

全球水產植物藻類研發 現況與趨勢

撰文/朱鴻鈞·劉翠玲·楊玉婷

藻類物種豐富全球現已知約有4萬種，涵蓋了生物分類五大界中的原核生物界、原生生物界和植物界。根據藻類所含的色素種類、儲藏物質、細胞壁成分、鞭毛數目和著生位置、細胞及細胞構造的特徵等，可將藻類概分為數個真核門(eukaryotic phyla)，包括紅藻門(Rhodophyta)、綠藻門(Chlorophyta)、褐藻門(Phaeophyta)、矽藻門(Bacillariophyta)和渦鞭毛藻(dinoflagellates)等，以及原核門(prokaryotic phylum)如藍綠藻(Cyanobacteria)。型態上則有球菌、阿米巴型(amoeboid)、膠狀群體(palmelloid)、群聚(colonial)、變形體(plasmodium)、絲狀體(filamentous)、間質型(似組織結構)(parenchymatous)和葉狀體(thalloid)等，另外某些藻類更發展出類似維管束植物的葉片、根和枝幹等較複雜的結構。大小則從細胞直徑小於1 μm 的單一細胞到60公尺高的多細胞有機體都有可能。

藻類多樣化的特性與生長條件，使其具有極高的商業利用性，除了生產特殊蛋白質和脂肪等營養源，用於製藥、保健食品、農業和動物營養添加外，亦可作為再生能源和肥料，某些種類具有多醣的膠質(hydrocolloids)則可應用於工業用途，而矽藻土可提升硝化甘油穩定性，甚至可做為炸藥原料。在過去二~三十年間，隨著多元化的應用，許多新創企業開始瞭解藻類的應用潛力，目前藻類生技產業每年約產出千萬噸的藻類供作食品、飼料、食品及

飼料添加劑、化妝品與色素等，雖然目前所有商業化的藻類皆為非基改藻類，但隨著相關的研發活動持續的進行，此狀況可能會快速改變。

過去幾年中，已有約25種藻類成功完成基因改造(表一)，其中多數是藉由核轉移(nuclear transformation)技術達成。綠藻中有10種物種完成轉殖，7種為穩定轉殖(stable transformation)；紅藻中目前有6個物種已進行轉殖；在大型藻中褐藻也有2個穩定轉殖的成功案例。矽藻中有4個物種已有穩定轉殖的報告；渦鞭毛藻中的兩屬*Amphidinium*、*Symbiodinium*以及裸藻眼蟲(*Euglena gracilis*)也已完成基因改造。其他種類如螺旋藻(*Arthrospira platensis*)等藍綠藻，也可利用電穿孔(electroporation)或結合生殖(conjugation)等方式進行基因改造。

基因改造藻類研發技術現況

針對目前的研究概況，以下分別就適合進行基因改造研究之藻類品種、藻種轉殖效率、篩選標誌、啟動子與報導基因以及導入外源DNA之研究方法等項目，進行技術現況之分析與說明。

1. 適合進行基因改造研究之藻類品種

在藻類品種部分，藻類進行基因改造最主要的考量在於該種生物的繁殖難易度，由於小型藻的生活史短暫，且可培養於液態、無菌、已知成分的合成培養基中，所以很適合用來做為轉殖實驗的材

