

## 感謝

本刊 40 期所刊登之《利用藻類生產生質能源》(潘崇良著)及《蝦蟹殼中的寶貝—幾丁質》(吳彰哲、黃瀚寧著)係轉載自科學發展月刊 448 期(2010 年 4 月出版)文章，除了感謝文章作者慷慨答允，並感謝行政院國家科學委員會《科學發展》月刊編輯部的同意及協助，讓本刊讀者能有機會讀此豐富而精彩的作品，本刊在此致上十二萬分的謝意。

行政院國家科學委員會《科學發展》月刊：<http://www.nsc.gov.tw/sd/>

## 利用藻類生產生質能源

潘崇良

台灣海洋大學食品科學系

國內外近期的學術和產業研發都證實，  
可利用多種酵素的組合式分解反應，  
自海洋藻類產生新的綠色生質能源。

### 生質能源的發展

在全球暖化與能源危機的大環境下，海藻可以在海水中與海岸周邊生長，不會和陸地上的糧食、飼料等農作物搶耕地、淡水、肥料等生產資源。此外，海藻的生長可以吸收大氣與水中的二氧化碳，協助解決地球暖化與海水酸化的問題，未來隨著碳稅的開徵，還可以出售可觀的二氧化碳配額。

就台灣地區而言，除了在陸地上可就已有的農業與發酵技術，發展如澱粉類作物中的甘藷做為國家特有的生質能源作物，以及利用廚餘等生物性廢棄物開發新型態的生質能源外，在海洋經濟水域中養殖各種藻類，做為生質柴油、生質乙醇、生質氫氣等的生質能源產業的原料，應是確保未來長遠經濟發展的可行策略。目前藻類可再生生質能源尚屬發展的起始階段，若政府與企業界能早日投入與支持已略有基礎的研發工作，必可在藻類生質能源產業領域，建立具有領先全球生產技術的重要地位。

此外，開創綠色的可再生生質能源產業，除了國內自用能源與其他民生所需的供應外，也可以把這類生質能源技術以整廠輸

出方式，拓展到其他國家地區應用並取得回饋，最重要的是，可使能源需求不再完全掌握於他人之手。對於我國的獨立自主發展與全體國民的民生福祉而言，海洋藻類再生生質能源產業的技術研發是值得及早投資的。

其他屢被論及的生質能源發展問題，包括糧食與國際貿易之間複雜的關係，有限的陸地農業土地資源被生質能源生產作物占用，以及受限制的水資源究竟應使用於工業糧食飼料作物，或生質能源生產作物栽種的問題。實際上，若能跳脫局限於陸地有限耕種土地的思考框架，願意把視線轉向台灣周邊遼闊的海洋水域，就可立即出現嶄新的開闊思考空間，與更多可供解決現有能源供給問題對策的選項，以及奠定海洋國家未來各類先進海洋生質能源科技產業的發展基礎。

中研院院士徐遐生博士在 2008 年暑假的吳健雄科學營「全球暖化與能源危機」的演講中，述及生質燃料、光電能、核融合與核分裂 4 種有發展潛力的能源，且經分析後認為是未來符合永續能源需求的 4 項選擇。

但在後續的評估中，徐院士僅談到由纖維素乙醇製成的生質燃料，以及未來可改種植經基因改良可產生玉米乙醇 4 倍能量的軟化軟枝草。然而，在評估軟化軟枝草產生生質燃料所需的廣大土地面積，以及土壤有機物再需求等問題後，質疑以這類方法產生的生質能源是否較好，最後還是認為核能發電是解決全球暖化與能源危機的可行方案。徐院士也在演講文稿後的附錄中，提出數據化估算生質燃料生產限制說明，主要是以陸地植物產出乙醇的淨效率和需要的種植土地面積，來評估其可行性。

徐博士對於生質能源的估算，似乎仍限制在陸地植物，忽略了國內外已蓬勃發展的藻類生質能源產研成果。海藻生質能源產業已被許多國內外的產研機構認同是最具開創性，也是可解決諸多全球暖化和能源危機的可行方案。

