



財團法人 中華民國輻射防護協會

輻射防護簡訊

第 159 期

出刊日期 109 年 10 月 15 日

本期內容

CONTENT

食@安心

1

食物的安全性是多面向的問題，可能是農藥殘留，可能是非法添加物，也有可能是食物中是否含有輻射的疑慮。本文將針對食物中可能存在的放射性物質，及其安全性進行討論，作者分享個人心得與看法。

世界各國核能反應器除役概述(I)-歐亞各國

5

作者整理了歐洲各國，如法國、英國、西班牙、德國與俄羅斯等，亞洲則以日本與韓國為代表，彙整這幾個主要核能國家的除役狀態介紹，並比較歐洲國家如德國與日本的除役作業方式的不同。

訓練班課程

8

公告本會各項訓練班開課時間

輻協新聞廣場

9

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 全球輻防新聞

世界各國核能反應器除役概述(II)-加拿大與美國

13

本篇就美洲核能先進國家加拿大與美國的電廠除役現況收集資料彙整，並與世界幾個核能先進國家間的除役進行比較，提出心得與結論供閱讀者參考與思考。

640 切電腦斷層攝影介紹

18

本篇就美洲核能先進國家加拿大與美國的電廠除役現況收集資料彙整，並與世界幾個核能先進國家間的除役進行比較，提出心得與結論供閱讀者參考與思考。

食@安心

作者 劉鴻鳴 博士

清華大學原子科學技術發展中心



古人說「民以食為天」，從以前農業社會要求「食飽」、工業社會要求「食巧」、到資訊社會則要求「食安」。因此，現代有人替「民以食為天」加了一副下聯「食以安為先」，來強調食物要吃得安全。食物的安全性是多面向的問題，可能是農藥殘留、可能是非法添加物、也有可能是食物中是否含有輻射的疑慮。本文將針對食物中可能存在的放射性物質、及其安全性進行討論。

(1) 有關減(低)鈉鹽中的鉀-40：

時下一些環保人士聯合立法委員召開記者會、並經媒體報導披露有關臺鹽

所生產的『健康減鈉鹽』中含有鉀-40 超標的疑慮與風險，應下架或是標示「含放射性」的醒語。

一般食鹽的化學式為氯化鈉 (NaCl)、是生活中不可或缺的飲食調味，因應國人飲食習慣的改變以及飲食逐漸精緻化，高血壓成為現代人的文明病，因此，醫生經常會建議高血壓患者能減少鈉的攝取量，導致食鹽製造業者利用鉀元素 (KCl) 來取代食鹽中的鈉元素，也就是市售所謂的減鈉鹽。

由於鉀-40 是鉀元素的天然放射性同位素，天然存在的豐度約為 0.0117%，

半衰期約為 1.25×10^9 年。若以市售的臺鹽所生產的『健康減鈉鹽』來估算 (如圖 1)，其中氯化鉀所占的重量百分比 47%，則 1 公斤臺鹽『健康減鈉鹽』中含有氯化鉀 470 克、鉀元素約占 246 克、鉀-40 則約為 0.0287 克、含鉀-40 原子總數約 4.32×10^{20} 個。利用下式(1)可計算 1 公斤臺鹽『健康減鈉鹽』的鉀-40 活度為：

$$A = \lambda N = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \times 4.32 \times 10^{20} = 7608 \text{ (Bq)} \quad (1)$$

$A = \text{Activity}$ (鉀-40 的活度)

$\lambda = \text{Decay Constant}$ (鉀-40 的衰變常數 $= \ln(2)/T_{1/2}$)

$T_{1/2} = \text{Half-Life}$ (半衰期，鉀-40 的半衰期為 1.25×10^9 年)

此一數值與媒體爆料的每公斤含有鉀-40 高達 8000 貝克相當，但仍低於原子能委員會在「天然放射性物質管理辦法」中所訂之限值 (10000 貝克/公斤)。事實上，由於鉀-40 是自然環境中即已存在的天然放射性物質，國際間包括：Codex、歐盟、美國、紐澳、加拿大等各先進國家，均無針對

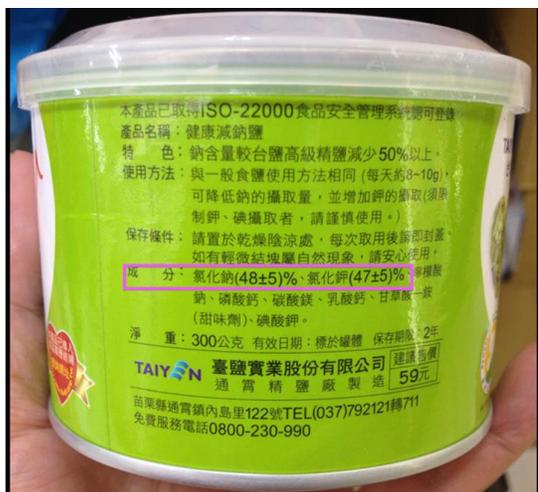


圖 1：臺鹽所生產的『健康減鈉鹽』

食鹽或食品特別訂定鉀-40之限量標準。假設市售的健康減鈉鹽含鉀-40的活度濃度為 8000 貝克/公斤，是否就表示有安全性疑慮？世界衛生組織 WHO 統計平均成人一天約攝食 10 公克的鹽，假設飲食都使用低鈉鹽，再則根據鉀-40劑量轉換參數（游離輻射防護安全標準附表三之四，一般成年人鉀-40 吸入： 6.2×10^{-6} mSv/Bq），故保守推算攝食低鈉鹽一年所造成的劑量約為 180 微西弗（10 公克 / 天 \times 365 天 \times 8 貝克 / 克 \times 0.0062 微西弗 / 貝克 = 180 微西弗），此一劑量與搭乘飛機往返台北與紐約一趟所受宇宙輻射劑量相當，遠小於一般人之年有效劑量限值 1,000 微西弗，況且人體具有生理代謝功能會適度調節體內過多的鉀元素，實際影響的劑量應較前述估算值更低，不會有輻射安全之顧慮。

事實上，鉀-40是天然的放射性同位素（一般的鉀是鉀-39）。鉀-40在地殼裡（岩石、土壤、海水）天然存在；又因為鉀肥也是農作物非常重要的肥料之一（氮、磷、鉀），所以生物體內都會有鉀元素存在，其中自然也包含了一部分鉀-40的存在，就算你不從低鈉鹽中攝取，還是會從其他攝取的食物中將鉀-40攝入體內（圖2為日常飲食中各類食材所含鉀-40的活度濃度）。以鉀元素含量較高的香蕉為例：平均1根香蕉約含有0.5公克的天然鉀，換算成每根香蕉約含有15.5貝克的放射性同位素鉀-40。所以，吃1根香蕉的所獲得的劑量約等於0.096微西弗（15.5貝克 \times 0.0062微西弗/貝克），以每天吃一根香蕉計算，一年因為吃香蕉攝入鉀-40所造成的輻射劑量也只有大約35微西弗。

此外，鉀元素也是人體內不可或缺的電解質之一，鉀在人體內所佔的重量百分比約0.2%左右。依據國外的研究報告指出，人體內鉀-40的含量會因體重、性別（男>女）、以及年齡（在20~40歲含量較高，爾後隨年齡越大越少）而略有差異。以體重70公斤的人來估算，人體內約略固定維持140公克的鉀，其中，鉀-40約佔0.0163克（ $140 \times 0.0117\%$ ），含鉀-40原子約： 2.46×10^{20} 個，此時身體內鉀-40的活度為： $A(t) = \lambda N(t) = 4326 \text{ Bq}$ （約61.8 Bq/kg）。事實上，因為飲食而攝入的鉀元素大多會透過腎臟平衡機制而在幾天之內排出體外，以維持人體內的恆定狀態，因此，上述因飲食（如低鈉鹽、香蕉）而攝入的鉀-40所計算的輻射劑量可能嚴重高估，這也是為什麼低鈉鹽已經在全世界風行40年以上了、網路上也可以找到許多網友實際利用輻射測量儀器度量低鈉鹽所得的數值，卻不會針對低鈉鹽進行管制的原因。

(2) 核災區食品：

在2011年日本發生福島核電廠事故之後，所謂日本核災區食品進口的問題持續引起社會的關注與討論。日本福島核災之後，我國政府規定日本福島周圍5個縣的食品不准進口，其他地區則必須檢附「產地證明」及「輻射檢測證明」方可進口。然而在此規定之下，仍然在2015年發生有日本核災區食品改標濫混入關事件，引起社會大眾對於核災區食品安全的疑慮。

何謂核災區食品？一般核能發電廠若發生嚴重核子事故，可能導致放射性分裂產物外釋與擴散，日本福島核災之後，社會經常討論的放射性分裂產物外釋與擴散主要包括銫-137及碘-131兩種。其中碘-131因為半衰期只有8天，時至今日，大部分當初所外釋的碘-131放射性分裂產物應該已經衰減到可忽略的程度；反而銫-137因為半衰期長達30年，除非透過除污的方式，否則當初所外釋的銫-137活度仍有高達80%的殘留量。這些外釋到環境中的放射性分裂產物可能污染了當地的土壤，經由植物生長的吸附作



資料來源：生活環境與輻射，台灣輻射偵測工作站

單位：貝克/公斤

圖2：日常飲食中各類食材所含鉀-40的活度濃度

用進入食物鏈中，這就是所謂的核災區食品。

理論上，銫-137 並非天然放射性核種，不應該出現在環境試樣（包括：土壤、植物）中，但在實際的環境試樣中卻經常可測得銫-137 的存在，其背後原因可能與開放式的核子武器試爆、或幾次嚴重的核電廠事故（如：車諾比核子事故、福島核電廠事故）有關。大量的分裂產物在核子武器試爆或核子設施嚴重事故發生當下即釋放到外界環境，再藉由地球大氣循環系統擴散到全世界各地。

由於銫元素化學性質活潑、且易溶於水，當核分裂產物銫-137 因嚴重核子事故外釋時容易隨著大氣擴散與水流的移動而產生大範圍污染、最後再被土壤吸收而造成大片土地遭受污染，此時雖然可以透過土壤剷除等除污的方式來降低土壤中的污染量，但殘留在土壤中的放射性活度最終會因為植物的吸收而進入食物鏈中，這也是一般大眾對於核災區食品安全性的疑慮。

