

# 微藻燃油風潮再起，美夢如何成真?!

蘇惠美

水產試驗所東港生技研究中心

## 前言

石油價格飆漲，作為燃料作物之玉米大豆等原物料價格，也隨之水漲船高，進而被指責為導致全球糧荒之罪魁禍首。在水域生長的藻類不與糧食搶耕地，又可吸收 CO<sub>2</sub>，在長達 18 年的水生生物計畫 (Aquatic Species Program, ASP 1978–1996 美國國家再生能源研究所 NREL) 中止後 10 年的 2007 年，美國在能源安全與自主方案中，重提利用藻類作為生質燃油的研究，於是從五角大廈到明尼蘇達州，甚至到紐西蘭，政府與私人公司紛紛興起「微藻－生質燃油」的風潮。迄今，不僅研究單位，許多企業也紛紛投入研發藻類燃料，富油的微藻及富含醣類的海藻，可能成為新一代生質燃料的原料。決定燃料藻產業發展的關鍵因素，應是產品價格與生產成本。

NREL 水生生物計畫結束報告中說明，「即使用最簡單的開放式養殖池養藻，仍因投資成本昂貴而結束計畫」，本人由衷認同，因此對於油藻產業的發展持保守看法。然而現今油價高漲至每桶 143 美元，本所同仁、國內各大學、工研院、中油、台糖研究所，以及生技公司等，不斷地問起微藻燃油之潛力。於是，再度研讀 NREL 18 年計畫的結束報告，檢視計畫成果，探求 2006 年重啟微藻

研究計畫的重點與近況，蒐集油藻產業資訊，瞭解在國外，特別是美國油藻公司是如何推動「微藻－生質燃油」產業。現在已覺察到，能源安全與自主性，為世界各國發展的趨勢，未來燃料原必須本土化。生質燃料之發展，需要由試驗單位、研究機構與公司企業共同合作開創，因而撰成此文，作為產官學各界研發微藻燃油之參考。

## 美國國家再生能源研究所舊計畫與新方向

水生生物計畫結束報告中，建議研發基本原則為：(1)理想藻種必須是優勢種，有最高的生質產量，能合成大量油脂，容易收穫；(2)微藻柴油生產系統必須是一個太陽能轉換器，操作效率最高，生產成本最低，因此，工程設計不要太複雜，養殖設施要簡易。短中期要有經濟效益，最好與廢水處理作整合養殖，以弭補無法達到最高產量之損失。建議未來之研發方向為：(1)重視更多生物學之研究、降低野外試驗之需求；(2)研發先進的植物生物技術；(3)篩選本土優勢藻種、研發最適生長條件；(4)最大化光合作用效率；(5)以技術導向設定合理的微藻燃油生產目標；(6)短期先應用較成熟的養藻技術，並考慮土地、水利及氣候資源。



美國 2006 年重啟研究計畫的重點為：應用分析技術解明微藻之光合作用機制，並生產高級運輸燃油及基改藻種用於氫氣之生產。

### 一、生質精煉 (Biorefinery)

2006 年 NREL 研究彙報揭露三項技術產品重獲青睞：熱裂解製油、液化合成氣、微藻燃油。應用石油煉製原理，在高溫無氧下，裂解纖維素，然後氣化或合成為液體及氣體燃料，此生質精煉產業將成為明日之星。生質精煉原料來自農作、林產與水產養殖，轉化為燃料、化學品及其他產品，顯示水產養殖可能提供新一代生質燃料的原料。

NREL 期望應用 3 項分生技術利器，在生質柴油領域發展出更關鍵的技術：(1)X-ray 儀器解析酵素之立體結構；(2)基因體學辨識表現基因；(3)蛋白質體學辨識生物體生長代謝過程產生的各種小分子，以促進生物酵素發展之速度。

### 二、噴射機燃油

2007 年 10 月 NREL 與能源公司 Chevron 簽約，共同研發藻類作為第二代運輸燃料原料，生產高品質燃油，如噴射燃油。所長 Dan Arvizu 說：NREL 執行水生生物計畫近 20 年，研究人員有先進的技術及經驗，能快速提升關鍵藻種的產量與產率。Chevron 能源公司有知識及技術，可將微藻燃油轉成燃料，並加以行銷。Chevron 從事運輸用原油與天然氣之精煉、行銷、運送，以及其他能源產品與服務，與 180 個國家有生意往來，2007—2009 年將投資 25 億美元，研發替代能源、再生能源技術與能源效率服務。Chevron 相信非食物原料，如微藻及纖維素等，是生質燃

