

循環低碳材料 新發展

李秋煌、劉榮昌、陳建明

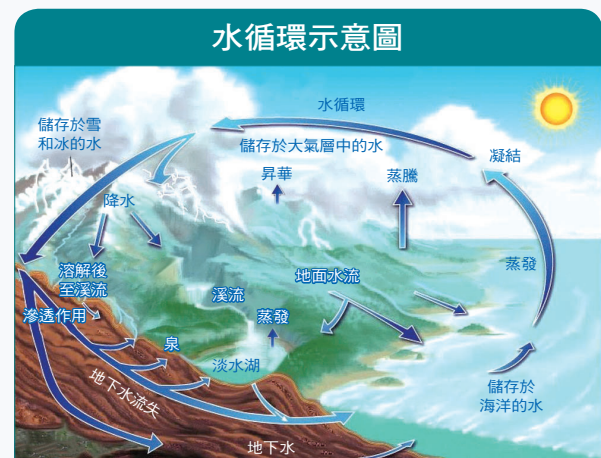
自工業革命以來，人類大量使用化石燃料，大幅增加了大氣中溫室氣體二氧化碳的濃度，也嚴重破壞了自然界的碳循環，並造成全球暖化現象，發展循環低碳材料成為刻不容緩的課題。

物質循環

物質循環又稱為生物地質化學循環，是指各種物質在自然界中循環的過程，例如：水循環、氮循環、磷循環、碳循環等。這些物質最終經過分解者分解成無機物返回環境，然後再被吸收成為有機物，周而復始。一般而言，在自然狀態下，這些循環物質處於穩定的平衡狀態，對於短暫的變化能夠迅速自我調節。

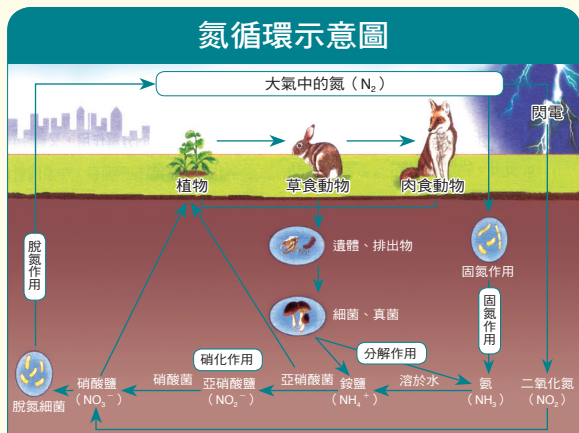
以碳循環為例，植物在光合作用中吸收二氧化碳生成葡萄糖，並保存在枝葉或果實內；當動物攝取了植物的枝葉或果實後，碳分子就會進入動物體內。動物呼吸時把二氧化碳釋放回大氣裡，死亡後，在屍體腐爛過程中碳分子也會和氧氣結合形成二氧化碳回到空氣中。此外，海洋也可吸收部分二氧化碳，形成生生不息的循環。

然而，自工業革命後，人類大量使用埋藏在地底下的化石燃料，包括煤、石油、天然氣、頁岩油等，讓千萬年來存在地底的碳元素重新加入碳循環系統，使得碳排放至大氣的速率大於保存在生物體及海洋中的速率。因此，大氣中的二氧化碳濃度越來越高，形成溫室效應，造成嚴重的全球暖化現象。

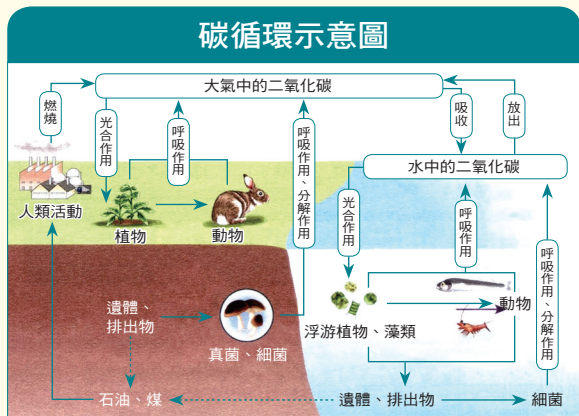


(圖片來源：維基百科，https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Water_cycle_zh.png)

