

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物科

佳作

030306

藻出能源，發電我最行

—探討影響藻類電池發電效率之影響

學校名稱：彰化縣立陽明國民中學

作者： 國二 陳佳旻 國二 郭喜溱 國二 王心駢	指導老師： 陳信穎 洪存慧
---	-----------------------------

關鍵詞：藻類電池、光合作用、太陽能

藻出能源，發電我最行

— 探討影響藻類電池發電效率之因素

摘要

在能源日漸耗竭的今日，開發環保新能源是重要的課題。本研究使用的藻類電池，係藉著藻類照光會行光合作用而發電。藻類可以吸收空氣中的二氧化碳，因此更符合「**節能減碳**」的概念，**藻類電池又被稱為「活的太陽能電池」**。從研究結果發現製作藻類電池時，以**藍綠藻與小球藻**的組合為最佳，其中**藍綠藻擔任負極**，而**小球藻擔任正極**。藻類電池在光照強的環境，有較佳的發電效率，而且添加營養劑在藻類電池中，不僅可以提高發電率並可以延長藻類的生命。在不同色光的照射中，藍光與紅光對於刺激藻類電池發電效率最佳；綠光則是最差。藻類電池也可以進行串聯，藉此提高電壓與電功率。我們期待藻類電池在未來可以成為一種新的能源。



壹、研究動機

人類過去對於能源的仰賴，主要來自於石化燃料與核能。但是火力發電會造成嚴重的空氣污染，隨著燃燒煤炭，可能會有許多致癌物質會隨風傳播，此外火力發電排放的大量二氧化碳，更是造成溫室效應的元兇；過去標榜安全的核能發電神話，隨著發生日本福島核災而破滅。因此有許多科學家致力研究再生能源，期待可以建立更安全使用的永續能源，減少碳排放量並且避免核輻射外洩的可能，藉此建立美麗環保的家園。

目前太陽能是被廣泛採用的再生能源。太陽能電池具有許多不同的種類與材質，常見的結晶矽型太陽能電池，其光電轉換率比較高，但是製作過程中，常常會造成環境污染，因此矽晶太陽能電池對於環保的貢獻也備受存疑。



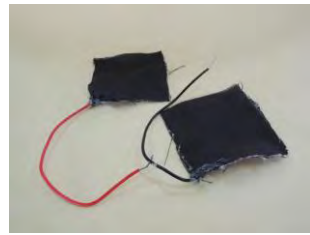













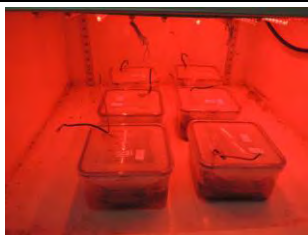

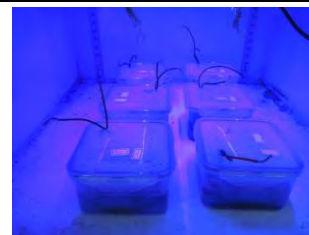
近來科學家利用微生物，發明了微生物燃料電池(microbial fuel cells, MFCs)，但是必須注入葡萄糖等養分，以維持微生物燃料電池的運轉，這種需要額外投入養分的方式，卻讓人覺得不夠有效益。

直到有一天，老師上課時，帶來一個由中部某大學生物系所開發的「藻類電池」，它僅單純地利用藻類的光合作用發電，不需要額外注入葡萄糖，但需要注入藻類生長所需的微量元素；此外藻類在行光合作用會吸收空氣中的二氧化碳，因此更可以符合「節能減碳」的概念，又被稱為「活的太陽能電池」，讓我們十分好奇它的作用。所以我們組成科展研究小組，在老師的指導下，利用藍綠藻與小球藻共同製作成藻類電池來發電，期望可以找出最好發電效率的藻類電池。

貳、研究目的

- 一、 藻類電池模組的製作與組合
- 二、 探討不同藻種所組成的藻類電池發電效率之評估
- 三、 探討不同自然光照環境對於藻類電池發電效率之影響
- 四、 探討不同色光對於藻類電池發電效率之影響
- 五、 探討添加營養液對於藻類電池發電效率與發電持續能力之影響
- 六、 藻類電池的串聯測試

參、研究設備與器材

			
圖 3-1 吸量管(Pipette)與 tips	圖 3-2 塑膠盒(大小各一)	圖 3-3 碳布與導線	圖 3-4 質子交換膜
			
圖 3-4 藻液 (左：藍綠菌；右：小球藻)	圖 3-5 液態肥料	圖 3-6 微量金屬補充液	圖 3-7 數位三用電錶(CHY)
			
圖 3-8 血球計數器	圖 3-9 平板加熱器 (SHIN KWANG)	圖 3-10 複式顯微鏡 (CROWN)	圖 3-12 照度計 (KOLA)
			
圖 3-13 USB 顯微鏡	圖 3-14 pH 計 (Milwaukee)	圖 3-15 植物培養箱 (LIAN SHEN)	圖 3-16 植物培養燈
			
圖 3-17 數位照相機 (Nikon)	圖 3-18 紅光 LED (照度 1500 Lux)	圖 3-19 綠光 LED (照度 1500 Lux)	圖 3-20 藍光 LED (照度 1500 Lux)

肆、研究過程與方法

一、 原理介紹：

(一) 光合作用的簡介：

藻類屬於原生生物界中的一類，屬於真核生物，藻類具有葉綠體，因此可以行**光合作用**，製作生活所需的葡萄糖，因此**藻類屬於自營生物**的一種，扮演自然界中**生產者**的角色。藻類在行光合作用時，會吸收環境中的二氧化碳，產生葡萄糖、水以及氧氣。

光合作用反應式如下：



葉綠體是個囊狀的構造，其內具有可以行光反應的類囊體膜與行暗反應的基質。葉綠體的構造，如下圖4-1所示。

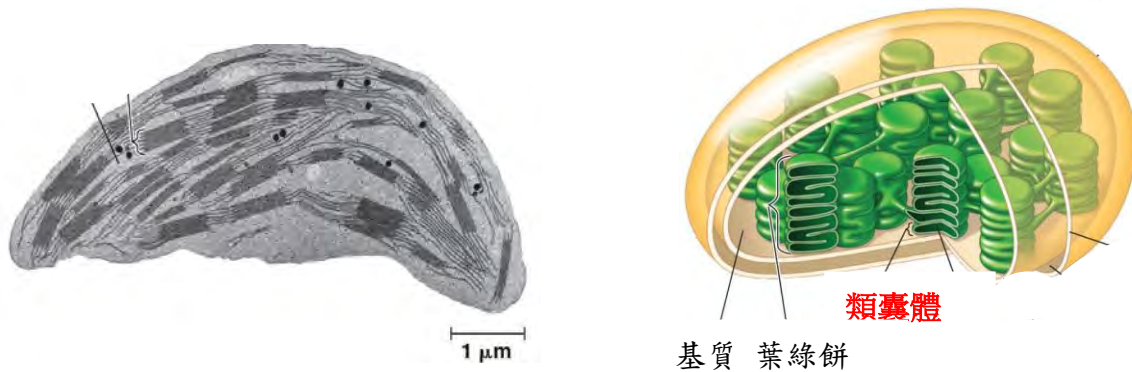


圖 4-1 顯微鏡下的葉綠體(左圖)與內部構造示意圖(右圖)

(圖片取自普通生物學 **Biology**，Campbell 與 Reece 著)

葉綠體呈現橢圓形，可以藉著細胞質流動在細胞內移動，尋找最佳的光合作用位置。葉綠體是由雙層膜所構成，內部包含「**類囊體**」與「**基質**」兩大部分，**類囊體膜上具有電子傳遞鏈**，主要進行光反應；**基質則具有酵素**，進行暗反應。

葉綠體中具有可以**吸收光線的色素**，其中最主要的為**葉綠素a**以及**葉綠素b**；而類囊體膜上具有許多蛋白質。當光線照射葉綠體時，葉綠素中的電子會被光線激發，進而跳躍到類囊體膜上的蛋白質中，在膜上的蛋白間進行一連串電子傳遞的過程。

光合作用中光反應的進行過程，如圖4-2所示：

- ①當光系統II吸收光能，反應中心的葉綠素(P680)的電子會被激發至高能階，而進入電子傳遞鏈中，造成光系統II中缺少電子，產生一個電子洞的現象。
- ②類囊體內的水分子被分解成**氧氣(O₂)**、**電子(e⁻)**、**質子(H⁺)**，其中**電子(e⁻)**用來填上光系統II

的電子洞，而多餘的質子(H^+)造成類囊體內部的質子濃度的升高；氧氣(O_2)則釋放協助生物呼吸。

- 從葉綠素所釋放的電子在膜上蛋白間傳遞產生能量，使得膜上蛋白可以將外部基質中濃度較低的質子(H^+)，逆向蓄積在內部類囊體腔內，使得類囊體內部產生較高的濃度質子濃度。
- 類囊體內部的高質子濃度與外部基質的低質子濃度間，產生質子濃度梯度，此質子(H^+)由類囊體內部流向外部基質，推動膜上的ATP合成酶 (ATP synthase)，產生ATP送至卡式循環中，藉以產生葡萄糖。

