

替代石油來源的生質材料產業

陳建明、劉榮昌

近年來全球面臨石油蘊藏枯竭、溫室效應持續擴大的困擾，如何務實地達成循環經濟的理念，發展生質材料商業化製程又能真正節能減碳便成為重要的課題。

循環經濟

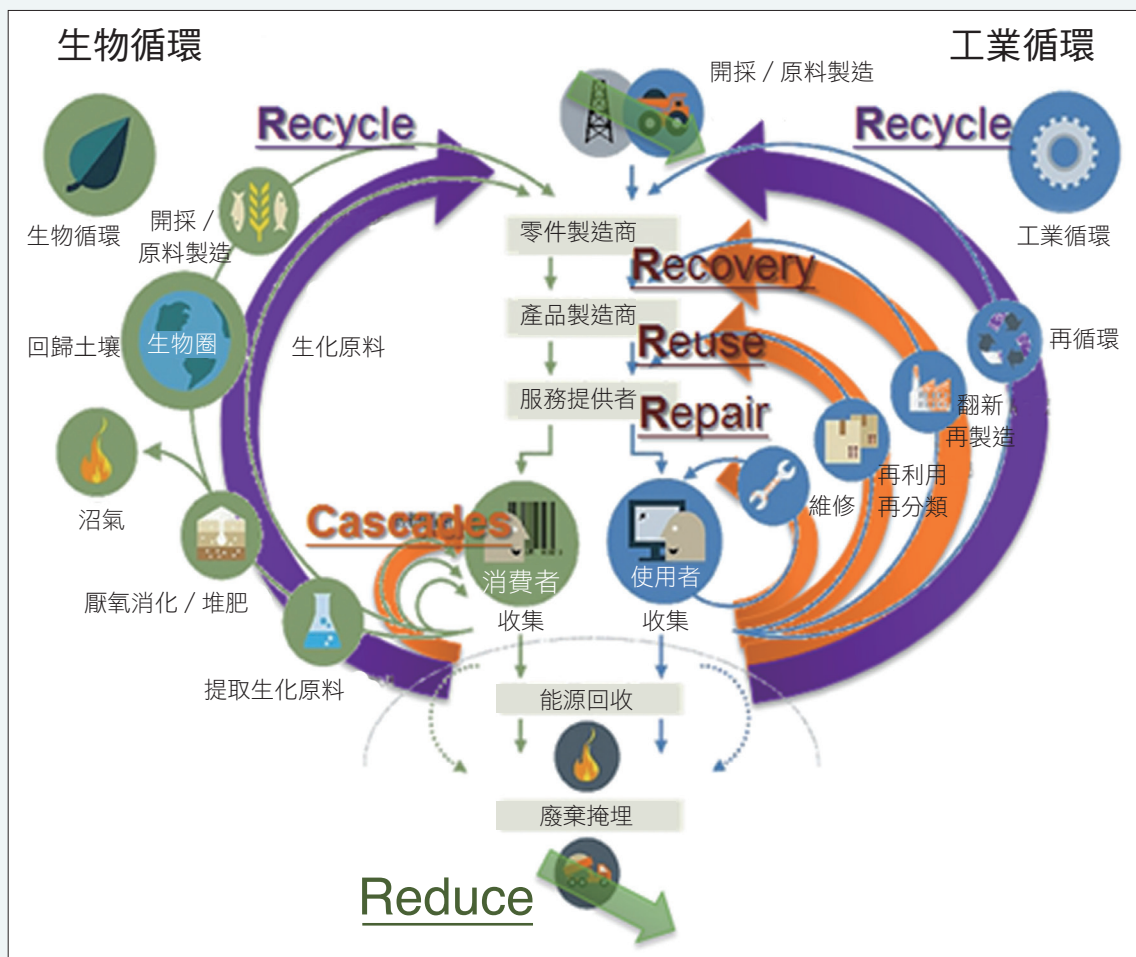
自工業革命以來，全球的商業就呈線性經濟式的發展，也就是說人們在消費的過程中，產品用完即丟並不回收。相對於此的就是循環經濟（circular economy），使消費完的產品回到經濟體循環再利用，因而達到零廢棄物的產生。