表一 已建立轉殖系統之藻種

物種	轉殖基因	轉殖目的	發展情形
綠藻(Green algae)			
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Chlorophyta; Chlorophyceae; Volvocales; Chlamydomonadaceae	穩定	Debuchy <i>et al.</i> , 1989; Kindle <i>et al.</i> , 1989
<i>Volvox carteri</i>	Chlorophyta; Chlorophyceae; Volvocales; Volvocaceae	穩定	Schiedlmeier <i>et al.</i> , 1994
<i>Dunaliella salina</i>	Chlorophyta; Chlorophyceae; Volvocales; Dunaliellaceae	穩定	Geng <i>et al.</i> , 2003, 2004; Tan <i>et al.</i> , 2005
<i>Dunaliella viridis</i>	Chlorophyta; Chlorophyceae; Volvocales; Dunaliellaceae	穩定	Sun <i>et al.</i> , 2006
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Chlorophyta; Chlorophyceae; Volvocales; Haematococcaceae	穩定	Steinbrenner and Sandmann, 2006
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Chlorophyta; Trebouxiophyceae; Chlorellales; Chlorellaceae	穩定	Dawson <i>et al.</i> , 1997
<i>Chlorella kessleri</i> (<i>Parachlorella kessleri</i>)	Chlorophyta; Trebouxiophyceae; Chlorellales; Chlorellales incertae sedis	穩定	El-Sheekh, 1999
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	Chlorophyta; Trebouxiophyceae; Trebouxiophyceae incertae sedis	短暫	Jarvis and Brown, 1991
<i>Chlorella vulgaris</i>	Chlorophyta; Trebouxiophyceae; Chlorellales; Chlorellaceae	短暫	Chow and Tung, 1999
<i>Ulva lactuca</i>	Chlorophyta; Ulvophyceae; Ulvales; Ulvaceae	短暫	Huang <i>et al.</i> , 1996
紅藻(Red algae)			
<i>Cyanidioschyzon merolae</i>	Rhodophyta; Bangiophyceae; Cyanidiales; Cyanidiaceae	穩定	Minoda <i>et al.</i> , 2004
<i>Porphyra yezoensis</i>	Rhodophyta; Bangiophyceae; Bangiales; Bangiaceae	穩定	Cheney <i>et al.</i> , 2001
<i>Porphyra miniata</i>	Rhodophyta; Bangiophyceae; Bangiales; Bangiaceae	短暫	Kabler <i>et al.</i> , 1993
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Rhodophyta; Florideophyceae; Gigartinales; Solieriaceae	短暫	Kurtzman and Cheney, 1999
<i>Gracilaria changii</i>	Rhodophyta; Florideophyceae; Gracilariales; Gracilariaceae	短暫	Gan <i>et al.</i> , 2003
<i>Porphyridium</i> sp.	Rhodophyta; Bangiophyceae; Porphyridiales; Porphyridiaceae	穩定 (葉綠體轉殖)	Lapidot <i>et al.</i> , 2002
褐藻(Brown algae)			
<i>Laminaria japonica</i>	Phaeophyta; Phaeophyceae; Laminariales; Laminariaceae	穩定	Qin <i>et al.</i> , 1999
<i>Undaria pinnatifida</i>	Phaeophyta; Phaeophyceae; Laminariales; Alariaceae	穩定	Qin <i>et al.</i> , 2003

(待續)

表一 已建立轉殖系統之藻種

物種	轉殖基因	轉殖目的	發展情形
矽藻(Diatoms)			
<i>Phaeodactylum tricomutum</i>	Bacillariophyta; Bacillariophyceae; Bacillariophycidae; Naviculales; Phaeodactylaceae	穩定	Apt <i>et al.</i> , 1996; Falcatore <i>et al.</i> , 1999, 2000; Zaslavskaja <i>et al.</i> , 2000, 2001
<i>Navicula saprophila</i> (<i>Fistulifera saprophila</i>)	Bacillariophyta; Bacillariophyceae; Bacillariophycidae; Naviculales; Naviculaceae	穩定	Dunahay <i>et al.</i> , 1995
<i>Cylindrotheca fusiformis</i>	Bacillariophyta; Bacillariophyceae; Bacillariophycidae; Bacillariales; Bacillariaceae	穩定	Fischer <i>et al.</i> , 1999
<i>Cyclotella cryptica</i>	Bacillariophyta; Coscinodiscophyceae; Thalassiosirophycidae; Thalassiosirales; Thalassiosiraceae	穩定	Dunahay <i>et al.</i> , 1995
<i>Thalassiosira weissflogii</i>	Bacillariophyta; Coscinodiscophyceae; Thalassiosirophycidae; Thalassiosirales; Thalassiosiraceae	短暫	Falcatore <i>et al.</i> , 1999
裸藻(Euglenids)			
<i>Euglena gracilis</i>	Euglenozoa; Euglenida; Euglenales	穩定 (葉綠體轉殖)	Minoda <i>et al.</i> , 2004
渦鞭毛藻(Dinoflagellates)			
<i>Amphidinium</i> sp.	Alveolata; Dinophyceae; Gymnodiniales; Gymnodiniaceae	穩定	ten Lohuis and Miller, 1998
<i>Symbiodinium microadriaticum</i>	Alveolata; Dinophyceae; Suessiales; Symbiodiniaceae	穩定	ten Lohuis and Miller, 1998
藍藻(Cyanobacteria)			
<i>Spirulina platensis</i> (<i>Arthrospira platensis</i>)	Cyanobacteria; Oscillatoriales	穩定	Kawata <i>et al.</i> , 2004
<i>Amphidinium</i> sp.	Cyanobacteria; Nostocales; Nostocaceae	穩定	Thiel and Poo, 1989
<i>Symechocystis</i> sp.	Cyanobacteria; Chroococcales	穩定	Dzelkalns and Bogorad, 1986

