

甘蔗田工廠

生質酒精



■ 林祐生 李文乾

車子沒油了，

用高粱酒取代汽油可能嗎？

不要懷疑！

這不是電影〈上帝也瘋狂〉的劇情！

利用路邊的雜草生產能源可能嗎？

不要懷疑！

這不是電影〈回到未來〉的科幻情景！

這是目前最熱門的

科技和能源趨勢——生質酒精！

何謂生質酒精

生質酒精，也可叫做生物乙醇，就是利用微生物發酵把生質（biomass）中的醣分轉化所得到的酒精。生質酒精其實就是乙醇，分子式是 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ，和由石化原料生產的乙醇相同，差別只在於原料的不同。生質指來自生物體的非石化有機物，一般所指的生質通常是植物藉由光合作用產生的含碳化合物。

做為汽油的替代燃料，生質酒精通常以5~15%和汽油混合，可在不修改現有汽車引擎的情況下使用，也可以完全替代汽油做為汽車燃料。添加5%和10%酒精的汽油就分別稱為E5和E10，美國有E85汽油，也就是含酒精85%和汽油15%的混合燃料。使用生質酒精的汽油辛烷值高且較潔淨。此外，汽車引擎燃燒的酒精是由二氧化碳（ CO_2 ）經植物光合作用轉化的生質而來，形成封閉系統，在這個系統中循環利用 CO_2 ，淨排放量是零。

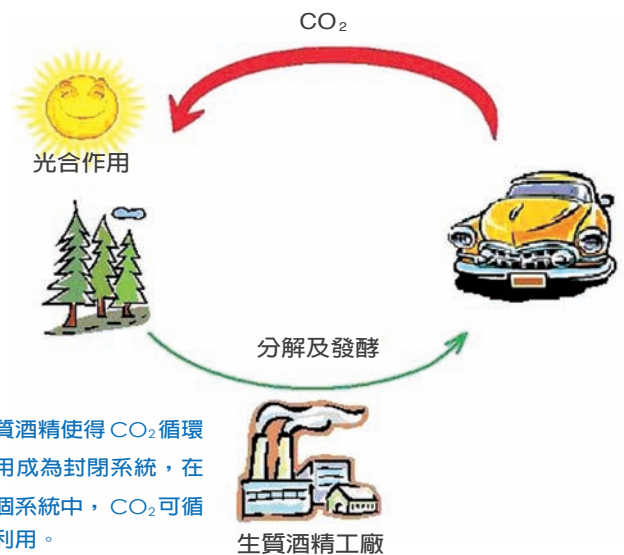


生質酒精的原料

早在 1970 年代石油危機時，巴西、美國就積極投入生質酒精工業的發展，近年來在 CO₂ 超量排放、全球氣候暖化、國際原油供需不穩定和價格持續上漲等因素影響下，有越來越多的國家投入。2006 年全年的生質酒精產量約 4 千萬公秉，90 % 生產於巴西和美國。巴西以甘蔗為原料，美國則以玉米為主，生產生質酒精，甘蔗和玉米分別是糖質和澱粉質作物。

除了這兩者之外，做為生質酒精原料的作物也包括大麥、小麥、燕麥、稻米等穀類，還有甜菜、甜高粱，以及木薯、甘藷等。最近幾年的發展是以非糧食作物為原料來生產酒精，也就是以木質纖維素或纖維質做為生質酒精的原料，包括穀類農作物廢棄物如麥稈、稻稈、玉米稈等，以及農業、都市和建築廢棄物，如蔗渣、舊報紙、木屑、廢木材等，或者成長快速的纖維質作物，如芒草、狼尾草、柳枝稷等，甚至包括海藻類。

這幾年因為玉米酒精工廠大量設廠開工，造成玉米價格飆漲，美國國內畜牧業受



到波及，使得全球糧食短缺而引起恐慌。為了加速纖維酒精的發展，並配合布希總統未來 10 年內減少 20 % 汽油用量的宣示，美國能源部在 2007 年 6 月底宣布，未來 5 年內將提供 3 個研究中心總共 3 億 7 千 5 百萬美元經費，進行生物燃料研究計畫，目標是改進纖維素轉化為生質酒精的製程，以降低成本。

