



財團法人 中華民國輻射防護協會

# 輻射防護簡訊

第 140 期

發行人  
鄧希平

主編  
張似璵

編輯委員  
尹學禮 江祥輝  
劉代欽 蔡惠予 魯經邦

執行編輯  
李孝華

出版單位  
財團法人中華民國輻射防護協會

地址  
30017 新竹市  
光復路二段 295 號 15 樓之 1

03-5722224 電話  
03-5722521 傳真  
01486683 統編

rpa.newsletter@gmail.com 電郵  
[www.rpa.org.tw](http://www.rpa.org.tw) 網站

行政院新聞局 出版事業登記證  
局版北市誌字 第柒伍零號

協會報導

第 3 頁

談兒童的游離輻射效應

20 歲以下的輻射防護適合採取年齡分群的方式，考慮其主要的曝露途徑，並關注氫氣的效應，並研究各器官受輻射曝露的危險度。

測驗與訓練班公告

第 8 頁

公告本會各項訓練班開課時間。

新聞廣場

第 10 頁

各項證照考試資訊、國內產官學界最新消息、以及近日全球輻防新聞。

看郵票學原子科學發展史

第 13 頁

X 光繞射與晶體學

這些多彩多姿的迷你藝術品，描繪出偉大的科學家，他們賴以成名的分子發現，以及成就其發現自行研發出來的各式儀器設備。

輻說 – 廖彥朋專欄

第 16 頁

那兩個二戰終結者

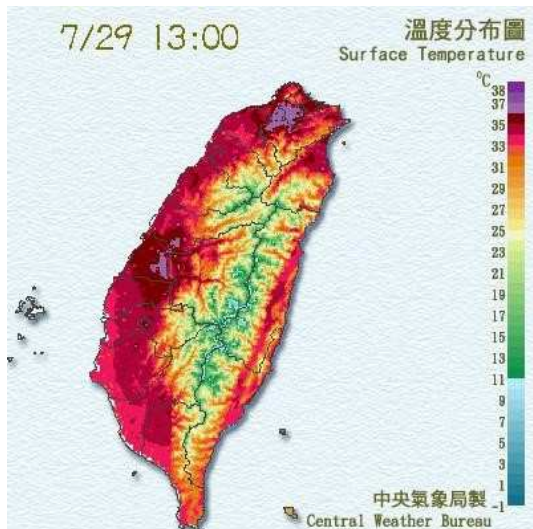
原爆的犧牲者、倖存者們帶給後世龐大的輻射生物效應案例，是十九世紀末的輻射科學發展以來最重要的資料之一。輻射帶給現代人許多的便利，唯有了解輻射才能與之共舞而無懼。

專題報導

第 19 頁

國立清華大學 硼中子捕獲治療簡介

國立清華大學與台北榮總研究團隊，利用清華水池式反應器進行硼中子捕獲治療癌症，開啟了台灣標靶重粒子治療的新頁，是台灣癌病治療史的里程碑。



## 熱浪來襲

主編 張如琛

七月下旬持續的高溫，造成台灣用電量屢創新高，這股熱浪考驗著我國的供電能力。在此酷暑中，台電公司於 7 月 7 日奉經濟部指示撤回核一廠延役申請案，表現了政府「2025 非核家園」的決心，但也帶來如何在發電與減少溫室氣體排放之間取得平衡的難題。面對極端氣候的挑戰，需要全民共同努力，期盼未來我國不致面臨缺電危機。

「輻說 - 廖彥朋專欄」於本期開始和大家見面。第一砲打出了「那兩個二戰終結者」。廣島與長崎原爆犧牲者與倖存者，留給我們珍貴的輻射健康效應資料，讓我們在享受輻射應用所帶來的便利時，同時擁有完善的輻射防護。

本期**輻射的神奇醫術**系列專題報導，介紹清華大學與台北榮總研究團隊，利用清華水池式反應器所進行的硼中子捕獲治療癌症。這個方法結合了重粒子與標靶治療兩者的特性，由 2010 年開始針對復發頭頸癌進行臨床試驗，結果十分令人振奮，目前正進行第二期的臨床試驗，其結果值得期待。

綜合近三期簡訊的專題報導，本協會與美洲保健物理學會臺灣總會將於今年 11 月 2 日共同主辦「2016 輻防新知研討會：台灣粒子放射治療腫瘤的新發展」，歡迎大家參加。

歡迎賜稿，稿件請寄：

輻防協會編輯組

300 新竹市光復路二段 295 號

15 樓之 1 或

傳真 (03)572-2521 或

電郵 [rpa.newsletter@gmail.com](mailto:rpa.newsletter@gmail.com)

來稿一經刊登，略奉薄酬；

政令宣導文章，恕無稿酬。

## 談兒童的游離輻射效應

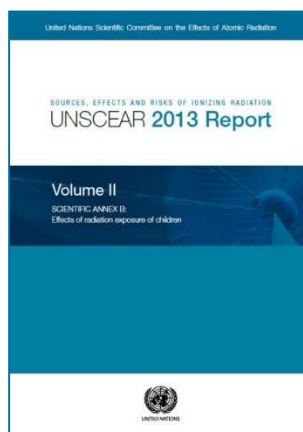


20 歲以下的輻射防護適合採取年齡分群的方式，考慮其主要的曝露途徑，並關注氫氣的效應，研究各器官受輻射曝露的危險度，這些都是未來強化輻射防護可關注的方向。

討論低劑量的輻射防護，通常參考國際放射防護委員會(ICRP)報告所提供的數據資料，該資料利用高劑量的數據推估出低劑量時的危險度。根據該報告提供的數據，可看出孩童在游離輻射致癌方面，屬於危險度較高的群體。因此，筆者一直有個想要了解兒童的游離輻射效應危險度的想法。

有關兒童受游離輻射曝露的資料並不多，最近看了聯合國原子輻射效應科學委員會(UNSCEAR) 2013 年報告第二冊，其內容主要談游離輻射對兒童曝露的效應 (Effects of radiation exposure to children)，個人有些心得與想法，趁此機會與讀者們分享。

兒童一直是民眾輻射防護中受到關注的對象。各國對於輻射作業均有年齡上的規範，我國一般要年滿 18 歲才能從事輻射作業工作，因此在考



作者

劉代欽

輻射防護協會 訓練組組長

表一、低劑量率輻射曝露後機率效應的危害標稱危險度

| 曝露對象 | 癌症      |          | 遺傳效應    |          | 合計      |          |
|------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
|      | ICRP-60 | ICRP-103 | ICRP-60 | ICRP-103 | ICRP-60 | ICRP-103 |
| 全體人口 | 6.0     | 5.5      | 1.3     | 0.2      | 7.3     | 5.7      |
| 成年人  | 4.8     | 4.1      | 0.8     | 0.1      | 5.6     | 4.2      |

單位： $10^{-5} \text{ mSv}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$

量輻射職業安全上，從成人的角度出發是合理的，而成人的輻射防護也是大家比較熟悉的。兒童的輻射效應危險度比成年人高是普遍的認知，比較國際放射防護委員會 ICRP-103 號與 ICRP-60 號報告中成年人與全體人口的的低劑量率輻射曝露後機率效應的危害標稱危險度(表一)，可以看出其中的差異。全體人口的危險度比成年人的數值高，顯示出兒童有比較高的危險度。游離輻射對人的實際曝露的資料，本就比實驗室選用動物進行實驗所得到的資料難得，這當中兒童的受曝資料更是稀少，所以 UNSCEAR 2013 年報告中的內容很值得關心兒童輻射防護的人員參考，不過在本文僅節錄部分的內容，如需完整的內容還請上網搜尋下載。

報告序言指明 “Scientific findings on effects of radiation exposure of children”，強調了 “Scientific findings” - 科學上的發現。輻射生物效應的研究是科學性的，但是輻射防護的設計對象是人時，就有了對專業研究解讀的理性與感性溫情判斷的拉鋸。這現象在我國是很普遍的，而這也是輻射防護在民眾溝通上的困難。此報告整理了過去的研究資料，從科學的角度來探討，希望透過真實且嚴謹的態度來呈現，提供關心輻射防護議題的人參考。

從過去所累積游離輻射的效應資料得知，對輻射傷害較敏感的對象有胎兒、兒童、治療中的病人以及本身有 DNA 不正常修復情況者等。這當中有關兒童效應的部分，近百年來長期受到關注。概略

來說孩童的游離輻射危險度約比成年人高 2~3 倍，但是所有的輻射效應都是這樣嗎？有沒有某些輻射效應不是這樣，甚至有些效應兒童比成年人有更高的抗性呢？造成這些情況的原因為何？

對於兒童曝露，這份報告中考慮了許多因素，包括了重要的輻射曝露源以及這些輻射源的兒童受曝露程度；受曝露時成人與兒童在劑量上的差異；成人與孩童對游離輻射效應敏感度的不同等。

UNSCEAR 報告中所謂的「兒童」，其年齡為 20 歲以下，從生理發育的角度來看，包括嬰幼兒、孩童與青少年，不過報告中有些研究報告的對象則選擇 16 歲以下的資料。數據的來源包括生活在高背景輻射地區、意外事故下孩童遭受曝露(此部分極少)、兒童醫療(此部份曝露資料掌握度最高)，廣島長崎原爆倖存者、過去核武試爆與大量落塵區域中生活的兒童、核設施周圍區域的居民等。研究人員在追蹤孩童受曝後的效應所面臨最大的挑戰之一是：兒童時期受到曝露的效應，可能要到成人階段(也就是數十年後)才顯現出來。相關流行病學調查必須建立更長時間甚至終身的追蹤資料。