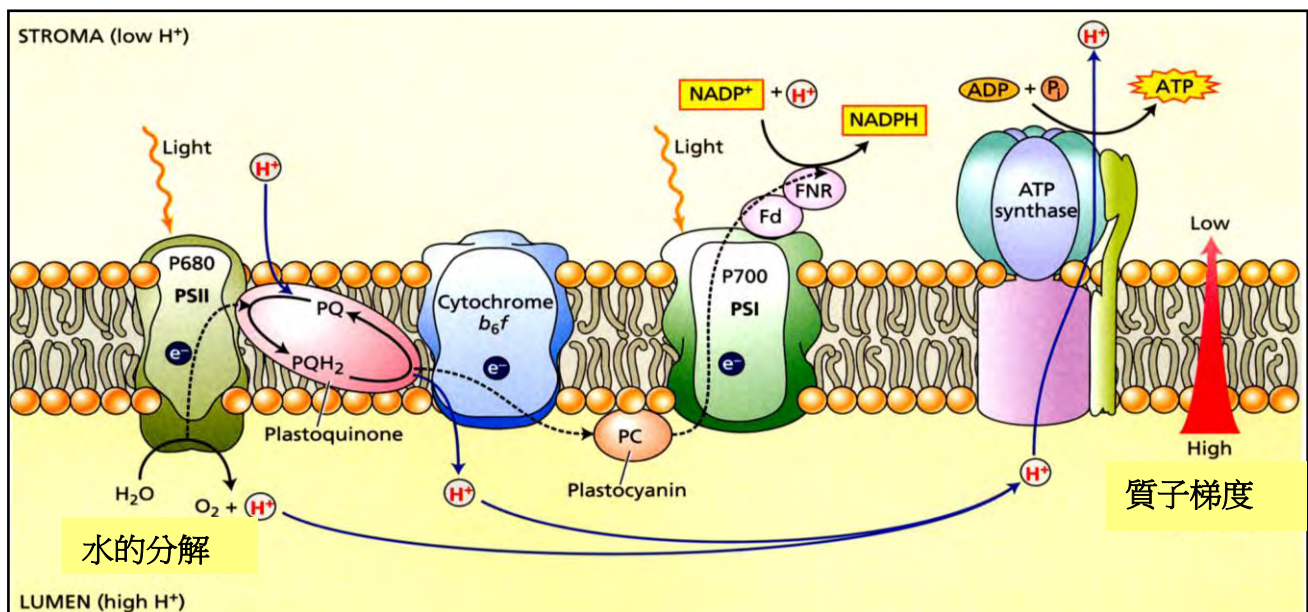


圖 4-2 電子傳遞鏈的過程 (圖片取自普通生物學 *Biology*, Campbell 與 Reece 著)
光系統 II 吸收光能，激發電子進入電子傳遞鏈中，並且造成水的分解，產生質子與氧氣。電子在蛋白間的傳遞產生能量，使質子能逆向蓄積在類囊體內部，使得內部質子濃度高於外部，產生質子濃度的電化學梯度。

(二) 藻類電池的原理：

本研究採取的「藻類電池」，其材料與作用原理的功能如下圖4-4所示。藻類電池是透過藻類光合作用的過程，將光能轉化為電能，進行發電。其發電原理是利用上段內容中所描述的光反應過程。當光合作用進行時，藻類的葉綠素吸收太陽光，激發葉綠素的電子進行電子傳遞，使得膜上蛋白獲得能量，能將外界低濃度的質子逆向吸入高濃度的內部，而造成類囊體與基質間的質子濃度差，製造出質子流動，流出至基質中。因為藻類體積微小，因此質子

也隨著擴散至水溶液中，而形成電池的**負極**，質子也在藻類電池內部的負極處流向另一端的**正極**；而導致「**電子藉由藻類電池的外部導線，由負極流向正極**」，形成一個正常電池的流動情形。

藻類電池的製作方法，利用「**內盒裝藍綠藻，外盒裝小球藻**」，兩盒間以質子交換膜作為間隔，然後再施以光照，因**藍綠藻為原核生物**，構造較為簡單，缺乏葉綠體，僅在細胞膜進行光合作用的反應，因此有較強釋放電子與質子的能力，在**藻類電池中扮演負極的角色**。而**小球藻為真核生物**，具有葉綠體，光合作用主要是在葉綠體內進行，因此較難釋放質子到外界，在**藻類電池中扮演正極的角色**。

當光線照射時，藻類即會進行光合作用，而藍綠藻與小球藻在放電效率的差異，就會產生電位差，形成電流與電子流，進而發電。

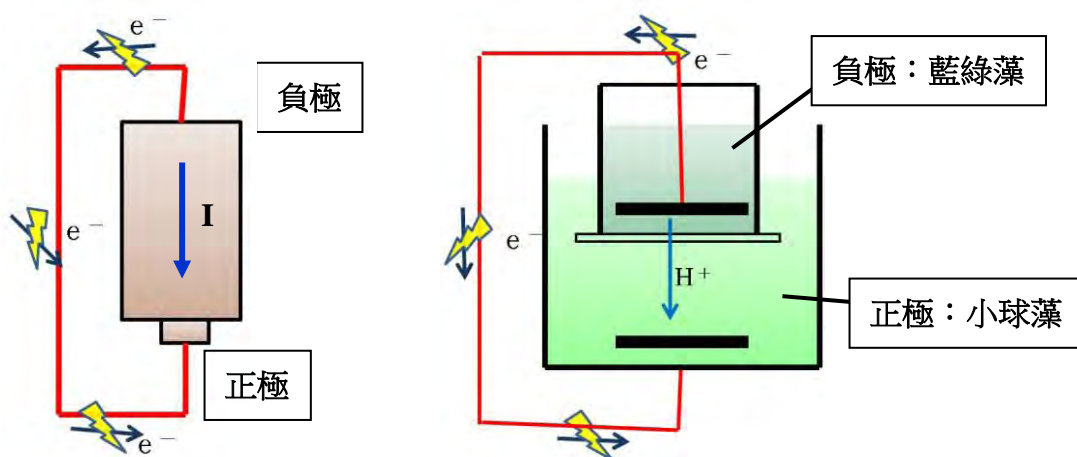


圖 4-3 乾電池(左圖)與藻類電池(右圖)的對照

常見的乾電池，**電子經由導線傳送，是從負極→正極**；藻類電池中，**藍綠藻扮演負極角色**；**小球藻扮演正極角色**，電子由內盒，經過導線傳至外盒，產生電子流，進而產生電力。

目前許多生物發電的研究都指向微生物燃料電池(microbial fuel cells, MFCs)，許多科學家利用各式各樣的微生物進行發電，雖然有不錯的初步成效，但是微生物燃料電池卻需要額外注入葡萄糖等養分，以維持微生物的生命。

藻類為自營生物，因此僅需照光與提供二氧化碳即能存活，無需再額外提供葡萄糖等養分，所以藻類電池的應用，更可以朝向自給自足的永續使用，因此更值得我們研究與探討。我們的研究中，是以藍綠藻與小球藻做為藻類來源，進行關於藻類電池發電效率的相關研究，期盼可以發現較佳的發電效率，對環境保護盡一點心力。

(三) 藻類電池原理的示意圖：

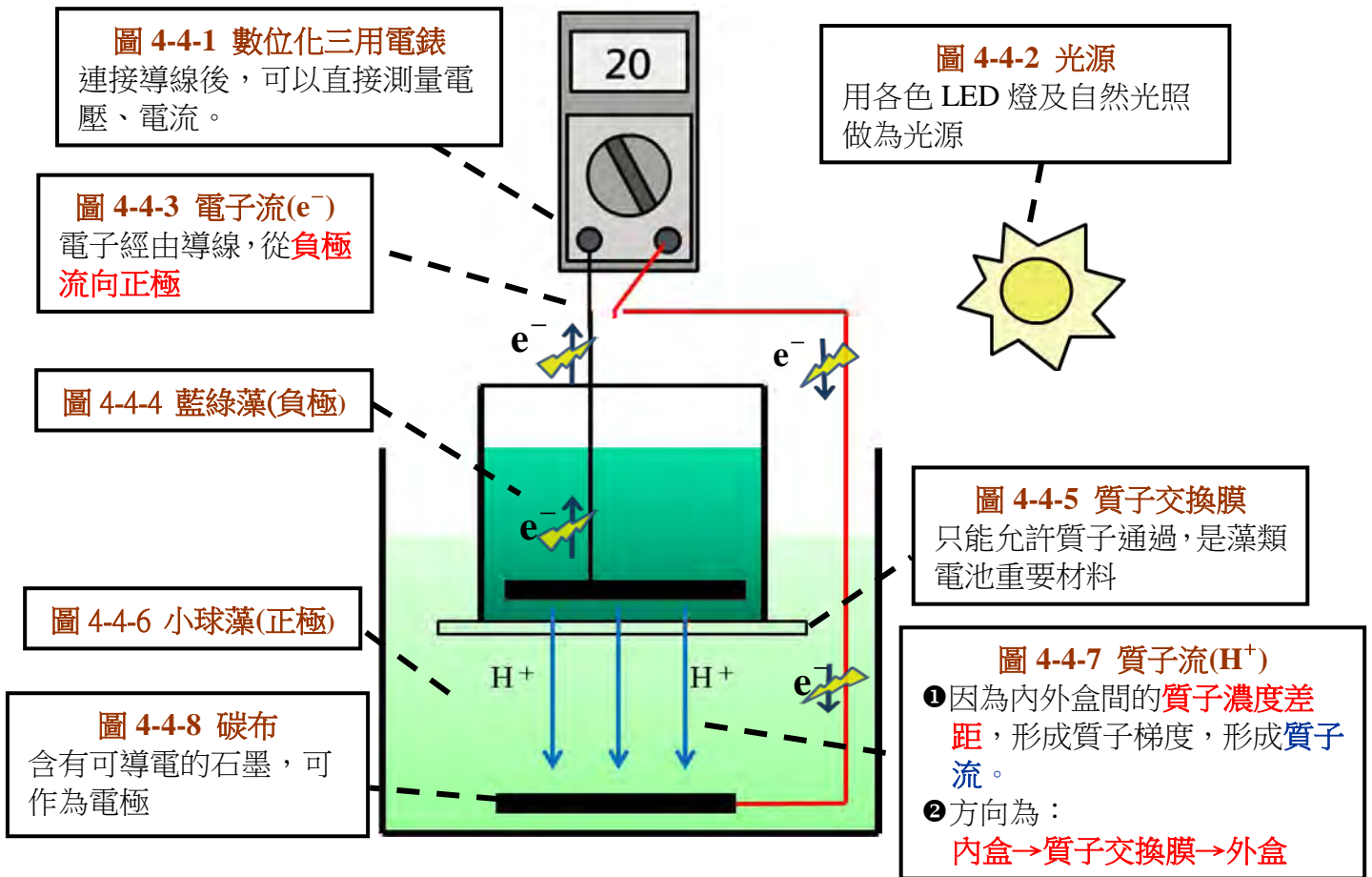


圖 4-4 藻類電池的發電原理

- ① 藻類電池主要是利用藻類細胞內具有**葉綠體**，葉綠體具有可吸收太陽能的葉綠素。當光線照射時，葉綠素的電子被釋放，在膜上的蛋白間傳遞，形成電子傳遞鏈，驅動膜上的蛋白作用，造成製造內外的質子濃度差，形成質子濃度梯度。當內外兩側的質子濃度不等量時，電化學趨力將會使得質子流動。
- ② **藍綠藻為原核生物**，不具有葉綠體，因此其**光反應的電子傳遞鏈僅在細胞膜上**，因此較容易將質子丟出細胞外，造成**內盒累積高濃度的 H^+** ；**小球藻則為真核生物**，光合作用在葉綠體內進行，因此較難將質子移出，所以**外盒的 H^+ 濃度較低**。
- ③ 因為內外兩盒間具有質子交換膜，因此限制僅能讓質子流通，兩盒間的離子濃度差，造成**質子流 (H^+ -flow)** 的現象；而電子則是由導線，從負極流向正極，因此「**藍綠藻是扮演負極角色，小球藻則是扮演正極角色**」。