國內發展的前景

不久前，經濟部才指示國營事業帶頭籌設生質酒精工廠。中油規劃和味丹合作，利用味丹的發酵設施生產生質酒精。台糖則將在嘉義南靖投資設廠，以甘蔗、甜高

做為汽油的替代燃料，生質酒精通常以5～15%和汽油混合，可在不修改現有汽車引擎的情況下使用，也可以完全替代汽油做為汽車燃料。

梁等為原料生產生質酒精。

台灣現在休耕的農田已超過24萬公頃，每年政府補助休耕轉作的經費高達118億元。根據京都議定書的規定，將來國際間有CO₂排放量的配額，若利用休耕的土地種植能源作物來提煉酒精，都能算為CO₂減少的配額。因此，因應CO₂排放減量的需求和能源短缺的問題，可以利用休耕農地種植能源作物以生產生質酒精，同時提高土地使用率和增加農民收入。

農委會農試所的研究指出，最適合在國內栽種的生質酒精能源作物是甘蔗、甘藷和甜高粱。若有糧食短缺的考量，休耕的土地不宜全部用來種植能源作物，國內每年仍有數千萬公噸的農林廢棄物（稻草稈、蔗渣、蔬果廢棄物、建築林木廢棄物等）可做為原料來生產生質酒精。

製造程序 and 技術

製造生質酒精的原料大致區分為3類，根據不同種類的原料，轉化成酒精的方式也不同。

第1類是糖質原料，如甘蔗，甜高粱等富含簡單的醣類。利用甘蔗和甜高粱的莖



綠油油的甘蔗田

壓榨成汁後，可直接經酵母菌發酵製成約13～17%的含水酒精，再經過蒸餾提高濃度到95%，最後經過分子篩脫除水分成無水酒精。榨汁剩餘的廢棄物除可燃燒生產高溫蒸氣提供蒸餾時所需能源，甚至以汽電共生方式發電降低成本外，也可成為纖維酒精的原料。巴西或國內台糖公司未來的工廠，都是以這種方式運作的。

第2類是澱粉質原料，如小麥、玉米、木薯、甘藷等，澱粉含量分別約為70～75%、60～70%、25～30%和15～20%。這些作物須先經前處理步驟使澱粉釋放出來，而澱粉是一種聚合醣，須經液化、醱化步驟分解成可發酵的單醣（葡萄糖），隨後的發酵、蒸餾製程則和糖質酒精一樣，這類酒精稱為澱粉質酒精。東南亞的國家大多以木薯為原料，美國和墨西哥則以玉米為原料。

第3類是纖維質原料，多半是農業廢棄物，是由纖維素（約占38～50%）、半纖維素（約占23～32%）及木質素（約占15～25%）三者所組成。其中纖維素是長鏈狀的高分子結構，和澱粉一樣，是由葡萄糖所構成，但兩者結構不同。半纖維素則是短分子鏈的結構，是由多種糖類單體組成，以五碳糖居多。

不同農業廢棄物的組成比例也不同，因此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，這類酒精稱為纖維酒精。酵素水解剩下的木質素則可燃燒以汽化發電方式產生能源，提供後段蒸餾所需的能

最近幾年的發展是以非糧食作物為原料來生產酒精，也就是以木質纖維素或纖維質做為生質酒精的原料。

源。

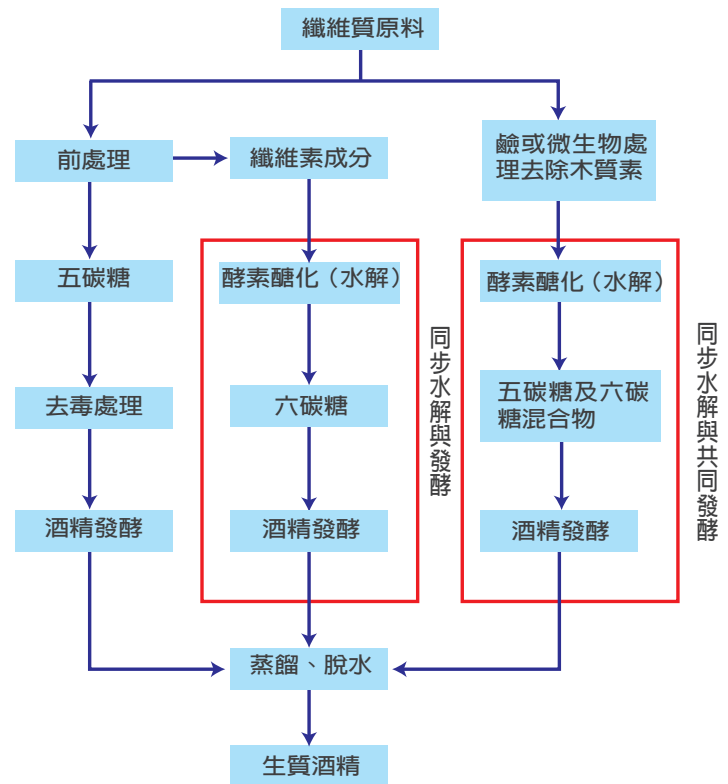
由糖和澱粉製造酒精的技術屬於第1代的生質酒精，已商業化設廠，所用的生產設備和技術也非常成熟，但農作物來源和人類或動物的食物相互競爭，有造成糧食短缺的問題。第2代的纖維酒精可解決這個問題，但其主要原料來源—農業廢棄物也是一種重要的有機肥料，若大量使用於製造纖維酒精也有環保上的疑慮。