料產業擴大規模最具可行性的原料。

### 三、氫燃料

氫氣燃燒不會釋放  $\text{CO}_2$ ，且其能值高達 231 BTU/mol (244 kJ/mol)，每單位重量產生之熱能值為 34300 kcal/kg，約為甲烷的 2.5 倍，汽油的 3 倍，因此，專家預測在未來的數十年內，氫氣將可能會繼煤炭及石油之後，掀起第三次能源革命，成為下一波能源新寵兒 (黃，2008)。

NREL 新完成的研究基地共有 41 個研究所，致力於發展最新且更有效的方法，要將廢棄物轉化為有用的燃料、電力與化學物品。其中微藻生技研究所從遺傳上加強藻體的油脂含量，希望能在 2010 年前，使微藻燃油更具經濟利益外，也將以光反應器測試藍藻與綠藻產氫之能力。目標專注於藻類、光合細菌及暗發酵細菌的生化、生理及分子生物學研究，以瞭解並操控光合作用與暗發酵過程，進而研發生產氫燃料、有價值的副產品 (還原性碳) 等新方法。研究分為 4 組：(1) 光合作用的基礎研究；(2) 產氫酵素的基礎研究；(3) 微生物直接轉化產氫；(4) 發酵產氫。

光合作用產氫，乃由綠藻或藍藻類藉由光能將水分解產生氫氣，此過程最大的挑戰為產氫酵素對氧敏感，當綠藻類進行光合作用產生氧氣後，很快地就停止產氫了。為克服此問題，研究人員將嘗試多種處理方法：(1) 利用營養鹽限制，將藻類產氧與產氫時間加以分隔；(2) 將耐氧細菌的產氫酵素移入藍藻，使藍藻可在微量氧環境產氫；(3) 將萊茵衣藻 (*Chlamydomonas reinhardtii*) 的產氫酵素，以基因工程方法，移除其對氧敏感的不利特性。

## 微藻生產

2007 年自然雜誌「藻類風潮再現」報導，1996 年美國中止執行 18 年的水生生物計畫遭遇的最大障礙為：難以確實將實驗室有利於微藻增殖的條件，在戶外大規模量產重現。另一方面，當油含量增加時，如油含量 >50% 乾重，會因為生質量下降，導致最終之總生產油量降低。再者，許多認為油藻具有潛力的計畫，是立基於錯誤的假設—以為微藻的生產量一年四季都一樣高。事實上，微藻生產有許多不利因素需要克服：太強的陽光會殺死微藻，養殖的溫度要穩定，藻濃度太高會抑制生長，產生的氧必須持續從水中移除，太強的 CO<sub>2</sub> 流可能刺破藻細胞，開放培養會受蒸發及下雨影響，致使鹽度與 pH 改變，最嚴重且一直未解決的，則是本地野生種常較篩選的養殖種長得更好。

### 一、油藻公司

麻州理工學院化工教授 Isaac Berzin 2001 年創立 GreenFuel 公司，2004 募款 2.1 百萬美元，在 MIT 屋頂以天然氣發電廠煙氣之 CO<sub>2</sub> 生產微藻，得到 82% CO<sub>2</sub> 吸收率的效果。2006 再募得 17.8 百萬美元，請能源工業老兵 Cary Bullock 擔任 CEO，在 2 家發電廠進行先導計畫，同年 11 月宣稱已可生產酒精及柴油。2007 年初擴大 100 倍規模，在極乾燥的 Sonoran 沙漠 2000 畝土地上，利用亞利桑那州天然氣公司排出的廢氣 (含 CO<sub>2</sub>)，注入微藻培養設施促進藻類成長，因為成本不斷增加及技術問題，同年 7 月暫時關閉紅鷹生物反應器 (國家地理雜誌，2007)。新任 CEO Metcalfe 是網路大亨，2008 年宣稱要發

