

藻類培養之光合生物反應器發展現況

Development of Photobioreactors for Algal Cultivation

盧文章¹、王振諧²

工研院能環所(EEL/ITRI) ¹研究員、²工程師

以藻類油脂作為生質柴油原料為現今替代能源研究的焦點，而開發適合於藻類生長的光合反應系統，為實現藻類大規模培養生產的重要研究課題。目前藻類光合生物反應器有兩種類型，一是開放式，以開放式渠道池為主；而另一是密閉式，有管狀、平板式、攪拌槽等型式。兩種類型各有其優缺點及適合應用的條件，也各有其支持者。本文即針對藻類培養所需之光合生物反應器的發展情形進行整理分析，並提供藻類大規模培養的相關資訊。

Algae have attracted much attention due to their potentials in the production of biodiesel. In order to grow and tap the potentials of algae, efficient photobioreactors are required. Algae are grown either in open or closed systems, for specific condition, respectively. The purpose of this article is to allow thorough understanding of various photobioreactors that are promising for mass production of algae. It is a reference for reader who is interested in mass cultivation of algae.

關鍵字/Key Words

光合生物反應器(photobioreactor)、生質柴油(biodiesel)、氣升式反應器(airlift reactor)、微藻(microalgae)

一、前言

經過多年的驗證，大規模藻類培養的技術已被證實可行，且由藻體所衍生之終端產品生產亦具有經濟價值，不過仍需擴大這些產品的市場面，以獲得足夠的經濟效益。目前的挑戰則在於如何將實驗室高密度培養結果成功地放大至戶外養殖，且將生產最大藻體量的培養技術達到一致通用性，再加上便宜及健全的應用技術等，讓藻類生產技術得以實現。

目前許多不同型式的藻類生產系統與技術正在進行開發，亦有多家公司競相發展相關研究，寄望成為此領域的領導者。發展中的養殖系統，主要分為開放式與密閉式系統兩大類，開放式系統為不同大小及形狀的池子，將藻類置於其中培養、生長並加以採收，開放式光合生物反應器以開放式渠道池為主，從1960~1970年代開始被美國、以色列等國家應用於工業污水的處理。1970~1980年代在中國、美國、日本等國應用於保健食品的生產。而最早利用藻類培養降低CO₂排放並同時生產燃料技術的研究，為美國能源部的國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory；NREL)所提的「水生物種計畫(aquatic species program；ASP)」，亦利用開放式渠道池作為主要培養系統⁽¹⁾。密閉式系統即所謂的光合生物反應器(photobioreactor)，其將培養的基質封閉在反應區內以避免外來的污染，所以密閉式反應器培養穩定，可無菌操作，易進行高密度培養，已成為今後的發展方向，但是利用密閉式光合反應器培養藻體的成本高，是商業化的主要障礙。

二、光合生物反應器進展

微藻能有效利用光能、CO₂和無機鹽類合成蛋白質、脂肪、碳水化合物及多種高附加價值生物活性物質，可以透過微藻培養來生產保健食品、食品添加劑、飼料、生物肥料、化妝品及其它天然產品。另外，近年來利用微藻體內的脂肪、碳水化合物生產生質燃料也日益受到關注。隨著人們對微藻研究的進展，開發及研製高效率光合生物反應器，及其在微藻的高密度培養方面的應用研究，已成為微藻培養技術的重要課題。對於光合生物反應器的發展可分為開放式及密閉式兩種型式，主要設計特徵說明如表一，以下將針對此兩種型式的進展做一說明。

(一)開放式系統

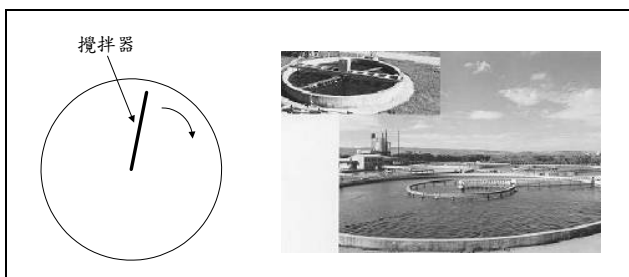
所謂開放式光合生物反應器就是指開放池培養系統(open pond culture system)。其培養