資料來源：Hallmann, 2007；台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

料。此外光自營生物 (photoautotroph) 只要有光、水和基礎營養就可以生長，而多數藻類屬於這類生物。若是藻類的突變株容易取得，或是已經存在許多既有的突變株，也會有利於基因改造實驗的進行。而基因體套數則是越少越理想，甚至是單倍體最為適合。最後，藻類基因序列資訊則是最重要的一環，藻類的基因體研究，可說是藻類及其相關產品的生物技術及基因科技研究的基礎。目前已有紅藻中的 *Cyanidioschyzon merolae*、矽藻中的假微型

海鏈藻 (*Thalassiosira pseudonana*)、綠藻中的衣藻 (*Chlamydomonas reinhardtii*) 及 *Ostreococcus tauri* 已定序完成。

另外，藻類轉殖效率和具生產活性轉殖株 (transformant) 的數量亦會因物種而有所差異。當藻類越大且越複雜時，所能取得或能處理的穩定轉殖株就越少，因此多數的實驗室會選擇以微藻類做為研究對象。

2. 篩選標誌

由於基因轉殖試驗的成功率很低，使用篩選標誌 (selection marker) 協助成功轉殖株之辨認是實驗中不可或缺的一部分。目前多數的篩選標誌建立於衣藻的研究系統上，氨基糖苷類腺苷酸轉移酶 (aminoglycoside adenytransferase) 基因 (*aadA*)、*Streptoalloteichus hindustanus* 的 *ble* 基因、突變的 protoporphyrinogen oxidase 基因 (*ppx1*)、氨基糖苷磷酸轉移酶 (aminoglycoside phosphotransferase aphVIII) 基因 (*aphH*) 等抗性基因廣泛的被應用於基因改造衣藻的篩選。

同樣地在多細胞綠藻 - 團藻 (*Volvox carteri*) 基因轉殖試驗部分，也有許多抗生素基因被選為篩選標誌如：*Streptoalloteichus hindustanus* 的 *ble* 基因以及氨基糖苷磷酸轉移酶 (aminoglycoside phosphotransferase aphVIII) 基因 (*aphH*)。

而其他單細胞綠藻部分，綠藻 (*Chlorella vulgaris*) 曾使用吸水鏈黴菌 (*Streptomyces hygroscopicus*) 的氨基葡萄糖苷磷酸轉移酶 (aminoglycoside phosphotransferase) 基因做為標誌；乙醯乳酸合成酶 (acetohydroxyacid synthase) 基因 [*ahas(w492s)*] 的突變型也被建立為篩選標誌，搭配除草劑 sulfometuron methyl，可用於紅藻 (red alga) 葉綠體轉殖株之篩選；在矽藻 (diatom) 的研究成果方面，*Streptoalloteichus hindustanus* 的 *ble* 基因、氯黴素乙醯轉移酶 (chloramphenicol acetyltransferase) 基因 (*cat*)、新黴素磷酸轉移酶 (neomycin phosphotransferase II) 基因這些抗性基因亦曾被選為三角褐指藻 (*Phaeodactylum tricorutum*)、轉殖實驗之篩選標誌。

