

微藻採收及其相關技術介紹

Introduction of Microalgal Harvest Technology

白明德¹、陳國帝¹、藍得彰²、林昀輝³、李宏台⁴

工研院能環所(EEL/ITRI) ¹研究員、²副研究員、³經理、⁴副組長

微藻是地球上最早的生命型態之一，而人類使用微藻已有數千年的歷史。近年來因能源與環境問題日益嚴重，微藻被視為一個可以解決能源與二氧化碳減量的可行技術。微藻採收是微藻能源應用技術的一個關鍵瓶頸，目前微藻養殖產業上使用的採收技術包括沉降、離心、過濾與浮除。而為了加強採收功能，克服微藻顆粒小、密度小等問題，混凝技術被用作輔助採收工具以提高採收效率，包括傳統的加藥混凝、利用微藻自身特性的自混凝、利用電場與電中和原理的電混凝，以及利用生態共生技術的生物混凝。雖然這些採收與輔助採收技術尚未有能通用於各種藻種與案例者，但在更先進的採收技術發明之前，改良目前的技術，用最佳的組合來符合微藻能源應用的低能耗與低成本需求，是目前最有希望的研發途徑。

Microalgae are among the most ancient lives and had been utilized as food provisions or as medicine for more than thousands years. Recently, microalgae were respected for their application in bioenergy production and carbon dioxide reduction because microalgae are a non-food, environmentally- and ecologically-friendly biomass feedstock. Microalgae have high photosynthesis efficiency and do not need cultivated lands to grow. They are favorable feedstock for bioenergy production. Although, the microalgal cultivation is a mature science, the traditionally microalgal cultivation technologies cannot be utilized in the microalgal bioenergy industry. The industrial production of microalgal bioenergy has a requirement of a low unit price and it hungers for low cost and low energy consumption technologies. Traditionally, microalgal cultivation industry utilizes settling, centrifuge, filtration or floating processes to harvest mature microalgal cells. However, the harvest is very difficult and its energy consumption is high because of the small size and low density of the microalgal cell. Therefore, some auxiliary harvest technologies are utilized to increase the particle size and density, such as flocculation. Different flocculation technologies are utilized for microalgal harvesting, including traditionally flocculant, autoflocculation through pH variation, electro-flocculation by electric field and neutralization, and bio-flocculation by symbiotic micro-organisms. There is no single technology to harvest every microalgae species under all conditions at low cost and low energy consumption. However, modification from the traditionally harvest technologies and utilizing them in an optimal combination of processes is one pathway to develop a favorable microalgal harvest technology.

關鍵字/Key Words

微藻(microalgae)、採收(harvest)、生物能源(bioenergy)

一、微藻產業現況與前景

微藻屬於真核微生物，在地球上生存已超過20億年，是地球上最早出現的生命型式之一，而在演化上，微藻極可能是所有植物的起源。歷史記載人類利用微藻已有數千年，早期被作為食物使用，後因其營養價值高，甚至被用作醫藥使用，《本草綱目》及《本草綱目拾遺》中即有念珠藻藥用價值的相關記載。20世紀中葉，由於工業化造成人口暴增，糧食問題浮上檯面，藻類因其生長快速，及蛋白質成分豐富，被視為解決糧食危機的新契機，因而逐漸受到重視。近年更因養生與美容風潮，使微藻在健康食品與美容及醫藥產業應用發展迅速。目前微藻在產業上的應用主要有幾方面：(1)增進食物及動物飼料的營養價值；(2)水產養殖飼料；(3)化妝品的原料；(4)內含高價值分子，如聚不飽和脂肪酸油脂，添加至嬰幼兒配方奶及營養補充品中；(5)內含色素是重要的天然染料。現今全世界微藻市場產量約每年5,000公噸(乾重)，產值約為每年12.5億美元⁽¹⁾。

長期以來，台灣的綠藻產業一直位居全球之冠，近年來因大陸與韓國的競爭，市場佔有率略有下降，但仍穩居世界第一。根據食品所ITIS計畫估算，2007年台灣綠藻原料的產量為1,050公噸，約佔全球總產量的52%，而且因台灣生產的產品品質穩定且優良，佔全球總產值約70%⁽²⁾。

近年隨著能源與環境議題逐漸受到重視，生質能源產業日趨茁壯，前幾年生質柴油與生質酒精等生質能源技術已日趨成熟，並進入大規模示範、甚至量產的普遍應用階段，例如國內於2008年開始全面於市售柴油中強制添加1%的生質柴油。然而，隨著生質能源逐漸普及，規模日益壯大，生質料源開始成為制約生質能源拓展的瓶頸。尤其前幾年石油價格飆