循環經濟是運用生態學概念進行經濟發展，生物材料和工業材料都可透過循環經濟系統的循環重返環境，避免資源的過度浪費。循環經濟須充分考量自然生態系統的承載能力，預先透過優良設計（如原料、產品、系統及商業模式）與產品 5R 原則（Reuse（再使用）、Recycle（再循環）、Reduce（降低消耗）、Repair（修理）、Recovery（再復原））以降低廢棄物的產生與能源消耗，使生產合理地依附在自然生態循環中，藉此有效地利用自然資源。

循環經濟同時提倡消費時必須考量到廢棄物的資源化，建立循環生產與消費的觀念。循環經濟包括生物循環與工業循環。生物循環是指產品由生物可分解的原料製成，最終也會回到生態循環提供養分。常見的回歸生物圈的方式包括厭氧消化、堆肥等，也可透過級聯循環（cascade cycle）延長材料壽命，發揮每一分的價值。

工業循環則是指產品材料持續回到工業循環，把可再利用的材質維持同等品質回收，或升級製成更高價值的新產品，無法直接再利用的產品則予以維修、翻新。至於塑膠、金屬等無法生物分解的材料才會回收製成新產品，如此才能最有效地利用能量與資源。

消費時必須考量到廢棄物的資源化，建立循環生產與消費的觀念。



循環經濟概念與產品 5R 原則（圖片來源：工研院產經中心（2016 / 04））

循環經濟的概念是透過區域系統性的合作，優化配置資源，盡可能地提高資源的利用效率，使生產過程中減少投入與排放，達成利潤的創造。循環經濟超越了環保道德上的永續概念，已成為 21 世紀企業獲利的新趨勢，可預期在不久的未來，循環經濟將成為國際企業的主要生產模式。

依據麥肯錫顧問公司的估算，經濟的發展模式如全面走向資源循環運用的概念，每年將創造高達 5,000 億歐元的效益（約 16 兆 5,000 億台幣，大致與台灣全年國民

生產毛額相當）。且未來一旦全面普及，商業利益更是無可限量。因為利之所在，近年來循環經濟已成為企業尋求獲利的新趨勢。

環保理念經過數十年的討論與演進，綠色環保與經濟製造由相斥走到相合，企業實際獲利的時刻已經來到。此外，循環經濟模式不僅是一種社會責任與義務，也可藉由企業間的合作循環與創新以增加利潤。若再透過政府與民間合作以整合組織及企業資源循環模式，開創更多的商業機會與經濟發展將可以預期。

生質材料產業

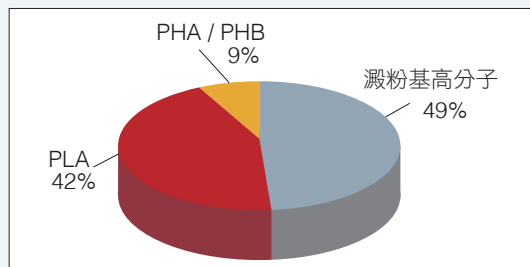
據估計，全球石油儲存量逐漸耗竭，石化原料價格長期看漲應是必然的，而非石化來源的生質材料會是下一代高分子材料應用的焦點。生質材料是一種再生材料，與風能、太陽能、地熱一樣具有取之不盡、用之不竭的特性。而且取材多是廢棄物，目前各國都以發展非糧食作物為主，其植物生長過程還可以吸收二氧化碳、減少溫室氣體的累積，因此開發生質材料技術既可解決地球資源衰竭的問題，又能符合節能減碳的要求，以之取代現有石化產品已成為生質材料產業發展的方向。