銫-137 一旦經由飲食途徑吸入體內，則造成的體內劑量可由下式計算：

$$TED(mSv/y) = SA(Bq/kg) \times M(kg/y) \times IF \times DCF(mSv/Bq) \quad (2)$$

TED = Total Effective Dose (體內約定有效劑量)

SA = Specific Activity (進口食物含放射性物質的活度濃度)

M = 個人食物的平均年攝取量 (假設成年人每年平均攝取 550 公斤)

IF = Import Factor (核災區食品進口比例，假設：10%)

DCF = Dose Conversion Factor (銫-137 劑量轉換參數，游離輻射防護安全標準附表四之一，吸入： 1.3×10^{-5} mSv/Bq)

未來若開放日本核災區食品進口，到底進口食物中含銫-137 活度濃度管制標準應該如何訂定才算安全？也可以利用上式(2)進行初步估算。若以年度約定有效劑量不超過 1 mSv/y 併同上述的假設來推算，進口核災區食品中銫-137 活度濃度只要不超過 1400 Bq/kg 即可符合安全管制標準；即使考慮核災區食品可能存在其他放射性物質（如：銪-90）、或尚有其他可能額外接受輻射劑量的來源，因此將核災區食品中銫-137 所造成的年度約定有效劑量以不超過 0.25 mSv/y 來進行估算，進口核災區食品中銫-137 活度濃度只要不超過 350 Bq/kg 即可符合安全管制標準。相較之下，目前衛福

部所訂定之「食品中原子塵或放射能污染容許量標準」（如下表 1）相對嚴格，若能依照此一表準確實執行嚴格檢驗和把關，核災區食品應不會造成輻射劑量超標的危害。

如若依照目前政府所訂定之「食品中原子塵或放射能污染容許量標準」進行管制，核災區食品所造成的輻射劑量與危害，事實上是相當低微且可忽略，但為什麼民眾對於核災區食品的進口仍存在諸多疑慮，其關鍵應在於政府對民眾的輻射認識教育不足、且民眾普遍存在對政府的不信任度所導致。以 2015 年所發生的日本核災區食品改標矇混入關事件來看，政府長期以來以國家經濟發展為優先，偏重國際貿易與廠商利益，卻忽略民眾健康與食安，不採源頭管理，反以耗時、耗力的逐批查驗制度來取代，但在執行面上卻存在海關食品查驗機制漏洞、人力檢驗設備不足，引發民眾的不信任感。再者政府對於民眾知的權利也有所疏忽，核災區食品進口之後若無法與其他食品在標示上容易分辨區隔，只會讓企業廠商在利潤導向下蒙混圖利、讓一般民眾無法分辨選擇、無所適從，最終將喪失對政府的信任。

表 1：衛福部所訂定之「食品中原子塵或放射能污染容許量標準」

目前管制標準(Bq/kg)	乳品	嬰兒食品	其他食品	液態食品
(銫-137 + 銫-134) 總和	50	50	100	10
碘-131	55	55	100	100

核災區食品表面上看似輻射劑量安全的問題，但追根究底仍是結構上與執行面上的問題。若政府能確實做到嚴格把關、繼而清楚標示，相信民眾在信賴政府的基礎上，核災區食品的安全疑慮也能逐漸消除。

(3) 結語：

食品安全絕對是國民健康不可忽略的一環，食品輻射安全則是食品安全中的一個項目。從最近幾年經由媒體陸續披露有關食品輻射安全議題（如本文所提低鈉鹽與核災區食品），可以理解到一般民眾對於食品安全的疑慮與恐慌、也凸顯出一般民眾希望政府嚴格把關食品安全的期待。由於生活在地球上無可避免的會接受來自於生活周遭的天然輻射，一般從要求「零風險」所延伸的所謂「零檢出」，在食品輻射安全的管制上並不可行，因此必須回歸到科學的基本面來考量民眾的風險：

a. 有關食品中所含的天然放射性元素（如：香蕉中的鉀-40）：事實上無論是土壤、空氣、食物、甚至是人體內都含有天然的放射性核種鉀-40，這些天然存在於身體或食物中的鉀-40每年約造成 0.3 毫西弗左右的劑量（約占天然背景輻射每年造成約 1.6 毫西弗劑量

的 15~20%）。雖然在游離輻射防護安全標準中針對一般人每年接受的輻射劑量以不超過 1 毫西弗為限，但上述標準已明定將天然輻射及醫療輻射排除在外，因此，在此談論食品中天然放射性元素所造成的輻射劑量實在沒有意義、也沒有必要。倘若在食品中刻意添加天然放射性元素（如：低鈉鹽中的鉀-40），行政院原子能委員會已在「天然放射性物質管理辦法」中訂有鉀-40 之活度濃度基準值為 10 貝克/克，目前市面上販售的低鈉鹽並未超過此一限值，且經由保守計算評估，因食用低鈉鹽所造成的輻射劑量仍遠低於 1 毫西弗的法規標準，實在沒有必要過度擔心。另外，倘若單純為了減少鈉的攝取量，減少精鹽用量也是一種更經濟、健康的方式，如此也不用擔心食鹽含鉀-40 的問題了。

b. 有關食品中殘留非天然放射性元素（如：核災區食品中銫-137）：事實上從冷戰時期各國所進行的開放式核子試爆、以及經歷車諾比和福島嚴重核子事故，經由水流擴散或大氣循環所造成的放射性落塵（絕大部分為銫-137 和銾-90）已成為環境背景輻射的一部分，想要完全去除此一背景輻射相當困難。依照目前政府所訂定之

「食品中原子塵或放射能污染容許量標準」進行管制（一般食品銫-137 活度濃度不超過 100 Bq/kg），保守估計（每年食用 550 公斤、10%為核災區食品、含銫-137 活度濃度 100 Bq/kg）每年因核災區食品所造成的輻射劑量仍低於 0.1 毫西弗，可能存在的輻射風險或致癌機率相當低微可忽略。雖然隨著科技的進步，儀器檢測能力也大幅提升，但要曠日費時、耗損經費來偵測極低的放射性活度實在沒有必要；反倒是政府若能確實做到嚴格把關、繼而清楚標示，再透過認識輻射的教育宣導，相信民眾在信賴政府的基礎上，核災區食品的安全疑慮也能逐漸消除。

現今社會資訊蓬勃發達、各類消息傳播的速度超乎想像，在大眾逐漸注重食安的氛圍下，一點點有關食品輻射安全的小道消息，可能快速造成社會大眾的疑慮。個人覺得政府應負擔最大的責任，政府一方面應該加強認識輻射的教育宣導、另一方面應該確實做到嚴格把關、繼而清楚標示，讓民眾有「知」與「選擇」的權利，相信民眾在信賴政府的基礎上，食品中的輻射安全疑慮也能逐漸消除。以上個人見解願與國內同儕交換意見。



參考文獻

1. 行政院原子能委員會，「天然放射性物質管理辦法」，中華民國 96 年 03 月 08 日。
2. 行政院原子能委員會，「游離輻射防護安全標準」，中華民國 94 年 12 月 30 日。
3. E.I. Tolstykh, M.O. Degteva, N.G. Bougrov, and B.A. Napier, "Body Potassium Content and Radiation Dose from 40K for the Urals Population (Russia)", PLoS One. 2016; 11(4): e0154266. Published online 2016 Apr 25. doi: 10.1371/journal.pone.0154266
4. HPS Specialists in Radiation Protection, "Are Our Bodies Radioactive?", <https://hps.org/publicinformation/ate/faqs/faqrdbods.html>.

世界各國核能反應器 除役概述(1)-歐亞各國

作者 施建樑

核能研究所副所長(退休)



前言

所有發電廠，包括燃煤、燃氣與核能，均有一定的運轉壽命；超過運轉壽命，一般而言就不具經濟效益而沒有繼續運轉之必要。早期核電廠之設計壽命約為 30 年，雖然某些電廠被驗證可超過期限繼續運轉。較新的電廠設計為 40 至 60 年之年限，在任一電廠年限到達時，就必須除役、清理及拆解至可被再利用做為其他用途。對於核電廠，除役期包括清理所有含放射性活度物質與設備及後續的結構拆除。

截至 2020 年 3 月，全球有超過 180 座商業核動力反應器及實驗或展示反應器，以及超過 500 部研究用核反應器；另還有許多核子燃料循環設施，已經從運轉中退役下來，其中有些已被全面拆除。根據過去三、四十年之實驗與實務除役作業，可獲得下列主要結論：

- 核電廠的結構與設備等大部分並不具有放射性或只被輕微污染，故大部分拆解的金屬可被再循環利用。

- 已有經過驗證之拆解技術與設備可用來安全地執行核設施除役，並在幾個國家被很好的展示與實踐。
- 核電廠除役成本包括相關廢棄物的處置只占總發電成本一小部分。

核電廠除役之選擇方案

國際原子能總署 (IAEA) 曾對於「除役」定義了三種方案，定義如下：(1) 立即拆除(或在美國被稱為早期廠址外釋“Decon”)、(2) 安全貯存(或稱“Safestor”)及 (3) 封埋(或稱“Entomb”)。

每一方案有其優劣點，由國家的政策來決定採用那一方案或混合方案；在立即拆除的方案，除役的責任不移轉給未來世代；而運轉人員的經驗與技術亦可在除役計畫中被利用。替代方案安全貯存則允許先讓殘留放射性活度隨長時間有顯著的降低後，可在最終拆除時減少輻射危害。而預期的機械拆解技術的進步，將也使得危害與成本降低。

在核反應器的情形，大約有 99% 的總

放射性活度與用過核子燃料有關，但在永久停機後隨即會被移開。而除了任何電廠的表面污染外，剩餘的放射性活度則來自活化產物，它係由如鋼製組件長期曝露在中子照射下所產生。它們的原子被改變為不同的同位素如鐵-55, 鐵-59, 鈷-60 與鋅-65；有些是具高放射性的發射加馬射線。然而，它們的半化期分別約為 2.7 年、45 天、5.3 年與 245 天。所以，在關廠 50 年以後，它們的放射性活度幾乎消失殆盡，且其對於工作人員的風險也大大地減除。

