

# 2020 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

**作品編號** 070002

**參展科別** 微生物學

**作品名稱** 利用共生菌與小球藻建構不須添加培養基  
且能日夜發電的長效生物光伏電池

**得獎獎項** 大會獎：一等獎  
出國正選代表

**就讀學校** 臺北市立第一女子高級中學

**指導教師** 李思賢、李宏孝

**作者姓名** 李芊葳

**關鍵詞** 生物光伏電池、小球藻、共生菌

## 作者簡介



我是北一女中二年級的學生李芊葳，小學時參加科展的難忘回憶，讓我在高中時再度踏上了科學之旅。很開心能夠參加這次國際科展，和更多人分享我的研究成果！謝謝李思賢教授和李宏孝老師的指導，也謝謝實驗室蔡語學姊、奕廷學長、孟辰學長、御軒學長、及柏宇學長指導我微生物操作技術，讓我進步和成長，完成這份研究，也希望可以為再生能源領域貢獻一份心力，讓研究成果落實在實際應用中！

## 摘要

生物光伏電池(BPV)是一種利用光合自營生物進行光電能量轉換的發電裝置。本研究利用共生菌 G76 創造不須補充培養基的固態複合型 BPV。我們以陽極只含小球藻的 BPV 為控制組(X-C)，發現在實驗開始 24 小時之後，BPV 電壓開始隨著光照週期產生規律變化，前三個光週期電壓高峰平均值為  $116.23 \pm 2.92$  mV，谷底平均值為  $87.96 \pm 4.48$  mV，波動幅度 28.27 mV。實驗組為陽極有小球藻與共生菌 G76 的複合型 BPV (X-CG)，同時期電壓高峰平均值為  $109.23 \pm 2.45$  mV，谷底平均值為  $100.63 \pm 0.9$  mV，波動幅度 8.6 mV。與 X-C 相比，添加 G76 會使電壓高峰下降 6.02%，但提高谷底電壓 14.4%且縮小電壓波動幅度 69.58%。目前 X-CG 已運轉超過 1032 小時，電壓高峰為 95.2mV，衰減幅度 19.35%。同時期控制組 X-C 電壓高峰已下降至 61.1mV，衰減幅度 90.22%。實驗過程中我們發現在 X-C 及 X-CG 組別運作 73 小時後，在陰極區都出現了紫黑色微生物(PB1)，同時這些被污染的 BPV 的電壓明顯比其他組別更高，將 PB1 單獨培養並引入陰極後(P-CG)，此一 BPV 的電壓高峰平均值高達  $179.3 \pm 3.66$  mV，谷底平均值則為  $162.37 \pm 1.38$  mV，都比 X-CG 組提高近六成。更重要的是 X-CG 與 P-CG 分別能保持日間電壓的 92.13%與 90.56%，都是非常穩定的 BPV。

由以上結果可知，將共生菌 G76 加入 BPV 陽極能提高日夜間的供電穩定度並延長裝置使用壽命，而將 PB1 引入陰極則能使 BPV 電壓提高六成以上。若能進一步優化應用這些共生菌，此種低成本複合型生物光電轉換裝置將有潛力建構出一套不須儲電系統的太陽能發電系統。

## Abstract

Biophotovoltaic cells (BPV) can utilize photosynthetic autotrophic organisms for photoelectric energy conversion. In this research, we screened and inoculated the symbiotic bacteria G76 (G) to create a solid composite BPV, which does not require adding extra mediums during the operation process. The BPV with Chlorella in anode was the control group (X-C). After 24 hours, it was found that the voltage curve would change regularly with the photoperiod. The average voltage peak in the first three photoperiods was  $116.23 \pm 2.92$  mV, and the average value of the low voltage peak was  $87.96 \pm 4.48$  mV. The fluctuation amplitude was 28.27 mV. The experimental group was a composite BPV (X-CG) with the symbiotic bacteria G76(G) and chlorella(C) at the anode. The average voltage peak was  $109.23 \pm 2.45$  mV for the same duration, and the average value of the low voltage peak was  $100.63 \pm 0.9$  mV. The fluctuation amplitude was reduced to 8.6 mV. Compared with X-C, adding G76 will reduce the voltage peak by 6.02%, but increase the low voltage peak by 14.4% and reduce the voltage fluctuation by 69.58%. At present, X-CG has been running for more than 1032 hours, the voltage peak is 95.2 mV, and the total attenuation is 19.35%. At the same time, the voltage peak of the control group X-C has dropped to 61.1 mV, and the total attenuation is 90.22%. During these experiments, we found that after 73 hours of operation in the X-C and X-CG groups, purple and black microorganisms (PB1) appeared in the cathodes, and the voltage of these contaminated BPVs was significantly higher than other groups. After PB1 was cultured separately and introduced into the cathode (P-CG), the average voltage peak of P-CG was  $179.3 \pm 3.66$  mV. The average value of low voltage was  $162.37 \pm 1.38$  mV, which was nearly 60% higher than that of the X-CG group. More importantly, X-CG and P-CG can maintain 92.13% and 90.56% of the daytime voltage, respectively. Both of them are very stable BPVs.

