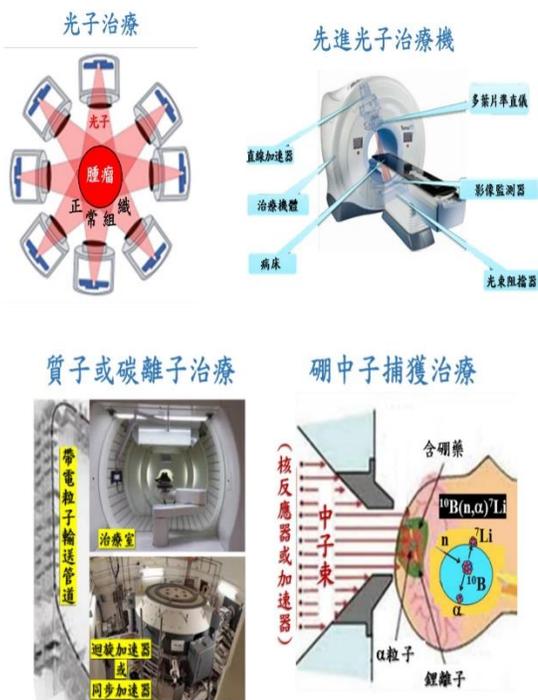


圖引用 國家原子能科技研究院



財團法人 中華民國輻射防護協會

# 輻射防護簡訊

第 185 期

出刊日期 114 年 2 月 15 日

# 本期內容

## CONTENT

國內新興放射治療介紹	1
癌症 (惡性腫瘤) 連續 42 年蟬聯國人十大死因榜首，且去年癌症死亡時鐘較 111 年快轉 14 秒。國內近年引進多種先進光子治療技術，也引進了幾種新興粒子治療方法。這些放射治療的新技術與新方法，不但提升了腫瘤病患的整體控制率，同時也降低了病患癒後的併發症機率。	
新興放射治療的輻射防護	5
國內陸續引進質子治療、碳離子治療、硼中子捕獲治療，提供更好的治療與選擇。從輻射防護的角度，因新興放射治療環境中存在中子及活化物質，應審慎處理其輻射防護。	
訓練班課程	7
公告本會各項訓練班開課時間	
輻協新聞廣場	8
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	
福島核電廠外釋核種在海底沉積物中的分布	12
放射性核種在海洋的遷移相當複雜，福島核電廠放射性外釋事件提供一個實際調查研究的案例，其對海洋的擴散稀釋機制和對環境生態的影響評估，值得借鏡。	

# 國內新興放射治療介紹

作者 董傳中

國立清華大學榮譽退休教授

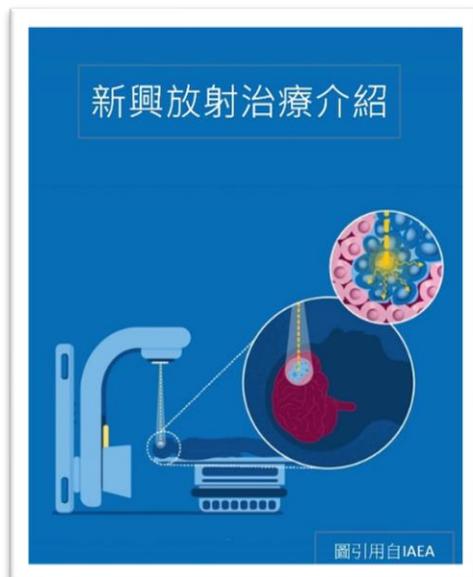
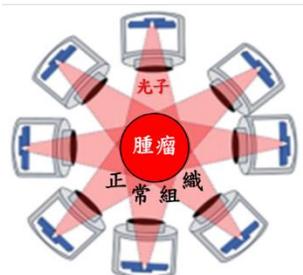
## 先進光子治療

惡性腫瘤已連續數十年蟬連國人 10 大死因之首，實體腫瘤的治療目前以外科手術為主，對於不適合手術的病人、手術無法完全切除之腫瘤、以及需要保留之器官，則多選擇或輔以放射治療。傳統放射治療是以射線或 X 射線之光子，自體外照射人體，藉著治療機的自由旋轉，從不同角度以聚焦腫瘤的方式，增加腫瘤劑量以殺死癌細胞，減少正常組織劑量以控制輻射傷害。為了形塑腫瘤劑量的完整包覆，先進光子治療使用各種新式儀器與技術，包括 X 光影像引導照射、同步呼吸調節照射等。圖中顯示之強度調控多葉片準直儀、影像導引監測器，斷層照射直線加速器，以及多維移動治療病床等，這些設備和儀器大幅提升了光子治療的精度。國內引進之先進光子治療，包括立體定位放射治療、影像導引放射治療、弧形調控放射治療等。新興粒子治療