除役經驗

過去已累積不少不同核設施之除役經驗；大約有 115 座商業用動力反應器、48 座實驗或展示用動力反應器，以及超過 250 座研究用反應器與核子燃料循環設施，已經從運轉中退役。其中超過 160 座動力核反應器(包含實驗用與展示用機組)，至少有 17 座已被完全地拆除，約 50 座正拆除中，50 座處於安全貯存中，3 座則被封埋著；至於其餘的則除役策略尚未確定。

表 1 各國核反應器機組永久停機組數

國家	停機組數
阿美尼亞(ARMENIA)	1
比利時(BELGIUM)	1
保加利亞(BULGARIA)	4
加拿大(CANADA)	6
法國(FRANCE)	13
德國(GERMANY)	30
義大利(ITALY)	4
日本(JAPAN)	27
哈薩克(KAZAKHSTAN)	1
韓國(KOREA, REPUBLIC OF)	2
立陶宛(LITHUANIA)	2
荷蘭(NETHERLANDS)	1
俄羅斯(RUSSIA)	8
斯洛伐克(SLOVAKIA)	3
西班牙(SPAIN)	3
瑞典(SWEDEN)	6
瑞士(SWITZERLAND)	2
台灣(TAIWAN)	2
烏克蘭(UKRAINE)	4
英國(UNITED KINGDOM)	30
美國(UNITED STATES OF AMERICA)	37
總計(Total)	189

世界各國核電廠已永久停機的統計如表 1 所示。由於各國的詳細除役狀況蒐集不易，僅就目前可獲得的資訊敘述如表 1。

歐洲反應器

法國電力公司為了對於其位於 Chinon(x3), Bugey(x1), Marcoule(x2) 與 St Laurent(x2)核電廠的已退役的 8 部氣冷式反應器正進行除役中，選擇先部分拆除，並延後 50 年後再進行最後的拆除。另有一座 EL-4 (Monts

D'arree)，是採重水的氣冷式核反應器。此外，還各有兩座 PWR 與 FBR，分別為 Fessenheim-1、Chooz-A (Ardenne) 與 Phenix、Super-Phenix，也分別已永久停機。故目前總共有 13 座機組停機。由於在這些電廠內還有其他核反應器持續運轉中，對於安全貯存期間之監測並不會增加多少費用。另外，法國已在 Marcoule 設置處理拆解自核設施之廢金屬的回收工廠，這些回收之金屬中含有少量的活化產物，將會再回收使用在其他

核電廠中。

英國已有 30 座反應器(其中有 29 座為早期 Magnox 石墨緩和劑型式反應器，以及 1 座蒸汽重水反應器 Steam Generating Heavy Water Reactor (SGHWR)的 Winfrith 核電廠)開始進行除役中，最早的一座 Berkeley 核電廠 (2 x 138 MWe, Magnox 反應器*)；在運轉了 27 年後，於 1989 年因經濟效益不佳而關閉，用過核子燃料移除於 1992 年完成。冷卻池經洩水、清洗，而汽機廠房被拆除。核反應器廠房則

處在長期安全貯存狀態。最後，它們也要被拆除，廠址則恢復為野地。其他的英國核反應器廠址也按照同樣模式進行中。

西班牙的 Vandellos-1，是一座 480 MWe 氣冷式石墨反應器，在運轉 18 年後，於 1990 年因汽機火災修復不符經濟效益而關閉。在 2003 年，ENRESA 決定了第二階段的核反應器除役及拆解計畫，將允許大部分的場址被釋出；在 30 年的安全貯存後，讓活度水平的 95% 已衰減到可外釋時，則電廠的其餘部分亦將被移除。該為期 63 個月的計畫，所需費用為 0.93 億歐元。

此外，位於 Zorita 的 Jose Cabrera-1 核電廠，只有一部 150 MWe 的 PWR 機組，它於 1969 年 8 月 13 日商轉，2006 年 4 月 30 日永久停機；Enresa 於 2006 年向主管機關提交初步拆解計畫，工業部於 2006 年 4 月 20 日核定永久停機，並展開用過核子燃料管理及前期拆解工作。2008 年 Enresa 向主管機關申請拆解許可；2009 年主管

機關核定，電廠開始執行用過核子燃料的乾貯，並安置在廠內中期貯存設施。2010 年 2 月 1 日，工業部授權將該廠轉移給 Enresa，以便開始執行除役；並也開始進行傳統組件及汽機廠房的設備。2011 年開始展開放射性污染區域的拆解；2012 年水下切割反應器壓力槽內部組件，並在輔助廠房將來自核反應器廢棄物盛裝至第一個護箱內。2013 年反應器壓力槽內部組件切割完成，並開始執行蒸汽產生器的切割。2014 年開始反應器壓力槽的切割；2015 年反應器壓力槽與蒸汽產生器的切割分別完成，另其他放射性污染區域的組件與系統均完成拆解。2016 年拆解生物屏蔽並進行建築結構的除污，也進行了土壤清理設施的建置與試驗；2017 年-2018 年持續執行建築結構的除污，並開始拆除主煙囪及最終放射性拆除。2019 年建築外釋、除污、拆除與挖掘。2020 年進行其它建築拆除與挖掘及最終廠址輻射特性調查。另一座 Santa Maria De Garona 核電廠，亦只有一座 466

MWe 的 PWR 機組，於 1971 年 5 月 11 日開始商轉，2017 年 8 月 2 日永久停機，目前正在申請拆解許可及規劃中。

德國 19 座已永久停機機組均採立即拆除。前東德 Greifswald 核電廠曾有五部機組在運轉，被下令停機並選擇採用立即拆除策略。15 MWe 的 Kahl 實驗用 BWR 核電廠，在經 25 年的運轉後於 1985 年停機；在除污後，該電廠已完全拆除且廠址已復原可無限制使用。同樣地，位於 Bavaria 的 Niederaichbach 100 MWe 核電廠，已在 1995 年被宣布適合無限制農業使用；在移除所有核系統，包括輻射屏蔽與一些被活化物質，剩餘的電廠已低於放射性活度可接受的限值，而州政府也核准最後建物拆除及廠址之解除管制。250 MWe 的 Gundremmingen-A 機組，為德國第一座商業用核反應器，於 1966-77 年期間運轉。自 1983 年起，開始除役工作，於 1990 年使用水下切割技術，將高污染部分移除。該計畫驗證了可以不需長期之延遲，以安全經濟的方法完成除役，且其大多數的金屬均予回收再利用。2011 年 3 月，由於政治因素而停機的 8 部核能機組，大多數將在約超過 15 年內完成拆除；其中有 4 部機組已提撥 380 億歐元，作為除役與廢棄物處置之費用。

*氣冷式反應器之除役費用在每單元容量上，比輕水式反應器高很多，對 Magnox 至少為 5 倍。這是因為其廢棄物體積大及需要處置石墨緩和劑。Magnox 每單元容量的除役廢棄物體積為西方輕水式反應器的 10 倍。

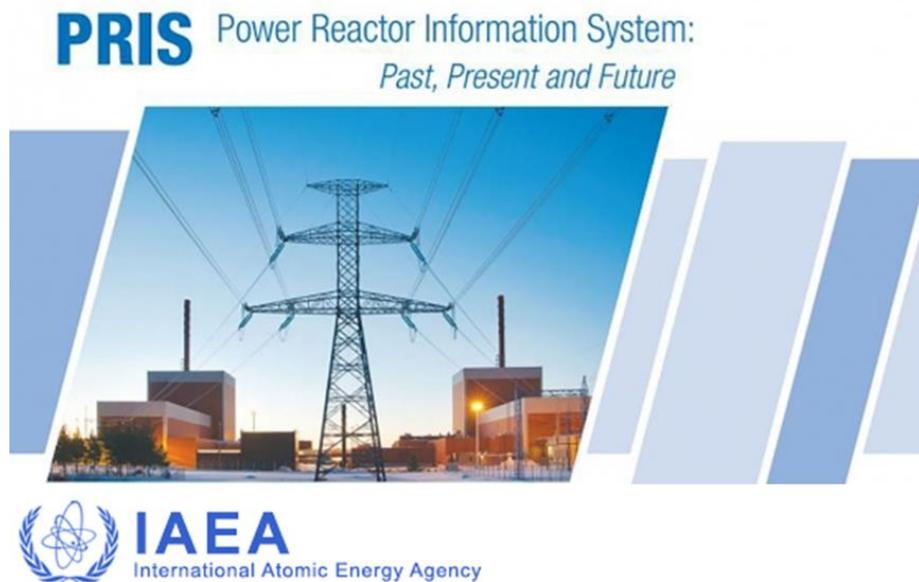
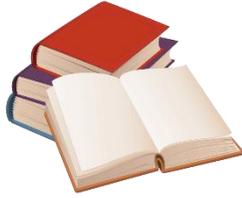


圖 1 國際原子能總署 PRIS 系統



訓練班課程(109 年度)

放射性物質或可發生游離
輻射設備操作人員研習班

A 組 36 小時-許可類

A4 高雄 文化大學推廣部
8 月 11 日~ 8 月 18 日

B 組 18 小時-登記類

B17 台中 文化大學推廣部
9 月 8 日~ 9 月 10 日

B18 高雄 文化大學推廣部
9 月 15 日~ 9 月 17 日

B19 台北 建國大樓

10 月 13 日~ 10 月 15 日

B20 新竹 帝國經貿大樓

10 月 20 日~ 10 月 22 日

B21 台中 文化大學推廣部

11 月 4 日~ 11 月 6 日

B22 高雄 文化大學推廣部

11 月 18 日~ 11 月 20 日

B23 台北 建國大樓

11 月 25 日~ 11 月 27 日

B24 新竹 帝國經貿大樓

12 月 9 日~ 12 月 11 日

B25 台中 文化大學推廣部

12 月 23 日~ 12 月 25 日

輻射防護專業人員訓練班：
輻防員(108 小時) / 輻防師
(144 小時)

