

原子能技術於半導體、醫療、食品及農業之應用現狀

廖偉辰

國家原子能科技研究院 綜合企劃處研發策略室

2024/10

原子能技術除了可以應用在核能發電外，也可用於其他民生應用領域，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)近年來積極推廣原子能應用，並將原子能在民生的應用上劃分為「放射性同位素和輻射技術」、「人類健康」、「糧食和農業」三議題(IAEA, 2020)，並投入更多資源在這些領域以解決人類面臨的問題，這同時也符合聯合國追求永續發展的目標。國原院在 2020 年已經探討上述三議題之主要技術群組(葛復光，2020)，本研究接續探討近三年 IAEA 報告及研究計畫中所提及半導體、醫療、農業及食品領域中較新及較迫切需要的技術。原子能民生應用種類有許多，而相關應用技術大多需在高輻射環境中，因此發展具抗輻射能力的半導體材料是發展原子能民生應用技術的基礎之一。因為醫療及食物與民眾的生活是密不可分，相關的原子能技術重要性遠高於其他技術，以下針對近幾年原子能技術於半導體、醫療、食品及農業的應用做出說明。

壹、半導體

原子能技術已廣泛應用於半導體製程，如先進微影光源、離子束摻雜、電漿蝕刻及輔助化學氣相沉積等，在「半導體製程」領域方面，我國擁有全球最完整的半導體產業聚落及專業分工，如圖 1 所示。此外，歐盟執委會(EU Commission)在今年 3 月啟動一項調查計畫，蒐集歐盟利害關係人對於半導體產業國際合作的意見，有助於評估利益、找出需求，並解決戰略夥伴的關切，其鎖定的七大戰略夥伴包含美國、印度、韓國、日本、臺灣、新加坡以及加拿大。

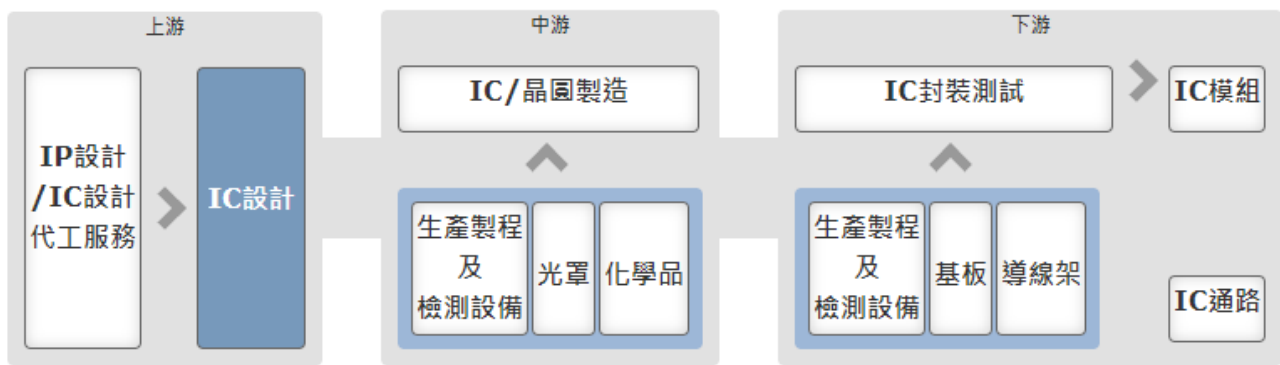


圖 1.我國半導體產業鏈

資料來源：產業價值鏈資訊平台(2024)

此外，根據 Guidelines for the Determination of Standardize Semiconductor Radiation Hardness Parameters (IAEA, 2023)，含有半導體材料的電子設備常被用於高輻射環境中，如放射治療設施、航空、航天等，這些電子材料和設備的性能、可靠性和壽命與它們對各種類型和強度的電離輻射(ionizing radiation)抵抗能力相關，因為這會導致其性能逐漸降低，因此半導體材料對電離輻射引起的累積損害的抵抗力至關重要。此外，IAEA 從 2011 年到 2016 年執行的研究計畫「Utilization of Ion Accelerators for Studying and Modelling of Radiation Induced Defects in Semiconductors and Insulators」¹(利用離子加速器，用於研究和模擬半導體和絕緣體在輻射誘導的缺陷)，目的在於更深入地了解不同類型的輻射如何影響材料和設備的電子特性，從而提高對輻射的抵抗能力。