先進光子治療雖然提升了腫瘤治療的精度，但因受限於光子先天不利因素的影

響，很難再有進一步發展，不利因素有二：(1)光子入射人體後，劑量會隨深度增加不斷遞減，導致入射方向的正常組織劑量高於腫瘤劑量，造成正常組織的輻射傷害。(2)比起其他種類之輻射，光子殺死癌細胞的能力相對較弱。基於此二不利因素，帶電粒子乃成為放射治療的更好選擇。如圖所示，帶電粒子初入人體時的劑量很小，隨著深度增加劑量開始增大，直到帶電粒子快要停止時劑量突然上升，形成「布拉格尖峰」，最後帶電粒子停止後，劑量又迅速下降為零。通常布拉格尖峰的寬度小於腫瘤尺寸，必須藉助多個不同能量的布拉格尖峰相加，才能產生寬廣平坦的「擴展布拉格峰」，方得以高劑量完全覆蓋整個腫瘤。另外，游離輻射殺死

光子治療

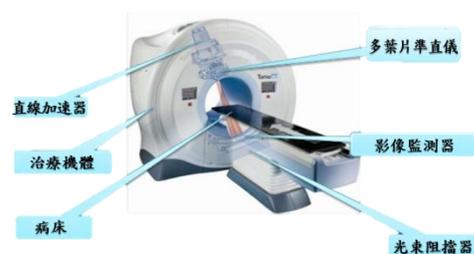


癌細胞的能力—即「相對生物效應」

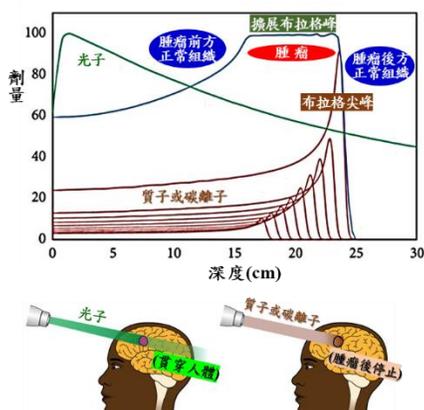
RBE，與輻射在單位距離內耗損的能量 LET 有關。如圖所示，光子 LET 很小，不易產生 DNA 雙股斷裂，故 RBE~1；質子 LET 較大，較易產生 DNA 雙股斷裂，故 RBE>1.1；而重離子 LET 最大，最易產生 DNA 雙股斷裂，故 RBE>2。

國際上發展最成熟的帶電粒子治療是質子治療，其次是碳離子治療，發展之考量包括：加速器的場房與費用、治療機的機體與安置、臨床治療的效果、輻射防護的因素等。因為帶電粒子加速器的體積龐大，除了需要獨立的建築物廠房外，還要有專門的管道將帶電粒子輸送至治療室，以致照射與控制都需從遠端操作，

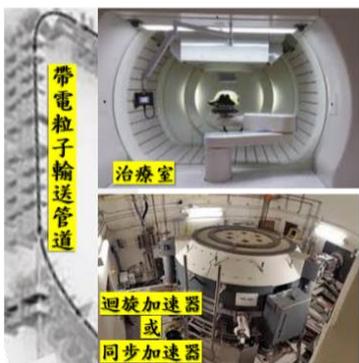
先進光子治療機



### 粒子治療劑量分布



### 質子或碳離子治療

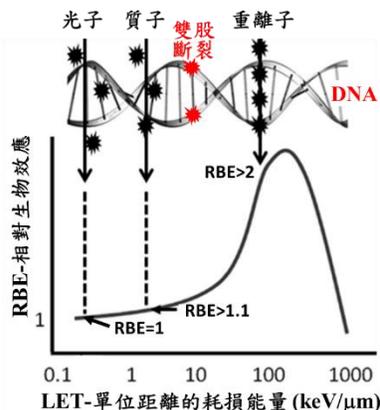


加上帶電粒子治療機的靈活度不及光子治療機，導致新興粒子治療很難套用所有光子治療的先進技術。臨床效果上，帶電粒子治療的最大優勢在於：(1) 避免或減少正常組織的劑量，降低併發症的發生機率，(2) 帶電粒子比光子容易殺死癌細胞，更適合極度惡性腫瘤的治療。

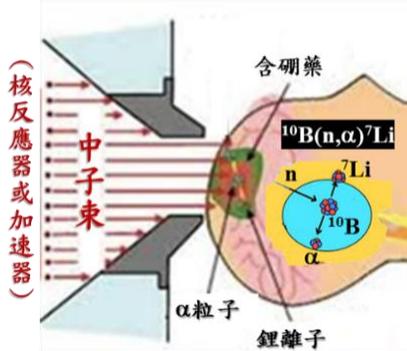
### 新興標靶放射治療

除了質子治療及碳離子治療之外，還有一種帶電粒子治療，是以中子照射標靶藥物，產生重離子直接殺死癌細胞，稱為「硼中子捕獲治療」BNCT。如圖所示，將含硼藥物注射人體，利用腫瘤吸收藥物多、正常組織吸收藥物少的差別，以及中

### 輻射殺死細胞的能力



### 硼中子捕獲治療



子誘發核反應  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  產生的α粒子及鋰離子，直接導致腫瘤高劑量殺死癌細胞、正常組織低劑量則不影響細胞存活。此一治療方式因結合標靶藥物與放射治療，故稱為「標靶放射治療」。國際上開發成功的含硼藥物有 BPA 及 BSH，用於治療多形性膠質母細胞瘤 GBM，效果相當不錯。

### 結語

國內醫院近年來引進了多種先進光子治療技術，包括立體定位放射治療、影像導引放射治療、呼吸調控放射治療、弧形調控放射治療等；另外也引進了幾種新興粒子治療方法，有質子治療、碳離子治療、硼