From these results, the BPV device with symbiotic bacteria G76 can significantly improve the stability of the power supply day and night and extend the service life. Inoculated of anaerobic bacteria BP1 to the cathode can increase the BPV voltage by more than 60%. If these symbiotic bacteria can be further optimized, such a low-cost composite bio-electrical conversion device will have the potential to construct a solar power generation system that does not require a power storage system.

# 壹、前言

## 一、研究動機

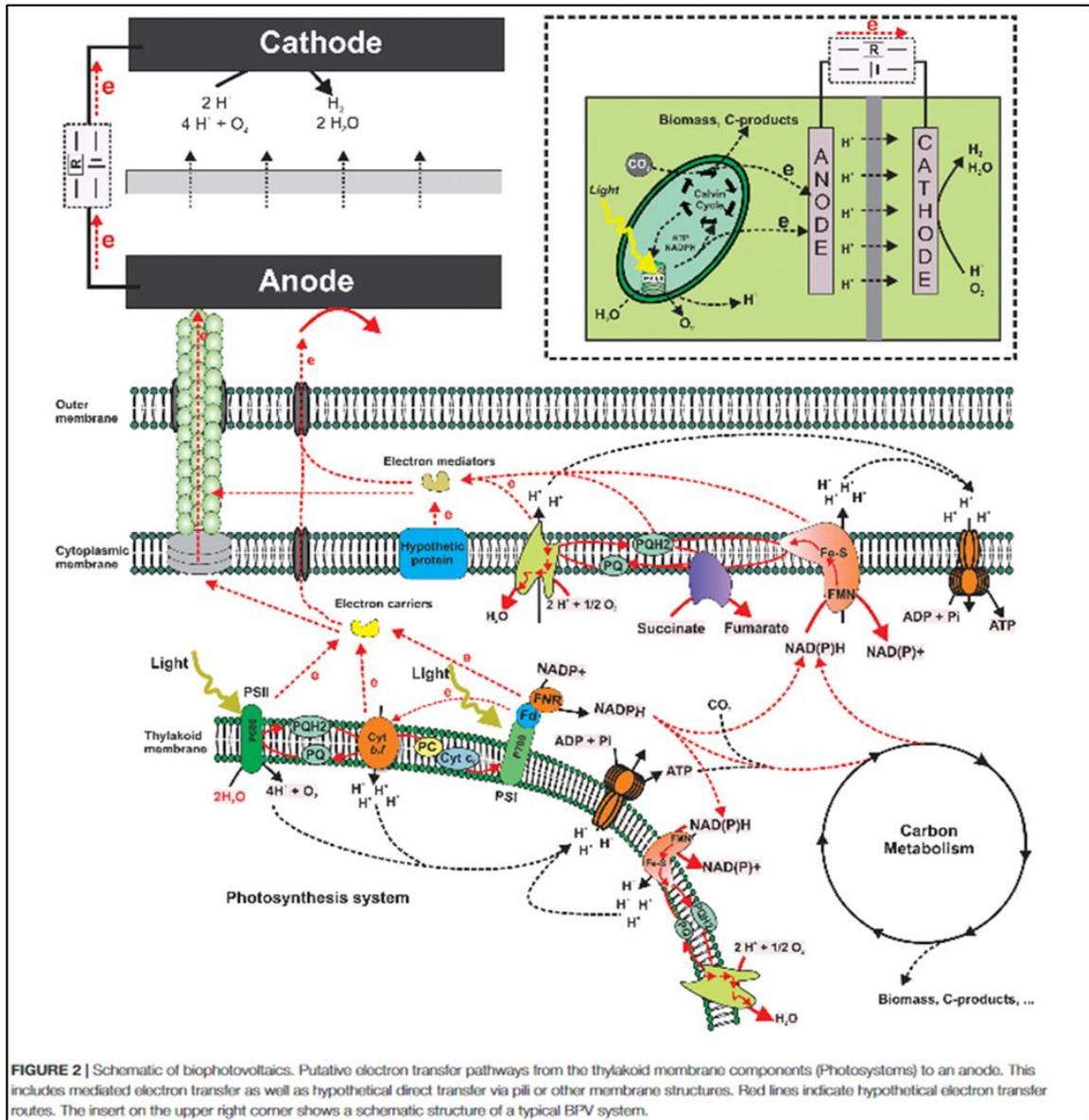
太陽能是地球上單位面積功率最大的再生能源(Barbaro et al.,1981)，也是目前綠能發展的主要選項之一。其中的太陽能光電轉換更是近年來快速發展的再生能源，其具有發電過程不排放溫室氣體，產電高峰與電網用電高峰時間點相近等優點，在單晶矽太陽能電池成本日趨下降且性能持續提升的今天，矽晶片已經成為太陽能發電最主要的光電轉換材料。但矽晶太陽能光電板的製造過程極為耗能且會產生大量有機廢水與重金屬汙泥(Sun et al., 2014)，發電功率亦會受到光照變化而劇烈波動，在夜間或日全蝕時幾乎無法發電。這些問題導致現今矽晶太陽能發電體系必須搭配昂貴複雜的儲能系統(Vijayakumar et al., 2018; Carrillo et al., 2019)，或是與其他可快速啟動的發電設備(如天然氣火力發電廠)等搭配才能達成穩定供電之目的。因此，開發一種更便宜、生產過程更環保，且能在夜間持續供電的太陽能發電裝置是目前非常吸引人的課題。