▼表一 開放式及密閉式光合生物反應器主要設計特徵

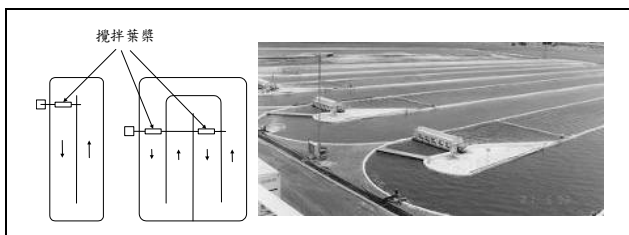
特徵	開放系統	密閉系統
面積/體積比值	小	大
藻種	受限制	易適應
藻種選擇主要準則	生長競爭	剪切阻力
族群密度	低	高
採收效率	低	高
培養週期	受限	廣泛
污染	可能	低
水分蒸發損失	可能	防止
光利用效率	差/一般	一般/優
氣體輸送	差	一般/高
溫度控制	無	優
最耗成本參數	混合	氧氣控制、溫度控制
設備投資	低	高

資料來源：Carvalho et al., 2006⁽²⁾

技術經過了廣泛深入的試驗，已普遍應用於商業化微藻大規模培養中，其具有投資少、成本低、技術要求簡單等優點。主要有圓形培養池(circular pond)及渠道式培養池(race-way pond)兩種。圓形培養池(圖一)早期曾盛行於日本及國內之藻類營養食品培養用途，而最典型、最常用的開放池培養系統是Oswald所設計的渠道式培養池(圖二)。培養系統之培養液深度為15~30公分的圓形及環形淺池。以自然光為光源和熱源，靠攪拌器移動及攪拌葉槳轉動的方式，使培養液於池內混合、循環，防止藻體沉澱並提高藻體細胞的光能利用率，可通入空氣或CO₂氣體進行鼓泡或氣升式攪拌。在美國為防止渠道式培養池污染，並減少水分蒸發，生產中常在池體上方覆蓋一些透光薄膜類的材料，使之成為密閉池。目前國際上較著名的大規模生產微藻的公司(如Cyanotech、Earthrise Farms等)均採用渠道式培養池，在螺旋藻、小球藻和鹽藻的大規模培養中獲得良好的培養效果。



▲圖一 圓形培養池



▲圖二 渠道式培養池

雖然開放式光合生物反應器在微藻培養中具有一定的效果，但開放式光合生物反應器仍存在下列缺點(1)易受外界環境影響，難以保持較適宜的溫度與光照；(2)會受到灰塵、昆蟲及雜菌的污染，不易保持高生物質量的單一藻種培養；(3)光能及CO₂利用率不高，無法達到高密度培養。這些因素都將導致培養密度偏低，使得採收成本變高，而能適應培養的微藻藻種必須是在極端環境下能快速生長的藻種，因此只能用於螺旋藻、小球藻及鹽藻等少數能耐受極端環境的微藻培養。對於要求溫和培養條件和種群競爭能力較弱的微藻種類，則只能採用密閉式光合生物反應器培養。

(二)密閉式系統

密閉式光合生物反應器開發雖已有近50年的歷史，但快速地進展還是近10年的事，自1990年代以來，大量相關專利被提出。與開放式光合生物反應器相比，密閉式光合生物反應器具有以下優點：(1)無污染，能實現純種培養；(2)培養條件易於控制；(3)培養密度高、易採收；(4)適合於所有微藻的光自營培養，尤其適合於微藻代謝產物的生產；(5)有較高的光照面積與培養體積之比，光能和CO₂利用率較高。由於光合生物反應器中培養的藻體及溶液與外在環境隔絕，所以是具有較佳控制性的系統。外來可能捕食的其它藻種、植物、動物及細菌等都被隔離在外，且所需的CO₂濃度、pH值、水位及其它環境因子則保持在內部，故密閉系統產率通常高於開放系統。另一方面，為防止藻類死亡而裝設的偵測及控制系統中參數情況儀器，使設備成本提高，所以光

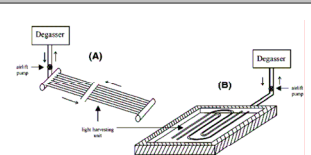
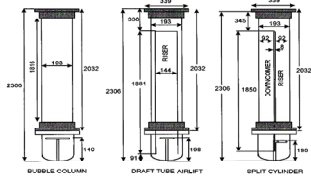
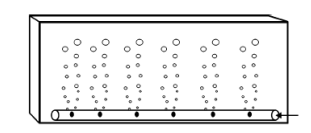
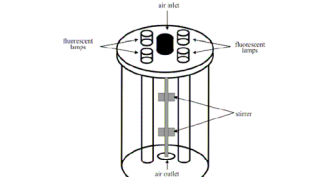
合生物反應器的設備成本較開放系統昂貴。目前一般密閉式光合生物反應器有管狀(水平、垂直)、平板式及攪拌式醱酵槽等，針對此型式反應器的特性說明如表二。