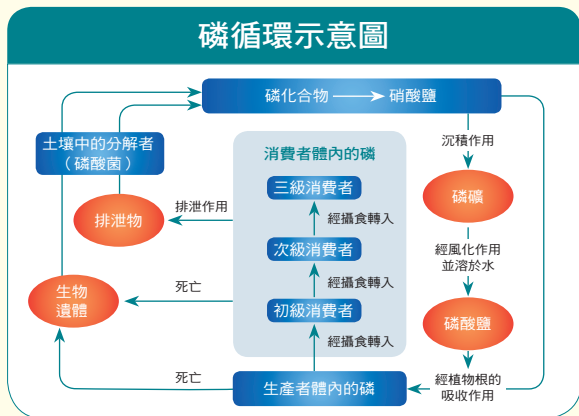
為了有效減緩氣候暖化，
全球先進企業廣泛採取碳足跡來評估產品對氣候變化的影響，
並採取可行的措施減少供應鏈中的碳排放。



(圖片來源：科學的家庭教師，http://www.phyworld.idv.tw/BA_BIO/BOOK_2/htm/6-2_POINT-ANS.htm)



(圖片來源：科學的家庭教師，http://www.phyworld.idv.tw/BA_BIO/BOOK_2/htm/6-2_POINT-ANS.htm)



(圖片來源：台灣海洋生態資訊學習網)

碳足跡

為了有效減緩氣候暖化，全球先進企業廣泛使用碳足跡來評估產品對氣候變化的影響，並採取可行的措施減少供應鏈中的碳排放。碳足跡是個人或企業針對一項活動或產品的生命週期中所直接與間接產生的溫室氣體排放量，並以二氧化碳的影響為單位，來衡量這項活動或產品對環境的影響。產業界二氧化碳的排放，一般是指與製造相關的排放，但產品碳足跡排放尚須包含產品原物料的開採與製造、組裝、運輸，一直到使用及廢棄處理或回收時所產生的二氧化碳排放量的總和。

估算個人的碳足跡頗為簡單，使用的公式如下：

家居用電的二氧化碳排放量 (kg) = 耗電度數 × 0.785；

開車的二氧化碳排放量 (kg) = 油耗公升數 × 0.785；

乘坐飛機的二氧化碳排放量 (kg)：
 短途旅行 (200 公里以內)：飛行公里數 × 0.275；
 中途旅行 (200 ~ 1,000 公里)：55 + 0.105 × (飛行公里數 - 200)；
 長途旅行 (1,000 公里以上)：飛行公里數 × 0.139

然而，對企業而言，碳足跡的估算較為複雜。這是因為企業的碳足跡包含了十分廣泛的排放源，從材料的運輸過程到工廠的能源消耗無所不包。為了幫助企業能精確、系統地計算碳足跡，一系列的解決方案和專業組織相繼誕生，其中接受度最高的是溫室氣體盤查議定書。這個議定書是由世界可持續發展工商理事會和世界資源研究所共同發起和完成的。目前針對企業碳足跡的計算有兩種方法：

生命周期評估法 (life cycle assessment, LCA) — 這個方法準確且具體，包含兩個主要的步驟：詳細描述產品生命週期內所產生

產品碳足跡 (Carbon Footprint) :

服務或產品在整個生命周期中所直接與間接產生的溫室氣體排放量。

- 能源與資源耗用越多，溫室氣體排放量越多，碳足跡越大。

產品碳足跡標籤 (Carbon Labeling) :

