

# 國立交通大學

高階主管管理學程碩士班

碩士論文

以藻類生產生質柴油之經濟效益評估



The Assessment on Economic Benefit of Algal Bio-diesel in Taiwan

研究生：張羿宸

指導教授：丁承 教授

中華民國九十九年六月

以藻類生產生質柴油之經濟效益評估

The Assessment on Economic Benefit of Algal Bio-diesel in Taiwan

研究生：張羿宸

Student：Yi-Chen Chang

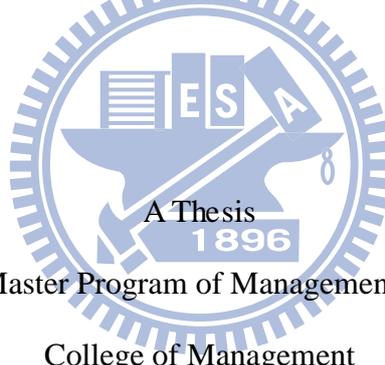
指導教授：丁 承

Advisor：Cherng G. Ding

國立交通大學

高階主管管理學程碩士班

碩士論文



Submitted to Master Program of Management for Executives

College of Management

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Executive Master

of

Business Administration

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

## 以藻類生產生質柴油之經濟效益評估

學生：張羿宸

指導教授：丁承 博士

國立交通大學 高階主管管理學程碩士班

### 摘 要

隨著油價的高漲，環保意識的抬頭，發展新型態且乾淨的替代能源成為全世界的首要目標。由於生質柴油具有生物可分解性、不含硫、無苯環化合物、燃燒排放物質較無污染等特性，於最近幾年愈來愈受到人們的重視，是一種兼顧環保並可永續經營的替代能源。目前生質柴油大部份由如大豆、油菜及棕櫚等陸生作物的油脂所製成，此可能引發「與人爭糧」及「與糧爭地」爭議，由於藻類之生長速率較植物快速，使得以藻類製造生質柴油成為目前研究開發的重點，然國內卻幾無藻類生產成本相關的資料可循。有鑑於此，本論文針對國內以藻類生產生質柴油的各種情況加以分析其成本，應用敏感度分析探討各因素對生產成本的影響，並提出相關建議。

本論文設定三種藻類生質柴油程序及兩個藻類生質柴油情境，經由各項分析結果得到開放式培養系統、密閉式光生物反應器及異營醱酵槽培養程序產製藻油的成本及內部報酬率分別為 22.73 元/公斤和 8.91%、27.94 元/公斤和 5.33%、24.83 元/公斤和 5.44%。此外，由敏

感度分析結果得到三項對藻類生質柴油經濟影響最大的因素，包括：(1)降低光合反應系統的建造成本；(2)增加藻體/油脂生產量；(3)高附加價值副產物的產量與價值或藻油售價。依此結果所得藻油成本仍無法與石化原油相比，但已與一般陸生油脂相近，未來仍有很大的機會能進一步降低成本，做為生質柴油的油脂料源。最後，本論文提出相關的微藻生質柴油產業經營管理與執行策略及未來能源藻類發展的建議，提供給國內對藻類生質柴油有興趣的人員參考，期能使其早日實現商業化生產。

關鍵字：微藻、生質柴油、經濟評估、敏感度分析



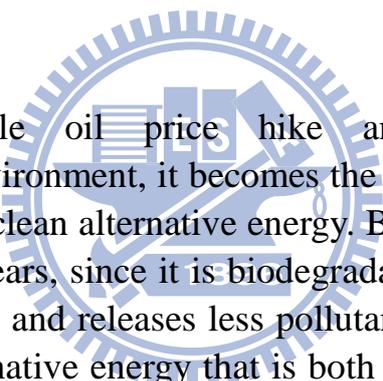
The Assessment on Economic Benefit of Algal Bio-diesel in Taiwan

Student : Yi-Chen Chang

Advisors : Dr. Cherng G. Ding

Master Program of Management for Executives  
National Chiao Tung University

ABSTRACT

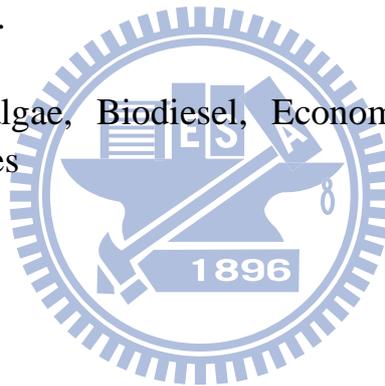


With noticeable oil price hike and increasing protective consciousness of environment, it becomes the prime goal for all countries to develop new and clean alternative energy. Biodiesel has received much attention in recent years, since it is biodegradable, contains no sulfur and benzene compounds, and releases less pollutant substances after burning. Biodiesel is an alternative energy that is both environmental friendly and has sustainable operation achievability. Currently, most of the biodiesel is produced from vegetable oils of terraneous oil-crops, such as soybean, rape seed and palm oils. The production of biodiesel from microalgae is a newly emerging field due to it's larger biomass, larger growth rate compared to those of oil-crops. However, it was rare investigated for the economic assessment of microalgal biodiesel in Taiwan. Therefore, the main purpose of this article was to study the cost of biodiesel from microalgae oil based on domestic conditions and the effects of the relative economic importance of each variable with sensitivity analyses, and then the suggests for future development of microalgae derived biodiesel were proposed.

There were three production procedures and two scenarios for microalgal biodiesel being set in this article. By the analysis results, it was found that the cost and IRR(Internal Rate of Return) of algae oil

production for open system, close system and fermentation were NT\$22.7/kg and 8.91%, NT\$27.94/kg and 5.33%, and NT\$24.83/kg and 5.44%, respectively. Moreover, from ‘sensitivity analyses’ it is clear that the three most important factors for facilitation of microalgal biodiesel production systems are : (1)The reduction of cultivation systems construction costs ; (2)The increase of biomass/algae oil yield ; (3)Extractable HVP value or oil commodity price. Those analyses obtained that the cost of microalgal oil remain in an higher stage compare with crude oil, but they are now approaching profitability compare with those of terraneous oil. They may be a raw material for biodiesel production with decreasing cost in the future. Finally, the suggestions of business management and execution strategy for biodiesel production by microalgae, and the future researches of microalgae were proposed. Those could be a reference for people who are interesting in the development of microalgal biodiesel.

Keywords : Microalgae, Biodiesel, Economic assessment, Sensitivity analyses



## 誌 謝

本論文得以順利完成，首先要感謝擔負論文指導重任的丁承教授，在百忙當中不辭辛勞，給予本論文最大的指導與協助。在資料的整理及論文寫作過程中，感謝工業技術研究院能源與環境研究所新能源技術組李宏台副組長、林昀輝經理、盧文章研究員、王振諧工程師及提供資料的工研院好朋友們，感謝鴻潔能源科技股份有限公司李得民執行長、魏秀朱財務長、翁孝元經理、丁樑泉博士、曾美華研究員、吳文傑研究員及賴鏡安研究員與各部門的好朋友們，提供資料及寶貴的意見。

感謝口試委員交通大學丁承教授、楊千教授及國防大學傅振華教授的熱心教導指正。也感謝學長姐思閩、建雄、益傑、祺鐘、雍政、志宏、美釗、宗昆及蔡忠的協助，才得以順利完成碩士班的課業。感謝我的父母、內人及小孩們在我寫論文期間的支持與鼓勵。所以本論文能夠完成，要感謝的人太多，謹藉此機會表達無限感謝的心意，也感謝您的閱讀與不吝指正！謝謝！

張羿宸                      謹誌於  
高階主管管理學程碩士班  
中華民國 九十九 年六月

# 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
誌謝 .....	V
目錄 .....	VI
表目錄 .....	IX
圖目錄 .....	XI
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的 .....	3
1.3 研究步驟 .....	3
<b>第二章 文獻探討 .....</b>	<b>5</b>
2.1 藻類生產生質燃料介紹 .....	5
2.1.1 藻類做為生質燃料的優勢 .....	5
2.1.2 國外研究歷程和最新發展 .....	5
2.1.3 國內研究現況 .....	8
2.2 藻類培養 .....	11
2.2.1 藻類的分類與特徵 .....	11
2.2.2 藻類油脂生成 .....	12
2.2.3 藻類生長與脂質生成的影響因子 .....	13

2.3 大規模藻類養殖技術 .....	14
2.3.1 培養系統.....	14
2.3.2 培養策略.....	18
2.3.3 兩階段培養策略 .....	20
2.4 下游藻體採收及藻油萃取技術 .....	20
2.4.1 藻類採收技術 .....	20
2.4.2 藻油萃取技術 .....	23
2.5 藻類於生質柴油生產上的潛力 .....	23
2.5.1 藻類油脂產量 .....	23
2.5.2 藻類生質柴油的可受性 .....	25
2.5.3 藻類生質柴油的經濟分析 .....	25
2.6 生質柴油經濟效益分析 .....	27
<b>第三章 研究方法 .....</b>	<b>33</b>
3.1 藻類生質柴油程序設定 .....	33
3.1.1 培養系統.....	34
3.1.2 藻體採收.....	36
3.1.3 藻體萃油.....	36
3.2 藻類生質柴油情境設定 .....	37
3.3 藻油生產製程經濟評估 .....	38
3.4 藻油生產製程成本之敏感度分析 .....	39
<b>第四章 結果與討論 .....</b>	<b>41</b>

4.1 藻油生產經濟效益分析 .....	41
4.1.1 開放式培養系統 .....	41
4.1.2 密閉式光生物反應器 .....	44
4.1.3 異營醱酵槽培養 .....	51
4.1.4 相異生產製程經濟分析比較 .....	54
4.2 敏感度分析結果 .....	59
<b>第五章 結論與建議 .....</b>	<b>71</b>
5.1 結論 .....	71
5.2 建議 .....	72
5.2.1 微藻生質柴油產業經營管理上的建議 .....	72
5.2.2 微藻生質柴油未來發展的建議 .....	74
<b>參考文獻 .....</b>	<b>76</b>



## 表目錄

表 1.1、不同作物單位面積生質柴油產量 .....	3
表 2.1、藻類在系統學上的分類 .....	12
表 2.3、開放式及密閉式系統的主要特徵 .....	15
表 2.4、密閉式光合生物反應器特性 .....	19
表 2.5、生質柴油原料來源之比較 .....	24
表 2.6、不同微藻之含油量 .....	24
表 2.7、微藻油脂生產之生質柴油、柴油及ASTM生質柴油規範特性 之比較 .....	26
表 2.8、製造成本及經濟分析條件設定 .....	28
表 2.9、生質柴油損益平衡分析 .....	29
表 2.10、生質柴油廠運轉參數設定 .....	31
表 2.11、以IRR 7%及 14%計算不同原料成本之生質柴油價格 .....	32
表 3.1、藻類生產生質燃料之途徑 .....	34
表 4.1、開放式培養系統參數設定 .....	42
表 4.2、開放式培養系統產製生質柴油各項成本 .....	43
表 4.3、密閉式光生物反應器參數設定 .....	45
表 4.4、密閉式光生物反應器產製生質柴油各項成本 .....	46
表 4.5、生產藻體主要設備清單及成本 .....	48
表 4.6、生產藻體之總及年度固定資本支出 .....	49
表 4.7、生產藻體之直接成本 .....	50

表 4.8、異營醱酵槽培養參數設定 .....	53
表 4.9、異營醱酵槽培養產製生質柴油各項成本 .....	54
表 4.10、相異生產程序產製生質柴油各項經濟分析比較 .....	56
表 4.11、異營醱酵槽培養產製生質柴油經濟評估表 .....	58



## 圖目錄

圖 1.1、研究流程圖 .....	4
圖 2.1、藻類能源利用技術流程圖 .....	10
圖 2.2、藻類三酸甘油酯合成途徑 .....	13
圖 2.3、生質柴油原料價格變動分析 .....	30
圖 3.1、渠道池藻類培養系統 .....	35
圖 3.2、垂直圓管光生物反應器 .....	35
圖 4.1、各生產程序每年生產總成本分析 .....	57
圖 4.2、各生產程序的生產經濟比較 .....	57
圖 4.3、藻體產率對不同程序藻油成本的影響 .....	61
圖 4.4、藻體油脂含量對不同程序藻油成本的影響 .....	62
圖 4.5、DHA的售價對藻油成本與內部報酬率的影響 .....	63
圖 4.6、剩餘藻體的售價對不同程序藻油成本的影響 .....	64
圖 4.7、密閉式光合反應系統建置成本對藻油成本及IRR的影響 .....	65
圖 4.8、開放式培養系統建置成本對藻油成本及IRR的影響 .....	65
圖 4.9、培養系統建置成本對不同程序之折現回收年限影響 .....	66
圖 4.10、土地租金對不同程序藻油成本的影響 .....	67
圖 4.11、碳交易對不同程序藻油成本的影響 .....	69

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

隨著經濟的快速發展及人類活動的頻繁，能源短缺已成為全世界極為關注的焦點。而石油是重要能源之一，因其不可再生性和資源的有限，使得原油價格的起伏都能造成國際能源、甚至政治層面不小的影響。依據英國石油公司公佈的「British Petroleum 世界能源統計 2006」指出，截至 2005 年底已知的世界石油儲量，若按照目前 81,088 千桶的開採速度計算，全球石油儲量僅可供繼續生產 40 年左右[British Petroleum, 2006]。因此，石油價格與日俱增，原油價格曾於 2008 年 7 月飆漲到 147 美元/桶。而在 2008 年底受到美國金融風暴的影響，石油平均價格仍然超過 60 美元/桶，仍比 2004 年的平均價格上漲超過 60%。因此，目前世界各國採取兩大主軸做為解決之道：其一是控制對石油的需求量，節省能源消耗；另一方面則積極開發新能源及替代性燃料。

在眾多替代性燃料中以生質燃料最受注目，主要為生質柴油及生質酒精。生質柴油為從植物油(如大豆、油菜籽)或動物脂肪中長鏈脂肪酸的甲基酯化物衍生而出的燃料；生質酒精則由含糖質、澱粉等作物如玉米、甘蔗等經發酵、蒸餾、脫水，再經過不同形式的變性處理後生產而來。為一項可再生性、減少對傳統石化能源依賴及溫室氣體排放的替代能源，但其大量生產的結果，導致對農作物的大量需求，造成「與糧爭地」的爭議及糧食價格不斷上漲，並可能進一步導致發展中國家的糧食短缺。有鑑於此，尋求新一代低成本且含油量高的原料來源，為目前各國主要研究方向，而「微藻」便是一個新的原料來源。

生質柴油是一項兼具環境友善及永續性的潔淨替代燃料，受到國際的重視並競相發展，而國內在能源局的推動下，從 2008 年的「綠色公車」、「綠

色城鄉」等示範計畫實施，至 2009 年 7 月已全面實施 B1 生質柴油，全國加油站之市售柴油中皆添加 1% 的生質柴油，且預定今年將全面實施 B2 生質柴油。由於國內在推行生質柴油的政策上已明確，未來使用量可期，使得國內生質柴油產能快速增加，可預見料源的供給將成為短期內限制該產業發展的重要因素，如何開發永續的非糧油脂原料是一項極重要的課題。由於藻類之生長速率較植物快速，在各種生質物中，藻類具有生長快速及 CO<sub>2</sub> 零排放之優點，進而降低二氧化碳濃度、無毒性等特性[Li *et al.*, 2008; Chisti, 2008]，經大規模養殖後，乾燥的藻細胞其油脂經萃取，再經轉酯化即可產製出生質柴油。依據國外研究顯示，於相同單位土地面積下養殖微藻類的油脂收成量遠高於(>10 倍)種植油脂作物收成量(見表 1-1) [Hu *et al.*, 2008; Schenk *et al.*, 2008]，且藻體仍可進一步的加值應用，是一項極具發展潛力的研究課題。由於我國是一個海島國家，地處亞熱帶，西部沿海地區氣候適於藻類的養殖，對於耕作面積少且海岸線長的我國而言，此為增加生質柴油料源的另一項選擇，值得國內進一步研究開發。

以藻類製造生質柴油已成為目前研究開發的重點，各國眾多的研究機構、生質燃料公司、投資公司在該領域也投入大量人力及資金進行相關研究。目前在技術上已證實使用微藻大量生產生質燃料是可行的，然在國際上仍未達微藻生質柴油商業化生產階段，主要是由於油脂微藻培養及下游程序成本偏高。因此，能源微藻生質柴油要真正成為一種替代能源，降低微藻油的生產成本至關重要。國外已有許多研究針對微藻生產生質柴油的成本進行探討，相互間仍有相當的出入，而國內對於藻類生質柴油的研究投入正方興未艾，然基於國內情況的藻類生產成本卻幾無相關的資料可循。有鑑於此，本論文將針對國內以藻類生產生質柴油的各種情況加以分析其成本，並應用敏感度分析探討主要變數對生產成本的影響，提供國內對藻類生質柴油有興趣的人員參考。

表 1.1、不同作物單位面積生質柴油產量

原料	產量(公升/公頃-年)
大豆(Soybean)	450
油菜籽(Rapeseed/Canola)	1,200
麻瘋果(Jatropha)	1,900
油棕(Oil Palm)	5,900
藻類[Algae (open system)]	11,000 - 112,000
藻類[Algae (close system)]	58,700 - 136,900

## 1.2 研究目的

評估可行的藻類上、下游產製生質柴油製程，設定藻類生成生質柴油程序的情景，基於以國內情況的各項成本評估藻類生產生質柴油之經濟效益，並完成影響成本各項因素的敏感度分析，據以提出相關的建議方案，提供國內在藻類生質柴油研究發展的參考。

## 1.3 研究步驟

本論文的研究流程如圖 1.1 所示，主要步驟為：

1. 蒐集藻類培養、採收、萃油及轉製成生質燃料各項技術資料，並加以彙整分析，做為情境設定依據。
2. 經由資料分析，評估可行的藻類上、下游產製生質柴油技術，設定藻類由培養、採收到產製生質柴油的程序。
3. 設定各情境(如產量、高單價物質產出、...)，做為經濟評估依據。
4. 依據上述所設定的程序及情境，應用國內情況的各項成本以評估藻類生產生質柴油之經濟效益。

5. 列出可能影響成本的因素，並針對這些因素進行敏感度分析。
6. 由敏感度分析結果，提出藻類生質柴油未來發展建議。

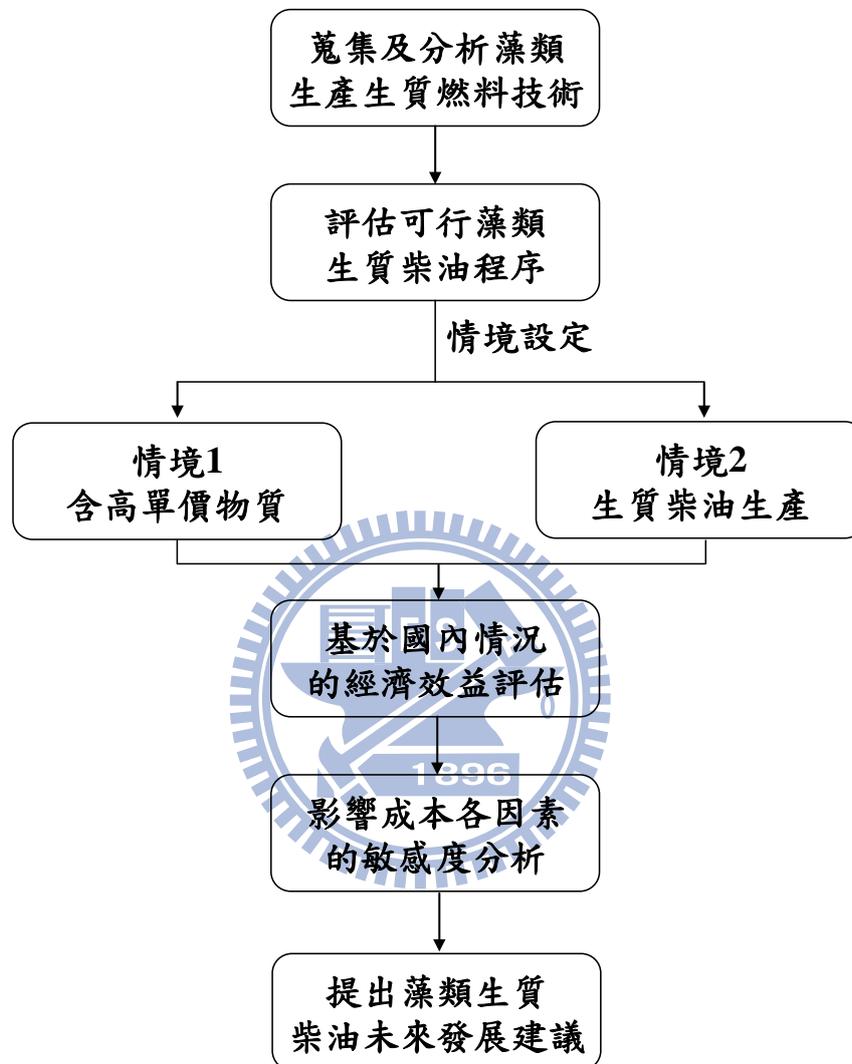


圖 1.1、研究流程圖

## 第二章 文獻探討

### 2.1 藻類生產生質燃料介紹

#### 2.1.1 藻類做為生質燃料的優勢

早在1950年代，美國麻省理工學院即在校園內建築物的屋頂進行養殖藻類生產生質燃料的實驗，並在研究報告中第一次提到了藻類生質燃料。

而藻類可做為生質燃料潛在的優勢則如下列所示[Hu *et al.*, 2008]：

- 1.合成並累積大量中性脂質或油脂 (20-50 % DCW)。
- 2.生長快速。
- 3.可於鹽水/鹹水/沿岸的海水中生長。
- 4.可忍受不適合於傳統農耕的邊際土地 (Marginal land)(如沙漠、乾旱或半乾旱土地)。
- 5.可利用各種廢水來源(如農耕溢流、工業及都市廢水)中的生長營養源，如氮源及磷源，提供廢水生物降解的額外好處。
- 6.可吸收從石化燃料發電廠及其他來源所排放的煙道氣二氧化碳，因而降低主要的溫室氣體排放量。
- 7.產生有添附加價值的產物或副產物(如生物聚合物、蛋白質、多醣、顏料、動物飼料、肥料及氫氣)。
- 8.生長於適當的培養槽(光合生物反應器)，每年單位面積的細胞產量幾乎為陸生植物的十倍。