以衛星科技為例，使用的半導體元件在太空中會受到游離輻射環境影響，造成總游離劑量效應(Total Ionizing Dose, TID)、單事件效應(Single Event Effect, SEE)等而無法正常運作，因此研發抗輻射晶片是發展衛星的重要環節。由上述可知，抗輻射半導體材料是原子能民生應用的基礎之一。

¹ <https://www.iaea.org/projects/crp/fl1016>

貳、醫療

根據林洺秀(2020)，原子能技術在醫療方面之應用，主要有放射診斷、放射治療及核子醫學之檢查與藥物治療。放射診斷方面：包括 X 光攝影、電腦斷層攝影等。X 光攝影乃利用 X 射線管所發生之放射線穿過人體，將人體的組織影像記錄在底片上再由醫師判讀診斷。放射治療方面：治療惡性腫瘤的方法常為放射治療、手術與化療。放射治療係利用聚焦的、高能量的放射線，破壞腫瘤細胞的遺傳物質 DNA，使其失去再生能力從而殺死腫瘤細胞。如 Co-60 治療機、直線加速器、加馬刀、電腦刀、電腦斷層治療機。核子醫學領域：包括(1)體內造影檢查：加馬造影機、單光子放射電腦斷層(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)、正子放射電腦斷層(Positron Emission Tomography, PET)、(2)放射免疫分析、(3)核醫治療。

一、基於同位素的治療診斷學

核子醫學是使用放射性示蹤劑(放射性藥物)來評估身體功能並診斷和治療疾病的技術，Nuclear Technology Review (2022)指出，現代核子醫學著重於實現「個人化」(personalized)或「精準」(precision)，也就是可以選擇適合個別患者病情的治療方法，如此可以解決與個人病情相關的風險評估、診斷、治療監測和放射性同位素治療。基於同位素的治療診斷學(Isotope-based theranostics)是指診斷和治療的結合，在治療診斷學中，嵌入不同放射性同位素的分子用於診斷或治療，一種放射性同位素用於高精度地識別癌細胞的位置、擴散以及類型，而另一種放射性同位素則散發輻射，透過放射性子彈(radioactive bullets)瞄準腫瘤，如此可在不傷害周圍的健康組織下來殺死癌細胞，不似傳統治療方法可能較大範圍傷及周圍健康組織，從而提高了治療的有效性和安全性。圖 2 為一名前列腺癌患者，癌細胞已擴散至淋巴結和骨骼，由左至右顯示經診斷治療後之狀況逐步緩解。治療診斷學臨床應用正在加速成長，目前最主要的應用是神經內分泌腫瘤、淋巴瘤、

攝護腺癌、乳癌、肺癌和甲狀腺癌患者的治療。未來著重於開發針對特定腫瘤細胞的新分子，從而可以治療一些晚期癌症，同時減少副作用。該領域若要快速發展，在培訓醫學和科學專家以及建立專門的醫療基礎設施方面需要更廣泛的國際合作。

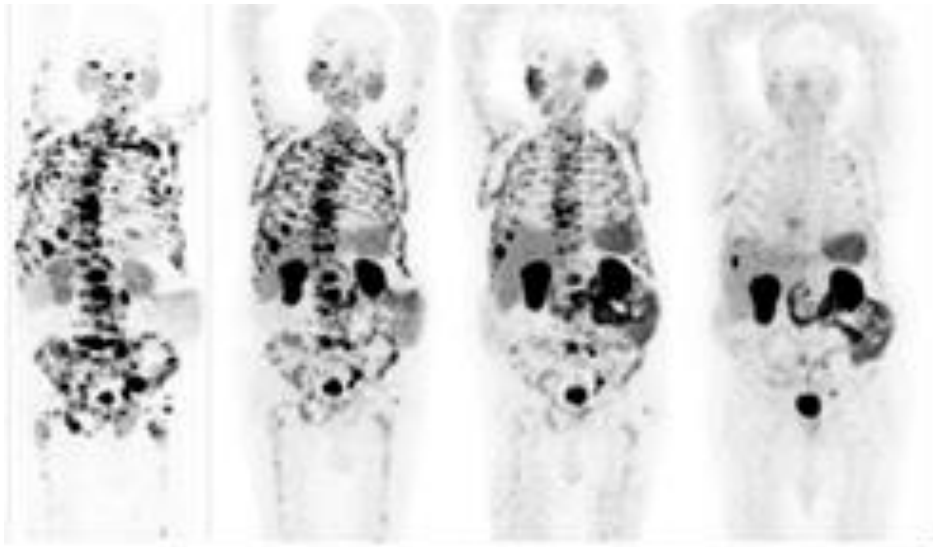


圖 2.患者經診斷治療後之狀況

資料來源:IAEA(2022)

