



資源再生創永續

綠色化學與農業循環商機

海洋廢棄物衝擊生態、陸上廢棄物污染環境，資源永續、減廢再生是全世界追求環保永續的宗旨之一。工研院「眺望2023產業發展趨勢研討會」中，從再生碳源、農業剩餘資材再利用、生質塑膠等技術切入，剖析綠色化學與循環商機，期能減少化石資源、降低廢棄、資材再生，與國際趨勢接軌，並創造更大價值。



水稻的剩餘資材稻殼灰含有豐富的二氧化矽，可作為工業原料，應用於鋼鐵、半導體、太陽能等產業，具有極大潛力。

撰文／林玉圓

全球9成的二氧化碳排放量來自化石燃料，減少化石資源，並將既有資源做最大程度的回收再利用，是透過綠色化學達成淨零排放的重點。工研院產業科技國際策略發展所產業分析師陳育誠指出，目前全球石化製品及衍生產品的最上游原料，仍以「化石碳源」如石油、天然氣、煤碳為主，占比高達85%，化石碳源經過開採、耗用，終將逐漸耗竭，「再生碳源」可代替開採，是自給自足的綠色化學方向。研究機構Nova-Institute預測，2050年再生碳源所合成的綠色化學品將成為主流。

廢棄塑橡膠透過降解 變身再生料

什麼是再生碳源？陳育誠解釋，「再生碳源分為三大類：廢棄塑橡膠、廢棄生物質、含碳廢氣。再生碳源之所以日益受到重視，歸功於淨零議題下，帶動限用一次性塑膠、回收料添加規範、碳稅及碳利用獎勵等政策。」

廢棄塑橡膠方面，目前產業界正在努力改變「消費後即廢棄」的模式，將以往掩埋或焚燒方式處理的塑橡膠，透過熱裂解、降解及物理性回收，如機械粉碎或溶劑溶解等方式，回收再利用。例如混合廢塑膠經過熱裂解與純化處理之後，可萃取

出再生油料，做為石化大廠產製塑膠與石化品的原料；廢輪胎也可回收製成再生碳黑；許多大廠如殼牌石油、巴斯夫（BASF）、米其林輪胎均已導入相關技術或產品。

將廢棄塑橡膠變身為再生料源，須仰賴各種降解技術，除了常見的熱能或溶劑降解，業界最新技術是以微波輔助及生物降解，從PET中取得BHET等再生原料，再製為衣鞋服飾，獲得包括Adidas、ZARA、PUMA、NIKE在內的時尚及運動品牌的青睞。



產業界將以往掩埋或焚燒方式處理的塑橡膠，透過熱裂解、降解及物理性回收，如廢輪胎也可回收製成再生碳黑。

廢棄生物質 化身生質材料

廢棄生物質主要來自產業或農業，例如植物油脂或動物油脂透過精煉後可製成生質輕油，國內奇美實業便與4家企業合組「生質塑膠」供應鏈，運用新創團隊Neste技術提煉的生質輕油來生產苯乙烯，再製成生質塑膠如ABS樹脂，預計於2023年上半年推出。

類似的生質材料，已導入慢跑鞋、手機、筆電；甚至衣服的染料也開發出100%植物為基底，不僅具生物可分解性，且製程是負碳排。日本紙廠運用紙業廢棄物研發出奈米纖維素CNF，與PP回收

料混合，打造出輕量輸送盒，未來擬進一步應用於汽車零組件。澳洲新創3RT則研發出奈米黏結劑，可將低價值的木材砍伐剩餘物，轉化為高價值的硬木。

含碳廢氣變原料 衣鞋清潔用品都能用

含碳廢氣則透過碳捕捉與再利用（CCU）技術，結合後端研發，轉為化學原料或再製燃料。歐洲投入將工業CO₂廢氣與氫氣結合，轉化為甲醇；全球化學大廠也研發以電化學及生物化學的CCU技術來產製聚丙烯（PP）、正辛醇等有機化學品。

以含碳廢氣回收再製的化學原料，受到不少鞋廠和服飾品牌的喜愛；瑞士運動鞋品牌On利用一氧化碳廢氣，多次加工後開發出EVA生質泡綿，作為運動鞋的中底材料。中國首鋼的含碳尾氣被轉化為乙醇，再進一步合成後，也成為聚酯服飾或清潔用品的原料。

值得注意的是，含碳廢氣的取得方式分為兩大類，有別於行之有年的定點式捕碳，近年備受重視的是空氣直接捕碳（Direct Air Capture；DAC），被認為具有更大的減碳潛力，不過陳育誠強調，DAC捕得的二氧化碳，其去化途徑仍以封存為主，轉化成燃料或再利用資材的市場，還有待開發，其能耗及能源成本將是一大挑戰。

再生碳源用到的綠色化學技術

廢棄橡塑膠製品	<ul style="list-style-type: none"> ◆熱裂解化學回收 ◆降解化學回收 ◆物理性回收（機械粉碎或溶劑溶解）
廢棄生物質	<ul style="list-style-type: none"> ◆生質精煉 ◆產業生物質再製化學品與塑膠 ◆農業剩餘資材再利用
含碳廢氣	<ul style="list-style-type: none"> ◆碳捕捉技術 ◆碳利用技術