## 二、背景介紹

### (一)生物光伏電池(Bio-photovoltaic, BPV)

BPV 是一種利用生物進行太陽能光電轉換的發電裝置，其主要原理是透過特殊的電池設計，收集光自營性微生物在光合作用時細胞表面溢散的電子來驅動電流產生(圖一)。由於其生產過程中成本與污染均較矽晶片低，且在光照減弱甚至夜間時依然能透過其他代謝途徑所產生的 NADH 代謝來持續發電(圖一)。最早的 BPV 是在 1985 年由 Tanaka 等研究人員所開發的雙槽式生物光伏電池，其電池設計是將藍綠藻培養在陽極槽，利用其在進行光合作用時所產生並溢散到細胞表面的電子來驅動電流產生，同時此種單細胞藻類還會釋出氫離子，陰極槽則設置能催化氧氣與氫離子及電子結合產生水的陰極板來進行還原反應，兩者之間以質子交換膜隔開來平衡兩側氫離子並避免單細胞藻滲漏至陰極區。由於氧氣與氫離子及電子結合產生水的還原電位很高，因此只要位於陽極的光合微生物能持續進行光合作用產生電子與氧氣，此種 BPV 裝置在理論上將能持續不斷產生電力，甚至在光合作用停止的夜間依然能維持一定的產電能力。此種雙槽式 BPV 經歷多次

改良也衍生出多種不同構型(Tanaka et al., 1988; Yagishita et al., 1993)。但由於雙槽式 BPV 裝置需要昂貴的質子交換膜導致其成本難以下降，且此質子交換膜在長期使用下容易因阻塞而造成電池內阻上升、壽命縮短，使得此種設計至今仍難以實用化(Kadi et al.,2018)。單槽式 BPV 則是近二十年來備受矚目的新式 BPV 設計，由於微生物固化處理的技術日趨成熟(Ng et al.,2017)，BPV 在設計上已經不須為了控制微生物的分布而使用昂貴的質子交換膜來區隔陰陽兩極，因此單槽設計能大幅降低成本並延長使用壽命。早期的單槽 BPV 雖然發電功率較雙槽式低，但在加入鐵氰化鉀或醌等具有微生物親合性的電子媒介物後已經能有效提升 BPV 發電功率(Rabaey et al., 2005; Marsili et al.,2008)，而在電極板上由於導電玻璃與奈米鉑等催化劑的採用則更進一步提升 BPV 的性能(Mccormick et al., 2011; Bombelli et al., 2011, 2012; Bradley et al., 2013; Sawa et al.,2017; Wenzel et al., 2018; Zhang et al., 2018)。雖然結合上述特點的新式單槽 BPV 能有效提升發電能力，但使用這些改進措施的同時也增加了 BPV 的生產成本，而更重要的是這些經過改良的單槽式 BPV 依然會受到太陽能光照強度變化而導致供電能力大幅波動，阻礙了 BPV 的實際應用。



圖一、生物光伏電池(Bio-photovoltaic)產電原理 (Tschörtner† et al., 2019)

## (二)單細胞藻共生菌

單細胞藻之共生菌是一群可以與單細胞藻類產生互利共生、片利共生或寄生的微生物，包含好氧菌、兼性厭氧菌與絕對厭氧菌等三大種類。其中好氧性共生菌與單細胞藻類能在氧氣與二氧化碳的循環上形成互補，某些還能提供單細胞微藻所缺乏的維他命 B 群，而其中的亞硝酸菌和硝酸菌更能將水中毒性較高的阿摩尼亞與亞硝酸氧化成硝酸 (Croft et al., 2005; Men et al., 2017; Cooper et al., 2019)，而兼性與絕對厭氧菌也常能與單細