### 兒童受曝露的主要輻射源

**自然背景：**是兒童曝露最主要的輻射源，主要為宇宙射線，在同環境中兒童所受的曝露劑量與成人相同。另一為地表土壤輻射，這與土壤中含放射性核

種類別與含量有關，土壤中放射性核種的狀況也連帶影響了飲食中放射性核種的含量，所以此部分對不同的年齡所致劑量會有些許的差異。

**醫療曝露：**特別是介入性透視檢查(例如心血管 x 光攝影)造成孩童的心臟，眼球與腦接受較高的劑量。不過，一般而言孩童甚少進行心臟與癌症的核醫診斷與治療。有一點值得注意的是，兒童在醫療過程中頭部受曝露所佔的比例逐年增高，兒童時期大腦的快速發育增加了其輻射效應的危險度。

**核子武器：**目前的最大宗資料來源是原爆倖存者。廣島長崎原爆倖存者 86,611 人中，0~9 歲 17,833 人，10~19 歲 17,563 人，提供急性體外曝露的資料。

**核武試爆落塵：**蒐集了包括 Marshall 群島放射性落塵區孩童的資料，哈薩克 Semipalatinsk 核武試爆場順風處 4000 位兒童的調查資料，美國 Nevada 核武試爆場順風區域居民白血病的調查資料。

**核電廠事故：**車諾比事故時，白俄羅斯、烏克蘭與蘇聯強迫遷移了 114,511 人，0~6 歲 11,931 人，7~14 歲有 13,120 人，15~17 歲 5,815 人。另有 600 萬人生活在汙染區域(土壤中銫-137 的濃度 >37,000 Bq/m<sup>2</sup>)沒有遷移，可惜的是這部分沒有年齡分布的資料。日本福島事故，0~14 歲佔曝露人口的 13%。特別值得注意的是生活在放射汙染區域的嬰幼兒，其因為爬行而吃進泥土的量，根據評估大約每天 0.02 g~0.1 g。

## 兒童的生理發育

評估輻射劑量時生物的質量與幾何尺寸是重要的因子，兒童成長的過程重量與尺寸的生長變化與不同年齡階段有關，而且在不同的成長階段，各組織器官對游離輻射的敏感度與成人也不同，因此報告中針對兒童成長過程，調查其在不同年齡階段器官生長發育的情況。另外特別兒童研究攝入放射

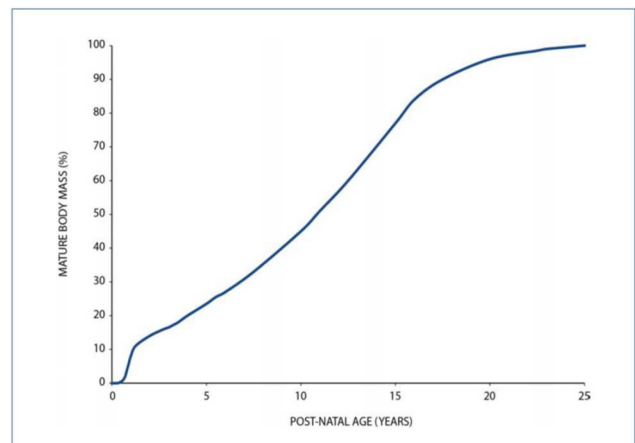


圖 1 成長期間體重與 25 歲體重的比值

圖片來源：UNSCEAR 2013 年報告第二冊

性核種造成體內曝露的劑量轉換因子(Sv/Bq)。動物研究顯示嬰幼兒的轉換因子比成年者高，兒童飲食習慣的特殊性也應加以考慮。

## 劑量觀點-曝露的差異

**體外曝露：**因為孩童的個體較小，器官具集中性，所以體外曝露時，孩童器官受到的曝露值會比成人高一些，孩童身高比較矮，也造成地表曝露會高一些。嬰幼兒的體外曝露約比成人高 1.4 倍，孩童約比成人高 1.2 倍，上述數值對於銫核種放射性落塵區域(車諾比與福島)生活的孩童特別重要。總括來說，生活在相同的輻射背景下，孩童的曝露約為成人的 2~3 倍。醫療曝露的情況也類似，所以目前採用調整參數的方式以降低孩童所接受的曝露。

**體內曝露：**考慮放射性核種、攝入量、器官以及生化代謝參數，某些放射性核種的嬰幼兒劑量轉換因子會比成人高約 10 倍。一般情況下，孩童攝入放射性核種的量比成年人少，但由於嬰幼兒食物類型的單一性，因此關注某類食物(例如牛奶)中的放射性核種活度濃度是必要的。以下是幾個與孩童體內曝露有重要關聯性的核種：核電廠事故的碘-131，如果攝入相同的活度，嬰幼兒甲狀腺劑量比成人高約 9 倍。在相同的空氣濃度下，因為嬰幼兒呼吸量

少，劑量約為成人的 2 倍，但是經由食物攝取，碘-131 透過牛奶則對嬰幼兒造成的劑量可比成年人高 20 倍。銻-137 則因為小孩的代謝速度比成年人快，與其他因素相抵，成人與孩童在相同攝入量時所接受的劑量沒明顯不同，差異不超過 2 倍。銻-90 則是核武試爆落塵的重要核種，富含於牛奶並具有趨骨的特性，不論是食入或吸入，由於孩童的腸吸收率高(1 歲以下 0.6，1 歲以上 0.3)，且孩童的骨骼持續發育中，所以其劑量轉換因子較高。

## 孩童與成人輻射致癌症的差異

### ● 惡性腫瘤

本報告主要整理游離輻射致惡性腫瘤的危險度，針對不同的組織器官兒童與成人的差異加以比較，分為兒童的危險度高、兒童與成人差不多、兒童較不敏感、以及目前資料不足所以無法下定論等類別。至於評估模式，則有相對危險度模式(Excess Relative Risk, ERR) 與絕對危險度模式(Excess Absolute Risk, EAR)。

以 ERR 模式與 EAR 模式來評估曝露後的追蹤研究，若採計 25 年的結果，EAR 模式顯示出孩童的危險度比成人低，但若是考慮終身追蹤，孩童受到輻射曝露的實體癌 EAR 比成年人高，至於 ERR 模式則都得到孩童的比成年人高的結果。流行病學調查研究顯示，比較嬰幼兒受曝露與 40 歲以上受曝露，終身評估結果顯示嬰幼兒在肺癌，大腸癌，膀胱癌，

前列腺癌約高 2.5~3 倍。雖然我們提到孩童比成人的輻射致癌敏感度高，但是“兒童癌發展的敏感度”是非常複雜的過程，若不考慮惡性程度，約有 25% 的癌症病例，孩童是比成人敏感的，包括白血病(血癌)、甲狀腺癌、皮膚癌、乳癌、腦癌等。

以下整理各種癌症的差異：

**白血病：**除了慢性淋巴白血病外，其他形式白血病可因游離輻射引起，潛伏期甚至短至 2 年。孩童的危險度比成人高 3~4 倍。

**腦瘤與中樞神經瘤：**神經膠質瘤(glioma)，5 歲前的曝露危險度最高，20 歲後大幅度降低。孩童曝露後 20 年內為高危險期。

**甲狀腺癌：**孩童甲狀腺受輻射曝露所致傷害的敏感度比成年人高是確定的，不論是 ERR 或是 EAR 模式都顯示此結果。數據來源有孩童頭頸部放射治療、車諾比以及原爆倖存者。輻射引起甲狀腺癌的危險度在成人的部分實在是太低了，無法取得量化的數據(日本在福島核事故時，事故區的老年人並不給予碘片)。

**乳癌(乳腺癌)：**40 歲以後輻射致乳癌的危險度非常低，至於孩童則比成人的敏感度高 3~5 倍(視採用的評估模式而定)，孩童最應該注意的是青春期時乳腺受到曝露。

**肺癌：**低 LET 輻射與氡氣都有致肺癌危險。原爆倖存者資料顯示孩童危險度比成人危險度低，抽菸的研究也顯示相同的關聯，礦工受氡氣曝露的研究也有相同的結果，但是上述的發現與 BEIR 7 的結果不同，BEIR 7 的數據顯示孩童比 40 歲以上才接受曝露者敏感 3 倍。

**食道癌：**資料不足，難以判斷。

**胃癌：**以 EAR 模式評估，成人與孩童危險度差異不大；ERR 模式則顯示孩童比成人有較高的危險度。

### 小辭典

**相對危險度模式(ERR)：**假設輻射致惡性腫瘤的危險度與自然癌症發生率有關，因此與年齡、性別等等參數有關，此模式適合用於因果關係與趨勢潛能的指標。

**絕對危險度模式(EAR)：**假設輻射致惡性腫瘤的危險度與自然癌症發生率無關，只需考慮輻射曝露後的發病數與自然癌症發病數的差值。

**大腸癌：**顯示出不同年齡受曝露的危險度有不確定性的例子，從原爆倖存者資料追蹤，10 歲前曝露者在其 40 歲前的 ERR 模式評估確實發現危險度高很多，但是 40 歲後，10 歲前曝露與 30 歲前曝露的 ERR 模式評估卻得到危險度相同的結果。