生質材料產業正積極投入商業化，可望找到發展的新方向與契機，但因產品具有生物可分解的特性，因此目前的主力應用市場是包裝產業。

近年來因減碳概念盛行，為了營造環保的綠色形象，世界各大廠牌都在自家產品上推動生質材料的創新與應用。例如：筆電外殼就使用生質材料、運用生質材料生產 DVD 光碟機、推出生質來源的飲料瓶、把生質材料應用於汽車內部零組件、使用生質材料生產 3C 產品。此外，生活用品（如尿布）、休閒產品（如水壺、運動鞋、滑雪靴等）、汽車工業（內裝飾板、備胎蓋等）等也開始注重綠色生質材料的應用。

生質材料產業的發展現況

由於原油枯竭造成油價高漲，使得生質材料與石化材料的競爭優勢逐漸浮現。全球暖化的迫切危機也促使簽署京都議定書的



各類生質材料的市場需求（圖片來源：工研院產經中心（2008 / 12））

各國政府以政策補助大力地推動生質材料的使用，這些因素都成為生質材料發展最主要的驅動力量。

一般高分子廢棄物的處理方式都需付出很高的環境成本與代價（例如：焚化會產生致癌的戴歐辛、掩埋 400 年不會腐化、再生利用則處理的成本高昂），因此開發可生物分解的生質高分子材料就成為解決環境汙染與使用需求問題的良好方案。由於生產生質高分子的原料是來自植物，原料則是大氣中的二氧化碳、水分與陽光，生質高分子材料使生命周期中的二氧化碳總量增加較石化來源材料低得多，對於地球整體二氧化碳的減量確有實質的功效。

現今全球生質材料的市場需求以澱粉基高分子、聚乳酸（polylactic acid, PLA）與聚羥基脂肪酸酯（polyhydroxyalkanoates, PHA） / 聚-β-羥丁酸（poly-β-hydroxybutyrate, PHB）3 類材料為主。其中澱粉基高分子的需求市場最大（約占 49%），其次是 PLA（約占 42%），剛發展的 PHA / PHB 則居第三（約占 9%）。2015

開發生質材料技術既可解決地球資源衰竭的問題，又能符合節能減碳的要求，以之取代現有石化產品已成為生質材料產業發展的方向。

年時，澱粉基高分子的市場規模達 53.6 億美元，PLA 是 46 億美元，PHA / PHB 也有 9.8 億美元，整體市場規模則達到 109.4 億美元，而且還以每年 10 ~ 15% 的速度快速成長。

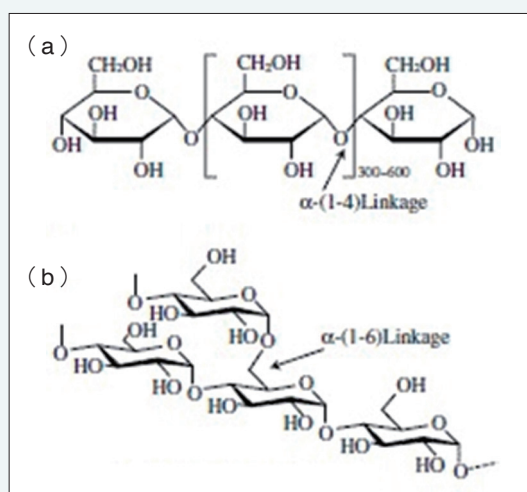
澱粉基高分子的發展現況

澱粉是植物儲備能量的方式，主要存在於植物的種子、根、莖和果實中，是地球上蘊藏量僅次於纖維素的天然有機化合物。目前全世界每年生產的澱粉約 12 億噸，主要來自玉米、小麥、木薯、馬鈴薯等，尤以前者年產 5 億 5,000 萬噸最高。而工業玉米澱粉年需求量約 5,000 萬噸，約占總產量的 9%，主要用於食品業、醫藥業、紡織業、造紙業、塑膠業與其他行業（如建築塗料、建材膠黏劑等）。