胞藻類合作完成硫循環與部分的氮循環(Gevertz et al., 2000; Zhang et al., 2019)，這些細菌已經被運用在汙水處理上(Zarezadeh et al., 2019)。而某些藻類共生菌還能藉由分泌天然的電子介體來協助單細胞藻類將多餘電子運輸至特定位置，並可能藉此讓共生菌獲得生存競爭優勢(Ng et al., 2017; Ortiz et al., 2012; Rivas et al., 2010)。去年剛出爐的一份研究報告亦利用藍綠藻及希瓦氏菌(*Shewanella*) 對 D-lactate 的供需建構出能日夜產電的生物光伏電池，但此種流體式生物光伏電池在使用過程中必須不斷補充培養基才能使電池持續維持運作(Zhu et al., 2019)。

### 三、研究目的

由於共生菌有可能提高單細胞藻的產電能力並延長 BPV 的使用壽命。因此本研究嘗試以目前已有之小球藻共生菌為基礎，配合小球藻與相關固化培養技術建立一套不需額外添加培養基，且能於日間與夜間都有效發電的光生物發電裝置。

主要研究目的有下列三項:

- (一)建立以小球藻為主體之生物光伏電池
- (二)在 BPV 陰陽兩極搭配不同共生菌並觀察其電壓與光週期的關聯性
- (三)提高 BPV 產電功率並找出能降低電壓波動之共生菌，探討其可能原因與應用

## 貳、研究方法與過程

為達成上述三項研究目的，我們依序進行下列實驗工作。

- (一)小球藻與共生菌獲得、培養、染色鏡檢以及實驗前殺菌處理
- (二)BPV 的設計與建構
- (三)實驗組別設計
- (四)實驗結果的檢測、記錄與分析

## 1. 實驗材料

### 藻種

本研究所使用的藻種為淡水小球藻 *Chlorella vulgaris*(購自屏東大洋藻公司)。小球藻 (*Chlorella vulgaris*)是一種淡水單細胞微藻，分類屬綠藻門 (Chlorophyta)四胞藻綱(*Trebouxiophyceae*)小球藻目(*Chlorellales*)小球藻科(*Chlorellaceae*)的真核微藻。小球藻是許多水域常見且重要的初級生產者，其細胞大小約只有 2-8 微米( $\mu\text{m}$ )，其最適生長溫度約為 24-28°C，最適 pH 值約在 6-8 之間。在陽光及養分充足的條件下，小球藻可在一日之內完成細胞分裂，具快速的繁殖力和旺盛的生命力。目前小球藻也被廣泛應用於水產養殖、畜禽飼料、保健食品等相關產業。

### 細菌培養基

Lysogeny broth(LB):

Tryptone	10 g
Yeast Extract	5 g
10‰ seawater to	1.0 L

Lysogeny broth plate(LB plate):

Tryptone	10 g
Yeast Extract	5 g
Agar	12 g
10‰ seawater to	1.0 L

## 藻類培養基

f/2 Medium:

NaNO <sub>3</sub> (75.0 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O (5.0 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
f/2 Trace Metal Solution	1.0 ml
Filtered seawater to	1.0 L

f/2 Trace Metal Solution:

FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	3.15 g
Na <sub>2</sub> EDTA·2H <sub>2</sub> O	4.36 g
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O (9.8 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (6.3 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (22.0 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O (10.0 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O (180.0 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
Distilled water to	1.0 L

f/2 Agar:

NaNO <sub>3</sub> (75.0 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O (5.0 g/L dH <sub>2</sub> O)	1.0 ml
f/2 Trace Metal Solution	1.0 ml
Agar	12 g
Filtered seawater to	1.0 L

## 抗生素

氨苄青黴素(Ampicillin):為一種  $\beta$ -內醯胺類抗生素,藉由抑制細菌細胞壁的合成,破壞菌體結構達到殺菌效果。卡納黴素(kanamycin):是一種氨基糖苷類抗生素,藉由抑制細菌的蛋白質合成達到殺菌效果。

## 2. 實驗方法

### (1) 藻類培養與計數

在室溫下(25°C)以鹽度千分之十的滅菌海水所配置的 f/2 培養基,以 12 小時光照 12 小時黑暗的週期進行照光打氣培養。每 2-3 天繼代一次並使用 80 目、200 目、300 目濾網過濾雜質,由於小球藻培養時間長且須持續觀察調整繼代倍率,因此除在水生生物技術研究室進行培養外,亦在家中利用紙箱、冷氣、檯燈及養魚用電動打氣機組成小球藻培養裝置,其光照強度、光週期、培養基、打氣量與溫度皆與研究室中藻類培養箱相同。藻濃度則以血球計數盤進行計算。