渦鞭毛藻的 (*Amphidinium* sp.) 以及蟲黃藻 (*Symbiodinium microadriaticum*) 的轉殖試驗則可利用 *nptII* 基因或是 hygromycin B phosphotransferase 基因，做為篩選標誌。

除了顯性標誌外，藻類研究系統中也有許多隱性的標誌被開發出來。雖然隱性標誌需要內生性基

因突變造成營養缺陷的突變株以及相對應且完整的互補基因，但是在使用隱性標誌也有許多優勢，包括標誌基因的啟動子即為內生性基因之啟動子，因此相較於顯性標誌，缺少了確認標誌是否能在目標生物體上表現、功能能否發揮等先置作業之程序。以常見的隱性基因：硝酸鹽還原酵素基因 (nitrate reductase gene, *nit*) 為例，*nit* 被用於回復硝酸鹽還原酵素缺失的衣藻、團藻、杜氏鹽藻 (*Dunaliella viridis*)、小球藻 (*Chlorella sorokiniana*)、石蓴 (*Ulva lactuca*) 突變株。藉由回復 *nit* 基因，原本該基因有缺陷的 *nit*- 突變株便可利用硝酸鹽做為氮來源，在缺乏其他氮源的培養環境下存活下來。而硝酸鹽還原酵素基因不僅還原硝酸鹽，亦可還原硝酸鹽類似物氯酸鹽 (chlorate)，但氯酸鹽還原後的產物亞氯酸鹽 (chlorite) 具有毒性，並且足以殺死藻類細胞。因此硝酸鹽類似物氯酸鹽可做為 *nit*⁺ 轉殖株篩選時二次確認的工具。藻類研究系統中篩選標誌出色的研究成果，是藻類進行轉殖試驗不可或缺的基礎以及重要的推動力量。

3. 啟動子與報導基因

合適的啟動子和報導基因，是一物種在進行基因轉殖實驗時重要的研究工具。一個好的啟動子其功能包括：可使基因表現更為強烈、可使基因穩定表現、可被誘導而表現。

在內生性啟動子的應用上，過去衣藻的研究方面已有許多文獻發表包括：RBCS2 (ribulose biphosphate carboxylase, small chain) 基因的啟動子、heat shock protein 70A (*HSP70A*)/RBCS2 融合啟動子以及 *HSP70A*/β2TUB (β2-tubulin) 融合啟動子等可供利用。團藻部分，arylsulfatase 基因 (*ARS*) 的啟動子能受 sulfur deprivation 誘導而起動；β-tubulin 啟動子、*HSP70*/*RBCS3* 融合啟動子也被證實具有功效。而 *ARS* 基因和編碼最適化的綠色螢光蛋白基因 (*GFP*) 則是極具價值的報導基因。水母冷光酶 (*Renilla reniformis luciferase*) 基因 (*crLuc*) 也有應用於衣藻轉殖實驗的案例。

外源啟動子方面目前有兩個重要的外源啟動子：CaMV35S 以及 SV40 被廣泛應用於藻類基因改造實驗。由 CaMV35S 啟動子以及大腸桿菌 (*Escherichia coli*) 的 β -glucuronidase (GUS) *uidA* 報導基因所構築的載體，已被成功用於許多藻種如：杜氏鹽藻、小球藻、綠藻 (*Chlorella vulgaris*)、條斑紫菜 (*Porphyra yezoensis*) 以及紫菜 (*Porphyra miniata*) 上。而以 SV40 啟動子進行的研究則有以 SV40 啟動子與大腸桿菌的 β -galactosidase 基因 (*lacZ*) 所構築的載體，進行龍鬚菜 (*Gracilaria changii*) 基因改造。

另外 fucoxanthin-chlorophyll a/c-binding protein 基因 (*fcp*) 的啟動子與 luciferase 報導基因 (*luc*) 以及 β -glucuronidase (GUS) *uidA* 與 GFP 報導基因構築之載體亦應用於三角褐指藻之轉殖基因研究。

