# 藻類生質能源－回顧與前瞻

黃俊翰、陳紫婉、蘇惠美
水產試驗所東港生技研究中心

## 藻類生質能源研究回顧

藻類生長快速，其光合作用效率約 6－8%，高於陸生植物的 1.8－2.2% (Aresta et al., 2005)，此意味著藻類能更有效率的吸收 $CO_2$。1970 年代能源危機爆發時，美國曾嘗試以微細藻提煉生質柴油，美國能源局推動一項以水生植物生質作為運輸替代能源的開發計畫，稱為 Aquatic Species Program (ASP)，之後近 20 年的研究歷程中，ASP 將研究重心從產氫逐漸轉移至生質柴油開發，並從諸多水生植物中選擇微藻作為開發對象。微藻是指無法直接用肉眼看見，行浮游生活的微小藻類，它們對光源的利用效率高，成長快速，對 $CO_2$ 及營養物質利用率高；更重要的是，有些微藻乾重含有 60%三酸甘油脂，其成分與陸生油脂作物的成分相同，意即微藻生質柴油可作為陸作生質柴油的替代品。歷經多年研究，ASP 篩選出 300 種適合提煉生質柴油的微藻，其中以綠藻及矽藻為主。從藻類生理背景探討，為促使微藻產生豐富的油脂，必需控制其生長環境，只有在極端的溫度、高鹼、高鹽或特殊營養鹽條件下才能達成，但這樣的條件卻使得微藻生長減緩。折衷的作法是分二階段培養，先將微藻培養在快速生長的條件下，待達到一定的生物量時，再改變環境以刺激油脂的累積。然而此計畫後來因生產成本高於石油，加上當時美國政府集中預算在生質酒精的開發而中止 (NREL, 1998)。

同樣肇因於能源危機，1970 年代另有一批美國科學家，希望藉廣大的海洋培育大型海藻作為天然氣 (甲烷) 的來源。簡單的說，他們的構想是要建立「海藻牧場」。海洋幅員遼闊，既不會佔用陸地面積，又可充分利用陽光，選擇離岸較遠的海域建立大型的養殖平台，同時抽取營養鹽含量較高的深層海水來灌溉海藻。科學家們篩選出褐藻中的「巨藻」作為培育對象，原本希望逐步放大到 4 萬公頃的操作規模，但很不幸的，這項研究始終面臨平台結構的缺失、暴風雨的摧毀、航行船隻的破壞等嚴重問題，直到 1980 年，才因新的平台結構，及轉移實驗地點至近岸海域而有成果。前後歷經近 10 年的研究，歸納出海面養殖藻類的三項重點：(1)海水的營養鹽含量不足，可用湧昇海水以提供營養、提昇產量；(2)附生生物附著及病害減損藻類生物量，若能提供海藻充足養分，則海藻可因抵抗力提昇而降低受害程度；(3)雖然食藻魚類會攝食海藻，但從另一個角度看，漁業資源亦因此而豐富，可視為海藻養殖的另一項收穫 (Brid and Benson, 1987)。

## 藻類生質能源研究現況

### 一、微藻－生質柴油

了解並控制藻類生長機制，才可能獲得最大的產量，並且有效結合現有資源，創造新的生產模式，才能確保生質能源的經濟效益。2001 年，美國麻省理工學院科學家創立「Greenfuel Technologies」公司，利用天然氣發電廠排放的 $CO_2$ 培養藻類，萃取藻油製成生質柴油，剩餘的蛋白質成分則製成飼料，用意是減少 $CO_2$ 廢氣，並且增加能源生產的收益，但去年 (2007) 因為成本增加與技術問題，運作中的藻類培養系統被迫暫時停止 (National Geographic Magazine, 2007)，顯示這項技術仍有必須改進的空間。成立於 2003 年的以色列 Seambiotic 公司，在 2007 年初發表一項技術，是利用發電廠廢氣中的 $CO_2$，經冷卻及過濾後供應藻類作為生長碳源，生產微細藻類用於生質柴油及不飽和脂肪酸 (EPA、DHA) 的原料；據估算，每公斤藻類生產成本僅 0.5 美元，而每 5 kg 的藻類則可產生 1 公升的生物燃料。許多國家如法國、西班牙、荷蘭都有類似的公司相繼成立，然而目前的發展瓶頸，仍在於生產成本過高，主因是培養過程容易感染而損失生物量、高透光材質的培養系統造價昂貴，微藻收穫設備如離心機所費不貲，以及收穫時間長等，導致微藻生質柴油的生產成本居高不下，所以目前仍無法與化石燃料競爭。

