

# 輻射普拉斯

趙自強

長庚大學 放射醫學研究中心

Email: chaot@gap.cgu.edu.tw

**摘要：**本文探討游離輻射在科學與應用領域的多元結合與影響。從居禮夫人與倫琴的開創性研究談起，說明輻射如何成為現代物理、化學與醫學發展的重要推手，進一步延伸至癌症治療、太空科技、動物臨床研究與安全標誌設計等實際應用。輻射本無絕對的好壞，關鍵在於其使用方式與風險管理。透過「+」的觀點，本文強調輻射加上跨領域的整合應用，不僅能帶來創新突破，也具備教學與社會溝通的潛力。文中亦介紹臺灣在質子治療與輻射模擬平台上的進展，展現我國在放射科學與產業應用的實力。輻射是一把雙面刃，既蘊藏風險，也蘊含機會，唯有秉持科學倫理與安全原則，才能善用輻射帶來的正向價值，造福人類社會。

## ■ 前言

輻射普拉斯這個題目，輻射很好理解，指的是游離輻射，游離輻射是指能量足以將原子或分子游離，也就是把原子中的電子擊出，使其成為自由粒子與正離子的輻射(Lechner, 2018)。常見的游離輻射包括 X 光、 $\gamma$  射線、 $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子、質子、重離子和中子等。由於其具有高能量，游離輻射可與生物組織發生作用，引發細胞損傷或遺傳物質破壞，因此在醫療、核能與科研應用上，必須嚴格控制曝露量並落實防護措施。

普拉斯指的是「+」，此符號常常有一個更好的涵義，例如 A+代表比 A 更好，C++代表比 C 更好的語言。然而，輻射本身沒有好壞之分，關鍵在於「如何使用」。用得對，它可以用來診斷疾病、治療癌症、保存食品、監測設備、探索宇宙；但若濫用或疏忽管理，則可能造成傷害甚至災難。就像電與火一樣，都是人類生活中不可或缺的能量來源，妥善運用就能造福社會，用錯了就會釀成風險。

因此，本文題目之「+」，並不是指更好的輻射，而是當游離輻射加上一個不同的應用，可能帶來教學研究的機會，或給人類帶來更美好的生活，這些種種源自於游離輻射的發現。

## ■ 居禮夫人與輻射的發現

瑪麗·居禮 (Maria Curie, 圖 1 左) 是近代科學史上最具有代表性的女性科學家之一，其科研歷程與對輻射的發現對物理、化學與醫學領域產生深遠影響。她於 1891 年前往法國巴黎

就讀索邦大學 (Sorbonne University)，展現卓越的數理能力，並與物理學家皮耶·居禮(Pierre Curie)結為伴侶及研究夥伴(Rockwell, 2003)。1896 年，居禮夫婦延續安東尼·亨利·貝克勒爾(Antoine Henri Becquerel)對鈾放射性的研究，發現天然礦石中存在放射性更強的未知物質。他們透過電荷測量與化學分離實驗，成功分離出兩種新元素：釷(polonium)與鐳(radium)，奠定放射性研究的基礎。1903 年，兩人與貝克勒爾共享諾貝爾物理學獎；1911 年，瑪麗再度因研究鐳的化學性質獲得諾貝爾化學獎，成為史上首位兩度獲獎者。她的研究不僅揭示原子內部結構的奧秘，也促成放射線在醫學診斷與治療上的應用，對後世科學與社會發展產生重大貢獻。

鐳屬於第 2 族鹼土金屬，化學性質類似鋇 (Ba)，具高反應性，能與水劇烈反應產生氫氣與氫氧化鐳。最常見的同位素為 Ra-226，半衰期長達 1600 年，會進行  $\alpha$  衰變並產生氣態的氡 (Rn)，具高度放射性。20 世紀初鐳廣泛應用於癌症治療與發光錶面，但由於輻射防護意識不足，造成工人（如「鐳女孩」(Gunderman & Gonda, 2015)）罹患骨癌、貧血等傷害，現已被其他放射源所取代，僅用於科研與歷史教育。