二、人工智慧(AI)於放射治療所需的輪廓勾畫

根據最新 Nuclear Technology Review (2023)說明人工智慧用於放射治療計畫，放射治療工作流程是一個複雜的過程，若該過程包含過多耗時的步驟，可能影響治療品質，然而近幾年來，放射腫瘤醫學的發展迅速，除了放射療法設備的創新，三維成像、資訊技術以及對癌症生物學(cancer biology)的知識也明顯增加。放射療法不僅需要準確靶向腫瘤，還需對正常組織和結構進行保護，以最大程度地減少正常細胞損傷和副作用，因此準備放療過程中的關鍵步驟是輪廓勾畫(contouring)，在此期間，器官、正常組織和腫瘤被描繪出來，如圖 3 所示。有幾種工具可以使用或開發以提高輪廓勾畫過程的效率，例如使用基於圖集 (atlas-based contour) 進行自動輪廓勾畫，以降低輪廓多變性，選擇與患者最相似的圖像，

然後使用可變形的圖像紀錄，將圖集中的輪廓轉移成患者的輪廓。最近，大量高品質臨床輪廓數據已用於開發基於 AI 的深度學習演算法。



圖 3.AI 技術之輪廓勾畫成像

資料來源: IAEA (2023)

三、雙標記水穩定同位素技術

根據 Global Nutrition Report (2021)，全球肥胖人數逐漸增加，預估到 2025 年，全球與肥胖相關的疾病每年將造成 1.2 兆美元的損失。在這種情況下，雙標記水(doubly labelled water, DLW)穩定同位素技術提供的能量消耗數據至關重要，DLW 方法使用兩種穩定同位素示蹤劑氘和氧 18 來測量人體的能量消耗，一個人喝了一劑含有此兩種穩定同位素的水之後與體內的水混合，最後透過尿液、汗水和呼吸離開人體，氘僅以尿液及汗水等體液形式離開人體，而氧 18 以體液和二氧化碳形式離開身體。在給藥前和給藥後 7 至 14 天收集尿液樣本，氘和氧 18 在給藥前後消除率的差異是二氧化碳生成率的衡量標準，從中可以計算出能量消耗(Klaas, 2017)。國際原子能總署(IAEA)於 2018 年 12 月啟動了一個 DLW 資料庫，其中包含過去三十年人類在不同條件下的能量消耗測量的集合，這些數據可以用來研究身體活動模式、能量平衡、肥胖和其他代謝等健康問題。截至目前，該資料庫包含來自 40 個國家的 11,000 名受試者的數據，分布於各年齡層。IAEA 網

站可提交新數據，也可請求使用這些數據來探索重要的研究問題²。

參、食品及農業

一、特定化合物之穩定同位素分析及偵測技術

抗菌藥物，如抗生素、抗病毒藥、抗真菌藥和抗寄生蟲藥不斷被使用，例如抗生素廣泛用於家畜的防治疾病、促進生長，但未被吸收部分易釋放於土壤或水中，這些抗菌藥物透過環境的轉移可能會導致植物、動物和食品中出現殘留，若經食物鏈進入人體，隨著時間的推移而變化時，就會發生抗菌藥物抗藥性(antimicrobial resistance, AMR)，易造成感染難治癒的問題。特定化合物之穩定同位素分析(compound specific stable isotope analysis, CSIA)及偵測技術(Stable isotope probing, SIP)是評估抗菌物質的強大工具，它們可用於使用氣相層析-同位素比質譜儀(gas chromatography–isotope ratio mass spectrometry)和液相層析-同位素比質譜儀(liquid chromatography–isotope ratio mass spectrometry)來測量環境樣本中自然存在的穩定同位素(例如碳 13 和氮 15)的比率以了解抗菌藥物來源，同時檢測和量化抗菌藥物降解及活動的過程。為了解抗菌藥物在食物鏈中的動態，可採用同位素技術和基因定序的綜合方法，較新基因定序法為散彈槍總體基因體定序法(shotgun Metagenomics)(Christopher Quince, 2017)，這有助於研究動物體內抗菌藥物的動態及其在環境(特別是土壤和水中)中的演變，以及抗菌藥物抗藥性基因的進化和傳播。因為抗菌藥物不斷被使用於農業領域，為了應用上述技術來追蹤農業系統中的抗菌藥物，IAEA 啟動了一個研究項目，題為「Isotopic Techniques to Assess the Fate of Antimicrobials and Implications for Antimicrobial Resistance in Agricultural Systems」³(評估抗菌藥物命運的同位素技術及其對農業系統中抗菌藥物抗藥性的影響)，上述特定化合物之穩定同位素分析和偵測技術已被用於監測抗菌藥物農業應用後抗菌藥物的來源、動態和傳播，並評估對環境