(四) 電功率 (P) 的介紹：

本研究中，關於藻類電池發電效率的表示，主要是採用電功率(P)的大小來呈現。電功率 (P) 指每單位時間發電機所產生的電能。它的國際單位為瓦特 (W)。因此藻類電池的電功率越高，代表其發電效率也越佳。

關於電功率的計算可由下列公式得到：電功率=電流 × 電壓 ($P=I \times V$)。因此在本研究中，我們會先量測藻類電池產生的電流與電壓，再經由計算即可以得到電功率的大小，並且改變各種變因，了解各種變因對於藻類電池發電功率的影響。

二、 藻類的介紹：

本研究使用小球藻與藍綠藻製作藻類電池，以下分別介紹兩種藻類。本研究所使用的小球藻，其學名為 *Chlorella* sp.，適合生長環境的水溶液 pH 值為 6.8–7.2，小球藻為真核生物，屬於原生生物界，具有葉綠體，光反應的電子傳遞鏈在類囊體膜上的蛋白進行。小球藻具有快速複製生長的功能，因此本研究選用小球藻做為藻類的來源。

本研究使用的藍綠藻，學名為 *Gloeotheca* sp.，適合生長環境水溶液 pH 值為 9–10，藍綠藻為原核生物界，不具有葉綠體，光反應的電子傳遞鏈主要是在細胞膜上的蛋白進行，因此產生的質子較易擴散到外界。

本研究為求實驗的嚴謹以及藻類來源的單一，沒有混雜其他藻種。我們藻類是來自於中部某大學的藻類研究室提供。

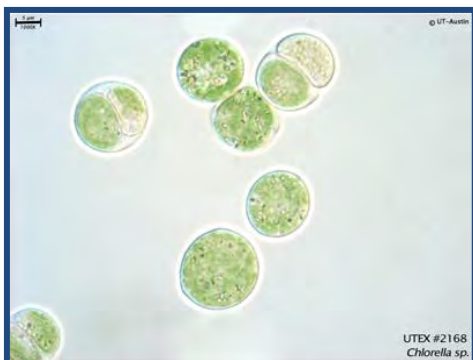


圖 4-6 小球藻(*Chlorella* sp.)
照片來源：
<http://web.biosci.utexas.edu/utex/algaeDetail.aspx?algaeID=4630>

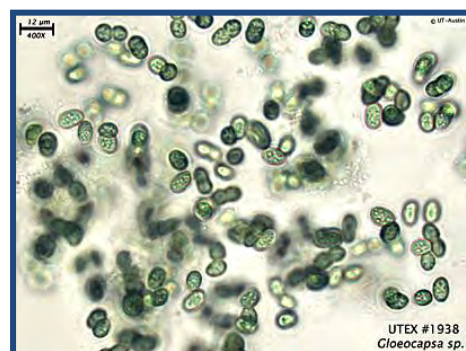


圖 4-7 藍綠藻(*Gloeotheca* sp.)
照片來源：
<http://web.biosci.utexas.edu/utex/default.aspx>

三、藻類電池的製作：

(一) 電極的製作與準備：(如圖 4-8 所示)

1. 藻類電池是利用藻類發電，藻類必須在水中生長，而傳統利用金屬做為電極的方式，可能會因為金屬電極的生鏽，而使得實驗產生誤差，並且金屬生鏽釋放離子，也可能造成藻類的死亡，所以我們選用**含有石墨可導電的碳布**做為**藻類電池中的電極**。
2. 將金屬導線縫製在碳布上，做為量測發電效率的導線；並且將熱融膠塗在縫合處，避免金屬導線與水的直接接觸，造成導線的生鏽。
3. 利用三用電錶檢查是否有連結完整，是否可以導電，如圖 4-8 所示。



圖 4-8 電極的製作與準備

藻類電池需要將電極長期置放在水中，因此無法使用傳統金屬電極，以免生鏽而傷害藻類的生長，因此使用碳布作為電極。圖(1)利用針線將金屬導線縫製於碳布上；圖(2)塗上熱融膠，使導線與碳布的連接處可以防水；圖(3)利用三用電錶檢驗是否可以導電。

(二) 質子交換膜的準備：

1. **質子交換膜僅能讓質子(H⁺)通過**，當質子移動時，可以製造電流。本研究採用的質子交換膜為杜邦公司所製造，型號為 N115，厚度為 1.25 μm。
2. 質子交換膜必須先在 80°C 的熱水中加熱 30 分鐘 (圖 4-9)，使之軟化才可以使用。當質子交換膜加熱軟化後，必須在浸泡在水中保存，等到要使用時才從拿起，避免質子交換膜乾燥而失去作用 (圖 4-10)。



圖 4-9 質子交換膜的軟化
將質子交換膜置於 80°C 的水中加熱 30 分鐘



圖 4-10 加熱後軟化的質子交換膜
(透明薄膜)(箭頭處)

(三) 製作裝置藻類電池的內盒與外盒：

1. 先將內盒的蓋子切開，僅留下外邊的扣環處，方便扣住質子交換膜；內盒底部留下一個小洞，方便電線穿出（圖 4-11）。
2. 外盒則在上方預留小孔，亦方便金屬導線進出。



圖 4-11 內盒的製備
圖(1)內盒的底部，需預留小孔方便導線進出。圖(2)先將上方的蓋子割成中空，方便扣住質子交換膜

(四) 進行組裝：(圖 4-12 所示)

1. 在內盒內放置碳布，做為導電的電極；金屬導線則由底部小孔穿出，以便後續的檢驗。
2. 將質子交換膜放置於內盒上，並用扣環扣住質子交換膜，注入蒸餾水檢查是否有空隙，避免日後藻類溶液會有滲漏的情形。
3. 在外盒內放置碳布，並將碳布固定好。
4. 將內盒倒放，置入外盒中，完成藻類電池的組裝。

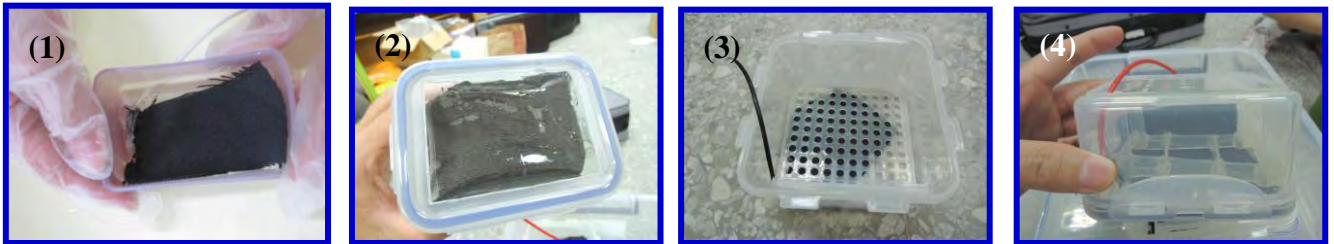


圖 4-12 藻類電池的組裝

圖(1)將碳布置於內盒，將金屬導線由底部的小洞穿出。圖(2)放置質子交換膜於內盒上，並用扣環扣緊，加入蒸餾水檢查是否有漏洞。圖(3)將碳布置於外盒中。圖(4)將內盒倒放，放入外盒中。

(五) 注入藻液：(圖 4-13 所示)

利用滴管在內外兩盒中注入藻液，內盒注入藍綠藻 200 ml，外盒則是注入小球藻 400 ml。本研究所使用的藍綠藻溶液細胞密度為 21×10^5 個/ml；小球藻溶液細胞密度為 18.5×10^5 個/ml。



圖 4-13 注入藻液

圖(1)利用滴管先在外盒注入小球藻。圖(2)在內盒則是注入藍綠藻。

(六) 電壓與電流的測量

利用鱷魚夾夾住藻類電池的兩極，並以光源照射藻類電池，利用電子數位化的三用電錶檢查是否能順利發電，並且測量其電壓與電流，隨後經計算轉換成電功率。(圖 4-14)



圖 4-14 測量藻類電池發電情形

利用數位化三用電錶測量藻類電池發電情形，測量其電壓與電流，並經計算轉換成電功率。

四、 藻類電池生長環境與光照的來源：

(一) 藻類電池生長的环境：

為了減少溫度、光照時間與光照強度等因素，對於藻類電池的影響。因此我們使用植物培養箱，來控制藻類電池的光照時間與環境溫度。根據 Pandit 等人(2012)的研究指出培養小球藻與藍綠藻的最適合溫度為 25°C，每日光照時間為 12 小時。因此我們依照該研究的方式，設定植物培養箱的溫度與光照時間，如圖 4-15 所示。