釷是由居禮夫婦於 1898 年從鈾礦中首次分離出的放射性元素，化學性質與碲 (Te) 相似。釷最重要的同位素為 Po-210，為強烈的  $\alpha$  粒子發射源，具有高揮發性與劇毒性，進入人體後會集中於肝臟、骨髓並造成嚴重輻射傷害。雖然 Po-210 可應用於靜電消除器與太空探測器的微型放射電源，但因其高毒性與放射性風險，目前多用於實驗研究與輻射防護訓練中。

釷與鐳的發現不僅開啟了放射化學的研究，也促進了醫學影像與治療的發展。這兩種元素都屬於天然放射性核種，具有高度學術與教育價值，有助於提升科學素養與風險意識，亦能激發對放射線科技與科學倫理議題的關注。

威廉·倫琴(Wilhelm Conrad Röntgen，圖 1 右)更比居禮夫婦早些年發現游離輻射，他是一位德國物理學家，以發現 X 射線聞名於世。1895 年，他在實驗陰極射線管時(圖 3 左)，偶然發現一種肉眼無法見的「看不見的光」，可穿透紙張與薄金屬，並使螢光屏發亮。他最著名的成果是拍攝了世界上第一張人體 X 光影像——他妻子手部的骨骼與戒指(圖 3 右)，這項突破為醫學診斷開啟全新視野。倫琴並未為此發明申請專利，反而開放全球使用，展現其科學家的道德胸懷。他於 1901 年成為第一屆諾貝爾物理學獎得主，肯定其在新型輻射研究上的開創性貢獻。倫琴的發現促進了放射物理學、醫學影像與現代診斷學的發展，也奠定後續居禮夫人、貝克勒爾等人對放射性元素研究的基礎。他是一位將實驗觀察與理論推論完美結合的典範，其對科學與人類健康的貢獻影響深遠。



圖 1：居里夫人(左)；威廉·倫琴(右)

## ■ 輻射 + 標誌

現今常見的輻射警告標誌(三葉形符號)源自 1946 年美國加州大學柏克萊分校的輻射實驗室。當時研究人員為了標示放射性物質的危險性，設計出一個三葉向外擴散的圖樣，象徵放射線自中心源頭發散。最初此標誌採用粉紅色圖案搭配白色底色，因粉紅色在當時顯眼且不易與其他符號混淆。隨著國際標準的建立，現今通用版本改為黃色背景配黑色三葉圖案，更具警示效果。此符號廣泛應用於醫療、核能、工業與太空等領域。

然而，為了更有效傳達「此處有潛在輻射危險」的訊息。讓不同歷史、文化背景的人即便不了解放射線的原理，也能看到符號也能立即意識到風險，2007 年國際原子能總署進一步推出補充標誌，加入紅底、骷髏與逃跑人形等圖像，用於高度危險源的容器。放射線標誌不只是科學符號，更體現了風險溝通與安全設計的整合，是核子時代最具代表性的視覺語言之一。

