

惜物環保，循環農業新經濟

廢棄物變寶藏 再生碳化技術

1 林裕仁

1 劉伶均



壹、農業加工剩餘物是廢棄物？還是資材？

根據行政院主計總處近 10 年綠色國民所得帳之農業廢棄物排放帳統計，臺灣每年因農、林、漁、畜生產過程約產生 460~519 萬公噸農業剩餘物，該等材料真是無法再利用之廢棄物？還是可再利用之資材？過去，該等剩餘物多以直接燃燒、堆肥或就地掩埋等低價值方式處理，未能有效循環再利用，造成許多資源浪費。然在科技發展基礎及確保地球有限資源能夠更有效率利用概念下，「循環經濟」近年來成為產業界新系統潮流與商業模式，藉以減少天然資源的使用需求。蔡英文總統於 2016 年就職典禮演說就提出「讓臺灣走向循環經濟的時代，把廢棄物轉換為再生資源」的「循環經濟」理念，該理念即是將過去線性經濟概念產出的各項廢棄物，以回收、重新設計、再製造、再利用等方式於產業中進行循環，減少產業製程所產生廢棄物衍生的環境問題，亦即重視資源之使用效率，並把廢棄物轉換為再生可利用資源。

| 註 1：行政院農業委員會林業試驗所。



基本上，循環經濟系統內所有產品、材料可分別歸納為「生物循環」與「工業循環」兩大類，在產製運作循環中消除廢棄物，讓資材可轉換永生不息地利用。其中「生物循環」係透過由生物可分解原料的採集、利用與加工，製成各級農產品，農產品經過使用後產生的各式可分解生物資材，最後回到生態循環提供養分。循「農林剩餘資材」觀點，2017~2020年行政院農業委員會（簡稱農委會）彙集所屬各試驗研究機關及各區農業改良場專家及學界學者執行「農林剩餘資材炭化技術創新與產業模式」計畫，即以科技研究為基礎，將農業廢棄物視為剩餘資材善加研發利用與管理，除應用科技技術提升附加價值外，也同時解決因堆置農業廢棄物造成空間減少、未能有效利用與造成環境雜亂及任意燃燒農業廢棄物所釋出之碳排放問題。

貳、生物炭被視為減緩氣候變遷的重要工具

在前述計畫重要工作項目之一「農林剩餘資材炭化技術創新與產業模式」，即以國內農業廢棄物為材料，透過炭化技術產製生物炭，並研發生物炭作為再利用資材。生物炭是將農林生物有機資材，透過攝氏400度以上高溫熱裂解製程後呈現黑色的產品。研究分析顯示，生物炭除可作為固態

燃料外，因內部結構形成微細多孔特性，其孔洞表面積具有吸附與調濕功能，孔洞表面積愈大，吸附與調濕功能愈佳，可混合於土壤作為土壤改良材料，具有復育土壤、促進作物生長及固碳之效果，目前已廣泛地被應用於農作物生產實務，也有異域結合應用作為調濕或過濾用之工業產品。

當今氣候變遷導致全球暖化已是全球無可避免的生存挑戰，聯合國氣候變遷委員會（IPCC）2021年指出，若要達成2015年《巴黎協定》全球升溫幅度減至攝氏1.5度內的目標，唯一的辦法就是大幅削減溫室氣體排放，並且從大氣中移除二氧化碳。法國政府在2015年巴黎氣候峰會（COP21）即提出「千分之四倡議」，認為每年增加土壤碳素含量達4‰（0.4%），將空氣中的碳留在土壤，就可以有效減緩氣溫的上升，再透過各種農業的措施，包括生物炭的施用，應該可以達到該目標，其倡議間接肯定生物炭的碳匯潛力。生物炭被認為具有改善土壤、促進作物生長及固碳效果，被視為減緩氣候變遷之最具潛力手段，已為國際所認同與重視。