升，生質燃料需求也跟著水漲船高，然而適逢氣候變遷與多個產糧區的重大天然災害，糧食價格飆漲，在糧食供應與生質能源料源供應的衝突下，下一世代的生質能源技術被提上檯面，如生質酒精技術發展的重心，逐漸移往木質纖維素生產生質酒精，而生質柴油技術也開始轉往麻瘋樹、微藻等非糧的生質料源開發。

二、微藻採收

微藻產油技術的研究起源自30多年前，美國能源部於1978年支持的aquatic species program(ASP)計畫，是近代規模最大，涉及範圍最完整的微藻研究，該計畫對於藻種、微藻生理特性、微藻基因、微藻養殖、生物反應器設計、藻油經濟評估等多有詳細的研究。依該計畫評估結果，藻油生產技術最大問題在於成本，而其成本中養殖約佔50%，採收約佔38%，而最後的油脂萃取約佔12%⁽³⁾。美國能源部於2009年的National Algae Biofuels Technology Roadmap中也提到採收濃縮、脫水程序約需消耗整體微藻產品能源的60%⁽⁴⁾，目前的微藻產業，不論是用於健康食品、醫藥或其它工業原料，其產品市場特性屬於高單價而小規模，因為單價高，所以對於成本的依賴性不高，目前大多數的微藻養殖業採用的採收技術，為多段式的離心採收或過濾。而未來微藻能源產業的產品市場特性，將是一個低單價但規模極大的市場，因為單價低，對於成本的依賴性就變得極高，有效降低成本將是該產業提高利潤與競爭力的關鍵之一，微藻採收技術也將成為該產業的關鍵技術。

微藻採收的困難有三點：(1)微藻顆粒小；(2)微藻密度與水相近；(3)微藻液含水比率大。顆粒小使過濾與浮除分離困難；密度與

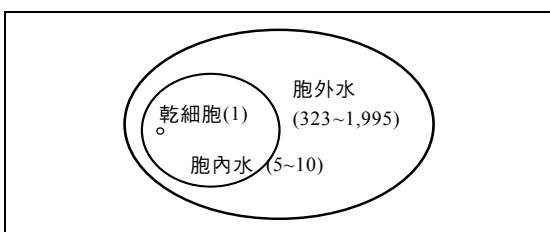
水相近則沉降與離心採收不易；而含水比例大，意味著獲得單位藻體乾重需要脫水移除的水分量大。以傳統養殖500~3,000mg/L的微藻液濃度，細胞含水率80~90%的案例估計，獲得一份的藻細胞乾重需要去除323~1,995份的胞外水與5~10份的胞內水(圖一)。胞外水屬於比較容易脫除的部分，常用的沉降、浮除、離心與過濾技術都可用於移除胞外水。而胞內水的脫除則較困難，除非先將細胞壁破壞，將細胞打破，否則只能依靠水分自然析出，較常見的方法為加熱或日曬方式進行胞內水份脫除。

三、固液分離技術

目前微藻採收固液分離技術，主要應用沉降、浮除、離心與過濾技術四大類，沉降與浮除應用於低濃度藻液濃縮後採收，一般只能達到2%以下，並不能完全去除胞外水。離心與過濾兩技術可以將大部分的胞外水去除，可將藻液濃縮至10%以上的藻泥。各項技術各有其優劣與適用範圍，目前仍無一通用的採收技術可以適用於所有的藻種與所有案例。針對重力採收、過濾採收與浮除採收三項技術比較列於表一，並討論如下。

(一)重力分離

由於水與藻體密度不同而利用重力予以分離，主要包括重力沉降與離心兩項技術，重力



▲圖一 微藻水分分布示意

沉降係直接於沉降池中將藻液靜置，使密度比水大的藻體自然沉降而達到分離的效果，設備簡易且操作耗能低，但因多數藻體密度和水相近，沉降效率低，而且需要相當大的土地面積，並不適合台灣缺乏土地資源的條件。然而，在土地資源豐富的區域，沉降是一個簡單、低耗能的微藻採收技術。不過沉降採收並不適合所有的藻種，細胞大、比重大的藻種是比較適合沉降採收的，然而因藻體本身比重與水相近，而含油量高的藻比重又多較輕，因此沉降採收一般必須搭配混凝，凝聚微藻細胞成較大的膠羽，以增加沉降效率。

重力沉降法效率低而難以實用，為提高重力分離效率，離心分離技術利用機械旋轉的離心力提高沉降加速度，可以大幅提高分離速率並降低土地需求，然而離心機設備價格昂貴，且高速旋轉能耗大。離心技術已為成熟的技術，許多藻類養殖示範計畫多是利用離心分離作為主要的採收技術，如美國ASP計畫就是利用沉降池略為濃縮藻液後，再以離心法採收⁽³⁾。