由於藻類做為生質燃料的料源具有許多優勢，在油價高漲的今天，此方面的開發已成為研究的重點項目之一。

#### 2.1.2 國外研究歷程和最新發展

對微藻的研究早在 1950 年代就已經開始，但真正成為研究焦點則是在

2005 年以後。經由文獻檢索可以發現，有關藻類生產生質燃料的論文，在 1990 年代時數量並不多，到 2000 年後數量開始大幅度增長，尤其是 2007 年後數量激增，研究增長趨勢十分的明顯。

於 1978 年，美國能源部通過國家可再生能源實驗室(The National Renewable Energy Laboratory, NREL)啟動的一項利用微藻生產生質柴油(biodiesel)的水生物種計畫(Aquatic Species Program, ASP)，研究內容從微藻篩選、微藻生長機制分析、微藻基因轉殖到模廠測試。研究人員經過十多年的努力，從美國西部、西北、西南部和夏威夷等地分離篩選到了 3,000 多株微藻，最後選擇了其中的 300 多株，並對其中生長速度快、脂肪含量高的微藻進行大規模培養。在實驗室研究的基礎上，研究人員在美國加州、夏威夷州、新墨西哥州等地進行了模廠放大。模廠運轉了一年，可獲得高達  $0.05\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  的微藻量，微藻含油量達到 40%-60%。本計畫於 1996 年因當時油價太低(約 30 美元左右)而終止，總計 1978-1996 年累計投入的研發經費達 2,505 萬美元。該研究室是迄今對微藻研究最全面和權威的機構。由於油價上漲，2007 年底美國能源部又將這個中斷了 11 年之久的項目重新啟動[Biofuels Digest, 2008]。

從 1990 年到 2000 年，日本國際貿易和工業部資助了一項名為「地球研究更新技術計畫」的項目，此項計畫是利用微藻來生物固定  $\text{CO}_2$ ，並著重開發密閉式光合生物反應器技術，通過微藻來吸收火力發電廠煙道氣中的  $\text{CO}_2$ ，以生產高附加價值的生質能源。該項計畫共有大約 20 多個私人公司和政府的研究機構參與，投入大約 25 億美元進行研究，總共分離出 10,000 多種的微藻，篩選出多株耐受高  $\text{CO}_2$  濃度、高溫，生長速度快，能高密度培養的藻種，建立光合生物反應器的技術平台以及微藻生質能源開發的技術方案。為增進微藻生質能源等生物技術在溫室氣體控制中的實用性研究、開發和示範成果，2000 年和 2001 年分別在澳洲和義大利舉辦多場

研討會，對於利用微藻來生物固定 CO<sub>2</sub> 研究領域的技術基礎進行了評價，同時對該項研究提出建議[Pedroni *et al.*, 2002]。

進入 21 世紀後，藻類研究逐步從實驗室走向中型規模驗證和生產放大階段。2002 年，美國辛蒂亞國家實驗室在 LiveFuels 公司資助下，利用分子生物學技術進行增加微藻細胞含油量和產量方面的研究，經過 5 年的研究，製得性能類似大豆油的微藻油，油脂含量豐富，可生產生質燃料。其研究更指出，應用此成果僅需美國土地面積的 0.3% 就可生產出滿足全美國需要的運輸用燃料，而該項目的目標是到 2010 年研究獲得經濟可行的生質柴油 [錢伯章，民 96]。2005 年 12 月，第一輛採用微藻燃料和大豆油(調合比例為 1：9)的示範車輛在印度進行了 1,500 公里的實車道路試驗。

除了研究機構外，許多的生質燃料公司、投資公司也投入了藻類研究領域。美國 Sapphire 公司 2008 年 9 月宣佈投資 1 億美元發展養殖微藻生產生質燃料的研究，Sapphire 公司有兩個引人注目的投資商：比爾蓋茲私人名下的一家投資公司(Cascade investments)和為洛克菲勒家族服務的投資合作商(Venrock Partner)。Sapphire 公司宣稱經由一種結合太陽光、二氧化碳和光合微藻的技術研製出辛烷值達 91 的「綠色」汽油。而且生產的「綠色」燃料與從煉油廠到加油站的銷售網絡設施完全相容，顯示了微藻汽油與第一代生質酒精相比的優勢所在[Worldwide Refining Business Digest Weekly, 2008]。美國生物技術公司 Solazyme 於 2008 年 7 月生產出第一批微藻基可再生生質柴油，並已通過美國材料試驗協會(ASTM)D-975 規格的驗證 [Biofuels Digest, 2008]。

美國國際能源公司(International Energy)於 2007 年 11 月初宣佈啟動「微藻產油」研發計畫，將從基於微藻的光合作用來生產可再生柴油和噴氣燃料[Renewable Energy World, 2007]。美國 GreenFuel 技術公司開發的微藻技術於 2005 年在 Arizona 的 APS 電廠完成了模廠測試，其選用高生長率的微

藻，置於裝有水的大型試管內，並曝露於直接的陽光照射下。美國 Algenol 公司 2008 年 7 月宣佈在美國 Maryland 投入世界上最大的微藻養殖場，目標是在美國沿海地區建置微藻製酒精工廠。該公司估算可從 1 畝(約為 4046.9 m<sup>2</sup>)土地生產 11,950 公升酒精。按照估計，如果美國所需酒精全部從微藻製取，則僅需使用穀物製取酒精需用土地的 3% [Green Energy Trends, 2008]。

美國可再生能源集團(REG)於 2008 年 8 月宣佈，該公司已擁可煉製和生產大量高品質的微藻生質柴油商業化技術，其品質可達 ASTM D6751 和 EN 14214M 標準。REG 公司計畫採用其開發的預處理技術對粗微藻油進行淨化和精製，然後採用與目前商業化規模生質柴油生產過程相似之系統，使之轉化為生質柴油 [Renewable Energy World, 2008]。美國 Valencent 產品公司和全球綠色解決方案公司合作開發的 Vertigro 技術正處於商業應用準備階段。包括微藻生長、微藻採收和藻油萃取用於生質柴油 3 個步驟。技術的核心是連續閉環生物反應器。在 25-30 天之後就可收集微藻，微藻的含油量約為 50%。Vertigro 技術的生質柴油產量要比用一般農作物生產的生質柴油增加 20 倍，用水量只有 5% [Ondrey, 2008]。

此外，石油公司也加入了養殖微藻生產生質柴油的研究開發。Shell 公司與美國從事微藻生質燃料業務的 HR 生質石油公司(HR Biopetroleum)於 2007 年 12 月合組 Cellaena 公司，在夏威夷用面積 2.5 公頃的實驗基地做為微藻養殖場，並建設以微藻生產藻油再轉化為生質燃料的模廠設施，進行為期 2 年的生質柴油生產實驗。Chevron 公司也與美國可再生能源國家實驗室、Solazyme 公司簽署了協議，共同開展研究工作。

### 2.1.3 國內研究現況

在國內，藻類養殖於 60 年代曾盛行一時，主要是做為健康食品用途。到目前國內綠藻的年生產量達 5,000 公噸以上，是全球綠藻最大的綠藻生產

國家，也有多家藻類生產廠商(如遠東藍藻公司、味丹公司)。因此，國內對於藻類的篩選、養殖及採收等已有良好的基礎，然而對於大規模培養微藻產製價格較低的生質燃料則較無經驗，且其所需的相關技術差異性很大，而國內也是近幾年才針對此方面加以研究開發，在學術界以成功大學吳文騰教授研究團隊投入藻類培養萃取油脂做為生質柴油的研究最為積極，也極力推動相關技術發展，目前其在藻類養殖(主要為綠藻)及其環境影響、油脂快速檢測方法(利用色差方式)、油脂累積策略(二階段培養)、反應器設計及高光利用率等方面都有不錯的研究結果，也計畫與台電公司合作進行戶外實地培養。而交通大學林志森教授應用突變工程技術使油脂綠藻於較高溫度下仍能有效成長，適合戶外高溫情況下生長。此外，其更探討在高的初始轉殖濃度(1 g 乾藻重/L)下，以不同的採收率連續培養，採收濃度可達 5 g 乾藻重/L，且可容忍含 10% CO<sub>2</sub> 的通氣培養。至於較大型的藻類研究則有工研院能環所於 2005 年執行經濟部能源局委辦之「生質燃料技術開發與推廣計畫」，開始進行微藻產製生質柴油之研究工作，由台灣沿海地區篩選出 35 株台灣周圍海域海水藻，並以等邊金藻進行生長因子影響之培養分析。為了能實現具經濟效益之藻類能源利用，許多技術仍待開發與突破，這些包括改善藻類生物特性以提高油脂產量、提升光合生物反應系統的效能及利用生物精煉(Biorefinery)的概念充分利用藻體產製有價產品等，對於整體藻類能源利用的流程如圖 2.1 所示。有鑑於此，工研院更於 2009 年針對油脂微藻篩選以及養殖與基改技術開發、微藻養殖系統測試平台建立與光合反應器開發、藻體採收與藻油萃取最適化下游製程開發及製程經濟與生命週期評估等四大項進一步全面研究探討，期開發出國內本土藻類生質柴油技術[經濟部能源局，民 98]。除海水藻之篩選外，國內水庫或水域中，曾出現之淡水藻亦有油脂含量高達 40% 以上之藻種，亦值得做進一步的探討。

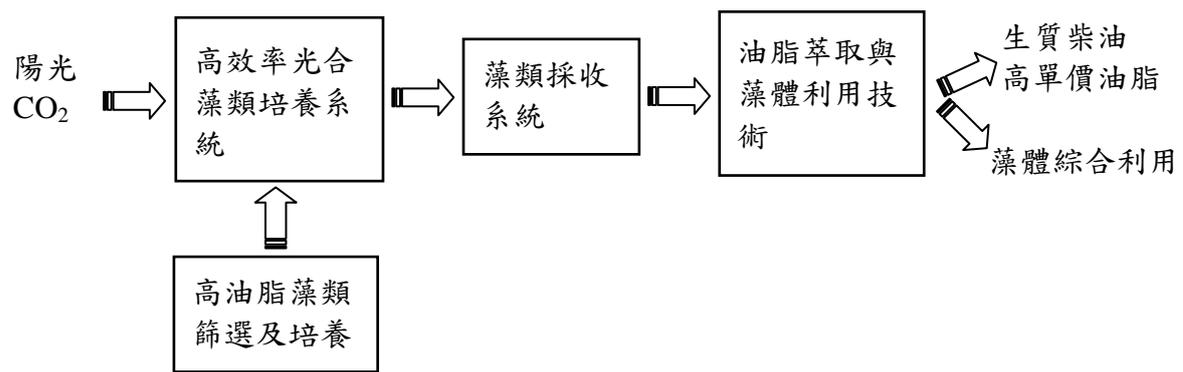


圖 2.1、藻類能源利用技術流程圖

目前國內生質柴油推動已積極的展開，現今已全面實施 B1，生質柴油用量達 45,000 公秉，為亞洲國家中第一個全面實施的國家，而 2010 年將全面實施 B2，生質柴油用量將達 100,000 公秉，開發生質柴油自產料源為一項刻不容緩的工作，兼具能源安全與環境保護雙重效益。由於我國是一個海島國家，地處亞熱帶，西部沿海地區氣候適於藻類的養殖，對於耕作面積少且海岸線長的我國而言，此為增加生質柴油料源的另一項選擇，除了再生燃料的取得外，附加固定廢 CO<sub>2</sub> 或處理廢水，對於土地面積小的國家，具有相當的競爭性，值得加以研究開發。此外，國內多處海埔新生地、火力發電廠旁皆為合適的藻類養殖場址，而台灣沿海有許多漁業養殖魚塭已閒置不用，如將其修正為藻類養殖塘，亦可減少工程機械的成本，增加發展可行性。對於培養藻類衍生天然油脂以製造生質柴油的構想是自藻體進行油脂萃取，然而為考量經濟成本及效益方面，在油脂萃取部分可分為兩階段；首先將高附加價值物質分離出來，再予以利用，其餘的油脂質再去進行生質柴油的製作，此外剩餘藻體仍可產製其他有價產品，提高整體經濟效益，促進產商投資意願。

## 2.2 藻類培養

### 2.2.1 藻類的分類與特徵

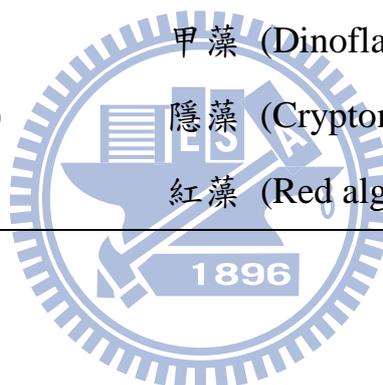
藻類(拉丁文為 Algae)，這個名詞最早即定義為低等的水生植物，而與一般陸地植物區分，但其實藻類的蹤跡並不僅限於水中，舉凡陸地(如石頭、土壤、建築物上)、水域(淡水、海水、半鹹水)，甚至沙漠、雪地或溫泉中都有藻類的蹤影[徐明光，民 88]。藻類與植物具有共同的特點是具有光合作用 (photosynthesis) 的能力，幾乎所有藻類都具有葉綠素 a，能吸收光能和營養鹽類而行光合作用。

傳統的藻類分類學主要依據藻體色素種類、細胞壁成分、鞭毛數目、型態構造、光合作用儲存產物、著生位置等進行區分，而伴隨著科技發展及儀器的進步，學者對藻類的區分更為詳細，Bold and Wynne 已將藻類區分成十個藻門，如表 2.1 所示[Bold and Wynne, 1985]。此外，也有學者將金黃藻門中的黃藻綱和矽藻綱提升成黃藻門(Xanthophyta)及矽藻門(Bacillariophyta)而成為十一個藻門[徐明光，民 88]。

藻類在長期演化過程中，以自身的構造、生理特點適應著生活環境，從而形成了各種生態群。就藻類依其在水中生活的習性可分為(1)浮游性、(2)底棲性、(3)附著性、(4)共生性等四大類，以前三者居多。其中的浮游性藻類，個體大小通常在數微米到兩百微米間，僅少數種類超過兩百微米[徐明光，民 88]，因此用肉眼看不清其形態和結構，必須使用顯微鏡觀察，又稱之為「微藻」(Microalgae)。微藻會漂浮在水層中，雖然有些微藻具有鞭毛，但仍無法抵抗較大外力的擾動。微藻個體雖小，但種類多，數量也多，包括了藻類的絕大部分，如生活在海洋中的矽藻和甲藻等浮游藻類是海洋重要的初級生產者，而淡水中種類最多則包含藍綠藻門、綠藻門、裸藻門、矽藻門[梁象秋等，民 87]。

表 2.1、藻類在系統學上的分類

門 (Division)	俗名 (Common name)
藍綠藻門 (Cyanophyta)	藍綠藻 (Blue-green algae)
原綠藻門 (Prochlorophyta)	
綠藻門 (Chlorophyta)	綠藻 (Green algae)
輪藻門 (Charophyta)	輪藻 (Stoneworts)
裸藻門 (Euglenophyta)	游藻 (Euglenoids)
褐藻門 (Phaeophyta)	褐藻 (Brown algae)
金黃藻門 (Chrysophyta)	黃藻，矽藻 (Golden, yellow-green algae, diatoms)
甲藻門 (Pyrrophyta)	甲藻 (Dinoflagellates)
隱藻門 (Cryptophyta)	隱藻 (Cryptomonads)
紅藻門 (Rhodophyta)	紅藻 (Red algae)



### 2.2.2 藻類油脂生成

藻類三酸甘油酯 (Triacylglycerol, TAG<sub>s</sub>)的合成如圖 2. 2 所示 [Hu, 2008]。帶有 CoA 的脂肪酸鏈(Acyl-CoA)藉由 cytosolic glycerol-3-phosphate acyl transferase 轉移至 glycerol-3-phosphate (G-3-P)的 1 和 2 位置上，產生中間產物 phosphatidic acid (PA)，PA 被去磷酸酶(Phosphatidic acid phosphatase)去磷酸化後，形成 diacylglycerol (DAG)。最後 DAG 經由 diacylglycerol acyltransferase 所催化將第三個 Acyl-CoA 轉移至 DAG 上第 3 個位置。

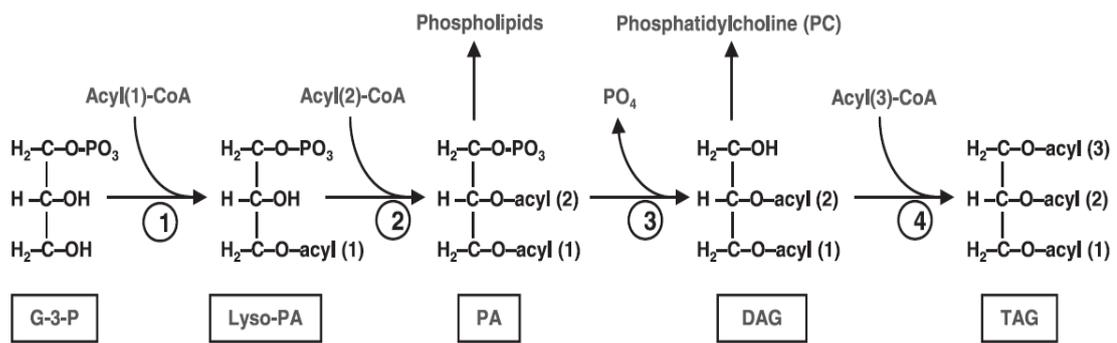


圖 2.2、藻類三酸甘油酯合成途徑

- (1) Cytosolic glycerol-3-phosphate acyl transferase.
- (2) Lysol-phosphatidic acid acyl transferase.
- (3) Phosphatidic acid phosphatase.
- (4) Diacylglycerol acyl transferase.