纖維酒精

纖維酒精所用的原料是木質纖維素，存在於地球上的草本和木本植物中，並非人或動物的食物，因此沒有排擠糧食的問題，對農地利用的影響也較小。例如蔗渣是製糖的廢棄物，能轉化為酒精是回收能源的好方法。此外，國內最大宗的農業廢棄物—稻草稈，年產量約200萬噸，除少部分用作堆肥、菇舍建材、草繩、飼料等之外，大部分是就地燃燒，造成空氣污染，危害道路安全，引起車禍時有所聞，如能做為生質酒精的原料，將有環保、節約能源等多重效益。

雖然以農林廢棄物做為原料生產第2代酒精，更符合經濟效益和環保要求。但目前纖維酒精的發展仍有不少障礙，成本上仍無法和糖質或澱粉質為原料的匹敵。纖維酒精所遭遇到的最大問題，是如何降低纖維素水解反應的成本和提高分解的反應效率。

植物細胞壁的纖維素是由葡萄糖聚合而成的線性長鏈分子，和半纖維素、木質素、果膠質等互相纏繞在一起。除此之外，植物尚有表皮組織，上面含有保護的腊質。在利用纖維素分解酶把纖維素水解為葡萄糖時，除有木質素和半纖維素的纏繞阻撓之外，由



纖維酒精的生產步驟示意圖。左右兩邊代表不同的程序，左半邊的前處理方法主要是溶解半纖維素，右半邊的前處理首要是去除木質素，以增加纖維素分解酶和纖維素的接觸面積。

於纖維素本身晶體結構的問題，使得酵素不容易接近它的表面，造成分解效率緩慢。因此須透過前處理步驟去除木質素並溶解半纖維素，提高纖維素和酵素的接觸面積，加



酒精發酵的操作

因應 CO₂ 排放減量的需求和能源短缺的問題，可以利用休耕農地種植能源作物以生產生質酒精，同時提高土地使用率和增加農民收入。

快分解速率。以稻草稈為例，若直接使用未處理的稻草稈和酵素反應，水解率不到 10 %。

前處理 前處理的方法大致可分為物理法、物理化學法、化學法、生物法等。

物理法主要是粉碎原料讓顆粒變小，增加酵素的接觸表面積，並破壞纖維素的晶體結構，耗能較大。

物理化學法包括高溫熱水或蒸氣處理，後者包括蒸氣爆裂法、氨爆裂法和 CO₂ 爆裂法，主要是利用蒸氣讓原料處於高溫、高壓一段時間後，可使木質素軟化，再瞬間洩壓，纖維素晶體便會爆裂。蒸氣爆裂法耗能低，但會產生對發酵有害的物質，氨爆裂法雖不會產生有害物質，但是半纖維素並不會分解，因此須再投入半纖維素分解酵素進行水解，而 CO₂ 爆裂的效果較差。

化學方法則包括：(1) 鹼處理法：利用鹼溶液溶解木質素；(2) 稀酸前處理法：稀酸可使半纖維素水解成為單糖，使得結構鬆散。

生物法通常是利用腐生真菌，如白腐真菌，把生質原料的木質素移除，這是利用真菌的木質素過氧化酶降解木質素。其他包括多酚氧化酶、漆酶等也能降解木質素。

綜合而言，要把纖維素從細胞壁中釋放出來需要有前處理步驟，傳統上以高溫高壓或酸鹼處理為主，不但耗能而且會產生大量的廢水，因此生物處理法是發展的方向。最好是利用各種分解酵素除去木質素和其他成分，並使纖維素和半纖維素分解為單糖以利發酵。