4. 導入外源DNA之研究方法

所有的藻類轉殖方式皆以造成細胞膜暫時的通透性，讓 DNA 分子進入細胞為基礎，而後續 DNA 進入細胞核並且嵌合入基因體之步驟，則無法藉由外力的協助。事實上，要增加細胞膜的通透性讓 DNA 進入細胞並不難，難的是如何讓成功轉殖的生殖細胞在遭受到破壞與外來 DNA 嵌入後，能繼續存活下來並繼續細胞分裂的過程。

最為普遍的導入方式為基因槍粒子轟擊法 (micro-particle bombardment, micro-projectile bombardment, particle gun transformation, gene gun transformation, simply biolistics)，此方式利用 DNA 包覆之重金屬微粒子穿過細胞壁，可用於各種細胞甚至可進行胞器之轉殖，目前已成功應用於衣藻、團藻、杜氏鹽藻、海帶 (*Laminaria japonica*)、三角褐指藻、小球藻、眼蟲藻 (*Euglena gracilis*)、羊栖菜 (*Cylindrotheca fusiformis*) 等。

另一較不複雜且成本較低之轉殖方式為製備藻類懸浮液，在懸浮液中加入微粒子或是巨粒子、聚乙二醇 (polyethylene glycol, PEG)、DNA 載體，利用攪動懸浮液的方式讓 DNA 進入細胞中。許多研究人員利用碳化矽鬚 (Silicon carbide whisker) 作為

微粒子材料，堅硬的微粒子能對具有完整細胞壁的細胞成功進行轉殖，已成功的案例如：衣藻、蟲黃藻和前溝藻類 (*Amphidinium* sp.)，縱使能用於具有完整細胞壁的細胞，但細胞壁經過降解的藻類細胞似乎更適合以此方式進行基因改造，例如：細胞壁弱化之衣藻突變株能以較大玻璃珠 (直徑約 0.4-0.5 mm) 完成轉殖。這種耗費較低廉的實驗方法已是衣藻經常進行基因改造的實驗方式。而細胞壁更進一步完全被移除之綠藻 (*Chlorella ellipsoidea*) 原生質體，則能夠在沒有微粒子或是巨粒子存在的情形下完成轉殖試驗。

缺乏細胞壁、細胞壁弱化的突變株、原生質體或是其他細胞壁薄者，也能以電脈衝胞膜穿孔法 (electroporation) 的方式進行轉殖，電脈衝胞膜穿孔法使用外加電場，利用極短時間電擊 (electric pulse) 的方式，使得細胞的磷脂雙層膜上產生短暫性的孔洞，允許 DNA 穿過孔洞進入細胞。衣藻、紅藻 (*Cyanidioschyzon merolae*)、杜氏鹽藻，以及綠藻 (*Chlorella vulgaris*) 皆曾以此方式進行轉殖。

此外，農桿菌 (*Agrobacterium tumefaciens*) 的轉殖方式亦能應用於藻類。農桿菌透過腫瘤誘導質體 (tumor inducing (Ti) plasmids)，以半隨機的方式進入植物的基因體中並且在植物體上造成腫瘤 (crown galls) 的病徵。一般農桿菌感染的對象為雙子葉植物以及某些單子葉植物，但實驗證實農桿菌的確也能感染某些藻類並且不會形成腫瘤的病徵，包括屬於多細胞的紅藻 (*Porphyra yezoensis*) 以及單細胞的衣藻。

基因改造藻類應用現況

隨著基因改造實驗持續累積以及技術不停突破，藻類的基因體定序研究或基因改造藻類的開發皆大有斬獲，基因改造科技的導入除可提高藻類生長密度，提升養殖環境耐受性之外，更重要的是利用基因改造藻類，進一步產生新的產品或衍生出藻類的特殊功能。以下分就基因改造藻類之應用層面

