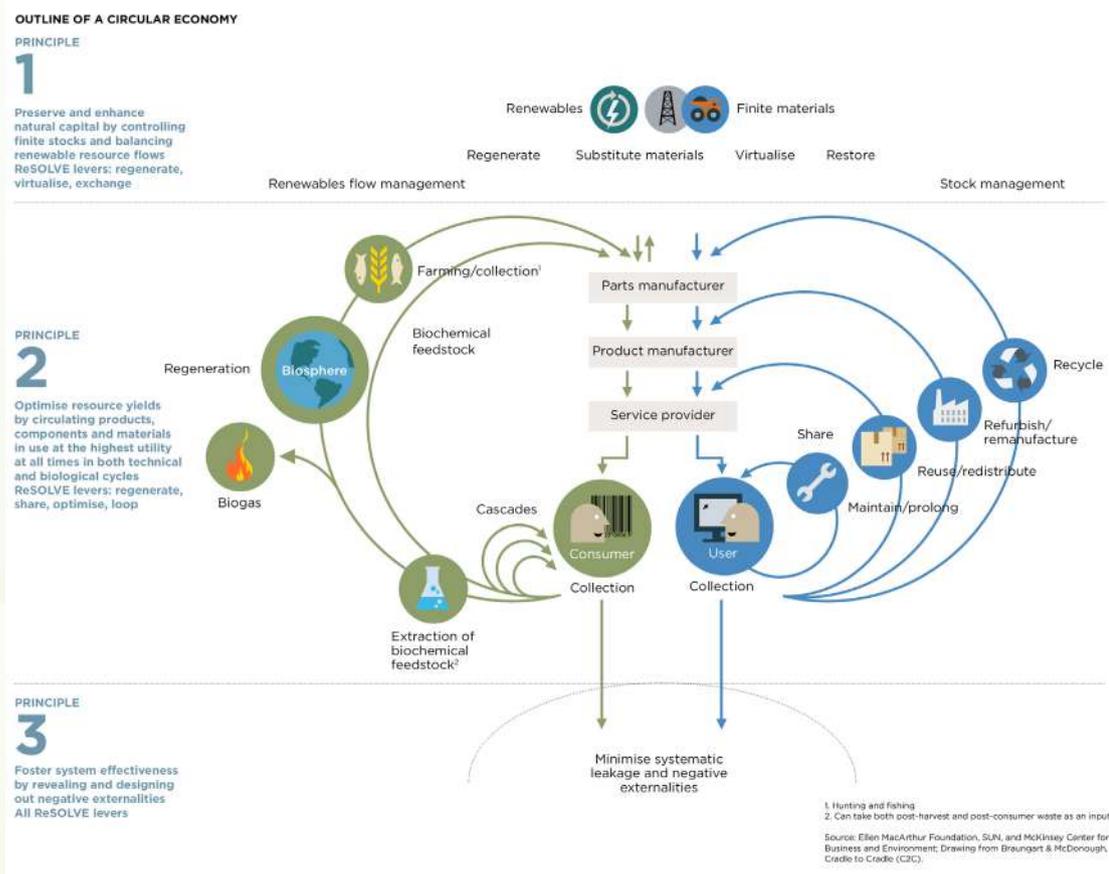


從分子尺度到工程應用： 以循環科技為例

文·圖/潘述元

我國2050淨零轉型十二項關鍵戰略已於2022年3月發布，並以「科技研發」與「氣候法制」兩大治理為基礎。創新科技之研發與應用為改善目前各種環境保護與經濟成長衝突之重要解方，亦為邁向綠色經濟之重要手段，特別是在供應鏈脫碳之壓力或淨零負碳思維之衝擊下，國家必須特別重視之關鍵領域。事實上，我國並沒有與生俱來之先天優勢（例如豐富煤炭或礦石資源），各種能資源皆高度依賴進口，唯一能加以利用資源為農業相關之生物資源（包含農、林、漁及畜牧）。因此，面對各種綠色與環境生態之要求，如何能將既有之廢棄物再轉換，提取能資源；同時，強化各種生物資源之再利用（包含農業剩餘資源），應是邁向永續淨零轉型之重要技術路徑。



Ellen MacArthur Foundation等建議之循環經濟模式。（資料來源：Ellen MacArthur Foundation, SUN, and McKinsey Center for Business and Environment; Drawing from Braungart & McDonough, Ceadle to Cradle (C2C)）