### 2.2.3 藻類生長與脂質生成的影響因子

藻類脂肪酸的組成及 TAGs 的含量與種或株特异性有關，且最終可歸因於生物體內遺傳訊息所控制的結果，而藻類在較適生長或有利的環境條件下只會生產少量的 TAGs，反之，當藻類生長於具壓力的條件下，由於某些化學或物理因子的刺激下，常會有大量 TAGs 的合成累積，並伴隨著細胞中脂質和脂肪酸組成有不同的變化[Hu, 2004]，影響藻類的生長和脂質生成的影響因素可分為三大部分，包含化學性因素、物理性因素以及生物性因素，如表 2.2 所示。

表 2.2、影響藻類生長及脂質生成的因子

化學性因子	營養源
	鹽度
	培養基酸鹼度
物理性因子	溫度
	光照強度
	光照週期
生物性因子	藻株生長期及年齡

## 2.3 大規模藻類養殖技術

### 2.3.1 培養系統

利用微藻來生產生質柴油的關鍵是要獲得大量廉價的微藻油脂，而這就需要應用微藻大規模培養技術。用於生質柴油生產的微藻培養系統具有以下優勢：(1)光能轉化效率高；(2)採用智慧分批生產方式，幾乎全年都可以採收，能提供穩定可靠的原料油供應；(3)可以利用海水或鹽鹼水甚至是污水進行生產，因此能大大減少淡水的使用；(4)能把碳中性燃料生產與CO<sub>2</sub>捕捉有機耦合起來；(5)生產的生質柴油無毒而且可高效生物降解，即使洩漏也不會污染環境。

目前，微藻培養主要有開放式及密閉式兩種光合生物反應器。開放式光合生物反應器構建簡單、成本低廉及操作簡便，但存在易受污染、培養條件不穩定等缺點。密閉式反應器培養穩定，可無菌操作，易進行高密度培養，已成為今後發展的方向，但是利用光合反應器培養藻體的成本高，是其商業化的主要障礙。一般密閉式光合生物反應器有管狀、平板式、圓柱狀氣升式及攪拌式醱酵槽等。對於開放式及密閉式兩種光合生物反應器主要設計特徵說明如表 2.3 所示[Carvalho *et al.*, 2006]。

#### 1. 開放式光合生物反應器

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，它具有投資少、成本低、技術要求簡單等優點。主要有四種類型，包括淺水池、循環池、渠道池式、池塘。其中最典型、最常用的開放池培養系統是 Oswald 設計的渠道式反應器(Race-way photobioreactor)。該類培養系統實際上就是佔地面積為 1,000-5,000 m<sup>2</sup>，培養液深度為 15 公分的

環形淺池。以自然光為光源和熱源，靠軸輪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 CO<sub>2</sub> 氣體進行鼓泡或氣升式攪拌。為防止污染，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)均採用這種反應器，在螺旋藻、小球藻和鹽藻的大規模培養中獲得良好的效果。

表 2.3、開放式及密閉式系統的主要特徵

特徵	開放系統	密閉系統
比表面積 <sup>註一</sup>	較小	較大
藻株篩選	較為限制	較有彈性
藻株篩選主要條件	生長競爭力	剪應力抵抗能力
細胞濃度	較低	較高
收穫效率	較低	較高
培養期	受限	較可延長
汙染機率	較大	較小
培養液蒸發	較大	可避免
光利用效率	差/尚可	尚可/好 <sup>註二</sup>
氣相質傳	差	尚可/高
溫度控制	無	好
影響成本最大因素	混合因素	氣體控制、溫控
投資成本	較小	較高

註一：將原文開放系統比表面積「較大」改為「較小」，密閉系統比表面積「較小」改為「較大」

註二：根據光對不同材質的穿透度有所不同

雖然開放式光合生物反應器在微藻培養中有一定的效果。但是開放式光合生物反應器仍存在下列不足：(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 CO<sub>2</sub> 利用率不高，無法達到高密度培養；這些因素都將導致細胞培養密度偏低，使得採收成本較高，能適應大池培養的微藻藻種必須是在極端環境下能快速生長的藻種，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，則只能採用密閉式光合生物反應器培養。另外，對於高單價的微藻產品生產，以及將來的基因工程微藻，研製高效、易於控制培養條件的新型光合生物反應系統，以實現高密度純種培養，已經成為微藻培養技術的發展趨勢。

## 2. 密閉式光合生物反應器

密閉式光合生物反應器開發雖已有近 50 年的歷史，但最快的進展還是近 10 年的事。自 1990 年代以來，提出了大量相關專利。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，能實現單一藻種、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 CO<sub>2</sub> 利用率較高等優點。因此近年來國外研究和開發利用較快，以實現了高密度商業化培養。目前一般密閉式光合生物反應器有管狀、平板式、圓柱狀氣升式及攪拌式醱酵槽等，以下將針對這些型式反應器的特性做一說明。

### (1) 管狀光合生物反應器

管狀光合生物反應器一般採用透明的直徑較小的硬質塑料或玻璃、有機玻璃管，彎曲成不同形狀，利用透明的管道，藉助外部光源條件下進行

工廠化繁殖生產藻類的方式。由於密閉的管道系統容易與其他加工設備配套，可用幫浦把管道內生長到一定生物量的藻體傳遞到下道工序，因而整個過程可以實現自動化的生產過程。

這種反應器最早出現在 1950 年代，Pirt *et al.* [1983]已建立了細管(管徑 1 公分)光合生物反應器的設計和操作理論及電腦控制裝置，在這個基礎上，Torzillo *et al.* [1993]設計和建造了雙層管狀光合生物反應器用於螺旋藻的室外培養。為了提高光能利用率，Lee *et al.* [1995]和 Miyamoto *et al.* [1988]都對水平設置的管道進行改進，採用 $\alpha$ -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。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、有效性和低成本日益引起人們的重視。

## (2) 平板式光合生物反應器

Ramos de Ortega and Roux [1986]開發平板式光合生物反應器。由於該類型的反應器具有光利用率高、易放大培養、易清洗、其內部的貼壁生長和外部的鹽沉澱容易處理。構造相對簡潔，可以隨意調節放置角度以便使其獲得最佳的取光效果。陽光有一部分直接射到反應器板面，大部分是通過反射或散射進入反應器，這種反應器具有光能利用率高、容易加工製造、可以根據需要設計不同的光徑以及操作條件容易控制等優點，使其成為具有良好使用價值的光合生物反應器。其短的光通路及氣流強烈攪動，是實現高密度高產培養的有利條件。

## (3) 圓柱狀氣升式光合生物反應器

混合體系是光合生物反應器結構設計的關鍵之一，圓柱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[Sánchez *et al.*, 2002]。氣升式反應器已用於微生物發酵和動、植物細胞

培養且符合大多數藻類培養的基本要求。

#### (4) 攪拌式光合生物反應器

機械攪拌式生物反應器是廣泛用於規模培養微生物的生物反應器，具有技術條件成熟、易於控制等優點，只要配套光源，就可成為培養微藻的光合生物反應器，因此可利用現有醱酵工程技術開展微藻的研究開發工作，國外許多學者在這方面都做了嘗試[Huang and Rorrer, 2003]。

針對這些型式反應器的特性說明如表 2.4。

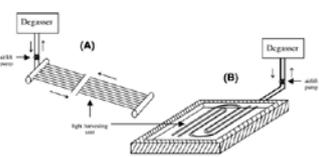
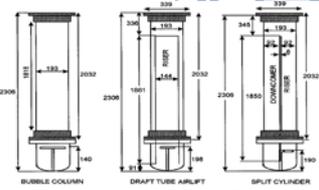
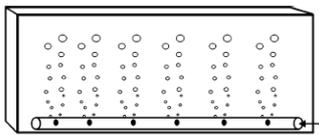
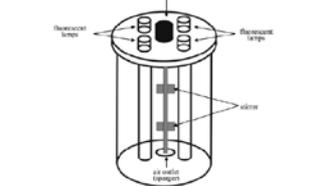
### 2.3.2 培養策略

生物培養策略主要可分為三種，包含批次培養(Batch)、饋料批次培養(Feed-batch)、連續式培養(Continuous)。批次培養是最簡便的培養方式，生物接種於固定量的培養液中，在培養期間不添加任何新的培養液，可用於小規模的研究，此外對於設備的要求較低因而成本較低。然而批次培養存有許多缺點：細胞代謝營養源產生之物質可能隨時間累積，也造成毒素的形成；營養源用盡時，老化的細胞可能會趨向死亡途徑；長期培養下細胞生長緩慢，主要營養源消耗而其他代謝產物累積，可能會影響到細胞生長週期，甚而產生產物的回饋抑制作用。另一常見的缺點是批次培養只能用於一次實驗條件就必須重新清理而花費時間[Najafpour, 2007]。

連續式的培養是指培養期間以一定的速率添加含有細胞的新培養液於反應器中，同時也移去相同體積含有老化細胞的培養液。連續式的培養有許多的優點：生長速率被控制且細胞濃度維持一定；新鮮培養基的加入使得細胞不易處於衰退期；培養液的恆定可得到最大產率；可避免掉細胞的二次代謝物等。然而缺點是須控制精密之設備以維持恆定的流量，避免細胞移除速率大於生長速率，因此成本提高，此外，細胞在長期操作培養下可能會產生細胞生長及產物的變異[Najafpour, 2007]。

饋料批次培養則介於批次及連續式培養間，於培養期間內間斷或連續添加不含細胞之培養液，直到培養體積達設定的量。根據生物體生長速率及生長期，適時適量的添加營養源，可使細胞或產物的生成達到最大產率。

表 2.4、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 <sub>2</sub> 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、具高的規模放大潛力、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、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表面積減小
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

資料來源：經濟部能源局，民 98。

### 2.3.3 兩階段培養策略

為了增加藻類細胞中油脂的含量，藻類細胞常培養在營養源缺乏的環境，如氮源缺乏的環境下，然而這樣的培養環境可能也會造成藻類細胞生長的限制，降低細胞濃度，因此藻類細胞的培養應分為兩個階段：(1) 細胞數目增加期(A cell-number-increasing stage)，在此時期細胞大量繁殖而增加細胞數目，對單一細胞而言細胞大小及重量只會有些許的增加。(2) 細胞體型增長期(A cell-size-increasing stage)，在此時期細胞停止繁殖分裂，因此細胞數目並不會有太大的增加，然而由於細胞內脂質逐漸累積，導致細胞的體型也隨之增長變大[Chi *et al.*, 2009]。

上述兩階段培養策略的概念已應用於藻類蝦紅素(Astaxanthin)的生產[Fabregas *et al.*, 2001]，此外也有研究者利用兩階段培養方式培養綠藻 *Chlorococcum* sp.來生產類胡蘿蔔素(Ketocarotenoid)，在藻類第一階段生長中以葡萄糖為碳源進行異營生長來提高生質量；第二階段則利用光照及化學壓力等環境下誘導類胡蘿蔔素的生成[Zhang and Lee, 2001]。另外，有研究人員控制培養基內的溶氧量培養 *Schizochytrium limacinum*，在細胞濃度增長時期約以4-8%之溶氧量操作，而在油脂累積的時期則以低於1%之溶氧量的策略來增加生產DHA的產量[Chi *et al.*, 2009]。

## 2.4 下游藻體採收及藻油萃取技術

### 2.4.1 藻類採收技術

微藻生物量的採收過程是生產過程的一個限制因素，因為正常生產中的藻濃度相對較低，約為0.1-1.0 g/L，並且藻細胞很小，很脆弱，易受到損傷破裂。因此，用常規的動力離心、過濾及自然沉澱法不能有效地收集藻體。已有人運用化學凝集法、過濾法、氣浮法收集微藻的嘗試，但這些方

法都有一定的優勢和局限性。

微藻生長到指數生長期末期，微藻密度達到最高，應當採用一定的方法，將其從培養液中分離出來，根據微藻的特性選擇不同的方法和試劑。同時也要考慮到經濟因素，所以一般採用化學凝集法、離心法、和加壓浮除法等幾種方法採收微藻。

### 1. 化學凝集法

凝集沉澱是一種傳統的生物分離方法，其凝集機構主要有3種理論：(1)膠體理論，把細胞直接當作膠體溶液中的膠粒來解釋凝集過程。認為凝集過程是由於細胞表面的極性基團引起的表面吸附使表面吸附自由能降低的過程[Erlsson, 1981]。(2)聚合物架橋理論，有研究指出細胞表面會分泌出許多聚合物，如蛋白質、多醣體等，這些聚合物在細胞表面形成胞外纖維，認為細胞的凝集是由於這些胞外纖維相互架橋交聯而形成[Megreor, 1969]。(3)電雙層理論，大多數生物細胞表面都帶有一定的電荷，凝集過程是加入電解質後，相同電荷排斥以及細胞表面水合程度不同而產生聚集；同時細胞表面的離子鍵和氫鍵參與了細胞的凝集過程[Kakii, 1985]。

### 2. 離心法

離心分離是生物分離中常用的一種強制式的機械分離方法，幾乎所有的微藻都能用離心法來分離。目前在微藻分離中應用較多的是自動排渣的碟式離心分離機，易於操作，並能連續工作，這對大規模的水量處理來說是必要的。日本天然日技術公司採用離心法採收鹽藻，其鹽藻養殖生產過程全部參數由電腦來顯示和自動控制，當鹽藻生長的生物量濃度達到一定量時，電腦自動控制，以連續進料，穩定轉速離心分離藻體懸浮液，自動排出的鹽藻乳液經噴霧乾燥成藻粉產品，離心後之培養廢液再循環使用。

### 3. 過濾法

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3-30

$\mu\text{m}$ 之間，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440,000  $\text{m}^2$  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% [Spolaore *et al.*, 2006]。早期加州HRP( High Rate Pond)計畫利用聚合物凝劑、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[Weissman and Goebel, 1987]。

掃流過濾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。一般藻體體積大不易進入濾材造成堵塞，而在濾材表面的單純沾附可以利用掃流過濾原液流向與過濾方向垂直，利用原濾液將其掃除帶離。然而藻體細胞分泌的胞外代謝物質如藻酸、腐質酸等大分子聚合有機物質，容易與藻體細胞或水中的離子結合發揮架橋作用與黏附作用，加劇藻體過濾堵塞的形成[王偉修，民92]。因此，解決濾材生物堵塞問題(Biofouling)是提高藻類過濾採收效率與降低成本的關鍵。

#### 4. 加壓浮除法

有鑒於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，此類狀況反而可以利用浮力來進行藻濃縮。加壓浮除方法為注入加壓的溶解二氧化碳於藻液底部，因為釋壓，溶解的二氧化碳將形成細氣泡，可附著於藻體提供浮力上浮，而可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凝滯的效果。有研究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[Borodyansk and Konstantinov, 2003]。

## 2.4.2 藻油萃取技術

二次大戰時，德國曾致力於研究由藻類提煉油脂做為食用油脂，近年來，由於化石能源價格的波動，藻類油脂精煉技術再度受到世界各國研究單位重視，其中主要方法包括：擠壓法、有機溶劑萃取法及超臨界 CO<sub>2</sub> 流體之油脂萃取與分離；因微藻類體積小，以擠壓方式取出的油脂量較低；所以目前常用的方法之一，是以己烷或其它有機溶劑將微藻之不飽和脂肪酸及油脂萃取出來。待進行油水分離的程序之後，再以轉酯化流程，即一般生質柴油製造方式，做成生質柴油。然而這樣的方式操作時間長，溶劑與藻油分離耗能且所留存的藻渣因溶劑殘留與破壞，再利用性低。

## 2.5 藻類於生質柴油生產上的潛力

### 2.5.1 藻類油脂產量

早在五十年前使用微藻做為燃料的概念就已被談論，而在1978年到1996年，在國家再生能源實驗室 (NREL) 中進行水生生物計畫 (Aquatic Species Program, ASP)，於此計畫中發展出許多產生藻類生質柴油的技術，然而於此計畫結束時，原油價格遠比今日便宜，考量經濟成本後此計畫便終止。然而在原油價格飆漲的今日，以藻類生產的生質柴油已重新獲得重視。

如欲以生質柴油取代目前全美國每年所有運輸用油量，則需5.3億公秉生質柴油，由目前油脂作物、廢食用油及動物油脂的總量並無法實質滿足目前美國運輸燃料的生質柴油消耗量，如表2.5所示，大面積耕種主要的油脂作物也無法滿足目前美國運輸燃料之生質柴油需求量的一半，而以微藻生產生質柴油，則只須美國總耕地的1-3%即可達到50%運輸用油所需 [Chisti, 2007]。微藻生長快速且富含大量油脂，一般在24小時內便可倍數成

長，而在對數生長期間生長分裂速率將縮短至3.5小時之內。其每單位細胞乾重之油脂含量可能超過80% [Metting, 1996 ; Spolaore *et al.*, 2006]，而20-50%油脂含量的微藻則十分常見，如 表2.6所示 [Chisti, 2007]。

表 2.5、生質柴油原料來源之比較

油脂作物	油脂產量 (L/ha · year)	供應美國油脂所需耕 種面積 (M ha) <sup>a</sup>	耕種面積占美國作 物面積百分比 <sup>a</sup>
玉米	172	1,540	846
大豆	446	594	326
油菜籽	1,190	223	122
麻瘋樹	1,892	140	77
椰子	2,689	99	54
油棕	5,950	45	24
微藻 <sup>b</sup>	136,900	2	1.1
微藻 <sup>c</sup>	58,700	4.5	2.5

a. For meeting 50 % of all transport fuel needs of the United States.

b. 70 % oil (by wt) in biomass.

c. 30 % oil (by wt) in biomass.

表 2.6、不同微藻之含油量

藻類	含油量(% dry wt)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella</i> sp.	28-32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16-37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris</i> sp.	20-35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	20-48
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia</i> sp.	45-47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50-77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15-23

### 2.5.2 藻類生質柴油的可受性

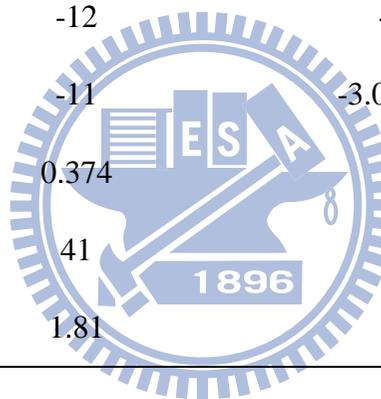
表 2.7 為柴油燃料特性、微藻油脂製成的生質柴油以及美國材料試驗協會 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 生質柴油標準之比較，由此可知，微藻油脂生質柴油的特性參數如密度、黏度、閃火點、冷濾點 (Cold filter plugging point)、凝固點及熱值，皆符合 ASTM 所訂定有關生質柴油品質的規範。然而，相較於柴油燃料，微藻油脂製成的生質柴油具有較低的冷濾點 ( $-11^{\circ}\text{C}$ )。此結果顯示，結合生化工程及轉酯化此一新的程序，為一適當且有效生產高品質微藻油脂生質柴油的方法，未來或許可替代傳統柴油燃料[Miao and Wu, 2006]。

### 2.5.3 藻類生質柴油的經濟分析

藻油產業成功的關鍵在於生產成本，許多報告針對藻油的成本進行分析，例如在水生物種計畫中，其估計在一個 400 公頃的養殖池中，使用純二氧化碳或燃煤電廠的煙道氣，在生產力為  $30\text{-}60\text{ g/m}^2/\text{day}$  且藻油含量 50% 的情況下，藻油生產成本為 39-69 美元/桶，換算 2008 幣值約 52-91 美元/桶[Sheehan *et al.*, 1998]。

表 2.7、微藻油脂生產之生質柴油、柴油及 ASTM 生質柴油規範特性之比較

Properties	Biodiesel from microalgal oil	Diesel fuel	ASTM biodiesel standard
Density (kg/L)	0.864	0.838	0.86–0.9
Viscosity (mm <sup>2</sup> /s, cSt at 40 °C)	5.2	1.9-4.1	3.5–5.0
Flash point (°C)	115	75	Min 100
Solidifying point (°C)	-12	-50 to 10	—
Cold filter plugging point (°C)	-11	-3.0 (Max -6.7)	Summer max 0; winter max < -15
Acid value (mg KOH/g)	0.374	Max 0.5	Max 0.5
Heating value (MJ/kg)	41	40-45	—
H/C ratio	1.81	1.81	—



有學者於 2007 年根據以前開放型池塘微藻生產的研究，預測微藻生物燃油生產成本相當於為原油價格 39-127 美元桶。按照 2006 年美元計算，相當於 50-265 美元/桶[Huntley and Redahe, 2007]。他們分別運行商業規模的 2 公頃面積的生物反應器和開放型池塘微藻生產系統(混合系統)，在生產力達  $70.4 \text{ g/m}^2/\text{day}$  且藻油含量 30% 的情況下，評估生物燃油生產成本分別為 84 美元桶 (2003 年)和 93 美元/桶(2006 年)。如果美國政府現在對所有生物燃油補貼 42 美元/桶，微藻生質燃油的生產似乎已具備價格競爭力。然而就現實面而言，大規模的長期養殖要達到上述要求仍有困難，根據水生物種計畫中的測試結果，在冬天，藻體的生產力會降低至僅約  $3 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，而超過 6 個月的操作試驗中，平均生產力僅約  $10 \text{ g/m}^2/\text{day}$  左右，仍有相當的距離待研究開發。然於 10-20 年後，當世界能提供的石油快要耗盡時，微藻生物燃油做為高價石油的替代燃料則具有更大的價格競爭力。如果全球變暖加劇，微藻生質燃油的價格競爭力更強。



## 2.6 生質柴油經濟效益分析

美國黃豆協會於 2001 年以黃豆油及廢食用油為原料分析對象，並收集到四個國家（日本、美國、愛爾蘭、奧地利）生質柴油主要的設備投資成本，進而分析不同產能規格（100、1000、3000、10000 公噸/年），分別以黃豆油及廢食用油為原料之生質柴油生產製造達到損益平衡點的內部報酬率、價格及相對的回收年限[美國黃豆協會，民 90]。

相關設備、製造成本及經濟分析條件設定如表 2.8。由於規模經濟效果，當生產規模由 100 公噸/年擴大至 10,000 公噸/年時，其單位產出的設備成本亦由 8 元/公斤降至 1.2 元/公斤。黃豆油廠盤平均價格由 2000 年 1 月的 18 元/公斤，於 2001 年降至 15 元/公斤左右；廢食用油於 2001 年收購的成本價約 3-4 元

/公斤，若再考慮回收商之運費成本及合理利潤，則廢食用油的原料成本約在5-6元/公斤。上述的相關成本變數及經濟條件參數將隨著市場供需及景氣狀況而變動，故本研究之分析結果亦隨實際狀況變動而有所差異。

表 2.8、製造成本及經濟分析條件設定

項目	說明	日本 <sup>(1)</sup>	美國 <sup>(2)</sup>	愛爾蘭 <sup>(3)</sup>	奧地利 <sup>(4)</sup>
規格 (年產出量)	公噸/年	100	1,000	3,000	10,000
	公秉/年	114	1,136	3,409	11,364
總設備成本 (NT萬元)	酯化反應裝置、過濾器、甲醇計量槽、脫酸裝置槽、鍋爐	452.20	2077.00	3654.25	6720.00
年金化設備成本*(NT元/公斤) Annual cost of capital(12%, 10年)		8.00	3.68	2.16	1.19
原料成本* (NT元/公斤)	黃豆油	15.31	15.31	15.31	15.31
	廢食用油	4.71	4.71	4.71	4.71
	甲醇、觸媒、藥液、脫水劑	4.28	4.28	4.28	4.28
能源成本* (NT元/公斤)	電力、水、鍋爐用煤油	0.36	0.36	0.36	0.36

	NT元/公斤 OUTPUT	價格	需求量
黃豆油	15.31	15 元/公斤	100% inputoil
廢食用油	4.71	4 元/公斤	100% inputoil
甲醇(Mathanol)	2.93	23 元/公升	11.0% inputoil
觸媒(NaOH)	0.18	9 元/公斤	2.0% inputoil
藥液、脫水劑	1.16	50 元/公升	2.0% inputoil
電力、水、鍋爐用煤油	0.36	1.8 元/度	200 kWh/1000kg

油脂轉換率	黃豆油	98%	廢食用油	85%
單位轉換：	一公秉=	0.88	公噸	
	日幣：新台幣=	1：	0.28	90.06.07牌價
	美金：新台幣=	1：	34	
	英鎊：新台幣=	1：	47	
	歐元：新台幣=	1：	28	
資本回收因子：	$R=[1-(1+R)^{-n}]$	R為折現率 (discount rate)		0.1770
生產條件	24	小時	330	天運轉
直接人工費用	\$30000/月	1人	13月	
維修、保險費用	3%	設備投資成本		
銷管費用	8%	收入		
折舊	10	年		
利息費用	9%	設備投資成本		

資料來源：(1)WWW.VDF.CO.JP

(2)PACIFIC BIODIESEL, INC. U.S.A.