展較簡單、較便宜的新反應器。

加州舊金山 Solazyme 創辦人 Wolfson，駕駛以微藻燃油為燃料的賓士 320 (2006 年出廠) 汽車進入會場，此微藻燃油來自工業發酵槽生產的微藻，產量為數千加侖，正努力於降低生產成本，相信 2 至 3 年內將可達到經濟效益 (Biodiesel, 2008a)。

PetroSun's 公司計畫 2008 年在路易斯安那州、德州、亞利桑那州、墨西哥及中美洲，建立藻農場及微藻燃油萃取廠。德州的藻農場將於 4 月開始運作，利用德州 South Padre Island 之 94 座 5 畝及 63 座 10 畝的養蝦池，共 1100 畝 (總面積 1,831 畝) 生產微藻，估計年產量為 2.1 千萬公升微藻燃油。

荷蘭殼牌石油公司與美國夏威夷 HR Biopetroleum 組成的 Cellana 公司，2008 年將在夏威夷大島海邊靠近既有之藻類公司，建立先導規模養殖池生產油藻 (Biodiesel, 2008b)。Cellana 公司成立於 2004，由一群海洋科學家組成，將採用開放式養殖池，自動控制 pH 值及營養鹽添加，使用時時採收與清洗的管理策略，篩選本土高產量、高油藻種養殖，以降低生產成本和克服野生藻種感染的問題。

其他計畫結合水產養殖養藻的公司，包括 Kent SeaTech (San Diego)、A2BE Carbon Capture (Boulder)、Aurora (Berkeley) 及 LiveFuels (Menlo Park) 等。設立 2 年的 Aurora 公司，正在加州柏克萊大學實驗室養殖高油脂微藻。LiveFuels 公司至 2007 年已花費 1 千萬美元，將再投資 3.5 千萬美元，預計 2010 年產製柴油前驅物之成本可降至每加侖 1 美元，但不知能否達到目標。



計畫投資 5–15 百萬美元，建立小型商業生產系統的 Solix 公司執行長 D. Henson 警告：不要太誇大技術，生質燃料大有可能完全失敗。

## 二、產油量

評估產油量時，大豆約 450 公升/公頃/年 (l/ha/y)，油菜 1200 l/ha/y，油椰 6000 l/ha/y，預期微藻 98,500 l/ha/y，高出陸上作物數倍。微藻產油量乃依照含油量 50%、最高日產量 50 g/m<sup>2</sup>/d，推估可生產生質柴油 100560 l/ha/y 換算而得。實際上，新墨西哥州戶外 1000 m<sup>2</sup> 的養藻試驗，最高日生產量雖曾達到計畫目標，但因養殖地點溫度低，整體產量僅約 10 g/m<sup>2</sup>/d。GreenFuels 以 45,000 l/ha/y 為期望值，PetroSun 在亞歷桑那州先驅農場測試值為 47,500–76,000 l/ha/y。Valcent Products 在德州溫室以塑膠袋養藻，產量為 48,000 l/ha/y，預估未來將可高於 150,000 l/ha/y (CNN)，理論上，將生質 100% 轉換為柴油之最高值達 262,000 l/ha/y，但實務上不可能。

## 三、藻種

美國 NREL 水生生物計畫執行期間 (1980–1987 年)，在其內陸淺水鹽湖、沿岸海域及夏威夷，篩選具有較廣溫及耐鹽性的藻種，總共收集 3,000 種以上，計畫結束時約有 300 種活體保存，其中以綠藻類與矽藻類居多。從生長速率、油脂質含量以及對環境的忍受度評估，沒有一株藻種符合期望值 (180 t/ha/y)，亦即就產油而言，沒有一株藻種是最好的。而戶外開放池生產量最高的藻種，卻是當地的野生種。事實上，可商業生產的藻種，是具有特殊的成長條件。例如螺

