

碳轉化新解方： 林麗瓊用奈米材料改寫未來

文字／鸞九辰 攝影／汪忠信

隨著臺灣在二〇二五年邁入「碳有價」時代，碳捕捉、利用及封存（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）技術再度成為業界關注焦點；然而，學術界早已將研究重心轉向將二氧化碳轉化為替代能源，第二十八屆國家講座主持人獎得主、臺灣大學物理系講座教授林麗瓊，正是此領域的先行者之一。

兩大奈米材料代表作，改寫科技未來

在男性占多數的物理學界，林麗瓊以卓越的科研成就展現「巾幗不讓鬚眉」的實力，尤其在奈米材料領域，她更是享譽國際的重要人物，無論是研發出全球最大面積的抗反射蛾眼結構「矽奈米尖錐陣列」，還是打造具有波長選擇性的光控電開關「奈米豆莢」，創新成果無不令學界與業界為之驚艷。

談及「矽奈米尖錐陣列」，林麗瓊解釋：「飛蛾的眼睛幾乎能完全吸收光線，防止光線反射，使其在黑暗中不易被捕食者發現。我們研發的超高密度『矽奈米尖錐陣列』即擁有

蛾眼效應的仿生結構，可達一百三十度至一百五十度的廣角抗反射效果，且適用於金屬、絕緣體等多種基板，大幅拓展應用範疇，突破傳統抗反射結構受限於特定視角、多應用於半導體領域的限制。」

以現今手機顯示螢幕為例，即使在近九十度極端視角下仍能保持清晰顯示，正是廣角抗反射技術的應用成果；若用於太陽能電池，則可提升光線吸收效率，增強發電效能；甚至在國防領域，還能助力打造隱形飛機。

「奈米豆莢」則是林麗瓊團隊於二〇〇六年領先全球提出的新奈米結構。該結構如同豆莢包裹著金色小豆子，其中「豆莢」為二氧化矽（SiO₂）奈米線，屬於近乎絕緣體的材料，導電性極低；而「小豆子」是金奈米顆粒，具備特殊光學特性——當綠光照射時，金奈米顆粒會產生表面電漿共振（Surface Plasmon Resonance, SPR），猶如讓電子集體共鳴，進而強化局部電場，影響附近電子行為，使得原本導電性不強的奈米線變得容易導電，形成「光奈米開關」。林麗瓊進一步闡釋：「『奈米豆莢』僅在特定波長（綠光）照射下才



林麗瓊

數學及自然科學領域

第二十八屆國家講座主持人獎

臺灣大學物理系講座教授

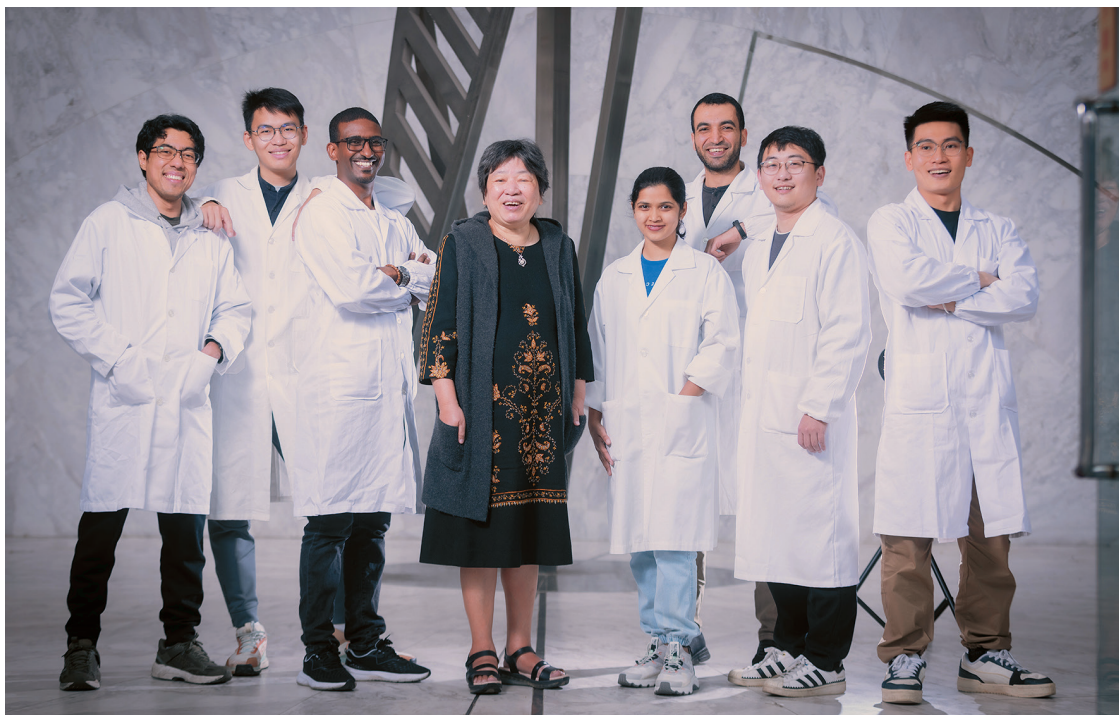
會導電，平時保持絕緣狀態，從而形成一種精準的光控電奈米開關，擁有巨大的發展潛力。」

著名的研究成果，竟來自於實驗意外!?