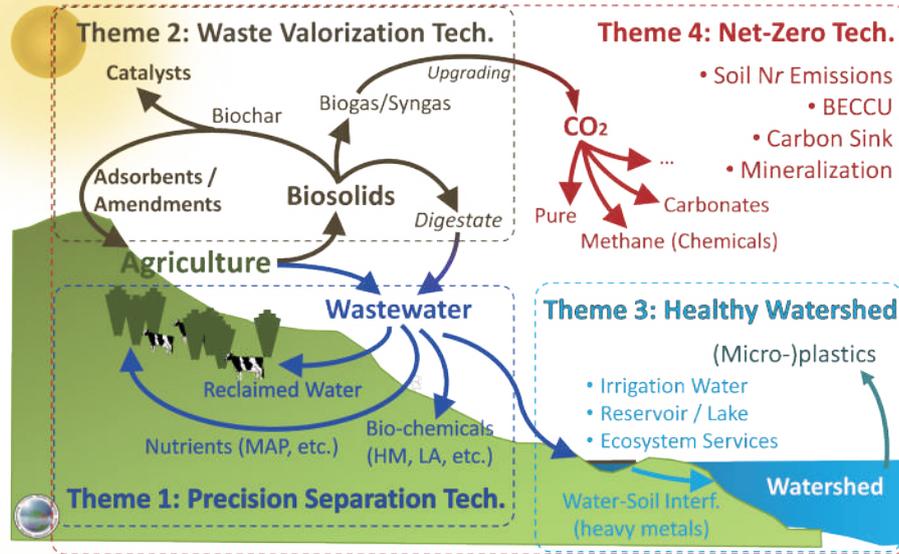
近年來，我國政府大力推動「5+2創新產業計畫」，其中，「+2」即為新農業（New Agriculture）與循環經濟（Circular Economy）兩大跨領域主軸，以支持「5」大關鍵產業發展。新農業之目的係讓農業成為兼顧生產、生活及生態之三生產業，打造幸福農民、安全農業及富裕農村之新願景，此理念包含永續農業與綠色農業等，應遵循永續發展原則進行農業生產，兼顧農業生態面、經濟面和生活面，並和資源、環境、經濟及社會等多跨領域面向政策結合。循環經濟模式為突破傳統線性經濟（Linear Economy）之生產模式，藉由能資源循環再利用技術，達到廢棄物減量目標；常見循環經濟原則包括：系統式思維、零廢棄設計、使用再生能源及強調多樣性等。



農業剩餘資源（以竹子為例）

循環經濟有三大原則，包括設計避免污染與廢棄物、延長產品（或元素）使用期限、及製造再生產品，以讓自然資源免於枯竭。我國2050淨零轉型戰略第八項為「資源循環零廢棄」，以廢水或固體廢棄物管理為例，國際間無不將其處置朝向高質化之綠色資源生產，以實現循環經濟理想。試想：如何能高效率且低成本的將原成分複雜之廢棄物（或廢水），轉換成各種高純度之產品？「分離技術」為關鍵，且應是「精準」分離（Precision Separation），精準地將目標物質，從複雜之基質中提取，變成循環產品。事實上，若僅是將廢物中某目標物質，達到高純度之分離，串聯既有各種商業化分離或轉換技術，終能達到此目的；然而，此作法通常需要藉由多種技術串聯或整合，亦即通常為高成本。此高成本「循環」產品，價格始終無法與市場上相對低售價之「石化基」產品（Fossil-based Product）競爭，因此，循環經濟模式始終僅有「循環」，無法創造「經濟」。當然，我們可以藉由政策與制度上精進，提供相關經濟誘因（例如補助、補貼、減稅或碳費等機制），扶植循環產業之運作；另一方面，應將部份資源投入「科技研發」，打造MIT（Made in Taiwan）之循環產業，此不僅能從基礎上實現低成本之資源循環，同時能有更多國際商業機會，提升國家整體經濟量能。

除了循環技術研發，我國亦應積極思考強化各種農業剩餘資源之再利用，包含稻稈、稻殼（粗糠）、米糠、香菇廢菇包、廢竹材、畜牧糞尿等。事實上，循環經濟針對不同物料特性，是有利用之差異與順序；依據Ellen MacArthur Foundation建議，生物性資材之循環經濟模式，應遵循生物化學品（Biochemicals）萃取、生質能源（Bioenergy）生產及作為土壤改良劑等次序；然而，上述技術門檻次序卻是相反，生物化學品萃取技術門檻最高。因此，我國應先積極將農業剩餘資源朝向生質能源（Bioenergy）生產，於此同時能源生產之固體副產物，再做成其他高價值用途（例如碳材料等）或土壤改良劑。以此當作發



綠色科技實驗室 (Green Technology Lab) 研究範疇

展基礎，持續進行技術突破，邁向未來以生物化學品萃取為主導之技術路徑（又稱生物精煉技術），剩餘產物再做生質能源生產等，以兼顧環境管理與淨零排放之任務。此作法既可符合農委會淨零四大主軸，亦具有提升糧食生產安全與能源自主等功能。