(二)過濾分離

過濾分離是另一項成熟而實用的藻類採收技術，由於藻體大小約在數個微米，利用微過濾或超微過濾技術，可以輕易地將藻體從水體中分離出來。微過濾技術已應用於微藻養殖採收，Earthrise Farm在美國加州的440,000m² *Arthrospira*藻養殖場，就是利用過濾法進行微藻採收，採收的藻體含水率80%⁽¹⁾。早期加州HRP(high rate pond)計畫利用聚合物混凝劑、氯化鐵及掃流過濾來採收微藻，可移除90%以上微藻，惟當時評估掃流過濾成本過高⁽⁵⁾。

過濾採收主要成本除了設備的初設成本與操作耗能外，操作過程中因為阻塞造成的濾材耗損與濾材清洗再生，是另外一項重大成本支

出。掃流過濾利用原液流向與過濾方向垂直，可以將濾材表面的沾附固體堵塞物掃除帶離，減緩堵塞問題，也將減少反洗成本並可延長濾材壽命。

(三)氣浮法

多數藻體細胞密度與水相近，不易以重力分離採收，甚至部分藻種細胞密度比水小無法利用重力分離，此類狀況反而可利用浮力來進行藻濃縮。氣浮法為注入加壓的飽和溶解空氣或二氧化碳於藻液底部，因為釋壓，溶解的氣體將形成細小泡沫，可提供藻體附著而產生浮力上浮，而後於上層收集得到高濃度的藻液。在二氧化碳氣泡形成時也會對藻體產生吸附而形成類似混凝的效果。Borodyanski 與 Konstantinov 利用加壓浮除原理，設計了一個連續套桶式的藻體採收裝置，自底層較大面積的桶槽開始浮除將藻體往上帶，在上方連續縮小面積的套桶將藻液逐層濃縮，最後於上層採收得到高濃度藻液⁽⁶⁾。

四、輔助採收技術

上述的固液分離技術都是成熟技術，但並

不能完全符合微藻採收，其中最大的問題是固體顆粒大小與比重，而為了促進微藻採收功能，適當的輔助技術是必須的。

混凝是將微藻單細胞微小顆粒聚集成較大的膠羽或顆粒，將有利固液分離作業。以過濾為例，較大的固體顆粒可使用較大孔洞的濾材，而濾材孔洞大則過濾速度快，需要的壓力或真空吸力也較小。顆粒較大的藻團在氣浮過程中較易與氣泡附著，提高氣浮採收效率。在重力分離方面，由於藻體一般比重與水相近，為了增加重力分離功能，減少能耗或土地面積需求，添加混凝劑促進藻體凝集，增加分離效果是一項常被使用的輔助方法。

最常見的混凝方法為添加混凝劑，一般常用的混凝劑為明礬或氯化鐵等化學混凝劑與聚丁質等聚醣類。主要提供藻之間架橋功能，鏈結大量的藻細胞後形成大顆粒膠羽，或中和藻體表面帶電性後，破壞藻與藻中間的阻力，使藻細胞之間可以自然地結合。但是混凝劑的添加，除了大幅增加操作成本中的化學藥劑項目外，也增加廢棄污泥產生量，增加後續廢棄物處理支出，為了避免混凝藥劑引發的副作用，免藥劑的混凝技術也在研究之中。

▼表一 微藻採收技術比較

採收技術	適用藻類	成本	容量	採收效率	能源投入	應用規模	技術瓶頸
過濾法 掃流過濾	適用於絲狀體、非浮游性藻類	12萬美元/百萬加侖(約為32美元/公噸)	950L/min (約57m ³ /h)	>90%	High	384,000m ³ 世界最大 <i>arthrospira</i> 藻養殖廠位於美國加州，佔地44公頃，亦採用過濾採收	容易阻塞、成本昂貴
重力沉降法 離心	比重較大之藻類	65~200美元/公噸(乾重)	180m ³ /h (最大225m ³ /h)	>95%	High	國外使用重力沉降較為普遍，本例離心機應用於0.1公頃藻塘。	處理容量小，時間長，能耗高，易使細胞破碎，不適於小型微藻
氣浮法	適用於藻體濃度較稀，密度與水體相當，對剪切力敏感的藻類，如鹽藻(<i>dunaliella</i>)及螺旋藻(<i>spirulina</i>)	35~55美元/公噸(乾重) 25萬美元/百萬加侖(約為66美元/公噸)	0.02m ³ /h (僅實驗研究階段)	80~94.3%	Medium (為離心法之40~65%)	此技術已廣泛應用於發酵產品濃縮、廢水處理等領域，惟對於微藻採收少有報導	僅適用低/高pH值(細胞嚴重損傷)、濃度較低、密度與水體相當之藻液，需再進一步處理

工研院整理, 資料來源^(3,7-12)

有些藻種在養殖中停止二氧化碳供應後，隨著溶解二氧化碳減少，pH值上升會有凝聚的現象，稱為自凝聚(autoflocculation)，也可以加鹼調整pH值來誘發自凝聚現象。