## 國際的研發概況

巴西適合甘蔗生長且勞動力便宜，有利於推動生質酒精產業發展，因此在政府產業政策方面保持長期的支持。然而持續研發提升酒精生產效率的新技術，以降低生產成本，才是巴西生質酒精產業成功的主要原因。

美國以玉米做為生質酒精的原料，在諸多生物技術及酒精脫水技術的發展下，生質酒精產量迅速成長，2005 年產量近 1,500 萬公秉。除了推廣生質酒精之外，美國也重視生質柴油的發展與應用。美國的生質柴油以黃豆為主要原料，2006 年已達到一億四千多萬加侖，顯示美國生質柴油的市場也處於快速成長階段。

美國夏威夷大學的 M.E. Huntly 與 D.G. Raleigh 博士，發展自藻類生產生質柴油的先進技術，且於 2004 年創設 HR BioPetroleum 公司。它是一個以夏威夷為基地的可再生能源技術公司，利用最具生產力的藻類生產生質能源與其他高價值產品，同時開發降低工業界所釋放二氧化碳的處理技術。

美國能源部於 1980 年代就已開始以藻類生產生質柴油的研究工作，並已獲得豐富與完整的成果。惟當時石油價格低廉，主要以微藻類生產的生質燃料(柴油)較不具競爭力。但當原油價格飆漲至每桶 100 美元以上時，以微藻類生產的生質柴油就可能具有

商業上的競爭能力。

德國在生質能源的發展方面，由於地理環境、氣候等因素，較適合種植油菜，而非玉米或甘蔗等醣類作物，因此引導其國內休耕或廢耕的農地種植油菜，利用油菜籽榨油製造生質柴油。此外，德國優異的柴油引擎生產技術，也是其選擇發展生質柴油的原因之一。

在 1998 年，德國政府訂定隨油徵收環境稅的政策，以減緩地球的溫室效應。但對生質柴油採取免徵燃料稅的獎勵措施，使得生質柴油的售價低於石化柴油，促使消費者改用生質柴油。惟自 2006 年 8 月起，德國政府基於財政因素，開始對生質柴油課稅，已對生質柴油市場的發展造成影響。在生產技術尚無法把生產成本降低到市場樂於主動接受的狀況下，生質能源產業必須依賴政府各種鼓勵措施的支持，需要面對因政策變動所產生的機會風險。

許多外國的生質能源公司，如 HR Biopetroleum、Risoe-DTU、Danish National Environmental Research Institute-AU、DONG Energy 等，都以可快速生長之藻類所產之藻油或藻類多醣，做為生質柴油、生質乙醇等的發展選項。

但目前以公司型態進行研發與量產之海藻生質能源產業，多根基於以前多年的藻類油脂之生產研發成果，特別是許多高產油量之海洋微藻。因此對於以藻類多醣做為發酵基質，多思考先經多種多醣水解酵素降解為微生物可代謝利用之簡單醣類，再用可以代謝利用這些簡單醣類之酵母菌和細菌，生產乙醇、氫氣等綠色生質能源。由於對於多種藻類多醣之降解技術目前尚在發展中，可能還需要一段時間之努力，才能觀察到以藻類生質乙醇為