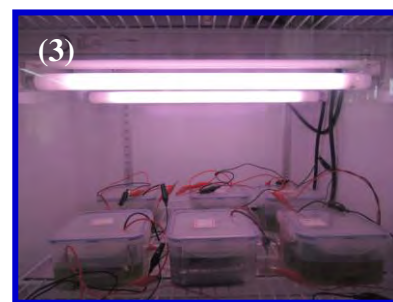


圖 4-15 植物培養箱

圖(1)植物培養箱的外觀，具有觀測窗，可以直接觀察。圖(2)光照時間與環境溫度的控制，光照時間定為 12 小時，環境溫度設定為 25°C。圖(3)植物培養箱內具有植物燈，可以照射讓藻類電池行光合作用。

(二) 光照的來源：

1. LED 燈的使用：

本研究中，關於色光對藻類電池的研究，為了有效控制實驗環境，因此在植物培養箱中，直接以不同色光進行照射，減少減少其他光照因素的干擾。本研究所使用的色光，包含白光、紅光、藍光以及綠光，如圖 4-16。



圖 4-16 各式 LED 燈光源
由左至右依次為白光、紅光、藍光以及綠光

2. 自然光照：

本研究中，同樣進行不同自然光照環境對於藻類電池發電效率的影響。本光源以自然的太陽光為主，但為了有效判斷光源的強弱，在實驗進行時，會以照度計檢視當時的光照強度，並以照度(Lux)做為光照強度的單位。

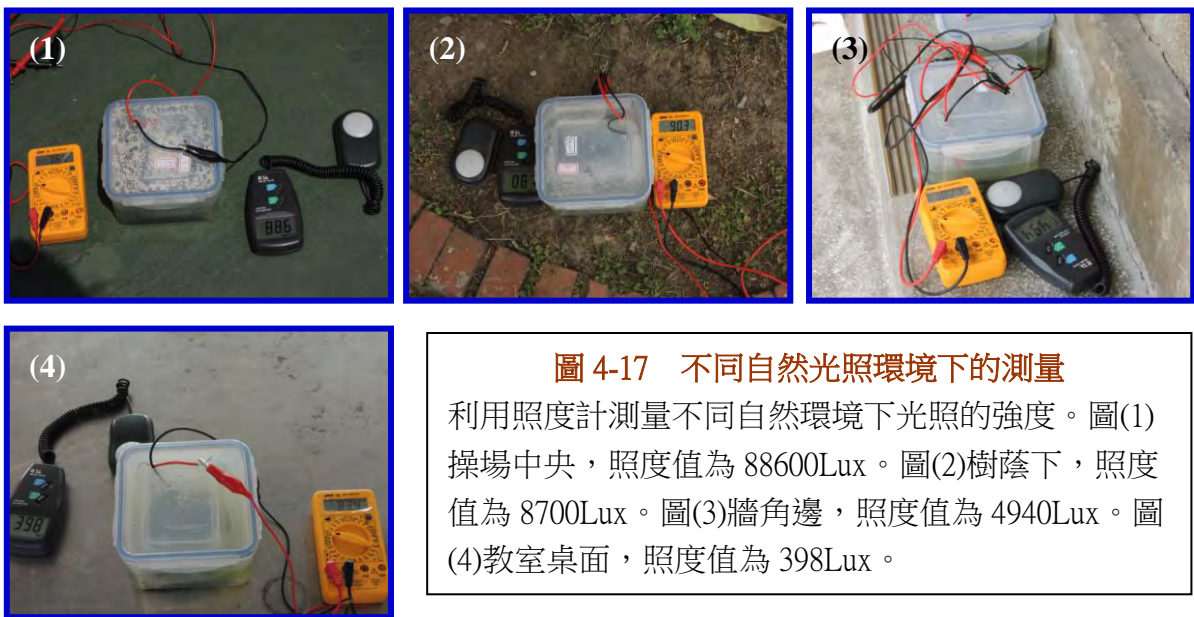


圖 4-17 不同自然光照環境下的測量
利用照度計測量不同自然環境下光照的強度。圖(1)操場中央，照度值為 88600Lux。圖(2)樹蔭下，照度值為 8700Lux。圖(3)牆角邊，照度值為 4940Lux。圖(4)教室桌面，照度值為 398Lux。

五、藻類細胞數目的計算：

本研究中，關於探討添加營養液於藻類電池發電效率與持續發電能力之影響，研究結果之一為藻類細胞數目的變化，我們使用血球計數計計算藻類細胞的數目。

1. 連續稀釋：

因為藻類原液中的藻類數量太多，而在血球計數器中，無法進行計算。因此我們必須先進行連續稀釋，其方法為：收取藻類原液 100 μL 加入 900 μl 的蒸餾水中，我們稱之為 10 倍稀釋液(10X)；再吸取 10 倍稀釋液 100 μL 再加入 900 μl 的蒸餾水中，我們稱此溶液為 100 倍稀釋液(100X)；以此方法再得到 1000 倍稀釋液(1000X)。

2. 注入血球計數器：

將剛剛得到的稀釋液，分別注入血球計數器中計算，若太過於密集的稀釋液，是不能使用來進行計算的，因此必須判斷何種稀釋液，最適合進行計算。

3. 進行計算：

將血球計數器計算所得藻類細胞數目，再依稀釋比例轉換成真實藻類溶液的細胞數目。



圖 4-18 藻液的連續稀釋以及血球計數器的使用



圖 4-19 連續稀釋在顯微鏡下的成效(16X)

這三圖是小球藻經過連續稀釋後，顯微鏡下的狀況。圖(1)此為原液，可發現非常密集，不好計算。圖(2)10 倍稀釋液，可見數量較少，但依然不好計算。圖(3) 100 倍稀釋液，數量更為減少，但是比較好分辨與計算。

伍、研究結果與討論

實驗一 藻類電池的製作與測試

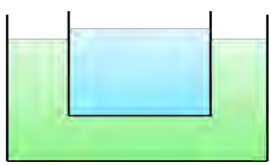
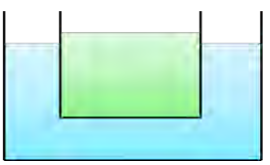
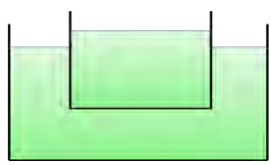
一、 實驗目的：

電池能夠產生電流，是因為正負兩極間具有電位差；而藻類電池亦是藉著內盒與外盒間具有電位差，才能發電。因此本研究想要證明藻類電池內外兩盒是否皆需要藻類存在，才可以達到較佳的發電效率；亦或是僅需一盒裝藻類，另一盒裝水，就可以達到較佳的發電效率。

二、 實驗設計：

(一) 實驗模組：

將藻類電池分成三組設計，分別裝入水與小球藻，相關設計如下：

	內(水)+外(小球藻)	內(小球藻)+外(水)	內外皆小球藻
側面圖示			

(二) 變因控制：

為了讓實驗變因可以達到更好的控制，以下列出本實驗的研究控制，如下表 5-1 所示。

表 5-1 藻類電池組合模式研究變因表

自變項	依變項	控制變項
內水外小球藻	電功率	生長溫度皆 25°C
內小球藻外水		照光時間皆為 12 小時
內外皆小球藻		皆由植物燈照射
		相同時間測量
		皆為小球藻

三、 實驗結果：

實驗結果顯示：**內外盒皆小球藻的電池模組發電功率最高，達到 0.65 μW** ，內水外藻、內藻外水等模組電功率僅有 0.16 μW 與 0.17 μW 。內外盒皆小球藻的模組的電功率為其他兩組電

功率的 4 倍，因此可以證實組合藻類電池時，必須內外兩盒都需要藻類，如此可以達到較佳的發電功率。

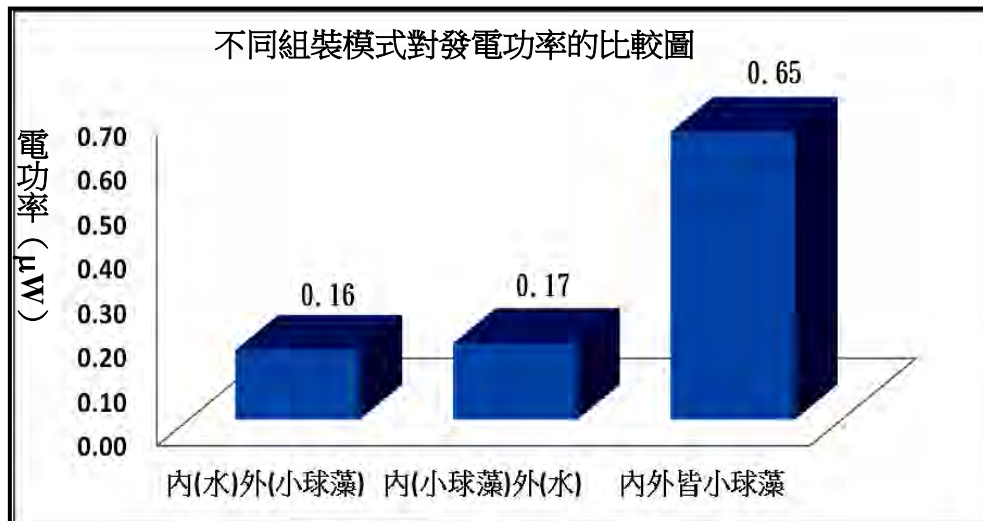


圖 5-1 不同組裝模式對發電功率的影響比較圖
 圖中可見到內外皆小球藻的模組，其發電功率最高，達到 $0.65 \mu\text{W}$ ，更為其他兩組的 4 倍左右。因此組合藻類電池時，內外皆需要藻類

四、 討論：

根據實驗結果，我們可以得知藻類電池不能僅有一方具有藻類，另一方為水，而是需要內外雙盒皆為藻才可以。根據科學家在微生物燃料電池的研究，通常在微生物電池的一端，必須有質子的接受者，如圖 5-2 所示，降低某端的質子濃度，才能避免質子的累積，造成質子電化學梯度的消失，更連帶使得電子流動情形的消失。