天然的澱粉材料包含兩種成分，根據分子的結構可分為澱粉醣和支鏈澱粉兩種。兩者的差異在於葡萄糖鍵結時，澱粉醣的葡萄糖是接在第四個碳上而形成 $\alpha - (1-4)$ 鍵結的直鏈結構；支鏈澱粉則是鍵結在側支鏈，形成 $\alpha - (1-6)$ 鍵結的支鏈結構。澱粉因為末端支鏈澱粉形成螺旋結晶結構，所以在自然界中以分離的顆粒存在。而澱粉顆粒表面含有大量的羥基並形成強氫鍵，使其表現出強烈的親水特性。

由於原澱粉顆粒分子間有強氫鍵作用，使其難以如同可塑性高分子材料般使用熱塑加工。因此，過去澱粉都添加在塑膠中做為填充劑來降低成本和增加材料的剛性。

當這些已添加澱粉的聚烯烴薄膜暴露在土壤中時，由於澱粉可分解成小碎片，若進一步配合光分解劑的使用，可使其完全解體。如在聚乙烯高分子中添加澱粉顆粒，



(a) 澱粉醣與 (b) 支鏈澱粉的分子結構。（圖片來源：工業材料雜誌 295 期）

可應用於農業膜和塑膠袋，由於親水性的澱粉與親油性的聚烯烴相容性並不佳，且考慮到產品的機械性能，通常澱粉添加量並不高，只約為 6 ~ 15%。

澱粉材料也可直接做為高分子材料，但純澱粉具有親水性、脆性等缺點，不利於產品的應用，而且其熔點也高於熱分解溫度，使其熱加工性能也不佳。若要克服上述問題，需對澱粉進行包括化學、熱或機械等方式的改質。隨著高分子技術的精進，澱粉高分子已被視為最有潛力取代石化來源的生質材料。

目前的技術發展已可把具生物可分解性的熱可塑澱粉 (thermoplastic starch, TPS) 研製成農業膜或緩衝材，再進一步透過與其他高分子的共混練技術，製成不同特性與等級的高分子材料，其應用範圍相當廣泛，目前澱粉高分子是生質高分子市場中重要的高分子之一。在歐洲，2013 年澱粉高分子的產能是 10 萬公噸，2015 年則攀升至 15 萬公噸，平均每年成長約 20 ~ 30%。

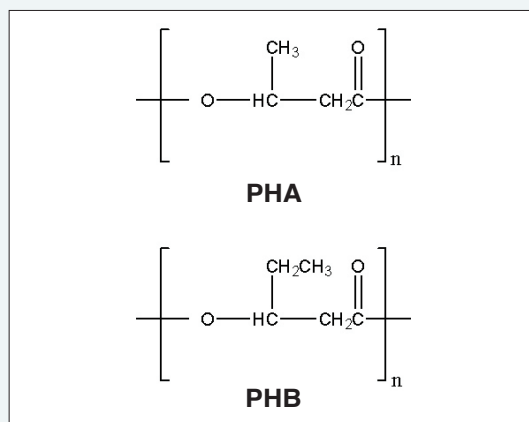
若把 TPS 摻混其他材料則可形成澱粉複合材料，具有與個別材料顯著不同的物理或化學特性。PaperFoam® 就屬於這類型的產品，其材料組成中，澱粉約占 70%、植物纖維 20%，其餘是添加劑。它是一個可生物分解的產品，也可回收到紙板與紙箱類。相對於澱粉而言，澱粉複合材料的市場較小且投入的公司不多。然而，這是一個快速發展的產業，主要應用領域聚焦於替代耐久的塑膠，例如光電、電子、汽車、運動器材、包裝、民生化工等產業。

PLA 的發展現況

PLA 是一種熱塑性脂肪族聚酯。生產聚乳酸所需的乳酸和丙交酯可以通過可再生資源發酵、脫水、純化後得到，所得的聚乳酸一般具有良好的機械和加工性能。而 PLA 產品廢棄後又可以各種方式快速降解，因此 PLA 是一種具備良好使用性能的生質材料。

