

光生物反應器於微藻培養之研究與產業化的進展

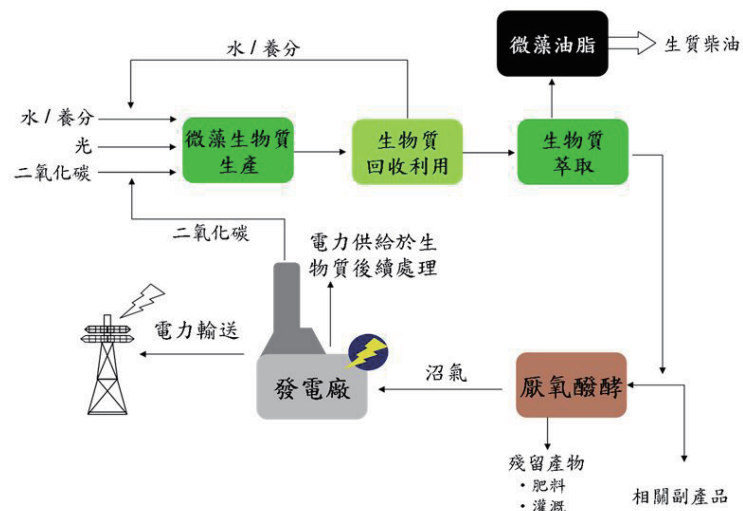
撰文/林志生·邱聖壹

前言

近年來，基於「急遽惡化的全球性溫室效應」、「高漲的國際原油價格」及「大量糧食作物用於生質能源開發導致糧價逐步高升」等多項問題，讓利用微藻 (microalgae) 培養用於二氧化碳 (CO₂) 減量與產製生質能源 (biofuel) 的研究成為全球生物能源注目的焦點。事實上，以藻油 (algal oil) 產製生質柴油 (biodiesel) 的研究，早在前一次全球石油危機爆發時，於美國就已進行過為期達 17 年的系統性研究。在 1978 年，美國能源部國家可再生能源實驗室 (National Renewable Energy Laboratory; NREL) 啟動了一項利用微藻生產生物柴油的 Aquatic Species Program(ASP) 計劃，研究人員於美國各地 (包括夏威夷) 採集、分離到約 3,000 株微藻，並篩選出其中 300 餘株具備潛力的產油藻種。該研究計劃還對其中生長速度快、油含量高的微藻採用開放池系統 (1,000 平方公尺) 進行室外培養試驗。惟於 1998 年時，能源危機解除，石油價格低廉，且以微藻生產生質燃料的成本偏高，不具競爭力，所以終止了 ASP 計畫。現今研究者可由當年 NREL 的計畫結案報告書中，得知 ASP 計劃執行的成果與結論 (Sheehan *et al.*, 1998)。

2007 年，美國能源部 NREL 重啟藻類生質能源的研究工作，和 1978-1998 年代不同的是，此次藻類生質能源的研發工作逐漸演變成全球性的競爭課題，其中產業界的參與催化了這個主題的重要性。

整合性的藻類產業逐漸成形，其構想是在「發電廠」與「污水處理廠」周圍設置藻類養殖池或培養的光生物反應器 (photobioreactor)，將工廠排放出的 CO₂ 與可再利用水源導入池中或反應器中，不僅可以減少工業界的 CO₂ 排放量、再利用水資源 (甚至於是污水處理)，又可透過藻類的光合作用將之轉化成生物質 (biomass)，進而再轉化成生質能源，以達到符合環保、減碳與水資源循環再利用的目的。同樣構想也可利用在重工業工廠、畜牧場、垃圾掩埋場、焚化爐所排放之 CO₂；水資源的再利用也可用於畜牧場與工業園區等污水處理廠 (圖一)。



圖一 整合性藻類產業用於環境保護與再生能源開發的策略概念架構

微藻用於生產生質能源的優勢

微藻是遍佈全球的水中浮游植物，每年由微藻進行光合作用所固定的 CO₂，占地球全部 CO₂ 固定量的 40% 以上，在能量轉化和碳元素循環中有舉足輕重的作用。有些微藻把光合作用產物轉化成油脂（三酸甘油酯）貯藏起來，在細胞內形成油滴。從這些微藻提取的油，通過轉酯化後可轉變為脂肪酸甲酯 (fatty acid methyl ester)，即為生質柴油。與一些產油植物（例如大豆、油菜籽、棕櫚油等）相比，利用微藻生產生質柴油的優勢在於以下幾個方面：