資料來源：工研院產科國際所

農業、食品剩餘資材 循環商機可觀

全球糧食與農業生產所產生的溫室氣體，占整體碳排達26%，妥善運用農業剩餘資材，也是減碳妙方。工研院產科國際所分析師邱純慧表示，「歐盟、美國與日本都已訂定綠色農業及綠色食品戰略，其重點之一就是循環利用，」她指出，全球農業與食品加工剩餘資材的循環再利用，不僅可降低碳排，還可創造360億美元的產值，商機頗為可觀。

英國新創公司CCm Technologies與食品大廠合作，推出環保洋芋片，利用馬鈴薯廢料製成低碳肥料，再投入馬鈴薯種植，可降低70%的碳排。汽車零組件公司豐田鐵工從高粱提取纖維素奈米纖維，取代汽車零件複合材料中的玻璃纖維，可減少零件製造端的碳排放。

臺灣每年約產生492萬公噸農產廢棄物，「2050淨零排放路徑藍圖」也納入農業循環經濟，作物未食用部分如稻桿及果樹枝條、畜禽排泄物等，都可進行再利用。傳統羽毛經過研磨粉碎可製成飼料粉原料外，透過生物精煉技術加值還可以將農業、食品剩餘資材，轉化成為環境友善的高值

產品。工研院便協助廠商開發出一款有機液肥，以分解菌快速分解羽毛，加工製成肥料，可促進植物根系發展。若再投入純化萃取技術加值，甚至可以生產護膚保養品添加劑。

亞洲盛行水稻種植，其剩餘資材稻殼灰含有豐富的二氧化矽，可作為工業原料，應用於鋼鐵、半導體、太陽能等產業，具有極大應用潛力。在印度及中國大陸，稻殼灰主要用於建築與陶瓷耐火材料；中國廠商益海嘉里成功以4,000萬噸稻殼取代1,800萬噸的煤來進行發電，減少碳排達5,000萬噸。邱純慧指出，透過跨域合作，建立農業與食品剩餘資材的循環商業模式，再輔以完善的農業廢棄物管理系統，將可加速綠色化學推廣循環經濟，創造高值應用。

實現無塑社會 生質塑膠大有可為

根據統計，每年約有1,270萬噸的塑膠垃圾流入海洋，海廢與塑膠微粒汙染問題備受關注。生質塑膠以生質原料取代石化原料，可減少化石資源的使用，以及環境中殘留的塑膠垃圾，更有助於碳中和。工研院材料與化工研究所研究員陳明

全球農業與食品加工剩餘資材循環再利用





廢棄塑膠變身為再生料源，再製為衣鞋服飾，獲得國際時尚及運動品牌的青睞。

君指出，各國均已規劃生質塑膠的目標，例如美國宣示2030年生質化學品須取代25%有機化學品及20%石化燃料；韓國逐步推動生質塑膠的獎勵和補助，將於2030年禁用一次性塑膠袋、2050年實現無塑社會。

根據European Bioplastics的市場數據，全球生質塑膠產能將從2021年的242萬公噸，成長到2026年的759萬公噸，而生質塑膠在全球塑膠占比，也首度突破2%，「長期來看，生質塑膠可望逐步取代石化塑膠，」陳明君說。

相關創新技術方面，歐洲國家顯得成果豐碩。荷蘭企業Photanol BV利用光合作用，以藍藻捕獲二氧化碳，製造出生質單體乙醇，再加工製成

高分子材料PLA（聚乳酸），與傳統石化PLA相較可減少土地及水的使用量，還能進行碳捕捉。

歐洲的VIVALDI專案結合10國18個企業與機構的力量，將造紙、食品加工、生質乙醇、生質化學品等四大生物基產業的CO₂廢氣轉化為有機酸，精煉後重返製程，打造新型生物化學品。

在市場應用面，生質塑膠目前主要用於包裝，食品大廠即推出可工業堆肥的洋芋片包裝袋，採非糧作物的植物基材料製成；中東石化大廠SABIC研發的生質聚碳酸酯（PC）採用50%的紙漿、落葉等剩餘物，已用於手機電池蓋。汽車產業也積極導入生質塑膠，賓士新車款的座椅、中控台、方向盤採用生質皮革，車門把手也是以生質纖維製成。

不過，生質塑膠仍面臨幾項挑戰，包括成本高、能源效率較低、尚未建立回收體系等；因此歐洲正積極開發新型生質原材料的認證系統，以打造更好的商業發展環境。經濟合作暨發展組織（OECD）預測，2030年全球生質化學品占比可望達到35%。

總結來看，綠色化學技術的創新發展，讓廢棄塑膠、廢棄生物質、含碳廢氣這三大再生碳源，能夠獲得循環再利用，同時還可彼此互補共存，擴大終端應用面，讓全球各行各業減少石化碳源的消耗，進一步落實永續減碳，預計未來還有更大的發展潛力與市場商機。■