參、生物炭是淨零排放政策的利器

誠如前述，因應全球各國面對氣候變遷衝擊，國際社會均積極投入減緩碳排技術，2021年起，政府就積極將氣候變遷調適與淨零排放策略列入

國家重點施政項目，配合該項施政，農業部門在2022年2月制定淨零排放策略有「減排」、「增匯」、「循環」、「綠趨勢」四大主軸，其中「循環」策略即在強化「農業剩餘資源材料化與增值再利用」，而「推動生物炭產製與利用」項目即為該項策略中重要規劃工作之一。生物炭之功能與效益得以在氣候變遷調適與淨零排放策略獲得認同應用推廣，蓋因產製生物炭是將農林作物生長過程中，自大氣中吸收儲存的碳固定在生物炭中，減少因燃燒農業剩餘資材釋出碳排放，符合「減排」策略；而利用農業剩餘資材產製生物炭，已於前述說明符合「循環」策略；至於生物炭適量施用於土壤中，增加土壤碳蓄積，符合「增匯」策略，可同時符合淨零排放的3項策略。根據土壤和氣候變遷資深科學家 Marc Redmile-Gordon 所帶領皇家園藝學會 (RHS) 於2018年進行生物炭如何改善植物生長研究中，曾估算在一般民宅花園中埋下10~20公斤生物炭，約可以抵消1個月汽車往返通勤5英里所產生的碳排放量。另英國學者 James Ephraim Lovelock 於2016年研究顯示，生物炭因具有微管多孔隙結構，容易聚集營養物質和有益微生物，使土壤變得肥沃，利於植物生長，減少肥料施用，增加作物產量，改善土壤排水系統，並將約80%之溫室氣體封存在土壤中（如NO、CH₄），阻止其排放到大氣。

肆、生物炭循環應用示範場域的建置

全球生物炭市場在預期成長下，若能透過良好的料源追蹤與生產管理規劃，有效將農業剩餘資材產製成生物炭，除可妥善處理環境與空間堆置問題外，生物炭亦可加以回歸農業生產系統再次利用，創造新的資材價值與產業經濟，改善土壤健康，有利農業作物生產，充分展現農業實踐循環經濟的功能與效益。為讓生物炭產製與施用的功能與效益得以彰顯，在2020年結束之「農林剩餘資材炭化技術創新與產業模式」計畫中即建置有生物炭循環應用示範場域，作為後續推廣國內生物炭產業基礎。

惟國外實務資料顯示，穩定的料源供給與交通運輸成本是目前國內發展生物炭產業的重要挑戰之一，根據運輸成本考量，料源運送至燒製設備場地，歐洲生物炭驗證機構 (European Biochar Certificate, EBC) 局限在80公里內，美國生物炭倡議組織 (US Biochar Initiative, USBI) 提出應局限於50~60公里內較合理，臺灣目前以後者為料源收集與運輸成本考量為主。因此，設置的生物炭示範(點)場域，以現地容易取得之料源及農林剩餘資材為示範(點)場域位置之主要考量因素。再者，當地經營事業體與燒製設備的合法性與安全性，亦在考量之中。生物炭循環應用示範(點)場域介紹如下：



桃園大溪新峰社區以生產綠竹筍剩餘之綠竹桿為原料，透過以租代買模式產製生物炭的微型產業。



新竹湖口木酢達人利用廢棄樹木或修枝材產製高值化及多元生物炭產品，並透過網路及多元行銷，成功行銷產品。

一、桃園大溪新峰社區——生物炭微型產業示範場域

桃園大溪新峰社區以有機竹筍產銷班為營運事業主體，販售綠竹筍為主。綠竹筍的發筍期為5~11月，盛產期大約在6~8月，社區竹農除竹筍盛產期較為忙碌外，11月下旬~隔年4月為農閒時期，亦是整理竹林環境與進行疏伐。由於東南亞便宜竹材大量進口，導致竹稈無人收購，但在竹林經營者的角度上，竹林需要疏伐，竹筍才得以生長，在常年疏伐下來的竹稈無人收購的情況下，疏伐下來的竹稈造成社區空間堆置與去化問題。

新峰社區是第一個透過以租代買模式形成的生物炭微型產業，一方面解決農閒時期社區居民收入問題，另一方面解決常年竹稈空間堆置與去化問題。經由各方協助透過以租代買模式，媒合燒製設備廠商及竹材前處理設備廠商租賃炭化電熱窯、醋液收集設備、原竹定長機及原竹裂片機等設備，並於2019年底組裝完成並開始運作，燒製竹炭、收集竹醋液至今。

二、新竹湖口木酢達人——生物炭微型產業產品高值化及多元銷售通路示範場域

木酢達人以「循環永續」為初衷，收購湖口地區廢棄樹木或修枝獲得之木材，利用燒炭技術再利用，獲得可以運用在復育農耕地力的生物炭及可滿足家庭生活清潔需求的木酢液

等產品，在經濟生產過程中保持與環境的共生循環。承襲上一代的製炭技術，研發、生產一系列對環境無毒無害的多樣化保養及清潔木酢產品，透過網路行銷，擁有2萬戶家庭以上定期購買使用，更成功外銷到東南亞等7個國家。

