travels through the body it can cause more damage to the tissue surrounding the tumor.



# 腫瘤治療--重離子射線



重離子射線照射可以達到理想的精準度，過去生長在難於治療部位的癌症也變成可以有效治療。在日本，近10年來重離子射線治療患者已達4000例(2008年6月)。

■小型重粒子線癌症治療裝置  
放射線醫學綜合研究所裝置小型化的研發成果，已被群馬大學重粒子線癌症治療裝置所採用，該裝置自2006年度開始興建。



# 游離輻射的應用

## 醫學應用--放射性示蹤劑技術

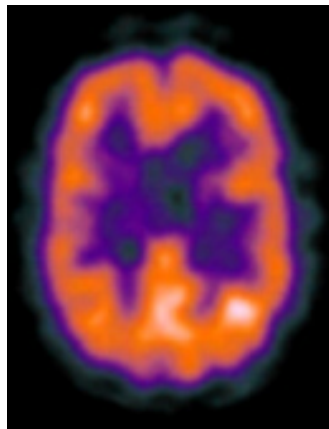
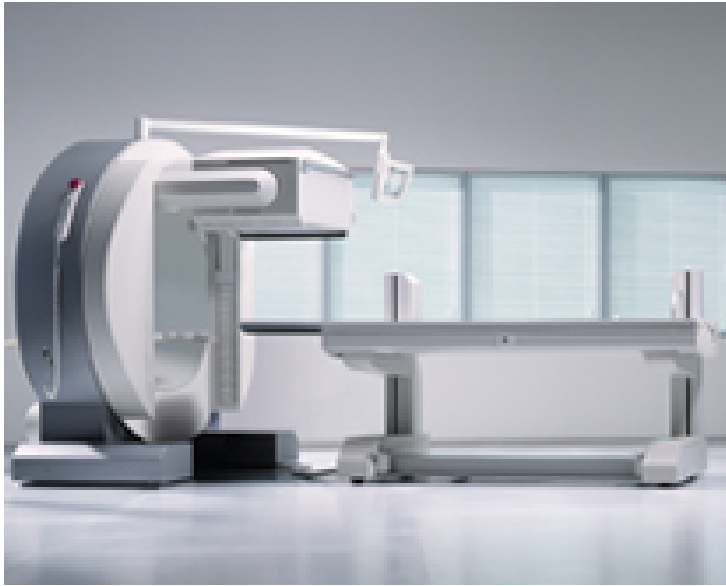
體外診斷：放射免疫分析(RIA)

核醫藥物診斷：探討人體生理功能、生化動態功能或組織(腫瘤)形態(SPECT、PET)

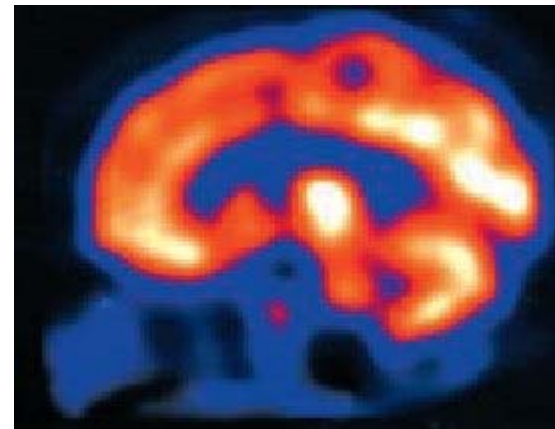
核醫藥物治療



# 醫學應用--單光子電腦斷層掃描 (SPECT)



Tc-HMPAO

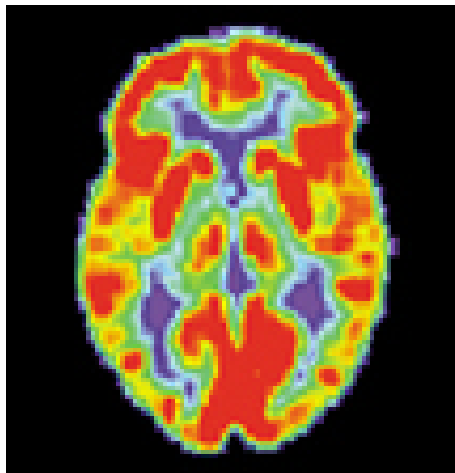
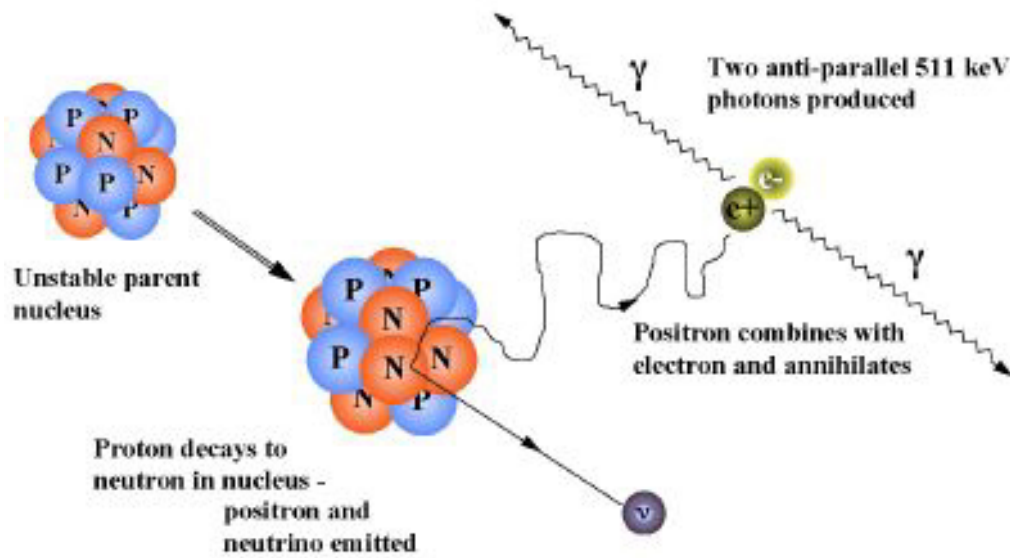