PLA 的熔點、耐熱性、機械性能、加工性能都與其結晶度有關，而影響其結晶度最主要的因素是 L-乳酸和 D-乳酸的配比。如果原料是純 L-乳酸或者純 D-乳酸，則所得的聚 L-乳酸（簡稱 PLLA）和聚 D-乳酸（簡稱 PDLA）都是半結晶聚合物。原本聚 L-乳酸的結晶度大概是 37%，但即使只加入少量聚 D-乳酸，結晶度就可大幅提高。比如聚 L-乳酸按照一定比例和聚 D-乳酸共混後，聚 L-乳酸的熔點最多可以提高 50°C，熱彎曲溫度提高了大約 60°C，達到攝氏 190 度。所得的抗熱性使 PLA 可以在攝氏 110 度的環境下使用。

PLA 和聚苯乙烯的機械性質相似，但可連續使用的溫度較後者低得多，結晶度提升後可以提高可連續使用的溫度，但生物



PHA 與 PHB 的化學結構

降解速率也隨之變低。相對於其他生物可降解材料，聚乳酸具有部分疏水性。

PLA 已經廣泛應用在生物醫學工程上，如用做手術縫合線、骨釘、骨板等。使用 PLA 製作的手術線不需拆線，可以緩慢水解為乳酸被身體代謝掉，一般的降解時間需要半年到兩年。骨板的理想要求是能夠逐漸降解，使骨頭一步步承受起逐漸增加的應力，而 PLA 逐漸降解的性質就非常適合製作骨板。不足之處是純乳酸降解時的機械強度下降得太快，一般還需加入纖維形成有較高強度的複合材料。

現在 PLA 的應用已經超出醫學的範圍，廣泛應用於一些常見的物品，如：包裝袋、農作物用薄膜、紡織纖維和杯子。PLA 所製的包裝材料初期造價較高，但如今已成為最普遍的包裝材料。通過擠出、注塑、拉伸等加工處理，PLA 可以製成纖維和薄膜。PLA 薄膜的透水透氣性都比聚苯乙烯薄膜低，由於水和氣體分子是通過聚合物的無定形區擴散的，因此可以藉由調節 PLA 的結晶度改變 PLA 薄膜的透水透氣性。

聚 L-乳酸的玻璃轉化溫度較低，可用於形狀記憶聚合物的研究。其低玻璃轉化溫度的特性也應用於熔融沉積成型 3D 列印機的進料材料，也是塑造臉部輪廓產品的主要組成部分。加入 D-乳酸之後的抗熱 PLA 可用於生產微波爐加熱用器皿或盛放熱液體的容器。

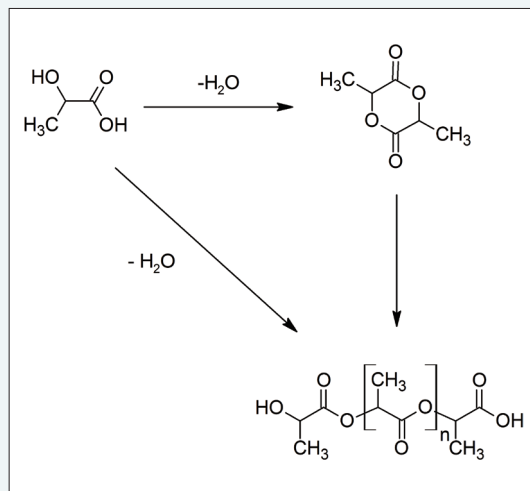
PHA 與 PHB 的發展現況

PHA 與 PHB 是近二十多年來迅速發展的高分子材料，可經由微生物（例如：真養產鹼桿菌、假單胞菌屬、重組大腸桿菌等）合成的一種細胞內聚酯，是天然的生質材料。由於 PHA 與 PHB 同時具有良好的生物相容性能、生物可降解性和塑膠的熱加工性能，可兼做為生物醫用材料和生物可降解包裝材料，成為近年來生質材料領域的研究熱點。PHA 與 PHB 還具有非線性光學性、壓電性、氣體阻隔性等高附加價值的性能。