(3)"Biodiesel Production Based on Waste Cooking Oil : Promotion of the Establishment of an Industry in Ireland", [WWW.BIODIESEL.ORG](http://WWW.BIODIESEL.ORG)

(4)ENERGY Umwelttechnologie GmbH Vienna, Austria

其分析方法採折現的現金流量法 (Discounted cash flow)，以油品價格

為變動因素，計算淨現值（NPV）、內部報酬率（IRR）、回收年限（PB）。經由分析可得出不同生產規模之不同預期報酬率下的損益平衡油品價格及回收年限，如表2.9。

表 2.9、生質柴油損益平衡分析

國別 規格(公噸/年)	料源別	廢食用油			黃豆油		
		IRR	12%	15%	20%	12%	15%
日本 (100)	價格	22.8	24.2	26.7	32.3	33.6	36.2
	回收年限	9.2	7.5	5.7	9.1	7.4	5.6
美國 (1,000)	價格	14.3	14.9	16.1	23.8	24.4	25.6
	回收年限	9.4	7.5	5.6	9.4	7.6	5.7
愛爾蘭 (3,000)	價格	12.3	12.6	13.3	21.8	22.1	22.8
	回收年限	9.7	8	5.8	10	7.6	5.8
奧地利 (10,000)	價格	11	11.2	11.6	20.5	20.7	21.1
	回收年限	9.8	8	6.3	15.3	11.2	5.8

說明：價格單位：元/公升，回收年限單位：年，折現率：12%

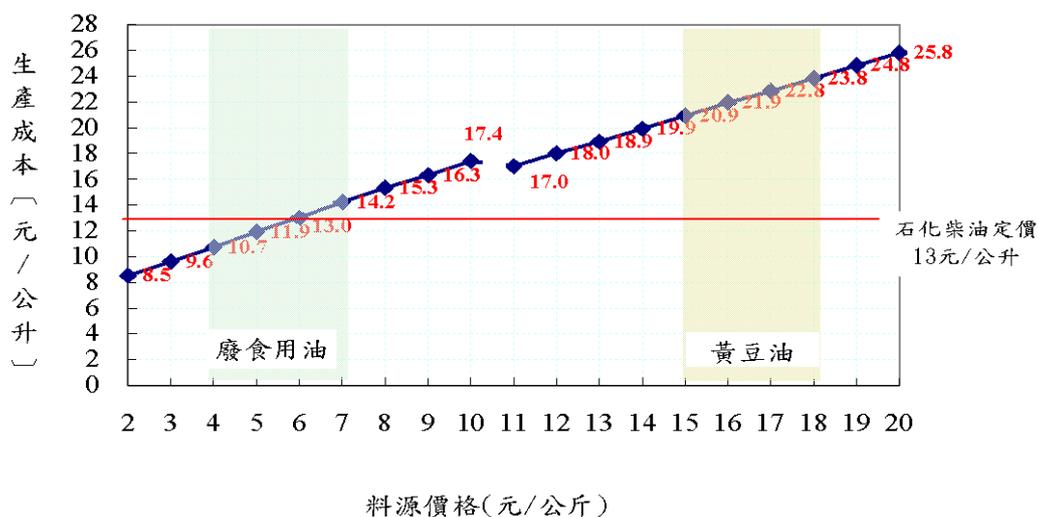
高級柴油14.3元/公升；普通柴油13.1元/公升（90.04.05中油公告零售價）

以廢食用油為原料的生質柴油，當生產規模為100公噸/年，其報酬率為12%的損益平衡點之油品價格為22.8元/公升，隨著生產規模擴大至10,000公噸/年，由於規模經濟的效果，其損益平衡之油品價格亦大幅下降至11元/公升，若提高預期報酬率至20%，則回收年限可由10年降至6年左右。同理，以黃豆油為原料的生質柴油，當生產規模為100公噸/年，其報酬率為12%的損益平衡點之油品價格為32.3元/公升，隨著生產規模擴大至10,000公噸/年，由於規模經濟的效果，其損益平衡之油品價格亦大幅下降至20.5元/公升，若提高預期報酬率至20%，則回收年限可由10年降至6年左右。

由上述的分析結果可知，以廢食用油為原料的生質柴油，當生產規模為100公噸/年，其損益平衡點之油品價格為22.8元/公升高於高級石化柴

油的 14.3 元/公升，無市場競爭利基點，但是隨著規模經濟效果的擴大，油品價格可大幅下降低於高級石化柴油，故將來生質柴油的生產，在無任何政府獎勵補助措施下，其生產規模應至少在 10,000 公噸/年以上，才能有市場競爭力。至於以黃豆油為原料的生質柴油，則因黃豆油原料價格高，以至於即使生產規模應在 10,000 公噸/年，其損益平衡的油品價格 20.5 元/公升亦高於市售高級柴油甚多，因此，目前以黃豆油為原料的生質柴油需要政府獎勵補助措施，才能有利於推廣。

此外，其更進一步分析當原料價格變動對生質柴油生產成本的影響，如圖2.3所示。由圖顯示，當廢食用油原料價格超過7元/公斤，則其生產成本將高於石化柴油價格，故若要維持市場競爭力，必需將廢食用油價格控制在7元/公斤以下。



- 說明：(1)生產規模每年產出10,000噸生質柴油  
 (2)不包含甘油收入  
 (3)已扣除投資抵減、低利貸款及加速折舊之獎勵效益

圖 2.3、生質柴油原料價格變動分析

另外，依工研院2008年的報告指出[經濟部能源局，民97]，目前國內生質柴油產製，主要以回收食用油為主要料源，搭配部分新鮮植物油脂，產出之生質柴油品質即可符合國家標準CNS 之品質要求。生質柴油生產成本中料源成本所佔比例甚大，而料源成本又受原物料價格波動變動。以2008年為例，回收食用油價格最高曾飆升至32元/公斤以上，低點則降至14.5元/公斤；如以年產量約一萬公秉生產規模之生質柴油廠計算，假設經濟壽命週期10年、設備成本約新台幣九仟萬元，其他相關運轉設定則如表2.10所列，計算IRR 7%及IRR 14%時，原料成本15-35（元/公斤）時之生質柴油價格，得計算結果如表2.11。

表 2.10、生質柴油廠運轉參數設定

參數項目	設定值
經濟壽命週期(年)	10
設備成本(元)	90,470,000
油品產量規模(公升/年)	10,000,000
原料轉換率(%)	90%
甲醇需求比例(%) (甲醇/原料)	20%
觸媒需求比例(%) (觸媒/原料)	0.70%
醋酸需求比例(%) (醋酸/原料)	0.10%
電力蒸汽需求比例(度/公斤)	0.47
電力售價(元/度)	2.00
維修、保險費用比例(%)	3%
管銷費用比例(%)	8%
融資利率(%)	5%
融資比例(%)	70%
營利事業所得稅率(%)	25%
投資抵減率(%)	7%

表 2.11、以 IRR 7% 及 14% 計算不同原料成本之生質柴油價格

原料成本 (元/公斤)	15	18.5	20	25	30	35
價格 (元/升)	21.55	24.97	26.44	31.33	36.21	41.1

IRR：7%，回收年限：7.14年

原料成本 (元/公斤)	15	18.5	20	25	30	35
價格 (元/升)	22.11	25.53	26.99	31.88	36.77	41.66

IRR：14%，回收年限：5.36年

由上表計算結果得知，當原料成本 15-35 (元/公斤) 時，以上述設定計算，所產出之生質柴油價格約介於 21.55-41.66 元/升。



## 第三章 研究方法

由於基於以國內情況的各項成本評估藻類生產生質柴油之經濟效益評估機無相關資料可茲參考。因此，本論文將評估可行的藻類上、下游產製生質柴油製程，設定藻類生成生質柴油程序的情景，針對國內以藻類生產生質柴油的各種情況加以分析其成本，並應用敏感度分析探討主要變數對生產成本的影響即提出相關發展建議，提供國內對藻類生質柴油有興趣的人員參考。主要的研究流程如圖1.1所示，以下將針對流程中各項研究方法加以說明。

### 3.1 藻類生質柴油程序設定

藻類產製生質燃料之製程分為上游製程(Upstream process)與下游製程(Downstream process)(參見表3.1之各項程序) [Sazdanoff, 2006]，上游製程為藻類培養(Cultivation)，主要分為自營培養的開放式培養池(Open-culture system)和封閉式的光生物反應器(PBR, photobioreactor)與異營培養的攪拌式醱酵槽兩類。開放式培養池多為戶外養殖，以自然陽光為照明[Terry and Raymond, 1985]，密閉式系統可分為戶外或室內培養[Pulz, 2001]，目前仍以戶外居多，因可利用天然的太陽光源，而異營培養的攪拌式醱酵槽主要在生產高單價的產品，如DHA、EPA等；下游製程主要為採收、濃縮、乾燥、萃取、溶劑回收及粗萃取物之純化等程序，以往有關於藻類的研究，較著重於養殖系統之改善，然而根據ASP的研究顯示，下游的採收與利用程序亦將近佔藻油生產成本的一半，目前對於各種下游製程已有許多報導，然而各單元間的組合則是少有人提及。

表 3.1、藻類生產生質燃料之途徑

[I] 藻類培養程序	[II] 採收程序	[III] 油脂萃取程序	[IV] 轉化程序
※藻類培養 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 開放池系統</li> <li>• 複合系統</li> <li>• 密閉式光合生物反應器</li> <li>• 異營醱酵</li> <li>• 整合培養系統</li> </ul>	※藻體回收 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 凝集</li> <li>• 浮除</li> <li>• 離心</li> <li>• 掃流過濾</li> </ul> ※除水 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 機械擠壓</li> <li>• 滴濾槽除水</li> </ul> ※乾燥 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 鼓式乾燥</li> <li>• 旋轉乾燥</li> <li>• 冷凍乾燥</li> <li>• 噴霧乾燥</li> <li>• 日曬乾燥</li> </ul>	※油脂萃取 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 機械式擠壓</li> <li>• 溶劑萃取</li> <li>• 超臨界流體萃取</li> <li>• 酵素萃取</li> <li>• 超音波</li> <li>• 滲透壓震動</li> </ul>	※轉酯化(生質柴油)  ※生物化學轉化 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 厭氧消化</li> <li>• 醱酵</li> </ul> ※熱化學轉化 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 液化</li> <li>• 熱裂解</li> <li>• 氫化程序</li> <li>• 氣化</li> </ul>

依據蒐集的文獻資料及表3.1的各項程序，設定藻類生質柴油程序如下：

### 3.1.1 培養系統

微藻培養系統的選擇需考慮幾個方面：藻的生理學特性、地產投資、勞工、能源、水、營養、天氣(室外培養)以及最終產品的形式、各種各樣的大規模培養系統需要在其基本特性如光利用率、溫度控制能力、藻承受的水壓、維持純種培養或無菌的能力，從實驗室規模進行放大的難易程度等方面進行比較，最終的選擇是在考慮所有這些方面的基礎上獲得有經濟價值的產品的協調結果。本論文選擇目前可行的微藻大規模培養系統，主要還是以傳統的開放式培養池(渠道池，圖3.1)，密閉式的光生物反應器培養(垂直圓管，圖3.2)和密閉式的醱酵槽生產為主，而複合或整合系統則涉及培養策略，在此先不予考慮。



圖 3.1、渠道池藻類培養系統



圖 3.2、垂直圓管光生物反應器

### 3.1.2 藻體採收

根據常用的化學凝集法、離心法、和加壓浮除法等幾種微藻採收方法來看，化學凝集法需要尋找合適的凝集劑，對於不同種類的微藻，需要的凝集劑可能有所不同；離心分離法比較簡單，只要有離心機並且規範操作，就可以將藻液分離；加壓浮除法採收小球藻成本較低，又可連續化操作，適合大生產的需要，但是加壓浮除法需要向藻液中加壓打入大量的氣體，採收效果受到凝集劑用量、pH和充入的氣泡密度等因素影響。離心與掃流過濾是目前兩個已實用化且最常被採用的微藻採收技術，兩者各有其優缺點與適用的藻種與其大突破的瓶頸，依目前收集的相關文獻報導，掃流過濾採收技術在成本與能耗有些微優勢，但由於其濾材成本與濾材清洗再生成本變化較大，對於生物堵塞的預防需要進一步探討。而以目前成熟的採收方式而言，以開放式系統培養藻類，由於藻體濃度過低(約~500 mg/L)，通常會以凝集法先增濃後，再加以處理；以密閉式系統培養藻類，則直接以離心法加以採收。因此，本論文將以此結合方式加以評估。

### 3.1.3 藻體萃油

由於水分對於藻油萃取的效率影響很大，因此在採收後皆須加以除水及乾燥，以增進萃取效率。在此，除水方法基本上是以傳統的機械式擠壓為主，而在乾燥方面，因冷凍乾燥及噴霧乾燥最主要用於藻類健康食品上，成本相對高，而日曬乾燥則需大面積土地較不適合國內情況，故在乾燥程序上主要以鼓式乾燥及旋轉乾燥為主；在藻油萃取上，因微藻類體積小，以擠壓方式取出的油脂量較低；所以目前常用的方法之一，是以己烷或其它有機溶劑將微藻之不飽和脂肪酸及油脂萃取出來。此外，像超臨界CO<sub>2</sub>流體萃取等幾項新型的萃取技術則需進一步的開發，仍未成熟，因此，在採收的技術選擇上以擠壓法及有機溶劑萃取法為主。

依據上述的說明，將本論文所設定的藻類生質柴油程序如下：

1. 開放式培養系統(渠道池)

→凝集採收→機械擠壓濃縮→鼓風乾燥→溶劑萃取

2. 密閉式的光生物反應器(垂直圓管)

→離心採收→機械擠壓濃縮→旋轉乾燥→溶劑萃取

3. 異營醱酵槽培養

→離心採收→機械擠壓濃縮→旋轉乾燥→螺旋擠壓提油

由於將藻油萃取出來後，經轉酯化反應生成生質柴油的技術相似，且其經濟評估亦已成熟。因此，為簡化相關的評估程序，主要將以製成藻油做為最終產品項目，分析其經濟效益。

### 3.2 藻類生質柴油情境設定

考量國內土地面積有限的問題，本論文設定以開放式培養系統及密閉式的光生物反應器的藻類培養面積以300公頃為評估的基準，而以異營醱酵槽培養藻類的方式則以應用光生物反應器於300公頃面積培養藻類所獲得的藻體量為基準設定生產槽體規模。以光合培養藻類之整體設施壽命達25年，異營醱酵生產方式則以工業生產常用的10年壽命為基準，依據上述3種途徑，設定相關的經營情境如下：

1. 情境1：基礎情況

以目前的可行技術情況為基準，藻類產率以目前狀況加以設定，所生產的產品除生質柴油外，尚有高單價DHA物質(DHA含量為總油脂量的2%)及萃取完的藻體剩餘物(可做為動物飼料)。

2. 情境2：目標情況

為以生產生質柴油為主要產品，其餘藻體可做為飼料或其他生質產品用途。

### 3.3 藻油生產製程經濟評估

進行藻油生產上、下游製程經濟評估，初步以培養面積達 300 公頃之商業化規模為評估基準。參考文獻數據並以國內之原材料、能源價格及人力成本為依據，提供設備投資成本(Capital cost)、操作及維護成本(Operating and maintenance cost)、原料(Raw material)成本、能源消耗(Energy consumption)、主產品及副產品價格(包括碳交易價格)及 ROI(Return of Investment)等數據。以建立本土化的藻油生產經濟評估模型，包括：藻類生產生質柴油製程技術之可放大性、投資成本、能耗及操作成本之參考基準指標(Baseline)，供探討藻類生質柴油經濟可行性之方向。

其分析方法採用折現的現金流量法 (Discounted cash flow)，以產品價格為變動因素，計算淨現值 (NPV)、內部報酬率 (IRR)、折現回收期間 (DPBP)。相關說明如下[威佛及威斯頓，民 91]：

#### (1) 淨現值，NPV

淨現值(Net present value, NPV)，投資方案所提供之預期現金流量根據某適當資本成本或要求報酬率折算的現值，扣除投資成本之後的餘額稱之。

$$\frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{CF_N}{(1+k)^N} - I_0 = NPV$$

$$\sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I_0 = NPV$$

其中：

$CF_t$  是計畫期間內每一期的現金流量

$I_0$  是期初的投入成本

$k$  是折現率

$N$  為投資計畫的期間

未來現金流量根據資本成本折算為現值，減去投資成本之後的淨值。投資方案淨現值也代表股東財富的增加程度，所以淨現值是評估資本預算決策的正確準則。它把所有的現金流量都考慮在內。所有的現金流量都按照市場決定的適當折現率計算現值。它符合價值加法原則。

## (2) 內部報酬率，IRR

內部報酬率(Internal rate of return, IRR)是讓方案預期現金流量現值等於投資金額的折現率。換言之，內部報酬率就是讓方案淨現值等於零的折現率。


$$\frac{CF_1}{(1+IRR)^1} + \frac{CF_2}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{CF_N}{(1+IRR)^N} - I_0 = \$0$$

$$\sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - I_0 = \$0$$

使得未來報酬流量之現值等於投資支出金額的折現率。內部報酬率方法和淨現值方法一樣，現金流量都經過折現，但內部報酬率假定現金流量在發生當初是根據內部報酬率進行再投資。

## (3) 折現回收期間，DPBP

折現回收期間(Discounted payback period, DPBP)是方案終值流量根據適當資本成本或要求報酬率計算的現值，然後計算起始投資期間的回收期間。

## 3.4 藻油生產製程成本之敏感度分析

本論文經濟評估的結果將與國外文獻之數據進行比對，並進行成本之敏感度分析，改變重要參數值，如：培養土地面積(規模大小)、藻體生長量與其油脂含量、生長速率、高單價物質含量與價格、技術突破造成設備成本之降低、油、電、水、原料、人力及土地成本等因素，觀察對於藻油生產成本的影響。



## 第四章 結果與討論

### 4.1 藻油生產經濟效益分析

為了要瞭解各種藻類培養方式對於生產生質柴油的經濟評估，本篇論文選擇以目前研究開發的開放式培養系統、密閉式光生物反應器及異營醱酵槽培養方式進行上、下游程序加以分析，應用國內的材料、人員及建造成本為基礎進行經濟可行性評估，提供給有興趣的研究人員與公司做為合適的藻類培養方法以產製生質柴油的選擇參考，經濟評估的結果如下。