旋藻嗜鹼液，杜氏藻要高鹽，而商業生產之小球藻則是選定的藻株，需勤接種並收穫，否則產量不穩定，但也因此使得操作成本增加。

本中心收集的 45 株微藻，在相同的實驗室條件養殖，有 11 株油含量達 20% 以上，從藻產量 (g/l) 與油脂量 (%) 計算之每公升油脂生產率，有 5 株藻較高，為 0.09–0.10 g/l，分別為擬球藻 *Nannochloropsis* 與等鞭金藻 *Isochrysis* 屬，其近似種 *N. atomus* 在美國水生生物計畫中，產量為 24.5 g/m<sup>2</sup>/d，油含量 16%，*I. galbana* 產量稍高，為 28.1 g/m<sup>2</sup>/d，油含量 22% (如表)。等鞭金藻類富含 DHA，但對溫度敏感且易被食藻生物吃掉，在戶外穩定生長較困難。擬球藻在本中心戶外養殖多年，可適應高溫 (35°C)，半連續式培養可維持數個月。

若成長快速的藻種其產油量不高，是否要進行基因改造呢？荷蘭殼牌 (2008 年開始)、法國 INRIA (2007 年開始的 3 年生質能計畫) 均表明藻種非基改型。

## 四、養殖地點—溫度、光線、水

微藻燃油產業成功關鍵在於降低生產成本，有高產量、高油含量的微藻是第一要件，接著需要足夠的陽光與全年較高的水溫，還要有廉價的大規模土地。因此，有沙漠地區的以色列、澳洲以及亞熱帶的台灣、越南是商業微藻主要產地。美國 80 年代水生生物計畫及 21 世紀的微藻燃油公司選擇在亞利桑那州、科羅拉多州、德州、加州及夏威夷養藻；在新墨西哥州戶外養藻的地點溫度低，使整體產量僅為最高產量的五分之一。培養不穩定是最大問題，特別是溫度變動的春

季，平均產量僅 7 g/m<sup>2</sup>/d；相對地，在 7-10 月產量為 18 g/m<sup>2</sup>/d，到 11 月時降為 5-10 g/m<sup>2</sup>/d，冬天僅剩 3 g/m<sup>2</sup>/d。

### 五、生產系統

養藻的另一挑戰，是達到具經濟利益的生產系統。無論哪種養殖設施，僅在水層表面數公分的藻體，可以吸收到充足光照，因此直徑 1.2 cm 會隨光傾斜的密閉管有最大的產量 (如表)。密閉光反應器較能克服光照不足與雜藻感染的問題，但設備昂貴。所以在以色列，利用密閉玻璃管養殖高價 (8000 美元/kg) 紅球藻，而以開放渠道池，養殖售價 1/4 的杜氏藻。近來，雜誌報導的微藻燃油公司中，以密閉光反應器養藻的 4 家：GreenFuel、Valcent Products、OTEC 及 Solix，採開放池的 3 家：PetroSun、HR Biopetroleum

及 LiveFuel。使用密閉光反應器，比較能有效地吸收 CO<sub>2</sub>，除可促進藻類成長外，並有減少碳稅之利得。

### 結語

台灣有商業微藻及水產養殖業，有 CO<sub>2</sub> 排放量高的發電廠、煉鋼廠、石化廠等，水試所有微藻種原庫及養藻技術，如何結合相關技術與產業，共同合作開創微藻燃油，需有更精進微藻生物技術的研發與先驅試驗場，這些需要更多具備生物、化工及電腦環控等專業知識的人才與團體加入，方能提供更多角度的思考、建立完備的設計規劃，促進台灣微藻燃油產業之研發、進而落實，並且最後美夢成真。

微藻在不同養殖系統的產量

藻種	生產系統	管徑/水深(cm)/面積(m <sup>2</sup> )	地點	產量 (g/m <sup>2</sup> /d)
淡水保健食品 <i>Chlorella</i>	實驗室密閉管狀傾斜	2.5/1.2	新加坡	72.5/130
淡水保健食品 <i>Spirulina</i>	實驗室密閉板式傾斜	10.4/1.3	以色列	33/51
海水餌藻 <i>Chaetoceros</i>	水生生物計畫開放池	0.35-1.4	美國/以色列	30-40
海水餌藻 <i>Isochrysis</i>	水生生物計畫開放池	0.35	以色列	28
海水餌藻 <i>Nannochloropsis</i>	水生生物計畫開放池	0.35	以色列	25
海水餌藻 <i>Cyclotella</i>	水生生物計畫開放池	1.4-3	美國	15-50
海水餌藻 <i>Tetraselmis</i>	水生生物計畫開放池	50-1000	美國	10
野生種	水生生物計畫開放池	1000	美國	3-50