1. 非糧食作物，對民生問題產生衝擊極小。
2. 生長快速，良好狀況下每天可達到兩倍以上的生物質產量，因此微藻單位面積的產率高出高等植物數十倍。其次，特定的藻種或在特定的養殖條件下（例如缺氮），某些單細胞微藻可大量積累油脂，其含油量可高達 70%，因此微藻生物質之油脂產能相較於陸生之能源作物，分別高出數十至百倍以上（表一）。

表一 不同能源作物生產生質柴油之比較

作物	油產量 (公升/公頃) ^a	生產10萬公乘所需面積(公頃) ^b	相對生產效率 (以大豆之值為1.0)
玉米	172	581,395	0.4
大豆	446	224,315	1.0
菜籽油	1190	84,033	2.6
麻瘋籽油	1892	52,854	4.2
椰籽油	2689	37,188	6.0
棕櫚油	5950	16,806	13.3
微藻 ^c	58,700	1,703	131.6
微藻 ^d	136,900	730	306.9

^a 本欄數值為Chisti (2007) 所列之評估值。

^b 10萬公乘的生質柴油約為我國現今推動B2所需的量。

^c 生物質30%油脂含量（按重量計算）。

^d 生物質70%油脂含量（按重量計算）。

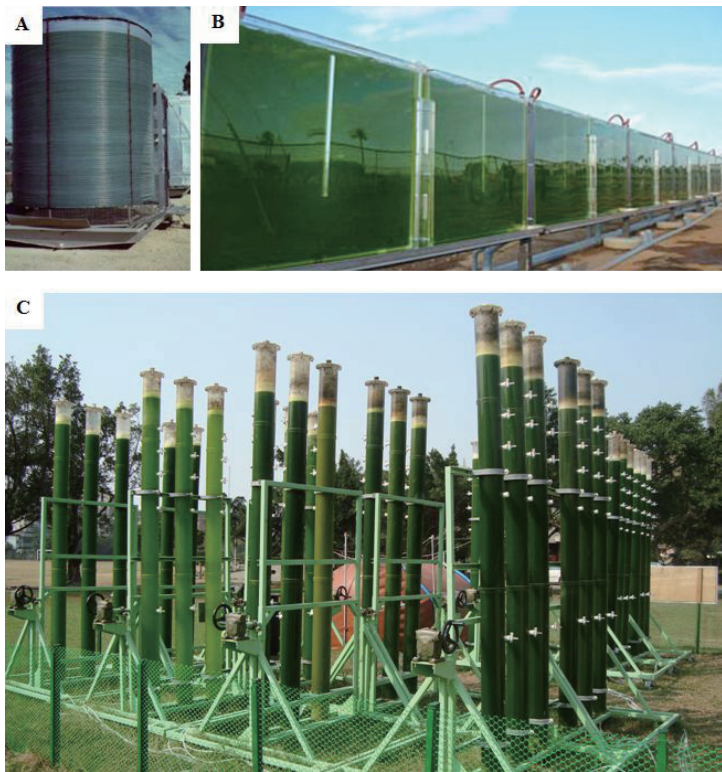
3. 微藻可利用鹽鹼地、荒漠進行大規模培養，可利用海水、鹽鹼水和荒漠地區地下水進行培養，因此微藻可以不與農作物爭地、爭水。
4. 微藻的培養可利用工業廢氣中的CO₂，緩解溫室氣體的排放，也可以吸收工業廢氣中的氮氧化合物，作為氮源的利用，減少環境污染。微藻甚至可用處理後之農漁牧或工業排放水來養殖，不但具有污水處理之功效，亦可促進水資源的再利用。
5. 在單位面積中，微藻培養一年可捕捉CO₂的量是植樹的二倍以上。其減碳成效不容小覷，未來還可用於碳稅交易標的。
6. 微藻之組成分多數為可利用物質，例如某些微藻含有不飽和脂肪酸與特定蛋白質，可為健康食品及餌料使用，而碳水化合物（包括纖維素）可為生質酒精的料源等，因此微藻培養的附加價值高。

