

二氧化碳再利用—— 微藻養殖

■ 張嘉修、陳俊延、林志生、楊勝仲、周德珍、郭子禎、顏宏偉、李澤民

微藻因光合作用效率高、成長快速，藉由微藻培養的二氧化碳減量效率是一般植物的數十倍以上。運用生物科技與工程技術養殖微藻進行二氧化碳減量，特別是直接引用含二氧化碳的工業廢氣來養藻減碳，更是值得發展。

19 世紀以來的工業化，造就了人類社會的繁榮與便利，但帶給環境的危害也日益嚴重，特別是工業活動產生的溫室氣體急遽增加，導致全球氣候變化，不僅影響生態平衡，甚至危害生存環境。因此，各先進國家無不把溫室氣體減量當成永續發展的重要政策。

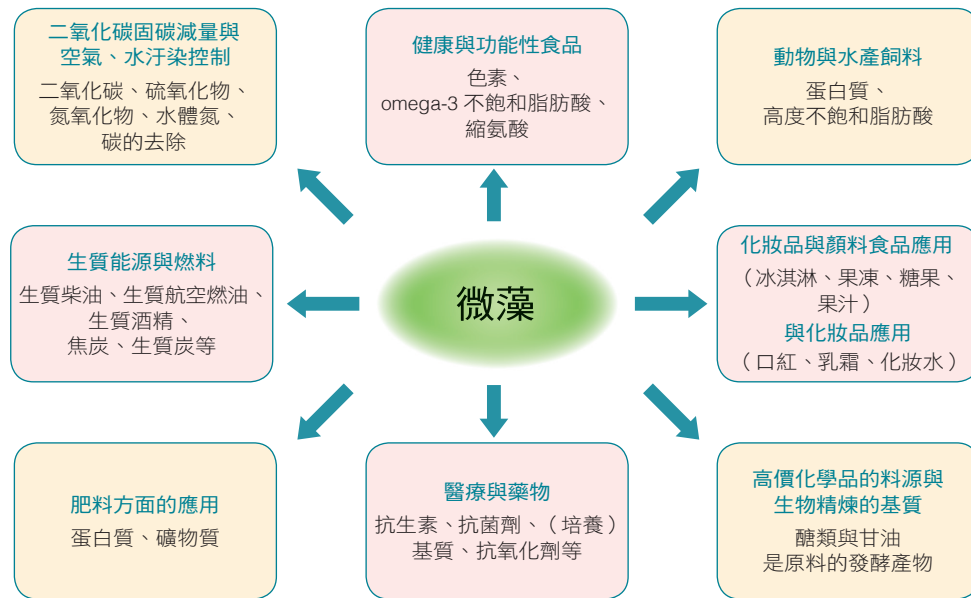
在工業排放的溫室氣體中，以二氧化碳為最大宗。微藻因光合作用效率高、成長快速，藉由微藻培養的二氧化碳減量效率是一般植物的數十倍以上。運用生物科技與工程技術養殖微藻進行二氧化碳減量，特別是直接引用含二氧化碳的工業廢氣來養藻減碳，更是值得發展。

微藻的用途

藻類具有光合作用色素可以行光合作用，依大小分為巨藻與微藻。微藻是指 1 ~ 10 μm 的單細胞藻類，生物量非常大且分布廣，在海水、淡水或潮溼的土壤中都能發現。目前，地球上的微藻超過 20 萬種，由微藻進行光合作用所固定的二氧化碳，占地球全部二氧化碳固定量的 40 % 以上，因此養殖微藻固碳有助於二氧化碳的減排。

常見的減碳技術有物理法、化學法及生物法。生物法是利用植物或藻類行光合作用來捕獲與固定二氧化碳，同時轉換成各種生物質。因微藻生長快且利用二氧化碳的效率高，所以當前傾向以微藻養殖為工廠煙道氣的減碳方法。此外，其所需的土地面積小、不需利用農耕地，且能以海水或廢水養殖，而可大幅降低陸地與淡水資源的需求。對於地狹人稠、四面環海、日照充足且四季溫度變化小的台灣而言，特別適合微藻減碳、微藻高產值產品、微藻生質能等技術的發展。

利用植物或藻類的光合作用可捕獲與固定二氧化碳，同時轉換成各種生物質。



微藻養殖具有生產生物質、減碳、控制水汙染等多重效果，而微藻生物質除了可用於各項生物燃料或特化原料的生產外，藻體中所含的特定醣類、蛋白質、脂質等也有開發成高價值產品的潛能。

微藻生物質可用於各項生物燃料如生質柴油、生質酒精、氫氣、焦炭等的生產，微藻經光合作用可把二氧化碳轉化為醣類、蛋白質、脂質等細胞組成。因此，在固碳時也能同時生產有用的物質如生理活性物質、色素如葉黃素與類胡蘿蔔素、omega-3 脂肪酸如 EPA 與 DHA 等的藻種最具經濟效益。此外，微藻也能做為動物或水產養殖飼料，以及用來處理廢水與廢氣。