進行說明：

1. 生質能源科技應用

隨著現今能源短缺、空氣汙染增加和全球暖化等現象發生，替代能源逐漸受到重視。藻類的應用潛力即是生產替代能源，其中利用大型藻當作生物質 (biomass) 以生產甲烷作為能源是一方式，而矽藻因具有高產量且含豐富油脂，也可提煉出生質柴油。根據 Emerging Markets Online(2010) 資料顯示，美國與歐洲為生質柴油主要市場，從 2005 年開始兩地區便快速擴增生物精煉 (biorefinery) 產能 (capacity)，但相對受限於原料作物 (大豆、油菜籽等) 的不足，使得產量成長速度不若產能 (附圖)。而藻類的產油量最高可達 10,000 加侖/英畝，高於大豆的 40-50 加侖/英畝、油菜籽 120-150 加侖/英畝、麻瘋樹的 175-250 加侖/英畝、棕櫚的 650 加侖/英畝，加上藻類的生產不與農作物爭地之特性，遂成為生質柴油重要原料之一。

有鑑於替代能源商機，許多企業紛紛投入藻類生質柴油的開發，石油巨擘埃克森美孚公司 (Exxon Mobile) 於 2009 年宣布與合成基因體學公司 (Synthetic Genomics Inc., SGI) 合作發展藻類生質燃料，預計於 5-6 年內投資 6 億美元進行量產測試；2010 年已完成溫室設施建立，進行藻類量產生質燃料之可行性測試，其中包含天然及基改的藻類，若開發成功，每英畝藻類可年產 2,000 加侖的油。此外，以藻類作為生質燃料的實際應用性，亦在發展當中，2009 年初，美國大陸 (Continental) 航空公司已試飛過部分動力來自藻類生質燃料的飛機，試飛結果良好。目前數十家企業和許多大學研究室，都致力於將海藻成為生質能源的來源，其利用基因改造工程或化學性誘發突變等技術來提高海藻的功能。擁有培育超級海藻實驗室的藍寶石能源 (Sapphire Energy) 公司表示，他們已改變超過 4,000 個海藻品種的基因結構，就是要馴化出一種具經濟價值的植物。

然而以基因工程創造海藻品種同時，也引來

一些專家的憂慮。由於海藻在自然界中扮演重要的生態角色，除了製造氧氣外，也是海洋食物鏈的底層。若基改超級海藻不慎落入自然生態系統裡，可能會出現過度生長，影響水中生態，即使有企業堅持尋找合適和培育自然品種的海藻，但如何養殖海藻仍然是一大問題。由於海藻繁殖速度快並能隨風散播，未來相關管理機構，將要針對基因改造海藻到底是在開放式養殖池，或封閉的生物反應器內培育等制定規範。

利用藻類生產氫氣也備受重視，以氫氣產生能源係使其充分燃燒或使用燃料電池 (fuel cell)，最終產物僅有水，兼具環保目的。現有許多研究計畫正對這些藻類做最適化開發，如透過基因改造技術使衣藻增加產氫效率，而具體改良的策略包括在篩選高產氫效率的突變株、基因改造捕光複合體 (light harvesting antennae complexes)、對產氫酵素的最適化開發等。目前衣藻已被確認可每天在每平方公尺培養區域中產生 10mol(20g) 的氫氣，一旦該高產率效果可大規模生產，對於以氫氣作為再生能源來源將是非常有效率。

2. 水和土壤的生物復育(bioremediation)

鉛 (lead)、鎘 (cadmium) 和汞 (mercury) 為主要汙染土壤和水源的重金屬，在工業產品製造過程，包括塑膠製造、電鍍 (electroplating)、鎳鎘電池 (Ni-Cd battery) 生產、採礦和熔煉等產業，持續釋放大量重金屬於環境中。生物復育 (bioremediation) 便是利用 (微) 生物，讓環境恢復原始條件的一種方式。藻類可吸收環境中的重金屬如鎘，並引起重金屬壓力反應，然而高濃度重金屬也會阻礙藻類主要代謝 (如光合作用、生長)，最終導致細胞死亡。野生衣藻在其快速複製期對於高濃度的鎘具有耐性，而研究發現額外表現蛾豆 (mothbean)P5CS 基因的基改衣藻，則可生長於更高濃度的重金屬環境中。相較野生細胞，基改細胞可展現四倍之多的鎘結合能力，此外表現該基因也讓細胞可在一般致死鎘濃度中快速生長，該研究的發現將使利用藻類復育汙