## 二、海藻－生質酒精、甲烷

傳統的生質酒精原料為玉米澱粉與蔗糖，成分單一且易行糖化及醱酵生產酒精，被稱為第一代生質酒精；以廢稻桿、甘蔗渣或林業廢棄物等木質纖維原料醱酵而生產的酒精，則被稱為第二代生質酒精；大型海藻含有豐富的多醣及纖維素成分，極有可能成為第三代生質酒精。不少國家針對大型海藻進行生質能源的開發研究，日本東京瓦斯公司鑑於許多沿海地區飽受大量的腐敗海藻所苦，2002 年嘗試採收沖上海岸的石蓴 (*Ulva* sp.)，經碾碎及醱酵過程生產甲烷發電，同時改善能源與環境問題，初步成果是每噸石蓴能產生 17 公升甲烷，每小時可製造 10 KW 電力，可作為廠房辦公室之照明用電，2007 將進入商業運轉測試。另一方面，日本東京大學 2005 年與多所機構合作，提出「太陽神與海神計畫」，希望收集隨著洋流移動的漂浮性馬尾藻，並培養馬尾藻作為生產酒精的原料，同時達到淨化海域的目的 (Notoya, 2007)。丹麥為了減少對進口能源的依賴，選擇生長快速、可適應優養水域的石蓴作為海藻酒精的原料，他們估算每公頃海域能生產 2－5 百噸石蓴，每年可有近 10 萬噸的酒精產量，該國將於 2007－2011 年進行海岸栽培石蓴的研究，但仍有生產成本過高的問題。荷蘭欲藉由離岸風能場地提供電力，在海岸栽培海藻作為生質原料，並同時養殖其他經濟水產物如牡蠣，以提高整體的利用率與產值。

## 三、水試所的能源海藻研究

台灣近年來也開始注意到藻類生質能的潛力，無論是生質柴油或生質酒精，目前已有不少單位開始都著手進行相關技術的研發，許多民間業者也展現了高度的興趣；基於肩負海洋資源利用與開發的重任，水試所亦積極投入海藻生質酒精的開發，選定資源量豐富的龍鬚菜及馬尾藻兩種大型海藻進行研究。龍鬚菜是提煉洋菜的重要原料，在台灣已有多年的陸上養殖歷史，其生產技術相

當成熟，全盛時期年產量達 47 噸鮮重/公頃；馬尾藻含有高經濟價值的褐藻膠成分，據本研究中心調查發現，在南部地區野生馬尾藻的生物量，可高達 70 噸鮮重/公頃。洋菜及褐藻膠在產業上早有其經濟地位，但海藻剩餘的纖維素成分用途則尚待開發。本所水產加工組嘗試將這些纖維成分降解為單糖，並轉化為酒精，目前已知經過適當的酸前處理及水解過程，能提升總醣產率。惟從數據粗估，若僅以海藻纖維素成分製成酒精，為滿足政府於 2011 年至少 100 萬公秉的生質酒精需求 (全國能源會議，2005)，則至少需要 7800 萬噸的馬尾藻，或 5100 百萬噸的龍鬚菜原料，數量相當驚人。