**直腸癌：**輻射敏感度低，受曝露年齡不同的影響小。

**腎臟癌與膀胱癌：**輻射敏感度低，受曝露年齡不同的影響小。

**前列腺癌：**沒有流行病學調查資料顯示輻射曝露與前列腺癌有關，BEIR 7 的評估結果則是孩童的敏感度比成人高 2.7 倍。

**卵巢癌，子宮癌：**除了原爆倖存者外，沒有其他的流行病學調查資料，而原爆倖存者則顯示與年齡無關。

**皮膚癌：**非屬黑色素細胞瘤(Non-melanoma)的皮膚癌與輻射曝露有關，黑色素細胞瘤(Melanoma)則與輻射曝露無關。輻射曝露致非屬黑色素細胞瘤的皮膚癌與年齡有關，孩童高約 2~5 倍。

**肝癌：**肝癌與輻射曝露有關，但與受曝露的年齡無關。

**胰臟癌：**無足夠資料來判定。

**骨癌與骨肉瘤：**與年齡無關，骨肉瘤與輻射曝露有關。

## 結論

從游離輻射曝露致各組織器官癌症的結果比較，白血病、甲狀腺癌、非屬黑色素瘤的皮膚癌、乳腺癌以及腦癌等兒童危險度確定是較高的，肺癌兒童危險度則較低，但是超過 50% 以上的癌症，輻射致癌的危險度與年齡的關聯性極低或是無足夠的資料來判定，不過其原因仍待釐清。另外，20 歲以下的輻射防護適合採取年齡分群的方式，考慮其主要的曝露途徑，並關注氫氣的效應，持續進行高背景輻射區域的調查，建立醫療過程放射治療高劑量的資料，也統計個別器官的效應，研究各器官受輻射曝露的危險度，這些都是未來強化輻射防護可關注的方向。

## 輻射防護協會

### 輻射防護訓練課程

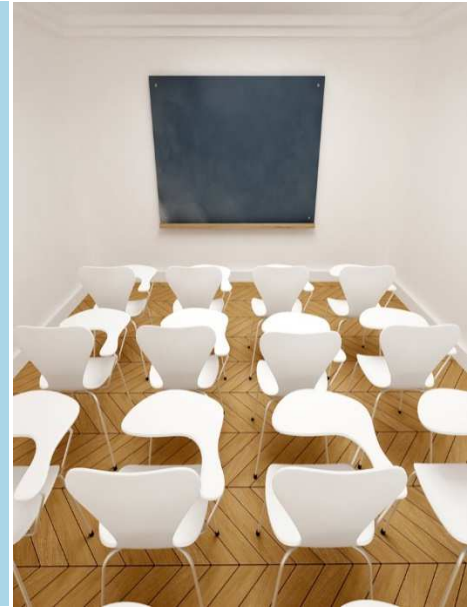
為協助民間提昇專業知識與技術，本協會敦聘國內、外相關單位的學者專家擔任授課教師，舉辦各種研習課程。

目前共有：

- 證照取得訓練
  - ✓ 操作人員資格
  - ✓ 輻防人員資格
  - ✓ 鋼鐵建材輻射偵檢人員資格
- 委辦訓練
- 換照積分（領有輻射安全證書及輻射防護人員認可證者）
- 三小時年度訓練（已受過 18 小時訓練者）

有興趣的朋友請蒞臨 [本會網站](#) 進一步了解。

## 訓練班開課時間



### 放射性物質或可發生游離輻射設備 操作人員研習班

|                     |                  |                  |            |
|---------------------|------------------|------------------|------------|
| A 組<br>36 小時許可類設備   | A3               | 08 月 09 日 ~ 16 日 | 高雄 輻射偵測中心  |
|                     | A4               | 08 月 24 日 ~ 31 日 | 新竹 帝國經貿大樓  |
| B 組<br>18 小時登記備查類設備 | B14              | 08 月 02 日 ~ 04 日 | 台北 建國大樓    |
|                     | B15              | 09 月 06 日 ~ 08 日 | 新竹 帝國經貿大樓  |
|                     | B16              | 09 月 20 日 ~ 22 日 | 台中 文化大學推廣部 |
|                     | B17              | 09 月 27 日 ~ 29 日 | 台北 建國大樓    |
|                     | B18              | 10 月 12 日 ~ 14 日 | 高雄 輻射偵測中心  |
|                     | B19              | 11 月 02 日 ~ 04 日 | 新竹 帝國經貿大樓  |
|                     | B20              | 11 月 16 日 ~ 18 日 | 台中 文化大學推廣部 |
|                     | B21              | 11 月 23 日 ~ 25 日 | 台北 建國大樓    |
|                     | B22              | 12 月 07 日 ~ 09 日 | 高雄 輻射偵測中心  |
|                     | B23              | 12 月 21 日 ~ 23 日 | 新竹 帝國經貿大樓  |
| 106 年 B1            | 01 月 11 日 ~ 13 日 | 台中 文化大學推廣部       |            |
| 106 年 B2            | 01 月 18 日 ~ 20 日 | 台北 建國大樓          |            |



## 輻射防護專業人員訓練班

輻防師 144 小時、輻防員 108 小時

／新竹帝國經貿大樓

|         |        |                        |
|---------|--------|------------------------|
| 員 30 期  | 第一階段   | 12 月 05 日～ 09 日        |
|         | 第二階段   | 12 月 12 日～ 16 日        |
|         | 第三階段   | 12 月 26 日～ 30 日        |
|         | 第四階段   | 106 年 01 月 013 日～ 06 日 |
| 進階 20 期 | 20 - 1 | 08 月 16 日～ 18 日        |
|         | 20 - 2 | 08 月 19 日～ 23 日        |

## 輻射防護繼續教育訓練班\*

|     |           |    |
|-----|-----------|----|
| 三小時 | 08 月 05 日 | 新竹 |
|     | 08 月 25 日 | 台北 |
|     | 10 月 18 日 | 高雄 |
|     | 10 月 28 日 | 新竹 |
|     | 11 月 01 日 | 台中 |
|     | 11 月 22 日 | 台北 |
| 六小時 | 09 月 01 日 | 台北 |
|     | 10 月 04 日 | 高雄 |
|     | 11 月 08 日 | 新竹 |

## 鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班\*

|   |                 |           |
|---|-----------------|-----------|
| 鋼 | 10 月 19 日～ 20 日 | 高雄        |
|   | 11 月 10 日～ 11 日 | 新竹 帝國經貿大樓 |

## 上課地點

|    |                 |                      |
|----|-----------------|----------------------|
| 台北 | 建國大樓            | 台北市館前路 28 號          |
| 新竹 | 帝國經貿大樓          | 新竹市光復路二段 295 號 20 樓  |
| 台中 | 文化大學推廣部         | 台中市西屯區台灣大道三段 658 號   |
| 高雄 | 輻射偵測中心          | 高雄市鳥松區澄清路 823 號      |
|    | 非破壞檢測協會<br>南訓中心 | 高雄市前鎮區擴建路 1-21 號 6 樓 |

\* 上課地點如果僅註明區域，但是沒有詳細地點，將依照當期報名人數來決定適當地點。屆時會再通知已報名的學員。

訓練班簡章可至[本會網站查詢](#)。

課程安排問題，請聯絡本會

電話 (03) 572-2224

分機 313 李貞君（專業人員、  
鋼鐵建材、  
繼續教育）

315 邱靜宜（放射物質  
與游離輻射設備）

傳真 (03) 572-2521

## 輻防新聞廣場

這裡有您最關心的證照考試資訊、國內產官學界最新消息、以及近日全球輻防新聞



### 最新證照考試日期與榜單

**行政院原子能委員會 105 年第 1 次輻射防護專業測驗及輻射安全證書測驗及格人員名單**  
「105 年第 1 次輻射防護人員專業測驗及輻射安全證書測驗及格人員名單」已公布於原能會網站，提供各界下載瀏覽。[相關網址](#)

**行政院原子能委員會 105 年第 2 次輻射防護專業測驗及操作人員輻射安全證書測驗**  
「行政院原子能委員會 105 年第 1 次輻射防護專業測驗及操作人員輻射安全證書測驗」訂於民國 105 年 10 月 29 日舉行，相關資訊已公布於原能會網站。[相關網址](#)

### 國內訊息

#### 105 年核安第 22 號演習

105 年核安第 22 號演習實兵演練將於 9 月 12 至 14 日假屏東縣核能三廠及鄰近地區舉行。為汲取日本福島電廠的事故經驗及檢視核能電廠安全防護總體檢改善方案，本次演練除驗證核三廠新增之各項設備與程序外，亦希望透過民眾親自參與，驗證屏東縣核災應變程序，務實檢討各項防護行動，以確保民眾之安全。

- [105 年核安第 22 號演習實施計畫](#)
- [105 年核安第 22 號演習前宣導短片](#)

#### 原能會發布「集中式放射性廢棄物貯存設施場址規範」

核能發電國家為解決放射性廢棄物的問題，皆致力於推動最終處置計畫。惟因放射性廢棄物處置設施因屬鄰避設施，世界各國處置計畫的推動均具有高度不確定性而容易導致延宕，遂有許多國家倡議設置過渡型集中貯存設施(Interim Storage)以作為因應。