#### 4.1.1 開放式培養系統

開放式系統為不同尺寸及形狀的池子，而藻類於其中培養、生長及採收，開放塘(Open pond)是最簡單、最便宜及最容易建置的藻類培養系統。事實上，並非所有都是完全建造而成的，商業模式是利用已有的水體中天然生長的藻類採收為主體。開放式渠道池(Race-way pond)設計是試著控制及提供養殖塘中藻類及營養源的混合程度，其對於基本的養殖塘能有明顯的技術功能提升，但仍是開放的型式。開放式渠道池技術已經應用於營養食品生產，且NREL ASP計畫亦聚焦於此設計，結合了開放塘系統的低成本與簡易性，加上能稍增加控制塘中的環境參數，使得開放式渠道池擁有簡易、便宜及有效等功能，而其基本的設計是利用輪槳或幫浦保持混合物沿著渠道軌跡等速循環。

在開放渠道式培養系統中，冷卻主要靠蒸發以達成目的，溫度隨著每日的循環及季節性等因素造成變動，且蒸發水損失量甚大。因為許多水量蒸發至大氣中，造成渠道池培養系統利用CO<sub>2</sub>的效率遠低於光合生物反應系統，藻體產量亦受到非預期藻類及雜菌污染等所影響，且因渠道式培養系

統較差的混合及懸浮現象使得藻體濃度維持於較低的狀況。而ASP計畫於1988年在新墨西哥州拉茲威市(Roswell)建立一座開放渠道式藻類養殖模廠進行相關研究。在測試期間，產率平均達到 $19 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，短期的尖峰產率高達 $50 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，此測試顯示通入池內的 $\text{CO}_2$ 利用率超過90%，此對於產率是一項關鍵的因子。

由以上分析，本論文將開放渠道池的藻體產率設定為 $20 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，由表2.6知對於不同的藻種而言，其油脂含量介於15-70%之間，加上開放式培養環境控制度不高及適合大量培養的藻種並不多(如綠藻、螺旋藻、杜氏藻等在較極端環境能生長的藻種)，故藻體油脂含量設定在30%(乾藻重)，且無DHA含量。此外，由於藻體除了含有油脂外，尚含有可觀之蛋白質、碳水化合物及其他營養物質[Sánchez Mirón, *et al.*, 2003]，因此藻類提取完油脂後所剩餘的藻體也具有做為動物飼料的潛力，而目前國內大豆粉飼料的售價約NT\$ 10,000/噸左右，由於藻體已經榨油且仍需市場推動及適應性等問題存在，可能降低其價格，故在此設定剩餘藻體的售價為NT\$ 5/kg(NT\$ 5,000/噸)。綜合上述說明，將開放式培養系統生產生質柴油之各參數項目設定值列如表4.1所示。

表 4.1、開放式培養系統參數設定

項目	設定值
經濟壽命週期(year)	25
藻體產率( $\text{g/m}^2/\text{day}$ )	20
藻體油脂含量(%)	30
每年運轉天數(day)	330
DHA含量(%)	0
藻類培養面積(ha)	300
剩餘藻體售價(NT\$/kg)	5
土地租金(NT\$ /ha/year)	50,000

由表4.1得每公頃培養面積每年能收獲得乾藻體量為66噸，所以 300公頃的培養面積每年能收獲的藻體量為19,800噸，以30%油脂含量計，則每年油脂產量達5,940噸，剩餘藻體量有13,860噸。至於以開放式培養系統產製生質柴油(開放渠道池→凝集採收→機械擠壓濃縮→鼓風乾燥→溶劑萃取)的各項成本依國內條件及成本列於表4.2。

表 4.2、開放式培養系統產製生質柴油各項成本

成本項目	說明	成本(NT\$)
開放渠道池系統	含週邊NT\$200,200,000	960,000,000
凝集採收池	NT\$850,000/台	1,700,000
機械擠壓	NT\$1,920,000/台	3,840,000
鼓風乾燥機	NT\$3,320,000/台	6,640,000
溶劑萃取系統	NT\$37,760,000/系統	37,760,000
設備直接總成本		1,009,940,000
<b>每年固定資本支出(A)</b>	<b>分25年、利息3%、土地</b>	<b>85,695,800</b>
電力(不含CO <sub>2</sub> 供應)		18,500,000
電力，flue gas 供應	風扇、scrubbers等	14,200,000
營養源(如N, P, Fe)		27,750,000
混凝劑、溶劑		11,000,000
耗材	濾心、CO <sub>2</sub> 及其他	20,150,000
勞工	25人(20技工+5管理)	13,500,000
廢棄物處理		3,370,000
維護、保險、稅		10,148,200
<b>總操作成本(B)</b>		<b>118,618,200</b>
<b>每年生產成本總計</b>	<b>(A)+(B)</b>	<b>204,314,000</b>

註：土地是以租賃的方式取得，租金為NT\$ 50,000/公頃/年。

由表4.2得在25年經濟壽命週期計算及利息3%的條件下，其每年固定資本支出達NT\$ 85,695,800元(佔每年生產成本41.94%)，而每年總操作成本NT\$ 118,618,200元(佔每年生產成本58.06%)，總和達NT\$ 204,314,000元為每年生產成本。每年生產成本先扣掉藻體售價(NT\$ 69,300,000元)後，可得每公斤藻油生產成本為NT\$ 22.73元。

#### 4.1.2 密閉式光生物反應器

由於密閉式光生物反應器中培養的藻體及溶液與外在環境隔絕，所以其為具有極佳控制性的系統。如此，則外來可能捕食的其他藻種、植物、動物及細菌等被隔離在外，且所需的CO<sub>2</sub>濃度、pH、水位及其他環境因子則保持在內部。在密閉系統中產率通常高於開放系統，依培養的藻種而有不同的藻體濃度，約介於1-5 g/L，如以單位面積產能約在30-60 g/m<sup>2</sup>/day之間。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，使得設備成本變得昂貴，所以光生物反應器的設備投資成本較開放池昂貴。

本論文將密閉式光生物反應器(垂直圓管)的藻體產率設定為40 g/m<sup>2</sup>/day，密閉式培養環境控制度高及適合高密度培養，且可調控其油脂生長路徑生成高單價DHA產物(含量視培養的藻種而定)，故藻體油脂含量設定在40%(乾藻重)，且DHA含量為油脂含量的2.5%。微藻能夠生產許多高商業價值的物質，比如不飽和脂肪酸、藻多醣體、類胡蘿蔔素、藻蛋白等。這些物質能應用於製藥、食品和動物飼料等多種工業生產。在此，將著重於 $\omega$ -3多元不飽和脂肪酸(與油脂共存)的生產以降低藻油成本，最重要的 $\omega$ -3多元不飽和脂肪酸是DHA和EPA。而本論文則以DHA為評估對象，藻種有等鞭金藻、隱甲藻等。DHA是人類腦發育的重要營養品，被譽為腦黃金，為大腦和視網膜中的一種主要構成脂肪酸及心臟組織的重要成分，在營養和藥

學上有重要作用。但DHA在人體內不能自身合成，只能靠膳食中獲得。DHA的傳統生產方法是從深海魚油中提取，但隨著市場需求量的增大，魚油資源已經無法適應，從微藻中提取DHA成為當前海洋科學領域研究的焦點。市場上高純度DHA的售價高達美金1,000元/公斤，而在此因DHA只初步由藻油中分離(純度為80-90%左右)，故設定粗DHA的售價為NT\$ 1,800/kg。此外，榨完油後剩餘的藻體仍可做為動物飼料，售價與開放式培養系統相同為NT\$ 5/kg(NT\$ 5,000/噸)。綜合上述說明，將密閉式光生物反應器生產生質柴油之各參數項目設定值列如表4.3所示。

表 4.3、密閉式光生物反應器參數設定

項目	設定值
經濟壽命週期(year)	25
藻體產率(g/m <sup>2</sup> /day)	40
藻體油脂含量(%)	40
每年運轉天數(day)	330
DHA含量(%)	油脂含量的2.5%
DHA售價(NT\$/kg)	1,800
藻類培養面積(ha)	300
剩餘藻體售價(NT\$/kg)	5
土地租金(NT\$ /ha/year)	50,000

由表4.3得每公頃培養面積每年能收獲得乾藻體量為132噸，所以300公頃的培養面積每年能收獲的藻體量為39,600噸，以40%油脂含量及DHA含量為油脂的2.5%計，則每年油脂產量達15,444噸，DHA產量達396噸，而剩餘藻體量有23,760噸。至於以密閉式光生物反應器產製生質柴油(密閉式光生物反應器→離心採收→機械擠壓濃縮→旋轉乾燥→溶劑萃取)的各項成本依國內條件及成本列於表4.4。

表 4.4、密閉式光生物反應器產製生質柴油各項成本

成本項目	說明	成本(NT\$)
密閉反應系統	含週邊NT\$270,000,000	12,270,000,000
離心採收	含採收帶、儲存槽等	1,699,440,000
機械擠壓	NT\$1,920,000/台	3,840,000
旋轉乾燥機	NT\$3,500,000/台	7,000,000
溶劑萃取系統	NT\$55,760,000/系統	55,760,000
酯化分離系統	NT\$92,000,000/系統	92,000,000
設備直接總成本		14,128,040,000
<b>每年固定資本支出(A)</b>	<b>分25年、利息3%、土地</b>	<b>1,004,009,000</b>
電力(不含CO <sub>2</sub> 供應)		30,500,000
電力，flue gas 供應	風扇、scrubbers等	19,500,000
營養源(如N, P, Fe)		38,170,000
溶劑	己烷、乙醇	54,340,000
耗材	濾心、CO <sub>2</sub> 及其他	70,130,000
勞工	25人(20技工+5管理)	13,500,000
廢棄物處理		3,370,000
維護、保險、稅		29,625,000
<b>總操作成本(B)</b>		<b>259,135,000</b>
<b>每年生產成本總計</b>	<b>(A)+(B)</b>	<b>1,263,144,000</b>

註：土地是以租賃的方式取得，租金為NT\$ 50,000/公頃/年。

由表4.4得在25年經濟壽命週期計算及利息3%的條件下，其每年固定資本支出達NT\$ 1,004,009,000元(佔每年生產成本79.48%)，而每年總操作成本NT\$ 259,135,000元(佔每年生產成本20.53%)，總和達NT\$ 1,263,144,000元為每年生產成本。每年生產成本先扣掉DHA售價(NT\$ 702,000,000元)及藻體售價(NT\$ 118,800,000元)後，可得每公斤藻油生產成本為NT\$ 27.94元。

至於生產乾藻體(algae biomass)至酯化藻油程序的各主要設備清單，則包括光合反應器(垂直圓管)、離心機、培養基過濾單元、進料泵浦、進料槽、藻液採收儲存槽、離心進料泵浦、空氣壓縮機、藻體採收輸送帶、海水抽水站、二氧化碳供應站與藻體儲槽等，及各項設備成本與各項投入成本之百分比(表4.5)，表4.6為生產藻體之總固定資本支出及年度固定資本支出等相關費用之比例，固定資本支出以主要設備最多約佔62.5%，折舊費用則佔年度固定資本支出之56.63%。

生產藻體之原料成本、公用設備與其他管理費用如表4.7所示，其中原料成本以培養基及二氧化碳供應佔一半(約50.72%)，其次為溶劑(己烷加乙醇)使用佔33.41%，公用設備支出完全為電費，藻體單位生產成本估計約NT\$ 27.94/kg。



表 4.5、生產藻體主要設備清單及成本

項目	單元成本 (NT\$)	單元數	總金額(NT\$)	主要設備 (%)
1.光合反應器 (0.2 m <sup>3</sup> /支)	10,000	750,000	7,500,000,000	84.43
2.離心機 (15 m <sup>3</sup> /h)	3,200,000	300	960,000,000	10.81
3.培養基過濾單元 (15 m <sup>3</sup> /h)	102,000	100	10,200,000	0.11
4.培養基進料泵浦 (2 m <sup>3</sup> /h)	5,000	15,000	75,000,000	0.84
5.培養基進料槽(100 m <sup>3</sup> )	1,500,000	10	15,000,000	0.17
6.藻液採收儲存槽(100 m <sup>3</sup> )	500,000	300	150,000,000	1.69
7.離心進料泵浦 (15 m <sup>3</sup> /h)	22,000	300	6,600,000	0.07
8.空氣壓縮機 (1,000 m <sup>3</sup> /h)	1,950,000	30	58,500,000	0.66
9.藻體採收輸送帶	210,000	30	6,300,000	0.07
10.海水抽水站(50 m <sup>3</sup> /h)	750,000	10	7,500,000	0.08
11.二氧化碳供應站 (500 kg/h)	125,000	10	1,250,000	0.01
12.磅站	130,000	10	1,300,000	0.01
13.藻體儲槽 (50 m <sup>3</sup> )	150,000	10	1,500,000	0.02
14.機械擠壓機	1,200,000	2	2,400,000	0.03
15.旋轉乾燥窯	2,500,000	2	5,000,000	0.06
16.萃取槽(含冷凝器)	1,800,000	2	3,600,000	0.04
17.溶劑槽(50 m <sup>3</sup> )	1,000,000	2	2,000,000	0.02
18.蒸餾塔(含冷凝器)	18,000,000	1	18,000,000	0.20
19.反應器(含冷凝器)	1,500,000	2	3,000,000	0.03
20.甲醇槽(50 m <sup>3</sup> )	1,000,000	1	1,000,000	0.01
21.分餾塔(含冷凝器)	55,000,000	1	55,000,000	0.62
<b>主要設備成本總計 (\$)</b>			<b>8,883,150,000</b>	

表 4.6、生產藻體之總及年度固定資本支出

項目	成本 (NT\$)	固定資本額(A)%
1.主要設備 (MEC)	8,883,150,000	62.50
2.安裝費用 (0.05 MEC)	444,157,500	3.12
3.儀控設備 (0.1 MEC)	888,315,000	6.25
4.管線(配管費用) (0.1 MEC)	888,315,000	6.25
5.電力設施(配電費用) (0.1 MEC)	888,315,000	6.25
6.建物 (0.05 MEC)	444,157,500	3.12
7.廠區改善 (0.05 MEC)	444,157,500	3.12
8.維修設備 (0.05 MEC)	444,157,500	3.12
9.土地租金 (NT\$ 50,000/公頃)	15,000,000	0.11
10.工程管理 (0.1 MEC)	888,315,000	6.25
<b>固定資本支出總計, A (\$)</b>	<b>14,213,040,000</b>	
項目	金額 (NT\$)	每年資本支出(B)%
折舊 (1-8, 10項總合)/25年)	568,521,600	56.63
資產稅(土地房屋稅) (0.01折舊)	5,685,200	0.57
保險 (0.006折舊)	3,411,130	0.34
土地租金 (NT\$ 50,000/公頃)	15,000,000	1.49
本金利息 (每年3%)	426,391,200	42.46
<b>每年資本支出費用, B(\$)</b>	<b>1,004,009,000</b>	

表 4.7、生產藻體之直接成本

原料	總量(kg)	成本(NT\$)	原料成本(C)%
1.培養基 (NT\$18.5/kg)	1,965,000	36,352,500	23.47
2.二氧化碳 (NT\$14.5/kg)	2,910,000	42,195,000	27.25
3.培養基過濾 (NT\$2,200/unit)	6,300 units	13,860,000	8.95
4.空氣過濾 (NT\$2,950/unit)	3,150 units	9,292,500	5.99
5.己烷, m <sup>3</sup> (NT\$11,000/ m <sup>3</sup> )	1,000	11,000,000	7.10
6.乙醇, m <sup>3</sup> (NT\$24,700/ m <sup>3</sup> )	1,650	40,755,000	26.31
7.其他耗材 (NT\$3,700/kg)	390	1,443,000	0.93
<b>原料成本總計, C (\$)</b>		<b>154,898,000</b>	
公用設備(水電瓦斯)	總量	成本(NT\$)	總計(D)%
8.冷卻水(含泵浦站)	14,500,000	0	0
9.電力(NT\$ 2/kW h)	25,000,000kWh	50,000,000	100
<b>總計, D (\$)</b>		<b>50,000,000</b>	
其他	總量	成本(NT\$)	總計(E)%
10.勞工(NT\$500,000/年, 1 班)	20人	10,000,000	18.44
11.管理 (5人)		3,500,000	6.454
12.維護 (0.002 MEC)		17,766,300	32.76
13.操作耗材 (0.004 C)		619,592	1.14
14.管理費用 (0.25(勞工+管理+維護))		7,816,575	14.41
15.稅 (0.05 1-9,12,13項總合)		11,164,195	20.58
16.廢水處理(NT\$18.2/m <sup>3</sup> )		3,370,000	6.21
<b>總計, E (\$)</b>		<b>54,236,662</b>	
<b>生產成本總計, F (B+C+D+E)(NT\$)</b>		<b>1,263,144,000</b>	
<b>藻體單位生產成本(NT\$/kg)</b>		<b>27.94</b>	

### 4.1.3 異營醱酵槽培養

目前國內外的研究主要是利用光生物反應器來實現微藻的高細胞密度培養，利用工業醱酵技術進行微藻的異營高細胞密度培養，是微藻大規模高效工業化生產的另一種發展趨勢。微藻在無光條件下以異營方式利用有機碳源，尤其是較低價值糖類物質，可以達到高密度培養微藻以生產高附加值代謝產物的目的。但是並不是所有的微藻都可以進行異營生長，需要通過異營化篩選，找到能異營性的微藻。在大陸有學者以淡水藻小球藻 (*Chlorella*) 為實驗藻種，通過在培養基中加入有機碳源，降低無機氮源的條件下進行小球藻異營生長，獲得葉綠素消失、細胞變色的異營性小球藻，與未經轉化的自營性小球藻相比，異營藻細胞的粗脂肪含量提高了4倍以上。利用正己烷從這些異營藻細胞中提取獲得了大量微藻油脂。這些微藻油脂在30°C、醇油物質的量比為56:1以及濃硫酸催化條件下經酯交換反應4 h可形成高品質的生質柴油，熱值高達41 MJ/kg。藻類的異營生長，不僅可提高細胞內脂類的含量，而且也是提高其生物量的有效途徑。異營培養微藻可以克服光合自營培養的許多缺陷，具有生長速度更快、能達到純種培養、單位體積產率高、便於自動化控制、產品品質穩定等優勢，是提高微藻產量的有效途徑，比密閉式光生物反應器系統更具有優勢。但也須利用有機碳源，因而存在使用有機碳源葡萄糖量大而出現成本的問題，此有待以廉價的碳源利用加以解決。

微藻異營高密度培養是一個相對概念，是指應用一定的培養技術和裝置來提高藻體的醱酵密度，使藻體密度較普通培養有顯著的提高，以提高特定產物的比生產率。用以描述比生產率的單位是乾細胞重量/升 (DCW/L)。廣義來講，凡是細胞密度相對比較高，以至接近其理論值的培養均可稱為高密度培養，一般認為其上限值為150-200 g/L，下限值為20-30

g/L。依據研究報導*Schizochytrium* sp.、*Ulkenia* sp.和*Cryptocodinium cohnii*是目前商業化生產DHA最普遍的微藻。de Swaaf *et al.*[2003]用醋酸補料培養方式培養*Cryptocodinium cohnii*，藻體量乾重高達109 g/L，油脂產量達61 g/L，DHA生產率達到19 g/L，然其培養時間長達400 小時，使得平均的產率相對較低。Chi *et al.*[2009]應用溶氧控制方式培養*Schizochytrium limacinum* SR21海藻，於200 小時的培養時間下，獲得藻體量乾重及DHA生產率分別為37.9 g/L與6.56 g/L。

由以上分析，本論文將異營醱酵槽培養的藻體產率設定為5 g/L/day(即於6天入料及培養時間條件下，藻體濃度達30 g/L)，藻體油脂含量同樣設定在40%(乾藻重)，且DHA含量為油脂含量的5%。此外，以每年生產藻體量39,600噸(密閉式光反應器系統產能)為基礎，建置異營醱酵槽，在相同的藻體產量下所估算得所需異營培養體積達24,000公秉，共需120公秉(培養體積約100公秉)醱酵槽240座。由於應用醱酵系統生產藻油所需土地與實地戶外培養的面積(於相同的產能情況)相差甚大，約只需1-2%即可達成，且可直接於工業區內生產，因此，以國內彰濱工業區土地以租代買的006688方案估算土地的費用，費用為NT\$ 35/m<sup>2</sup>/month。而對於工業生產設備而言，其壽命週期一般設定為10年。另外，DHA及剩餘藻體的售價同樣分別設定為NT\$ 1,800/kg及NT\$ 5/kg(NT\$ 5,000/噸)。綜合上述說明，將異營醱酵槽培養系統生產生質柴油之各參數項目設定值列如表4.8所示。