染地區和水源，踏出顯著的第一步。

3. 分子農場(molecular farming)之應用

利用藻類分子農場的想法，是希望由此生產高價分子以用於藥品或工業，通常這些物質是無法或很難在其他系統中生產，或需要高額生產成本。其中一個應用實例即是利用藻類系統大規模生產抗體，目前衣藻已被證實可成功表現人類 IgA 單株抗體，但要達到高表現量和簡單純化抗體的目標，仍需進行最適化開發。此外，在傳統的抗體生產系統中，可能會因寄主動物細胞的免疫系統而影響抗體表現，此現象在藻類中因無免疫系統而不受干擾。

藻類亦被證實適合用於合成疫苗，Sayre(2001)等人專利顯示杜氏鹽藻已可穩定表現 B 型肝炎表面抗原基因，由於杜氏鹽藻可作為營養補充品，故無須純化該抗原，完整的藻體可直接當作疫苗的傳遞工具。其他計畫尚包括以藻類生產魚類傳染性皮下及造血組織壞死病毒 (hematopoietic necrosis virus, IHNV) 疫苗，該疾病造成美國每年 30% 的鱒魚死亡，要達到免疫目的只要簡單餵魚吃藻類即可。微藻也同時可用於表現殺蟲蛋白，如綠藻中的小球藻屬於蚊子幼蟲子子的食物之一，若將墨蚊有關抑制胰蛋白酶的多肽 (hormone trypsin-modulating oostatic factor, TMOF) 基因轉殖到綠藻中，一旦表現 TMOF 的綠藻被子子吃下，將會促使其在 72 小時內死亡。由於許多疾病如瘧疾、登革熱和西尼羅熱 (west Nile fever) 都是藉由蚊子傳播，對於熱帶國家若利用基改藻類消滅蚊子，可能為一便宜的替代

方案。

對進一步藻類生物技術的應用，許多研究者正從多樣化藻類品種中做篩選，以發掘有效的有機物質，如二次代謝物、抗真菌或抗細菌等生物分子、藻類毒素，或是藥物活性成分以作為候選藥物。

基改藻類跨界應用，商機無限延伸

雖然藻類基因改造和藻類生物技術仍需要更多基礎研究作為後援，以和其他研究系統媲美，但是在特殊性上，由於藻類的生理學、生態學、生化學和分子特性皆與較高等的植物或動物相差甚大，使藻類可達到許多其他研究系統未能滿足的需求。過去幾年藻類已被許多新創公司開發為生物反應器，同時某些成熟的生物技術公司亦考慮使用基因改造技術，透過基因修飾增加藻類生理特性以及使藻類生產系統達到最佳化，而最佳的應用契機應建立於已充分研究且成長快速的品種，如衣藻上。

藻類與人的關係始於數千年前的食用目的，隨著對藻類的了解愈為透徹，應用領域延伸至保健食品、添加劑、肥料、水質處理、化妝品，甚至藥品等，而生物技術的進步，更開拓藻類跨跨領域應用的疆界，在生質能源開發、環境復育，以及新興藥物研發上皆有所成果且備受矚目，相關產品在未來極具發展空間。而愈趨多元化的應用，使得藻類研究充滿無限可能性及潛在商機。

AgBIO

朱鴻鈞	台灣經濟研究院 助理研究員	生物科技產業研究中心	
劉翠玲	台灣經濟研究院	生物科技產業研究中心	專案經理
楊玉婷	台灣經濟研究院 助理研究員	生物科技產業研究中心	

參考文獻

1. 農業生技產業資訊網，From <http://agbio.coa.gov.tw/>。
2. 劉翠玲、許嘉伊 (2011) 全球水產藻類發展現況與趨勢。台灣經濟研究院月刊，34(3):43-49。
3. Hallmann, A. (2007) *Algal Transgenics and Biotechnology*. Transgenic Plant Journal 1:81-98.
4. Emerging Markets Online (2010) *Algae 2020 Biofuels Market Survey and Commercialization Outlook*.
5. Sayre, R. T., Wagner, R. E., Sir poranadulsil, S. and Farias, C. (2001) *Transgenic algae for delivery antigens to animals*. Int. Patent.