

「輻射+化學」：燃起人類文明的第三把火炬

鄭宏文

國立臺北教育大學 自然科學教育學系

Email: hongwen@tea.ntue.edu.tw

■ 前言

化學是探究物質的科學，而生活中的化學則無處不在，與人們的食衣住行育樂習習相關。所謂的「輻射」係指除傳導與對流之外，能量傳遞的另外一種形式。以能量足夠高的輻射(>10 eV) 照射物質，即可游離該物質分子的價電子，此類輻射則稱之為游離輻射，例如高能量的中子射線(中子)、質子射線(質子)、 α 射線(氦原子核)、 β 射線(電子)、X射線(光子)與伽瑪射線(光子)等，實務上，因為10 keV 以下的光子穿透力太弱，要超過此限才會稱為游離輻射；而日常生活中人們所面對能量較低的諸如：紫外線、可見光、紅外線等光子則稱之為非游離輻射。過去，因為發現了前述高能量游離輻射、以及鈾、釷與鐳等輻射源，倫琴(Wilhelm Röntgen)、貝克勒(Henri Becquerel)與居禮夫人(Marie Curie)等科學家先後獲得了1901與1903年的諾貝爾物理獎、以及1911年的諾貝爾化學獎。以此高能量游離輻射作為探究工具，科學家們遂得以更深入地瞭解物質乃至於原子結構的奧秘，甚至可將科學探究歷程之中所累積的這些科學技術與相關經驗遷移、推廣並應用在：材料分析、分子診斷、癌症治療、放射醫療、質子治療等領域，進一步促成了現代化學、醫學與物理等跨越領域的深度融合。職是之故，「輻射+化學」所帶來的革命性影響，實可謂人類歷史進程中繼「用火」與「用電」後，推動文明發展的第三把火炬。

■ 放射醫學的研究與發展

根據衛福部的統計資料顯示：癌症(惡性腫瘤)已連續多年蟬聯國人十大死因之首，雖然放射治療是一種有效的癌症治療手段，但唯有透過醫學影像的精確診斷與定位才能夠發揮其最大效能，故「醫學影像」與「放射治療」兩者實相輔相成且缺一不可。其中「醫學影像」技術係透過影像判斷疾病的類型、程度與位置，在療程前可用以瞭解病灶，精確定位放射治療的目標，在療程中亦可藉以觀察或追蹤腫瘤的變化以評估其治療效果；而「放射治療」則使用高能量輻射以摧毀腫瘤細胞或抑制其生長並阻止其向周圍組織擴散。舉例來說：X光、電腦斷層掃描(CT scan)、核磁造影(MRI)即為常見的醫學影像技術；而光子放射治療(可利用X光或伽瑪射線)則是傳統常見的放射治療手段。

然而高能量輻射在摧毀腫瘤細胞的同時，亦會對其周圍健康的正常組織造成傷害。但由於光子束（例如：X光）與物質粒子束（例如：質子束）的物理特性不同，因此質子治療（利用質子束）或重粒子治療（利用碳離子束）之中，高能量的物質粒子射線強度在穿透進入人體組織的臨界深度之後便會急遽地衰減（稱之為「布拉格峰（Bragg Peak）」，請見後文詳述），使物質粒子束的輻射劑量能精準沉積於腫瘤區，進而大幅降低周圍正常組織的照射劑量而降低療程的不適與副作用，達成精準治療的目標。因此，質子束與重粒子束也就成為了放射治療工具多元選項之中，除了傳統光子束以外的另外一種新興的選擇。