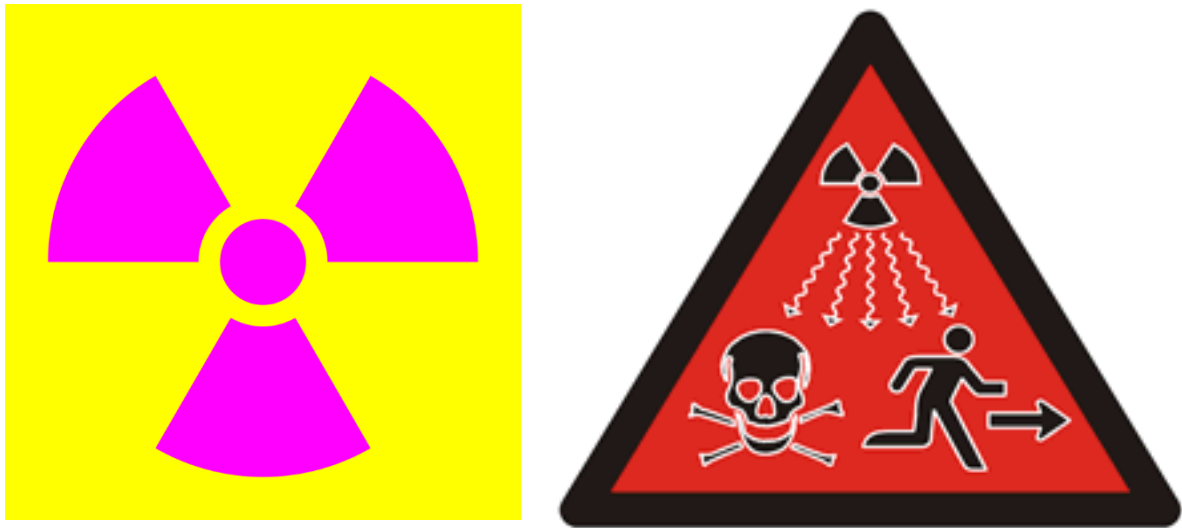


圖 2：輻射警告標誌的演進

## ■ 輻射 + 物理/化學/醫學

自 19 世紀末放射性被發現以來，輻射成為推動現代科學發展的關鍵力量，廣泛應用於物理、化學與醫學三大領域。在歷屆諾貝爾獎得主的研究成果中，輻射技術不僅展現其基本科學意涵，更反映其對人類健康、能源、材料與生命科學的革命性影響。

威廉·倫琴於 1901 年成為第一屆諾貝爾物理學獎得主，肯定其在輻射研究上的開創性貢獻。之後，在物理領域，1903 年諾貝爾物理學獎頒給亨利·貝克勒爾與居禮夫婦，肯定他們對天然放射性的發現與量測方法建立，開啟原子物理與核子物理的研究時代。1935 年詹姆士·查德威克 (James Chadwick) 因發現中子而獲獎，這一粒子成為核分裂理論與核能應用的基礎。1944 年，奧托·哈恩 (Otto Hahn) 的鈾核分裂實驗則促成核能與武器發展，也使人類對輻射風險有了深刻反省。

在化學領域，1911 年瑪麗·居禮因成功分離鐳與釷，揭示放射性元素的化學性質，榮獲諾貝爾化學獎。此後的放射化學研究推動了同位素標定技術、核反應合成與新元素的發現。1960 年，美國科學家威拉得·法蘭克·利比 (Willard Frank Libby) 因建立碳-14 放射性定年法而獲化學獎，為考古與地球科學提供了可靠的年代測定工具。

在醫學與生理學領域，輻射應用改變了人類對健康與疾病的認識與處理方式。1927 年赫爾曼·穆勒 (Hermann Müller) 因證明 X 射線可誘發遺傳突變而獲獎，奠定輻射生物效應與癌症成因的理論基礎。1946 年，美國放射生物學家赫爾曼·約瑟夫·馬勒 (Hermann Joseph Muller) 進一步揭示 DNA 損傷與輻射劑量的關係。2001 年，李察·蒂姆·亨特 (Richard Timothy Hunt)

等人獲得醫學獎，研究細胞週期與 DNA 修復機制，促進放射線治療（如質子或重離子治療）的精準化與個人化。

此外，正子斷層掃描 (PET) 則結合放射性同位素與分子影像技術，讓臨床醫師可追蹤腫瘤或神經疾病的生理變化。2003 年諾貝爾醫學獎表彰針對 MRI (Magnetic Resonance Imaging) 原理與應用的研究，也進一步擴展了非侵入式影像診斷的安全性與解析度。

從這些科學家的研究歷程可見，輻射不僅是一種物理現象或能量型態，更是促進跨領域合作與創新的核心技術。它既可用於破壞腫瘤細胞，也可能對健康造成風險，突顯科學倫理與風險溝通的重要性。未來，隨著粒子加速器、核醫材料與太空輻射模擬技術的進步，輻射科學將持續為能源、健康與材料科學開創新局，為人類生活帶來更多可能。

