

生質能源轉換技術

文·圖／陳力騏 柯淳涵 周楚洋

將生質物（Biomass）轉換成能源以取代傳統的化石燃料是環境永續的重要課題之一，生質料源在臺灣以農業廢棄物為最大宗，年產超過400萬噸。生質物轉換能源產物型態包括：液態的生質柴油（Biodiesel）及生質酒精（Bioethanol）、氣態的沼氣（Biogas）及氫氣，以及經焙燒（Torrefaction）製成粒狀（Pellet）的固態燃料等，本文主要介紹轉換的技術，包括生質柴油、生質酒精及生質沼氣。

生質柴油

19世紀末德國工程師Rudolf C. K. Diesel發明一種以Compression-ignition為推進機構的內燃機，初期是使用花生油為原料，而這種高能源效率引擎確實也容易適應各種不同的燃料，被稱為Diesel engine（柴油引擎）。但後來為了增強燃燒效率不斷改良油料霧化噴嘴，黏度較高的植物油已無法適用於現代的柴油引擎，特別是在油品黏度大幅增加的低溫環境。

Diesel fuel（柴油）泛指能適用於現代Diesel engine（柴油引擎）的油料，目前主要使用原油分餾時於200-350°C所得到的烷類混和物，即所謂Petrodiesel（石化柴油）。只是石化柴油燃燒時有燒柴的味道，因此中文以柴油稱之。主流的引擎設計很難因為要使用生物油料而立刻改變，所以科學家將生物油（三酸甘油酯）經過甲基酯化轉化而得脂肪酸甲基酯（Fatty acid methyl ester，簡稱FAME），使其動態黏度適用於一般現代柴油引擎（Kinematic viscosity < 10 m²/s）。

這種以FAME為主體的生質燃料，不但適用於現代柴油引擎，燃燒時可放出與石化柴油相若的熱值（Calorific value-40,000 kJ/kg）且沒有

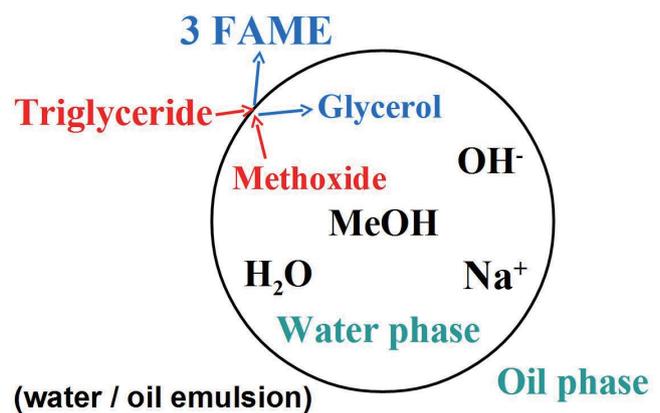


圖1：鹼催化三酸甘油酯甲基酯化反應的介面反應模式

柴味，不含會造成酸雨的硫、更不需要添加潤滑劑，儲運上也極為安全（閃燃點大於攝氏120度），目前在經濟、環保效益與油品品質上已廣受肯定與推廣，被稱為Biodiesel（生質柴油）。臺灣耐斯集團下的新日化公司於2005年起在嘉義縣民雄鄉生產生質柴油。目前產業上使用鹼催化甲基酯化反應為如圖1的異相反應。

反應與物質分離都同時在W/O乳化介面進行，是非常聰明的反應機構。由於一般使用難以回收的苛性鈉為催化劑，學界趨勢為研發容易回收、更經濟的異質催化劑，但仍然難以克服非勻相反應的速率限制問題。而於原料油品取得上，使用廢棄食用油雖然兼具廢棄物處理與減碳的效益，但難以滿足替代性燃料的供應鏈，所以德國近年廣植油菜，也從2003年起開始進口菜籽油（Rapeseed oil）以因應生質柴油產量的政策需求。除了油棕油（Palm oil）、菜籽油、芥花油（Canola oil）等熟知的高產量油料作物外，西班牙美食的黃土香（Chufa Sedge）、產業用大麻（Hemp）、乃至二戰中日軍於印尼栽種的麻瘋樹（Jatropha）則根據本土環境作評估。