微藻大量培養光生物反應器的種類與效應

目前微藻規模化人工培養主要有開放池和密閉反應器兩種方式。開放池培養（如迴圈跑道池或池塘式）成本相對較低，其最大問題是無法有效控制環境因子，藻類生長所達到的細胞密度較低（微藻產率低），易於被其他微藻侵染，水蒸發量大；密閉反應器培養可達到較高的藻細胞密度（培養微藻的產率高），不易被雜藻侵染，水蒸發量小，但反應器造價和運轉成本相對較高。

有別於其他菌體培養，培養藻類的反應器需要能提供充足的光線，因此此類反應器稱為光生物反應器。依反應器的外形與設計原理，個人將目前所發展的主要微藻光生物反應器歸納成管道光生物反應器 (tubular photobioreactor)、平板式光生物反應器 (flat plate photobioreactor) 及圓柱型光生物反應器 (column photobioreactor) (圖二)。在管道光生物反應器中又分成多種形式，例如直徑小而平行排列的管道系統、螺旋管式或繞圈管式管道系統；圓柱型光生物反應器則可區分成垂直式（有些並非呈 90° 角的垂直地面）與臥式（即大直徑橫臥平行於

地面的圓柱形反應器) 兩種。為了將光生物反應器系統運作成本降低, 高密度的微藻培養是必要要件 (Chiu *et al.*, 2008), 而除了光生物反應器本身設計的影響外, 光照效率、CO₂ 的適度供給及環境因子皆與微藻的生長效率有很大關係。每種光生物反應器都有其運作上的優缺點, 端視研究者或產業所處地點、運作模式、可聯盟合作公司或機構的技術等等決定何種光生物反應器系統最適合他們的運作 (表二)。欲就現有的研究報告, 要比較哪種光生物反應器有較佳的產能或成本較低並不容易, 其原因在於不同研究報告中所測試培養的藻種、打氣量與氣體中 CO₂ 濃度、環境溫度與光照情形等並不相同。



A : 管道光生物反應器 (tubular photobioreactor)。
B : 平板式光生物反應器 (flat plate photobioreactor)。
C : 圓柱型光生物反應器三類。

圖片來源：
A : Chisti, Y. (2007).
B : <http://biofuels.asu.edu/>
C : 國立交通大學 博愛校區 生物科技學系

圖二 各類用於微藻培養的光生物反應器

表二 不同藻類培養系統之前景與限制

培養系統	前景	限制
垂直式圓柱型光生物反應器	高質傳、在低剪應力下具有較佳的混合、低能耗、規模放大可行性高、易於滅菌處理、易於藻類固定化之應用、減低光抑制與光氧化作用	較低光照面積、建構需較複雜之材料、藻類培養之剪應力較高、規模放大會降低光照面積
平板式光生物反應器	較大光照面積、適於戶外培養、易於藻類固定化之應用、光徑較短、較佳的生物質產率、相對較便宜、易於清理、較低溶氧累積	規模放大需較多間隔與支撐材料、培養溫度控制困難、藻類具延反應器壁生長問題、流體剪應力會傷害部分藻種
管道式光生物反應器	較大光照面積、適於戶外培養、較佳的生物質產率、相對較便宜	具pH梯度、氧及CO ₂ 溶解易僅延管壁發生、發生積垢、藻類具延反應器壁生長問題、需較大的土地空間

資料來源: Ugwu, Aoyagi and Uchiyama (2008).