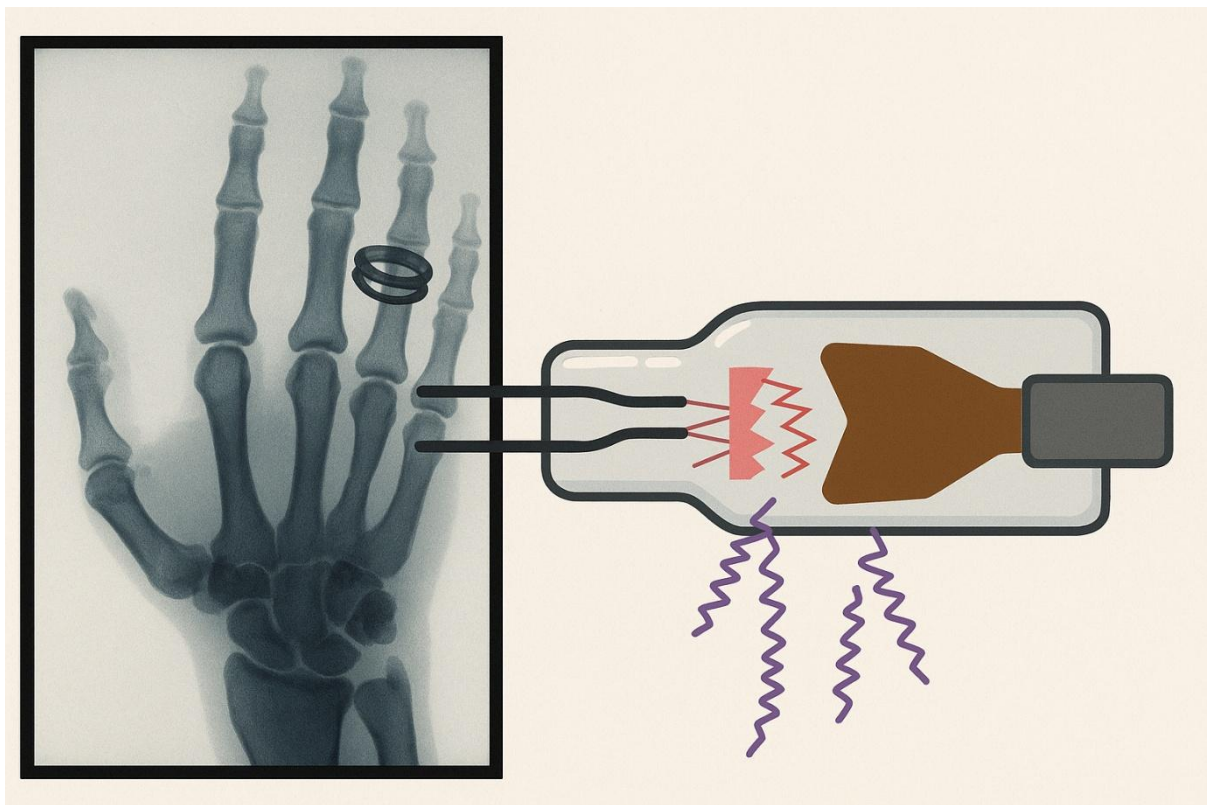


圖 3：左側為倫琴於 1895 年拍攝的第一張 X 光影像，顯示其妻子手部骨骼與戴著的戒指；右側為 X 光管示意圖，描繪電子自陰極發射，經高電壓加速後撞擊陽極金屬靶產生 X 射線。此原理奠定現代醫學影像技術的基礎。

## ■ 輻射 + 治療

1899 年，瑞典醫師塔格·謝爾根 (Tage Sjögren) 成為最早嘗試以 X 光治療癌症的先驅之一。在倫琴於 1895 年發現 X 光僅四年後，謝爾根便開始將這種新型輻射應用於皮膚癌與狼

瘡性結節病患的治療。他透過局部、控制劑量的 X 光照射，觀察到腫瘤明顯縮小與症狀改善的成效。這項成果雖然在技術上仍屬初期階段，但卻提供了放射線可用於「治療」而非僅作影像診斷的關鍵證據。謝爾根的臨床實驗被視為現代放射腫瘤學的雛形，開啟了以輻射治療癌症的新紀元。

放射治療是利用高能輻射破壞癌細胞的治療方式，已成為現代癌症治療的三大主軸之一，與手術、化學治療並列。傳統放射治療以光子為主，雖能有效殺死癌細胞，但同時也會影響周圍健康組織，可能引發不良副作用。隨著科技進步，質子治療因具備優越的劑量分佈特性，逐漸成為放射治療的新趨勢。本期另有四篇文章描述質子治療的發展與其在醫學影像、輻射生物、微劑量學的研究發展。