現有的核能電廠即將屆滿運轉年限，將來電廠除役後，不論低放射性廢棄物或用過核子燃料都必須整體妥善管理。依據台電公司提報奉核的低放射性廢棄物最終處置計畫書第 10 章替代/應變方案內容，台電公司如未能如期於 105 年 3 月選定低放處置設施場址，將於 105 年底前陳報經濟部同意後，啟動集中式貯存方案。

放射性物料管理法及其相關法規，對放射性廢棄物貯存設施之申請及審核辦法已有規範，有關核電廠內放射性廢棄物貯存設施之管制，亦可適用於集中式放射性廢棄物貯存設施。惟對可能於核能電廠外集中式放射性廢棄物貯存設施的場址條件，仍需進一步予以明確規範，以資妥善推動集中式放射性廢棄物貯存設施計畫。爰參考國內與美國相關設施場址之規定，訂定「集中式放射性廢棄物貯存設施場址規範」。

- 集中式放射性廢棄物貯存設施場址規範

### 台電公司撤回核一廠延役申請案，原能會已終止審查作業

台電公司於 98 年 7 月 27 日依「核子反應器設施管制法」及「核子反應器設施運轉執照申請審核辦法」規定，向原能會申請延長核能一廠運轉執照有效期限至 60 年(延役申請案)，惟原能會於 105 年 7 月 7 日接獲台電公司奉經濟部指示撤回核一廠延役申請案之來函，請原能會停止審查作業，故自該日起核一廠延役申請案全案終止審查。

### 《遠見雜誌》第 360 期特別企畫報導核廢料問題之原能會回應說明

《遠見雜誌》第 360 期特別企畫報導國內核廢料問題，其內容深入淺出，報導詳實，讓社會大眾對核廢料問題有更多的瞭解。原能會為核能安全主管機關，就相關核廢料安全管制的情況，進行補充說明。

#### 一、有關用過核子燃料貯存：「給我室內乾貯、其餘免談？」

國際上已有 22 個國家設置乾式貯存設施，包含美國、加拿大、德國等，目前正在使用中的乾式貯存設施共有 121 座，其中 86 座為戶外型乾貯設施，35 座為室內貯存設施。任何型式的乾貯設施都要符合安全規定，原能會才會同意興建，至於選擇哪種型式，則須由業者台電公司綜合考量選定。

#### 二、有關蘭嶼貯存場：「低階核廢料暫放，卻一擺 34 年」

經濟部正依「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」，辦理處置設施選址作業。俟選定場址並完成設施興建後，即可將貯存於蘭嶼之廢棄物，優先運送至最終處置場。目前蘭嶼貯存場之廢棄物，台電公司是否先遷回核能電廠，或是遷到規劃中的集中式貯存設施，只要運送及貯存過程均符合安全法規，原能會樂觀其成。

#### 三、有關核電廠除役：「沒有最終處置場，核電廠除役玩假的？」

核電廠除役的主要目的是為使設施及其土地資源能再度開發利用，其拆除或移出之放射性污染設備、結構或物質等，應貯存於原能會核准之設施。國際上對核能電廠除役的定義，均與我國相似，除役並不同於馬上恢復為綠地。除役後的核電廠均在原廠址內設有中期貯存設施，以存放用過核子燃料。將來最終處置場或集中式貯存設施完成興建後，即可將核廢料遷移，不會讓核廢料繼續留在原廠址內。

詳細回應內容請上網查詢。[相關網址](#)

### 105 年 5 月輻安預警自動監測日平均劑量率變動圖

105 年 5 月輻安預警自動監測日平均劑量率，均在背景變動範圍（ $0.2 \mu\text{Sv/hr}$ ）內。[相關網址\(5 月\)](#)

### 105 年 6 月輻安預警自動監測日平均劑量率變動圖

105 年 6 月輻安預警自動監測日平均劑量率，均在背景變動範圍（ $0.2 \mu\text{Sv/hr}$ ）內。[相關網址\(6 月\)](#)

### 輻射偵測中心 105 年 5 月份臺灣地區食用之農特產品檢測結果

原能會輻射偵測中心至消費市場抽樣購買宜蘭縣、南投縣、高雄市、花蓮縣等 5 件農特產品進行放射性含量分析，檢測結果皆符合法規規定。

## ◦ 海外信息

### 最新美國手機輻射致癌研究結果引發大眾關注

美國聯邦手機輻射致癌研究初步發現，大量使用手機將導致雄性老鼠得到腦瘤的風險微幅增加。該結果引發了大眾的關注，也引起相關專家針對該研究不合理之處提出質疑。相關報導請參考下列連結。[連結 1](#)；[連結 2](#)。

### 國際原子能總署(IAEA)發起設置國際輻射監測資訊系統

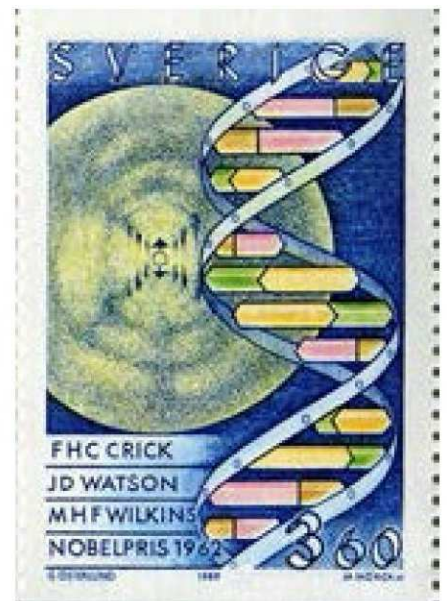
國際原子能總署(IAEA)發起設置網路國際輻射監測資訊系統(International Radiation Monitoring Information System, IRMIS)，蒐集各國的輻射監測資料，繪製輻射地圖，以協助各國在發生核子意外事故時，能採取最適當之措施。[相關網址](#)

## X 光繞射與晶體學

這些多彩多姿的迷你藝術品，描繪出偉大的科學家，他們賴以成名的分子發現，以及成就其發現自行研發出來的各式儀器設備。

120 多年前，威橫·康萊·侖琴（Wilhelm Conrad Roentgen）在他的著作「新射線（On a New Kind of Ray）」揭露了 X 光的發現。本文主要是從一些紀念郵票的角度來描述輻射源的另一面象。對於保健物理學家而言，這些重要的輻射源始於 X 光的發現，其引導出 X 光光譜學與繞射；接下來是 X 光晶體學，最終發展出中子繞射。在美國國家標準與技術局（National Institute of Standards and Technology, NIST）的中子研究中心（筆者的工作地），擁有全部這些技術與輻射源，其中包括一座做為中子源的 20 MW 研究用反應器。雖然本文特意強調了多位諾貝爾獎得主及其成就，但是並沒有打算完整收錄每位得獎者的故事。

西元 1895 年 11 月 8 日，侖琴的實驗成功地披露了一種「新射線」，在一張塗有螢光化學物質亞鉀氰銀（barium platinocyanide,  $\text{BaPt}(\text{CN})_4$ ）的紙板上產生微弱、閃爍又帶點綠色的光芒。整個實驗在暗室中進行的：侖琴使用由倫可夫感應線圈（Ruhmkorff induction coil）產生激發的克魯克斯管（Crookes tube），該管被包覆在黑色紙板的屏蔽內，以避免其他任何光線滲入。當克魯克斯管放電時，被處理過的紙板螢幕就會發光，甚至在距離管子兩公尺處仍會發出螢光。對於這



### 作者

湯瑪士·P·強司頓 (Thomas P. Johnston), RRPT

### 翻譯

輻防簡訊編輯組

### 資料來源

美國保健物理學會新聞  
Health Physics News February 2016  
Volume XLIV Number 2

種莫名的射線，倫琴選擇稱為「X光」，以「X」強調其未知的特性。迄今我們仍然使用「X光」一詞，雖然曾有段時間是採用「倫琴射線」。倫琴甚至推測 X 光具有使視網膜發出螢光的能力。在其劃時代的論文中，倫琴討論了如何觀察 X 光繞射的方法。他於西元 1901 年獲頒諾貝爾物理獎。這張阿拉伯聯合大公國沙迦發行的郵票描繪出從克魯克斯管產生的綠色光，以及在倫琴的時代用來產生 X 光的其他設備。

莫里斯·德布羅意 (Maurice de Broglie) 是 X 光光譜學的發明者，也是第一位觀察到吸收邊限 (absorption edge) 的人。西元 1908 年，德布羅意設立了實驗室並開始研究 X 光的繞射。他不但發明了 X 光光譜學，也發展出「旋轉晶體法 (method of the rotating crystal)」。西元 1928 年，德布羅意獲頒休斯勳章 (Hughes Medal)，表彰其在 X 光光譜上的貢獻。這張郵票展示了早期 X 光設備，包括 (從左至右) 克魯克斯管、繞射光柵、架設的旋轉晶體、繞射



Crookes tube and apparatus, 1965  
UAE Sharjah, Michel #124A



Maurice de Broglie, 1970  
France, Scott #B439

馬克斯·馮·勞厄 (Max von Laue) 於西元 1912 年預測 X 光會在具有天然繞射光柵的晶體中繞射。其後他採用硫酸銅晶體以及硫酸鋅晶體進行實驗而產生的圖形，被冠以「勞厄圖形」之名，可由此角。勞厄因為發現 X 光會在晶體中繞射，於西元 1914 年得到諾貝爾物理獎。這張郵票上除了勞厄的肖像外，也展示了硫酸銅晶體的繞射圖形。