員 38 期

新竹 帝國經貿大樓
第一階段

12 月 14 日~ 18 日

第二階段

12 月 21 日~ 25 日

第三階段 110 年

1 月 11 日~ 15 日

第四階段

1 月 18 日~ 21 日

進階 23

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

8 月 12 日~ 8 月 14 日

第二階段

8 月 17 日~ 8 月 19 日

高雄 科學工藝博物館南館

10 月 7 日(上午&下午)

台中 文化大學推廣部

10 月 27 日(上午&下午)

台北 建國大樓

11 月 10 日(上午&下午)

新竹 經濟部專研中心

11 月 17 日(上午&下午)

高雄 科學工藝博物館南館

12 月 3 日(上午&下午)

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
經濟部專研中心：新竹市光
復路二段 3 號

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

國立科學工藝博物館-南館：
高雄市三民區九如一路
797 號
文化大學推廣部高雄教育
中心：高雄市前金區中正
四路 215 號 3 樓

**鋼鐵建材輻射偵檢人員訓
練班**

鋼 3 新竹 帝國經貿大樓

9 月 23~ 9 月 24 日

課程安排問題，請聯絡本會，電話 (03) 572-2224

分機 313 李貞君 (繼續教育)；

314 林珏汶 (專業人員)；

315 邱靜宜 (鋼鐵建材、放射物質與游離輻射設備)

傳真 (03) 572-2521315



輻防新聞廣場

最新證照考試日期與榜單

- ➔ 行政院原子能委員會 109 年第 2 次輻射防護及操作人員測驗。[訊息連結](#)

報名期間：民國 109 年 8 月 3 日起至 8 月 21 日截止。

測驗日期：民國 109 年 10 月 24 日(星期六)。

測驗地點：

台北試區：考試院國家考場(台北市文山區木柵路 1 段 72 號)

高雄試區：高雄市立三民高級家事商業學校(高雄市左營區裕誠路 1102 號)

詳細報名簡章等相關測驗資料，請點選下方(相關網站)即可下載瀏覽。

相關連結：[輻防及輻安測驗](#)

國內新聞

- ➔ 原能會發布「有關 109 年 8 月 23 日媒體刊載「洪水湧入北韓核廢料池！專家憂「輾轉進入居民腹中」」之回應說明」。[訊息連結](#)

有關媒體刊載「洪水湧入北韓核廢料池！專家憂「輾轉進入居民腹中」」報導，原能會本於核能安全主管機關職責，謹就相關報導內容回應說明如下：

一、我國核能電廠所使用之核子燃料，均由國外直接進口，我國境內並無鈾礦煉製廠，不會有類似北韓鈾礦場與精煉工廠核廢棄物的問題產生，請民眾放心。原能會將持續追蹤國際原子能總署相關調查結果。

二、我國核能電廠之放射性廢棄物處理貯存設施，均經原能會嚴密審查，安全分析報告內含場址水文調查(地表水、地下水與洪水)，要求工程具防洪排水系統安全設計，並能防止雨水、地下水與洪水滲入，確認符合安全要求後，才會同意使用。

三、原能會定期檢查並執行核設施環境監測，汛期與颱風前要求各設施完成防災整備，並依照「放射性物料管理局天然災害通報應變作業程序」監控各種災害警報，災前即提前部署應變人力，臨災時依程序應變，災後回報設施狀況，以確保放射性廢棄物處理貯存安全。

四、原能會為全民的原能會，秉持安全管制專業，持續嚴格監督國內放射性廢棄物營運安全，保障民眾健康及環境品質，請民眾安心、放心。(發布日期 109 年 8 月 24 日)

➔ 文匯報報導「冬陽天地：乳癌普查」。 [訊息連結](#)

乳癌在香港是女性癌症之中的第一位，最新資料 2017 年香港發現乳癌新症 4,373 名，死亡人數 721 名，平均每 15 名香港人當中就有一位會患有乳癌。

眾所周知癌症愈早發現治癒率愈高，所受的痛苦愈少。

香港人愈來愈接受定期的乳房檢查，特別是高危一族，例如有乳癌的家族史，少生育，遲收經，接受女性荷爾蒙治療的人士更加應該定期檢查。

不過有很多人有不同的疑慮：聽說有 2D 和 3D 的乳房 X 光造影，如何選擇呢？

2D 是平面的 X 光造影一邊照兩張相兩邊四張相，3D 就 1mm 照一張的斷層照片，一邊乳房要照幾十張，而使用的輻射量和時間差不多，對於亞洲人或者比較年輕的女士更加清楚，更容易發現一些微小的病變和乳腺組織結構有改變的影像。減少複照的機會，而痛楚稍為輕。但價錢較貴。有些人想用超聲波來代替乳房 X 光，這樣既不痛又無輻射不是更好嗎？

乳房 X 光和超聲波是不能互相代替的。它們看的東西不同。X 光看的是很微細的鈣化點，組織扭曲變化，而超聲波看不到這些。但超聲波看到一些腫塊，能夠分辨是液體性水囊還是硬的腫塊以及其邊緣、結構、血流量。X 光乳房造影應該由什麼時候開始照呢？

在美國 40 歲以上建議每兩年照一次，但有些國家則建議 50 歲才照。因為太年輕乳腺組織比較細密而難以分辨裏面有沒有腫瘤，這個時候乳房超聲波和 3D 技術會更好。而且生育年齡的女士盡量減少接受 X 光檢查。事實上新的 X 光乳房造影的輻射量並不是太高，等於坐飛機由香港來回一次倫敦的輻射量。

最近有些人的短訊群組裏在講照乳房 X 光的時候要戴一個保護甲狀腺的護罩。其實不需要，為此美國放射學會發了一個通告說不需要，因為這個護罩會阻住照乳房，如果乳房的組織照得不好反而要照多兩次更加增加輻射次數。在照的時候放鬆和 X 光技師合作的話照得相對舒服又省時，既減少痛楚，又減少在 X 光下暴露所需要的時間。（發布日期 109 年 8 月 28 日）

➔ TechNews 報導「便宜又免煩惱輻射問題，核廢料電池使用壽命 10 年起跳最長 2.8 萬年」。 [訊息連結](#)

智慧型手機、筆電、電動車中所使用的鋰離子電池，它無所不在並大幅改變人們的科技生活，不過科技日新月異，鋰電池在未來還能坐穩儲能龍頭嗎？最近美國加州新創 NDB 研發出不管是基於環保還是實用性皆屬上乘的「核廢料電池」，10 年至 2.8 萬年都不用充電，而且比鋰離子電池還要便宜。

核廢料電池顧名思義，每一顆電池的核心都是人人為之煩惱、遺臭萬年的核廢料，NDB 用石墨慢化反應爐中的石墨核廢料，製成特殊的「奈米鑽石 (nano-diamond) 電池」。

這些石墨核廢料含有大量放射性同位素碳-14，其中碳-14 較不穩定，它會經過 β 衰變、轉變為氮 -14 原子，在蛻變過程中釋出 β 衰變電子、反微中子。NDB 則將碳-14 石墨核廢料純化並製造出微小的碳-14 鑽石，鑽石結構可以當作半導體與散熱器，用來收集並傳遞電荷。

團隊認為並不用擔心放射性污染等問題，團隊有製做出既便宜、沒有放射性的碳-12 鑽石外殼，不僅可以防止輻射外洩，也能充當超級硬的防護盔甲，因此做成電池也不用擔心各種撞擊、電池的輻射還比人體少。據報導，團隊將奈米鑽石材料層層堆起後，再與微型整合電路板、小型超級電容組合後，就能依設計製成 AA、AAA、18650、2170 等各式電池。

NDB 認為與其說是電池，不如說是微型發電機，畢竟它不需要充電。團隊表示，奈米鑽石電池應用廣泛，智慧型手機、電動車為基本，更能當作心律調整器等各種植入性電子儀器的供電核心，奈米鑽石電池使用壽命長，就不需要再動刀特定更換儀器電池。

公司創辦人兼執行長 Neel Naicker 也舉例，如果 iPhone 使用這種電池，雖然電池大小跟原本的鋰離子差不多，但我們不需要每天幫手機充電，可能只要一週、一個月甚至幾十年充電一次。如果用在電動車上，那麼電池在 90 年內都可以維持超高功率密度。NDB 團隊宣稱未來技術若更成熟，依照電池應用，壽命將長達 10 年至 2.8 萬年。(發布日期 109 年 9 月 2 日)

- ➔ 台灣新生報報導「核安第 26 號演習 9~11 日核 2 廠登場」。[訊息連結](#)

原能會表示，一〇九年「核安第廿六號」演習，將於九月九日至十一日，假核能二廠及鄰近地區演習三天，將就核能二廠因天然災害，併同發生核子事故複合式災害，依超前部署及分階段的民眾疏散策略，並將 COVID-19 防疫作為納入各項演練，以強化應變處置能量。今年演習分別由台電公司與核能二廠、新北市政府、基隆市政府依序作為三天演練的主軸，並由台北市政府、國軍支援中心、輻射監測中心等單位共同參與任務執行。

本次實兵演練重點，包括九月九日由核能二廠實施機組搶救，台北市政府、國家災害防救科技中心與輻射監測中心，對大屯火山群活動與環境輻射進行監測整合作業；十日由新北市執行各項民眾防護行動，並演練居家檢疫者疏散程序，另於三重綜合體育館實施避難收容時，提供關懷弱勢族群友善環境以及實施 COVID-19 防疫措施等作為；十一日由基隆市運用無人機巡查海灘遊客勸離情形，並執行學校師生預防性疏散，另由海巡署、陸軍、內政部空勤總隊加入輻射監測中心，協同執行海陸空域輻射偵測。

原能會特別提醒，十日演習將發放核子事故警報，並利用災防告警細胞廣播服務 (CBS)、區域簡訊 (LBS)、市話及民防廣播系統進行通知，同時透過新北市、基隆市及國家災害科技中心 LINE 群組，與警察廣播電台提供演習訊息，請民眾收到訊息時不用驚慌。(發布日期 109 年 9 月 4 日)