質子治療的原理是利用質子在人體內沉積能量的布拉格峰 (Bragg peak) 效應，能將最大劑量集中於腫瘤位置，顯著降低對周圍正常組織的照射傷害，尤其適用於兒童癌症、顱底腫瘤及難以手術的深部腫瘤。臨床研究顯示，質子治療在降低復發率、減少併發症、提升生活品質等方面均具優勢。

臺灣自 2015 年長庚紀念醫院設立首座質子治療中心以來，粒子治療逐漸普及。目前已啟用的治療中心包括林口長庚、高雄長庚、台北醫學大學、臺北榮總(碳離子)、中國醫藥大學附設醫院、與台大癌醫中心，建置中者如彰化基督教醫院等等。各中心採用不同機型與配置，包括 Sumitomo、IBA ProteusONE 與 Varian Probeam360 等，提供 1 至 4 條治療光束軌道。根據統計，長庚醫療體系由 2015 至 2024 年中已累積治療超過 7,500 名病患，適應症涵蓋頭頸癌、乳癌、肝癌與肺癌等。

整體而言，質子治療在臺灣的快速發展，不僅擴大癌症治療的選擇，也帶動影像導引、劑量優化、生物標靶追蹤等技術的進步。未來隨著個人化精準醫療的深化，結合生物影像的質子治療可望成為癌症放療的新標準，為患者提供更安全、有效與客製化的治療方案。

## ■ 輻射 + 動物

動物在輻射臨床前研究中扮演重要角色，主要用於探討放射線對生物體的影響機制、治療效果與安全性。這些研究通常利用動物模型（如小鼠、大鼠、犬、貓等）模擬人體疾病狀態，評估新型放射線治療策略的有效性與潛在風險。臨床前實驗可觀察腫瘤對不同劑量與粒子類型（如質子、重離子）的反應，並分析放射線對特定器官（如腦、肺、肝、骨髓）造成的急性或慢性影響，是推動精準放療與生物標靶治療設計的基礎。在此應用下，正子攝影（Positron Emission Tomography, PET）、單光子電腦斷層（Single-Photon Emission Computed Tomography, SPECT）與磁振造影（MRI）等多模態影像技術可用於追蹤腫瘤代謝變化、血流

分布與治療反應。其中，正子影像能顯示腫瘤缺氧、細胞增殖或 DNA 損傷等生物特徵，成為評估放射線效果與劑量設計的重要依據。結合即時影像與病理驗證，寵物模型不僅能驗證放療新技術的可行性，也有助於推動人醫與獸醫放射治療的跨界合作，發展更貼近臨床需求的治療策略。

近年來，寵物影像學的引入為輻射研究開啟新方向。犬與貓等中大型哺乳動物與人類在生理、腫瘤發展與治療反應上更為相似，成為介於小動物實驗與人體試驗之間的「轉譯研究橋梁」。許多臨床前放射治療計畫開始納入患有自然發生腫瘤的犬貓病患，利用臨床級放射線設備（如質子治療機、影像導引系統）進行治療，同步搭配影像追蹤、組織分析與長期觀察，提供極具臨床價值的資料。

從經濟面來看，寵物治療已成為一個潛力龐大的醫療服務市場。隨著全球飼養犬貓等伴侶動物的家庭逐年上升，飼主對寵物健康的關注也趨於人性化與高端化，願意投資先進醫療（如放射影像診斷、放射治療）的比例大幅提升。這樣的市場需求推動獸醫腫瘤學快速發展，投入放射影像與治療設備於寵物醫療不再僅止於科研用途，也具備商業可行性。因此，結合臨床前輻射研究與寵物醫療市場，不僅可加速新療法的發展與驗證，亦符合現代社會對動物福祉與高品質照護的期待。透過寵物經濟的支持，其輻射醫學研究正朝向更具實證性、轉譯性與產業價值的方向邁進。

許多患有自然發生性腫瘤的寵物病患，如犬隻的鼻腔癌、腦瘤與骨肉瘤，與人類癌症在生物學行為、放射反應與病程發展上高度相似。透過這些寵物個體進行放射治療臨床前驗證，科學家能收集與人體更接近的治療效應與毒性資料，彌補傳統小鼠模型的不足。相對於人類臨床試驗面臨的倫理與招募困難，寵物病患提供了一個高價值、具真實世界參考性的轉譯研究平台。