透過嚴謹的審核程序，傳達產品碳足跡訊息給消費者。

產品碳足跡



產品碳足跡示意圖 (圖片來源: 台灣產品碳足跡資訊網, <https://cfp.epa.gov.tw/carbon/ezCFM/Function/PlatformInfo/FLConcept/FLFootIntroduction.aspx>)

的廢棄物或使用的物料，一般稱為生命周期盤查；評估產品所產生的廢棄物或使用的物料對於環境的影響，一般稱為衝擊評估。

根據 LCA 所估算的碳足跡可由以下公式得到：

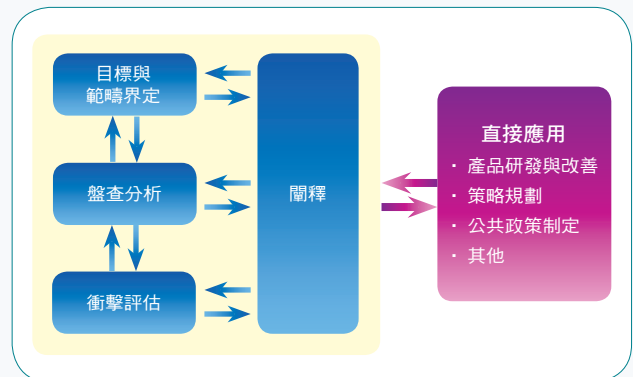
$$CFP = \text{活動數據} \times \text{排放係數}$$

其中活動數據代表產品生命周期中所有物質與能源的數量；排放係數代表每單位活動數據二氧化碳的排放量，可由適當的資料庫獲得。

通過所使用的能源礦物燃料排放量計算，這個方法簡略但估算方便。

採用碳足跡概念研擬適切的低碳生活以及減量計畫時，必須考量個人或企業活動相關的溫室氣體排放量，否則可能導致污染源轉移，實質上並未減量的假象。

碳足跡標籤又稱為碳標籤或碳排放標籤，是一種用以顯示企業的生產製程、產品、



生命周期評估法 (LCA) 的架構。(圖片來源: 台灣產品碳足跡資訊網, <https://cfp.epa.gov.tw/carbon/ezCFM/Function/PlatformInfo/FLConcept/FLFootIntroduction.aspx>)

服務及個人碳排放量的標示方式。它是指一個產品從原料取得，經過工廠製造、配送銷售、消費者使用，到最後廢棄回收等生命周期各階段所產生的溫室氣體，換算成二氧化碳當量的總和。

碳足跡是個人或企業針對一項活動或產品的生命周期中所直接與間接產生的溫室氣體排放量，並以二氧化碳的影響為單位，來衡量這項活動或產品對環境的影響。

循環低碳材料的開發是解決地球資源持續耗竭、氣候暖化、環境變遷等課題的關鍵策略。

最早的碳足跡標籤是由英國政府於 2001 年推出的碳減量標籤。透過碳標籤制度的施行，能使產品各階段的碳排放來源透明化，促使企業調整碳排放量較大的製程，也能促使消費者正確地使用產品，以達到降低碳排放量的目的。目前包括美國、日本、歐盟、德國、韓國、瑞士等國家正如火如荼地展開碳足跡相關政策與工作的建置。從已實施產品碳標籤的經驗可見，許多國家正朝著低碳社會的道路邁進，並且也為企業帶來碳排放減量的機會與強化公司品牌的聲譽。

我國也於 2009 年開始研議台灣碳標籤的機制，期望以碳標籤政策強化低碳產品的市場競爭力，並提升消費者對於碳標籤產品的購買意識，達成低碳經濟的永續消費與生產模式。