中子捕獲治療。這些放射治療的新技術與新方法，不但提升了腫瘤病患的整體控制率，同時也降低了病患癒後的併發症機率。未來放射治療將結合人工智慧，發展出更多優質的療法，造福廣大癌症病患的健康。

## 參考文獻

質子治療的發展

<https://doi.org/10.4103/2319-4170.167064>

質子、α粒子、碳離子的劑量分布與相對生物效應

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.02.007>

硼中子捕獲治療的微劑量

<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006172>

# 新興放射治療的輻射防護

## 新興放射治療的輻射防護

作者 董傳中  
國立清華大學榮譽退休教授



### 輻射法規與標準

傳統放射治療使用的是光子，新興放射治療使用的是帶電粒子—包括質子、阿伐粒子、碳離子等。不論是那一種治療，輻射防護的管制與標準，都依據國際放射防護委員會 ICRP 分類的三種曝露：病人之醫療曝露、工作人員之職業曝露、一般民眾之公眾曝露，而有所不同。其中醫療曝露的輻射防護，是藉由執行「治療計畫」，來提高腫瘤劑量以及抑低正常組織劑量；職業曝露的輻射防護，係透過實施個別監測，以確保個人劑量不超過「劑量限度」；而公眾曝露則經由施行環境監測，以驗證屏蔽設計符合「劑量約束」。ICRP 訂定的職業曝露劑量限度，為年有效劑量 20 毫西弗；公眾曝露劑量約束，為年有效劑量不超過 1 毫西弗。

### 醫療曝露的輻射防護

放射治療之目的，在於極大化腫瘤劑量，以便殺死癌細胞；輻射防護之目的，則在極小化正常組織劑量，以便減少併發症的機率與損害。為了同時達到此二目的，放射治療乃藉助執行電腦模擬之治療計畫，挑選最優化之治療條件—包括輻射種類、照射方式、照射大小、治療劑量、特殊技術等。

### 職業曝露的輻射防護

放射治療的工作人員含放射師、物理師、護理師、醫師等，如果經常出入輻射管制區，就必須佩戴人員劑量計，實施輻射劑量個別監測，以確保職業曝露不超過劑量限度。由於新興放射治療使用的帶電粒子，會活化物質並且產生中子，因此人員

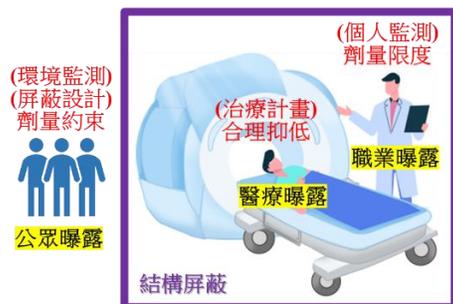
劑量計需一併度量光子與中子。此外，輻射作業場所除了要遵守劑量限度外，也要符合「干預基準」、「調查基準」、「紀錄基準」之規定。

### 公眾曝露的輻射防護

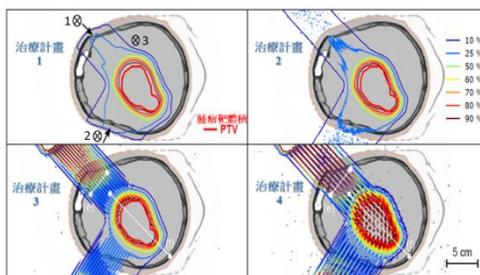
體外曝露的輻射防護方法是：減少曝露時間、增加射源距離、設置適當屏蔽。因為公眾曝露涉及公共安全，因此必須採取嚴格的防護措施—設置固定之結構屏蔽，以確保民眾在非管制區活動的輻射安全。由於新興放射治療會活化物質並產生中子，而中子會不斷四處散射，因此沒有公式可以直接計算屏蔽厚度，必須藉助數值模擬的蒙地卡羅程式，演算所需之結構屏蔽。另外，屏蔽設計必須有迷宮牆，以阻擋散射中子與光子。一般結構屏蔽的材料為混凝土，為了增強中子的屏蔽效果，可加入含氫物質以衰減快中子，並且混入鋰或硼以吸收熱中子，譬如可以採用含硼聚乙烯商品。

輻防管制單一輻射源公眾曝露的劑量標準為劑量約束，ICRP 訂定之公眾曝露劑量約束為年有效劑量不超過 1 毫西弗。

輻射防護曝露分類與劑量管制

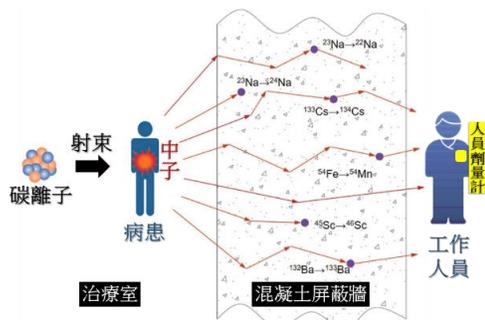


治療計畫的比較



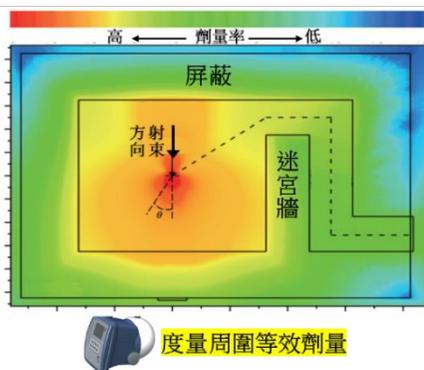
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-63975-9>