## ■ 輻射 + 太空環境/電子可靠度

太空是一個充滿遊離輻射的環境，包括宇宙輻射與太陽風，由質子、電子、重粒子...組成，對太空機電、材料與人體帶來了顯著風險(Simonsen et al., 2020)。由於半導體技術日新月異，台灣也在半導體先進製程居於國際領先地位。隨著元件體積所小，其輻射敏感性急劇增加。自動化系統與 AI 平臺都必須有對輻射損傷有足夠的耐受力(Balasubramanian & Maskell, 2023; Kochendarfer & Pabst Jr, 1971)。

電子元件的輻射損傷可分為三種：例如單一事件效應(Chiang et al., 2021; Dodd et al., 2004; Liu et al., 2023)，是指單一高線能粒子擊中電子元件的空乏區，產生電流造成資料錯誤，可能導致系統誤推、動作異常、甚至電路燒毀；總游離劑量效應，多半發生在氧化層，使元件逐

漸遠離其動態設計範圍最後導致失效；位移損傷，發生在所有晶格，因為晶格位移損傷造成能階改變，並改變半導體電性(Poulin & Bourgoin, 1980)。這些損傷是太空安全系統設計之基礎，為了準確預測這些效應，必須依靠成熟的計算模型。

長康大學與日本富山高級專門學校合作，建立了「PTSIM-Space」太空環境模擬平臺，用於預測分析太空輻變對電子元件與人體的影響。該平臺添加了元件模擬、對應模擬及 LET 資料量等功能，也展開了對電子元件細節的模擬。此系統基於 GEANT4 (GEometry ANd Tracking, V4) (Agostinelli et al., 2003)，能模擬不同輻射對半導體、人體、動物、材料的輻射損傷。從而推動我國在太空安全與先進製程設計上的發展，進一步與國際接軌。

於太空中作業的人類，還對輻射劑量特別敏感。更多的研究顯示，不僅是骨質減少、視力變化、記憶力衰退等。對於未來的月面移民、火星人類任務，都必須建立太空人輻射劑量與健康風險的評估與管理方案。PTSIM-Space 也有模擬人類與動物在太空環境曝露劑量的評估功能。

此外，該系統也考量材料降解模擬(Garoli et al., 2020; Olano-García & Montero, 2020)。成熟的材料是達到太空變環機車作業長期維持緊急機能的重要之一。

## ■ 輻射 + 傷害

2011 年美國西維吉尼亞州一間醫院就因腦部 CT(computed tomography)過度曝光，導致數十名病患接受到超量輻射，引發輿論關注與監管機構的調查。該事件突顯醫療輻射曝露風險絕非理論，而是真實存在的危害。

輻射傷害是指人體受到過量游離輻射（如 X 光、 $\gamma$  射線、質子、重離子等）曝露後，產生的組織傷害或生理異常。這些輻射會對細胞造成直接或間接傷害，例如直接打斷 DNA 雙股結構，或透過水分子產生自由基，進而破壞細胞內的重要蛋白質與遺傳物質(Incerti et al., 2010)。

根據曝露時間與劑量不同，輻射傷害可分為急性與慢性兩類。急性輻射傷害常見於大量短時間曝露，例如核災現場或醫療事故，可能出現噁心、嘔吐、掉髮、皮膚潰爛、造血功能抑制等症狀。若劑量過高，更可能導致死亡。慢性傷害則可能在多年後發生，包括白內障、不孕、免疫功能下降，甚至癌症或基因突變等長期影響。

為了保障人員健康，輻射安全的核心原則是「合理可行最小化曝露」。醫療院所或研究機構需配備個人劑量計，監控輻射工作人員的劑量累積情況；定期接受職業健康檢查，並安排輪值與休息時間，以降低長期累積風險。

針對職業曝露而言，台灣《游離輻射防護法》已針對放射線工作人員訂有明確規範。例如全身年劑量不得超過 20 毫西弗，孕婦輻射工作人員更需調整工作崗位以保護胎兒健康。相關單位如原能會、勞動部等亦有持續修訂技術指引，落實源頭管理與事後追蹤。

若發生核災或輻射外洩事件，例如福島核災、車諾比事件，則需立即啟動「去污」與「管制區設置」措施，並依情況進行人員撤離、碘片服用、全身污染監測等作業。在台灣，原能會與衛福部、消防署已有制定緊急應變計畫，各地也會定期舉辦演練，以強化災害應變能量。