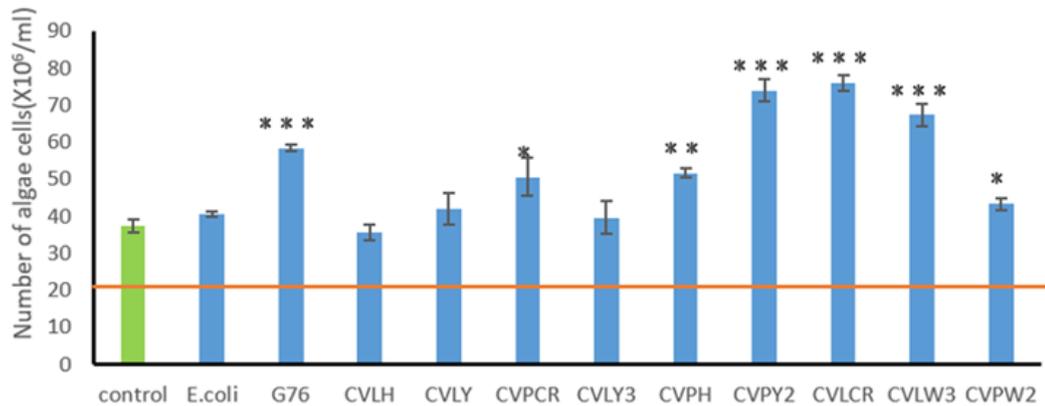


圖二、家中小球藻培養裝置

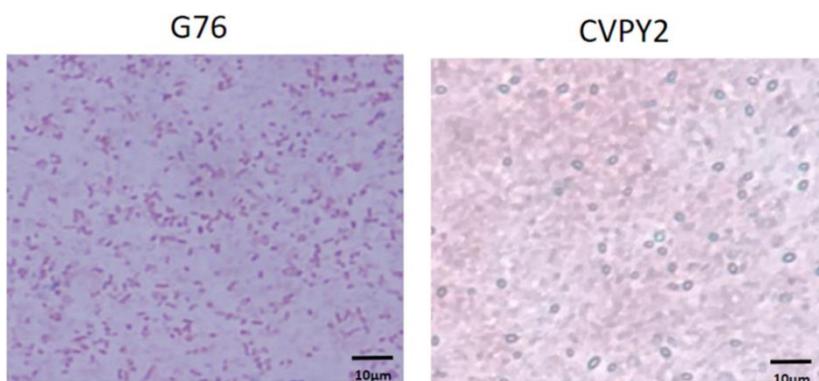
### (2) 菌種挑選、培養與染色鏡檢藻類培養與計數

本研究所使用的共生菌是之前由培養四週以上之小球藻培養液中獲得,利用四區畫線的方式塗抹在 LB plate 上,在 28°C 下培養 24 小時後,從盤上挑選外

觀有明顯差異的單一菌落做純化培養。將各菌株純化培養後分別塗抹在含有小球藻的 f/2 Agar plate 上進行篩選，並以液態共培養方式觀察小球藻的生長速率(圖三，前人所著)，篩選出能促進小球藻生長的菌種並進行革蘭氏染色與鏡檢(圖四，前人所著)。本研究即以此為基礎，將其中兩種小球藻共生菌 (CVPY2, G76)以 LB plate 培養 16 小時後放入生物光伏電池進行電壓偵測與紀錄。



圖三、共生菌對小球藻成長速率之影響(前人所著)。從左到右分別是沒有加菌的控制組 (control 綠色)、作為對照組的大腸桿菌:E.coli、十株篩選自藻培養液的共生菌：G76、CVLH、CVLY、CVPCR、CVLY3、CVPH、CVPY2、CVLCR、CVLW3，以及 CVPW2。橘線為實驗起始之藻濃度( $2 \times 10^7$  cells/ml)。數據分析:P 值 $>0.05$  視為與 control 無顯著差異， $0.05 > P$  值 $>0.01$  視為與 control 有顯著差異(\*)， $0.01 > P$  值 $>0.001$  視為與 control 有更顯著差異(\*\*)， $0.001 > P$  值視為與 control 有極顯著差異 (\*\*\*)。