同樣的情況也發生在藻類電池中，若內外盒皆有小球藻，一盒扮演質子提供者，留向另一盒的質子接受者，因此當質子不斷被接受者消耗，即可維持電化學濃度差，可維持電流的穩定，電功率也持續穩定；但在內藻外水、內水外藻的組合中，因為沒有質子的消耗者，而導致質子不斷地蓄積，當內外兩盒的質子濃度相近時，就不再有質子的流動，電流就不會產生，電功率隨即下降。

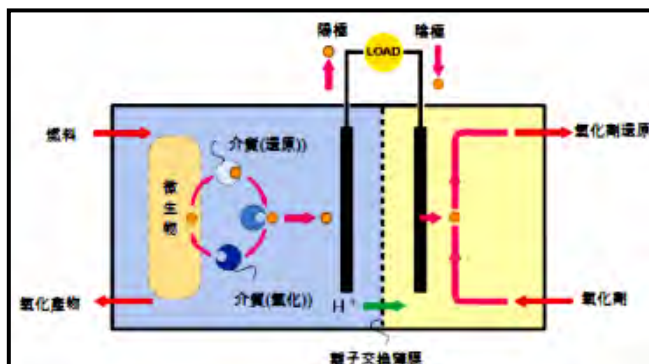


圖 5-2 微生物燃料電池的示意圖
 圖中可見到左盒產生的質子流向右盒，但是在右盒具有氧化劑可接受質子，使得兩盒的質子濃度差可以保持，並持續產生質子流
 (資料來源：
<http://case.ntu.edu.tw/hs/wordpress/?p=3335>)

實驗二 探討不同藻種所組成的藻類電池發電效率之評估

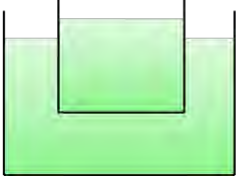
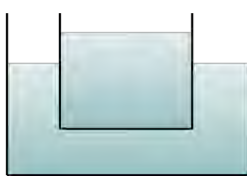
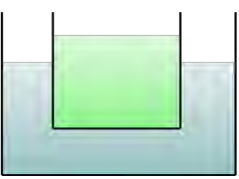
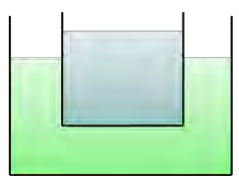
一、 實驗目的：

根據實驗一的結果，藻類電池需要內外盒皆有藻類，才有較高的發電效率。本部分研究原核生物的藍綠菌與真核生物的小球藻，兩種不同藻種搭配而成的藻類電池發電效率為何？

二、 實驗設計：

(一) 實驗模組：

將藻類電池分成四組設計，分別裝入藍綠藻與小球藻，相關設計如下：

	內小球外小球	內藍綠外藍綠	內小球外藍綠	內藍綠外小球
側面圖示				

(二) 變因控制：

為了讓實驗變因可以達到更好的控制，以下列出本實驗的研究控制，如下表 5-2 所示。

表 5-2 不同藻種所組成的藻類電池發電效率研究變因表

自變項	依變項	控制變項
內小球外小球	電功率	生長溫度皆 25°C
內藍綠外藍綠	藻類電池的正負極	照光時間皆為 12 小時
內小球外藍綠		皆由植物燈照射
內藍綠外小球		相同時間測量

三、 實驗結果：

經過實驗過後，我們發現下列兩個重要的現象：

1. 藍綠藻易放電，擔任負極角色

當我們測量藻類電池發電功率時，可以發現連接裝著藍綠藻的盒子都是扮演負極的角色，判斷的方式是由數位三用電錶所顯示的值。三用電錶的使用方式是正極接正極，負極接負極，其數值顯示為正值；若接錯電極則會顯示出負值。由圖 5-3 可以觀察到：在「內小球

外藍綠」這一組，當三用電錶的紅色鱷魚夾(正極)接上內盒小球藻(紅線)、黑色鱷魚夾(負極)接上外盒藍綠藻(黑線)時，電壓的讀數為 115.0 mV(如圖 5-3-1 所示)，代表這種藻類電池的負極(藍綠藻)接三用電錶的負極、正極(小球藻)接三用電錶的正極的接法是正確的；若是相反接法，則數值完全剛好相反，變成 -118.0 mV，代表所接的方向相反了(如圖 5-3-2 所示)。

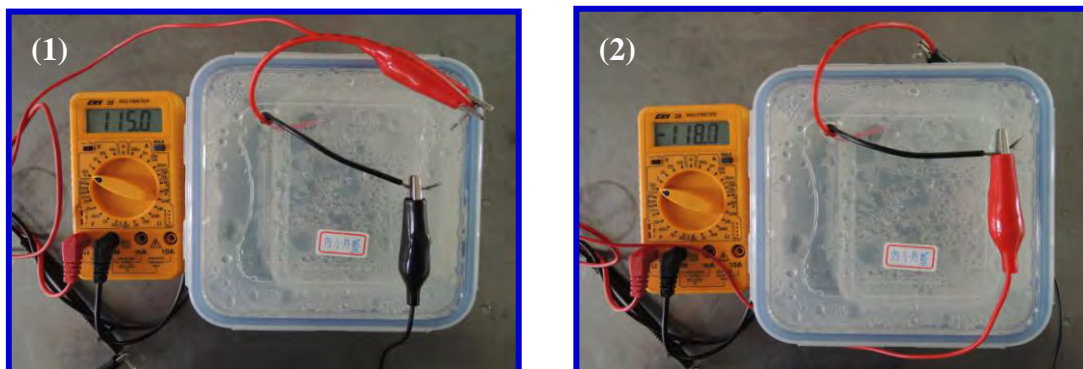


圖 5-3 內小球藻外藍綠藻的電性檢驗

利用三用電錶檢驗藻類電池的電性。圖(1)所示：當紅鱷魚夾(正極)－紅線(小球藻)時，數值顯示為正值，代表連接正確；圖(2)所示：當紅鱷魚夾(正極)－黑線(藍綠藻)時，數值顯示為負值，代表連接錯誤。結果可以推測：藍綠藻擔任負極角色，小球藻擔任正極角色。

2. 不同藻種混合所組成的藻類電池，發電效率較高

觀察四種不同藻類電池的電功率，可以發現由兩種不同藻類組合的電池，發電功率顯著較高，分別為 4.56 μW 以及 4.45 μW ；相同藻類所組合的電池，發電功率顯著較低，僅有 0.59 μW 以及 0.50 μW 。由兩種不同藻類組合產生的電功率約為相同藻類組合而成的電池的 9.12 倍，如圖 5-4 所示。

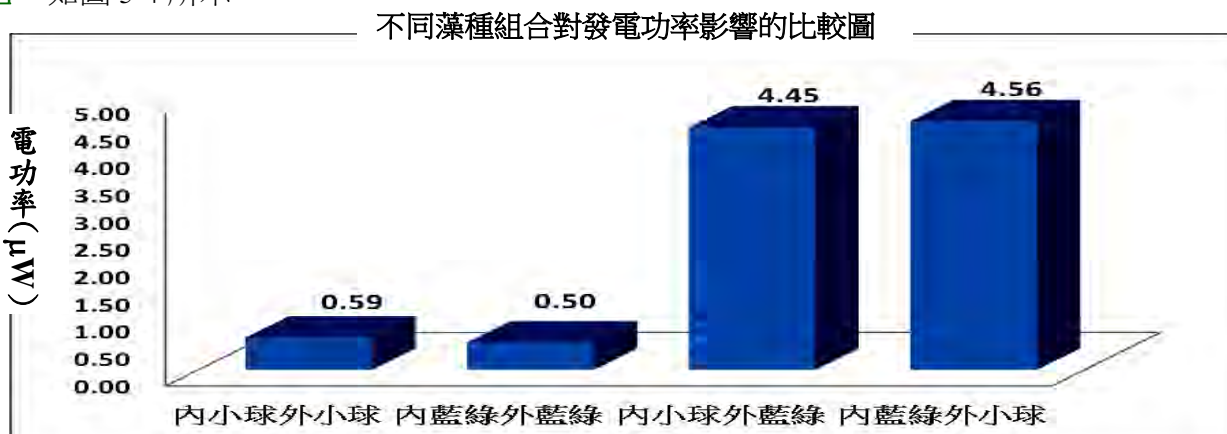


圖 5-4 不同藻種對發電功率的影響比較圖

可以發現兩種不同藻種組合而成的藻類電池，其發電功率遠大於單一藻種所組成的電池。不同藻種混合的電池發電效率為單一藻種的 9.12 倍

四、 討論：

由實驗結果，可以得知利用藍綠藻較易放電，它是擔任負極的角色，而小球藻則擔任正極的角色。兩種藻類放電效果的差異，可以從其細胞構造上的差異進行解釋。藍綠藻屬於原核生物，類似細菌的結構，因此缺乏葉綠體，其光合作用是在細胞膜上的蛋白進行，因此容易將質子釋放到細胞外，造成其放電效果較佳；而小球藻屬於真核生物，具有葉綠體，其光合作用是在其類囊體的膜上，其質子會先排到細胞質中，再擴散到細胞外，因此放電效率較差，其構造上差異可見圖 5-5 及圖 5-6 所示。