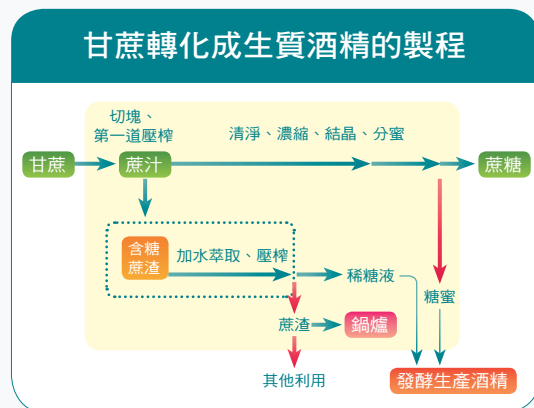
循環低碳材料的發展

由於循環低碳材料的開發是解決地球資源持續耗竭、氣候暖化、環境變遷等課題的關鍵策略，因此從國際組織到各國政府都積極推動循環低碳材料產業，相關的技術、產品與應用模式進展快速，發展循環低碳材料已成為未來趨勢。

典型的例子如巴西的農民在循環低碳潮流下，種植甘蔗提煉糖蜜，糖蜜經微生物發酵轉化成生質酒精—乙醇，可做為汽車燃料或上游化工材料，例如：乙醇脫水就可得乙烯；乙醇也可經酯化反應產生酯類。這種生質酒精是由二氧化碳經光合作用形成的葡萄糖衍生物—糖蜜轉化而來，若做為汽車燃料，最後經汽車引擎燃燒產生二氧化碳形成封閉循環系統，因此這種系統的碳足跡是零。



(圖片來源：育政科技全球資訊網，http://www.flywell.com.tw/Environmental_upload)



(圖片來源：BioEnergy Today 生質能源趨勢網，https://bioenergytoday.net/2011/05/19/biorefinery_intro_02/)

若做為上游化工材料，來自生質乙醇的乙烯相較於來自石油的乙烯碳足跡低，不但避免石油裂解製程的高能耗，也減少大量廢水廢氣排放，生成的下游化工材料經燃燒等終端處置後也會產生二氧化碳，可繼續導入碳循環系統中。此外，由於石油資源的日趨緊張，再加上生質乙醇的大規模工業化生產，預期成本相較於石油原料具有競爭性，可逐步進入石化基礎原料領域。

有別於巴西農民種植甘蔗轉化成生質酒精，在美國是以玉米做為轉化成生質酒精的原料。以玉米轉化成生質酒精的製程較為複雜，必須先透過蒸煮方式破壞植物組織取出澱粉，再經過糖化過程把澱粉轉化為糖蜜，然後才進入糖蜜發酵製成生質酒精。

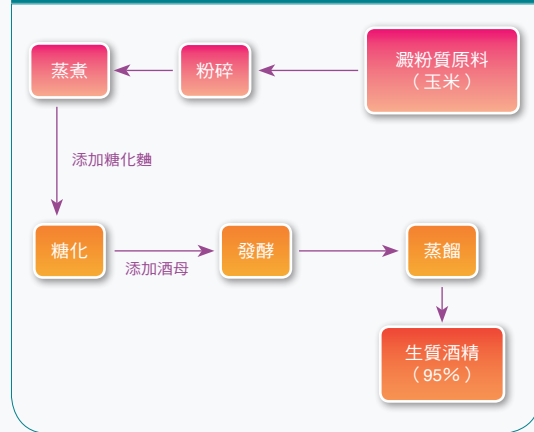
除了生質酒精外，現今全球循環低碳材料市場需求，主要以澱粉基高分子、聚乳酸、聚羥基脂肪酸酯 / 聚-β- 羥丁酸 3 類材料為主。其中澱粉基高分子的需求市場最大（約占 49%），其次是聚乳酸（約占 42%），聚羥基脂肪酸酯 / 聚-β- 羥丁酸居第三（約占 9%）。2016 年澱粉基高分子的市場規模達 60 億美元，聚乳酸規模達 52 億美元，聚羥基脂肪酸酯 / 聚-β- 羥丁酸的市場約 11 億美元，整體市場規模達到 123 億美元，目前全球循環低碳材料市場規模每年以 10 ~ 15% 的速度快速成長。