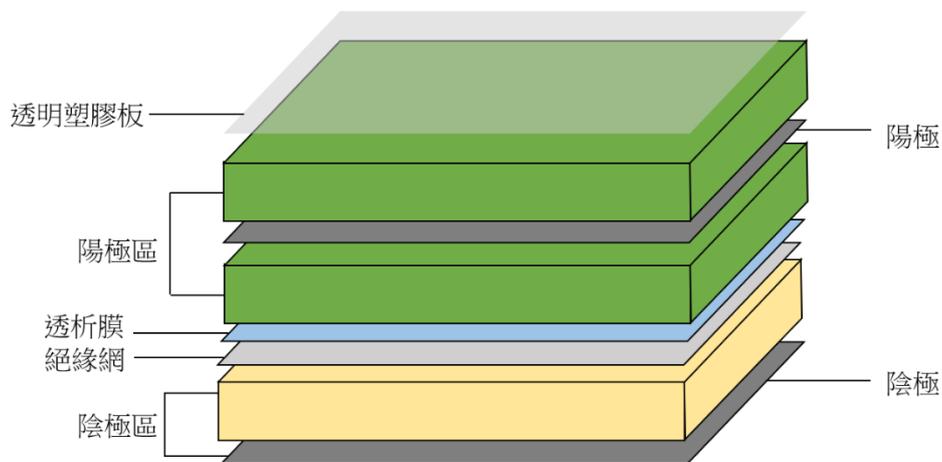


圖四、G76 與 CVPY2 革蘭氏染色(前人所著)。

### (3) 抗生素預處理

為了避免小球藻培養環境中已有的環境微生物影響實驗，實驗開始前先對小球藻經過抗生素預處理，在藻水中加入兩種抗生素(Ampicillin 100 $\mu$ g/ml; kanamycin 50 $\mu$ g/ml)並靜置 24 小時後，以離心機 3000rpm 離心 35 分鐘後去除上清液，加入已滅菌的 f/2 Medium 混勻，再次離心。清洗掉抗生素後再進行後續實驗。

### (4) 生物光伏裝置(BPV)設計與組裝



圖五、BPV 裝置圖

上圖(圖五)為本研究所設計的 BPV 裝置圖。陰極、陽極皆為面積  $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$  的 SUS 304 不鏽鋼網電極板，孔徑為 100 目。絕緣網是尼龍製的 80 目濾網，位於陰極區上方，目的是為了防止陰陽極電極板接觸造成短路。其上方為透析膜，蛋白截留分子量為 14000kD，目的在於避免藻類與共生菌擴散至別的電極而影響實驗結果。陰極區由 15 ml 的 f/2 Agar、小球藻、共生菌與電極板組成。陽極區成分同樣為 15 ml 的 f/2 Agar、小球藻及特定共生菌與電極板組成，其中小球藻濃度為  $1 \times 10^7 \text{ cells/ml}$ ，共生菌數量為 0.5 ml  $\text{OD}_{600}=1$  的菌液。最外側以透明膠片覆蓋，並以環氧樹脂密封(圖六)。



圖六、BPV 實作照片

### (5) 實驗組別設計

組別	陰極	陽極	設計目的
X-X	A	A	對照組。
X-C	A	A+C	小球藻放置於陽極是否能使裝置產電。
X-V	A	A+V	CVPY2 放置於陽極對裝置電壓的影響。
V-X	A+V	A	CVPY2 放置於陰極對裝置電壓的影響。
V-C	A+V	A+C	陽極有小球藻時，陰極置放 CVPY2 對裝置電壓的影響。
X-CV	A	A+C+V	陽極有小球藻與 CVPY2 共培養時對裝置電壓的影響。
G-CV	A+G	A+C+V	陽極有小球藻與 CVPY2 共培養時，陰極加入 G76 對裝置電壓的影響。
X-CG	A	A+C+G	陽極有小球藻與 G76 共培養時對裝置電壓的影響。

表一、實驗組別設計。A:f/2 Agar。C:小球藻。V:共生菌 CVPY2。G:共生菌 G76。

## (6) 電壓量測與分析

將各組電池置於光照強度 677 lux，攝氏溫度 27 度，光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗的環境下進行電壓量測，各電池分別與十通道微電壓量測儀(圖七)以夾式接頭連接，並透過 USB 介面與電腦連接記錄數據(圖八)。每一小時採樣一次，所得數據以 Excel 製作成折線圖分析。另外亦運用具有記憶功能之商用電錶 PROVA 803 digital multi-meter 與 16 路時控繼電器模組進行分項逐時記錄(圖九)。兩種電壓紀錄可交互比對確認。