高能帶電粒子活化物質並產生中子

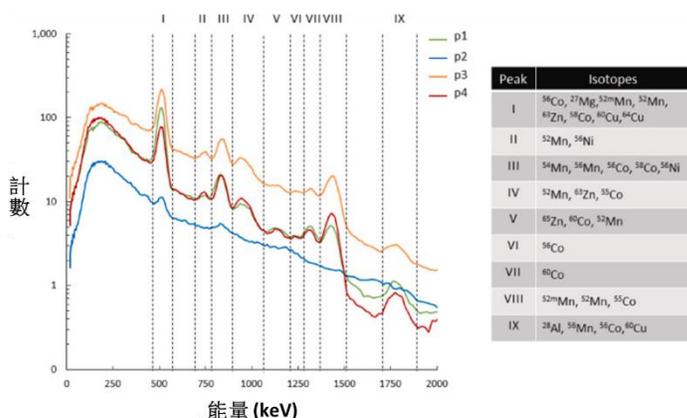


<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111233>

蒙地卡羅模擬輻射劑量率



質子治療設施內之活化核種



<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111386>

為了確保民眾劑量不超過此一管制值，應實施環境監測，以輻射偵測儀器度量「周圍等效劑量」。

環境曝露的輻射防護

新興放射治療使用的高能量帶電粒子，會在加速器、輸送管道、病人身體、結構屏蔽中，與設備、材料、組織等發生核反應而活化物質。雖然許多活化產物半衰期都很短，不會造成輻射防護的太大問題，但仍有一些活化物質—包括氣體、液體、固體之放射性廢料需要處理。因此，在加速器、輸送管道、治療室等四周，須設置監測器、抽氣機、排氣管、過濾器、冷卻室等，以便利環境監測及廢料處理。

結語

新興粒子治療是放射治療的趨勢，國內醫院陸續引進了質子治療、碳離子治療、硼中子捕獲治療，提供以往無法有效治療或治療效果不佳之惡性腫瘤，更好的治療或更多的選擇。從輻射防護的角度，因新興放射治療環境中存在中子及活化物質，故應審慎處理此一高強度輻射設施的輻射防護，包括人員與場所之規劃與管理、蒙地卡羅模擬之屏蔽設計與演算、各類活化物質之廢棄物處理、人員與環境之監測與評估等，再依照醫療曝露、職業曝露、公眾曝露之分類，實施劑量限度與劑量約束之管制。

參考文獻

輻射防護的法規標準探討  
 國際放射防護委員會(ICRP) 103 號報告 · ICRP 2007.  
 國際原子能總署(IAEA) GSR Part 3 報告 · IAEA 2014.  
 質子治療的中子活化探討  
 Is neutron-activation a radiation safety issue for the facility staff and public members in proton therapy? Radiation Physics and Chemistry 215, 111386, 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111386>  
 重離子治療的屏蔽計算探討  
 An investigation of neutron shielding and activation performances of four types of concrete for carbon ion therapy facility. Applied Radiation and Isotopes 206, 111233, 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111233>



## 訓練班課程(114 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

**A1 高雄** 文化大學推廣部

2 月 12 日~ 2 月 18 日

**A2 新竹** 帝國經貿大樓

2 月 19 日~ 2 月 25 日

### B 組 18 小時-登記類

**B1 新竹** 帝國經貿大樓

1 月 7 日~1 月 9 日

**B2 台中** 文化大學教育中心

1 月 14 日~ 1 月 16 日

**B3 台北** IEAT 會議中心

1 月 21 日~1 月 23 日

**B4 高雄** 文化大學教育中心

2 月 18 日~ 2 月 20 日

**B5 台中** 文化大學教育中心

3 月 25 日~ 3 月 27 日

**B6 新竹** 帝國經貿大樓

3 月 11 日~ 3 月 13 日

**B7 台北** IEAT 會議中心

4 月 15 日~ 4 月 17 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 43 期

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

114 年 6 月 23 日 ~ 6 月 27 日

第二階段

114 年 6 月 30 日~ 7 月 4 日

第三階段

114 年 7 月 14 日~ 18 日

第四階段

114 年 7 月 21 日~ 7 月 24 日

### 進階 26 期

新竹 帝國經貿大樓

第一階段

114 年 7 月 30 日~ 8 月 1 日

第二階段

114 年 8 月 4 日~ 6 日

輻射防護繼續教育訓練班  
(3/6 小時)

### 台北 建國大樓

1 月 15 日 (上午&下午)

新竹 經濟部專研中心

2 月 14 日 (上午&下午)

高雄 科學工藝博物館南館

2 月 7 日 (上午&下午)

台中 文化大學推廣部

2 月 25 日 (上午&下午)

鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班

### 鋼 1 新竹 帝國經貿大樓

5 月 8 日~ 9 日

鋼 2 高雄 文化大學推廣部

11 月 5 日~ 6 日

### 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

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)；

315 范佳怡 (鋼鐵建材、放射性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

- 核能安全委員會 114 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」簡章。  
[訊息連結](#)

114 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 114 年 4 月 26 日舉行，報名日期為 114 年 2 月 5 日至 2 月 26 日，採網路報名，相關事項請點選下方→(相關連結)

相關連結: [輻射防護專業測驗](#)、[操作人員輻射安全證書測驗](#)  
(發布日期 114 年 2 月 15 日)

### 國內新聞

- NOWNEWS 新聞網報導「延宕 12 年！法國「最強核反應爐」終於正式啟用 過半民眾支持核電」  
[訊息連結](#)

法國近日正式將弗拉芒維爾 3 號機 (Flamanville 3) 核反應爐併入國家電網，標誌著 25 年來法國首次擴建核電，儘管該項目歷經了 12 年的延誤，總成本更從最初估計的 33 億歐元飆升至 132 億歐元，但仍被視為法國能源工業的一大里程碑。且法國民眾對核電的支持度持續上升，57% 受訪者認為核能是「法國的優勢」。

綜合外媒報導，弗拉芒維爾 3 號機是新一代歐洲壓水反應爐 (EPR)，是全球第 4 座歐洲壓水反應爐，裝置容量為 1.6GW，是法國最大的反應爐，也是目前世界上最強大的核反應爐之一。

經過嚴格的測試和檢查，弗拉芒維爾 3 號機於當地時間 12 月 21 日上午 11 時 48 分併入國家電網，法國電力公司 (EDF) 執行長雷蒙 (Luc Remont) 表示，「對於整個核電產業來說這是一個歷史性時刻」，要向整個項目團隊致敬。併網後，弗拉芒維爾 3 號機不會立即全力發電，仍將繼續完善測試階段，測試工作直到 2025 年夏季才正式結束，預計屆時弗拉芒維爾 3 號機才會 100% 滿載運轉。

由於技術困難，弗拉芒維爾 3 號機面臨 12 年的延誤才正式完工，成本從最初估計的 33 億歐元飆升至 132 億歐元，足足增加為 4 倍。

作為法國能源轉型策略的一部分，法國電力公司已投入後續 6 座核反應爐的建造，且未來打算再追加 8 座核反應爐。法國總統馬克宏 (Emmanuel Macron) 繼續押注核能作為相對便宜和無碳電力的一種方案，認為核能可以強化國家競爭力並保護環境。

法國向來為擁核大國，約五分之三的電力來自核電，核能公司歐安諾 (Orano) 每兩年對法國民眾進行一次核能支持度調查，2023 年結果顯示，57% 受訪者支持核電，比 2021 年上升 7 個百分點。(發布日期 113 年 12 月 25 日)

- ➔ Yahoo!新聞報導「影/沒簽約沒培訓...陸男不熟儀器誤觸輻射源手爛慘將截肢」[訊息連結](#)

上班才 6 天竟誤觸輻射源將截肢！大陸一名 24 歲男子在山東省高密市一家公司，從事「金屬探傷」工作，豈料不慎誤觸檢測儀器的輻射源，導致右手嚴重受傷，左手也開始腐爛和疼痛，將面臨截肢。

《網易》報導，這名陳姓男子來自貴州省畢節市，由於輟學學歷不高，一直到處打工，今年 4 月 21 日他到山東省高密市一家外包公司，從事金屬探傷工作。金屬探傷是利用探傷器，檢驗金屬製品內部缺陷，例如隱蔽的裂紋、砂眼、雜質等。

豈料他上班第 6 天，就發生意外。陳男說，由於當時工作繁忙，沒有與老闆簽訂勞動合約，也沒有進行培訓，事發當天，他因檢測儀器被沙粒卡住，無法正常運作，於是向公司報告，維修師傅在電話中，指示要他拔掉儀器管子檢查，但因對儀器不熟悉，他在操作過程中，竟不慎誤觸輻射源。

事發後他右手嚴重受傷，左手也開始腐爛和疼痛，期間公司雖承諾支付醫療費用，但要求他放棄其他權益，遭到陳男拒絕。住院期間，陳男一直在接受治療，近日他拍攝影片證實，將面臨截肢手術，手術安排在下月初進行。這起事件引發網友關注，有網友表示惋惜，「才 24 歲就截肢，今後人生怎麼辦」，還有網友表示，「沒簽勞動合同（公司）更要賠錢」。（發布日期 113 年 12 月 25 日）

- ➔ 自由時報報導「《台中》中榮首台光子計數電腦斷層 輻射量減半」[訊息連結](#)

台中榮總引進全國第一台世界最先進的「光子計數電腦斷層」（簡稱光子 CT），以及兩台「正子 / 磁振造影」最新影像診斷設備，造價總計七、四億，具備更清晰影像、更低輻射劑量功能。衛福部長邱泰源表示，任何檢查都要更快速、更精準、輻射最少，尤其對重病或幼童等不耐久候者及癌症檢查幫助甚大。

中榮院長陳適安表示，醫療檢查進步關鍵，在於提升影像清晰度，並大幅降低輻射劑量，高階影像檢查對於複雜性疾病的診斷與研究非常重要，可延伸人工智慧技術，強化疾病評估和治療規劃，全面提升醫療服務品質。