雖然經過各國學者與工程師的努力，但上述循環低碳材料在成本與物性上目前仍有改善空間，無法完全取代石油來源的材料，因此亟需開發更高性能與更低成本的循環低碳材料。目前發展中的循環低碳材料還有生質聚對苯二甲酸乙二酯（bio-polyethylene terephthalate, Bio-PET）、生質聚丁二酸丁二醇酯（bio-poly(butylene succinate), Bio-PBS）、固碳乙醇（把二氧化碳直接轉化為乙醇）等。

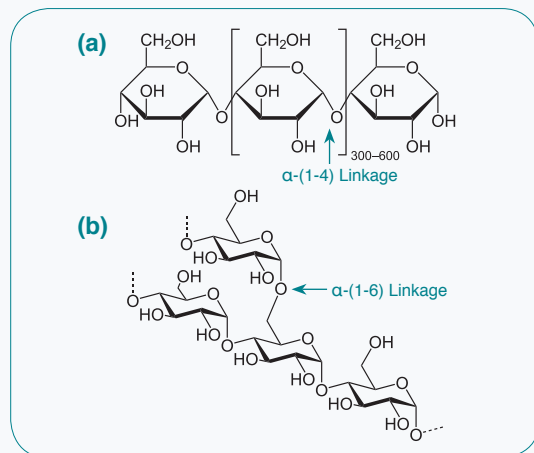
Bio-PET 發展現況

Bio-PET 是由生質乙二醇與生質對苯二甲酸共聚合而成；其中生質乙二醇是以玉米或甘蔗為原料發酵獲得乙醇，再把乙醇轉換為乙烯，然後經一連串化工製程得到生質乙二醇。生質對苯二甲酸則是以農業廢棄物，如：玉米稈、甘蔗渣、稻渣、麥稈、木材廢料等為原料發酵獲得葡萄糖，再把葡萄糖經一連串化工製程並加入乙烯轉換

玉米轉化成生質酒精的製程



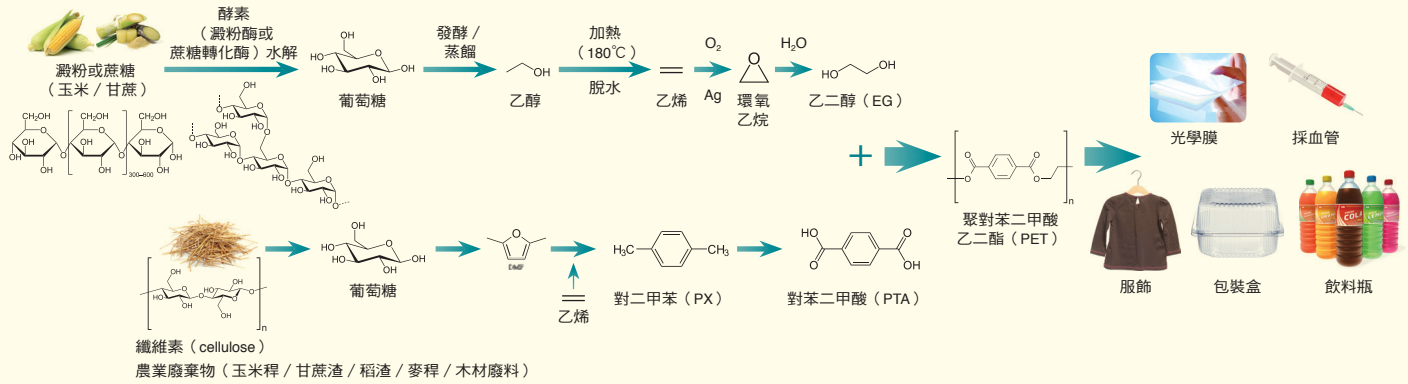
（圖片來源：樂多日誌，<http://reader.roodo.com/oilinsight/archives/1908852.html>）