圖七、十通道微電壓量測儀



圖八、十通道微電壓量測儀運作狀況



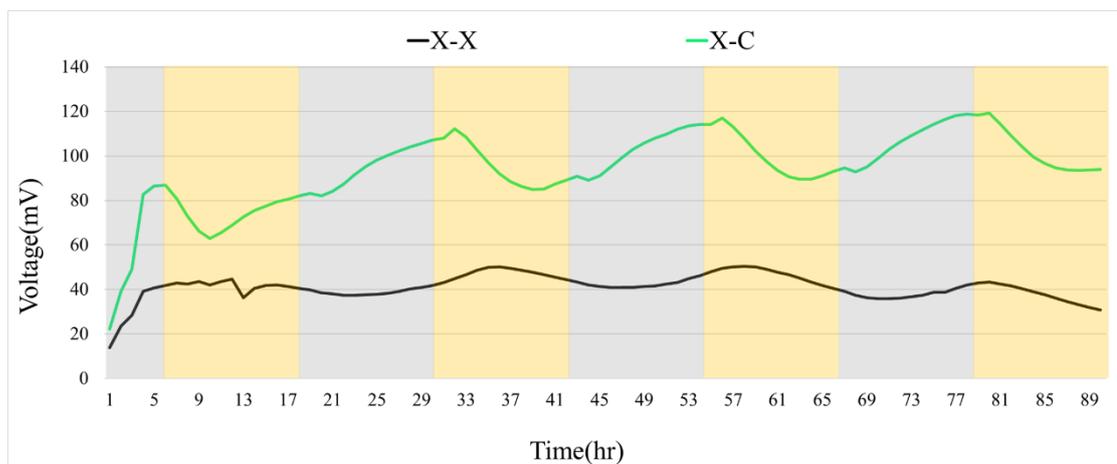
圖九、PROVA 803 digital multi-meter 與 16 路時控繼電器模組運作狀況

## 參、研究結果與討論

### 一、小球藻是否能在固態 BPV 中產生電壓

#### (一)結果

為確認所設計的固態 BPV 是否能產生電壓，我們首先建立一個陰陽兩極皆無接種微生物的控制組，並將其命名為 X-X。X-C 則是在陽極接種濃度  $1 \times 10^7$  cells/ml 小球藻，陰極未接種細菌的實驗組。光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗。實驗結果如下圖(圖十)。

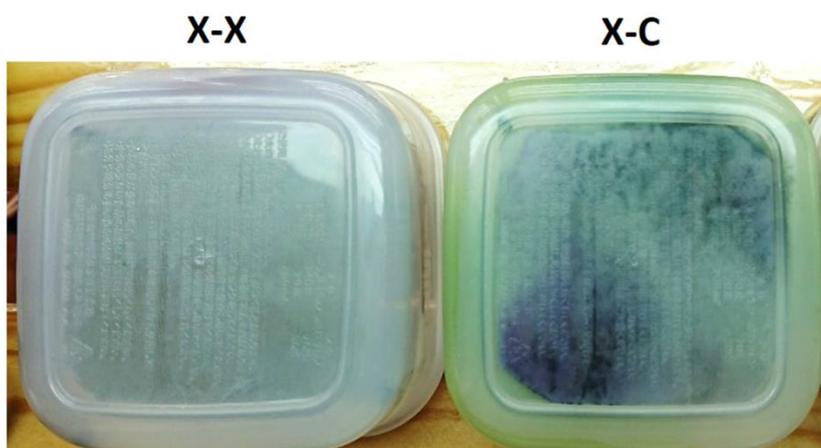


圖十、固態 BPV 之電壓偵測紀錄。X-X: 陰陽兩極區皆未接種細菌與小球藻。X-C: 陰極無接種細菌，陽極有小球藻。

圖中黃底部分為光照時間，灰底部分為黑暗時間。X-C 組在測試一開始的電壓即由 20 mV 迅速上升，在 5 小時內達到 89 mV，第 32 小時達到 112.3 mV。開始測試大約 24 小時後，X-C 的電壓曲線開始產生與光週期吻合的規律波動，在第 80 小時達到最高電壓 119.3 mV，最低電壓為 85 mV(第 39 小時)，電壓高峰平均值為  $116.23 \pm 2.92$  mV，電壓谷底平均值為  $87.96 \pm 4.48$  mV。而作為對照組的 X-X 的最高電壓皆未超過 55 mV，24 小時後其電壓開始規律上下波動，但每個週期的最高電壓都不斷下降，X-X 大約在一週內電壓即下降至 10 mV 以下。由結果可看出在所有時間點 X-C 電壓值皆比 X-X 組高，在第 76 小時兩者電壓差距達到最大值 77.7 mV，電壓差距最小值為 37.2 mV(第 39 小時)。此一結果顯示本次實驗使用的固態 BPV 裝置的確能讓小球藻產生電壓，且其電壓曲線隨著光週期會有規律性變化。而在第三天我們發現陰極區開始有紫黑色菌落生長(圖十一)。