43

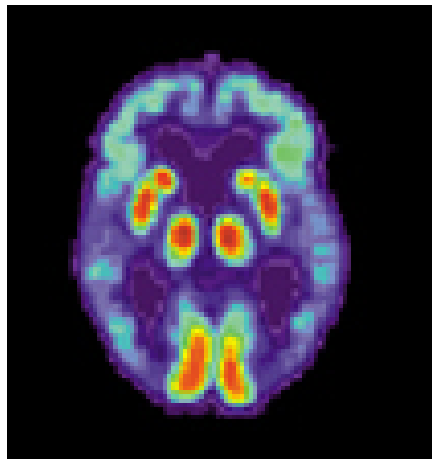
Tc-HMPAO



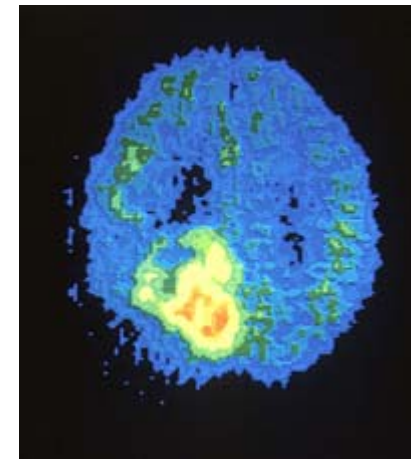
# 醫學應用--正子電腦斷層掃描 (PET)



Normal (FDG)



Alzheimer disease (FDOPA)



Brain tumor (Ac)



# 醫學應用——腫瘤核醫治療

## 碘-131

- 碘-131為目前用於治療有功能性甲狀腺癌的放射性核種。碘離子進入人體後由主動性吸收(active transport)進入甲狀腺，有機化(organification)後與麩氨酸(tyrosine)結合而成甲狀腺素(thyroxine)，再存於甲狀腺濾泡內之甲狀腺球蛋白中。惡性甲狀腺癌細胞的DNA因**β**粒子的照射而損壞，使細胞不能再行繁殖而死亡，因而達到治療之效果。



# 醫學應用——腫瘤核醫治療

## 鍶-89

- Sr-89治療特別針對在骨骼組織中的癌細胞，包括已知和未知的部位。這種藥物不單可以解除或減輕癌細胞入侵骨骼所造成的痛楚，而且能夠遏止癌細胞侵蝕正常骨骼的進度。在已接受過治療的病人中，超過八成感受到不同程度的止痛功效。其中大部份感到痛楚明顯減輕，甚至完全沒有骨痛。這種腫瘤治療對人體的副作用極少。



## 醫學應用--腫瘤核醫治療(微球體)

- ※ 於1980在西澳洲的佩斯市問世。至今已經有許多患者接受了使用這一技術的商業規模治療，與此同時該技術也正在全球（澳洲、美國、歐洲、新加坡、香港、印度和台灣）進行臨床試驗。SIRT技術獲得了澳洲TGA認證、美國食品和藥物管理局（FDA）的PMA許可，獲得BSI的歐洲CE認證。
- ※ 使用數百萬個微小樹脂球(resin microspheres)，樹脂球中含叫做鈮-90放射性元素(Yttrium-90)
  - ◆ 約32微米
  - ◆ 以導管導入肝部，通過導管注入微球體。將携有放射性物質Yttrium-90之微球栓塞於提供腫瘤血液的小血管，然後釋放放射線
  - ◆ 具選擇性照射腫瘤
  - ◆ 適用於原發性肝癌(HCC)及轉移性肝癌
  - ◆ 可改善患者生活質量，提高存活率