混合系統是光合生物反應器結構設計的關鍵之一，垂直管狀氣升式光合生物反應器的主體通常由外管和內管組成，通過氣流傳動使藻液在內外管間循環，提高藻類的光能利用效率和質傳效率，同時防止培養液中溶氧過飽和⁽³⁾。在水平管狀反應器方面，為了提高光能利用率，Lee等⁽⁴⁾和Miyamoto等⁽⁵⁾都對水平設置的管道進行改進，採用 α -斜管或螺旋盤管狀光合生物反應器，並做了大量的基礎理論和應用研究，然其在放大應用上則較困難。在諸多的密閉式光合生物反應器中，管狀光合生物反

應器發展最快，其可靠性、有效性和低成本的特點，日益引起人們的重視。

此外，為了降低反應器設置成本，利用塑膠或乙烯基類材質製作成垂直(懸掛)袋(vertical (hanging) bags)系統作為藻類養殖，具有可在小區域下生產大量藻體，且仍可提供生長介質合適的光穿透度優點。懸掛袋具有細槽(striations)或平行縫，這樣的結構使藻體完全聚集在袋子的底部。此型式系統相當便宜，且具有高產率的潛力，但目前並無任何發展這些設計的公司公開其培養的產率資料。圖三為Valcent Products公司所發展的懸掛袋系統圖，稱之為Vertigro™。另一型式的懸掛袋系統由GreenFuel Technologies公司所發展，被用來作為轉殖到主要藻類生產系統的前置育種培

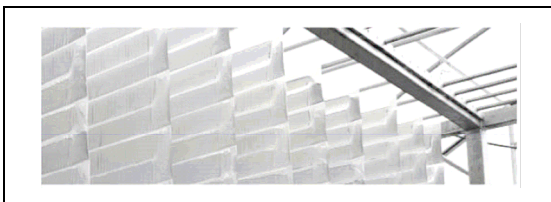
▼表二 密閉式光合生物反應器特性

反應器型式	圖形	特性	限制
水平管狀		大的光照面積、適合室外培養、相當好的生質物產率、相對較便宜	pH值、溶氧及CO ₂ 濃度隨著管長有梯度變化、污染阻塞、具有某種程度的藻類附著於內壁的成長、較大的土地空間需求
垂直管狀		高質量傳送速率、在低剪應力情況下可得到好的混合效果，低能耗、具高規模放大潛力、易消毒、易調節溫度、適合固定化藻類培養，降低光抑制及光氧化現象、並且便宜	小的光照面積、建造所需材質精緻，剪應力對藻類培養的影響，隨著規模的放大光照面積減小
平板型		大的光照面積、適合室外培養、適合固定化藻類培養、良好的光路徑、良好的生質物產率、相對較便宜、易清潔、易調節溫度、低溶氧增加量	規模放大較困難，需要許多的區隔物及支撐材質，培養溫度控制困難、具有某種程度的藻類附著於內壁的成長，剪應力對某些藻類可能有影響
攪拌槽		操作參數可完全控制，維持長時間的無菌培養、技術條件成熟、易於控制	(s/v)值低，導致光利用率差、需建置內部照明方式，提供更均勻的光分佈、放大困難

來源：工研院整理

養，圖四為此育種培養袋的照片。

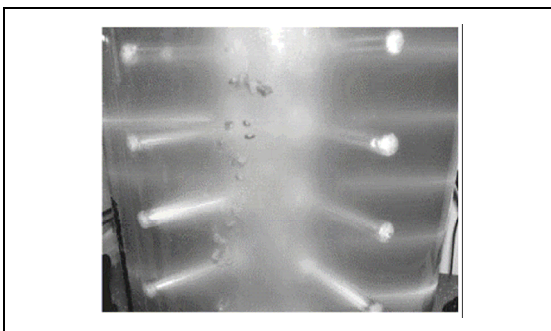
為促進光合效率，利用光網設計(light-matrix design)增加可用的光照量，是目前開發的藻類生長系統中較具技術先進性的研究。光網設計的主要目的，是在相同時間下增加藻體暴露於可用光照的量，且沒有減少培養空間內體積。對於光網型式有許多不同的設計，如OriginOil公司曾應用已有專利到其Helix Bioreactor™系統，主要是利用能發出紅色及藍色光的棒形物穿入生物反應器中，使藻類培



▲圖三 Valcent Products公司的Vertigro藻類培養系統



▲圖四 GreenFuel公司藻類育種培養系統(彩圖請見目錄)



▲圖五 OriginOil公司藻類培養系統(彩圖請見目錄)