即使是同一類型的光生物反應器, 其設計也有些差異。例如管道式與圓柱型光生物反應器的直徑大小、圓柱型光生物反應器是臥式或垂直式置放、平板式光生物反應器的厚薄等, 都會影響微藻的產率。

不論哪一類型的光生物反應器, 反應器設計考量的主要因子為光照效率、氣舉與氣體交換效率 (air-lift) 及懸浮微藻的攪拌效率, 上述直接影響的是反應器微藻的生質產能 (Carvalho *et al.*, 2001; Eriksen, 2008); 另外反應器設備的成本、系統是否容易放大等也是反應器設計需要考量之處 (表三)。就光照效率而言, 由於微藻培養至一定濃度之後, 細胞本身的自體遮蔽會減低光線進入培養液程度, 而使內部新分裂的藻細胞無法順利有效地利用光線, 因此設計著重於減少光穿透路徑, 以所有微藻細胞均能充分接受光照為最大原則, 但並非一味講求光的照射, 照射同時必須避免強光引起的微藻光損傷, 適度的遮光效應可使微藻有較佳的光合代謝效率; 在氣體交換效率上, 要考量到氣體交換問題,

表三 不同型態之光生物反應器效能評估之比較

反應器種類	光利用效率	混合效能	氣體交換效率	面積/體積	微藻密度 (單位生物質量)	反應器等相關硬 體設施成本	規模放大
管道光生物反應器	極佳	佳	普通	大	高	高	普通
平板式光生物反應器	極佳	極佳	佳	中	高	高	難
臥式圓柱型光生物反應器	佳	佳	佳	小	中	中	普通
垂直圓柱型光生物反應器 (氣舉式)	佳	極佳	極佳	小	中	中	易
塑膠袋式光生物反應器	普通	普通	普通	小	低	低	易

註：一般而言，用於評估光生物反應器生產效能有幾種方式，包括以面積來計算（克/平方公尺/天），以體積來計算（克/立方公尺/天）或（克/公升/天），反應器中最高生質量（即微藻細胞密度）（克/立方公尺）或（克/公升）等。若以藻油生產為主要目的，則微藻細胞中的油脂含量也是評估的重點，另外油脂中脂肪酸碳數組成也為評估要點之一。

提升 CO₂ 在培養液裡的溶解量並且加速排出光合作用產生的氧氣，以降低氧化損傷作用，並有效補償 CO₂，提升光合作用反應速率；其氣舉效率上則需考量氣泡或氣柱對藻液流動產生的導流作用；而在懸浮微藻的攪拌效率上，對於大型光生物反應器更為重要，因為其需借助機械裝置推動水流動和攪拌藻液。

在管道式反應器中，培養液是流動的，而流體與管道壁間所產生的亂流可以提供培養液本身的混合及細胞懸浮的能力。不管是何種管道系統，將管道並聯就有機會將系統放大至幾噸、甚至於上百噸的規模。較長的反應器提供較多氣體的交換時間，有助於藻體充分利用進氣中的 CO₂。此外，管道式反應器同時也具有較大的受光面積，可以更充分地利用光線。垂直式圓柱型光生物反應器最適合利用氣舉效應進行懸浮微藻細胞的攪拌，此同時達到混合與增加氣體交換（質傳）的效果。氣舉效應可以使反應器中微藻充分懸浮混合，因此在此類光生物反應器中，不需要額外的機械裝置來推動水流動和攪拌，如此也可降低光生物反應器系統運作的成本。平板式光生物反應器具較大光照面積特性，亦可利用氣舉效應進行懸浮微藻細胞的攪拌與氣體交換，唯此種反應器在規模放大時較不容易，不僅所需土地面積大，硬體所需經費也較龐大 (Carvalho *et*

al., 2001; Eriksen, 2008)。

欲將微藻培養產業化，需進行單位土地面積的生物質產能評估。例如 Chisti (2007) 評估欲生產一萬公秉生質柴油所需架設的微藻光生物反應器系統約需 170 公頃的生產面積（以藻體中含 30% 藻油計算，但未指出特定的光生物反應器），而以荷蘭 Algaelink 公司所生產之微藻光生物反應器系統產能估之，約需 125 公頃，另外 GreenFuel 公司在美國 Arizona 州實際進行塑膠袋式微藻培養系統結果估計，則約需 217 公頃的培養面積。然而，想要評估使用光生物反應器需以多少土地面積來生產多少生物燃料並不容易，原因在於光生物反應器系統的架設設計。由於光生物反應器立體建置程度與光生物反應器系統矩陣密度都會影響所需的土地面積，當然這也與光照效果、反應器造價成本有關。所以，在估算土地面積時，需先設定好光生物反應器的基本系統。就台灣而言，土地資源十分有限，且可提供足量 CO₂ 來源的重工廠或發電廠也侷限於單一區域，因此適合發展立體建置的光生物反應器，期能在最少的土地面積中設立微藻生產基地。