- ➔ 中央通訊社報導「月球輻射是地球 200 倍 太空人有罹癌和白內障風險」。[訊息連結](#)

(中央社華盛頓 26 日綜合外電報導) 美國計劃 2024 年執行太空人再度登月的計畫，不過最新研究顯示，月球輻射量是地球的 200 倍，如此將使太空人健康受損，可能引發癌症、白內障與神經退化疾病。

德國與中國學者組成的團隊，根據嫦娥四號探測器去年執行實驗的結果，發表研究報告刊登於期刊「科學進展」(Science Advances)。

研究報告的共同作者、德國基爾大學 (University of Kiel) 天體物理學家

威默-施溫布魯格 (Robert Wimmer-Schweingruber) 表示：「經量測月球的輻射量是地球表面的 200 倍左右，並且是紐約至法蘭克福航班的 5 到 10 倍。」

研究團隊另發現，太空人在月球上每日暴露在 1369 微西弗的輻射劑量，是國際太空站組員每日輻射劑量的約 2.6 倍。

由於美國打算在 10 年內重返月球，未來太空輻射將是太空人面臨的最大危險之一，因太空輻射可能會造成持久的健康影響，導致太空人罹患白內障、癌症和神經退化障礙等疾病。美國國家航空暨太空總署 (NASA) 日前公布太空人 2024 年再度登月的最新計畫，並估計在限期內完成需斥資 280 億美元 (約新台幣 8191 億元)，其中打造登月模組得花費 160 億美元。

(發布日期 109 年 9 月 26 日)

➡ 台視新聞報導「超狂! 12 歲男房內實現"核融合" 破金氏紀錄房間打造核融合裝置 門上貼警語:小心輻射建造"核融合"高度危險 少年全程戴手套.頭盔; 父母選擇相信力挺 少年實現"核融合"破紀錄」。 [訊息連結](#)

在自家房間也能打造核融合裝置。美國有個少年，12 歲的時候在房間，建造出一台小型的核融合裝置，打破金氏世界紀錄，成為全世界最年輕製造出核融合裝置的人。

這名美國少年，外表看似平凡，但其實是個金氏世界紀錄保持者。你沒聽錯，傑克森 12 歲時，受到核物理學家威爾遜啟發，在自己房間建造小型的核融合裝置，還，要大家小心輻射。傑克森興奮展示裝置，講起物理有模有樣，十分專業。這台裝置溫度維持在 1 億度凱氏溫標。由於建造過程十分複雜跟危險，傑克森花了兩年完成，全程都得戴手套跟頭盔。傑克森的研發獲得父母大力支持，不但打破金氏世界紀錄，還獲得 7.5 萬美元的獎金，約台幣 214 萬元，傑克森希望核融合技術能為世界帶來乾淨能源，幫助對抗氣候變遷。

(發布日期 109 年 10 月 12 日)

世界各國核能反應器除役概述(II)

— 加拿大與美國

作者 施建樑

核能研究所副所長(退休)



圖片引用NRC <https://www.nrc.gov/waste/decommissioning.html>

前言

前一篇專題文章中，作者先就歐洲國家如法國、英國、西班牙、德國與俄羅斯主要核能國家的除役狀態，以及亞洲國家中的日本與韓國作介紹；而在本篇文章則繼續就美洲核能先進國家加拿大與美國的電廠除役現況收集資料彙整。並對世界主要核能先進國家間的除役進行比較，提出心得與結論供閱讀者參考與思考。

加拿大

加拿大現有 19 座商用核機組及 2 個研究用反應器在運轉中。另有 6 部機組已永久停機，包括 Rolphton NPD (Nuclear Power Demonstration) 核電廠 (PHWR) 25 MWe，1962 年 10 月 1 日商轉，1987 年 8 月 1 日永久停機。Douglas Point 核電廠 (PHWR) 218 MWe，1968 年 9 月 26 日商轉，1984 年 5 月 4 日永久停機。Gentilly-1 (HWLWR) 266

MWe，1972 年 5 月 1 日商轉，1977 年 6 月 1 日永久停機；在燃料移除後，目前正處於安全貯存狀態。Gentilly-2 (PHWR) 675 MWe，1983 年 10 月 1 日商轉，2012 年 12 月 28 日永久停機。Pickering 核電廠 2 號機 (PHWR) 542 MWe，1971 年 12 月 30 日商轉，2007 年 5 月 28 日永久停機；Pickering 核電廠 3 號機 (PHWR) 542 MWe，1972 年 6 月 1 日商轉，2008 年 10 月 31 日永久停機。前三部核機組 Gentilly 1, Douglas Point and Rolphton NPD，均屬於 AECL，預期在 30 年內完成拆除；第四部核機組 Gentilly 2 已移除所有燃料，而重水則在 18 個月內至 2014 年中處理完成；主管機關則已頒布 2016 至 2026 年期間的除役許可執照，核反應器主要部分將先封閉，並先安置 40 年等放射性活度降低後才開始拆除；其所有 27,000 燃料束預期自 2020 年前完成乾貯 (Macstor)；整個歷經 50 年的除役經費約 18 億元加幣。其他兩部機組 Pickering 核電廠 2、3 號機，則屬於 Ontario 電力公司，它們在 3 年內開始



圖 1 加拿大核反應器現況

安全貯存，在 13 年內所有用過核子燃料移入乾貯設施，在 30 年內將所有用過核子燃料移出電廠，並在 40 年內完成拆除。

美國

美國的經驗是多樣性的，目前約有 10 部反應器採用安全貯存；而 20 部多數為單機組電廠，則採用或曾採用過立即除役。

在 2017 年初開始，有一種廠家聯盟(加速除役夥伴)逐漸形成，如由北星服務集團(NorthStar Group Services)領導，結合美國 Orano 公司(前 Areva)，去爭取並除役已停機的美國核反應器設施，且接收其用過核子燃料。另有國際綜合除役(Comprehensive Decommissioning International, CDI)於 2018 年由 SNC-Lavalin 與 Holtec 國際除役公司(Holtec Decommissioning International, HDI)共同成立，HDI 負責 Holtec 所擁有電廠的持照運轉者，並提供業主協助監督 CDI。另 HDI 亦管理除役信託基金與其他業主關切的如：申照策略、保險、土地及與政府間的介面。此外，EnergySolutions 也已經積極扮演同樣的角色。

除役之程序由核子管制委員會(NRC)訂定，已累積了相當的經驗。總計有 32 部動力反應器已被關閉及除役；NRC 要求已關閉核反應器之運轉執照應予終止，且除役活動應在 60 年內完成。廠址釋出通常不涵蓋廠內用過核子燃料乾貯設施，將等待能源部(DOE)設置的國家處置場在未來完成後移往。

Rancho Seco 為一座單一機組 913 MWe, PWR 核電廠，位於加州沙加緬度，1989 年關閉，1995 年 NRC 核定其安全貯存計畫。然而，業主後來決

定加速拆除，並在 2009 年完成，但仍留下約 3 英畝作為 NRC 管轄的廢棄物貯存設施；另有 32 英畝土地釋出作為無限制使用。

在多機組核電廠，則會選擇第一部關閉的機組先安全貯存，直到其他機組結束其運轉壽命，以便所有機組可依序進行除役。這將使職員運用及用來切割與遙控操作的設備最適切化，且可使得費用更節省。

TMI-2(PWR)在經過 14 年來之努力，包括 1979 年事故的核子燃料、碎塊與污染水已確實被清除，位於賓州的 TMI-2(PWR)將處於燃料移除後監測貯存(安全貯存)狀態，直到一號機最終停止運轉；此時，兩部機可同時進行除役。另 EnergySolutions 與 FirstEnergy 共同獲得二號機除役的合約。

位於加州的 San Onofre 1 是一座 436 MWe 的 PWR 核電廠，在 1992 年關閉後，原規劃先安全貯存直到二、三號機(各為 1,070 MWe 的 PWR 核能機組)之運轉執照分別於 2022-23 年到期後，三部機組將同時開始除役。然而，在 NRC 更改其法規後，一號機拆除提前於 1999 年開始，故其變為主動除役計畫，並大部分於 2008 年完成，少量工作則將保留到於 2013 年 5 月二、三號機停機後一起完成。2016 年 4 月，加州公共事業管理會核准來自信託基金之除役總經費為 44.1 億美元；南加州愛迪生電力公司則稱當時基金已有 33.7 億美元。用過核子燃料將從 2024 年開始移除至廠內獨立用過核子燃料中期貯存場(ISFSI)，而拆除電廠預計於 2030 年完成。並於 2016 年 12 月選定 SONGS Decommissioning Solutions 公司(由 Aecom 與 EnergySolutions 聯合組成)為總包商。

另一美國的立即除役計畫為 60 MWe Shippingport 是一座 PWR 核反應器，它是在 1957-1982 年期間商業運轉。它被用來展示一座商業級別核電廠能被安全及經費有效運用下被拆除，以及廠址能被早期地釋出。在 2 年內完成燃料移除，之後 5 年，廠址被無限制使用釋出。由於反應器壓力槽較小，反應器壓力槽將完整的移除並送往處置場。至於大型設備則被切割分解。

立即除役亦為 Fort St. Vrain 所選擇的方案，它是一座 330 MWe 高溫氣冷式反應器(HTGR)，於 1989 年關閉。它是以固定總價 1.95 億美元合約來執行(成本為 1 美分/度電，雖然只有 16 年的運轉)，且該計畫準時完成解除其廠址的管制，以及於早在 1997 年即終止其運轉執照，為美國大型動力式核反應器完成除役之典範。

Shoreham 為一座 BWR 核電廠，位於長島，只發十分少量的電且從沒有獲頒完整運轉執照。它在 1989 年停機，並變為一立即除役計畫，於 1994 年完成。位於南達科他州的 59 MWe Pathfinder 為展示用 BWR 核反應器，也是在短暫的運轉後，於 1967 年停機；亦變成一立即除役計畫，於 1992 年完成。位於康乃狄克州的 Haddam Neck，為一座 560 MWe PWR 核電廠，在 29 年運轉後於 1996 年關閉，也採立即除役計畫，於 2007 年完成。