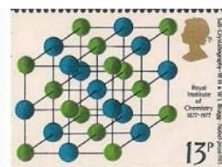
Max von Laue, 1979 DDR,  
Scott #1995

物理學與 X 光晶體學家，威廉·勞倫斯·布拉格 (子) 與威廉·亨利·布拉格 (父)，西元 1912 年發現 X 光在晶體中繞射的布拉格定律，對於判斷晶體結構非常重要。由布拉格父子研究出的探索晶

體結構方法是 X 光晶體學的重大進步，因此獲頒西元 1915 年的諾貝爾物理獎。這張摩爾多瓦 (Moldova) 的郵票描繪了布拉格定律： $2d\sin\theta = n\lambda$ 。



The Braggs, 1975  
Sweden, #1149

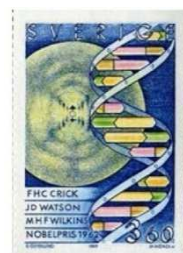


NaCl Salt Crystallography, 1977 Great Britain, Scott #809



Bragg's Law, 2014 Moldova

西元 1962 年，克里克·華森與威爾金 (Crick, Watson, and Wilkins) 的團隊在羅莎琳·富蘭克林 (Rosalind Franklin) 的協助下，利用 X 光晶體學判定出 DNA 結構，榮獲諾貝爾生理學與醫學獎。該團隊獲獎係「表彰其發現核酸的分子結構及在生命體內傳遞資訊的重要性。」這張瑞典郵票包括 DNA 的雙螺旋結構和羅莎琳·富蘭克林的「第 51 號照片」，一張 DNA 的 X 光繞射相片。



Crick, Watson and Wilkins, Molecular structure of DNA, 1989 Sweden, Scott #1773

西元 1962 年的諾貝爾化學獎頒給了馬克斯·佩魯茨 (Max Perutz) 和約翰·肯德魯 (John Kendrew)，表彰他們利用 X 光晶體學來闡釋球形蛋白的結構，像是肌紅蛋白與血紅素的結構。獲獎理由是「表彰其對於球型蛋白結構的研究」。這張郵票顯示佩魯茨正透過繞射儀觀察。

桃樂斯·克勞福·霍奇金 (Dorothy Crowfoot Hodgkin) 發展出蛋白質晶體學，並因此獲得西元 1964 年的諾貝爾化學獎。霍奇金的獲獎理由是「她以 X 光技術判定出重要生物化學物質的結構」。



Max Perutz, 2014 Great Britain, Scott #3276



Dorothy Hodgkin, 1996 Great Britain, Scott #1693

西元 1994 年，伯仁·布羅豪斯（Bertram Brockhouse）與克利福·舒爾（Clifford Shull）因為中子繞射獲頒諾貝爾物理獎。該團隊的獲獎原因是發展出中子散射的技術。這張照片上有布羅豪斯與舒爾的肖像，以及位於橡樹嶺（Oak Ridge）的中子譜儀。您沒看錯，舒爾是叼著煙斗。



**Bertram Brockhouse and Clifford Shull, 1994 at Oak Ridge**

西元 2004 年，阿龍·切哈諾沃（Aaron Ciechanover）、阿郎·赫什科（Avram Hershko）與歐文·羅斯（Irwin Rose）的團隊得到了諾貝爾化學獎。獲獎原因是「發現由泛素媒介的蛋白質降解作用(ubiquitin-mediated protein degradation)」。他們在闡釋複分子結構（complex molecular）時，使用了中子繞射的技術。



**Linus Pauling, 2008 United States, Scott #4225**

化學家萊納斯·鮑林（Linus Pauling）於西元 1954 年獲頒諾貝爾化學獎，「表彰其對於化學鍵性質的研究，以及對於闡釋複雜物質結構上的應用。」鮑林的研究使用到 X 光晶體學。

西元 2009 年，由艾妲·尤納特（Ada E. Yonath）、湯馬士·史塔茲（Thomas A. Steitz）與文奇·拉馬希南（Venki Ramakrishnan）組成的團隊，因為對於核糖體結構與功能的研究而榮獲諾貝爾化學獎。他們藉由分析 X 光繞射圖形來判定其結構。

西元 2011 年，丹·謝赫曼（Dan Shechtman）因為發現準晶體（quasicrystals）而獲得諾貝爾化學獎。這張郵票上花朵似的圖案是鋁錳合金廿面準晶體之聚集體的電子顯微鏡相片。郵票的背景圖案則是描繪出廿面準晶體的電子繞射圖形。謝赫曼藉由分析 X 光繞射圖形來解釋這些新型態準晶體的詳細結構。順便一提：謝赫曼是筆者之前在 NIST 的同事。

結束這篇關於繞射和晶體學的文章之前，筆者希望各位看官們讀後能有所啟發，會喜歡這些郵票背後的故事，這些多彩多姿的迷你藝術品，描繪出偉大的科學家，他們賴以成名的分子發現，以及成就其發現自行研發出來的各式儀器設備。



**Ubiquitin, protein destroyer, Nobel Prize in Chemistry, 2011 Israel, Scott #1868**



**Ribosome, protein constructor, Yonath, Steitz, Ramakrishnan, 2011 Israel, Scott #1869**



**Quasiperiodic crystals of aluminum-manganese alloy, Dan Shechtman, 2011 Israel, Scott #1993**

## 那兩個二戰終結者

原爆的犧牲者、倖存者們帶給後世龐大的輻射生物效應案例，是十九世紀末的輻射科學發展以來最重要的資料之一。

第二次世界大戰（World War II）是近百年來最後一場全球性規模的戰爭，我們所熟悉的「八年抗戰」後來也融合成二戰的一部份，這場戰爭到末期已經造成了數千萬人的死亡，然而在各國僵持之下，戰爭仍久久無法終止，直到兩枚神秘的兵器降世，結束了戰爭，也改變了許多人的一生，而說到這兩枚神兵，得從所謂的「曼哈頓計畫（Manhattan Project）」談起。

曼哈頓計畫是在二戰期間開始的，由諾貝爾物理學獎得主費米博士（Enrico Fermi）所主導，於 1942 年在美國芝加哥成立世界上第一個實驗性原子爐，並且成功的發展出可控制的「核子連鎖反應（nuclear chain reaction）」，也就是當我們用中子撞擊一個原子核使其分裂時，該原子核分裂所產生的中子將繼續撞碎其他原子，被撞碎的原子也將發射出能撞擊其他原子的中子，直到所有原子都無法再分裂為止。

基於這個概念，我們可以想像一下，如果有一批非常巨大的核子原料，我們就可以藉由核子連鎖反應，使這些原料瞬間產生巨大的能量，用白話來講就是「製造一個超級大爆炸」，因此美國

# 福說

廖彥朋 專欄



作者

廖彥朋

《台灣鯛民》專頁原作者，網友暱稱為「養殖戶」，自稱「周魚民的老闆」。大學念的是放射科學，發現自己沒有這方面才華，碩士轉讀醫學物理，又發現這行沒有前途，在醫院工作三年半之後帶著兩把吉他逃到日本，在京都大學醫學研究科當醫科學專攻博士生。

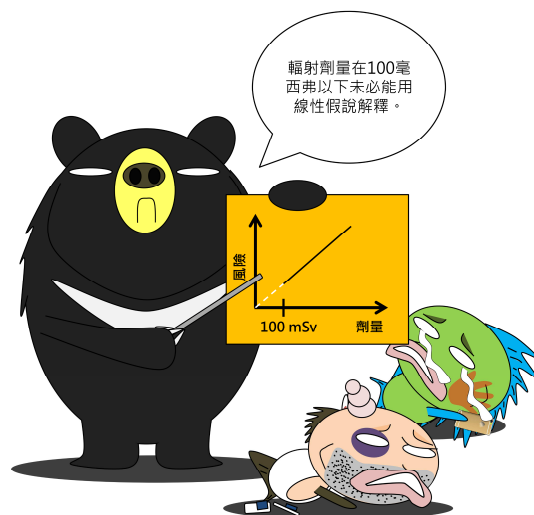
- ✓ 長庚大學醫學物理暨影像科學碩士
- ✓ 雙和醫院醫學物理師
- ✓ 中華民國醫學物理學會醫學物理師認證
- ✓ 日本京都大學醫學研究科醫科學博士生(ing)