天然或合成生質高分子材料往往有很高的水蒸氣穿透性，並不利於食品保鮮的應用。PHA 與 PHB 則有良好的氣體阻隔性，而能應用在較長時間的食品保鮮包裝上。因為水汽的穿透是保鮮包裝中的重要指標，而 PHA 與 PHB 在這一點的性能完全可以和 PET、PP 等產品匹敵。

此外，與其他聚烯烴類、聚芳香烴類聚合物相比，PHA 與 PHB 有很好的紫外光穩定性。由於 PHA 與 PHB 匯集了這些優良的性能，使其可廣泛應用於包裝材料、黏合材料、噴塗材料、電子產品、耐用消費品、農業產品、自動化產品、化學介質、溶劑等領域。

PHA 與 PHB 不但是一種性能優異的環保生質材料，又具有許多可調節的材料性能，



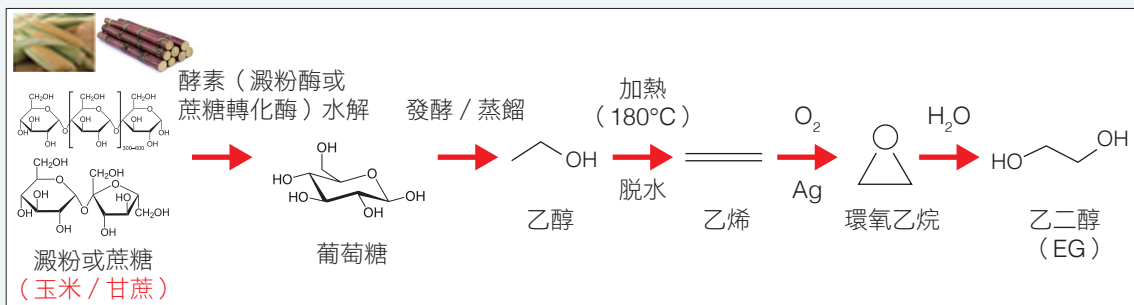
PLA 的主要合成途徑（圖片來源：[https://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(lactic_acid\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Poly(lactic_acid))）

隨著成本的進一步降低以及高附加價值應用的開發，將成為一種頗具潛力的多應用領域生質材料。由於它是一個組成廣泛的家族，其硬度與彈性可調整的特性使其可以適用於不同的應用。PHA 與 PHB 的結構多樣化以及性能的可變性使其成為生質材料中重要的一員，相較於澱粉基高分子與 PLA，PHA 與 PHB 發展的歷史很短，發展的潛力更大，應用的空間也更大。

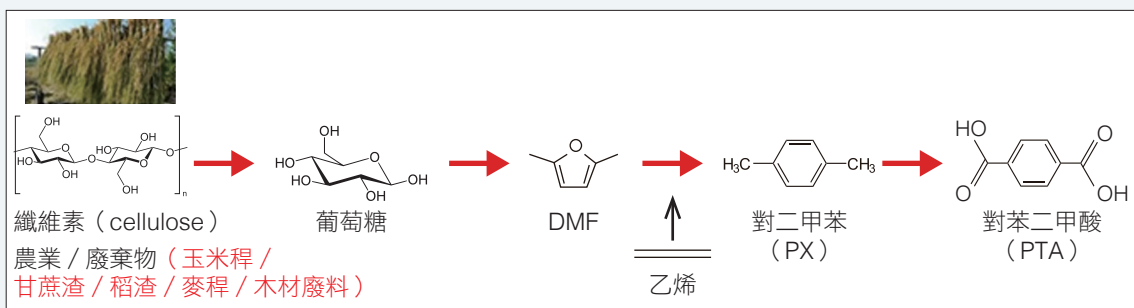
其他生質高分子材料的發展現況

國內已有公司利用生質聚對苯二甲酸乙二酯（polyethylene terephthalate, PET）材料製造 100% 生質保特瓶與聚酯衣。其研發團隊與美國公司合作，首先聚合了 100% 生質 PET 酯粒，再逐一突破吹瓶、抽絲、織布、染整後加工等各項工序的技術瓶頸，而完成 100% 生質保特瓶與聚酯衣的製造。