生質酒精

生質酒精被認為是最重要的可再生燃料之一，而木質纖維素生物質因具有全球可用性，且用於熱電聯產（汽電共生）時可獲得增加之能量，則被視為生產生質酒精最有前途的原料（Alzate and Toro, 2006）。全世界對石化燃料的過度依賴已造成許多不利的影響，包括空氣品質下降、全球氣溫上升及極端氣候事件頻繁等，生質酒精在作為混合物或化石汽油替代品時受到青睞（Aditiya *et al.*, 2016）。

過去使用可食用作物做為第一代生質酒精原料，有與民爭糧的爭議，因此近年來積極研發木質纖維素等非食用原料，取自農業和林業廢棄物，是為二代酒精。一代酒精之發酵殘餘物即為酒糟，富含蛋白質，可做為有機肥或動物飼料；二代酒精之不可發酵殘餘物含木質素，可做為生質燃料、土壤改良劑，可見發展生質酒精是落實循環經濟之永續方案。而離散式的酒精生產除了提供能源之外，也可做為目前抗疫消毒的急迫用途。

第二代生質酒精的生產過程中，如何克服木質素障礙及纖維素的水解是關鍵技術。木質纖維材料由纖維素（30-50%）、半纖維素（20-35%）及木質素（12-20%）所組成，在生質酒精的轉換過程中，主要使用纖維素與半纖維素。纖維素和澱粉一樣，都是由葡萄糖所組成的高分子，但兩者的結構不同，纖維素結晶度高且被半纖維素所覆蓋，而木質素則是堅固的立體網狀結構，支撐植物並固定纖維素與半纖維素（Himmel *et al.*, 2007）。因此，必須

對原料進行前處理，利用化學或物理的方式打散三者間之結構，因而提高了成本。木質纖維素的前處理技術起源很早，紙漿工業利用高溫的物理方式，加上強酸、強鹼的化學處理方式分離木質素，所以若能利用現有設備可節省許多發展成本。前處理後，纖維素將進入水解的階段，如果利用化學方式使用酸與高溫，會生成抑制發酵的有害物質，因此目前普遍使用酵素水解，其優點為副產物少、糖的產率高、使用溫度較低（Saha *et al.*, 2005）。國內若能逐步的發展前處理技術及低成本的酵素，將提高自主能源率且不與糧爭地，建立永續的能源來源。

另第二代生質酒精因不同農業廢棄物的組成比例不同，在製程上須先經化學或物理方法處理，破壞植物的細胞壁並把半纖維素降解為五碳糖，再以適當的酵素水解把纖維素降解成六碳糖，最後經酒精發酵把五碳糖和六碳糖轉化成酒精，因此這類酒精稱為纖維酒精（Aditiya *et al.*, 2016）。藉由使用具有內切葡聚糖酶、纖維二糖水解酶和木聚糖酶活性的酶製劑，來研究臺灣的銀合歡和桉樹素生產生質酒精，發現硬木的快速生長和適應性使其成為生質酒精生產的良好料源，並可用於後續的糖化（Ko *et al.*, 2012）。

另外生物質轉化為酒精的變化程度取決於原料的性質，主要是由於生化組成的不同。而典型的轉化過程中的主要步驟，如對於糖的發酵，受到微生物極大的影響，而酒精發酵技術廣泛使用傳統酵母、釀酒酵母（*Saccharomyces cerevisiae*）和細菌物種運動發酵單胞菌（*Zymomonas mobilis*），雖然有許多的因素影響酒精生產的過程，但最終產量與這些屬性的最佳條件有直接相關（Zabed *et al.*, 2017）。

生質沼氣

沼氣係由厭氧菌（*Anaerobic bacteria*）在厭氧的環境下，將複雜的高分子有機物分解而生成的最終產物，其過程稱為厭氧消化（*Anaerobic digestion*），可概分為水解、酸化及甲烷化三個階段。複雜的高分子有機物包含動物糞便、廢水污泥、城市固體垃圾等有機廢棄物或任何其他可生物降解的物質。沼氣的主要成分為甲烷和二氧化碳及其他微量氣體如氫氣、一氧化碳、氮氣和硫化氫等。由於甲烷的二氧化碳當量約為25-27，若放任沼氣自然排放，將成為環境的一大負擔，如能妥善回收利用，則可以提供家用熱源、發電、純化成天然氣做為車用燃料或併入氣網使用，是最簡單的潔淨能源之一。