主要生產目標的綠色生質能源公司的發展前景。

## 生產乙醇

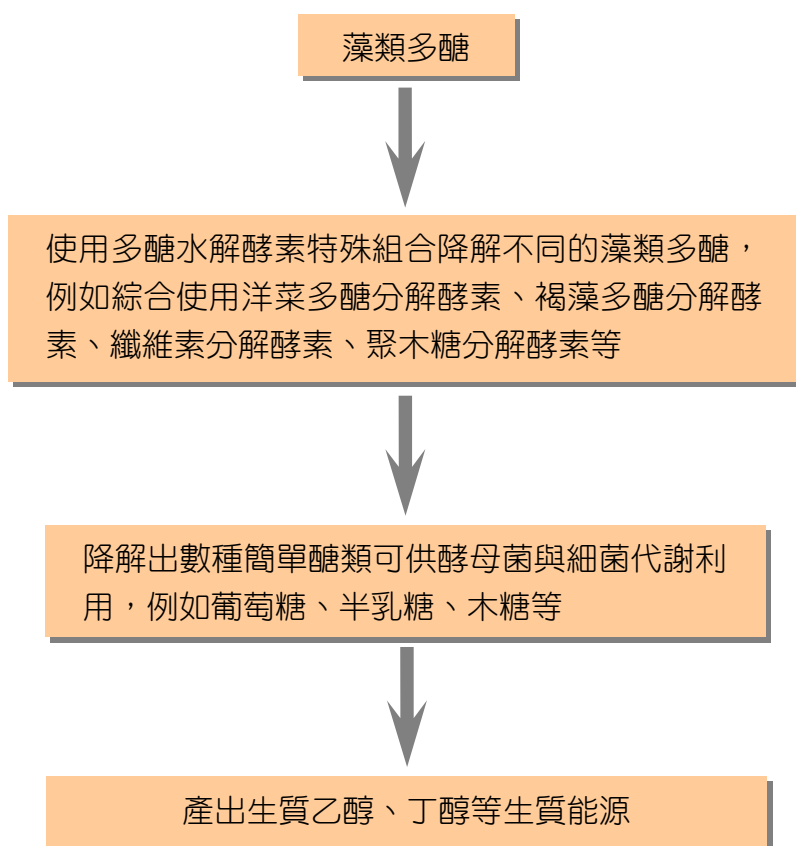
先就日常生活中一般人了解的醣類與糖來做說明。醣類通常是指一類的醣，例如寡醣類、多醣類等，糖則意味著單一的糖，例如葡萄糖或蔗糖。食物中所含有的各種單一的糖，不一定都可以被我們的消化系統分解和代謝利用做為能量或營養物質。其中一些可以被代謝吸收的單一糖與醣類，大多需要酵素水解或轉化後才能被吸收與代謝利用，例如牛乳中的乳糖，需要被乳糖分解酵素分解成半乳糖與葡萄糖。

同樣地，如果要酵母菌吸收與代謝醣類生產乙醇，必須給予酵母菌可以代謝利用的簡單醣類。例如用酵母菌發酵葡萄汁生產葡萄酒時，葡萄汁中的葡萄糖可以被酵母菌直接利用，經由厭氧發酵產生二氧化碳與乙醇。

與葡萄汁不一樣，許多食用穀物如米、小麥、高粱、玉米等的多醣主要是澱粉。東方(例如米酒)與西方(例如啤酒)的釀酒方法，分別是利用製麴(註 1)和麥子發芽(註 2)的方式，取得多種可以降解澱粉多醣的澱粉分解酵素，然後多醣型態的澱粉才會被降解成為許多大小不等的寡醣(例如雙糖中的麥芽糖)、單糖(例如葡萄糖)等。這些結構簡單的單一醣類，才是酵母菌可以代謝利用與發酵產生乙醇的醣類基礎物質。

不同來源的藻類多醣的單糖組成與相互間的鍵結多不一致，必須使用多種多醣水解酵素的特殊組合來降解不同的藻類多醣，經常綜合使用洋菜多醣分解酵素、褐藻多醣分解酵素、纖維素分

解酵素、聚木糖分解酵素等。藉由適當的反應，多醣被酵素降解為數種簡單醣，例如葡萄糖、半乳糖、木糖等可供酵母菌與細菌代謝利用，產出生質乙醇、丁醇等生質能源。



自藻類多醣生產可再生生質能源的主要製程

### 生質乙醇產量

比較藻類與陸生植物生長速率時，就可展現前者做為未來生質能源基礎材料的優勢。例如每公頃土地每年可產 65 噸甘蔗，每公噸甘蔗可產生 80 公升乙醇，每年每公頃土地就可生產 5,200 公

升生質乙醇。其他較常見植物的每年每公頃土地的生質乙醇生產效率，分別是甘藷 4,500 公升、甜菜 4,500 公升、甜高粱 6,000 公升、玉米 3,000 公升、木薯 6,000 公升、乾草(纖維素) 3,100 公升，以及木材(纖維素) 3,500 公升。