中榮引進全國第一台光子計數電腦斷層，造價四、二億，被稱為醫療「超級相機」，如同把手機相機從一〇〇萬畫素跳躍升級到一〇〇〇萬畫素，較傳統電腦斷層掃描的輻射量減少廿至五十%，在心臟檢查上更有力，從最細小的冠狀動脈、支架位置或血管鈣化都能更清楚。

針對衛福部健保署預計今年起實施「醫院個別總額制」衝擊醫學中心營運，邱泰源表示，新制一定會滾動檢討，以民眾利益為優先；陳適安也說，醫療志業不能只要賺錢營利，給病人正確診斷與治療，對醫院而言反而是節流。

（發布日期 114 年 1 月 5 日）

- ➔ 經濟日報報導「核能業衝刺研發微反應爐」[訊息連結](#)

核能公司正競相研發尺寸只有航運貨櫃大小的「微反應爐」，以取代目前廣泛用於資料中心、離岸油田等所有地方的柴油和天然氣發電機，成為能與電池匹敵的零碳能源來源。

英國金融時報 ( FT ) 報導，隨著各國政府和科技大廠拚命尋找乾淨的電力來源，以實現其氣候承諾，核能產業正在重新復甦。研發發電容量最高約 300 百萬瓦 ( MW ) 的小型模組化核反應爐 ( SMR ) 的計畫，已有數十個正在進行。

但微反應爐的發電容量則比 SMR 要小，最高只有 20MW，不過也足夠供應約 2 萬戶家庭電力，操作起來可能像是一顆大型電池，沒有控制室，也不需要工人駐守。這些反應爐只需運到設置地點，接上開關就能運轉多年，然後再送回給製造商補充燃料。

西屋電氣 ( Westinghouse ) 的 eVinci 微反應爐計畫主管波爾表示：「這個構想起初是為了那些難以減碳的地方，尤其是仰賴昂貴可運輸柴油的偏遠地區。但各界對此的興趣真的很高，我們相信這將成為一個大幅成長的領域。」

西屋的 eVinci 是第一個完成實驗計畫工程研究的微反應爐，其遠端控制系統去年 12 月也獲得美國核能監管機關批准，西屋近期也和英國新創公司 Core Power 簽約合作開發海上核電廠，預計最快 2029 年可望在美國取得營運執照。

波爾表示，eVinci 反應爐的兩個目標市場，是資料中心和油氣業；讓多個微反應爐一起供應資料中心電力，將比只靠單一能源來源更具能源韌性。

其他在微反應爐界已建立領導地位的公司，包括為美國海軍潛艇和飛機打造核反應爐的上市公司 BWX Technologies，以及去年 9 月向亞馬遜等投資人籌資到 5 億美元的未上市公司 X-energy。

但如何安全地建造、輸送和運轉微反應爐仍是問題。監管機關必須針對微反應爐是否可遠端操作和如何防範網路攻擊，制定規則。也需要訂定有關如何輸送的規定，尤其是在跨越邊境方面，以及是否該在工廠點燃反應爐。鑒於其尺寸較小，微反應爐也容易成為竊取核燃料的目標。( 發布日期 114 年 1 月 10 日 )

➔ 中時新聞網報導「IAEA 署長：札波羅熱核電廠 遭攻擊次數增」[訊息連結](#)

國際原子能總署 ( IAEA ) 署長葛羅西 ( Rafael Grossi ) 週五 ( 7 日 ) 表示，俄軍控制的烏克蘭札波羅熱核電廠 ( ZNPP ) 近期遭受攻擊的次數有所增加，加劇該地區緊張局勢。

《路透社》援引俄羅斯官媒塔斯社 ( TASS ) 7 日報導，俄羅斯國家核能公司 ( Rosatom ) 總裁利哈切夫 ( Alexey Likhachev ) 與署長葛羅西在莫斯科展開會談，會議在莫斯科國家經濟成就展 ( VDNKh ) 「原子館」 ( Atom Pavilion ) 舉行，葛羅西於會後提出上述報告。

俄軍自 2022 年戰爭爆發初期即控制該核電廠，並宣稱札波羅熱地區已併入俄羅斯，但基輔當局對此表示拒絕承認。會談後，俄羅斯國家核能公司發表聲明，指控烏克蘭持續攻擊核電廠所在地赫德市 ( Energodar )，加劇該地區緊張局勢。

自 2022 年戰爭升級以來，葛羅西曾多次前往基輔，與烏克蘭官員就核能安全問題進行談判，本次訪俄前，他已造訪烏克蘭 11 次。

札波羅熱核電廠位於戰爭前線，過去經常面臨爆炸、無人機襲擊、槍戰及電力供應中斷等挑戰，大幅提升事故風險，葛羅西過去多次強調，國際社會必須防止核災發生，並明確表示無論核電廠位於何處，攻擊核子設施都是不可接受的行為。

( 發布日期 114 年 2 月 7 日 )

➔ 中央廣播電台報導「歐洲最老核電廠反應爐意外關閉 營運商：未造成危險」。[訊息連結](#)