微藻養殖

微藻因種類或生長環境的不同，人工養殖有自營、異營或混營等方式。自營培養指微藻利用光源為能量，並以無機碳源如二氧化碳行光合作用得到生長所需的化學能，是最常見的人工培養方式。最大的

問題在於自營培養時藻類大多僅利用溶在水中的二氧化碳，但二氧化碳的溶解速率非常低，因此藻類的生長速率緩慢。

異營培養指微藻在無光照下，可像細菌一樣利用培養基中的有機碳源如醋酸鈉、醣類等做為能量來源而生長。最大的優勢是不需光照，易於高密度養殖，生長速率可以是自營培養的數十倍以上，且易於放大規模培養。主要缺點是碳源與其他營養源成本過高、產物化學結構因異營培養而有些微差異，且在培養過程中常遭受微生物汙染。

混營培養則是指微藻可同時進行自營生長和異營生長，使用有機碳源為能量，而其利用呼吸作用所釋放的二氧化碳也可被微藻捕獲進行光合作用，因此生長速率大於自營培養，較符合經濟效益。

微藻生物質可用於各項生物燃料的生產，在固碳時也能同時生產有用的物質。

然而，以減碳為主要目標的微藻養殖，多採自營生長方式，其生長時所需主要調控條件是光照、溫度、二氧化碳、培養基中的營養成分等。其中許多條件屬於環境因子，因此大都利用微藻養殖系統的設計來提升微藻的養殖效率。目前，微藻規模化人工培養有開放池和（半）密閉反應器兩種方式，後者因可提供較充足的光線而稱為光生物反應器。

開放池培養如迴圈跑道池或槽式，設置成本較低，且管理所需人力較少。最大問題是無法有效控制環境因子、藻細胞密度較低（微藻產率低）、易於被其他微藻污染。此外，因顧及光照效應，開放池深度通常僅有 30 ~ 50 公分，所以通入養殖池中的二氧化碳溶解於微藻培養液的效率低，減碳的效果較差。

利用光生物反應器培養微藻可達到較高的藻細胞密度（微藻產率高），由於通入反應器的二氧化碳在養殖液中有較長的滯留時間，並可充分進行氣液混合，因此二氧化碳溶解於培養液中的效率高，減碳的效果也較佳，但造價和運轉成本較高。如果所生產的微藻無法有較高的經濟價值，大規模養殖就不可行。

無論是開放池或光生物反應器的微藻養殖系統，光照效率、氣體交換效率及懸浮微藻的攪拌效率都是系統設計的主要考量因子，在高密度微藻養殖時尤為重要。

我國微藻減碳的研發

中鋼公司為配合經濟部 and 環保署的碳捕獲與封存（carbon capture and storage, CCS）策略，在 2009 年起的第 1 期能源國家型科技計畫中，與成功大學和交通大學

研究團隊共同建立二氧化碳捕獲示範工場。藉由篩選與馴養本土小球藻，分離出能耐高溫、高二氧化碳且具高生長效率的產油微藻株，並在廠區內建置一規模達 1.2 公噸的戶外實場煙道氣微藻養殖模組，直接引入廠區內的煙道氣養殖微藻。

這模組的固碳效能維持在 $250 \text{ g} / \text{m}^3 / \text{day}$ 以上，對煙道廢氣中二氧化碳的移除率高於 60%，對氮氧化物與硫氧化物也有高達 90% 以上的去除率。這模組除了可成為我國工廠廢氣生物減碳的關鍵技術外，所生產的微藻生物質很適合做為生質柴油的原料。這模組曾在中鋼成功運作超過 3 年，實證我國微藻養殖技術對於空氣污染防治的可行性與永續性。

台電公司是提供國內電力的重要來源，而化石燃料燃燒後會產生很多的二氧化碳。該公司於 1998 年起就開始微藻固碳的研究，2007 年在大林火力發電廠建立 10 公噸開放式微藻養殖池，收集電廠煙道煙氣以海水脫硫後養殖微藻，年減碳效應約為一百公斤。

另外，台電公司也建立 28 公噸立體微藻光生物反應器，在相同面積下，減碳效率約為開放池的 7.4 倍。為提升微藻養殖速率與減碳效益，另以特定 LED 光源比率提供微藻光照來源，結果顯示在相同規模條件下，立體微藻光生物反應器的減碳效能可增加至每年約 2.3 公噸。

台泥公司從 2013 年起，與能源署、工研院在花蓮和平水泥廠共同建立我國首座鈣迴路二氧化碳捕獲先導型試驗廠，並整合該項設施開發微藻養殖先導試驗廠，進行生物固碳研究，進一步發展成碳捕獲、封存與再利用策略，即利用鈣迴路捕獲的