國際藻類生質能源相關產業

近年來，宣稱以藻類作為生質能源開發目標的公司陸續成立（表四），依其成立的性質，這些公司

大致可區分成四類：

1. 因應減碳或再生能源開發目標而成立的新興公司，例如美國GreenFuel Technologies、LiveFuels、HR BioPetroleum、荷蘭AlgaeLink及以色列Seambiotic等公司。
2. 公司本來營運為能源相關事業，例如石化、天然氣及生質能源（特別是生質柴油）相關產業。這些公司因應時勢，將藻類生質能源的開發列為公司未來發展目標之一，例如夏威夷Cellena、美國PetroSun及Solazyme等公司。
3. 公司本來營運為藻類培養相關的事業，這些公司大部分擁有大規模藻田，而所培養藻類的用途為生物餌料、營養補充劑或健康食品等，但因應時勢將藻類生質能源的開發列為公司未來發展目標之一，例如美國Cyanotech與德國Bioprodukte

Prof. Steinberg公司。

4. 公司本來營運為農業、水資源、酵素等等相關產業，而由於該公司關鍵技術可應用於藻類生質能源的開發，因而置身於此產業，例如美國Valcent與紐西蘭Aquaflow Bionomic公司。

目前以光生物反應器作為藻類培養主要設置的公司還是少數，究其緣由為大規模的光生物反應器設備造價過於昂貴，因此用於生產價格不高的生質柴油不符合成本效益。美國 GreenFuel Technologies 與荷蘭 AlgaeLink 在微藻光生物反應器的研發上成效最為顯著，另外德國 Bioprodukte Prof. Steinberg 與美國 Valcent 公司也在此領域有所貢獻。

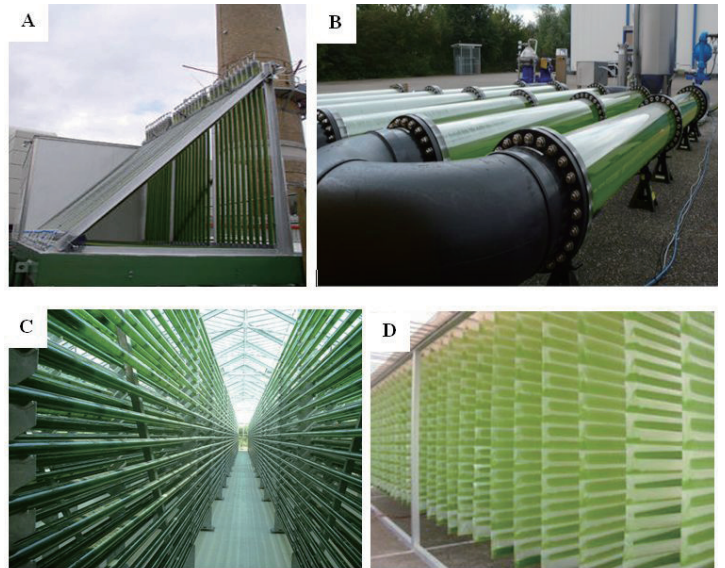
GreenFuel Technologies 是美國麻省理工學院 (MIT) 科學家於 2001 年創立的，其主要是利用發電廠排放的 CO₂ 培養藻類，再萃取藻油製成生