在擁有這個前所未聞的秘密技術之後，立刻就著手生產原子彈，這是人類史上第一次把原子彈用在大規模戰爭，也是最後一次。

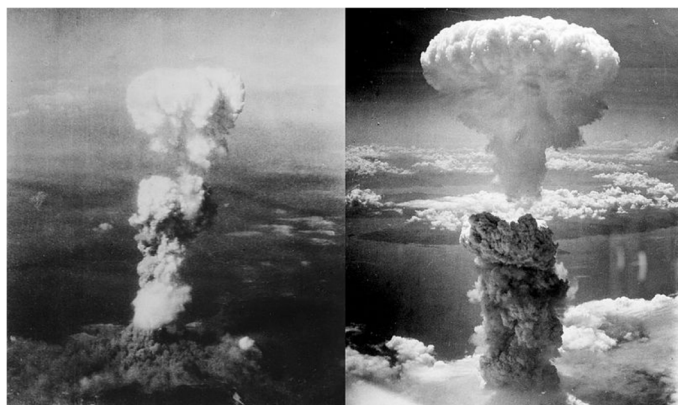
1945年8月6日上午8時15分，廣島市區的天空降下一枚長度僅有三公尺大小的炸彈，那時沒有任何人知道接下來會發生什麼事情：半徑一公里內除了鋼筋水泥以外的建築全毀、兩公里內的木造建築全毀，這一炸，全世界都驚呆了，沒想到這顆「迷你」炸彈威力高達50萬億焦耳，相當於1.3萬公噸黃色炸藥，不過日本並沒有因此而投降。三天後，體積更大、威力更強的第二枚原子彈從長崎上空降落，前總統府資政彭明敏先生那時正在長崎療傷，他在回憶錄寫著：「原子彈爆炸的後果，實在難以描寫。有些水泥建築物仍屹立著，但是，裡面所有木料和其他易燃物都在頃刻間化為烏有。據說在學校教室內，從整齊排列的白灰燼所在可以看出在死亡瞬間正坐在書桌旁的每一個學生。熱度竟有那樣強烈。大部分的醫科學生都罹難，其中包括四位曾經慷慨輸血給我的台灣留學生。他們有用的生命被消滅，我卻仍活著，這真是悲劇的命運。」（摘自《自由的滋味：彭明敏回憶錄》）這一次，戰爭真的結束了。

我們過去都認為，戰爭的結果當然是非死即傷，傷者經過療養多半能夠痊癒，然而這兩顆原子



但所造成的影響超乎當時的想像。戰後沒多久，那些倖存者中就不斷出現各種輻射急性反應，像是掉髮、皮膚紅腫潰爛、消化道崩潰、造血機能低下、水晶體混濁、白內障等，許多產婦生出畸形兒或青少年罹癌，許多成年人也在多年後罹患各式癌症，一瞬間的爆炸卻造成了至今七十年的後遺症，前前後後共計數十萬人因此而喪命，這讓所有人重新省思戰爭的代價，也促使了現在世界各國人權組織表達反核武的堅定立場。然而這數十萬人並沒有白白犧牲，原爆的犧牲者、倖存者們帶給後世龐大的輻射生物效應案例，是我們從十九世紀末的放射線科學發展以來最重要的資料之一。

二戰的兩次原爆有三個特徵：第一、瞬間暴露；第二、被曝者劑量高低均有；第三、被曝者的數量極大。基於這三個特徵，我們具有足夠的證據觀察輻射瞬間曝露對人體所產生的影響。經過數十年對於原爆犧牲者與倖存者的研究與探討，我們將輻射對人體的影響分為兩大項：確定效應 (deterministic effect) 與機率效應 (stochastic effect)。所謂的「確定效應」，就是指那些「只要我們知道劑量是多少就可以確定會不會發生」的效應；而「機率效應」則是「只要我們知道劑量多少就可以預估發生機率」的效應，因此不論是何者，都是基於「劑量」的概念而來的。



廣島 1945

長崎 1945

現在已知的確定效應中，嚴重可造成立即死亡，輕微能引起掉髮，至於所謂的嚴重到底有多嚴重？大約是 8 西弗，也就是在一秒鐘之內進行胸腔 X 光四十萬連拍（可惜以現在的科技還無法做到）；所謂的輕微到底有多輕微？大約大於 0.5 西弗就會產生了，那也要在一秒鐘之內進行兩萬五千連拍才能達到（也是現在的科技還無法做到的），簡單的說，一般簡單的 X 光檢查要讓人產生確定效應的可能性是零。不過在一些高強度的放射線治療（例如：光子治療）或是需要長時間接受曝露的放射線檢查（例如：血管攝影）中，還是有可能會造成累積劑量超過門檻、產生確定效應，因此在進行高劑量診療時，劑量的監控就十分的重要了。

另一方面，作為十大死因之首的「癌症」是輻射造成的機率效應中最令人關注的。依據過去數十年的研究顯示，人體曝露輻射的劑量愈高，罹患癌症的機率就愈高，這個現象不僅僅在廣島長崎倖存者中看到（單次曝露）(1)，同時也在核電廠工作者的身上看到（累積曝露）(2,3)，也因此，游離輻射被世界衛生組織下的「國際癌症研究機構」列為「確定致癌因子」，也是一般民眾容易聞輻色變的主要理由。因為是「機率效應」，許多文獻會使用「無低限值」的假設，也就是說「只要被曝露就必定增加風險」，不過事實上，截至今日為止，在科學上還沒有任何證據顯示出劑量低於 100 毫西弗的輻射曝露對人體的影響（不論是單次或是累積），很大的可能性是因為這個風險相對於其他的環境因子而言太小以至於測量不到，也因此，雖然我們身處一個時時被輻射曝露的環境中，大部分的情況下我們還是無法感覺到什麼異狀（也可能是因為大家都一樣，所以就沒有「異狀」可言）。

有時候我自己內心是非常矛盾的，雖然對於那些在戰爭中犧牲的無辜百姓感到憐憫，但是如果沒有他們的犧牲，我們現在也無法那麼了解放射線，所以我經常提醒自己，正因為我們接受了這些犧牲者用性命換來的知識，我們更有責任與義務要使用這些寶貴的知識保護活下來的人。

---

輻射帶給現代人許多的便利，不論是能源、醫療、農業、工業，甚至家庭消防，唯有了解輻射才能與之共舞而無懼。

---

#### 參考資料

1. Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat Res.* 2003 Oct;160(4):381-407.
2. Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, Hamra GB, Haylock R, Laurier D, Leuraud K, Moissonnier M, Schubauer-Berigan MK, Thierry-Chef I, Kesminiene A. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ.* 2015 Oct 20;351:h5359.
3. Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, Hamra GB, Haylock R, Laurier D, Moissonnier M, Schubauer-Berigan MK, Thierry-Chef I, Kesminiene A. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *Lancet Haematol.* 2015 Jul;2(7):e276-81..

## 國立清華大學 硼中子捕獲治療簡介

國立清華大學與台北榮總研究團隊，利用清華水池式反應器進行硼中子捕獲治療癌症，開啟了台灣標靶重粒子治療的新頁，是台灣癌病治療史的里程碑。

### 前言

前總統李登輝於 2014 年出席在日本大阪舉行的癌症治療研討會，聆聽日本專家講解硼中子捕獲治療(Boron Neutron Capture Therapy, 簡稱 BNCT)相關技術，對於 BNCT 治療癌症的潛力深感興趣；2015 年 7 月，李前總統再次前往福島瞭解日本 BNCT 最新發展，才間接從日本專家口中得知：其實台灣投入 BNCT 研究已超過 20 年，並長期與日本研究團隊交流合作，更在 2010 年開始針對復發頭頸癌進行臨床試驗，試驗結果十分令人振奮。

國立清華大學與台北榮總研究團隊，利用清華水池式反應器進行硼中子捕獲治療癌症，開啟了台灣標靶重粒子治療的新頁。國內首次結合重粒子與標靶方法之癌病治療於清華大學付諸實現，是台灣癌病治療史的里程碑。

以下將針對 BNCT 在台灣的發展歷程與現況做一簡單介紹。



作者

劉鴻鳴

清華大學原子科學技術發展中心

## BNCT 基本原理

利用硼-10 與中子發生作用，放出輻射以殺死腫瘤細胞的同時，卻又不嚴重影響正常組織細胞，是 BNCT 的基本精神所在。

BNCT 的治療過程可分成兩部分：首先是在腫瘤部位聚集穩定的硼-10，再利用熱中子（Thermal Neutron，通常是指能量在 1 eV 以下的中子）照射腫瘤部位。由於熱中子與硼-10 之間的捕捉機率，遠大於熱中子與細胞主要組成（碳、氫、氧、氮）之間的捕捉機率。因此，大部分照射在腫瘤部位的熱中子皆與硼-10 發生反應，並迅速放出高能量的鋰-7 及  $\alpha$  粒子（捕捉反應如圖 1 所示）。

由於鋰-7 及  $\alpha$  粒子在組織細胞中的最大移動距離分別只有 4 微米和 9 微米，此距離與細胞的大小相當，因此，若能控制中子與硼-10 的反應發生在腫瘤細胞內，則腫瘤細胞將被硼中子反應所產生的高能量粒子摧毀，距離較遠的正常組織細胞所受到的傷害則相對較小。這種利用含硼藥物累積於腫瘤細胞，再利用中子引發放射反應的治療方法，正是結合標靶治療與放射治療的優點，達到不傷及無辜的治療目的。

綜合上述可以瞭解：BNCT 治療的成敗主要定於(1)腫瘤細胞的硼-10 含量是否相對高於正常組織細胞、以及(2)是否有足夠數量且能量適合的中子抵達腫瘤所在位置。

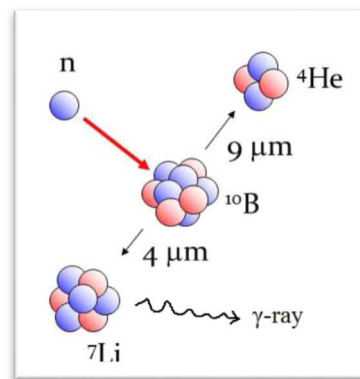


圖 1：熱中子與 B-10 的捕捉反應。

## BNCT 中子照射設施

BNCT 所需的中子源，雖然可經由改建 Cf-252 中子源、或建造加速器驅動中子源等設施來獲得，但若導引出穩定且大量的中子射束，研究用核子反應器仍是目前較佳的選擇。