由於厭氧消化為複雜的生物性程序，容易受到環境及操作條件如溫度、酸鹼度、營養成分、碳氮比、碳磷比、抗生素、基質的性質、微量元素及顆粒大小等因素的影響，因此操作



圖2：共消化程序處理固液混合廢棄物及副產物利用

時必須將外在的環境條件控制在適當的範圍內，才能使沼氣（甲烷）有最大的產值。

厭氧消化產沼氣的概念近來已由單一物料之廢污水處理，發展出將多種生物質做混合處理，即同時混合多種不同比例、不同固體、液體廢棄物的處理方式，稱為共消化（Co-digestion）。一般來說，含有機物的廢棄物都可以用於沼氣之生產，但高濃度、易降解且均質的料源會有較佳的效益。目前用來生產沼氣的廢棄物來源，可分為固體廢棄物、漿狀廢棄物及液體廢棄物（廢水），包含生活廢污，農業及工業廢棄物。如：蔬菜、水果殘渣及庭院廢棄物、家戶垃圾中已分類之有機廢棄物、農業（作物）廢棄物、一次及二次污水處理污泥、畜牧糞尿、屠宰場及肉品加工廢棄物、魚製品加工廢棄物、乳製品、糖、澱粉、咖啡等食品加工廢棄物、啤酒廠及飲料廠之蒸餾和發酵後廢棄物、化學工廠、紙漿和造紙業廢棄物、水果和蔬菜加工廢棄物等。為減少運輸成本，廢棄物通常採現地處理方式，但在特殊情況下也會採用集中式共消化處理系統。

因為厭氧消化中，有機物中的碳氮比（C/N ratio）為極重要的影響因子。不適合的碳氮

比會抑制發酵反應，為了改善碳氮比，通常會混合其他有機物進行共消化，其最大的優點在於讓處理槽的有機負荷有較大的緩衝空間。對含碳量高的農業廢棄物如玉米穗軸、燕麥稈、稻稈、麥稈、玉米桔桿、果菜廢棄物等，共消化被認為是較佳的處理方式，因為它們單獨進行厭氧消化時很難產生甲烷，但加入含氮量高的物質如動物糞便，並調整碳氮比使介於20-30間，即有利於厭氧消化而生產沼氣（甲烷）。

共消化程序的優點包含：（1）增進養分（例：碳、氮等）的平衡；（2）改善顆粒之沉降、懸浮、酸化等狀況；（3）可增加沼氣產量；（4）增加可回收處理之廢棄物種類；（5）額外之養分回收（例：土壤改良劑）；（6）增加生物可分解之有機物的比例；（7）提供緩衝之容量以穩定系統；（8）可調整水分含量及酸鹼值；（9）可以稀釋潛在的有害物質；以及（10）加強微生物間的協同作用（Braun, 2002; Mata-Alvarez *et al.*, 2000）。厭氧共消化處理固液混合廢棄物及後端副產物利用的概念如圖2。（本期專題策畫／農化系李達源教授&生物能源中心周楚洋主任）



陳力騏小檔案

現任臺大生物機電工程學系教授。臺灣大學藥學系學士（1988），九州大學博士（1996）。主要研究領域：生物感測。



柯淳涵小檔案

現任臺大森林環境暨資源學系教授。曾任臺大森林環境暨資源學系主任。臺大森林學系學士（1989），美國洛杉磯加州大學土木環境工程博士（1999）。主要研究領域：永續生物材料、紙漿造紙、生質能源、環境工程。



周楚洋小檔案

現任臺大生物機電工程學系副教授及生物能源研究中心主任。臺大農業工程學系學士（1978），佛羅里達大學農工博士（1989）。主要研究領域：廢棄物處理、生物程序工程、生質能源、自動化工程。