自 2015 年林口長庚醫院啟用第一座質子中心、臺北榮總於 2023 年成立第一座重粒子癌症治療中心以來，時至本文截稿之日止，臺灣已有 6 間粒子（質子/碳離子）中心投入營運，使臺灣粒子治療技術蓬勃發展，更讓臺灣成為全球粒子治療人均密度最高的國家之一。以長庚醫院為例（Chao, 2024），其質子中心時至 2024 年 6 月已累計治療病人逾 7,500 人，涵蓋肝癌、肺癌、頭頸癌、小兒腫瘤、乳癌等多種癌症類型，展現其醫療體系臨床與技術的雙重實力。在全球質子醫療快速發展之際，台灣相對密集的質子治療設施布局，已成為亞洲甚至全球注目的焦點。此外，長庚大學於 2018 年所成立的放射醫學研究中心（Chao, 2024），整合了物理、醫學、工程與化學領域並推動輻射相關研究，使該中心為全臺唯一設有高能質子束實驗平台之研究單位，不僅與太空中心合作開展微電子元件抗輻射測試，更建立輻射標準程序，與國際接軌。此外亦與臨床代謝體核心實驗室合作，探索放射與代謝路徑之交會處，深化輻射化學於診斷與治療中的角色，展現放射化學教育與應用的高度整合。本期邀請臺灣於前述相關領域從事前沿研究之專家學者，撰文闡述並介紹其研究成果以與讀者共享。

■ 本期專題文章簡介

一、《輻射普拉斯》—從歷史觀點談化學、輻射與倫理的融合

本篇文章由趙自強教授撰寫，回顧從倫琴發現 X 光、居禮夫婦分離出鈾與鐳，到現代放射醫學與化學應用的歷程，強調輻射本無好壞，關鍵在於應用的智慧與倫理。普拉斯，也就是「+」符號象徵輻射與各種學科的融合與可能性。此文能啟發讀者反思化學技術背後的社會責任與風險溝通。

二、《質子治療的輻射化學機轉與模擬探索》

卓奕均助理研究員深入介紹質子射束在細胞與水介質中所誘發的自由基反應，涵蓋從能量沉積到奈米尺度化學過程的關鍵機轉，突顯氫氧自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）在 DNA 損傷中所扮演的間接作用角色。同時亦說明金奈米粒子在自由基動力學中的潛在調控效應，以及模擬軟體如 Geant4-DNA 在建構放射化學與生物效應模型中的應用價值，為理解輻射化學與生物損傷間

的連結提供了具體而全面的視角，亦是學生學習放射治療相關跨域知識的優良素材。

三、《放射治療調控腫瘤微環境免疫細胞的化學分子機轉介紹》

程俊嘉助理研究員以化學與免疫分子機制的角度，解釋輻射如何經由 cGAS-STING 路徑活化免疫反應，並探討自由基、細胞激素在腫瘤免疫環境中的功能轉化。這篇文章建立起放射與免疫化學間的教育連結，展現化學在現代腫瘤免疫療法發展中的關鍵地位。

四、《走向個人化精準質子治療：從物理影像到在線生物影像導引》

詹美齡副研究員深入探討 Bio-IGRT 的應用，說明質子/重粒子治療透過特有的在線生物影像，可在分次治療期間的觀察腫瘤對輻射的反應，並配合個人化治療計劃進行劑量調整。此文介紹先進的質子/重粒子治療在線生物影像技術研發現況，亦比較其與傳統核子醫學利用 ^{18}F -MISO 缺氧顯影劑的差異。文章內容融合放射影像、生物化學與臨床策略，是跨學科教學與放射化學教育的極佳素材。

五、《超極化碳-13 磁振造影：即時代謝可視化技術》

謝憬儀助理研究員介紹如何透過動態核極化技術(DNP)，大幅提升 ^{13}C 磁振影像的靈敏度，進而以丙酮酸等探針觀察體內代謝變化，廣泛應用於腫瘤學與代謝疾病研究。此文連結物理化學、磁振造影與臨床應用，是當代化學教育不可或缺的重要題材。

■ 結語

當年居禮夫人因探索放射性元素而跨越了物理與化學的領域疆界，今日臺灣的質子醫療與放射研究則延續了這份精神，將科學實踐推向了跨領域整合與醫療臨床應用。這五篇文章從輻射化學、免疫、模擬、影像到代謝探針，具體展現了輻射與化學的深度結合，是臺灣多年來持續推動化學教育走向跨域融合與整合應用的另外一個重要示例。

■ 參考資料

Chao, T. C. (2024, Sep 20-22). *Particle therapy in Taiwan: Past, current status, and future prospects* [Conference presentation]. The 10th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Nagoya, Japan.