至於海藻主要組成中的纖維素與海藻多醣，理論上都可以利用多種不同的水解酵素，降解為微生物可以利用於發酵生產乙醇的基礎物質。由於每公頃海洋面積每年可產 750 噸(乾重 50 噸)的海藻，每公噸乾燥海藻可產生 320 公升乙醇，因此每年每公頃海洋面積可生產 16,000 公升生質乙醇。

由此可知海藻的競爭優勢在於生長快速，如做為我國未來生質能源發展規畫中的主要發展目標，預估台灣本島與澎湖等離島海岸都向海洋擴展 1 公里形成大型海藻養殖區，則約有 1,000 平方公里，約相當於 100,000 公頃的海藻養殖平面區域。依上述生質乙醇的產量推估，每年可以生產  $1.6 \times 10^9$  公升生質乙醇，相當於  $1.6 \times 10^6$  公秉生質乙醇。

若再加計可出售的二氧化碳配額，則上述海藻養殖區域可以獲得  $7.5 \times 10^7$  噸海藻(溼重)。當每 1 噸海藻(溼重計)可以出售 2 噸的二氧化碳配額，且若每噸二氧化碳配額可售得新台幣 800 元時，則每年約可產生新台幣  $1.2 \times 10^{11}$  元收入的經濟效益。

### 醣類組成與含量

大型海藻如龍鬚菜、馬尾藻、石蓴等藻體細胞中所產生的多醣類，是其細胞中除了水分以外最多的成分，在多數的大型藻中約占去除水分後乾重的 50% 以上。一般海藻的其餘成分就含量而



言，依序是蛋白質、脂肪、纖維素、礦物質等。

屬於紅藻的石花菜，乾重中有 12.6%的纖維素與 64.4%的海藻多醣，若都能被適當的水解酵素降解為酵母菌等微生物可代謝利用及發酵成乙醇的發酵基礎物質，則理論上的乙醇生產量可達到乾重的 38.4%，即每 100 克乾重產生  $(12.6 \text{ g} + 64.4 \text{ g}) \times 51.2\% = 38.4 \text{ g}$  乙醇。

石花菜中主要的單醣，包括 3,6-anhydrogalactose (24.7%)與半乳糖(64.6%)。也屬於紅藻的龍鬚菜，乾重中有 7.0%的纖維素與 63.0%的海藻多醣，理論上的乙醇生產量可達到乾重的 35.8%。龍鬚菜中主要的單醣，包括 3,6-anhydrogalactose (36.1%)、半乳糖(63.9%)與葡萄糖(1.5%)。

屬於綠藻的青海菜，乾重中有 8.9%的纖維素與 65.3%的海藻多醣，理論上的乙醇生產量可達到乾重的 38.0%，即每 100 克乾重產生  $(8.9 \text{ g} + 65.3 \text{ g}) \times 51.2\% = 38.0 \text{ g}$  乙醇。青海菜中主要的單醣，包括鼠李糖(rhamnose, 53.0%)、木糖(23.2%)、半乳糖(19.3%)及葡萄糖(4.6%)。

同屬於綠藻的石蓴，乾重中有 55.2%的海藻多醣，理論上的乙醇生產量可達到乾重的 28.3%。由於未計入其纖維素含量，因此所得的乙醇產率略低。石蓴中主要的單醣，包括鼠李糖(45.0%)、木糖(12.0%)與葡萄糖(6.4%)。

屬於褐藻的馬尾藻，乾重中有 6.0%的纖維素與 57.4%的海藻多醣，理論上的乙醇生產量可達到乾重的 32.5%。馬尾藻中主要的單醣，包括清涼茶糖(sorbose, 5.1%)、木糖(11.9%)、異葡萄糖(idose, 11.0%)、甘露糖(mannose, 5.5%)與半乳糖(24.1%)。

至於屬於微藻類的螺旋藻，乾重中所含的藻類多醣是 15.0~23.0% (平均值是 19%)，經使用理論值換算的乙醇生產量可達到乾重的 9.7%。螺旋藻中主要的單醣，包括鼠李糖(25.5%)、甘露糖(9.2%)、果糖(1.4%)、半乳糖(46.4%)及葡萄糖(6.8%)。