纖維素分解 把生質中的聚合醣分解為可發酵的單糖，是生質酒精發酵的首要步驟。不若澱粉質作物的澱粉酵素分解，包括液化和醱化步驟的技術已相當成熟，纖維素的分解酵素是製造纖維酒精的主要成本所在。在 2004 年，克服這個障礙的研究終於有了突破性的進展，全球知名的兩大酵素公司 Novozymes（總部位於丹麥）和 Genenco（美國加州），在美國能源部的經費補助和國家再生能源實驗室（NREL）支援下，分別研發出遺傳基因工程菌體，能大量生產有效分解纖維素的纖維素分解酶。

乙醇發酵 工業上主要用來發酵產生酒精的微生物是啤酒酵母和革蘭式陰性菌，但這兩種酒精生產菌只能代謝葡萄糖、果糖和蔗糖，無法消化利用半纖維素的分解產物木糖、阿拉伯糖等五碳糖。

經過許多學者的努力，包括普渡大學的何南西（Nancy Ho）博士，已成功利用基因



國內稻田每年約有 200 萬噸的農業廢棄物—稻草稈，除少部分用作堆肥、菇舍建材、草繩、飼料等之外，大部分是就地燃燒，造成空氣污染，如能做為生質酒精的原料，將有環保、節約能源等多重效益。

纖維酒精所用的原料是木質纖維素，存在於地球上的草本和木本植物中，並非人或動物的食物，因此沒有排擠糧食的問題，對農地利用的影響也較小。

重組技術把能代謝木糖的基因轉殖到上述兩種微生物中，使它們能同時把五碳糖（木糖）和六碳糖（葡萄糖）轉化為酒精。美國佛羅里達大學恩格倫（Ingram）教授則是把革蘭式陰性菌代謝得到酒精的兩個基因選殖到大腸桿菌，所構築的 E. coli KO11 也可把葡萄糖和木糖轉化為酒精。

另外，NREL 也宣稱開發出全球第 1 株能同時代謝阿拉伯糖和葡萄糖的酵母菌，可代謝阿拉伯糖得到 83% 的酒精產率。除了代謝五碳糖的酒精生產菌研發之外，高耐受力（耐酒精、耐高溫、耐有毒成分）的酒精生產菌的篩選和改良，也是學者持續研究的重點。尤其是纖維素的酵素分解要和酒精發酵一起進行，配合酵素分解時的高溫需求，酒精生產菌必須能在高溫發酵，因此耐高溫的酵母菌開發是很重要的。

纖維酒精製程 國際上目前已開始有纖維酒精公司加入生質酒精的生產行列，加拿大的 Iogen 公司先利用蒸氣爆裂法處理農業廢棄物，然後以酵素分解得到五碳糖和六碳糖，再發酵為酒精。這種製程稱為分開醱化（水解）和發酵程序（SHF），也就是先透過酵素水解法或酸水解法分解為單糖後再進入發酵製程。美國的 BC International 公司也是採用這種酵素水解和發酵分開的製程。

發展中的製造程序還有：同步水解和發酵程序，可克服發酵過程中糖濃度過高所造成的抑制現象；同步水解和共同發酵程序，利用可同時代謝五碳糖和六碳糖的酒精生產菌進行發酵；整合生質處理程序，利用能水解並能發酵的微生物，把木質纖維素前處理後的產物完全轉化為酒精。

另外，單是在發酵部分，還有許多適合



纖維酒精的原料—（上）芒草、（下左）蔗渣及（右）稻草稈。

圖片來源：李金駿

生質酒精的製造程序，例如：細胞固定化製程，可提高菌體濃度；非常高糖濃度發酵製程，增加進料的可溶性物質至 300 克/公升以上，可提升最終酒精濃度和降低操作成本；連續發酵製程，可降低操作成本和提高產率。

因應國際能源存量的減少和價格的攀升，發展生質酒精是勢在必行的。根據國際能源總署的估計，全球生質酒精取代汽油做為汽車燃料的比率，在 2010 年會達到百分之四，在 2030 年會成長到百分之六。從生質酒精絕對使用量來看，則會成長 3 倍，也就是從目前每年全球生產量 3,800 萬公秉，增加到 2030 年的每年 1.2 億公秉。因此生質酒精，尤其是纖維酒精工廠的建立，將如雨後春筍般快速擴增，以因應越來越多的燃料酒精需求。 □

林祐生 李文乾
中正大學化學工程學系