由於台灣尚未有馬尾藻的養殖前例，因此本研究中心於 2007 年開始積極進行馬尾藻採苗、培苗及海面養殖試驗，探討其人工養殖的可行性。3 月份從小琉球、恆春等地採回成熟之馬尾藻株，於室內收集其釋放之胚 (已受精且正在發育中的細胞，圖 1)。經過 4 批次的採收，分別採得 1－540 萬顆不等之數量，除保留部分於培養皿中觀察外，其餘均使其附著於附苗棉繩上，以方便日後移植海面。在胚發育 1 個月後 (苗長約 5 mm)，將附苗繩移至屏東地區的海上箱網區，吊掛於箱網上培養，並同時吊掛成熟馬尾藻及附著基質嘗試野外採苗 (圖 2)。於 5 月觀察發現，附苗設施遭外來附生生物 (海綿、貝類、雜藻) 及泥沙大量覆蓋，且原本成熟之馬尾藻株凋萎脫落嚴重，所幸附苗繩上的馬尾藻苗發育良好，長約 8－10 mm (圖 3)，雖然已去除部分附著生物，但於 7 月時，附著生物的漫延更加嚴重，馬尾藻苗也幾乎被完全覆

圖 1　馬尾藻的胚細胞

圖 2　馬尾藻海面吊掛作業(上)；馬尾藻近照(下)

圖 3　附苗繩上的馬尾藻幼苗

蓋導致生長緩慢。在 8 月颱風過境後，附苗設施全部被巨浪沖走；相對於野外培育的馬尾藻苗，培養皿培養的胚則成長超過 10 mm，但容易因雜藻附著而死亡。面對能源海藻開發的課題，這些結果值得深入討論：(1)海面養殖易導致附生生物的污染，尤其愈接近夏季，附生生物的危害愈劇，因此定期檢視及清理是必要的，但成本會因此提高；(2)即使以錨定穩固之箱網作保護，附苗設施仍易因颱風而損失。颱風天災是台灣在海藻養殖上的先天劣勢，因此養殖地點需選擇內灣或潟湖等較為合適，只是這類地點並不普遍，要達到大面積栽培的目標，有一定的困難；(3)馬尾藻的季節消長非常明顯，4－5 月開始凋萎，一直到 12 月左右才會再度增生，採收期因而受到限制。不過馬尾藻增生速度很快，從 12 月到隔年 4 月，生物量可增加 10 倍之多，這樣的生長週期，是否能維持原料的供需平衡，則需詳細評估。因此綜合所述，可終年生長的龍鬚菜及生長快速的石蓴，應更具備成為能源海藻的潛力。

## 藻類生質能源的未來

藻類生質能源能否蓬勃發展，取決於油價與藻類生產及轉化成本，前者在未來勢必高漲，但後者的成本可能因技術瓶頸的突破而降低。Greenfuel 公司表示，藻類燃料要行得通，就必須比石化柴油便宜 (National Geographic Magazine, 2007)。許多人誤解生質能源是「無碳能源」，事實上以整個能源的「生命週期」為觀點，只能稱之為「碳平衡能源」，因為其生產過程亦需要能源 (能量)的投入，當產出的能量等於或大於所投入的能量時，此種能源才有效益可言。目前有科學家利用電腦程式，計算生產藻類生質能源過程中的淨能輸出/入量，以追求獲得最大的生產效益：將藻類吸收 $CO_2$、施肥、栽培及採收方式、生質轉化等過程所需之能量予以參數化，再輸入電腦程式計算生產淨能量。較多的淨能量輸出，代表此生質能源的產出較高；而能量輸入低，代表生產成本較低。由初步的試驗研究顯示，栽培大型海藻如硬毛藻 (*Chaetomorpha linum*) 及翼枝菜 (*Petrocladiella capillacea*) 作為生質原料，將比微藻產出較多的淨能量；另外，利用排放廢水作為藻類營養來源，可節省較多的能量輸入 (Aresta et al., 2005)。前述利用優養化水域，也是節省能量輸入的方法。所以，找出藻類「生命週期」中最耗能的階段並予以改善，才能有效降低成本。其他的具體作法，包括利用海上風能系統提供採收及栽培的電力、回收含蛋白質的藻體製成飼料等副產品，甚至有人認為，收穫漂上岸的海藻應視為與栽培海藻同等重要 (Kraan, 2007)，可以節省養殖的成本。

## 結語

由前述討論可以瞭解，「成本」及「碳平衡」是藻類生質能源發展的最大關鍵，因此，在數年之內，這種能源可能還無法真正達到效益，吾人不能抱持過於美好的想像，但面對未來無石油可用的事實，推動類似的研發工作，有其絕對正面的意義，並且同時激發我們對於新式能源發展的想像及創意。