當談及讓她引以為傲的奈米材料代表作時，林麗瓊語出驚人地說：「這兩項研究成果，其實都來自於意外的驚喜。」

以「矽奈米尖錐陣列」為例。當時，林麗瓊團隊正致力開發新型半導體薄膜，希望透過鍍膜技術製造出光亮且平滑的表面。不料在實驗過程中，研究生使用的加熱基板突然故障，但並未因此停止操作，使得理論上應於高溫進行的實驗，意外地在室溫下完成。最後令人詫異的發現，本該呈現光滑表面的薄膜卻變得漆黑如墨，透過掃描式電子顯微鏡觀察後，林麗瓊發現這層黑色薄膜的表面竟行成獨特的奈米尖錐狀結構，這正是具備抗反射特性的關鍵，並由此開啓嶄新的研究方向。

同樣的，「奈米豆莢結構」亦源自一場美麗的意外。林麗瓊回憶道：「最初，我們的目標是製備細長的奈米線，但矽基板表面被氧化與真空腔體內可能存在微小漏氣，導致氧氣滲入而改變反應條件。結果，本應形成的金奈米線，竟演變為由二氧化矽包覆金奈米顆粒所組成的『豆莢』狀結構，並展現出令人驚嘆的光電特性。」



事實上，實驗過程中的「小意外」屢見不鮮，這也反映出：任何微小的變因改變，都可能導致截然不同的結果。然而，正是這種不可預期性，讓林麗瓊至今仍對材料研究樂此不疲。她強調：「我從不把研究中的挑戰視為『挫折』，因為它們往往孕育著意想不到的發現。更重要的是，我們從未因實驗條件偏離預期就輕言放棄，而是保持對科學的好奇心，深入探究，方能發掘出新的應用潛力。」

人工葉片，將開啟碳轉化的新時代

隨著研究領域拓展，林麗瓊開始涉足不同的能源應用，從多元角度審視奈米材料潛力。此時，她注意到將二氧化碳轉化為太陽能燃料的研究方向：「這與太陽能電池的原理相似，兩者的前期步驟皆仰賴半導體材料吸收光能並產生電子（負電荷）—電洞（正電荷）對，是我熟悉的領域，而後續步驟是全新的挑戰，困難重重；但作為研究者，應該勇於挑戰未知、尋求突破。」

這項「二氧化碳轉化」計畫究竟有多困難？林麗瓊解釋：「我們的研究目標是打造『人工葉片』，模擬植物的光合作用，透過高效光催化技術將二氧化碳轉化為可用燃料。目前的轉換率約為〇・八%，相較初期已提升百倍，但仍未突破一%。植物的天然光合作用效率約為一%，但考量工業化應用需求，我們必須達到更高的轉換效率。」

這項轉化過程環環相扣，每個步驟皆充滿挑戰。以二氧化碳的捕捉與轉化為例，首先，二氧化碳是極為惰性的氣體，使其與光觸媒發生作用並不容易；其次，光觸媒在吸附二氧化碳時必須拿捏得當，既不能太鬆讓它逃脫，也不能太緊以致無法進行化學反應，同時還要適時釋放電子。

「最後，是一場精準的遊戲。」林麗瓊表示，即便二氧化碳順利接受電子，它仍可能轉化為甲醇、乙烷、丙烯等不同碳數的產物，這些未必是目標燃料，「因此，如何讓光觸媒材料有效釋放電子，並精準誘導二氧化碳轉換為單一理想燃料，是我們最大的挑戰。」

目前，團隊仍處於探索與驗證階段，透過不斷地試驗與觀察來累積數據，希望揭示背後的科學規律。她說：「這是一條漫長的旅程，我們現在所做的是為未來的研究者鋪路。」

美國奇異公司帶來的三大影響

一路走來，林麗瓊始終秉持科學家的使命感與社會責任，她坦言，美國奇異公司（GE）的工作經歷對自己的研究生涯影響深遠。

舉例來說，她曾參與「為鎢絲燈尋找替代材料」專案。當時，GE使用的鎢絲燈含有微量放射性元素鈾（U），美國政府因工廠人員健康風險，對GE祭出罰單要求改進製程。

這讓林麗瓊深刻體會，科學研究不僅是滿足個人好奇心的探索，更肩負著社會責任。

另一項是跨領域合作。林麗瓊說，「例如，在開發飛機引擎的隔熱鍍膜專案中，我們需要與物理、化學、材料、電機等不同領域專家共同合作。這讓我深切了解到，研究從來不是單打獨鬥，而是團隊協作成果。因此，我鼓勵不同專業領域的研究生攜手合作，讓實驗室團隊發揮一加一大於二的綜效。」

不僅如此，即便如GE這類國際大企業，也需投入十至二十年的時間，才能讓新材料成熟至足以實際應用；這讓林麗瓊真正體悟，將實驗室研究成果轉化為可用產品是一個漫長的過程，需歷經不同團隊接力合作，這也是她願意成為研究後輩「鋪路人」的原因。

回顧當年，林麗瓊受四姊及知名女物理學家吳健雄影響，立志投身物理學。如今，她更樂於發揮自身影響力，讓學生們在共事過程中，親身感受她對科研的熱情與執著，進而獲得啟發；同時，她也以女科學家身分鼓舞女高中生：「永遠不要自我設限！妳無需追求十項全能，只要在某些領域有所專精，就能透過團隊合作，與夥伴攜手創造更好的成果。」