二氧化碳做為微藻養殖所需的碳來源。由於碳源純度高，因此可提高效益用於培養含高單價衍生物質的微藻株。

為提升微藻固碳效能，且使研究成果產業化，成功大學研究團隊在安南校區建立亞洲第 1 個跨領域大型戶外微藻養殖模廠，並計劃把這微藻養殖基地打造成亞洲第 1 個結合生態、保健、能源、醫學等研發領域的示範科技園區，設置微藻鑑定、保存、成分分析、量產測試平台，針對台灣本土特殊藻種進行純化與開發，並對具商業性藻種進行產品開發和商業化測試。

目前，已設置的光生物反應器模組包含 10 公噸等級的跑道式微藻培養系統、40 公噸以及 300 公噸規模的大型槽式微藻培養系統。研發團隊將致力於改良微藻戶外大規模養殖系統，提升微藻固碳能力以及煙道氣二氧化碳減量，同時開發高單價微藻產品如葉黃素、DHA、EPA 等的生產技術和商品化評估，使微藻養殖在減碳的同時能大幅提升附加價值。

國際微藻減碳與再利用

近年來，國際間因應減碳並開發微藻養殖與應用事業的公司紛紛成立。以色列的 Scambiotic 是全世界第一個直接利用電力公司發電廠廢氣進行微藻養殖的企業，不但能有效減少二氧化碳的排放量，也證實微藻能利用二氧化碳快速生產生物質做後續開發與應用，目前正處於由實驗工廠轉成大規模微藻養殖與生產工業的階段。

美國 GreenFuel Technologies 也是利用發電廠排放的二氧化碳來養殖藻類，並萃取藻油製成生質柴油。該公司所開發的微藻養殖系統在白天可捕獲近 80% 從發電廠排放的二氧化碳，每公畝養殖的微藻可生



中鋼公司與成功大學和交通大學研究團隊共同建立的「導入工業煙道廢氣微藻養殖的實場模組」，分別是壓克力管柱式（左圖）和塑膠袋式（右圖）兩種生物光反應器模組，這是公噸級戶外實場微藻養殖系統，直接導入中鋼工廠煙道廢氣，達到二氧化碳減量與微藻生物質生產的雙重效用。



成功大學研究團隊在安南校區建置的戶外大規模微藻養殖系統，包含 50 公升等級的管柱型光生物反應器（左上圖）、6 公噸等級的槽式微藻培養系統（右上圖）、10 公噸等級的跑道式微藻培養系統（左下圖），以及 40 公噸規模的大型槽式微藻培養系統（右下圖）。

產約七千加侖的航空燃料、五千加侖的乙醇及一千公噸的藻蛋白質。該公司也與西班牙 Aurantia 公司合作，在西班牙 Holcim 水泥廠旁建構 100 公頃的藻類養殖設備，預計每年可生產 25,000 公噸藻生物質。

美國 Solix Biofuels 公司利用公司周邊啤酒廠所產生的二氧化碳大規模養殖微藻，

用微藻生物質做為飼料產品的原料，以解決全球氣候變遷與糧食缺乏的困境。美國 LiveFuels 公司則透過養殖藻類大規模進行二氧化碳減量與淨化農業廢水的策略，利用含農業廢棄物養分的河川與海洋交匯點的天然環境養殖藻類以降低成本，帶動藻類下游產業的發展，包括微藻生質柴油產業。

此外，還有以研發微藻生長、最有效率收集方法或開發微藻高附加價值產品為主要的公司。例如，荷蘭的 AlgaeLink 設計製造微藻生長光生物反應器系統，提供該系統的技術支援，開發微藻應用與推廣；Cellana 公司主要利用海藻養殖生產生質燃料的料源、水產餌料、動物飼料、化妝品、化學原料等，並可減少工業的二氧化碳排放量。A2BE Carbon Capture 主要是開發微藻體採收系統和微藻捕獲工業排放的二氧化碳並再利用的系統，進一步製作高單價產品、生質燃料或保健食品。

前景可期

近十年來，微藻科技一直都是已開發國家、國際間重要能源或環保研究機構，以及大型能源公司非常重視的研發主題，無論用於產製生質能源或進行二氧化碳減量，都值得期待。雖然目前技術尚未達到經濟效益的階段，但這也是全球相關領域者極力投資與發展的原因。

我國在微藻科技領域的研究雖起步較晚，投入資源較少，但從事微藻科技研究的學研機構與公私營研究單位已逐步連結成幾個實力堅強的研究團隊，研究能量與技術分工也拓展至微藻產業上、中游，期待在大家努力下能加速微藻科技的產業化。

張嘉修

成功大學化學工程學系

陳俊廷

成功大學生物科技中心

林志生

交通大學生物科技學系

楊勝仲

金屬工業研究發展中心生技能源設備組

周德珍

輔英科技大學生物技術系

郭子禎

金屬工業研究發展中心能源與精敏系統設備處

顏宏偉

東海大學化學工程與材料工程學系

李澤民

中山大學海洋生物研究所

深度閱讀資料

陳慶隆、陳俊廷、張嘉修、林志生、陳俊廷、林勳佑（2013），微藻減碳與微藻生產生質能源，台灣化學工程學會會刊，60，14-27。