法新社報導，瑞士貝茲諾 ( Beznau ) 核電廠的營運商表示，在針對這座歐洲最古旧的核電廠進行例行檢查時，無意間觸發對其中一座反應爐的緊急關閉，但強調並未造成任何危險。

瑞士能源公司 Axpo 發表聲明說，位於瑞士北部的貝茲諾核電廠 2 號反應爐 ( Reactor 2 )，10 日下午 1 時 5 分 ( 台灣時間晚間 8 時 5 分 ) 因為例行檢查時的一項「不正確操作」而關閉。

聲明指出，「核電廠依照設計作出回應並一直處於安全狀態」，已通知監管部門這起事件。

聲明中說，在和瑞士聯邦核安監察局 (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate) 進行諮商後，這座反應爐將會恢復運作。

Axpo 表示，在反應爐重啟期間，核電廠的非核部分上方將出現明顯的水蒸氣，強調「對人和環境都沒有危險」。

貝茲諾核電廠 2 號反應爐最早是在 1971 年開始運作，而 1 號反應爐 (Reactor 1) 則在這之前 2 年就已經運作，使得貝茲諾成為世界上最古老的核電廠之一。

Axpo 去年底表示，計劃將這座核電廠運作到 2033 年。

( 發布日期 114 年 2 月 11 日 )

---

# 福島核電廠外釋核種在海底 沉積物中的分布

作者 陳清江

義守大學 醫學影像暨放射科學系 退休

海底沉積物對於被封存的顆粒反應性放射核種非常重要，並且是在海底進食和生活的生物體的污染源。它們也可能透過細粒顆粒結合放射核種的再懸浮、生物擾動以及孔隙水中可溶性放射核種的損失而成為污染物的長期來源。

福島第一核電廠(FDNPP)外釋後，海底採樣和放射核種分析立即開始。使用表面抓取樣本和多芯進行沉積物取樣，其穿透深度從小於 3 公分到大於 20 公分不等，同時也部署了拖曳式伽馬射線能譜儀，測量沉積物頂部約 3 公分的平均放射性，以研究銻沉積物分佈的變化。

日本東岸附近海域底部沉積物中的放射性污染主要是  $^{134}\text{Cs}$  和  $^{137}\text{Cs}$ 。儘管 Pu 和 Am 在地球化學方面更具顆粒反應性，但對它們的活性和沉積物中同位素比率的測量是來自大氣層核爆，而不是較小的 FDNPP 來源。

$^{90}\text{Sr}$  的釋放濃度遠高於 Pu，但由於  $^{90}\text{Sr}$  對顆粒的親和力較低，底部沉積物中  $^{90}\text{Sr}$  的庫存可能比水柱中測量的  $^{90}\text{Sr}$  的庫存低一千倍。鑑於 FDNPP 衍生的 Pu、Am 和  $^{90}\text{Sr}$  的輸入量相對較小以及

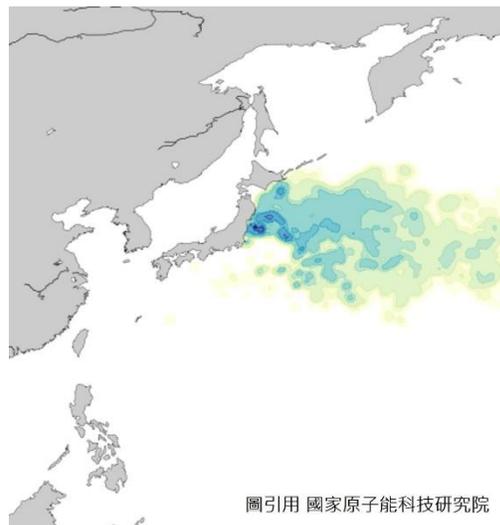
$^{134}\text{Cs}$  的衰變（最初釋放的  $^{134}\text{Cs}$  在 5 年後只剩下不到 20%），所以討論以海底  $^{137}\text{Cs}$  的分佈為主。

沉積物  $^{137}\text{Cs}$  在時間和空間上都有很大變化，核武試驗中預期的庫存量小於  $50 \text{ Bq m}^{-2}$ ，最接近 FDNPP 的沉積物庫存量超過  $100,000 \text{ Bq m}^{-2}$  (圖 1)。一般來說， $^{137}\text{Cs}$  庫存隨著距 FDNPP 距離的增加和水深的增加而減少，因為水柱顆粒豐度較低，導致近海下沉顆粒的去除量減少。由於向南流動的洋流和較細顆粒的沉積物，FDNPP 南部陸棚沉積物中的放射性銻含量相對於北部略高。

然而，這些趨勢受到  $^{137}\text{Cs}$  活性的高空間變異性的影響，即使在同時收集且彼此緊鄰的一組多核樣本中，其變動範圍也可能高達 3-5 倍。

如果在同一位置收集多個樣品，則對數據進行平均。

無論是與黏土礦物或有機物質伴生，一旦沉積在海底，銻可能會以其顆粒伴生狀態重新流動，並透過物理過程水平傳輸，和/或主要透過生物擾動垂直重新



圖引用 國家原子能科技研究院

分佈和混合。顆粒通量數據顯示，颱風事件後陸棚沉積物輸入量更大，更細粒的沉積物更容易透過水流重新懸浮和傳輸。

使用  $^{210}\text{Pb}$  推導出生物擾動率，發現南部沿海地區銻污染最嚴重的沉積物中的混合率明顯更高，而北部和近海的混合率則降低。估計南部沿海地區 50% 的銻污染沉積物在沉積一年內混合深度將超過 3 厘米，而在北部和近海，較低的生物擾動率導致地表銻活度的下降速度要慢得多。