生質 PET 是採用生質乙二醇與對苯二甲酸（PTA）聚合而成。其中生質乙二醇是



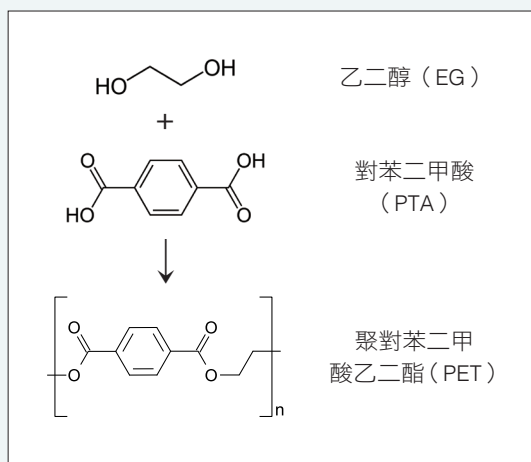
生質 EG 的主要合成途徑



生質 PTA 的主要合成途徑

以玉米或甘蔗為原料發酵獲得乙醇，再把乙醇轉換為乙烯，之後再經一連串化工製程最後可得生質乙二醇 (EG)。生質對苯二甲酸則是以農業廢棄物 (玉米稈 / 甘蔗渣 / 稻渣 / 麥稈 / 木材廢料等) 為原料進行發酵獲得葡萄糖，再把葡萄糖經一連串化工製程並加入乙烯轉換為對二甲苯，之後再經氧化製程可得生質對苯二甲酸。

生質 PET 屬於綠色高分子，對人類及環境都無害，除可應用於保特瓶與紡織纖維外，也可應用於汽車、包裝、光學膜等產業。面對油價日益高漲，已逐步成為替代性原料，估計全球市占率約有 5%，每年可供應 225 到 300 萬噸。



生質 PET 的主要合成途徑

若能結合國內技術深耕的高分子加工業者開發生質材料產品並導入循環經濟概念，不失為傳統石化產業轉型升級的有效策略。



生質材料產業與循環經濟的連結

生質材料產業的展望

全球生質材料仍以歐美與日本為主要發展地區，歐、美生質材料的市場發展著重於可堆肥袋、食品包裝材料與隨用即丟的一次消耗性高分子產品，日本則大力發展生質材料在汽車與 3C 電子產品上的應用。在生質材料已逐漸成為品牌廠商所指定使用材料的今天，台灣 3C 電子、汽車產品與生技醫療業者須及早看清這一發展趨勢，若能結合國內技術深耕的高分子加工業者開發相關產品並導入循環經濟概念，不失為傳統石化產業轉型升級的有效策略。

目前與石化產業密切相關的化學材料業遍布全省，有潛力發展循環經濟的園區也是如此，建議可以高雄市選定範圍為示範

場域發展生質新材料，且以推動循環經濟為主軸廣納符合循環經濟的各產業進駐。在這園區內可建立最適化區域能資源供應技術及發展模式，進行汽電共生廠能源鏈結及發展廢熱回收技術，把多餘蒸氣或電力外售供鄰近廠商使用，並整合區域內水資源再生利用。初期可導入生產力 4.0 進行園區內產業高值化智慧生產，長期以推動高值生質材料循環產業的商業化為目標。

陳建明、劉榮昌
工研院材料與化工研究所