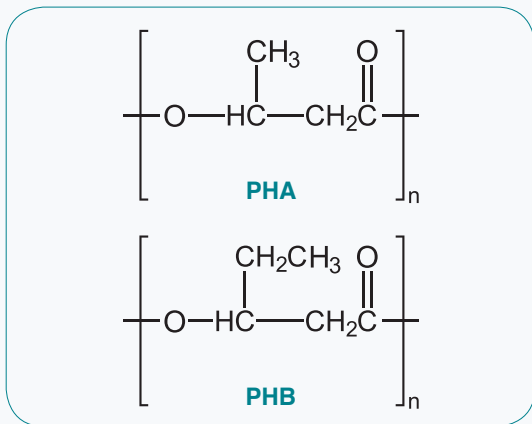
澱粉基高分子的化學結構，包含 (a) 澱粉糖與 (b) 支鏈澱粉。（圖片來源：《科學發展》第 531 期）

為對二甲苯，然後經氧化得到生質對苯二甲酸。

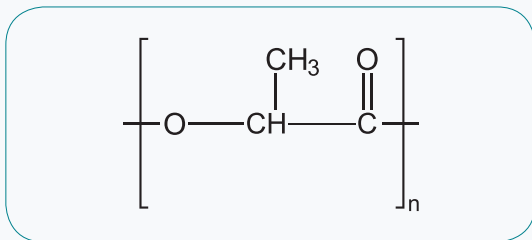
Bio-PET 是熱塑性聚酯，具有優良的透光度、韌性、拉伸強度、抗衝擊強度、耐磨性、電絕緣性，也表現出質量輕、不透氣、耐酸鹼、耐水、耐油等特點，近年已廣泛應用於光學膜、採血管、包裝盒、飲料瓶、連接器、齒輪、服飾等產品。



Bio-PET 的聚合與應用



PHA (聚羥基脂肪酸酯) 與 PHB (聚-β- 羥丁酸) 的化學結構。(圖片來源:《科學發展》第 531 期)



聚乳酸的化學結構

循環低碳材料的市場預估近年來會大幅度修正，早期認為澱粉基高分子是主流產品，後來修正為聚乳酸與聚羥基脂肪酸酯 / 聚-β- 羥丁酸，最近則是開始關注 Bio-PET。早期市場分析專家認為循環低碳材料的利基市場主要是具有用完即丟的特性，可節省後續處理所需的龐大成本，例如衛生掩埋的空間與焚化產生戴奧辛的環境代價，

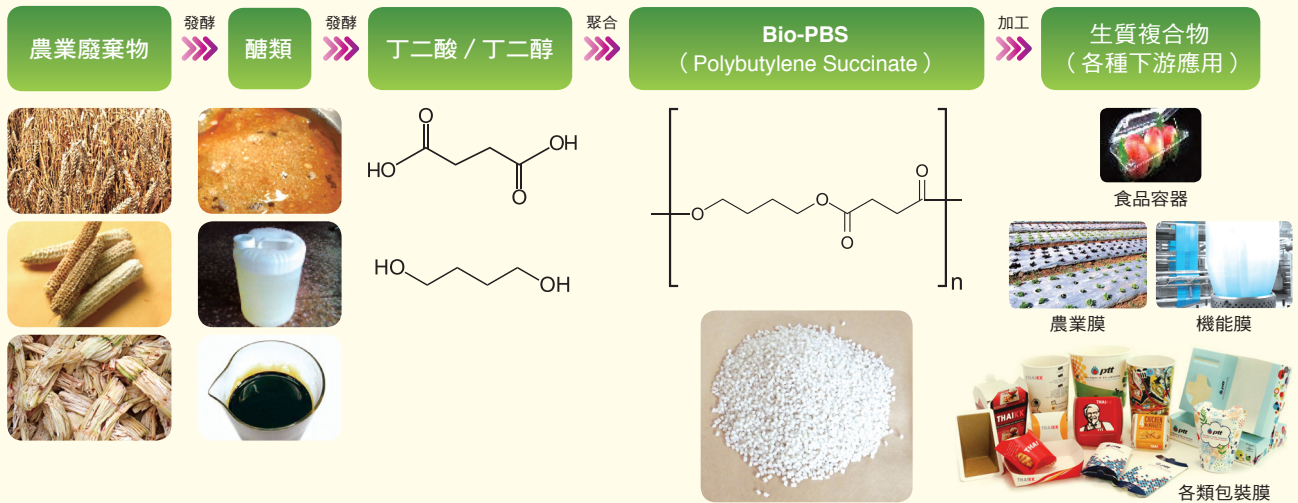
因此看好澱粉基高分子、聚乳酸、聚羥基脂肪酸酯 / 聚-β- 羥丁酸。後來可口可樂等品牌廠商倡導使用可循環再利用與低碳足跡的 Bio-PET 製備飲料瓶，積極進行產品的綠色差異化區隔。