表 4.8、異營醱酵槽培養參數設定

項目	設定值
經濟壽命週期(year)	25
藻體產率(g/L/day)	5
藻體油脂含量(%)	40
每年運轉天數(day)	330
DHA含量(%)	油脂含量的5%
藻類培養體積(kL)	24,000
DHA售價(NT\$/kg)	1,800
剩餘藻體售價(NT\$)	5
所需土地面積(ha)	5
單位土地費用(NT\$ /ha/year)	4,200,000

由表4.8得在24,000公秉的培養體積及藻體產率設定為5 g/L/day的情況下，每年能收穫的藻體量達39,600噸，以40%油脂含量及DHA含量為油脂的5%計，則每年油脂產量達15,048噸，DHA產量達792噸，而剩餘藻體量有23,760噸。至於以異營醱酵槽培養產製生質柴油(異營醱酵槽培養→離心採收→機械擠壓濃縮→旋轉乾燥→螺旋擠壓提油)的各項成本依國內條件及成本列於表4.9。

由表4.9得在10年經濟壽命週期計算及利息3%的條件下，其每年固定資本支出達NT\$ 966,154,080元(佔每年生產成本50.37%)，而每年總操作成本NT\$ 951,971,800元(佔每年生產成本49.63%)，總和達NT\$ 1,918,125,880元為每年生產成本。每年生產成本先扣掉DHA售價(NT\$ 1,425,600,000元)及藻體售價(NT\$ 118,800,000元)後，可得每公斤藻油生產成本為NT\$ 24.83元。

表 4.9、異營醱酵槽培養產製生質柴油各項成本

成本項目	說明	成本(NT\$)
醱酵反應系統	NT\$25,500,000/組	6,120,000,000
離心採收	含採收帶、儲存槽等	840,000,000
機械擠壓	NT\$1,920,000/台	3,840,000
旋轉乾燥機	NT\$3,500,000/台	7,000,000
螺旋擠壓提油系統	NT\$25,576,000/系統	25,576,000
酯化分離系統	NT\$92,000,000/系統	92,000,000
土建、廠房及週邊		182,000,000
設備直接總成本		7,270,416,000
土地成本	4,200,000 NT\$ /ha/year	21,000,000
<b>每年固定資本支出(A)</b>	<b>分10年、利息3%(218,112,480)</b>	<b>966,154,080</b>
電力	以每度電NT\$ 2元計	25,500,000
電力，空氣供應	鼓風機	16,500,000
營養源(如C, N, P, Fe)		743,870,000
溶劑	乙醇	40,755,000
耗材	濾心及其他	23,296,800
勞工	100人(90技工+10管理)	52,000,000
廢棄物處理	高濃度培養液排放	23,500,000
維護、保險、稅		26,550,000
<b>總操作成本(B)</b>		<b>951,971,800</b>
<b>每年生產成本總計</b>	<b>(A)+(B)</b>	<b>1,918,125,880</b>

#### 4.1.4 相異生產製程經濟分析比較

根據NREL的資料，每公頃微藻的生質柴油生產系統的營運成本為美金12,000元，其中包括了固定資本折舊、人工、電力、化工原料、維護保養及投資回報等所有經營成本。據此可測算出，從微藻中提取生質柴油在美國

的成本為美金134.4元/桶(約合NT\$ 27.06/L  $\cong$  NT\$ 29.77/kg)。這在美金30-40元/桶的低油價時代是沒有競爭力的。但如在國際原油價格高達美金100-140元/桶的時候，吾人已看到了應用微藻生產生質柴油之綠色燃料產業的希望和現實可能性。

經由上述針對開放式培養系統、密閉式光生物反應器及異營醱酵槽培養等程序產製生質柴油所做的各項經濟分析，將其結果列於表4.10，並將其每年生產總成本及生產生質柴油的經濟比較，繪製於圖4.1及圖4.2。由於異營醱酵槽培養程序類似於工業生產製程，因此其經濟壽命週期以工業上常用的10年加以分析，而其餘兩程序類似於種植作物，故以25年的週期進行評估。以總投資額而言，以密閉式光生物反應器程序的141億元為最高，異營醱酵槽培養程序次之，而開放式培養系統需10億元左右，只有密閉式光生物反應器程序的十四分之一，由國外的文獻資料指出，密閉式光生物反應器建置所需成本約為開放式培養系統的10-20之間，以國內的情況所估算的成本亦落在此範圍之間。此外，這些生產程序的年期NPV值、內部報酬率(IRR)及折現回收年限等分析，則以製表計算，如表4.11為異營醱酵槽培養產製生質柴油經濟評估表，其他程序是以類似的方式計算而得。

由圖4.1可知，此三個生產程序除總投資額差異甚大外，對於每年固定資本支出及總操作成本亦有相當大的差別。對於開放式培養系統，其固定資本支出與總操作成本的比率約4:6比，此乃因為其總投資額較低所造成；而密閉式光生物反應器程序則因總投資額達141億元，雖然其操作成本亦遠高於開放式培養系統，仍造成固定資本支出與總操作成本的比率約8:2比的結果；至於異營醱酵槽培養程序的固定資本支出與總操作成本的比率約5:5比，雖其總投資額達72.7億元，且以10年壽命週期分析，然由表4.9可知其操作成本中，營養源成本佔了近8成(約7.4億元)，使得操作成本高，而造成此結果。

此外，由圖4.2可知，此三個生產程序的藻油生產成本、內部報酬率(IRR)及折現回收年限間的比較。每公斤藻油生產成本由小至大為開放式培養系統(22.73元) < 異營醱酵槽培養(24.83元) < 密閉式光生物反應器(27.94元)；如以藻油售價為30元/公斤為基準，計算其內部報酬率由大至小為開放式培養系統(8.3%) > 異營醱酵槽培養(4.31%) > 密閉式光生物反應器(4.13%)，與藻油生產成本成對比；然而，分析其折現回收年限則得到由小至大排序為異營醱酵槽培養(8.67年) < 開放式培養系統(11.28年) < 密閉式光生物反應器(16.24年)，此可能是因為異營醱酵槽培養程序所獲得高單價DHA量多，使得其現金流量大所造成的結果。

表 4.10、相異生產程序產製生質柴油各項經濟分析比較

項目 \ 生產製程	開放式培養系統	密閉式光生物反應器	異營醱酵槽培養
經濟壽命週期(年)	25	25	10
藻體產量(噸/年)	19,800	39,600	39,600
總投資金額(萬元)	100,994	1,412,804	727041.6
固定資本支出(萬元)	8569.58[41.94%]	100400.9[79.48%]	96615.408[50.37%]
總操作成本(萬元)	11861.82[58.06%]	25913.5[20.52%]	95197.18[49.63%]
藻油生產成本(元/公斤)	22.73	27.94	24.83
內部報酬率，IRR(%)	8.91	5.33	5.44
折現回收年限(年)	13.65	20.51	9.34
年期 NPV 值(萬元)	56,389	190,352	46,689

註：括號[ ]內表示佔每年生產總成本的百分率。

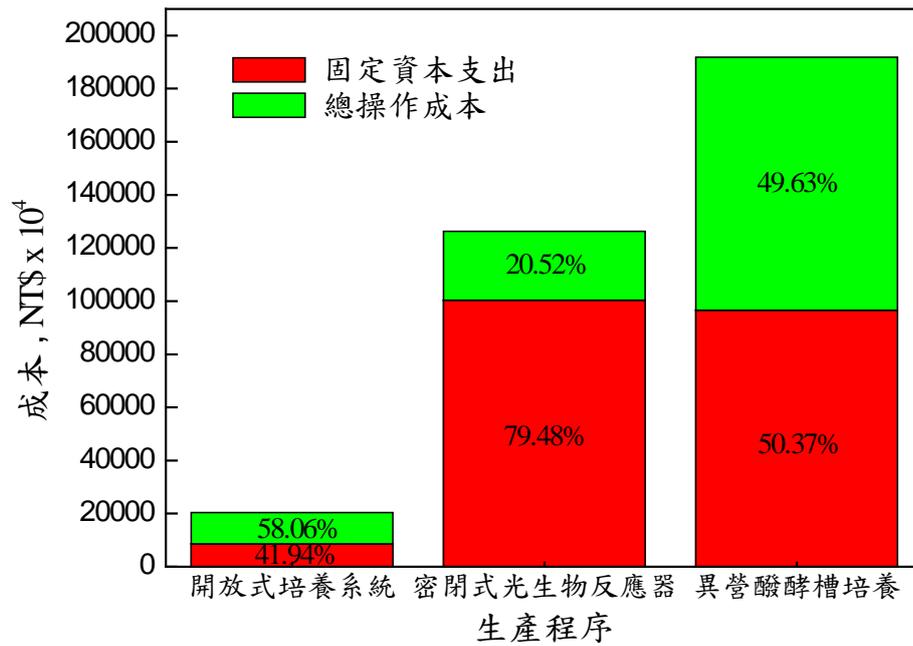


圖 4.1、各生產程序每年生產總成本分析

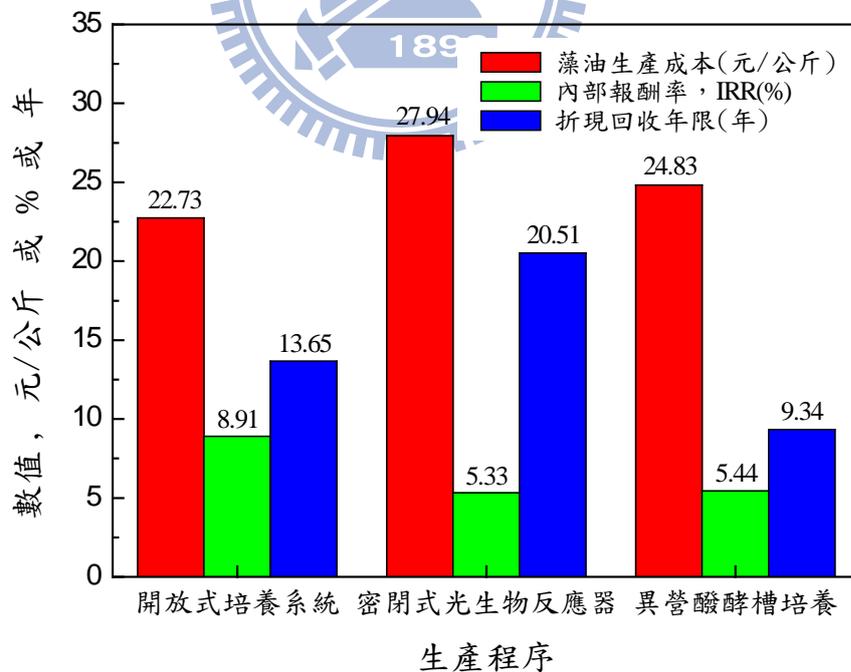


圖 4.2、各生產程序的生產經濟比較

表 4.11、異營醱酵槽培養產製生質柴油經濟評估表

總投資金額: 727041.6 萬元

單位: NT 萬元

年度	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
運轉起算年數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
投資金額	(727042)									
舊機出售利益	0									
營運資金	(72704)									
收入										
藻油銷售收入	45144	45144	45144	45144	45144	45144	45144	45144	45144	45144
副產物收入	154440	154440	154440	154440	154440	154440	154440	154440	154440	154440
收入合計	199584	199584	199584	199584	199584	199584	199584	199584	199584	199584
支出										
營養源成本	74387	74387	74387	74387	74387	74387	74387	74387	74387	74387
物料成本	4075.50	4075.50	4075.50	4075.50	4075.50	4075.50	4075.50	4075.50	4075.50	4075.50
耗材	2329.68	2329.68	2329.68	2329.68	2329.68	2329.68	2329.68	2329.68	2329.68	2329.68
油、電	4200.00	4200.00	4200.00	4200.00	4200.00	4200.00	4200.00	4200.00	4200.00	4200.00
直接人工	5200.00	5200.00	5200.00	5200.00	5200.00	5200.00	5200.00	5200.00	5200.00	5200.00
折舊費用	72,704	72,704	72,704	72,704	72,704	72,704	72,704	72,704	72,704	72,704
廢棄物處理費用	2350	2350	2350	2350	2350	2350	2350	2350	2350	2350
土地費用	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100
維修、管銷、稅費用	2655	2655	2655	2655	2655	2655	2655	2655	2655	2655
利息費用	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811
支出合計	191813	191813	191813	191813	191813	191813	191813	191813	191813	191813
稅前損益	7771	7771	7771	7771	7771	7771	7771	7771	7771	7771
-所得稅 稅率 25.00%	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943	1,943
+投資抵減	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
稅後損益	5829	5829	5829	5829	5829	5829	5829	5829	5829	5829
累計稅後損益	5829	11657	17486	23314	29143	34971	40800	46628	52457	58286
折舊加回	72704	72704	72704	72704	72704	72704	72704	72704	72704	72704
利息費用加回	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811	21,811
-還貸款本金										
未折現現金流量	(699402)	100344	100344	100344	100344	100344	100344	100344	100344	100344
年折現率= 4%	100.0%	104.0%	108.2%	112.5%	117.0%	121.7%	126.5%	131.6%	136.9%	142.3%
折現現金流量	(699402)	96485	92774	89205	85774	82475	79303	76253	73320	70500
累計折現現金流量	(699402)	(602917)	(510144)	(420938)	(335164)	(252688)	(173385)	(97132)	(23811)	46689
年期NPV值: 46,689 萬	折現回收年限:		9.34	年	內部報酬率(IRR):		5.44%			

## 4.2 敏感度分析結果

對於石化產業而言，應用藻油具有可完全取代石油做為碳氫化合物原料來源的潛力。如果此將實現，則藻油的成本與原油的價格大致可以如下的方程式表示[Chisti, 2007]：

$$C_{\text{algal oil}} = 6.9 \times 10^{-3} C_{\text{petroleum}}$$

其中  $C_{\text{algal oil}}$ (\$/公升)為藻油的價格，而  $C_{\text{petroleum}}$  為原油每桶(Barrel, =158.97 公升)的價格(美金)。例如，若以目前原油價格美金 80 元/桶計算，則藻油欲完全取代原油的價格應不超過美金 0.55 元/公升，而當原油價格上升至美金 140 元/桶時，則藻油的價格應低於美金 0.97 元/公升。在此須注意上列方程式是假設藻油的能量含量約為原油的 80%情況下所得的結果。

經由4.1節針對開放式培養系統、密閉式的光生物反應器及異營醱酵槽培養方式等的經濟分析結果知其產出的藻油成本分別為NT\$ 22.73/公斤、27.94/公斤及24.83/公斤，仍然高於上述方程式所述能取代原油的價格。目前主要的研究者及公司已慢慢相信密閉光合生物反應器是做為生質燃料原料生產最具經濟可行性的選擇，隨著研究進展產率逐漸提升，成本則持續下降，使得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，因此最終將趨使此產業邁向高產率的生長系統。因此，本論文以密閉式光生物反應器生產生質柴油的經濟評估為基礎，而以開放式生產系統為輔做為比較，設定影響生產成本變數(如藻體產率與其油脂含量、生長速率、高單價物質含量

與價格、建造成本等)的範圍，進行敏感度的分析以瞭解對成本影響相對重要的變數，可做為研究發展的參考。

需注意在本論文是以藻油為主要產品，而高單價DHA產品及剩餘藻體等為生產過程中的副產品。由於要瞭解各變數對藻油成本的影響程度，在敏感度分析中使用較大變異範圍加以分析，可能造成藻油成本有零或負值的情況發生，此表示只副產品售出的收入即可達到年度收支平衡(藻油成本為零的情況)或已達到年度收入大於支出，並將多出的收入部分(盈餘)除以藻油量，以每單位藻油的方式表示副產品售出的盈餘，且以負值表示，而全部的盈餘為每單位數值乘上藻油量即可得(藻油成本為負值的情況)。以下即為各變數敏感度分析的結果：

#### 1. 藻體產率(Biomass productivity, g/m<sup>2</sup>/day)

藻體的產率隨藻種、外在環境、培養方式等而改變，如在溫帶/亞熱帶地區，開放式的培養年平均產率約在20-25 g/m<sup>2</sup>/day，在天氣較冷時則產率約為10 g/m<sup>2</sup>/day左右，然在尖峰的產率仍可到50 g/m<sup>2</sup>/day以上，而以密閉式光生物反應器藻類培養而言，文獻報導[Chisti, 2007]約在30-60 g/m<sup>2</sup>/day之間。因此，在此分析將藻體產率範圍設定於10-60 g/m<sup>2</sup>/day之間，觀察其對於開放式的培養及密閉式光生物反應器程序之藻油成本的影響，結果如圖4.3所示。由圖知當產率介於10-55 g/m<sup>2</sup>/day時，密閉式光生物反應器生產的藻油成本由每公斤273.31元降至5.64元，而開放式培養系統生產的藻油成本由每公斤57.13元降至0.84元，影響甚鉅。由於密閉式光生物反應器生產程序中有高單價的DHA產出，且產量隨著藻體量增加而增加，因此，隨著藻體產率的增加所造成藻油成本的影響較大。

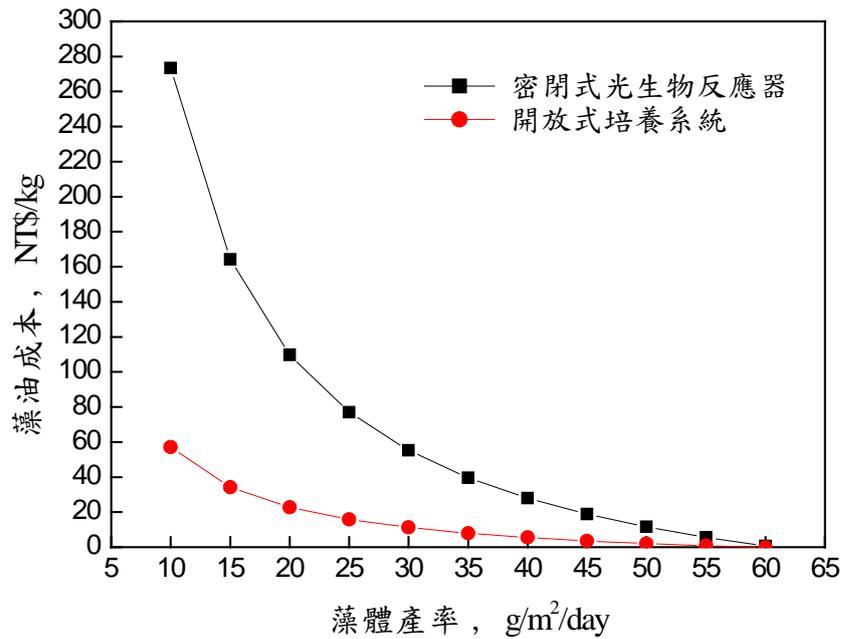


圖 4.3、藻體產率對不同程序藻油成本的影響

## 2. 藻體油脂含量(%)

對於不同種類藻株的大範圍油脂含量(~15-70%)已有許多報導[Chisti, 2007]，而當藻株生長於極端的情況下(如缺氧)及不再複製的條件下通常可使藻株達到較高的油脂含量[Borowitzka, 1988]。在本論文中保守的將開放式系統中為藻油脂含量設定於30%，而密閉式光合系統設定於40%。因此，為瞭解藻體油脂含量藻油成本的影響，將其範圍設定於15-70%之間，分析結果如圖4.4所示。由圖知當藻體油脂含量介於15-65%時，密閉式光生物反應器生產的藻油成本由每公斤142.88元降至1.42元，而開放式培養系統生產的藻油成本由每公斤40.50元降至13.18元，影響甚鉅。此外，因密閉式光生物反應器程序中高單價的DHA產量隨著油脂含量增加而增加，因此，造成對藻油成本的影響較大，此與藻體產率分析的結果類似。