表四 利用藻類光反應系統於CO₂減量與生質能源開發之主要國際公司

公司名	國家	產業簡介	備註
AlgaeLink	荷蘭	藻類光反應系統設備廠	生產直徑25公分，總長度為480公尺與2,000公尺兩種臥式圓柱形光微藻生物反應器。
Cyanotech	美國夏威夷	藻體生產供應健康食品、食品添加物	近年來也將藻類生質能源的開發列為研發重點之一。
HR BioPetroleum (HRBP)	美國夏威夷	利用海洋藻類生產生質能源，同時開發降低工業界所釋放CO ₂	荷蘭Shell石油公司與此公司組建Cellena合資公司，投資70億美元開展微藻生物柴油技術的研究。
GreenFuel	美國麻州	利用煙道廢氣生產藻體生物質	公司設立主要目的為CO ₂ 的減量，生質能源的開發為延伸之利益。
PetroSun	美國亞利桑那州	以藻田生產藻油	在約1,100 英畝的藻田中，PetroSun預計將年產440萬加侖的藻油，並宣稱將在3年內將達到500萬噸/年的生產規模。
Solazyme	美國加州	利用生物酶方式轉化生產生質柴油	近年來與美國第二大石油公司Chevron合作，籌資約4500萬美元，計畫由藻油中生產百萬加侖的藻類生質柴油。
Aquaflow Bionomic Corporation	紐西蘭	由污水處理池中取得的藻類來提煉生質柴油	波音(Boeing)與該公司合作產飛機燃料用油(Jet-fuel)。
BioKing	荷蘭	生質柴油設備廠	為藻類光反應系統設備廠AlgaeLink姊妹廠。
Seambiotic	以色列	以藻田生產藻油	計畫在2009年底時於以色列的一處發電廠旁運作一約5公頃的藻田。
Valcent Products Inc.,	美國、加拿大	以研發一種可垂直式種植蔬果系統聞名	以塑膠袋為素材的室內微藻培養系統(Vertigro system)，所生產的藻油成本可降低至每加侖0.8美元，而每年每英畝的面積可生產33,000加侖的藻油。

質柴油。事實上，GreenFuel 公司創立的主要目標是工廠廢氣中 CO₂ 的減量，增加能源生產則是附加價值。GreenFuel 公司可說是利用光反應器培養藻類並用於 CO₂ 減量研究的引領者，其於 2004 年與 University of New Hampshire Biodiesel Group 合作，在 MIT 的一個汽電共生 (cogeneration) 工廠樓上架設一個高約 2.5 公尺的三角形管道的光生物反應器 (圖三 A)，用於降低工廠所排放的廢氣。結果顯示，於此反應器中所培養的微藻可減低工廠廢氣中 NO_x 達 86%、CO₂ 達 82% (Vunjak-Novakovic *et al.*, 2005)，這個結果吸引很多後繼研究者跟從 (包括筆者的研究室，圖二 C)，進行反應器與藻培養技術的改良。GreenFuel 公司在 2006 年獲得千萬美元經費的挹注，並分別在美國 Louisiana 與 Arizona 州的電力工廠 (APS' Redhawk 1,040 megawatt power plant) 進行較大規模的微藻減碳與生產生質能源計畫，他們開發一種塑膠袋微藻培養裝置，以期降低整個系統的設備成本，但於 2007 年仍因為成本增加與技術問題，停止這項藻類培養系統的運作 (National Geographic Magazine, 2007)。如今，GreenFuel 公司有更大的計畫，將與西班牙 Aurantia 公司合作 (Aurantia-GreenFuel Partnership)，將集資 9,200 萬美元，在西班牙的 Holcim 水泥工廠旁建構廣達 100 公頃的 Algae Greenhouse，預計其將每年可生產 25,000 噸的藻生物質。

荷蘭 AlgaeLink 公司研發與製造微藻培養光生物反應器系統，並整合微藻回收與榨油的整套設備，AlgaeLink 於 2007 年開始向全球銷售其系統，並提供相關技術支援，是國際上推動微藻光生物反應器商業化最積極的公司。AlgaeLink 提供直徑 25 公分，總長度為 480 公尺與 2,000 公尺兩種臥式圓柱型光微藻生物反應器 (圖三 B)，其整套系統目前價格不斐，480 公尺的系統為 144,000 歐元，2,000 公尺的系統為 194,000 歐元，其 480 公尺系統架設所需土地面積為 300 平方公尺，2,000 公尺系統需 1,200 平方公尺；AlgaeLink 系統的產能評估為每 1