因此，生物擾動可能在沉積物-水界面處提供持續的 FDNPP Cs 污染源，其時間尺度比僅根據當地沉積速率預測的時間尺度要長得多。生物擾動會導致表層沉積物活性下降，而生物灌溉可以增加孔隙水與底層水的交換。這已在愛爾蘭海塞拉菲爾德觀察到，隨著塞拉菲爾德  $^{137}\text{Cs}$  釋放量大幅減少，沉積物中 Cs 的脫附成為水柱的主要來源。

總之，海底沉積物中 FDNPP 最初釋放的  $^{137}\text{Cs}$  活性含量不到 1% ( $130 \pm 60 \text{ TBq}$ )。

然而考慮到自首次 FDNPP 釋放以來水體中銫濃度逐漸下降，沉積物儲存庫目前比上覆水域中當前銫總庫存量大 5-10 倍以上。

透過生物擾動對銫污染的沉積物進行快速向下混合有助於降低表面銫沉積物濃度並減少沉積物-水界面的生物吸收，但生物擾動也可以在數年至數十年的時間尺度內將受污染的沉積物回流到地表。

沉積物的物理再懸浮會透過近海擴散降低 Cs 的活性，並會發生可溶性損失。

然而，河流和地下水中與沉積物結合的銫的持續輸入基本上平衡了這些損失，導致沉積物庫存的預期變化很小。結果顯示，日本近岸沉積物在數年至數十年內仍將是放射性銫的重要長期來源，具體取決於位置和沉積物類型，儘管需要更多的研究來限制這些來源和損失項。這與先前檢查愛爾蘭海塞拉菲爾德放射性銫污染的研究一致，在大幅減少輸入後，總沉積物  $^{137}\text{Cs}$  的庫存在大約 5-20 年的時間尺度上減少了一半。

放射性核種在海洋的遷移相當複雜，福島核電廠輻射外釋事件提供一個實際調查研究的案例，其對海洋的擴散稀釋機制和對環境生態的影響評估結果，很值得我們借鏡。

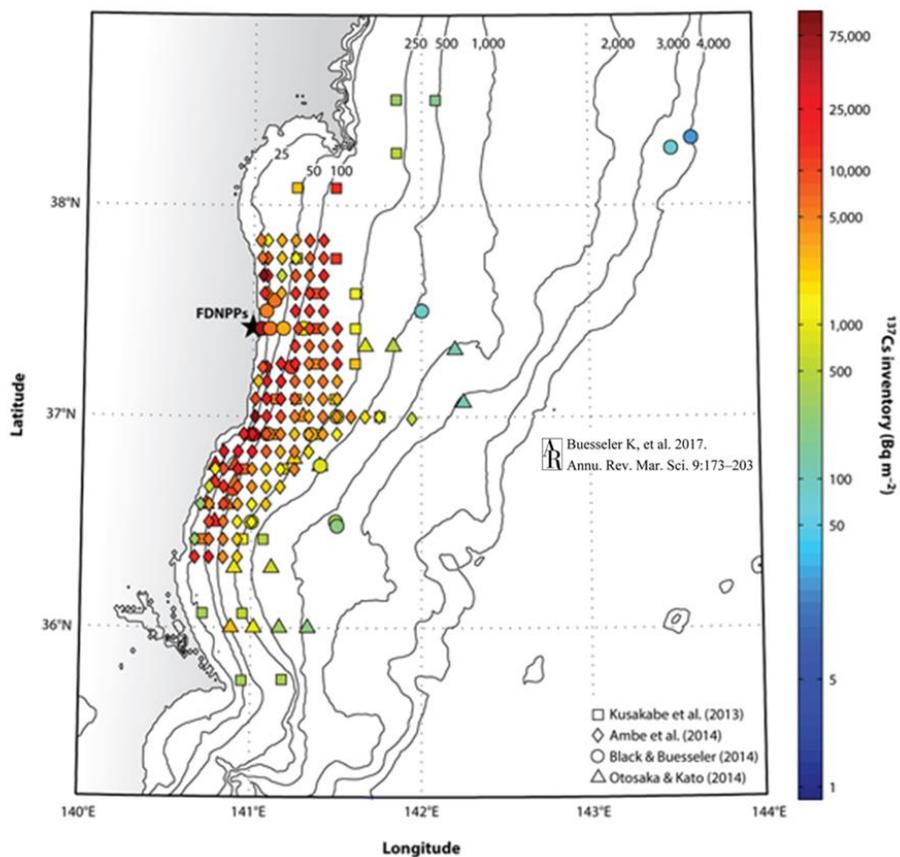


圖 1 根據 2012 年和 2013 年收集的岩心對日本近海海底的  $^{137}\text{Cs}$  進行彙整。

發行人  
張似璵

主編  
劉代欽

執行編輯  
林珏汶

編輯委員  
尹學禮  
江祥輝



**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