透過木酢達人的產研銷經驗，協助桃園大溪新峰社區產製出之竹炭與竹醋液進行檢測與化驗，並以產銷經驗提供新峰社區進行產品行銷與販售，媒合苗栗獅潭燒炭業者進行竹炭燒製技術輔導與協助燒製去化竹程，並將蒐集之竹醋液於實驗室中進行檢測、品質改良與精進，期望以經驗傳承及循環經濟的概念，形成互利共生之生物炭循環再生微型產業鏈。透過產官學研共同發想，並以目前合作廠商、研發團隊與實驗室為基礎，於2021年年底，推出自由調沐浴乳及相關精油系列，並與台客劇場知名網紅、在地樹木修剪工作室之樹藝師們共同合作，利用故事行銷手法與多項實際檢測數據，成功將循環經濟概念推廣並同步向下紮根於社區、校園、網路平臺活動中。

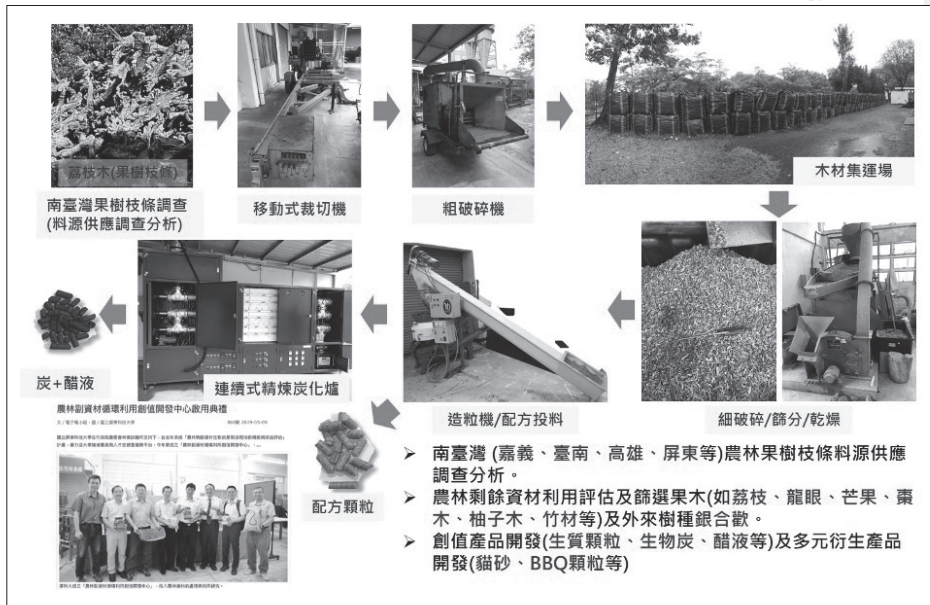
三、國立屏東科技大學——南臺灣農林 資材循環經濟推廣示範產製中心

南臺灣（嘉義、臺南、高雄、屏東）地區是芒果、荔枝、龍眼、番石榴、棗子、柚子、檸檬等果樹的主要產地，為達利潤最佳化之經營，在果

樹生長時，需以人工技術進行產期調整，並同時施以矮化作業，以利果園經營並節省成本，其執行過程需對果樹進行強度或中度之修枝，進而產生大量果樹修剪枝條。由國立屏東科技大學組成之團隊，走訪這些縣市政府環保單位，瞭解果樹修剪枝條處理程序，發現環保單位委由外包廠商進行處理，訪談部分得標業者提出，其清理搬離均由廠商自行處理負責，且無特別規範後續處理事項。

資料顯示，臺南、屏東尚有垃圾掩埋場，可提供堆置，然非該轄區所產生修剪枝條，則需繳交進場費用每公噸500~1,500元不等；若載往焚化爐燒掉，每公噸需繳交1,200~1,500元費用；若在轄區範圍內，具有垃圾堆置場，雖可免費進場堆置，但堆置場之地點偏僻，造成運輸成本過大。因此，廠商均選擇自行覓地堆置處理。根據農委會農糧署的資料顯示，南臺灣地方縣市每年應去化超過10,000公噸之修剪枝條量。各地區堆置場皆瀕臨飽和狀態，若要進行木質顆粒作業，又因果樹或樹木修剪枝條的含水率過高，需堆置2~3周進行乾燥後，才能進行破碎再製成木質顆粒，其破碎與再製皆需要處理費用。