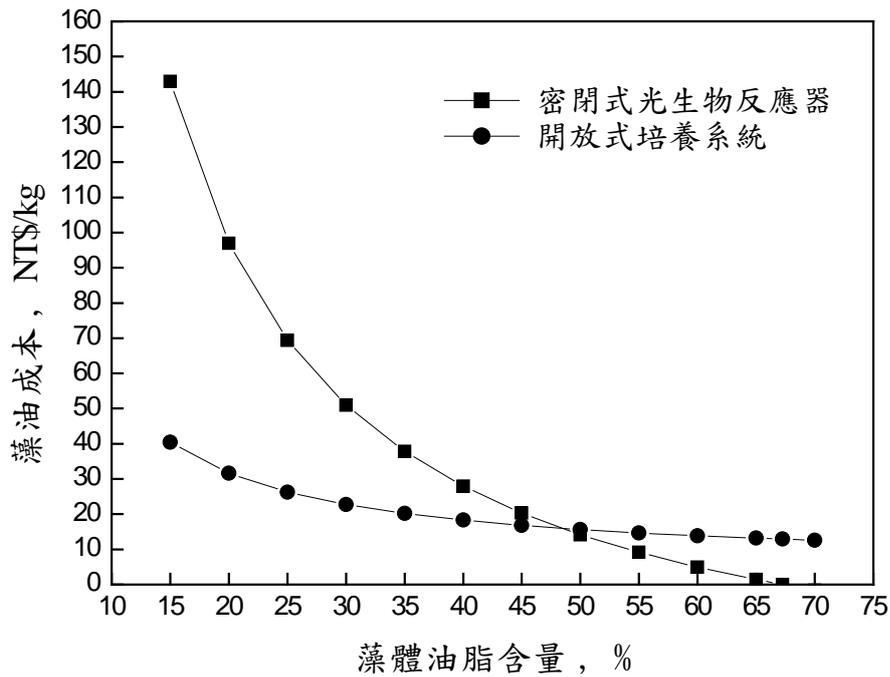


圖 4.4、藻體油脂含量對不同程序藻油成本的影響

### 3. 高單價產品DHA的價格

對於高單價DHA的售價的敏感度分析，在此只針對密閉式光生物反應器程序進行分析(開放式培養系統已設定無DHA產出)。DHA的價格範圍設定於NT\$ 0-2,890元/公斤之間，其對於藻油成本及內部報酬率(IRR)的影響如圖4.5所示。由圖知當DHA售價介於NT\$ 0-2,800元/公斤時，藻油成本由每公斤74.09元降至2.30元，而內部報酬率(IRR)由-1.57%升至8.49%，折現回收年限由61.35年降至13.84年，如進一步提高DHA售價至NT\$ 10,000元/公斤時(國外曾報導高純度DHA的售價高達US\$ 1,000/kg)，則IRR提高至31.01%，且折現回收年限降至4.52年，影響甚鉅。雖然DHA對於經濟性的影響甚大，然因市場規模已趨近飽和的緣故，仍需進一步的市場開發。

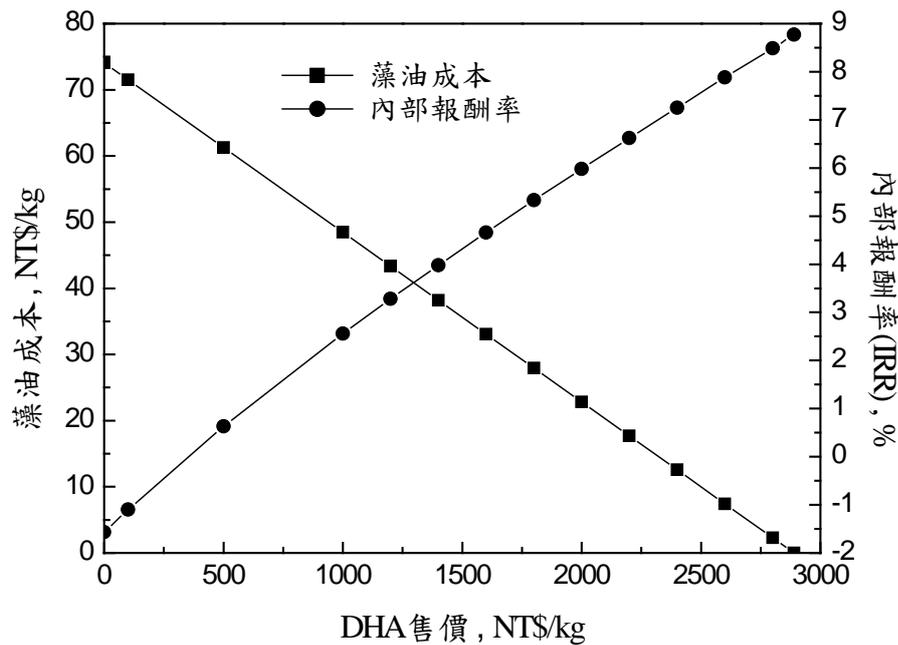


圖 4.5、DHA 的售價對藻油成本與內部報酬率的影響

#### 4. 剩餘藻體的價格

目前以藻體做為漁業用飼料的價格約在US\$ 800-1,000/公噸之間，然而因藻體內的油脂已被萃出，可能降低其做為餌飼料的營養價值及用途，依國外評估剩餘藻體價格只約在US\$ 400-500/噸之間，與大豆飼料及相似原料價值相當。在本論文中，假定藻體做為飼料用途仍需進一步推廣，其售價設定為NT\$ 5,000元/公噸。而於敏感度分析中，將剩餘藻體的價格範圍設定於NT\$ 0-15,000元/公噸之間，其對於藻體成本的影響如圖4.6所示。由圖知當剩餘藻體售價介於0-14,000元/公噸時，密閉式光生物反應器生產的藻油成本由每公斤35.63元降至14.09元，而開放式培養系統生產的藻油成本由每公斤34.40元降至1.73元，雖有一定的影響程度，仍比高單價物質DHA的影響小。

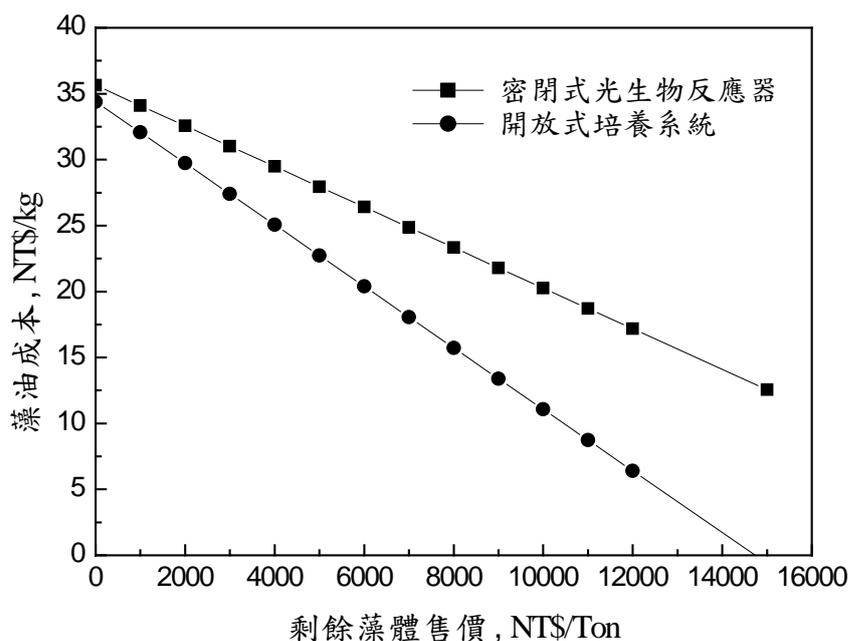


圖 4.6、剩餘藻體的售價對不同程序藻油成本的影響

## 5. 光合反應系統建置成本

開放式培養系統的建造成本比目前開發的密閉式光生物反應系統便宜很多，在目前的研究都集中於降低密閉系統製造成本，在本論文中的開放式培養系統為標準渠道池(Raceway pond)，最近亦有研究已將開放系統及密閉系統詳細比較[Shen, 2009]。建造成本包括工程建置、場址準備、主系統(渠道池、密閉反應器)建置、管線、水氣電輸送與供應、檢測儀器及輔助機械等。此外，採收及萃取分離系統亦個別估算成本。依據國外研究分析，開放式系統的建造成本約US\$97,000/ha[Weissman, 1987]，此與本論文估算的成本相近。此外，在密閉式系統建造成本的分析中，成本約在US\$ 500,000-3,000,000/ha之間，亦在本研究估算成本內。為進一步瞭解開放式與密閉式系統建造成本對經濟上的影響，密閉系統以總投資金額之0.1-2倍，而開放系統以總投資金額之0.5-3倍加以分析其影響。分析結果如圖4.7、圖4.8及圖4.9。

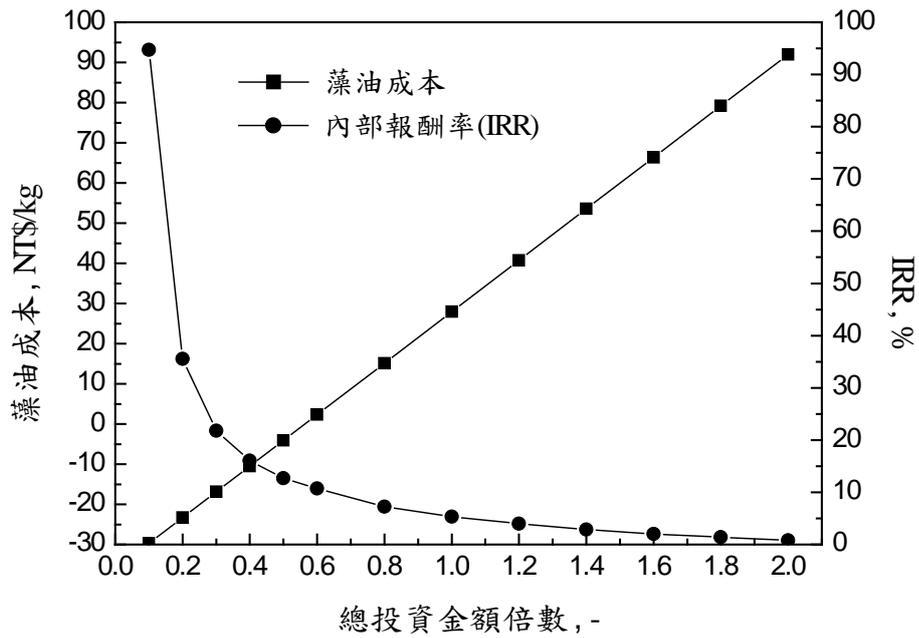


圖 4.7、密閉式光合反應系統建置成本對藻油成本及 IRR 的影響

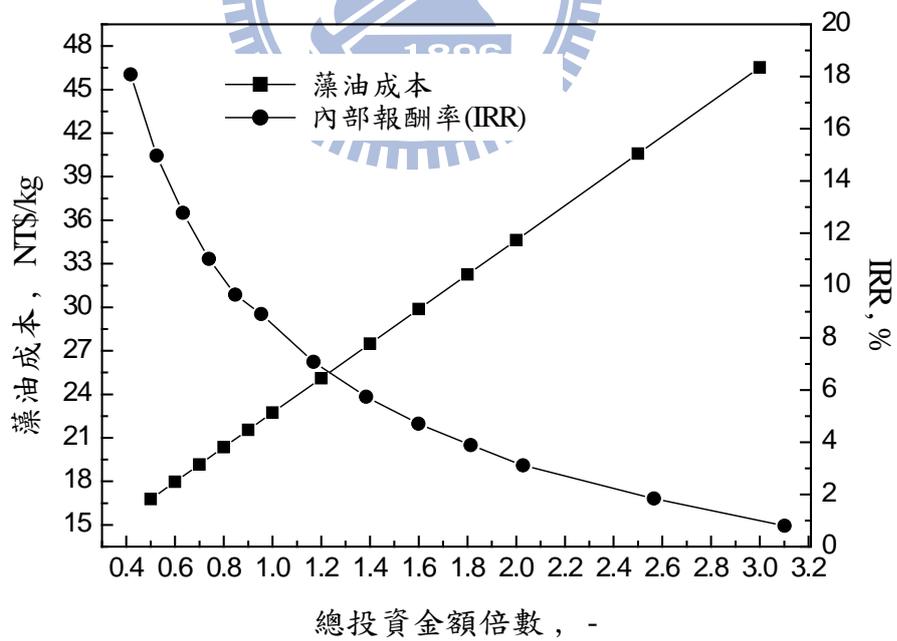


圖 4.8、開放式培養系統建置成本對藻油成本及 IRR 的影響

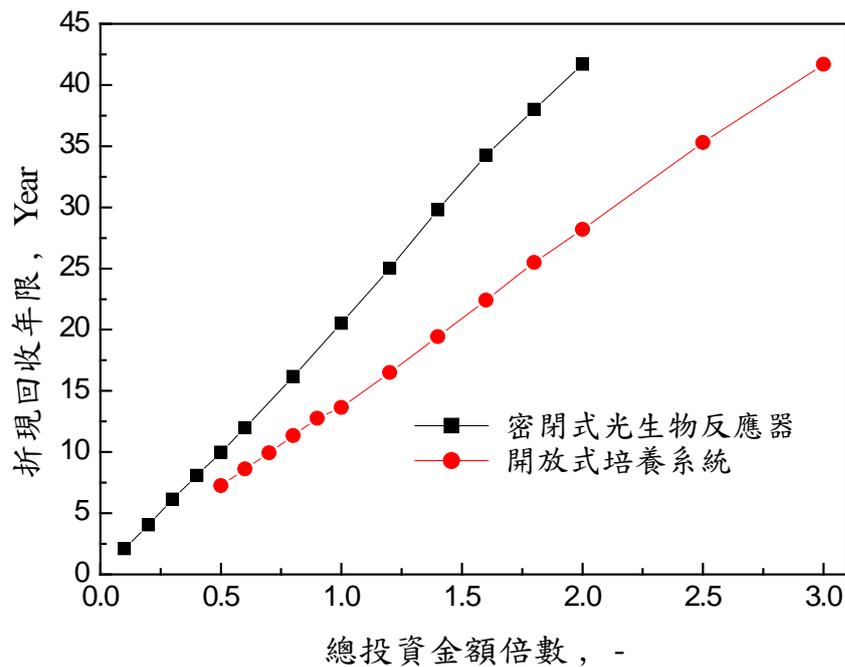


圖 4.9、培養系統建置成本對不同程序之折現回收年限影響

由圖 4.7 知密閉式光生物反應系統建造價格對於藻油生產成本及其內部報酬率的影響很大，藻油生產成本隨總投資金額倍數增加而呈直線增加的趨勢，而內部報酬率則呈拋物線下降，約於 0.3 倍總投資金額時有最大轉折；圖 4.8 為開放式培養系統建造價格對於藻油生產成本及其內部報酬率影響，趨勢與密閉式光生物反應系統類似，然因其總投資金額只約密閉式光生物反應系統的十四分之一，所以影響幅度並沒有密閉式光生物反應系統大；而圖 4.9 為培養系統建置成本對不同程序之折現回收年限影響，由圖知如能進一步降低建造成本，對於藻類生質柴油商業化有極大的影響。

為了降低光生物反應器建置成本，從 1980 年代開始，就有研究利用塑膠桶做為微藻培養的容器進行密閉培養，接著用塑膠薄膜袋培養，然由於塑膠袋容易破裂，進一步創造了薄膜袋浮式法培養為藻。這幾種方法也屬於密閉式光生物反應器，優點就是設備投資少，製作簡單，可以節省初期投資金額，使生產出的生質柴油具有更低的生產成本，如能加強其培養適

應性及壽命，未來將獲得更大的市場競爭力。

## 6. 土地租金成本

在本論文中，土地租金是以台糖公司對外的土地租賃價格為基礎訂定，每年每公頃為新台幣 50,000 元。由於台糖土地一般仍可做為作物種植用途，而藻類養殖如以海水藻種為主，則需引入海水及利用廢 CO<sub>2</sub>，土地屬較貧瘠且無法種植經濟作物，因此租金可能會較低。此外，鑒於國內土地有限的限制下，未來租金亦有可能提高。為瞭解土地租金對於藻油成本的影響，敏感度分析設定其範圍介於新台幣 5,000-200,000 元之間，分析結果如圖 4.10 所示。

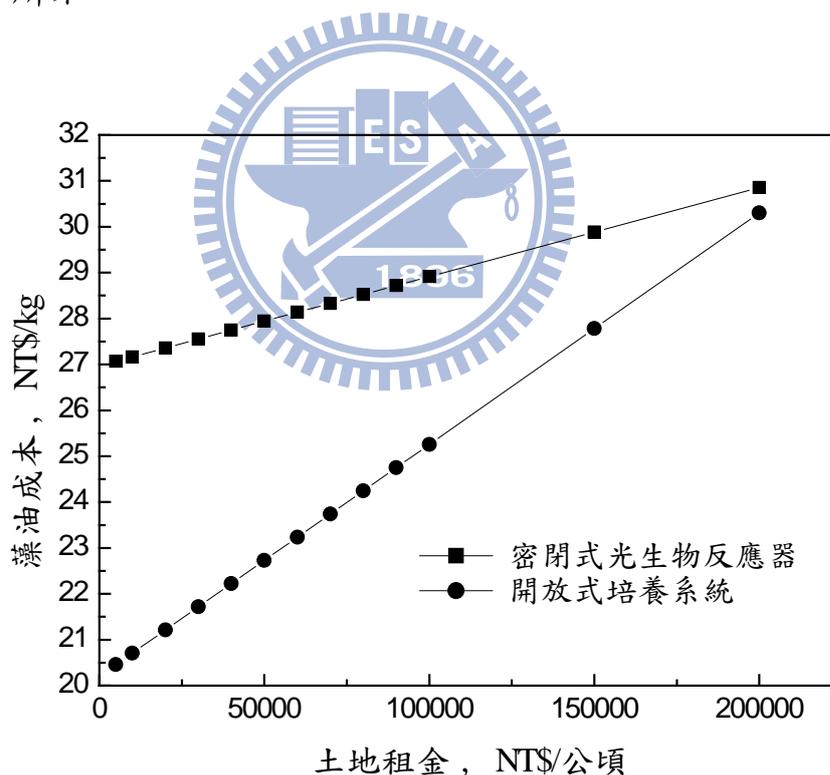


圖 4.10、土地租金對不同程序藻油成本的影響

由圖知當土地租金介於 5,000-200,000 元/公頃時，密閉式光生物反應器生產的藻油成本由每公斤 27.06 元升至 30.86 元，而開放式培養系統生產的

藻油成本由每公斤 20.45 元升至 30.31 元。對於密閉式光生物反應器，由於初期投資成本很高，而每年土地租金只佔每年生產總成本的小部份(約 1.2%)，使得土地租金於 40 倍差異下，對於藻油成本的影響不大(約 10%)；而對開放式培養系統而言，因每年土地租金佔每年生產總成本的 7.3% 左右，使其對於藻油成本的影響較高(約 45%)。

## 7. 碳交易收益

通常乾燥的藻體約含有 50 wt% 的碳[Sánchez Mirón *et al.*, 2003]，而所有的碳則是由光合作用所吸收的 CO<sub>2</sub> 而來，所以生產 100 噸的藻體粗略估算可固定 183 噸 CO<sub>2</sub>，換算碳重量約為 50 噸 C。CO<sub>2</sub> 於白天光照期間需持續的供應，並應用 pH 計的輸出訊號以控制 CO<sub>2</sub> 進流量，最小化 CO<sub>2</sub> 的損失量及 pH 值的變化幅度。此外，可利用燃燒石化燃料的火力發電廠所排放的 CO<sub>2</sub> 做為生質柴油生產的原料[Sawayama *et al.*, 1995; Yun *et al.*, 1997]，這些大量排放的 CO<sub>2</sub> 通常只需少量的成本或不需任何成本即可充足的供應。

於理想狀況下，由藻類所生產的生質柴油屬於碳平衡(即沒有碳的淨排放)，實際上，在藻類培養、採收及製成生質柴油的過程中都會造成 CO<sub>2</sub> 的排放，對於 CO<sub>2</sub> 的減量低於理想狀況。由於目前對於藻類產製生質柴油的生命週期並未完全瞭解，因此，假設在理想狀況下，生產每噸乾燥藻體有 0.5 噸的碳收益，將其效益最大化並分析其影響，基於此則在密閉式光生物反應程序產出的碳交易量達 19,800 噸/年，而開放式培養系統達 9,900 噸/年。對於碳交易的敏感度分析，其收益價格設定由基於 2005-2007 年歐盟最高交易價格的每公噸碳美金 50 元(新台幣 1,600 元)至預估於 2050 年可能的每公噸碳美金 200 元(新台幣 6,400 元)之間[McFarland *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2009]，在此範圍內的分析結果如圖 4.11 所示。

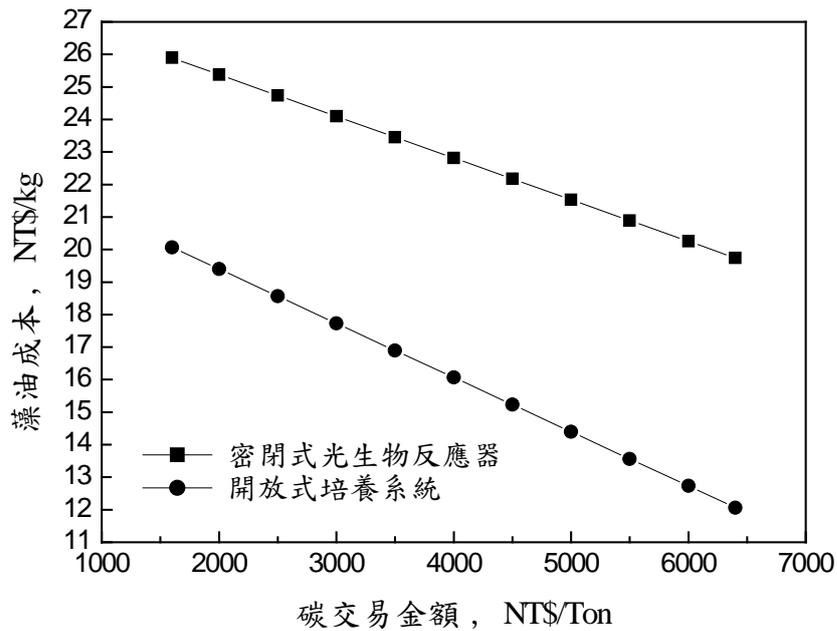


圖 4.11、碳交易對不同程序藻油成本的影響

由圖知當碳交易金額介於 1,600-6,400 元/公噸時，密閉式光生物反應器生產的藻油成本由每公斤 25.89 元降至 19.74 元，而開放式培養系統生產的藻油成本由每公斤 20.06 元降至 12.06 元，雖有一定的影響程度，但比剩餘藻體價格的影響小。由於其是以理想狀況下且碳交易金額較高的情況下所得的結果，未來如其生命週期已詳實，則其減碳效益將較低，對於藻油成本的影響將更低。