問題又來了？應如何切入循環科技之研發？我認為應有跨領域之合作，涵蓋化學、材料、農業、化工、環工及能源等領域，並著墨從分子角度到工程應用等多尺度範疇。以前述分離技術為例，思維應包括：

- 原子/分子尺度 (Atomic / Molecular Scale)，特別應強調材料設計合成、介面化學及奈米科技等，從原子與分子觀點，依據目標回收物質之特性製備合適材料，以實現高效之選擇性分離或轉換。
- 程序評估 (Process Evaluation)，特別應強調程序設計應依據理論最低能耗來選擇適用程序，並能於短時間內在工程上實現之技術，包括熱力學與動力學等。常見比喻為殺雞用牛刀，有可能成本較低，但能源效率差。
- 系統優化 (System Optimization)，特別應強調從系統角度最佳化技術之工程面、環境面、能源面及經濟面等績效，常見工具包括程序系統整合、生命週期評估及技術經濟分析等。
- 工程應用 (Engineering Deployment)，特別應強調工程放大應用之考量，包括商業模式、專利佈局、專業人員培養、技術輸出等。

上述從分子尺度到工程應用思維，與綠色化學12項原則 (Twelve Principles of Green Chemistry) 亦有高度關聯，例如原子經濟性 (Atom Economy)、能源效率設計 (Design for Energy Efficiency)、使用可再生原料 (Use of Renewable Feedstocks) 及催化 (Catalysis) 等。為於此領域深耕，本團隊成立綠色科技實驗室 (Green Technology Lab)，範疇為開發廢水及農業剩餘資材高值化技術，從系統性角度評析技術應用之作

法，主要理論包括介面化學、熱力學/動力學分析、生命週期評估及成本效益分析等，以實現綠色循環體系。

我們對於「綠色」定義為具有高效率、低成本、不產生二次污染、使用可再生資源等特色。為開發具突破性之精準分離單元，本團隊以綠色化學原則為基礎，開發客製化關鍵材料，並結合使用薄膜/電化學分離/生物轉換等，以強化梯級回收速率與各產品純度；另一方面，研發朝向前端程序改善，例如開發電厭氧消化程序，以使後端產生之沼液成分更適於分離程序與高值化市場；此外，著手改良分離模組之設計與系統整合，以廢水成分與目標回收產品為設計依據，前後串聯各種合適之分離單元，建立整合式精準分離系統。（本專題策畫／生農學院副院長李達源教授）

延伸閱讀：

- [1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022. “New Directions for Chemical Engineering” .
- [2] A Rani, SW Snyder, H Kim, Z Lei, SY Pan*, 2022. “Pathways to a net-zero-carbon water sector through energy-extracting wastewater technologies” , npj Clean Water 5 (1), 49.
- [3] SY Pan*, KH He, KT Lin, C Fan, CT Chang, 2022. “Addressing nitrogenous gases from croplands toward low-emission agriculture” , npj Climate and Atmospheric Science 5 (1), 43
- [4] CY Chen, SW Wang, H Kim, SY Pan*, C Fan, YJ Lin, 2021. “Non-conventional water reuse in agriculture: A circular water economy” , Water Research 199, 117193.
- [5] SY Pan*, AZ Haddad, A Kumar, SW Wang, 2020. “Brackish water desalination using reverse osmosis and capacitive deionization at the water-energy nexus” , Water research 183, 116064.
- [6] Z Zhang, SY Pan, H Li, J Cai, AG Olabi*, EJ Anthony*, V Manovic, 2020. “Recent advances in carbon dioxide utilization” , Renewable and sustainable energy reviews 125, 109799



潘述元小檔案

臺大環工博士，現為臺大生物環境系統工程學系助理教授，曾赴美國柏克萊國家實驗室擔任博士後研究員。研究領域包含能資源循環、再生水工程及農業負碳技術等，已發表逾 90 篇 SCI 期刊論文（Google Scholar 引用次數逾 6,000，h 指數 42）。曾獲美國 ACS Sustainable Chemistry & Engineering Lectureship Award（2022）、World's Top 2% Scientists（2020; 2021）、德國教育研究部 Green Talents Award（2013）等，並為我國國科會（過去為科技部）愛因斯坦學者。曾主持國科會、環保署、農水署、農試所及地方政府等各類型研究計畫。現同時擔任國際灌排協會（ICID）劣質水工作小組委員、社團法人臺灣農業工程學會學術組組長、臺大水工所水質量測組組長等職位。致力參與多個國際學術組織活動，例如 International Society of Paddy and Water Environment Engineering（PAWEES）、American Chemical Society（ACS）等。