就以上蒐集到的藻類多醣資訊，可以推估未來藻類多醣水解技術與微生物發酵水解所得簡單醣類，產生生質乙醇的技術都成熟後，紅藻、褐藻、綠藻等大型藻類約可生產其乾重的 30~38% 的生質乙醇。剩餘的藻類殘渣可以做為保健食品、美容化妝品、動物飼料補充物等。

## 國外發展案例

台灣水產試驗研究所東港生技研究中心研究員蘇惠美博士在《科學發展》第 433 期的報導中，述及北歐的丹麥採用近岸海水中快速生長的石蓴(屬於大型藻中的綠藻)做為海藻乙醇的生產原料，而且在 2007 至 2011 年的生質能源計畫中，預定丹麥海域的年產量可以達到 10 萬噸，未來應該有更大的生質乙醇發展機會。

蘇博士在那篇報導中也提到，日本國內的「太陽神與海神計畫」規劃在日本海沿岸養殖 1 萬平方公里(100 萬公頃)的馬尾藻，預計每年可以用所產馬尾藻的海藻多醣產出 2,000 萬公秉(每公秉相當於 1,000 公升)生質乙醇。另外也提到東京海洋大學的 Notoya 教授告知，已分別完成自石蓴多醣產製乙醇，以及尋獲可降解馬尾藻所產岩藻聚醣的水解酵素。Notoya 教授還開發針對馬尾藻所產的另一種藻類多醣褐藻酸的分解技術，這部分的未來研究方向，是以降解所得的簡單醣類產物生產氫氣。

## 技術待突破之處

在實驗室中嘗試以單一的洋菜分解酵素水解洋菜多醣 24 小時後，水解產物(簡單醣類)的產率僅 0.6%。而在使用來自 2 株海洋細菌含有 16 個洋菜分解酵素的粗酵素液，水解洋菜多醣 24 小時後，就可得到大於 10%的簡單醣類水解產物。經以洋菜多醣誘導這 2 株海洋細菌生產特異性的分解酵素組合物，以及配合其他降解條件的運用，對於龍鬚菜熱萃多醣可以達成約 55%的簡單醣類的水解效率。

依循上述藻類多醣生產生質乙醇技術的發展歷程，筆者的實驗室已可自 10 公斤的乾燥龍鬚菜生產得到約 0.96 公升乙醇(9.6%產率)。現階段的研發目標，是自 10 公斤的乾燥龍鬚菜生產約 1.5 公升乙醇(15%產率)，最終的研發目標，是自乾燥龍鬚菜生產 30%的生質乙醇(30%產率)。

期待台灣地區產官學研各界能合作，開發適於本土發展的大型藻類如龍鬚菜、馬尾藻、石蓴等的技術。例如採用不同來源的 6~16 個洋菜分解酵素或褐藻膠分解酵素，再搭配已研究多年的纖維素分解酵素，把纖維素降解成葡萄糖，以及用微生物生產生質乙醇等，應可大幅提升自海藻多醣生產生質乙醇的產率，並降低單位生產成本。

可行的策略是配合水試所與各地區漁會及政府機構，充分開發在海洋水域養殖各種有應用需求與經濟價值的藻類繁養殖技術，以期未來所需的藻類生質能源的生產原料可以不虞匱乏。相信日後便可與世界先進的藻類生質能源發展國家如美國、日本、丹麥等較勁，產業的發展也指日可待。

註 1：製麴—把黴菌的孢子灑在蒸熟的米飯上，黴菌孢子在萌發的過程中為了吸收米飯中的營養成分，必須產生許多可以分解澱粉的多種澱粉分解酵素並釋放到胞外，把環境中的澱粉等巨大營養物質降解成為可以吸收利用的簡單小分子營養基質。

註 2：麥子發芽—把麥子置於適合發芽的環境中，在發芽的過程中為了吸收種籽裡的澱粉等營養物質，必須產生與分泌多種澱粉分解酵素到細胞外，把環境中的澱粉等巨大營養物質降解成為可以吸收利用的簡單小分子營養基質。