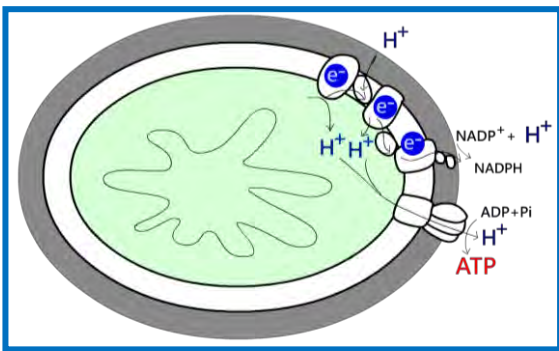


圖 5-5 藍綠藻的構造示意圖

藍綠藻沒有葉綠體，光合作用都在細胞膜上進行，因此質子很容易擴散到細胞外。因此藍綠菌較易放電，可擔任負極的角色

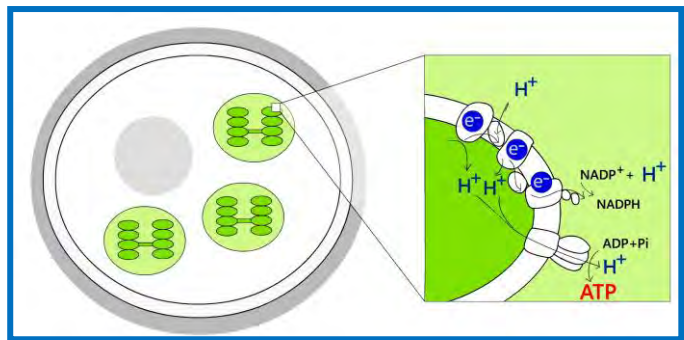


圖 5-6 小球藻的構造示意圖

小球藻具有葉綠體，光合作用都在葉綠體內進行，因此質子需要先擴散到細胞質，再緩慢擴散到細胞外，因此小球藻較不易放電，擔任正極的角色。

此外兩種不同藻類所組合而成藻類電池，其發電效率較高；其值是單一藻種組合的 9.12 倍，主要原因是電池的發電效率要看兩盒間的電位差，若兩盒皆為同種藻類，則因放電能力相同，因此電位差差距不大，電功率也變得很小。而當藍綠藻與小球藻組合在一起時，因為藍綠藻的放電效率較小球藻高上許多，所以兩盒間的電位差很大，電功率也隨即增加。因此接下來的實驗，皆採取「內藍綠外小球」的方式進行實驗。

實驗三 探討不同自然光照環境對於藻類電池發電效率之影響


一、 實驗目的：

本研究探討在不同光照強度的自然環境中，藻類電池的發電效率為何？

二、 實驗設計：

(一) 實驗模組：

將藻類電池放置在下列四種自然環境中，並以照度計測量該環境的光照強度，相關設計與光照強度如下：

	操場中央	樹蔭下	牆角邊	教室桌面
照度	88600 Lux	8700 Lux	4940 Lux	398 Lux
側面圖示				

(二) 變因控制：

為了讓實驗變因可以達到更好的控制，以下列出本實驗的研究控制，如下表 5-3 所示。

表 5-3 不同自然光照環境對藻類電池發電效率研究變因表

自變項	依變項	控制變項
光照強度	電功率	皆由日光照射 照光時間皆為 1 小時 皆為內藍綠外小球的電池組合 相同時間測量

三、 實驗結果：

研究結果顯示：**光照強度較高的地方，藻類電池發電效率也比較高**。在光照強度最大的操場，其發電功率達到 6.02 μW ，其後隨著光照強度的減弱，其發電效率也緩慢下降。不過值得一提的是：藻類電池在照度僅有 398 Lux 的教室內，其發電功率雖然最低，但卻與最高值的操場中央電功率，兩者僅相差 1.92 μW 。

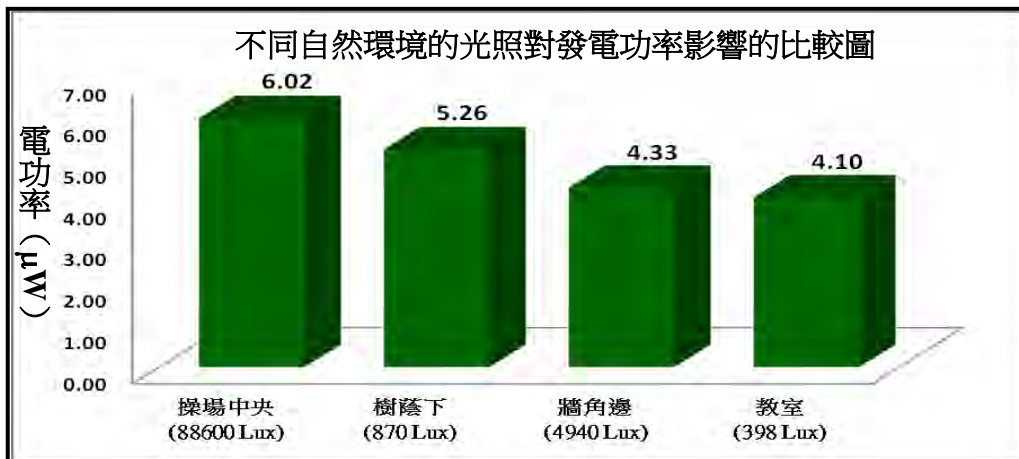


圖 5-7 不同自然環境的光照對發電功率影響的比較圖
 由數據可見：**越高照度的環境，其發電效率也越高**；但在**低照度環境下，藻類電池發電效率並未明顯下降**。

四、 討論：

由此實驗可以得知：**藻類電池的發電功率與光照強度有關連性，當光照強度越高，其電功率也跟著越大**。不過在較低光照的環境中，例如：教室(398 Lux)仍有不錯的電功率表現，因此**藻類電池即使在室內環境中，也可以持續提供電能，而不會有大幅降低的情形**。

實驗四 探討不同色光對於藻類電池發電效率之影響

一、實驗目的：

本研究著重不同色光對於藻類電池發電之影響，藉以尋找出最佳的色光，讓藻類電池發電功率達到最佳。

二、實驗設計：

為了讓實驗變因可以達到更好的控制，以下列出本實驗的研究控制，如下表 5-4 所示。

表 5-4 不同色光對藻類電池發電效率研究變因表

自變項	依變項	控制變項
不同色光	電功率	培養溫度皆為 25°C 照光時間皆為 12 小時 皆為內藍綠外小球的電池組合 相同時間測量

三、實驗結果：

藻類電池在不同色光照射下，發電功率有著高低的不同。在藍光與紅光的照射下，其發電功率較高，分別為 8.38 μW 以及 7.75 μW ，而照射綠光的藻類電池則是表現最差的一類，僅有 4.87 μW 。

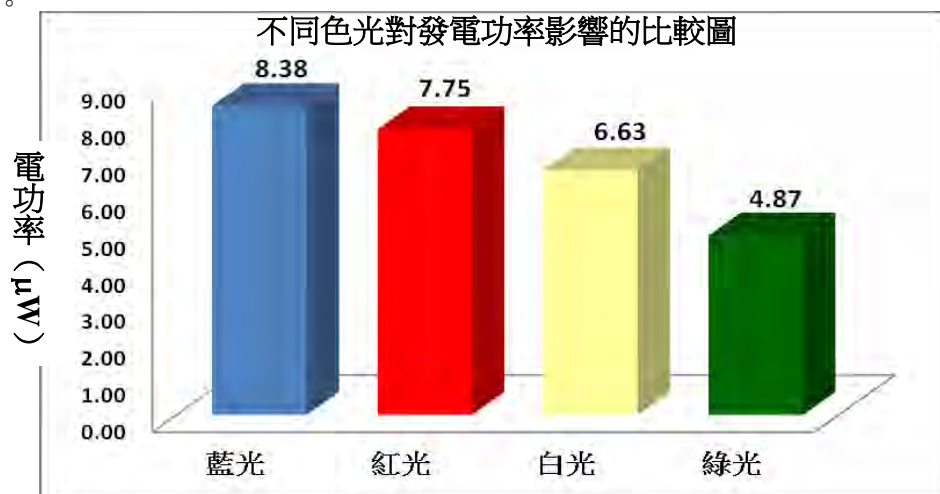


圖 5-8 不同色光對發電功率影響的比較圖

由數據可見：藍光與紅光有較高的發電功率，而綠光則是發電功率最低。

四、討論：

我們可以發現不同色光對於藻類電池發電效率影響不同。這些值得我們注意的現象，經過我們查詢資料之後，我們提出下列可能的解釋：在我們國二理化課程的光與顏色課程中，我們學習到光的三原色與物體顏色的關係，其關係如圖 5-9 所示。每種物體所呈現的顏色，是被反射出來的色光。因此葉綠素所呈現的綠色，是因為葉綠素反射出綠光，代表葉綠素對綠光的吸收情況不佳，因此光合作用的效率較差，產生的電功率也較低。根據圖 5-8，我們也可以得知葉綠素對於紅光與藍光的吸收能力最好，因此光合作用的效率也最高，會產生最高的電功率。

此外根據藻類的色光與光合速率關係圖（如圖 5-10 所示）。我們可以再次得到驗證：藻類在紅光與藍光中光合作用的效率最高，因此這也呼應我們的研究結果：藻類電池在藍光與紅光中，發電效率較佳；而在綠光中，發電效率則較差。

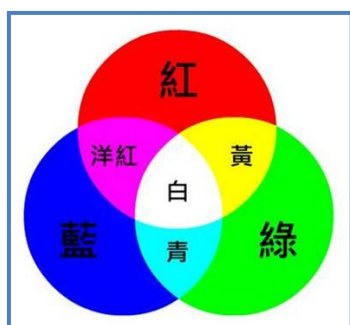


圖 5-9 光的三原色

光的三原色包含紅光、藍光與綠光，物體所呈現的顏色，是因為該物體反射該種光所造成，例如：綠色物體是因為吸收紅光與藍光，反射綠光所造成。

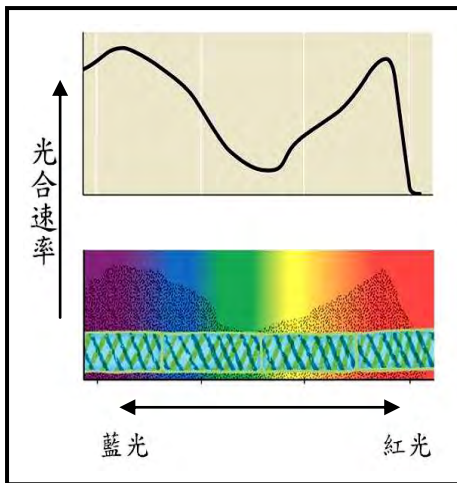


圖 5-10 不同色光與藻類光合速率的關係圖

(圖片取自普通生物學 *Biology*，Campbell 與 Reece 著)