對於位於奧勒岡州的 Trojan (1,180 MWe, PWR)核電廠，拆除工作是由業主自行執行；該廠於 1995 年關閉，同年蒸汽產生器被移除、運送及處置在 Hanford 低放處置場；RPV(含內部組件)則於 1999 年被移除並運送至 Hanford 低放處置場。除了用過核子

燃料外，廠址於 2005 年被釋出作為無限制利用；另其冷卻塔於 2006 年被拆除。它相對而言，是一個低廉的除役計畫：約只花費 3 億美元。Yankee Rowe (167 MWe, PWR) 在運轉 30 年後，於 1991 年停機，它亦是一立即除役計畫，建物拆除於 2006 年完成；而執照終止於 2007 年 8 月，除了 2 英畝的用過核子燃料乾式貯存外，允許公眾無限制進出。

另一美國立即除役計畫為 Maine Yankee，是一座 860 MWe PWR 核電廠，在 24 年運轉後，於 1996 年停機。圍阻體結構最後在 2004 年拆除，除了 5 英畝做為用過核子燃料乾貯設施外，廠址則於 2005 年釋出作為公眾無限制使用，全程計畫在按時預算內(約 5 億美元)完成。

Haddam Neck/Connecticut Yankee (590 MWe PWR)，在 29 年運轉後，於 1996 年停機；除役於 1998 年開始，建物拆除於 2006 年完成。廠址則於 2007 年釋出給公眾無限制使用，除了 2 英畝做為用過核子燃料乾貯。土地內所殘留的污染低於 NRC 的每年 0.25 mSv 之最高輻射劑量限值。

位於密西根州的 72 MWe Big Rock Point，是一座 BWR 核電廠，於運轉了 35 年運轉後，在 1997 年停機。在 2006 年，大部分回歸為綠地狀態。於 2007 年 1 月，大多數土地釋出作為無限制公眾使用，但仍有 43 英畝做為用過核子燃料乾貯用，以便日後運往國家處置場；總費用為 8.36 億美元

Vermont Yankee 是一座 535 MWe 的 BWR 核電廠，於 2014 年永久停機後採安全貯存，並預計在許多年後花費 5.77 億美元來除役。然而，Entergy 決定加速進行除役，安排將整個場轉移及

賣給由北星服務集團為首的除役公司聯盟，他們將於 2030 年完成除役並販售該已清理乾淨的土地。用過核子燃料則已於 2017 年移出。美國 Orano 公司則獲得切割及移除反應器壓力槽與其內部組件的合約。

Exelon 電力公司的 Zion 1 & 2 (2 x 1,098 MWe, PWR)，於 1998 年關閉並安全貯存，後考慮加速除役。Exelon 委託給一專業公司 EnergySolutions，執行移除該電廠並將廠址回復為綠地。為達此目標，電廠的執照與除役基金轉移給 EnergySolutions，而成為擁有者與持照人，廠址將於約 2020 年返還給 Exelon。用過核子燃料將留在廠內，直到日後運往國家處置場。而在 2015 年 1 月前，EnergySolutions 已利用不到 12 個月時間，將用過核子燃料轉至 61 組 Magnastor 乾式護箱進行貯存，亦即安置在 ISFSI。EnergySolutions 也已經同樣地完成一座 50 MWe LaCrosse 的 BWR 與另一座 67 MWe Big Rock Point 的 BWR 核電廠除役。也簽下了 Three Mile Island 2 號機的除役合約。Exelon 的 Oyster Creek 是一座 619 MWe 的 BWR 核電廠，位於紐

澤西州，將由 SNC-Lavalin and Holtec 聯合組成的國際綜合除役公司 (CDI) 負責拆除與清理，於 2019 年開始，預計在少於 10 年內完成。該廠執照於 2019 年 7 月由 Exelon 轉移給 CDI。CDI 也將是 2019 年停機的 Pilgrim BWR 核電廠、分別於 1974 年, 2020 年, 2021 年停機的 Indian Point 1, 2&3 號核能機組，以及於 2022 年停機的 Palisades 核電廠的除役總包商。

Entergy 的 Indian Point 核電廠在所有權轉移給 Holtec 後，預期花費 23 億美元在約 12-15 年間，由 CDI 完成除役與拆解。其中，一號機為 277 MWe，自 1974 年起進入安全貯存，將花費 5.98 億美元；而二號機為 7.02 億美元及三號機 10 億美元。除役信託基金為這三個機組提撥的經費，在 2019 年時為 21 億美元，故預期在三號機停機時應可補足。只是 ISFSI 將保留在廠內直到 2032 年。

Duke 電廠的 Crystal River 3 將在 60 年期間以安全貯存方式執行除役，預期花費 11.8 億美元(2013 年幣值)。雖然該反應器只運轉了 35 年，在該期間儲備的基金將孳生利息，使得可以完



圖 2 LaCrosse 電廠排放煙囪拆除俯瞰圖

圖片來源：[ENERGYSOLUTIONS](https://www.energysolutions.com)

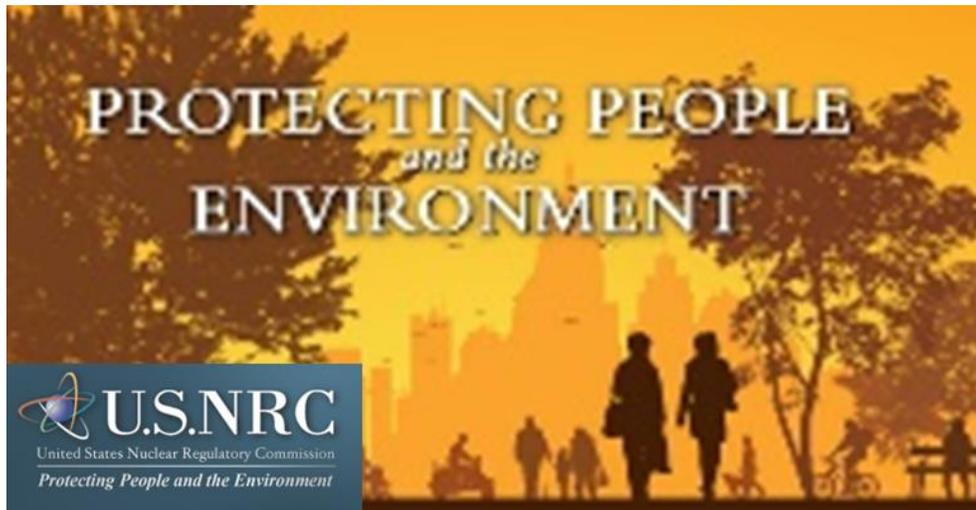


圖 3 美國核管會-NRC-的宗旨目標

整涵蓋所需費用。若採立即拆除 (Decon)，則只要花費 9.94 億美元。

但這將只剩下有幾年的運轉時間，不能讓除役基金成長到足以涵蓋所需費用；將使得佛州用戶需支付不足的 1.95 億美元。建造一座場內乾式貯存設施並於 2016 年運行，用過核子燃料自 2017 年夏天開始移除後，並於 2018 年 1 月完成。用過核子燃料預計保留在廠內直到 2036 年為止，接著將移往聯邦設施。安全貯存約在 2070 年將機組的剩餘組件移除時結束，並在 2074 年進行廠址復原。

然而，在 2019 年 5 月，Duke 宣布與加速除役夥伴(北星與 Orano 聯合廠家) 簽約，將在 2027 年完成 Crystal River 核電廠的除役，費用將由除役基金支應，其於 2019 年第一季時值 7.17 億美元。合約內容將潛在的經費超支與後續的虧空轉移給聯合廠家。Duke 將保留擁有執照，以及土地與信託基金的所有人。然而，加速除役夥伴將成為負責電廠運轉及廠內相關乾式貯存設施與用過核子燃料的所有人。

Omaha Public Power District(OPPD)

的 Fort Calhoun，是一座 482 MWe 核電廠，在運轉 43 年後於 2016 年關閉。從 2019 年由 EnergySolutions 負責除役，但原先是打算花費 13 億美元採安全貯存；不過，2018 年 10 月，OPPD 董事會決定與 EnergySolutions 簽約，大約可在 2020-2030 年中期完成清理，並可節省 2 億美元。

做個總結，美國採立即拆除並完成除役的核電廠有：Big Rock Point, Elk River, Fort St Vrain, Haddam Neck/Connecticut Yankee, La Crosse, Maine Yankee, Pathfinder, Rancho Seco, San Onofre 1, Saxton, Shippingport, Shoreham, Trojan, Zion 1&2 and Yankee Rowe 等(也包括 Santa Susana Field 實驗室的鈉冷卻實驗核反應器，它並未列於核能發電反應器的表中)。而正在立即拆除中的有 Humboldt Bay 3，即將展開的則有 Fort Calhoun 與 Indian Point。

美國電廠採安全貯存不管是部分或全部的，包括有：Crystal River 3, Dresden 1, Fermi 1, Indian Point 1, LaCrosse, Kewaunee, Millstone 1, Peach Bottom 1, Zion 1&2 與 NS Savannah；TMI-2 則在燃料移除監測貯存中。San Onofre 2&3 與 Vermont

Yankee 在移除燃料後，亦進入安全貯存。

美國電廠只有小型實驗用反應器採封埋方案：在波多黎各的 Bonus BWR、在俄亥俄州的 Piqua 有機緩和劑反應器及位於內布拉斯加州的 Hallam 石墨緩和劑鈉冷卻反應器。

心得與結論

1. 目前全球僅有幾十部核機組完成拆除；不過，迄今累積的實務經驗顯示，只要有縝密的規劃與設計、訓練完整的拆解團隊、引進國外經驗及謹慎的實施，則成功的完成核電廠除役工作是可預期的。
2. 美國算是很早就進入除役的，但由於當年經驗不足，曾有因發現有地下水污染造成除役成本大增，而有所停滯，並且有多家電力公司採用安全貯存(尤其是多機組核電廠)；不過，後來有原屬於 Commonwealth Edison(ComEd，後來由 Exelon 購併)的 Zion 1, 2 核電機組，原準備相關設施置於安全貯存狀態，經約二十年後，才開始除污及拆除作業，原預定完成日期為 2026 年 12 月 31 日。