## 8. 其他成本的影響

對於像勞工成本、電力成本、培養基成本及維護成本等的敏感度分析而言，密閉式光生物反應系統各項成本分別佔每年生產總成本的 1.1%、3.9%、3.0% 及 2.3%，所佔比例不高，因此對於經濟影響並不大(可參考土地租金成本的敏感度分析)；而開放式培養系統各項成本則分別佔每年生產總

成本的6.6%、16.0%、13.6%及4.9%，對於藻油成本的影響較高，但與高單價DHA售價、藻體產率及建造成本等的影響比較，則仍屬低影響項目。此外，對於這些成本的變動幅度而言，亦屬較小變異性的項目。

經由各個項目對於藻類生質柴油經濟上影響的敏感度分析後，歸納出藻體產率、藻體油脂含量、高單價產品DHA的價格、光合反應系統建置成本等幾個項目對於經濟的影響很大。本篇論文透過敏感度分析所得的結果，可做為未來藻類生質柴油發展上的參考及努力方向上提供建議，並加速能源藻類商業化時程。



## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

應用海洋微藻生產生質柴油是一項資源永續的可再生能源，污染少，已經成為世界各國優先考慮發展的方向。利用國內四面環海所擁有的廣闊海域資源培養高含油量的海洋微藻，發展海洋微藻生產生質柴油的研究，對於國內油脂原料欠缺狀況、環境生態保護等都具有重要的實質意義。針對本論文的結論與技術發展建議做一總結如下。

對於培養面積達300公頃的開放式培養系統及密閉式的光生物反應器產製生質柴油與異營醱酵槽培養(藻體產量與密閉式相等)產製生質柴油的經濟評估而言，其各項分析結果如下：

1. 開放式：總投資金額達NT\$ 10.1億元；每年固定資本支出佔41.94%；總操作成本佔58.06%；藻油製造成本為NT\$ 22.73元/公斤；以藻油售價NT\$ 30元/公斤評估得其內部報酬率(IRR)為8.93%，折現回收年限為13.65年。
2. 密閉式：總投資金額達NT\$ 141.3億元；每年固定資本支出佔79.48%；總操作成本佔20.52%；藻油製造成本為NT\$ 27.94元/公斤；以藻油售價NT\$ 30元/公斤評估得其內部報酬率(IRR)為5.33%，折現回收年限為20.51年。
3. 異營培養：總投資金額達NT\$ 72.7億元；每年固定資本支出佔50.37%；總操作成本佔49.63%；藻油製造成本為NT\$ 24.83元/公斤；以藻油售價NT\$ 30元/公斤評估得其內部報酬率(IRR)為5.44%，折現回收年限為9.34年。

以上結果得知密閉式光反應器流程因總投資金額高導致其折現回收年

限較高；開放式培養系統的藻油製造成本最低，但對未來能增進成本的改善機會也最少；對於異營培養藻類的方式，則應著重於高單價產物的生產，以增加其經濟效益。而為瞭解各項變數對於成本的影響，本論文也應用敏感度分析方法找出重要影響因子，結果如下：

1. 降低開放式渠道池/密閉式光生物反應器的建造成本。
2. 增加藻體/油脂生產量。
3. 高附加價值副產物的產量與價值或藻油售價。

由敏感度的分析所獲得結果，可提供未來藻類生質柴油發展方向的參考。依此，本論文提出降低藻油成本的機會及未來所需研究及開發的領域如下：

1. 增進藻類生長/油脂生產。
2. 降低設備/系統成本(如材質)及簡化程序。
3. 開發非油副產物(如多元不飽和脂肪酸、 $\beta$ -胡蘿蔔素、色素)的市場。
4. 開發不需乾燥即可萃取藻油的技術，節省下游程序耗能。
5. 生產系統與廢 $\text{CO}_2$ 源整合，降低生產成本。

## 5.2 建議

### 5.2.1 微藻生質柴油產業經營管理上的建議

利用植物油脂產製生質柴油的技術已經成熟，微藻中油脂的性質與植物油脂類似，應用藻油生產生質柴油，技術上完全可行。但是，按照微藻工業化生產現有的模式生產生質柴油，與商業應用目標還有相當的距離，仍存在的一些問題待解決。為能加速藻類產製生質柴油的發展，本論文提出幾點管理與執行策略上的建議，提供給有興趣的人員參考，期能使其早日實現商業化生產，這些包括：

1. 應用生物精煉概念針對藻體有價產品完全開發的執行策略：與石油精煉的概念一樣，生物精煉是利用藻體中的每一項成分製造出有價值的產品，由於所有生質物的成分皆加以利用，能降低所產製的產品總成本。應用藻體潛在的生物製品包括：特效有機物，如食品級β-胡蘿蔔素、藥品、色素；多種通用化合物，如多醣體、碳水化合物、介面活性劑；醱酵產品，如生物氣體；還有高單價的油脂(除了大部分油脂生產生質柴油之外)。另外，微藻生質柴油生產獲得的能源收入還可以通過其他生產收入管道(提取微藻高價值的油脂和蛋白質用於動物飼料)如來回補，進一步提高其經濟性。此外，須注意前述所列有價產物的市場規模，並進一步擴大其應用範圍與市場。
2. 結合廢水及廢CO<sub>2</sub>之藻類培養策略，申請碳權交易降低成本及提升環境效益：應用微藻處理農業和都市廢水，藻類提取廢水中的營養物質而獲得的潛在價值及環境的效益；將微藻能源生產與CO<sub>2</sub>的生物固定相結合，即利用工廠、火力發電廠排出的廢CO<sub>2</sub>為碳源養殖微藻，在生產微藻的同時，生物固定了工業廢氣二氧化碳，減少溫室氣體排放的價值，由於微藻生質柴油具有減碳效益，可成立相關部門從事碳權交易工作，降低生產成本。
3. 降低能源藻類生產過程中的能耗，實行清潔生產：降低生產過程中的能耗，提高能源效益，控制廢培養液的排放，不造成環境污染，是能源微藻產業化須重視的問題。實現清潔生產，是能源微藻生產的必經之路，為達成能源微藻的清潔生產，基本需實施：(1)利用合適的工廠產生的廢氣二氧化碳為碳源生產能源微藻；(2)大規模養殖過程的營養調控及採收最佳化；(3)培養基的迴路使用，做到廢水「零排放」。

4. 整合培養及生產體系，善用各項物質提升競爭力：在生產生質柴油時，甘油是主要的副產物，現階段是直接以低比例粗甘油混合重油至鍋爐中燃燒，然仍有許多粗甘油無法利用，而純化後的價格亦不高，形成廢棄物造成困擾。由於異營醱酵所需碳源成本佔操作成本比例甚高，因此，可結合生產廠的甘油副產物經簡易前處理後做為異混營藻類生長時的碳源，促進藻類高密度生長並生成高單價產品(如DHA)，可有效利用甘油，解決廠商處理廢棄甘油問題，並增加競爭力。此外，以目前藻類生質柴油工業化生產而言，產油成本過高仍是一大問題，可思考初期以光合培養、異營培養及生質柴油生產廠整合的商業營運模式，以生質柴油運轉產出粗甘油，維持一般的營運，並應用其產出粗甘油做為異營碳源生產高單價油脂(DHA)，提升整體競爭力，以維持光合系統運轉及持續改善，最終完成具經濟效益的上、中、下整合體系。

#### 5.2.2 微藻生質柴油未來發展的建議

生產的經濟性是利用微藻生產生質柴油所要面對的最大問題。當然，吾人不能僅僅從經濟效益方面來考慮生產，另外，環境效益和社會效益也是極其重要的。儘管藻類生質柴油的研究已有很大進展，但要成為可行的替代能源，仍存有的主要問題待解決，包括：(1)生產過程中藻液的機械攪拌、離心採收和乾燥等能耗很高，能量的投入、產出不夠經濟；(2)以生產能源為目的微藻養殖規模巨大，大量的廢培養液如果處理不當，會造成嚴重的環境污染；(3)生產成本高，不能與石化原油競爭等。而經由本論文的經濟評估與敏感度分析的結果，依此提出未來能源藻類發展的建議如下：

1. 提升藻類光合作用效率及其油脂含量：需要解決微藻最佳的培養條件和最低的成本、消耗，即選擇合適的光照方式，提高光能利用率；

應用基因及代謝工程技術促進藻類油脂含量與藻體產量，此技術之突破將對於油脂生產成本有重大的影響，這些包括：

- (1) 增加光合效率以增加藻體生長量。
  - (2) 增進藻類生長速率。
  - (3) 增加藻體內油脂含量。
  - (4) 改善藻類熱忍受性以減少冷卻之投入成本。
  - (5) 消除光飽和現象(Light saturation phenomenon)，以使藻類能於光強度增加的情況持續提高生長速率。
  - (6) 降低常發生於溫帶及熱帶地區中午時因強烈光強度造成藻類生長速率減緩的光抑制(Photo-inhibition)效應。
  - (7) 降低對藻細胞造成損害之光氧化(Photo-oxidation)敏感性。
2. 開發合適及便宜的培養系統，達到最大的培養密度：如提高反應器內質傳效率和混合效果，避免或降低光抑制現象對微藻的損害；利用過程工程手段解決微藻高密度培養的瓶頸問題；開發便宜的反應器替代材質，降低反應器建造成本。
  3. 研發不需乾燥即可萃取藻油的技術：藻類在水中生長，進行生質柴油轉化前需將其從水中分離出來，並將油脂萃取，需要特定採收、乾燥及萃取的設備，能耗也很大，進一步增加了投資。
  4. 藻體高單價物質開發及綜合利用：藻類生長繁殖要求條件高，前期投資比較大，需開發利用微藻體內各項有價物質及用途，提升經濟競爭力。
  5. 微藻固定二氧化碳機理探索：重點是瞭解無機碳的利用形式、二氧化碳濃縮機理以及高濃度二氧化碳對微藻生長的影響，高效固定二氧化碳的藻種篩選和培養，未來可與廢CO<sub>2</sub>來源結合，降低成本。

## 參考文獻

### 中文部份

王偉修，「MF 薄膜堵塞現象之探討」，國立成功大學，碩士論文，民國 92 年。

威佛(Weaver Samuel C.)，威斯頓(Weston J. Fred)，財務會計管理(Finance And Accounting For Nonfinancial Managers)，黃嘉斌譯，麥格羅·希爾(McGraw-Hill)出版，台北，民國91年。

徐明光，台灣的淡水浮游藻(I)-通論及綠藻(1)，國立台灣博物館，台北，民國 89 年。

梁象秋、方紀祖、楊和荃，水生生物學(型態與分類)，水產出版社，台北，民國87年。

經濟部能源局，「生質燃料技術開發與推廣計畫」，九十七年度執行報告，民國 97 年。

經濟部能源局，「多元料源液態生質燃料技術開發與推廣計畫」，九十八年度執行報告，經濟部能源局，民國 98 年。

錢伯章，「海藻生產乙醇和生物柴油燃料成新寵」，可再生能源，第25卷第3期，101-105頁，民國96年。

### 英文部份

Biofuels Digest, “Algae bloom : two organizations and countless companies strive to bring the dream of algae biofuels to life”, *Biofuels Digest*, 2008(9).  
<http://biofuelsdigest.com/blog2/2008/09/24/algae-bloom-two-organizations-and-countless-companies-strive-to-bring-the-dream-of-algae-biofuels-to-life/>

Biofuels Digest, “Solazyme produces the first ASTM spec aviation kerosene from algae” , *Biofuels Digest*, 2008(9).  
<http://www.biofuelsdigest.com/blog2/2008/09/10/solazyme-produces-the-first-astm-spec-aviation-kerosene-from-algae/>

Bold, H. C., and Wynne M. J., “Introduction to the Algae : structure and reproduction. 2nd ed”, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.

Borodyanski, G. and Konstantinov, I., “ Microalgae separator apparatus and method”, *United States Patent 6524486*, 2003.

Borowitzka, M.A., “Algal growth media and sources of cultures. in *Micro-Algal*

- Biotechnology”, *Cambridge University Press, Cambridge*, pp. 257-287, 1988.
- British Petroleum, “BP statistical review of world energy 2006” , 2007.03.01.
- Carvalho, A.P., Meireles, L.A. and Malcata, F.X., “Microalgal reactors : A review of enclosed system designs and performances”, *Biotechnol. Prog.*, 22, pp. 1490-1506, 2006..
- Chi, Z. Y., Y. Liu, C. Frear, and S. L. Chen., “Study of a two-stage growth of DHA-producing marine algae *Schizochytrium limacinum* SR21 with shifting dissolved oxygen level”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 81 (6), pp. 1141-1148, 2009.
- Chisti, Y., “Biodiesel from microalgae. *Biotechnol*”, *Adv.* , 25 (3), pp. 294-306, 2007.
- Chisti, Y., “Biodiesel from microalgae beats bioethanol”, *Trends Biotechnol.*, 26 (3), pp. 126-131, 2008.
- De Swaaf, M.E., Sijtsma, L., Pronk, J.T., ”High-cell-density fed-batch cultivation of the docosahexaenoic acid producing marine alga *Cryptocodinium cohnii*”, *Biotechnol. Bioeng.*, 81, pp. 666-672, 2003.
- Eirilsson L., “Direct influence of wastewater pollutants in flocculation and sedimentation behavior in biological wastewater treatment-I model system E. coli B”, *Water Res.*, 15 (4), pp. 421-431, 1981.
- Fabregas, J., Otero, A., Maseda, A. and Dominguez, A., “Two-stage cultures for the production of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*”, *J. Biotechnol.* 89 (1), pp. 65-71, 2001.
- Green Energy Trends, “ biofuels has big plans for algae ethanol”, *Green Energy Trends*, 2008(6).  
<http://greenenergytrends.com/stream/algenol-biofuels-has-big-plans-for-algae-ethanol-105.html>
- Hu, Q., “Handbook of Microalgal Culture : biotechnology and applied phyecology”, *Edited by A. Richmond: Oxford: Blackwell Science*, 2004.
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., and Darzins, A., “Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances”, *Plant J.*, 54(4), pp. 621-639, 2008.
- Huang, Y.M. and Rorrer, G.L., “Cultivation of microplantlets derived from the marine red alga *Agardhiella subulata* in a stirred tank photobioreactor”, *Biotechnol. Prog.*, 19 (2), pp. 418-427, 2003.

- Huntley, M. E., Redahe, D. G., “CO<sub>2</sub> mitigation and renewable Oil from photosynthetic microbes : a new appraisal“, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12 (4), pp. 573-608, 2007.
- Kakii, K., “Effect of calcium ion on sludge characteristics”, *Ferment Bioeng.*, 63 (3), pp. 263-270, 1985.
- Lee Lee, Y.K., Ding, S.Y., Low, C.S., “Design and performance of an  $\alpha$ -type tubular photoreactor for mass cultivation of microalgae”, *J. Appl. Phycol.*, 7, pp. 47-51, 1995.
- Li, Q., Du, W., and Liu, D., “Perspectives of microbial oils for biodiesel production”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 80 (5), pp. 749-756, 2008.
- McFarland, J.R., Reilly, J.M. and Herzog, H.J., “Representing energy technologies in top-down economic models using bottom-up information”, *Energy Economics*, 26, pp. 685-707, 2004.
- Megreor W. C., “Factors affecting the flocculation of bacteria by chemical additives”, *Biotechnol Bioeng.*, 11 (2), pp. 127-138, 1969.
- Metting, F. B., “Biodiversity and application of microalgae”, *J. Ind. Microbiol.*, 17, pp. 477-489, 1996.
- Miao, X., and Wu, Q., “Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil”, *Bioresour. Technol.*, 97, pp. 841-846, 2006.
- Miyamoto, K., Wable, O., Benemann, J.R., “Vertical tubular reactor for microalgae cultivation”, *Biotechnol. Lett.*, 10, pp. 702-708, 1988.
- Najafpour, G., “Biochemical Engineering and Biotechnology”, *Elsevier Science*, 2007.
- Ondrey, G., “Chementator : algae-based biodiesel”, *Chemical Engineering*, 2., pp. 545-546, 2008.
- Pedroni, P., Davison, J., Beckert, H., Bergman, P., Benemann, J., “A proposal to establish an internal network on biofixation of CO<sub>2</sub> and greenhouse gas abatement with microalgae”, *Presented at Greenhouse gas R&D Programme Workshop*, pp. 1-15, 2002.
- Pirt, S.J., Lee, Y.K., Walach, M.R., Pirt, M.W., Balyuzi, H.H.M., Bazin, M.J., “A tubular photobioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide : design and performance”, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 33B, pp. 35-38, 1983.
- Pulz, O., “Photobioreactors : Production Systems for Phototrophic Microorganisms”, *Appl. Microbiol Biotechnol.*, 57, pp. 287-293, 2001.

- Ramos de Ortega, A., Roux, J.C., “Production of Chlorella biomass in different types of flat bioreactors in temperate zones”, *Biomass*, 10, pp. 141-156, 1986.
- Renewable Energy World, “International energy developing algae to oil for many applications”, *Renewable Energy World*, 2007(5).  
<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2007/11/international-energy-developing-algae-to-oil-for-many-applications-50499>.
- Renewable Energy World, “REG announces commercialization of technology for algaebased fuel”, *Renewable Energy World*, 2008(4).  
<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/08/reg-announces-commercialization-of-technology-for-algae-based-fuel-53387>.
- Sánchez Miron, A., Cerón García Camacho, F., Molina Grima, E., Chisti, Y., “Growth and characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors : studies in fed-batch culture”, *Enzyme Microb. Technol.*, 31, pp. 1015-1023, 2002.
- Sánchez Mirón A., Cerón García M-C., Contreras Gómez A., García Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y., “Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricornutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors”, *Biochem. Eng. J.*, 16, pp. 287-297, 2003.
- Sawayama S., Inoue S., Dote Y., Yokoyama S-Y., “CO<sub>2</sub> fixation and oil production through microalga”, *Energy Convers Manag.*, 36, pp.729-731, 1995.
- Sazdanoff N., “Modeling and simulation of the algae to biodiesel fuel cycle”, Undergraduate Thesis submitted to Ohio State University, 2006. <http://hdl.handle.net/1811/5981>.
- Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussnug, J. H., Posten, C., Kruse, O., and Hankamer, B., “Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production”, *Bioenerg. Res.*, 1 (1), pp. 20-43, 2008.
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., Roessler, P., “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, 1998.
- Shen, Y., Yuan, W., Pei, Z.J., Wu, Q. and Mao, E., “Microalgae mass production methods”, *Transactions of the ASABE*, 52, pp. 1275-1287, 2009.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran E. and Isambert, A., “Commercial

- applications of microalgae”, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101, pp. 87-96, 2006.
- Terry, K.L, Raymond, L.P., “System design for the autotrophic production of microalgae”, *Enzyme Microb. Technol.*, 7, pp. 474-487, 1985.
- Torzillo, G., Carlozzi, P., Pushparaj, B., “A two-plane tubular photobioreactor for outdoor culture of spirulina”, *Biotechnol. Bioeng.*, 42, pp. 891-898, 1993.
- Weissman, J. C. and Goebel, R. P., “Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels”, *Subcontract Report of U.S. Department of Energy*, pp.34-78, 1987.
- Worldwide Refining Business Digest Weekly, “Sapphire energy produces green gasoline from algae”, *Worldwide Refining Business Digest Weekly*, 35, pp. 14-17, 2008(6).
- Yun Y.S., Lee S.B, Park J.M., Lee C.I., Yang J.W., “Carbon dioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 69, pp. 451-455, 1997.
- Zhang, D. H., and Lee, Y. K., “Two-step process for ketocarotenoid production by a green alga, *Chlorococcum* sp. strain MA-1”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 55 (5), pp. 537-540, 2001.
- Zhu, Z., Graham, P., Reedman, L. and Lo, T., “A scenario-based integrated approach for modeling carbon price risk”, *Decisions in Economics and Finance*, 32, pp. 35-48, 2009.