A : GreenFuel 三角形管道的光生物反應器
 B : AlgaeLink 臥式圓柱型光微藻生物反應器
 C : Bioprodukte Prof. Steinberg GmbH & Co KG 管道式生物反應器
 D : Valcent 塑膠袋式光生物反應器。

圖片來源：

A : GreenFuel: <http://greenfuelonline.com/>

B : AlgaeLink: <http://www.algaelink.com/>

C : Bioprodukte Prof. Steinberg GmbH & Co KG:
<http://www.bioprodukte-steinberg.de/>

D : Valcent Products Inc.,: <http://www.valcent.net/>

圖三 國際生質能源開發公司用於微藻培養的光生物反應器

立方公尺面積下每日可生產 3.5 公斤的生物質。

Bioprodukte Prof. Steinberg 公司在德國 Klötze 市設置一套溫室中長達 500 公里的管道式生物反應器 (此為現今全球最長的微藻培養反應器) (圖三 C)，此系統占地 1.2 公頃，評估每年生產效應為 96 噸。不過目前該公司絕大部分藻類產品還是來自於開放池的養殖。

美國 Valcent 公司以研發一種可垂直式種植蔬果系統聞名，近年來他們也開發一種利用塑膠袋為素材的室內微藻培養系統 (Vertigo system)，其命名為 High Density Vertical Bioreactor (HDVB) (圖三 D)。Valcent 強調的是研發一種在造價成本上合理的微藻培養光反應系統，以使微藻生產再生能源的價格具合理性。Valcent 公司表示利用 Vertigo system 所生產的藻油成本可降低至每加侖 0.8 美

元，而每年每英畝的面積可生產33,000加侖的藻油。

光生物反應器用於藻類生質能源發展的未來展望

1. 開發低成本的光生物反應器與高效率培養系統

高成本是目前主要障礙，高透光材質的微藻培養光生物反應器造價昂貴，是導致微藻生產生質柴油成本居高不下的主因，因此建構可應用到生產規模的噸級以上新型封閉式光生物反應器裝置，成為開發微藻資源的關鍵核心技術。

2. 多元領域的整合是成功重要關鍵

微藻光生物反應器與其生產系統的建立是項高度跨領域整合的生物工程，需要許多機械、工程及材料學家進行光生物反應器的設計、控制、操作分析及計算，以期大幅增加單位產能、提升 CO₂ 減量之效能、減少水資源之消耗及增加土地運用之效率。個人認為在發展大規模光生物反應器矩陣系統之前，就應先引進塑膠或塑化業者，因為大規模透明反應管的使用是目前無法避免的基本材料。

3. 建立大規模CO₂減量的微藻光生物反應器單元系統

利用藻類吸收燃煤發電廠、煉鋼廠等排放的大量 CO₂，目前雖已有初步的實驗成功案例，但大量處理的效率仍待未來更先進的技術發展，需要解決的問題或許是如何提升單位體積內藻類等微生物吸收 CO₂ 的效率，使之不需要非常大的工作體積，便可協助大量 CO₂ 排放量的工廠可以安心的進行每日例行性的工作，成為非常有應用發展價值的研發目標，未來如有突破的機會，應可滿足全球解決 CO₂ 排放量付費的需求。

4. 大量廢氣有效率的前置處理系統的建立

包括 CO₂ 廢氣之排放廠的 CO₂ 減量及廢氣中有毒物質移除與廢氣降溫之技術，並自排放廠之煙道抽取煙道廢氣以海水脫硫後供應微藻培養系統。廢氣回收儲存，以穩定供應 CO₂，有毒物質移除以減少對微藻生長影響，皆有助於微藻於光生物反應

器中維持高生長特性。

5. 政府的大力支持與具有實力企業的協力合作

在已有的基礎上，對特定光生物反應器進行進一步開發並實現產業化，可為我國微藻培養技術與規模量產提供強有力的裝備支撐；此外，若能建立封閉式光生物反應器微藻大規模培養示範工程，將有助於我國微藻生物技術的產業化推動。