總之，輻射是一項可怕但可控的有用工具，只要遵守防護原則、落實教育訓練與制度管理，不論在醫療、工業、科研或太空領域，輻射應用都能達到「高效、低風險」的平衡點，為人類社會帶來實質助益而不致造成危害。

## ■ 結語

輻射沒有好壞之分，關鍵在於我們怎麼用。從診斷疾病、治療癌症，到探索宇宙、發展新材料，輻射在各領域的應用早已深植人類生活。然而，每一項科技進展的背後，也提醒我們需謹慎面對潛在風險、強化防護機制、維持科學倫理，才能讓輻射有更多應用，物理、化學、醫學、生物與太空等不同場域，展現其廣泛的應用潛力與教育價值。長庚大學放射醫學研究中心將把握這些跨領域議題，啟發學生對科學的興趣與風險意識，讓輻射不只停留在教科書或實驗室，而是成為理解自然、造福社會的橋梁。未來，期待臺灣能持續發揮研究能量與產業優勢，培育出能在輻射科學與應用領域中，結合理性與人文關懷的新世代人才。

## ■ 參考資料

- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. a., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., . . . Barrand, G. (2003). GEANT4—a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250-303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- Balasubramanian, P., & Maskell, D. L. (2023). FAC: A Fault-Tolerant Design Approach Based on Approximate Computing. *Electronics*, 12(18), 3819. <https://doi.org/10.3390/electronics12183819>
- Chiang, Y., Tan, C. M., Tung, C.-J., Lee, C.-C., & Chao, T.-C. (2021). Lineal Energy of Proton in Silicon by a Microdosimetry Simulation. *Applied Sciences*, 11(3), 1113. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1113>
- Dodd, P. E., Shaneyfelt, M. R., Felix, J. A., & Schwank, J. R. (2004). Production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51(6), 3278-3284. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.839172>

- Garoli, D., Rodriguez De Marcos, L. V., Larruquert, J. I., Corso, A. J., Proietti Zaccaria, R., & Pelizzo, M. G. (2020). Mirrors for space telescopes: Degradation issues. *Applied Sciences*, *10*(21), 7538. <https://doi.org/10.3390/app10217538>
- Gunderman, R. B., & Gonda, A. S. (2015). Radium girls. In (Vol. 274, pp. 314-318): Radiological Society of North America.
- Incerti, S., Ivanchenko, A., Karamitros, M., Mantero, A., Moretto, P., Tran, H., . . . Bernal, M. (2010). Comparison of GEANT4 very low energy cross section models with experimental data in water. *Medical physics*, *37*(9), 4692-4708.
- Kochendarfer, D. C., & Pabst Jr, W. R. (1971). MIL-STD-883 and related documents. *Journal of Quality Technology*, *3*(3), 129-137.
- Lechner, A. (2018). CERN: Particle interactions with matter. *CERN Yellow Reports: School Proceedings*, *5*, 47. <https://doi.org/10.23730/CYRSP-2018-005.47>
- Liu, Y., Cao, R., Tian, J., Cai, Y., Mei, B., Zhao, L., . . . Xue, Y. (2023). Study of Single-Event Effects Influenced by Displacement Damage Effects under Proton Irradiation in Static Random-Access Memory. *Electronics*, *12*(24). <https://doi.org/10.3390/electronics12245028>
- Olano-García, L., & Montero, I. (2020). Energy spectra of secondary electrons in dielectric materials by charging analysis. *Results in Physics*, *19*, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103456>
- Poulin, F., & Bourgoin, J. (1980). Threshold energy for atomic displacement in electron irradiated germanium. *Revue de Physique Appliquée*, *15*(1), 15-19. <https://doi.org/10.1051/rphysap:0198000150101500>
- Rockwell, S. (2003). The life and legacy of Marie Curie. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, *76*(4-6), 167-180.
- Simonsen, L. C., Slaba, T. C., Guida, P., & Rusek, A. (2020). NASA's first ground-based Galactic Cosmic Ray Simulator: Enabling a new era in space radiobiology research. *PLoS biology*, *18*(5), e3000669. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000669>