此外，近期頁岩氣產能大增，造成 C4 與芳香烴系列產品短缺，Bio-PET 產品已成為廠商調整發展方向的目標產品，使得 Bio-PET 一躍成為市場看好的循環低碳材料。全球 PET (聚對苯二甲酸乙二酯) 市場需求是 6,000 萬噸 / 年，估計 Bio-PET 的市場占有率於 2020 年將達到 10%，且逐年增加。

Bio-PBS 發展現況

Bio-PBS 是由生質丁二酸與生質丁二醇共聚合而成的可生物降解聚合物。生質丁二酸與生質丁二醇都可由農業廢棄物先經微生物發酵轉化為各種醣類後，再經微生物發酵生成。

Bio-PBS 於 20 世紀 90 年代進入研究領域，價格低廉，耐熱性能好，熱變形溫度和製品使用溫度可以超過攝氏 100 度，性能介於聚乙烯和聚丙烯之間。它可直接以注塑、吹塑、吹膜、層壓、發泡、紡絲等成型方法加工，因此迅速成為可廣泛推廣應用的通用型可生物降解的循環低碳材料，目前已應用於食品容器、垃圾袋、包裝膜、化妝品瓶、嬰兒尿布、機能膜等產品。



Bio-PBS 的聚合與應用

就應用市場而言，PBS 的性質可取代聚乙烯、聚丙烯、PET 等塑膠材料，不但可利用如押出、射出或吹模等各種加工技術成型，也可取代天然纖維、木頭等材料，未來也有取代 PS 的潛力。PBS 的物性與澱粉基高分子、聚乳酸、聚羥基脂肪酸酯 / 聚-β-羥丁酸等生質塑膠材料相似，2016 年 PBS 以包裝材料為主要應用市場，占整體市場約 60.2%，其次是農業用膜市場的 22.5%，車用材料市場則占 10.6% 居於第三。

2016 年全球 PBS 市場規模約 8 萬公噸，預期在 2020 年達到 10 萬公噸。以區域市場來看，2016 年北美占 48.2% 是全球最大市場，歐洲 47.5% 居次，亞洲則占 4.3%；預期 2020 年歐洲將以 50.6% 市場占有率超越美國成為全球最大市場，美國 45.8% 居次，亞洲則占 3.6%。

固碳乙醇的發展現況

由於京都議定書已於 2005 年 2 月 16 日正式生效，近年來各國政府都開始著手管制二氧化碳的排放，對一些高二氧化碳排放量的工業（如半導體、水泥、石化、

鋼鐵、造紙、人造纖維等）造成很大的影響與衝擊，使得如何把二氧化碳轉化成高價值化學品或能源產品成為重要課題。若能成功產業化，除了可大幅降低二氧化碳捕獲成本及後續儲存的問題外，也因可替代自化石燃料中獲得的碳源而降低對化石燃料的依賴度。

