

# 可恢復、可再生 簡談竹循環經濟

文、圖／汪大雄（林業試驗所退休研究員／臺灣竹會理事）  
黃盈賓（通訊作者 | 工業技術研究院中分院經理）  
周子好（工業技術研究院中分院副研究員）  
李士畦（工業技術研究院中分院副執行長）

循環經濟（circular economy）是一種再生系統，藉由減緩、封閉與縮小物質與能量循環，使得資源的投入與廢棄排放達成減量化目標。簡單來說循環經濟是物質循環流動型之經濟，是指在人、自然資源和科學技術的大系統內，於資源投入、企業生產、產品消費及其廢棄的全過程中，把傳統依賴資源消耗的線形增長經濟，轉變為依靠生態型資源循環發展的經濟。

循環經濟將是零排放、零廢棄，所生產出的副產品、受損壞的產品或不再想用的貨物並不會被看作是「廢物」，而是可成為新生產週期的原材料和素材。「傳統經濟」和「循環經濟」的不同，在於前者財富創造越多、資源消耗及產生的廢棄物就越多，對環境資源造成的負面影響就越大；後者則是以越小的資源消耗和環境成本，來獲得越大的經濟和社會效益；從而使經濟系統與自然生態系統的物質在循環過程相互和諧，促進資源永續利用（World Economic Forum et al., 2016）。因此在環保意識提升下，為減低全球經濟發展對環境資源的負面影響，「循環經濟」遂成為

國際社會的趨勢，受到各國發展經濟模式及企業營運活動資源永續利用的重視。

相較於傳統經濟中的產品有壽終正寢的概念，循環經濟講求的是「再生恢復」，使用可再生能源、拒絕使用妨礙再利用的有毒化學物質，並藉由重新設計材料、產品及商務模式來消除廢棄物，使資源能夠更有效率地被利用。

林業循環經濟是將木竹等廢棄資材回收再利用，研發成生活用品，不但可以減少廢棄物及資源浪費，產品也可以提供社會應用，促進規模生產經濟的效果，並達成森林永續經營及環境保護的目標（林業試驗所新聞稿，2018）。

## 可作為循環經濟的竹子

竹子生長快速、竹材成熟期短並能自行天然更新，因而竹產品具有以下4種特點：能夠取代非生物性物質（abiotic materials）、百分之百的生物基含量（bio-based content）、能重複使用和多產品週期、產品最後使用完後能進行生物分解或

能安全燃燒提供能源，加上全球竹林面積不斷擴增，使再生資源之竹林符合發展循環經濟（Lugtanc and King, 2019）。

臺灣竹資源豐富，但竹材利用率低，竹產業所衍生的竹材廢棄物處理是國內近年來面臨的環保問題之一，為發展竹的循環經濟，如何開發竹材、竹材廢棄物的新用途及增加竹循環再利用率之經濟價值是很重要的議題。

竹產品依產品壽命分成耐久竹產品和中短期竹產品。前者是指產品壽命超過5年，甚至在永久性建築中能超過25年，這些在竹循環經濟中的耐久竹產品包括竹杆、建築用的定向竹重組板材（engineered bamboo）、戶外使用的竹鑲板（bamboo paneling）、長纖維複合材料和家具（Lugtanc and King, 2019）。

### 1. 建材類 耐久竹產品

現今建築部門中，許多建築材料被視為排放密集（emissions intensive）產品，在基礎設施不斷擴充的未來，使用生基建築材料是發展循環經濟的重要項目。竹子可以原竹自然狀態或經加工後型態作為建築的材料，由於竹長、體輕、價格便宜、產量大，又有良好的拉抗強度和彈性，使原竹長久以來廣泛作為房舍、橋梁和支架的材料，在有些國家竹子被稱為貧窮人的木材。世上許多著名建築師使用傳統原竹建築技術建造時髦輕巧的橋梁、生態渡假村和涼亭，印尼峇里島著名綠色學校建築即是用原竹蓋成，有些地方更使用原竹當鷹架，建成10層樓高的建築（Lugtanc and King, 2019）。

#### (1) 定向竹重組板材

近期定向竹重組板材的發展使得竹材料轉向結構使用，多種處理方式如壓平（flatting）、層壓（laminating）、壓縮（compressing），將原竹轉變成像木材具有規格化的產品。經熱改性和緻密性後的竹板，其戶外使用耐久性超過闊葉樹；層壓過後的竹板剛硬度較低但有較高的彈性，達到可彎曲但不會裂的狀態，因此可在地震中維持較大彈力；殺菌處理後能增強竹板在戶外使用耐久度，如荷蘭交通信號除用鋁製外，也用經殺菌處理的竹製品。



■ 臺灣竹資源豐富，可作為經濟重點研究發展材料。（豐年社提供）

## (2) 長纖維竹複合材和竹家具

用長纖維段落做成竹複合材，可以模壓成各種形狀，用竹複合材技術做成的產品有和定向竹重組板材類似的特性，但前者含有超過 30% 的較高合成樹脂含量，將竹編織之薄板浸入樹脂中再經熱壓固化後形成硬板，適合做托盤、混凝土鑄件、貨櫃地板和屋頂瓦楞板等產品。由於長纖維竹複合材具有輕巧、多變之型態及優越強度之特性，使得竹複合材在汽車、太空、船、建築和基礎設施業上有廣大應用空間。