超音波在密閉空間中會形成駐波，導入藻液後，在駐波中藻細胞會被捕獲在節點的位置，因為劇烈震盪使藻細胞劇烈運動、摩擦而形成自凝集的現象，可達到濃縮採收的目的。藻體回收效率可達90%以上，並達到最高20倍的濃縮效果⁽¹³⁾。

要除去細胞帶電除了加藥外，亦可提供一電場，應用低電壓直流電，將鋁板或鐵板連接於犧牲性陽極，產生鋁(Al^{3+})、鐵(Fe^{3+})離子為混凝劑，在電場誘導下，加速微藻移動、碰撞、凝聚而形成膠羽，此為電混凝(electrocoagulation)。同時電解過程產生微小氣泡，與膠羽黏附，將藻體上浮。此種採收方式構造簡單，但採收藻體含有鐵及鋁離子成份，後續藻體殘渣之再利用及大規模採收之操作成本則需進一步評估。

微藻養殖時很難避免細菌的存在，甚至有些藻種必須與某些細菌形成穩定共生生態才能存活。因此，有學者注意到這種現象，嘗試引入某些細菌與微藻共生，並利用這些細菌分泌出具有類似混凝劑功能的胞外分泌物EPS(extracellular polymer substance)，引發混凝現象，稱為生物混凝(bio-flocculation)⁽¹⁴⁾。微藻養殖技術中，如能掌握生物混凝機制，未來將可降低採收成本，不添加混凝劑也避免藻體污染及增加再利用價值，但如何促進生物混凝、如何選擇共生的混凝菌種與如何維持穩定共生生態等課題，仍待進一步研究。

五、結論

石油能源逐漸耗盡及大氣中二氧化碳濃度

不斷上升，因此再生能源需求日益增加，微藻產業未來極有可能導入能源應用，微藻能源產業與現有的微藻產業模式差異極大，尤其是低單價的產品市場特性，使既有的微藻養殖採收技術必須要能有效地進行成本與能耗刪減，才能適應未來產業趨勢。微藻採收技術是微藻生產的主要成本與能耗單元，而目前主要的重力、離心與浮除分離技術尚未能完全滿足未來的產業需求。微藻採收技術將是未來微藻能源應用的關鍵技術之一，雖然這些採收與輔助採收技術尚未有能通用於各種藻種與案例的採收技術，但在更先進的採收技術發明之前，改良目前的技術，用最佳的組合來符合微藻能源應用的低能耗與低成本需求，是目前最有希望的研發途徑。

參考文獻

1. Spolaore, P., C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert, "Review-Commercial Application of Microalgae," *Journal of Bioresource and Bioengineering*, 101, 2 (2006)
2. 陳麗婷, 陳淑芳 "IT IS產業評析": 財團法人 食品工業發展研究所(2008)
3. NREL, A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae (1998)
4. USDOE, National Algae biofuels Technology Roadmap (2009)
5. Weissman, J. C. and Goebel, R. P., 1987, Design and Analysis of Microalgal Open Pond Systems for the Purpose of Producing Fuels. Subcontract Report of U.S. Department of Energy
6. Borodyanski, G. and Konstantinov, I., 2003, Microalgae separator apparatus and method. United States Patent 6524486
7. NSW Fisheries, FRDC (Fisheries Research and Development Corporation) Project No. 93/123 & 96/342: Production of Microalgal Concentrates for Aquaculture (2001)
8. 曾文燾, 李寶華, 蔡昭鈴, 叢威, 歐陽藩, "微藻細胞的連續氣浮法採收," *水生生物學報*, 27, (2003)
9. Spolaore, P., C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert, "Review-Commercial Application of Microalgae," *Journal of Bioresource and Bioengineering*, 101, 2 (2006)
10. Nick Szadzanoff, "Modeling and Simulation of the Algae to Biodiesel Fuel Cycle", Honors Undergraduate Thesis, The Ohio State University (2006)
11. Weissman, J.C.; Goebel, R.P. "Design and analysis of pond systems for the purpose of producing fuels." Report to the Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado SERI/STR-231-2840 (1987)
12. Gilbert V. Levin, John R. Clendenning, Ahron Gibor and Frederick D. Bogar, "Harvesting of Algae by Froth Flotation," *Applied and Environmental Microbiology*, 10 (1962)
13. Bosma, R., van Spronsen, W. A., Tramper, J. and Wijffels, R. H., 2004, Ultrasound, a new separation technique to harvest microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 15, 143-153
14. Pui Chi Leung, Effects of Extracellular Polymeric Substances on the Bioflocculation and Sedimentation of Diatom Blooms and Activated Sludge, thesis, University of Hong Kong December 2003