有鑑於此，各國學者近年來投入大量資源與時間從事二氧化碳轉化為乙醇的研究。例如：目前已有許多項研究發現利用 K / Cu-Zn-Fe 觸媒或 Rh-Li-Fe / SiO₂ 觸媒可顯著提高二氧化碳的轉化率，在前者觸媒催化條件下，轉化率約為 45%，乙醇選擇率近 20%；後者的選擇率更可達 34%。然而，製程成本仍然太高。

因此，2016 年美國橡樹嶺國家實驗室的研究團隊首先使用奈米技術在矽的表面鋪設奈米級的銅與碳，再把氮原子安置在碳表面的頂端，使矽的表面產生高低不平的表面紋理，然後把處理過的矽暴露於二氧化碳與少量的電荷中，就可把二氧化碳轉化成乙醇。

這種催化過程引發了複雜的鏈式化學反應，但本質上就是把燃燒的過程反轉過

我國化學材料產業為追求永續發展，可朝高值化循環低碳產品研發的方向邁進，不但兼顧產業與環保，也可實現循環經濟。

來（二氧化碳 + 水 = 乙醇 + 氧）。整個轉換過程可以在常溫下進行，更重要的是幾乎沒有任何副反應。這個反應沒有使用昂貴且稀有的貴金屬做為催化劑，僅用氮摻雜的奈米碳和奈米銅複合材料，具有用於大規模工業生產的前景，但現今仍停留在實驗室階段，需進一步深入研究。

目前最有可能產業化的二氧化碳轉化為乙醇的技術，是由紐西蘭公司研發的厭氧菌發酵技術。這個技術直接利用的主要成分是鋼鐵廠轉爐氣中的二氧化碳，減碳效果優於由甘蔗或玉米產製的生質乙醇。中鋼公司與李長榮化工公司曾合組，並耗資新台幣 1.5 億元在中鋼小港廠區建立示範工廠，把中鋼煉鋼製程中產生的轉爐氣轉化成乙醇，未來完成技術驗證後將建置商業化生產工廠（投資 14 億元，產能 5 萬噸 / 年）。

循環低碳材料產業的展望

自工業革命以來，化石能源（高碳能源）的燃燒使用大幅增加了大氣中溫室氣體二氧化碳的濃度，也嚴重破壞了自然界的碳循環。在漫長的農業社會中，大氣中的二氧化碳濃度一直穩定在 280 ppm，但預計到 2050 年，濃度會達到 550 ppm，這將導致全球氣候暖化、冰川融化、海平面上升、病毒增加、物種減少、災害性氣候頻繁等，嚴重擾亂自然生態系統內部的平衡與威脅人類的生存，因此發展循環低碳材料成為刻不容緩的課題。

近年來我國化學產業在國內外的布局面臨重大挑戰，對外面臨新興國家崛起與美國頁岩氣商業化開採成功導致的低價乙烯強力



固碳乙醇的聚合與應用

競爭，對內遭遇環保抗爭、新產能擴增計畫無法推動、國光石化停建與中油五輕關廠的衝擊，短期國內乙烯的擴充供應有困難。我國化學材料產業為追求永續發展，可朝高值化循環低碳產品研發的方向邁進，不但兼顧產業與環保，也可實現循環經濟。

期許業者可依據應用市場需求，賦予高值化環保低碳新材料所需功能，朝向加值應用提升與差異化價值發展，並接軌五加二創新研發產業（綠能科技、亞洲矽谷、生技醫療、智慧機械、國防產業、新農業與循環經濟），整合上中下游業者進行循環經濟園區整合、產品策略與應用聯盟，配合政策規範、政府採購及獎勵導引、品牌推動策略、環境友善、安全訴求與國際法規等優勢，創造循環低碳材料及下游應用產業，形成完整產業鏈，拓銷全球市場布局。

李秋煌、劉榮昌、陳建明
工研院材料與化工研究所