圖中可以觀察到，藻類在紅光與藍光的照射下，有最佳的光合速率；而在綠光照射下，光合速率則是最低。由此可以觀察色光對光合速率有很大的影響。

實驗五 探討添加營養液於藻類電池發電效率與發電持續能力之影響

一、實驗目的：

本研究探討加入營養液對於藻類電池的發電效率與持續發電能力是否有所影響？觀察添加營養液的實驗組與未添加任何藥品的對照組，在藻類電池的電功率、藻液細胞數目與藻液 pH 值的變化等依變項有沒有差異？

二、實驗設計：

1. 為了讓實驗變因可以達到更好的控制，以下列出本實驗的研究控制，如下表 5-5 所示。

表 5-5 不同藻種所組成的藻類電池發電效率研究變因表

自變項	依變項	控制變項
營養組	電功率	生長溫度皆 25°C
對照組	持續發電率	照光時間皆為 12 小時
	藻液細胞數	皆由植物燈照射
	藻液 pH 值	相同時間測量
		皆為內藍綠外小球的電池組合

2. 營養組添加液態肥料與微量金屬補充液，兩者依溶液體積稀釋 1000 倍後，加入藻液中。

3. 發電持續率：

為了研究添加營養劑對於藻類電池發電能力的延續，本研究特別計算發電持續率。研究者測量到的第一天電功率做為分母，隨後每日測量到電功率為分子，兩者的比值定義為發電持續率。計算公式如下：

$$\text{發電持續率 (\%)} = \frac{\text{每天的電功率}}{\text{第 1 天的電功率}} \times 100\%$$

三、實驗結果：

從研究結果可以顯示：添加營養液對於藻類電池的發電效率有顯著的提升，對於藻類電池的持續發電能力也顯著提昇。添加營養液的藻類電池，其第 1 天發電功率為 18.21 μ W，而對照組僅為 5.47 μ W，營養組是對照組的 3.33 倍，營養組與對照組發電功率雖然都隨著時間經過而下降，但是到了第 10 天，營養組電功率還有 2.89 μ W；而對照組僅剩 0.09 μ W，幾乎不發電了，如圖 5-11 所示。若以發電持續率的角度來看，營養組在第 2 天還保有 98.69%的發電能力，而對照組僅剩下 58.87%；到第 10 天時，營養組還剩下 15.87%，而對照組僅剩下 1.68%，如圖 5-12 所示。



圖 5-11 營養液對電功率影響的變化圖
營養組的電功率一直都比對照組高，而且在第 10 天還維持有 2.89 μ w 的功率，但對照組僅剩下 0.09 μ w。

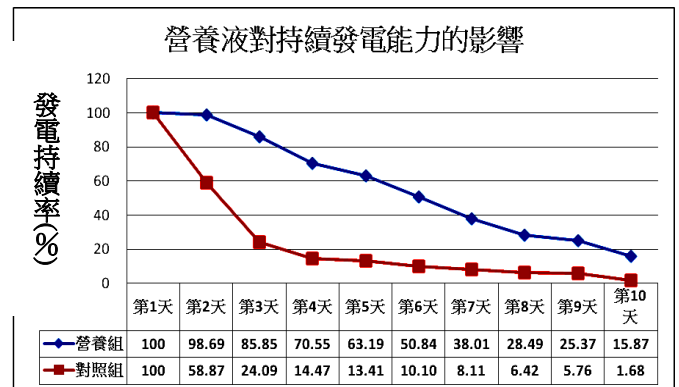


圖 5-12 營養液對持續發電能力的影響
添加營養液對於持續發電能力有很顯著的提升。在第 10 天時，營養組持續發電率還有 15.87%，但對照組卻僅剩 1.68%

若從電池內藻類細胞數目的變化來看，我們可以發現：雖然隨著時間經過，營養組與對照組的藻類細胞都有減少的現象，但是添加營養液可以減緩藻類細胞數目的減少。以小球藻來說：一開始都是注入濃度 18.5×10^5 個/ml 的小球藻，但是營養組 10 天後，還剩 1.5×10^5 個/ml，對照組卻只剩 0.33×10^5 個/ml，營養組的小球藻數為對照組的 4.45 倍。同樣的情況也出現在藍綠藻中，實驗開始藍綠藻的數目為 21×10^5 個/ml，但是 10 天過後，營養組的藍綠藻剩下 5.25×10^5 個/ml，對照組則僅剩下 0.28×10^5 個/ml，營養組的藍綠藻數為對照組的 18.75 倍，如圖 5-13 所示。

本研究為了再深入探討可能造成藻類死亡的原因，我們每日連續採樣小球藻溶液，進行 pH 值的檢驗，結果如圖 5-14 所示。營養組與對照組的水溶液 pH 值都隨著時間經過而逐漸升高，但是對照組在第二天就開始明顯上升，而營養組的變化卻沒有如此明顯。

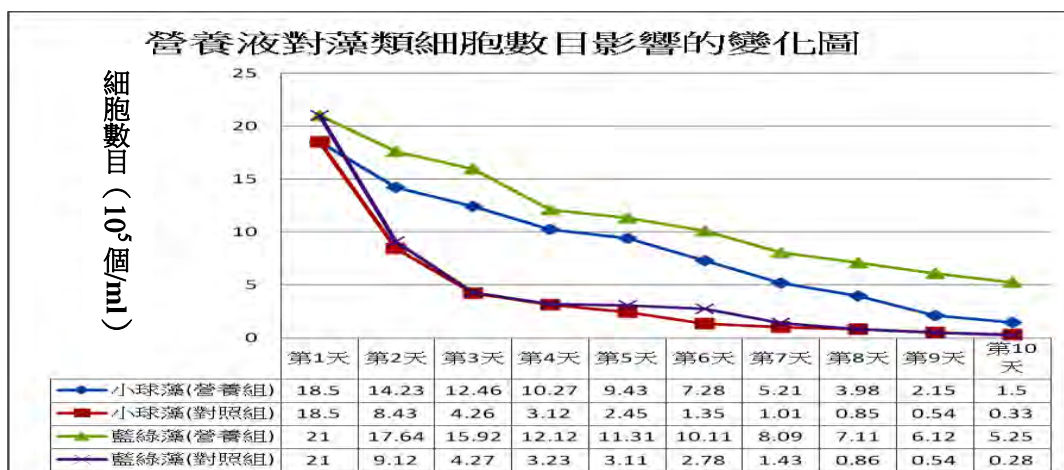


圖 5-13 營養液對藻類細胞數目影響的變化圖

兩組藻類細胞數目都會隨著時間而下降，但是營養組下降速度較慢，代表添加營養液可以減緩藻類細胞死亡的速度。

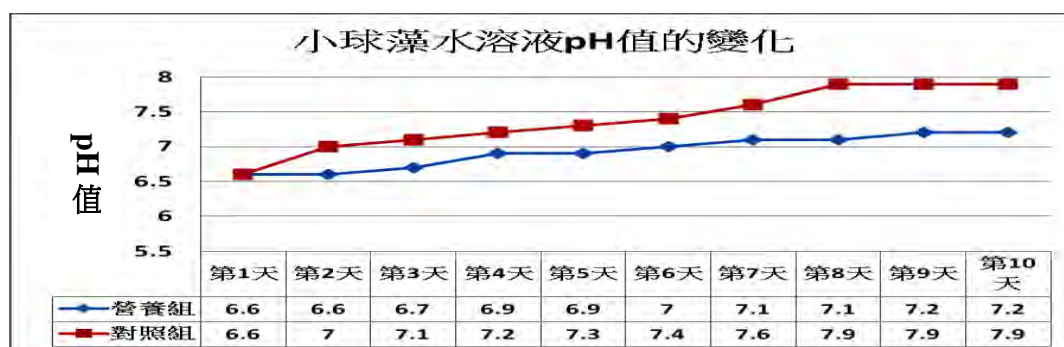


圖 5-14 小球藻水溶液 pH 值的變化圖

兩組的 pH 值都隨著時間而逐漸上升，但對照組的小球藻水溶液從第 2 天開始，其 pH 值就升高至 7；而營養組上升情況卻比較緩慢。

四、討論：

根據實驗結果，我們可以發現添加營養劑對於藻類電池發電有顯著的提昇，而且對於持續發電能力也同樣有顯著提昇。從第 1 天的發電功率情形可以發現：營養組的電功率為對照組的 3.33 倍。我們推斷可能的原因為：添加營養劑中具有離子，可以增加水溶液的導電度，使得藻類所產生的電力更容易傳導到碳布上。

此外由藻類細胞數目的變化研究中，我們可以發現添加營養劑可以減緩藻類細胞的死亡，藻類雖然可以行光合作用，產生養分維持自身的生命，但是藻類生存依然需要微量元素與金屬元素，因此添加營養劑能給予藻類更多生存所需的元素，使得生命延長。

但是我們依然可以見到添加營養組的藻類細胞逐漸死亡，我們認為可能是受到容器本身

影響，本研究所建立的系統並非為循環式的系統，所以當有藻類開始死亡時，其釋放的物質無法經由循環而排除，進而破壞生存的環境。主要證據為：對照組小球藻溶液的 pH 值變化，小球藻適合的生存環境為 6.8—7.2，因此當小球藻開始大量死亡時，造成 pH 值的上升，更連帶使得小球藻大量死亡。

因此根據本研究的結果，我們認為添加營養劑對於藻類電池很有幫助，不僅可以增加導電度，提高發電傳導的能力；且可以延長藻類的生命週期，減緩死亡的速率，使得發電能夠持續。