基於上述問題，國立屏東科技大學執行團隊結合在地產官學研之構想，與地方業者共同簽署「循環經濟產業聯盟」合作意向書，由造粒設備廠商負責前處理設備（包括切片機、破



國立屏東科技大學——南臺灣農林資材循環經濟推廣示範產製中心。

碎機、磨粉機等)及產製木質顆粒的造粒機；電熱設備公司則研發生物炭碳化設備與醋液收集機具，成功研發基地型連續式精煉炭化機械爐，於校區內設置從料源集中堆置、處理與加工造粒技術、生物炭製程設備之「南臺灣農林資材循環經濟推廣示範產製中心」，並於2019年5月初正式營運，更於2020年設置「南臺灣農林資材循環經濟產業發展平臺」，提供地方有意願投入生物炭料源、產製與行銷再利用之農、林、養殖業者，相關問題諮詢與產業媒合的平臺。

四、宜蘭三星原鴨有機米廠——稻殼炭連續燃糠爐產炭技術示範場域

宜蘭、花蓮兩縣不似西部地區土壤受工業污染嚴重，水質清澈、雨量

充沛等環境下，為臺灣高品質有機米的重要產地，經過初次碾米後約可年產27,000公噸稻殼(粗糠)，早期大多添加於飼料、肥料、燃料及蒸餾酒槽中，由於現代農業快速發展，飼料與肥料內逐漸減少稻殼之使用，亦使稻殼成為待去化的農業廢棄物之一。近5年，臺灣逐漸興起生物炭產業，意外讓農民發現「稻殼炭」這顆明日之星。

透過相關研究報告中顯示，稻殼炭富含矽與鉀，可使水稻植株健壯，經水稻田每公頃施用2公噸之稻殼炭試驗，可提高12.3%之稻米產量，減少水稻植株15.2%之水稻紋枯病發生。此外，稻殼炭亦可提高瓜果類作物的產量與品質，且具有良好的導水及通氣性，其具微鹼性的特性，可彌補以泥炭為主的介質，土壤易酸化的問題。又因其為

生物惰性，不易為生物分解，故防腐性佳，是理想的介質材料，試驗結果顯示，經過適當處理的稻殼炭，不但可完全取代珍珠石（常用之栽培育苗介質材料），植株生育狀況更佳。

農委會花蓮區農業改良場（簡稱花改場）之執行團隊早期與當地農機公司曾合作開發第一代「附掛式稻殼連續碳化裝置」，使「稻殼炭」逐漸被農民接受並再利用，此裝置可控制產程的碳化溫度及時間，產出之品質優良穩定，惟產能僅約7%~8%，不符合量產之需求。2017~2019年間則與原鴨有機米廠之廠長及當地農機公司機具研發人員調整製程中各項參數條件，使原來設計為產熱的燃糠爐，可藉由電子面板的參數設定，幾乎全自動並連續式地生產稻殼炭，其產能大幅進步至25%，適合使用臥式燃糠爐為熱源的穀物乾燥廠，於非穀物產季時可生產稻殼炭，提高爐具的利用率。至於地方經濟規模較小之農民，想自行生產稻殼炭用於自家稻田，但當時設備規模與售價較大，遂促使花改場執行團隊機具研發人員共同研發，以市面販售之TLUD爐（Top-lit Updraft，上方點火、下方進氣）進行改良與調整，利用通氣盤設計，令碳化過程更穩定、快速；並設計多項省力設計，一人即可獨自操作、搬運使用，且稻殼炭之取出更加方便、省力。此批次式強制通氣型碳化裝置，產能可高達35%，每小時可產出約50

公斤之稻殼炭，符合中小型農戶自製自用之規模，亦大幅提升稻殼再利用率與普及性。

伍、未來展望

生物炭並非現代高科技高產能高產值之產品，但以農業剩餘資材產製之生物炭，與生俱來就有循環農業經濟的基因，迎合現代淨零排放趨勢及碳權市場交易，可發揮固碳減排的附加價值之功能與效益，若再結合異業與創意開發新應用領域，生物炭可從昔日僅提供作為低階農業應用，提升為兼具商業利潤與環境功能的高附加價值產品，躋身為現代市場之熱銷商品。



宜蘭三星原鴨有機米廠——稻殼炭連續燃糠爐產炭技術示範場域。上圖為連續式產炭燃糠爐，左下及右下圖為可單人操作之批次式通氣小型碳化設備。