養液能接收這些光照量(圖五)。而GreenFuel Technologies公司擁有的Matrix™光網系統，其概念是以一組管子或腔體在藻類生長腔體內，使具過量的光照及增加擴散效果，但並沒有提供任何相關照片或詳細的描述。此系統宣稱其表面積對體積的比值(S/V ratio)為 $1,500 \sim 2,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ，比一般密閉系統高出20倍以上，而比開放塘系統高出千倍。S/V ratio可作為光照穿透系統表面積多寡的參考，較高的S/V ratio值意味著有較大的照光區域及較高的產率潛力。但需注意的是，此為小規模、短期間的測試，平均產率雖可達 $98 \text{ g}/\text{m}^2/\text{day}$ ，然放大規模至商業化藻類生產程度的實現仍待進一步完成⁽⁶⁾。

有許多種類的密閉式光合生物反應器用於不同的藻類培養生產，而多數的光合生物反應器易於實驗室規模下進行操作，只有少數可成功地放大至先導模廠(pilot)規模及具有良好的藻類生產量，產率介於 $0.1 \sim 2.7 \text{ g}/\text{L}/\text{day}$ 之間(與藻種及反應器型式有關)。光合生物反應器的放大可經由增加培養系統的長度、管徑、高度或分隔數加以達成(視光合反應器型式)，而這些規模放大的策略具有很大的挑戰性，主要由於要保持反應器中最適的光照、溫度、混合及質量傳送有困難，仍待相關的研究開發。此外，藻類大量培養主要的問題之一為缺乏高效率及彈性的光合生物反應器，為增進藻類產量，通盤瞭解光合反應器中的水流力現象及質量傳送速率是有必要的。

工研院能環所為開發適合國內發展的光合生物反應器，經考量在製程放大的容易性及工程困難障礙等因素，選擇以管狀光合反應器為發展對象。針對其規劃設計，建置實驗室級(百公升)氣升式反應器進行水流力、質量傳送行為(包括總質量傳送係數、混合時間、液體

流速及氣體滯留量等)與實際放大藻類培養的相關研究，掌握各項規模放大重要因素，再逐級放大轉殖培養之光合生物反應器(噸級)，最終將完成模組化放大設計，作為未來藻類培養基礎。目前已建置20公升、100公升級反應器(圖六)及同時能放置5~6座管狀光合反應器可調整角度($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$)支撐架台(圖七)，並完成初步的流力及藻類培養測試。未來將進一步深入測試分析，及同時針對光照量對不同管徑反應器之藻類培養影響進行測試，尋找適合國內培養的反應器管徑尺寸，作為未來開發的參考，也歡迎研究單位及廠商一同研究開發，為藻類生質柴油產業奠定成功的基礎。

三、結論

開放及密閉式藻類生長系統都各有支持者，而目前專注於可產生較高產量的藻類生長技術系統，但也衍生較高的生產成本，實際的問題是如何將成本及產量作為經濟可行的設計。目前主要的研究者及公司已開始認為密閉光合生物反應器，對於生質燃料原料生產較具經濟可行性；隨著研究進展，產率逐漸提升，成本則持續下降，使此系統愈來愈受到注目。至於開放系統由於受限於本身的特性使其無法有太多的技術改善空間，加上用水量大及污染侵入等問題，將使其限制在某些具市場性地區生產藻類(如便宜土地、大面積土地及充分非飲用水供應等區域)。開放式系統從事如螺旋藻生長之低產量、高單價的產物，但在生產燃料的程序中，需要大量的藻體以達到商業化規模，因此最終將驅使此產業邁向高產率的生長系統。由於國內在土地及水資源供應上處於較不足的状况，因此對於生產燃料之藻類培養



▲圖六 100 公升氣升式反應器



▲圖七 可調整反應器角度支撐架台

系統的開發及選擇上，建議以密閉式系統為主，而以開放式系統為輔。

參考文獻

1. Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, Roessler P., 1998, A look back at the U.S.Department of Energy's Aquatic Species Program—biodiesel from algae. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO; 1998. Report NREL/TP-p.580-24190.
2. Carvalho, A.P., Meireles, L.A., Malcata, F.X., 2006. Microalgal reactors : A review of enclosed system designs and performances. Biotechnol. Prog., 22, 1490-1506.
3. Sánchez Miron, A., Cerón García Camacho, F., Molina Grima, E., Chisti, Y., 2002. Growth and characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors : studies in fed-batch culture. Enzyme Microb. Technol., 31, 1015-1023.
4. Lee, Y.K., Ding, S.Y., Low, C.S., 1995, Design and performance of an -type tubular photoreactor for mass cultivation of microalgae. J. Appl. Phycol., 7, 47-51.
5. Miyamoto, K., Wable, O., Benemann, J.R., 1988, Vertical tubular reactor for microalgae cultivation. Biotechnol. Lett., 10, 702-708.
6. BBI International, 2008, Technologies for Commercial Production of Algae : Challenges to Growing and Harvesting the Newest Feedstock on the Block, Report.