實驗六 藻類電池的串聯測試

一、實驗目的：

本研究嘗試將藻類電池進行串聯，觀察隨著串聯的電池數目增加，其電壓、電流與電功率是否有隨之增加的情形。

二、實驗設計：

1. 將藻類電池正負極相接的方式，進行串聯，如圖 5-15 所示。
2. 利用三用電錶測量串聯過後的電壓、電流，並計算出串聯過後的電功率。



圖 5-15 藻類電池的串聯

將每個電池的正負極相接，最後並連接到三用電錶上，測量其電壓與電流，隨後再計算出電功率。(圖中的電壓為 501mV)

3.研究變項：

為了讓實驗變因可以達到更好的控制，以下列出本實驗的研究控制，如下表 5-6 所示。

表 5-6 藻類電池的串聯研究變因表

自變項	依變項	控制變項
藻類電池的串聯數目 (1-7 個)	電壓 電流 電功率	以日光為光照來源 皆為內藍綠外小球的電池組合 相同時間測量

三、實驗結果：

由結果可以得知：藻類電池再經過串聯之後，其電壓會隨著串聯電池的數目，逐漸增加，最高可達 526 mV；電流則在 95.7 μ A 時，增加的情形就逐漸趨緩；電功率也是隨著串聯數目增加可以達到 50.34 μ W，如圖 5-16 所示。

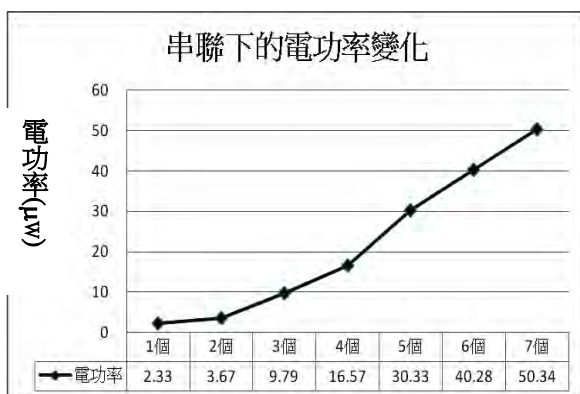
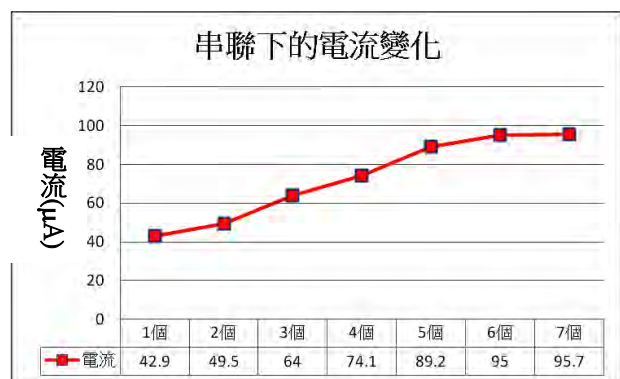
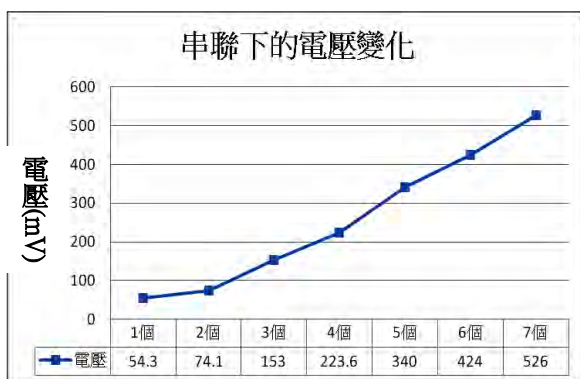


圖 5-16 串聯後的電壓、電流與電功率變化

圖(1)電壓部分：隨著串聯數目的增加，串聯而成的電壓也隨之升高；圖(2)電流部分：當電流升高到 95 μ A 左右，增加情形就趨緩。圖(3)電功率部分：隨著串聯數目的增加，可達到 50.34 μ W。

四、討論：

當藻類電池經由串聯過後，可以發現電壓、電功率以及電流都會隨著串聯的藻類電池數目增加，而隨著升高。但是電流似乎在 95 μ A 附近，升高的情形就不顯著。主要的原因可能為：電池內電阻也隨著串聯而增加。每個電池本身都有其電阻，隨著串聯，電阻也會逐漸增

加，且根據歐姆定律表示： $\text{電壓} = \text{電流} \times \text{電阻}$ ($V=I \times R$)。所以當電壓升高時，電阻也隨著串聯而增加，於是電流也不會有明顯的變化，但是因為電功率的計算公式 $P=I \times V$ ，因此雖然電流沒有再顯著升高，但是電功率還是會隨著電壓增加而升高。雖然串聯可以有效提昇電池的功率，但是可能隨著串聯數目的增加，電阻的加大，使得電池的溫度升高，導致藻類生長環境有可能受到破壞。

陸、結論與未來展望

一、結論：

(一) 藻類電池模組的製作與組合

藻類電池的製作，必須要內外兩盒都充滿藻類溶液，如此才能有較好的發電效率。因為其中一盒可做為質子提供者，但仍需要另一盒做為質子接受者，如此才能維持兩盒間的質子濃度差，才能造成質子電化學梯度，使得電流能夠持續流動。

(二) 不同藻種所組成的藻類電池發電效率之影響

使用藍綠藻與小球藻搭配製成的藻類電池，發電功率最高。其中藍綠藻擔任負極的角色，因為屬於原核生物，構造簡單，光反應在細胞膜上進行，因此容易釋放出質子到細胞外，放電效率較佳；小球藻則擔任正極的角色，因其屬於真核生物，光反應在葉綠體內進行，較不易將質子擴散到細胞外，因此放電效率較差。

(三) 不同自然光照環境對藻類電池發電效率之影響

自然環境下的光照越強，則藻類電池發電效率高，但是在低照度的環境中，如：教室(398 Lux)，藻類電池也能持續提供電能，而不會有大幅降低的情形。

(四) 不同色光對藻類電池發電效率之影響

照射藍光與紅光對於藻類電池的發電效率提昇最顯著，而綠光則是發電效率最低。主要原因為葉綠素為綠色，因此會反射出綠色，而吸收藍光與紅光，所以當照射藍光與紅光時，葉綠素吸收效果最佳，發電效果也最佳。

(五) 添加營養液對於藻類電池發電效率與持續發電能力之影響

添加營養液對於藻類電池的發電效率有顯著的提升，且對於延緩藻類細胞的死亡有所幫助。因為營養液可以增加藻類溶液的導電度，使得藻類產生的電力更容易傳導到碳布上，營養液能提供藻類生存所需的物質，使得藻類細胞不易死亡。

（六）藻類電池的串聯測試

藻類電池可以藉著串聯增加電壓與電功率，隨著電池串聯數目的增加，電壓與電功率也跟著越高，但電阻也跟著增加，所以可能會造成電池溫度的升高，使得藻類生存的環境受到破壞。

二、未來展望：

本研究進行的藻類電池研究，期待可以為未來的世界開創一個新的能源，利用藻類行光合作用，不僅不需額外注入葡萄糖等養分，更可以達到「節能減碳」的目的。期盼在未來的研究中，可以將藻類電池的規模變大，相信大容量藻類電池可以提供更穩定且更大量的電量；且能將水溶液循環系統導入藻類電池中，解決藻類大量會死亡的情形。

作者也期盼在未來藻類電池可以發展各種形式，例如：將藻類與水族缸結合，不僅可以美化家中的環境，更可以利用它來發電，增加電力的來源；此外也希望不僅只是研究藍綠藻與小球藻結合而成的藻類電池，能夠找尋更多類型的藻類，組合更多樣的電池，例如：尋找海中的藻類組合成電池，未來只要在海水圈養一圈，就可以讓藻類在其中滋長，並可設計成特大的藻類電池。

最後，期盼我們小小的研究，能夠為未來點亮一絲絲希望。

柒、參考資料及其他

生物學（鍾楊聰等譯）（2005）。臺北市：偉明圖書。（原著出版年：2001年）

黃毓涵（2009）。小球藻最適化連續式培養之研究。國立成功大學化學工程學系碩士論文，未出版，台南市。

霍格蘭·竇德生（2002）。觀念生物學 1。（李千毅譯）。臺北市：天下遠見。

科學實驗王 4—光合作用與呼吸作用（徐月珠譯）（2010）。台北市：三采文化。

何念萱、陳昕臨、張藍心、劉瑞臻（2007年7月）。微生物電力公司—微生物燃料電池之變因探討。中華民國第47屆中學小科學展覽會，高雄市。

林弘恩、黃士恩、李郁柔、劉靜文（2009年7月）。來電用「絲絲」---絲藻在微生物燃料電池之應用。中華民國第49屆中學小科學展覽會，嘉義市。

方偲庭、陳宣愛、楊舒惠(2012年7月)。醇中帶電－酵母菌燃料電池的初探。中華民國第51屆中學小科學展覽會，桃園縣。

Briggs, B., Mitton, T., Smith, R., & Magnuson, T. (2009). Teaching cellular respiration & alternative energy sources with a laboratory exercise developed by a scientist-teacher partnership. *The American Biology Teacher*, 71(3), 164-167.

Chao, L., Wen, Y., Chen, P., Lin, C., Lin, S., Guo, C., & Wang, W. (2012). The development and learning effectiveness of a teaching module for the algal fuel cell: A renewable and sustainable battery. *International Journal of Technology and Human Interaction*, 8(4), 1-15.

Pandit, S. Nayak, B. K., & Das, D. (2012). Microbial carbon capture cell using cyanobacteria for simultaneous power generation, carbon dioxide sequestration and wastewater treatment. *Bioresource Technology*. 107. 97-102.

【評語】 030306

本作品藉原核光合生物及真核光合生物的組合建構出可以發電的生物電池，雖發電量仍低，尚未臻實用階段，但已具驗證科學概念的意義。此外，作者能動手自行組裝電池亦深值嘉許。