² <https://www.iaea.org/resources/hhc/nutrition/databases/double-labelled-water-dlw>

³ <https://www.iaea.org/projects/crp/d15022>

的潛在影響。

二、小型化原子能分析儀器

根據 Nuclear Technology Review (2023)，隨著半導體、光子和其他技術的進展，使原子能分析儀器實現了小型化，從而產生了各種桌上型、手持式和便攜式設備，這些設備不僅可以應用於實驗室，而且可以應用於整個食品的各個生產和供應的流程。例如(Byers, McHenry, Grundl, 2019)開發用於快速篩檢食品的能量色散 X 射線螢光 (energy dispersive X-ray Fluorescence, EDXRF) 應用，以便依照世界衛生組織設定的監管標準檢測營養素和有毒金屬，例如鉛、鎘和砷。手持式和桌上式兩種形式可供非專業操作員在現場使用，它僅需要少量的樣品製備，並且不使用對環境有害的試劑。另一個例子是氣相層析-離子遷移光譜測定法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)，這是一種採用低能量氬化氬輻射源的技術。GC-IMS 可用於檢測微生物揮發性有機化合物，顯示真菌的存在，對食品中潛在的黴菌毒素(Mycotoxin, 真菌感染穀物後所產生的二次代謝產物)產生提供預先警告，以實施控制措施(Wang, Mo, Xu, Hu, Hu, Shuai, Li, 2021)。GC-IMS 亦可以檢測食品中的許多其他污染物和危險物質，包括甲醇(一種存在於摻假酒精飲料中的化學物質，攝入後會產生有毒代謝物)和環氧乙烷(一種有毒農藥，導致自 2020 年以來歐洲受污染的食品多次被召回)。

三、食品輻照新技術開發

食品輻照方面，輻照技術發展的趨勢與改變和調整設備中的光束能量的能力有關，例如，能量以千電子伏特 (keV) 為單位測量的低能量束(軟電子(soft electron)或軟 X 射線(soft X-ray))可用於相對小型的輻照燈，這些輻照燈可以安全地安裝在櫃子或其他設備中，這使得輻照設備可帶入食品工廠並安裝到食品生產線中進行食品監測。由於軟電子無法穿過整個食品，因此可有效地處理在食品表面或附近發現的微生物，例如雞蛋殼，圖 4 展示使用不同能量的軟電子可穿透蛋殼不同深度，目的是確保電子能夠破壞存在於蛋殼中或表面的沙門氏桿菌

(salmonella)。此外，食品工程公司布勒(Bühler)開發了一種自由落體系統，使乾燥成分通過軟電子束(<300 keV)，這種方法可確保將微生物污染控制在可接受的範圍(Laatu, 2019; Schottroff, Lasarus, Stupak, Hajslova, Fauster, Jäger, 2021)。開發小型軟 X 射線輻照的一個例子是櫃式輻照器(cabinet irradiator)，通常用於醫療器械消毒，韓國原子能研究所先進輻射技術研究所(Advanced Radiation Technology Institute of the Korea Atomic Energy Research Institute)的研究人員將軟 X 射線輻照用於食物，研究人員的目標是利用醫院現成的軟 X 射線技術為免疫功能極低的病患提供高衛生標準的食品，而這種低能量(160 keV)X 射線技術已被證明能夠確保病人食用的蔬菜符合標準。

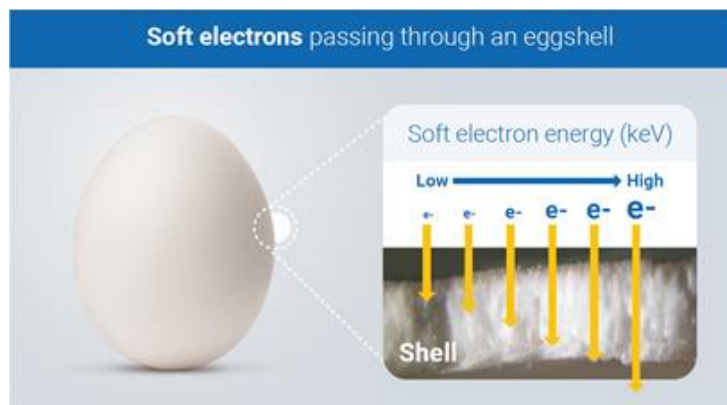


圖 4.軟電子通過蛋殼

資料來源: Nuclear Technology Review (2023)