6. 不可忽視水資源消耗的問題

雖然封閉式微藻光生物反應器所需要的水資源僅為開放式微藻養殖池的 1/5-1/10，但若要大量培養微藻所需的水量也是相當驚人。因此台灣可利用本身四面環海的優勢，進行海水微藻的養殖，此海水微藻養殖可應用於較貧瘠之沿海地區，減少農耕使用地及淡水資源的消耗；再者，淡水微藻養殖可應用於畜牧場或工業廢水處理後排放水的回收再利用，另外也可以發展出低能耗的細胞收集和循環使用培養液的技术。

結語

「成本」是藻類生質能源發展成敗的最大關鍵，特別是在開發之初所需的龐大設備費用將會使人卻步，因此在未來數年之內，藻類生質能源可能還無法真正達到有經濟效益的地步，研發者、投資者及決策者均不可抱持過度美好的想像。但是，面對未來無石油可用與日益惡化環境問題的事實，推動藻類可再生能源的研發工作，甚至於產業，有其絕對正面的意義。個人認為一個能符合上述六項未來展望的國際性藻類生質能源公司在近三年內不易產生，但一定有很多國家政府、研究單位及私人產業會置身於此領域持續發展。與現今許多新興能源產業比較起來，發展藻類生質能源產業，乍看之下似乎並不困難，但具經濟效益的整合性藻類技術用於環境保護與再生能源開發產業，在運作上卻又不易達成，其中關係到的是在產業發展之初，國家能源政策所影響的研發資源挹注與重視之程度，再則又端視個別國家與地區的環境資源與環境限制。個人

淺見，在台灣欲發展藻類技術用於環境保護與再生能源的開發，不得不重視「水資源」與「土地」的限制，因此利用光生物反應器於藻類培養技術的開發似乎是項合理的選擇，故著此文與同樣關心此議題者分享之。

AgBIO

林志生 國立交通大學 生物科技學系 教授
 邱聖壹 國立交通大學 生物科技學系 博士研究生

參考文獻

1. Bourne, J. K. (2007) *Biofuels: Green Dreams*. National Geographic Magazine. October issue.
2. Carvalho, A. P., Meireles, L. A. and Malcata, F. X. (2006) *Microalgal Reactors A Review of Enclosed System Designs and Performances*. Biotechnology Progress 22:1490 1506.
3. Chisti, Y. (2007) *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances 25:294 306.
4. Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Chen, C. H., Kuan, T. C., Ong, S. C. and Lin, C. S. (2008) *Reduction of CO₂ by a high-density culture of Chlorella sp. in a semicontinuous photobioreactor*. Bioresource Technology 99:3389 3396.
5. Eriksen, N. T. (2008) *The technology of microalgal culturing*. Biotechnology Letters 30:1525 1536.
6. Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J. and Roessler, P. (1998) *A look back at the U.S Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae*. National Renewable Energy Laboratory, Report NREL/TP-580 24190.
7. Ugwu, C. U., Aoyagi, H. and Uchiyama, H. (2008) *Photobioreactors for mass cultivation of algae*. Bioresource Technology 99:4021 4028.
8. Vunjak-Novakovic, G., Kim, Y., Wu, X. X., Berzin, I. and Merchuk, J. C. (2005) *Air-lift bioreactors for algal growth on flue gas: Mathematical modeling and pilot-plant studies*. Industrial and Engineering Chemistry Research 44:6154 6163.
9. 相關網站
 AlgaeLink, From <http://www.algaelink.com/> °
 Cyanotech, From <http://www.cyanotech.com/> °
 HR BioPetroleum, From <http://www.hrbp.com/> °
 GreenFuel, From <http://greenfuelonline.com/> °
 PetroSun, From <http://www.petrosunic.com/> °
 Solazyme, From <http://www.solazyme.com/> °
 Aquaflo Bionomic Corporation, From <http://www.aquafloflowgroup.com/> °
 BioKing, From <http://www.bioking.nl/> °
 Seambiotic, From <http://www.seambiotic.com/> °
 Valcent Products Inc., From <http://www.valcent.net/> °
 Bioprodukte Prof. Steinberg GmbH & Co KG, From <http://www.bioprodukte-steinberg.de/> °
 LiveFuels Inc., From <http://www.livefuels.com/> °