沒有使用合成膠進行上漆，而是以最廉價、可以拆除和重新使用之生物元素，如竹釘、螺釘和螺絲製成之竹家具完全符合循環經濟；竹家具使用到期後會回到生物之循環，從永續性角度來看，竹家具比其他材料之家具更永續，甚至可以取代木製產品。

## 2. 日常使用 中短期竹產品

竹亦有使用周期較短（5 年以下）的產品，包括生活日常用品、竹紡織品、竹紙和竹漿，市場中最普遍的竹紡織品是竹人造絲。人造絲的製造為傳統製漿技術，將竹片經蒸氣燻蒸、加熱和加壓後，使用化學溶劑移除竹材中的木質素和二氧化矽，剩餘的木纖維素漿經沖洗、漂白和乾燥後，將纖維轉成紗線、織成竹紡織品。在服裝業，為增強紡織品的結實性，常在竹纖維中加上棉花，此外，竹也可以做成較粗放和結實的亞麻布紡織品。

由於高產量、長纖維和良好的機械性質，竹在紙業和紙板業是很好的原料。造紙是將竹片和水混合加熱後加入硫化鈉，

將木片去木質化後產生纖維漿，在此過程中產生大量有害、需要回收及廢物處理的有害廢棄物，又稱黑水。加入碳酸鈣將竹纖維漿漂白後產生白紙，漂白過程中雖耗費大量清水，但此水可回收使用，除非為了防水於外表加入塑料塗膜，否則所有的竹紙產品都能生物裂解。

## 生物能源和副產物

循環經濟中強調讓廢棄物重新進入循環並找到新用途。竹子植物的所有部位都能利用，將廢棄的竹材或加工處理後的竹廢料做成竹片，經清洗、軟化、樹脂膠合、加壓後製成竹質之粒片版和中密度纖維板。在能源方面，竹子可提供如木炭、顆粒和煤氣等各類生物能源。

世界許多地區為了減緩森林砍伐所造成的環境破壞壓力，紛紛以竹木炭和竹煤球做為燃料來源取代木材燃料。資料顯示在撒哈拉以南的非洲地區，竹木炭可以取代 64% 的木材燃料消耗量 (Partey et al., 2017)；竹經由轉換後可以用來發電，1.2 公斤的竹可以產生每小時 1 千瓦特之電



竹生物炭



力，這和木材的效能相當，且遠勝鋸屑、花生、咖啡和稻殼等材料 (Sharma et al., 2018)。此外，在生物精煉廠，竹還可經轉換製成許多副產品如生物炭、活性炭等，提供衛生健康部門的利基市場需要。

## 零廢棄價值鏈

循環經濟中的產品不是孤立地發揮作用，而是在產品間相鏈結，並使廢棄物重新進入閉合循環價值鏈中。中國福建三民地區有許多工廠形成竹利用之閉合循環鏈，例如該地區有間公司以低廉價格買進不能再使用的竹稈，除將木質素抽出賣到陶瓷和染料製造公司外，也將剩餘的纖維製成竹漿，這家公司於 2019 年每個月處理的老舊竹稈即達 100 萬公噸。此外，竹產品製造產生的下腳料可用來生產許多附加值產品如活性炭、除臭劑 (Lugtanc and King, 2019)。任何竹廢棄物都可做成顆質燃料燃燒當成能源，然而竹主要不是變成顆質燃料，顆質燃料是用來防止廢棄的最終選擇。

林業及自然保育署、林業試驗所與工業技術研究院等單位為落實「循環經濟」，利用木竹製備多項生活用品，其中以竹為原料者有：

1. 生質綠色能源資材：利用粉碎的竹廢棄物製成竹顆粒燃料，可作為產熱及發電使用。
2. 環境改善基材：利用生物材料製造生物炭及木竹醋液，進一步生產具有吸附雜質、異味、除溼、淨水、改良土壤等功能的產品。

3. 文創紙：研製竹纖格拉辛紙，可應用於烘焙、秤藥紙、包裝等使用，具有高密度、耐油性、透濕性及高透明性等特性。
4. 科技紙：研製竹炭奈米纖維素紙，使其對於臭氣有極佳的吸附功效 (林業試驗所新聞稿，2018)。
5. 工業或民生新型潛力產品：複合式竹活性炭濾網與空氣清淨設備，可具備有效去除室內空氣 99% 甲醛、80% 有機揮發物與 20% 一氧化碳的多功處理能力，經實場測試還可去除 80% 以上之生物氣膠，具備直接替代現行工業無塵室所需之高階空氣濾材的潛力。
6. 家居或生活新型潛力產品：竹炭貓砂在單位時間內可達成 90% 的除臭率，竹醋液驅蟻劑針對白蟻忌避效果達到 87%。
7. 生物或農產新型產品：竹碳保鮮紙，可延長水果存放期限。
8. 竹裝潢建材：以刨削方式製備絲狀竹材，製備成環保健康竹絲板，供建築、裝飾、隔間或輕鋼架屋頂鋪設材料，具備調濕、抗菌、尺寸安定性等功能性，符合智慧綠建材規範。(李等人，2014)

世界各國為增進人民福祉不斷發展經濟，對地球環境造成越多的影響，為減低全球經濟發展對環境資源的負面影響，循環經濟成為未來經濟發展的主流。竹因其特性適合發展循環經濟，又臺灣竹林資源充沛，政府應注重竹林的經營管理，以期提供良好的竹材原料。♻️

(參考文獻請逕洽作者)