肆、結論

本研究探討近三年 IAEA 報告及研究計畫中所提及半導體、醫療、食品及農業領域中較新及較迫切需要的技術，結論如下：

半導體:含有半導體材料的電子設備常被用於高輻射環境中，如放射治療設施、航空、航天等，因此發展可以抵抗電離輻射引起的累積損害之半導體材料至關重要。

醫療:基於同位素的治療診斷學結合診斷和治療技術,高精度地識別癌細胞位置及類型後,可在不傷害周圍的健康組織下來殺死癌細胞,達到現代核子醫學著重於實現「個人化」或「精準」的目標,目前已開發出以基於圖集的自動輪廓勾畫(atlas-based contour),以提高輪廓勾畫過程的效率,大量高品質臨床輪廓數據已用於開發基於 AI 的深度學習演算法。雙標記水穩定同位素技術方法使用兩種穩定同位素示蹤劑氘和氧 18 來測量人體的能量消耗,這些能量消耗數據可以用來研究身體活動模式、能量平衡、肥胖和其他代謝等健康問題。

食品及農業: 特定化合物之穩定性同位素分析及偵測技術可用來檢測和量化環境中抗菌藥物的來源、降解及活動過程,已被用於監測抗菌藥物在農業應用後抗菌藥物的來源、動態和傳播,並評估對環境的潛在影響。小型化原子能分析儀器可以應用於整個食品各個生產和供應流程的檢測,例如:能量色散 X 射線螢光、氣相層析-離子遷移光譜測定法,食品輻照方面可以改變和調整設備中的光束能量的技術是目前趨勢。

參考文獻

- (1) 葛復光(2020),「原子能科技國際發展趨勢及我國發展策略之研析」,行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告
- (2) 產業價值鏈資訊平台(2024), <https://ic.tpex.org.tw/introduce.php?ic=D000>
- (3) 林泓秀(2020),原子能民生應用與新南向政策願景規劃,行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告
- (4) Nuclear Technology Review, IAEA(2020)
- (5) Guidelines for the Determination of Standardize Semiconductor Radiation Hardness Parameters, IAEA(2023)
- (6) IAEA 網站, <https://www.iaea.org/projects/crp/fl1016>
- (7) Nuclear Technology Review, IAEA(2023)
- (8) Nuclear Technology Review, IAEA(2022)
- (9) Klaas R. Westerterp, Doubly labelled water assessment of energy expenditure: principle, practice, and promise, Eur J Appl Physiol, Vol. 117, (2017) 1277–1285
- (10) Global Nutrition Report, Development Initiatives Poverty Research Ltd(2021)
- (11) IAEA 網站, <https://www.iaea.org/resources/hhc/nutrition/databases/double-labelled-water-dlw>
- (12) Christopher Quince, Alan W Walker, Jared T Simpson, Nicholas J Loman, Nicola Segata, Shotgun metagenomics, from sampling to analysis, Nature Biotechnology, Vol. 35, Number 9 (2017) 833–845
- (13) IAEA 網站, <https://www.iaea.org/projects/crp/d15022>
- (14) Byers, H.L., McHenry, L.J., Grundl, T.J., XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits, Food Chemistry: X, Vol. 1 (2019) Article 100001
- (15) Wang, S., Mo, H., Xu, D., Hu, H., Hu, L., Shuai, L., Li, H., Determination of volatile organic compounds by HS–GC–IMS to detect different stages of

Aspergillus flavus infection in Xiang Ling walnut, Food Science & Nutrition, Vol. 9, Issue 5 (2021) 2703–2712

- (16) Laatu: Non-thermal, in-plant microbial reduction solution for dry foods (Bühler, 2019)
- (17) Schottroff, F., Lasarus, T ., Stupak, M ., Hajslova, J ., Fauster, T ., Jäger, H., , Decontamination of herbs and spices by gamma irradiation and low-energy electron beam treatments and influence on product characteristics upon storage, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Vol. 14, NO. 1 (2021) 380–395