美國核管會(NRC)於 2010 年 8 月 23 日宣佈，同意 EnergySolutions 公司以 10 年的時間來進行場址拆除程序，最後會將廢棄物運至位於猷他州的 Clive 低放貯存場處置。在拆除程序中，所有的用過核子燃料都將移到乾式貯存場置放(以上作業總價約為 10 億美元)。完成之後，Exelon 將重新擔負起對此場址之責任(包括乾式貯存場)。這是因為 EnergySolutions 擁有兩座低放處置廠(另一處為位於南卡羅來納州的 Barnwell)，另他擁有除役的主導權；結果，他只用了約 9 年及七成的經費就完成兩座核機組的除役。鑑於本案的成功，近幾年(約 2016 年底開始)，美國除役市場有所轉變，有幾家不同專業公司採結盟方式(請參上述)，共同去承攬電力公司的電廠除役計畫，如先將電廠及存在核後端基金的除役經費轉讓給聯盟公司，由聯盟公司承辦除役計畫，完成後再將清理完成的電廠土地還給電力公司；如北星服務集團公司與國際綜合除役公司。不過，似乎前景看好；然而，對於其他歐亞國家不很合適，除了外國公司可以接收核電廠與除役基金嗎？另廢

棄物外釋或處置也不像美國那樣容易處理。

3. 綜合歐美日幾個國家的核電廠除役現況，我們應該以誰為師呢？德國與日本應該均會採用由電力公司主導的方式，且這兩個國家日本已有六所村低放處置場，但德國則仍須先以中期貯存庫暫存。而美國則將傾向 Turn-key 方式委由專業除役公司或集團承攬，其利基是聯盟公司不是擁有低放處置場(如 EnergySolutions 公司)，就是擁有用過核子燃料乾式貯存設施技術與證照(如國際綜合除役公司，其中有 Holtec 公司是美國乾貯設施最大市場佔有率的)。我國的上述條件均無，應該採用那一個營運策略呢？看來三個國家的發展策略均不適合我國的狀況。
4. 我國核電廠除役的可能困難，大致有下列幾點：(1)核後端基金估算的除役經費看似與國外接近，不過，若需考慮電廠人事經費、廢棄物解除管制的程序不明確與繁複及採國外廠家總承攬的話，是否足夠就必須再考量。(2)除役期規劃達 25 年，似乎符合德國與日本的現況；但美國 Zion 核電廠的範例是因為僅花費

9 年，才能以七成經費完成的；是應該考量儘量縮短期限。但依國內現況，受乾貯設施運轉遙遙無期及低放處置選址延宕，著實令人擔心。(3)廢棄物外釋是否順利離廠是另一關鍵，核一廠廠址面積有限且從未有外釋的實務，若不積極與鄰近民眾溝通，同樣將造成經費飆高甚至無法完成除役。

5. 若要解決上述困難與問題，有以下建議：(1) Line Up：儘量結合國內已具備之核設施除役技術及經驗，應用於國內核電廠除役之工作需求。(2) Team Up：整合台灣相關產業、學研及現場工作實務能力者，並邀請地方代表加入監督，組成有能力完成除役工作所需之國家團隊。(3) Domestic Up：讓國內團隊有機會參與以建立可有效執行核設施除役工作之能力與經驗。例如，可先從國內 TRR 爐體拆解這個重要的時機點切入，引進國內未來有潛力進入此行業者，來及早布局與準備，並技轉給核一廠與需要的國內廠商；同時，從國外引進國外諮詢技術服務，由國家團隊合作吸收消化再轉介給國內廠商。以創造國內除役產業商機。



參考文獻

1. Nuclear Energy Institute 2002, Decommissioning of Nuclear Power Plants, factsheet
2. IAEA Power Reactor Information System (PRIS)
3. IAEA 2011, Policies and Strategies for the Decommissioning of Nuclear and Radiological Facilities, Nuclear energy series No. NW-G-2.1
4. Ontario Power Generation's 網頁
5. AECL 網頁
6. NRC Decommissioning 網頁

640 切電腦斷層攝影介紹

作者 盧銘翊

國軍高雄總醫院左營分院放射核醫科 醫事放射師/輻射防護師



圖引用於 Pixabay (by Bokskapet)

前言

放射線於生活中具有廣泛的用途，其中運用在醫療用途更是許多民眾都接觸過的，在醫療院所中可分為三大類，包含放射診斷、核子醫學及高劑量的放射治療，其中對於診斷類電腦斷層攝影 (Computed Tomography, CT) 更是廣泛運用，依據西元 2009 年及 2019 年美國輻射防護與度量委員會 (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP) 發表之第 160 號及第 184 號報告指出，對於美國民眾「醫療曝露」所造成之有效劑量貢獻占比進行比較，僅 CT 乙項所造成之累積劑量佔「總醫療輻射劑量」之貢獻佔比，於西元 2006 年至 2016 年，十年間由 50% 提升為 62%，因此，於日益廣泛使用 CT 作為診斷工具之時，其所造成之輻射劑量也成為民眾所關切的議題。[1、2]

CT 原理簡介

球管於旋轉產生 X 光，並由各個不同

的角度入射人體，途中經由人體各組織或器官對 X 光產生不同程度的衰減後，經由位於球管對側之偵測器 (Detector) 偵測後，將 X 光轉換成大小不一之電流訊號，電腦軟體由所收集的訊號計算出 X 光於穿透人體時任一點之 X 光衰減值，此點即稱為畫素 (Voxel)，再用不同程度之灰階 (Grayscale) 呈現此點而成為一面素 (Pixel)，將所有面素組合成此一切面之影像後，再經由窗寬 (Window width) 和窗階 (Window level) 進行影像後處理，便可獲得具診斷價值的臨床醫學影像，若使用電腦軟體將所有影像堆疊，即可組成 3D 立體影像，此外，若是掃描時搭配靜脈對比劑注射，以顯影血管系統、增強病灶和正常組織間的對比，便能有效顯示血管病變、腫瘤組織或其他異常的解剖構造。

CT 的發展

CT 運用於臨床醫學，對於臨床醫師診斷病患病況具有極大的幫助，自西元 1972 年第一部電腦斷層掃描系統發明

問世後，由於電腦科技及電子設備效能的迅速發展，促使 CT 快速地發展與演進，從單切面電腦斷層掃描儀 (Single-Slice Computed Tomography, SSCT)，演化出多切面電腦斷層掃描儀 (Multi-Slice Computed Tomography, MSCT)。SSCT 使用平行射束及單排偵測器，掃描時 X 光球管與偵測器可同時移動，並將影像數據傳送至電腦工作站進行運算處理，但每掃描一圈僅能擷取成一張影像，因此掃描時間較長[3]。西元 1992 年 MSCT 問世，偵測器之排數隨著軟硬體設備的發展從 4、8、16、64、128 增加至 320，由於 MSCT 具有多排偵測器，因此在 X 光球管掃描一圈時便能獲取更多的影像數據，隨著 MSCT 的切數發展越來越多，檢查時間便能大幅地縮短，輻射劑量也隨之降低，並且透過電腦軟體的快速演進、硬體設備的效能升級，提升影像品質、減小切面厚度，使得解析度更為細緻，藉由電腦軟體也能重組出矢狀切面、冠狀切面，甚至是任意切面的二維影像，以



圖 1. 64 切電腦斷層掃描儀



圖 2. 640 切電腦斷層掃描儀

及三維立體影像，如此能更加準確地提供臨床醫護人員進行影像判讀，不論是內出血、結石或是腫瘤，CT 都可以提供醫師精確的檢查結果，因此 CT 可謂是診斷流程中不可或缺的檢查之一。

CT 的發展過程中，「切數」扮演關鍵的角色，不僅僅是切數，提升掃描速度、降低輻射劑量及高影像品質皆是 CT 發展重點，於臺灣各級醫院中，MSCT 已是「基本配備」。為因應臨床對於高檢查速度及低輻射劑量的需求，全球四大醫療影像儀器品牌紛紛引進各式最新設備加入市場，目前四大品牌包括飛利浦 (PHILIPS) 推出「Brilliance iCT 256-slice scanner 及 IQon Spectral CT」，佳能 (CANON) 推出「第三代超微輻射劑量 320 排 640 切動態體積式電腦斷層掃描儀 (Aquilion One ViSION 640 CT)」，奇異 (GE) 推出「寶石能譜 CT (Discovery CT750 HD 及 Revolution GSI CT)」，西門子 (SIEMENS) 推出「雙球管雙能量電腦斷層 (SOMATOM Definition Flash 或 SOMATOM Force)」。各廠牌及切數的 CT 皆有不

同的軟硬體特色及掃描技術，因此可依照自身的需求或參考其他受檢者的經驗來做選擇[4]。

640 切 CT 的應用

依據台灣衛生福利部中央健康保險署公布之“108 下半年全台 CT 數量、廠牌、機型、出廠日期、院所購入日期、使用年限”一表[5]，由表中可得知全台灣四百多台 CT 中僅 16 台為 SSCT，而有高達九成五以上的 CT 為 MSCT，由此可得知現今臨床醫學的檢查是以檢查時間縮短、影像品質提升、輻射劑量降低為主要趨勢，其中又以佳能的 640 切電腦斷層掃描儀為現今臨床最高階醫療用 MSCT。

「切」數是代表 CT 的球管旋轉一圈，偵測器可獲得的切面圖像張數，相較於 64 切 CT 而言，640 切 CT 球管每轉一圈即可獲得 64 切 CT 之 10 倍的影像資訊。當電腦斷層掃描儀發展到 64 切 CT 之後，即可執行非侵入性的心臟冠狀動脈鈣化分析及冠狀動脈血管造影，對於心臟冠狀動脈疾病的評估具有相當高的