清華水池式反應器（Tsing Hua Open-pool Reactor, 簡稱 THOR）是台灣第一座、也是目前唯一運轉中的研究用核子反應器（圖 2a 為 THOR 爐心運轉時所發出的特殊藍光，Cherenkov radiation）。THOR 從 1961 年臨界運轉至今已經歷 55 年的運轉歷史。在 2001 年，為了整合清華大學 BNCT 研究團隊、並支援國內 BNCT 相關研究照射，遂向國科會（現更名為科技部）申請通過「改建 THOR 做為 BNCT 醫療設施」的整合型研究計畫。歷經三年的設計改建時間，終於在 2004 年將 THOR

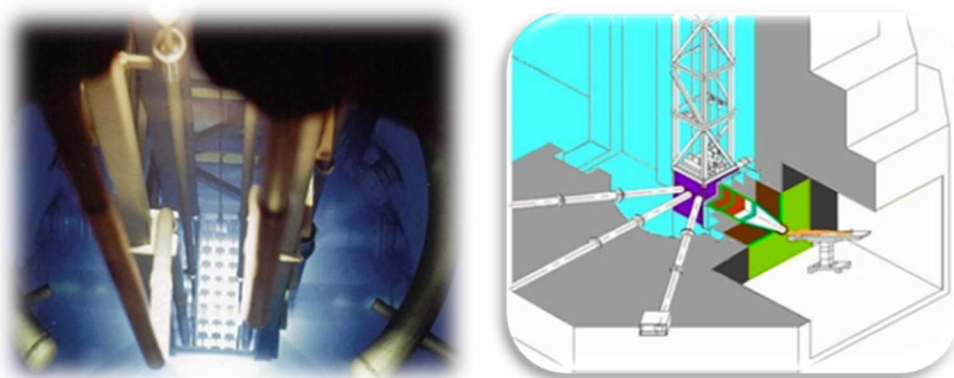


圖 2：(a)THOR 爐心運轉時所發出的特殊藍光, Cherenkov radiation；(b)THOR-BNCT 設施透視圖。

原有之熱中子柱(Thermal Column)改建成為超熱中子束(圖 2b 為 THOR-BNCT 設施透視圖)，成為當時全世界八個 BNCT 治療設施之一，提供醫界及學界進行 BNCT 治療癌症及其他相關研究。

### ● THOR-BNCT 的設計與改建

改建 THOR 成為符合 BNCT 治療癌症的用途，所必須考量的因素眾多，其中針對中子束的設計考量主要包括如下：

**(1) 中子射束的能量：**含硼藥物 (B-10) 主要是和能量較低的熱中子發生反應，但中子的能量若太低，在其進入人體後，很容易被身體組織阻擋吸收而無法到達較深的腫瘤部位；反之，若中子的能量太高 (快中子)，在其進入人體後，容易造成正常組織細胞不必要的輻射劑量。因此，在兼顧治療深度、及避免過多的快中子劑量情況下，目前國際上認為超熱中子 (0.5eV~10keV) 是做為 BNCT 治療最適當的能量範圍。

**(2) 中子射束的強度：**中子射束的強度主要是考量治療時間的合理性。以目前含硼藥物在腫瘤的累積濃度約 60~70 ppm 估算，若超熱中子通率大於  $1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ ，則可確保單一次治療時間在 1 小時以內完成。

**(3) 背景輻射劑量：**此處所謂背景輻射劑量是指伴隨超熱中子射束所產生的快中子與加馬射線所造成的輻射劑量。目前設計的標準是以每引出一個超熱中子所引發的快中子劑量與加馬劑量，必須要小於  $1 \times 10^{-10} \text{ cGy-cm}^2$ ，如此才能確保皮膚表面所受的輻射劑量不會超過限定值。

**(4) 中子射束的照野：**中子射束的照野大小主要是考量未來治療腫瘤的體積大小。由於 BNCT 治療是屬於單一射束 (one-shot) 的治療方式，射束的照野必須涵蓋腫瘤的範圍，因此，中子射束的照野設計一般較大 (目前 THOR-BNCT 的照野為直徑 14cm 的圓孔)，若所要治療的腫瘤體積較小，則

可透過外加中子匯聚管 (Extension Collimator) 的方式來調整照野。

為了達到上述超熱中子束設計的基本要求，THOR-BNCT 於 2001 年的改建過程中，特別設計由 Al、Fluental<sup>TM</sup>、Cd、Bi、Pb、Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-PE 等材料所組成之濾屏，將 THOR 爐心核分裂所產生之快中子加以減速，另一方面將有害之加馬射線加以屏蔽，以減少快中子和加馬射線所造成之傷害。圖 3 是 THOR 熱中子柱重新改建成超熱中子束的最佳化設計。

在完成 THOR 超熱中子束的最佳化設計後，如何改建組裝也是另外一個問題，除了改建設施因 THOR 長期運轉導致結構材料被中子活化的高輻射劑量問題外，為了縮短照射位置與爐心的距離來提昇中子束的強度，以及為了增加照射治療室內的空間方便病人以平躺治療方式進行 180 度旋轉，皆必須將 THOR 原結構水泥屏蔽體加以切割。

改建工程經由結構安全分析確認切割補強過程不會造成 THOR 安全疑慮，並經原子能委員會審查通過後才開始進行改建工作。圖 4 是整個 THOR 熱中子柱改建為超熱中子束的過程彙整：包括將舊有設施材料的移除、水泥屏蔽體的切割、新設計材料的組裝、設施定位及周邊輔助設施的配置...等，前後歷經三年的時間才得以完成。

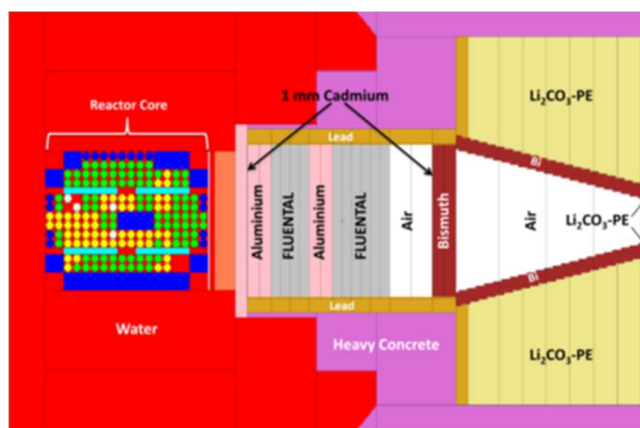


圖3：THOR超熱中子束最佳化設計。



圖 4：THOR 熱中子柱改建為超熱中子束的過程彙整。

THOR-BNCT 除了中子照射治療室之外，還配置模擬定位室、準備室/恢復室、以及劑量監控室（詳細配置如圖 5 所示）。其中模擬定位室用來進行病人的預先模擬定位，主要考量照射治療室中因為受到中子長期照射導致背景輻射劑量率較高，為了避免醫護人員及協助定位的工程人員接受不必要的輻射曝露，需要較長時間的模擬定位動作將在模擬定位室中完成；準備室/恢復室則是做為含硼藥物注射的場所、以及病人接受 BNCT 治療後的後續觀察監測之用，此外，病人接受中子照射的過程，醫師亦可在此透過 TV-monitor 監視設備，全程掌握病人在治療室的動態；劑量監控室則是透過射束出口周圍預先佈置的 3 組中子分裂腔計測系統，即時監控進入病人體內的中子數量，進一步換算成病人所接受的累積劑量的即時信息(on-line monitor)，達到劑量精準給予的目的。

### ● THOR-BNCT 中子束特性研究

2004 年完成 THOR 超熱中子束的改建工程後，為了確認該設施能夠符合醫療用途，清華大學

BNCT 研究團隊立即進行該超熱中子束的特性研究、同時進行該設施之輻射與安全測試評估。

經由不同活化金屬片，配合 SAND-II 程式分析所得之 THOR-BNCT 射束出口的中子能譜，計算其熱中子、超熱中子、快中子通率分為： $1.34 \times 10^8$ 、 $1.07 \times 10^9$ 、 $7.66 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>/sec，顯示此一中子射束以超熱中子為主（佔 83%以上），且其超熱中子通率大小已能提供合理照射時間所需的強度；另外，評估快中子與加馬射線所造成之輻射劑量顯示：每一個超熱中子所引發之劑量皆小於  $0.5 \times 10^{-10}$  cGy-cm<sup>2</sup>，完全符合上述醫療的基本要求。

利用 THOR-BNCT 設施進行癌症治療，其有效治療深度（Advantage Depth, 簡稱 AD）也是我們關心的議題，為了探討超熱中子束進入人體組織後的劑量分佈情形，我們假設腫瘤部位所含 B-10 的濃度為 65ppm、血液中的 B-10 濃度為 18ppm，光子與中子的生物相對效應值（RBE 值）分別為 1.0 和 3.2；含硼藥物在腫瘤和正常組織的藥物生物效應值（CBE 值）分別為 3.8 和 1.3，在此一條條件下，THOR-BNCT 中子束進入身體組織後沿著中

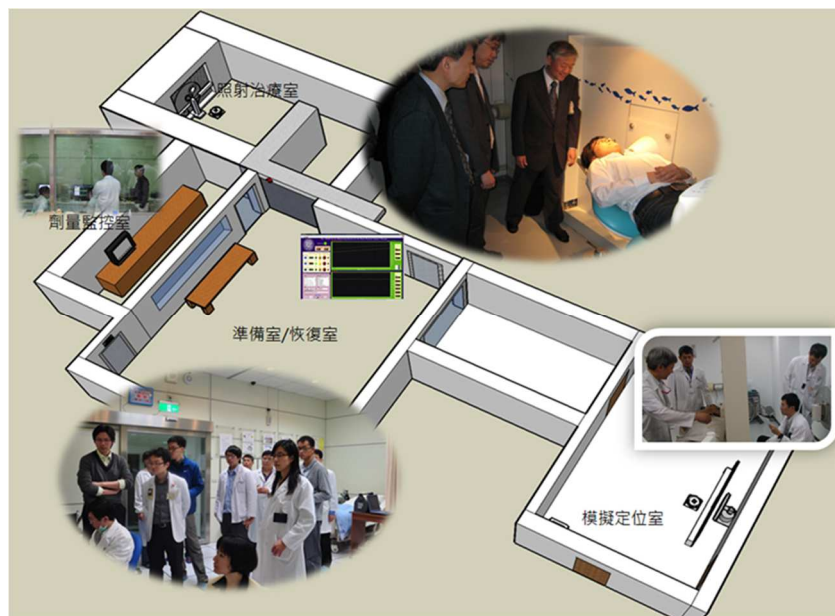


圖5：THOR-BNCT設施配置圖。

心軸的劑量變化如圖 6 所示。由於超熱中子束的特性，超熱中子在進入身體組織後逐步減速而成為熱中子(約在 2~2.5 公分處形成最大值)，隨後與 B-10 反應釋出極大的能量，這也是劑量最大值出現在 2~2.5 公分的原因。

從圖 6 我們也可以發現，正常組織所受的最大背景劑量來自於快中子劑量、加馬劑量、以及正常組織中(血液) B-10 與中子反應所造成的劑量總和。若將此劑量與腫瘤所接受的劑量做比較，當腫瘤深度達 8.5 公分以上，腫瘤所接受的劑量將低於正常組織所接受的最大背景劑量，意謂著在確保正常組織輻射安全的情況下，深度太深的腫瘤部位無法獲得良好的治療效果。

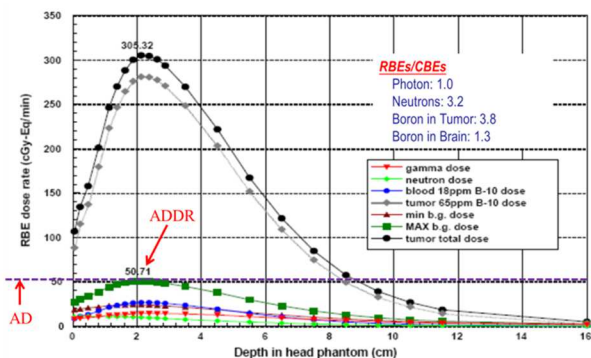


圖 6：THOR-BNCT 中子束進入身體組織後沿著中心軸的劑量變化。

## BNCT 含硼藥物

關係 BNCT 治療成敗的第二個主要因素是含硼藥物，必須確認該含硼藥物經由靜脈注射進入人體後，腫瘤細胞的硼-10 濃度足夠、且相對高於正常組織細胞的 B-10 濃度。目前臨床試驗的要求，腫瘤細胞的 B-10 濃度必須高於正常組織細胞的 B-10 濃度達 2.5 倍以上(即 T/N ratio 值 > 2.5)。

截至目前為止，全球的研究均一致發現：BPA (Boronophenylalanine) 及 BSH (sodiumborocaptate) 這兩種含硼藥物對癌細胞的親和性最為顯著。其中 BPA 結構與人體必須氨基酸-苯丙氨酸相似，過往研究顯示：BPA 可被惡性黑色素皮膚癌及其他代謝旺盛的癌細胞高度吸收，而且當 BPA 與果糖結合後，亦可增強癌細胞對 BPA 的吸收能力。

清華大學所執行的 BNCT 臨床試驗，早期係由國外進口 BPA 藥物，再委由國內信東生技公司進行配製，每次照射所需的藥費相對昂貴。目前，台灣信東生技公司已有能力自行生產 BPA 藥物，也是目前台灣 BNCT 臨床試驗唯一的製藥廠，在 BPA 藥物國內自行生產的情況下，有助於降低 BNCT 所需含硼藥物的價格。

## THOR-BNCT 臨床試驗

解決了中子照射設施、以及 BPA 含硼藥物的製備問題後，台灣 BNCT 臨床試驗只欠臨門一腳。國立清華大學、台北榮民總醫院、與日本京都大學，於 2010 年 3 月 22 日在清大簽訂三方合作協議書（圖 7），希望結合台北榮總在癌症治療的專業能力、及日本京大在 BNCT 的臨床實務經驗，共同努力以 THOR 超熱中子束進行 BNCT 臨床研究合作，為癌症病患提供新的治療方法。

利用 THOR 進行 BNCT 臨床試驗計畫獲得衛福部同意後，在清大-台北榮總-京大三邊共同合作下，2010 年 8 月 11 日順利利用 THOR 進行台灣首次的 BNCT 臨床治療。病人在模擬定位室進行預先模擬定位後、隨即移至準備室/恢復室進行含硼藥物注射（注射時間 2 小時）、緊接著便進入照射治療室進行中子照射（照射時間約 30 分鐘）、待照射結束，病人回到準備室/恢復室進行後續觀察監測，除了一般生理檢查之外，並進行病人體內放射性活度分析，以瞭解病人接受 BNCT 治療後，體



圖 7：國立清華大學、台北榮民總醫院、與日本京都大學簽訂三方合作協議書。

內因中子活化所造成的輻射劑量情形，做為病人回到醫院是否必須特別處置的參考。此外，病人接受 BNCT 治療過程中，必須依據試驗規劃進行血液中含硼濃度分析，以精確計算病人所接受的輻射劑量。現階段 THOR-BNCT 已完成第一階段 17 位無法再以其他方法治療的復發性頭頸癌病人的治療，並持續展開第二階段的試驗。在第一階段 17 位病例的持續追蹤觀察發現：除了明顯改善病人之病情與生活品質外，其中 6 位病人在臨床上判定為腫瘤完全消失，成效令人驚艷。



圖 8：THOR-BNCT 治療流程圖。



## BNCT 未來展望

THOR-BNCT 開啟了台灣標靶重粒子治療的新頁，展望未來，我們深自期許除了針對現有之復發頭頸癌治療持續精進外，還能擴大應用於其他癌症的治療(如：腦瘤、肝癌...等)，以造福更多癌症病患。

現階段以核子反應器提供中子源的 BNCT 治療設施，在其使用上有諸多條件的限制。為了讓 BNCT 治療癌症的方法能更加普及，如何在現代化的醫院內建造中子照射設施是 BNCT 未來發展的主軸之一。例如：利用加速器產生高能粒子(如：質子)，在撞擊特定靶材(如：鈹)後可產生中子，中子能量經過適當衰減過濾即可做為 BNCT 治療的用途，此一方法稱為加速器 BNCT (Accelerator-Based BNCT，簡稱 AB-BNCT)。

在含硼藥物方面，除了目前使用的 BPA 和 BSH 之外，如何針對特定腫瘤開發新式含硼藥物，增加含硼藥物在腫瘤部位的累積濃度，並降低危險器官的累積量，如此便能有效提昇 BNCT 的治療效果。清大周鳳英教授利用硼酸針對肝臟腫瘤進行動物試驗，其治療效果十分理想，為將來新式含硼藥物發展提供一個重要的方向。

## 結語

台灣 BNCT 經過 20 多年的努力才進入臨床試驗階段，試驗結果也顯示其結合標靶治療與重粒子治療的優勢，完全符合現代醫學精準治療的要求。此外，利用 BNCT 進行癌症治療的療程，僅需進行 1~2 次的照射治療，與目前所採用的光子放射治療相比較(30~35 次照射)，可減少病人往返醫院的辛苦。

現階段 BNCT 仍受限於治療場所(核子反應器)及治療深度的限制(8.5 公分以內)，但相信藉由更多人的投入與研究開發，最終將能達成 BNCT 治療醫院化與常規化，提升台灣國民健康福祉。



圖 9：THOR-BNCT 第一次執行臨床試驗後研究團隊合影

清華大學原子科學技術發展中心配合國家原子科學技術之發展，推動原子科學研究及原子能和平用途，擴大對社會之原子科技服務。除中心本部，並依任務特性不同下設反應器/同位素、保健物理及加速器等三個功能業務單位。

### 反應器/同位素業務單位

反應器教學訓練·教學參觀·學術實驗研究·同位素製造·非破壞性檢驗·鈷六十輻射照射·核醫藥物研發應用·微量元素分析·同位素推廣應用。

### 保健物理業務單位

教學參觀·學術實驗研究·輻射管制·人員劑量評估·全身加馬核種量測·環境試樣核種分析·輻射偵檢儀器校正·放射廢料管理。

### 加速器業務單位

教學參觀·學術實驗研究·加速器運轉與維護·離子束分析·離子束照射·材料分析。