準確性。然而，當心跳速率高於每分鐘 65 下、心律不整或受檢者無法配合穩定閉氣，皆是以 64 切 CT 執行心臟冠狀動脈造影時所面臨的困境，如此使用 64 切 CT 執行檢查時，常會因掃描當下心臟跳動使影像產生移動假影或是模糊，進而導致影像不具診斷價值，然而若以 640 切 CT 執行心臟冠狀動脈檢查，可排除 64 切 CT 檢查時常遇到的技術限制。640 切 CT 具有 320 排偵測器，偵測器厚度精細達 0.5 毫米，因此偵測器的寬度由原先 64 切 CT 的 3.2 公分增加到 16 公分，圖 1 及圖 2 為國軍高雄總醫院左營分院 64 切及 640 切 CT，可看出掃描儀的厚度 (意即隧道的長度) 有明顯地增加，因此以心臟平均大小為 12 至 13 公分來說，可在檢查床不移動的情況下，球管旋轉一圈即能取得整顆心臟的影像資訊，不需分段掃描就能獲得足夠的影像資訊，如此除了能避免分段掃描所產生的假影，受檢者配合閉氣的時間也得以縮短，同時也克服了心律不整及心跳速率高於每分鐘 65 下的困境，大幅提升了心臟冠狀動

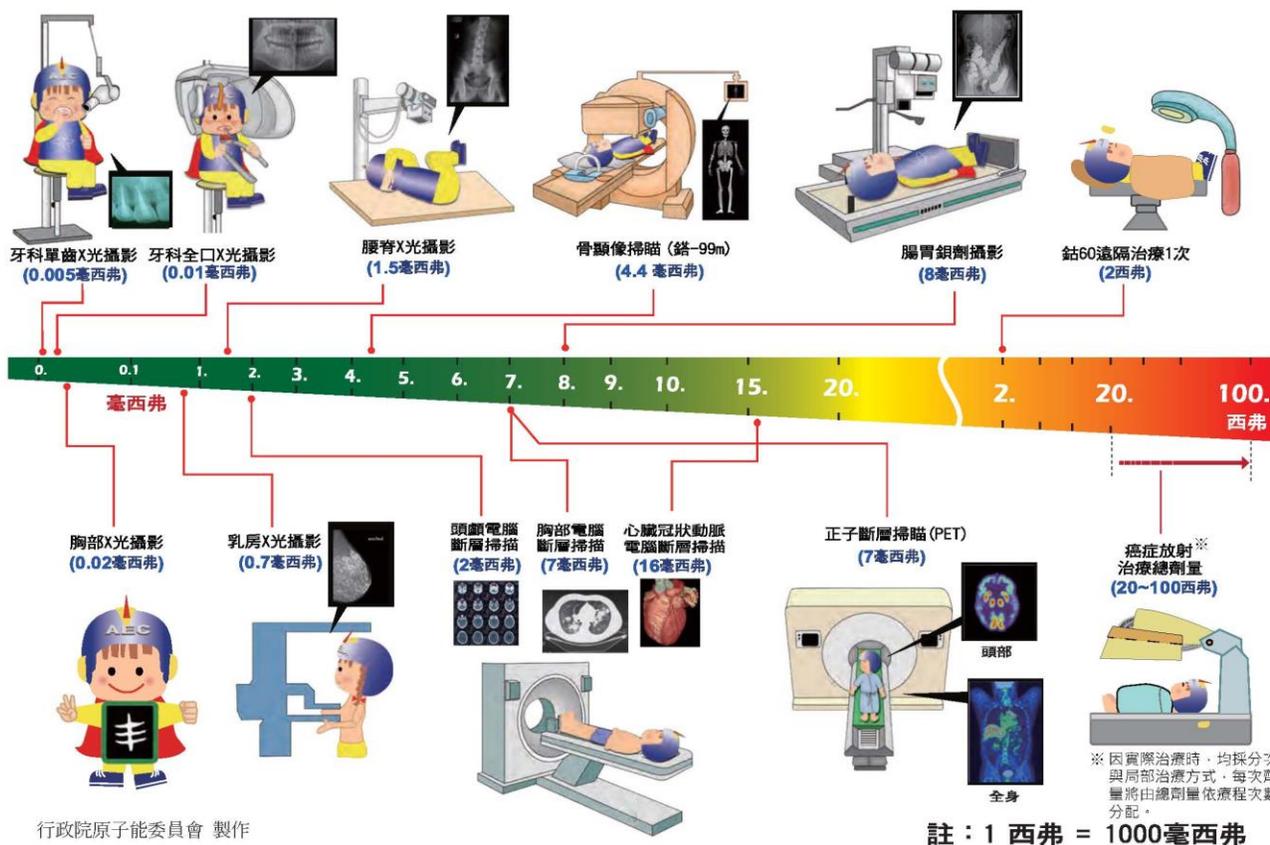


圖 3.我國醫療游離輻射劑量比較圖-原能會

脈檢查之成功率，再者 640 切 CT 軟硬體設備與電腦計算功能的進步，掃描時間縮減至 0.275 秒，減少輻射曝露的時間，此外由於掃描速度更快，因此所需注射對比劑的劑量就不需太高，如此也能降低腎臟代謝對比劑的負擔。

640 切 CT 於篩檢心臟冠狀動脈疾病是個理想的工具，以往若想知道心臟冠狀動脈狹窄的嚴重程度，必定得執行耗時的心導管檢查，雖然心導管檢查的準確性高，但是屬於侵入性的檢查，因此受檢者須承擔的風險較高，當 64 切 CT 問世後，提供了臨床醫師及受檢者另一項診斷選擇，但仍受限於受檢者心跳過快、心律不整或無法配合穩定閉氣，而 640 切 CT 便能改善上述情況，640 切

CT 除了常規的心臟冠狀動脈檢查之外，還可做心血管血流動力學、心肌灌注檢查評估，執行缺血性心肌圖譜評估，對於急性心肌梗塞病患的治療評估頗有功效；對於全腦、頭頸部、體內器官、四肢等亦能進行電腦斷層動脈血流灌注攝影 (Computed Tomography Angiography, CTA)，提供更多的臨床參考價值。

640 切 CT 降輻射劑量技術

關於輻射劑量方面，相較於一般 X 光檢查，CT 掃描是輻射劑量相當高的檢查，依據行政院原子能委員會公布之醫療輻射劑量比較，如圖 3，胸部 X 光攝影為 0.02 毫西弗，心臟冠狀動脈電腦斷層掃描為 16 毫西弗。基於對 CT 輻

射危害風險的考量，一直以來 CT 皆是朝著控制及降低輻射劑量的方向發展，於軟硬體設備也不斷精進，發展出許多技術，如自動曝露控制系統 (Automatic Exposure Control, AEC)，然而這項技術對於輻射劑量的降低程度仍然有限。在軟體方面，新的疊代重組技術 (Iterative Reconstruction, IR) 能於影像原始資料降低雜訊及抑制假影，目前各廠牌「高階」CT 皆具備此項技術，只是對此項技術的稱呼不大相同，例如：佳能 - AIDR，奇異 - ASIR，西門子 - IRIS/SAFIRE，飛利浦 - iDose，在維持影像品質的前提下，將上述技術應用於臨床檢查，輻射劑量將會比傳統濾波反投影 (Filtered Back Projection,

FBP) 降低 60~80%，當雜訊較高或掃描數據不完全時，新的 IR 技術即可重建出較高品質的影像；依據老達利貿易股份有限公司網站上對於 640 切 CT 的介紹[7]，針對佳能 640 切 CT 則是採用最新第四代迭算超微劑量影像重組技術 (Adaptive Iterative Dose Reduction, AIDR 3D Enhance)，搭配最新的 Sure Exposure 3D 全身型低劑量自動電流調控系統、Sure kV 全身型低劑量自動電壓調控系統、Active Collimator 智能

型準直儀控制系統及搭配最新型超感度量子偵測器，可提升 40% 光轉換效率，如此可更有效去除影像雜訊及降低輻射劑量，最高可降低 90% 輻射劑量，應用於低劑量心臟檢查時，80~90% 的受檢者僅需接受小於 1 毫西弗的輻射劑量，應用於低劑量肺部篩檢時，受檢者所接受平均最低劑量僅需 0.2~0.5 毫西弗的輻射劑量，對於嬰幼兒、適孕年齡女性及需定期以 CT 檢查的受檢者頗有益處。

結語

640 切 CT 除了保有前幾代 CT 的優點，在心臟冠狀動脈檢查方面也能夠突破心跳和呼吸的限制，能於一個心跳和閉氣的時間內完成心臟掃描，大幅提高檢查成功率，並且掃描時間縮短，對比劑使用量及輻射劑量也隨之降低，能為心臟冠狀動脈檢查的受檢者提供更快速及精確的診斷。



參考文獻

1. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP): NCRP Report 160: Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States, 2009.
2. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP): NCRP Report 184: Medical radiation exposure of patients in the United States, 2019.
3. 莊克士編著，第二版醫學影像物理學，臺北市合記圖書出版社，2012；223-248。
4. 劉峻成 - 專為肺及心血管造影所設計的高速電腦斷層簡介。2020.09.13 擷取自 <http://web.tccf.org.tw/lib/addon.php?act=post&id=4101>
5. 衛生福利部中央健康保險署 - 電腦斷層造影(CT)之數量、廠牌、機型、出廠日期、院所購入日期、使用年限。2020.09.13 擷取自 https://www.nhi.gov.tw/Content_List.aspx?n=7299122478446FC7&topn=23C660CAACAA159D
6. 行政院原子能委員會 - 醫療輻射劑量圖比較圖。2020.09.13 擷取自 https://www.aec.gov.tw/share/file/convenience/NvkLafGqPiOdUxivoWu~4w_.jpg
7. 老達利貿易股份有限公司 - 醫療用 X 光 CT 裝置 - 第三代超微輻射劑量 320 排 640 切動態體積式電腦斷層掃描儀。2020.09.13 擷取自 <http://www.rotarytc.com.tw/prodDetail.asp?id=113>

發行人
張似璵

執行編輯
林珏汶

編輯委員
尹學禮
江祥輝
劉代欽
蔡惠予
魯經邦



出版單位

財團法人中華民國輻射防護協會

行政院新聞局 出版事業登記證
局版北市誌字 第柒伍零號

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 網站