## (二)討論

X-C 在黑暗時間內電壓會先小幅度下降而後穩定上升，其原因可能是光照停止後小球藻產生電子的效率下降所導致，而進入黑暗時間後半段電壓上升的原因則可以由 X-C 陰極區發現紫黑色菌落來解釋(圖十一)，這些紫黑色菌落是在 X-C 運作約三天之後被肉眼觀察到的，我們推測這些存在於陰極區的紫黑色菌落可能是由小球藻帶進 BPV 的某些還原性厭氧菌。在黑暗時間，X-C 組因陽極區小球藻光反應停止使陰極逐漸形成缺氧環境，陰極區的還原性厭氧菌開始吸收電子進行還原反應，所以 X-C 組電壓會隨著黑暗來臨而逐漸提升。而當進入光照階段的早期，陽極小球藻光反應所產生的氧氣濃度尚低，陰極區的缺氧環境尚未被破壞具有還原力，此時陽極區小球藻因光反應所產生的電子推力與陰極區的還原力合作，使電壓大幅上升。但隨著光照時間延長，過量的氧氣進入陰極區破壞缺氧環境，使得陰極的還原反應被抑制，電壓也因此下降。

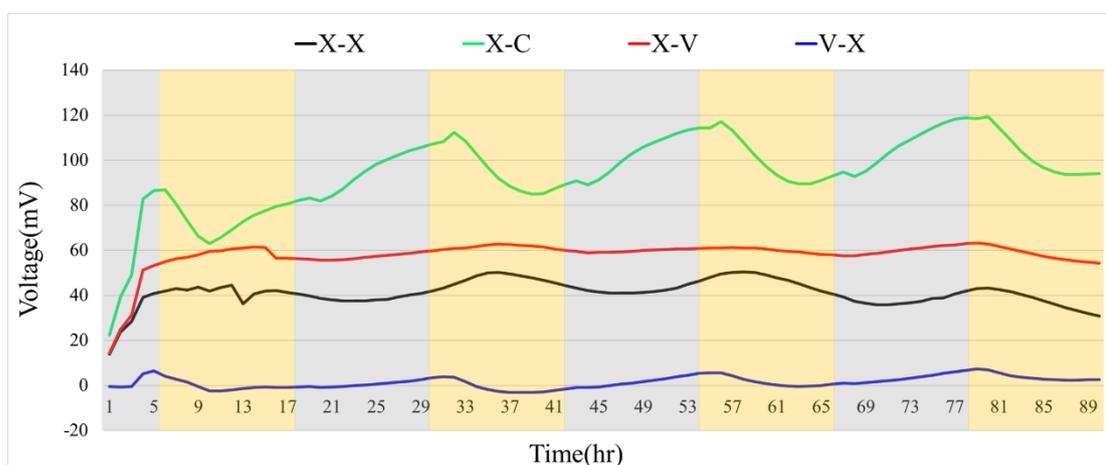


圖十一、不含藻之控制組(X-X)與在陽極區接種小球藻之實驗組(X-C)培養一個月後的底部(陰極)照片。

## 二、共生菌 CVPY2 是否能在 BPV 獨立產生電壓

### (一)結果

為了瞭解共生菌 CVPY2(V)是否能在 BPV 裝置中獨立產生電壓，我們將 CVPY2 分別放置於陰極(V-X)和陽極(X-V)組成兩種 BPV 構型，每個電池接種菌量皆為 0.5ml OD<sub>600</sub>=1 的菌液。X-C 為控制組，其陽極含有濃度  $1 \times 10^7$  cells/ml 的小球藻。X-X 則為陰陽兩極無藻也無菌的對照組。光週期同樣為 12 小時光照 12 小時黑暗。實驗結果如下圖(圖十二)。



圖十二、共生菌 CVPY2 是否能在 BPV 中獨立產生電壓。X-X: 陰陽兩極區皆未接種細菌與小球藻。X-C: 陰極無接種細菌，陽極有小球藻。V-X: 陰極有 CVPY2。X-V: 陽極有 CVPY2。

圖中黃底部分為光照時間，灰底部分為黑暗時間。在開始測試 24 小時後，X-V 組在第 79 小時達到最高電壓 63.2 mV，最低電壓達 54.3 mV(第 90 小時)，電壓高峰平均值為  $62.37 \pm 0.85$  mV，電壓谷底平均值為  $55.97 \pm 1.48$  mV。V-X 組同樣在第 79 小時達到最高電壓，但電壓值僅為 7.3mV，最低電壓則為 -3.2 mV(第 39 小時)。電壓高峰平均值為  $5.63 \pm 1.39$  mV，電壓谷底平均值為  $-1.1 \pm 1.68$  mV。X-C 與 X-X 組電壓結果與圖八相同。由結果可看出 X-V 組的電壓值始終是高於 V-X 組的，電壓差距最大值為 65.5 mV(第 37 小時)，電壓差距最小值為 51.7 mV(第 90 小時)，X-V 組的電壓較高且穩定，約維持在 60 mV，而 V-X 組的電壓值極低，有時電壓還會出現負值。由本次實驗結果可知，與無菌無藻的 X-X 相比，在陽極單獨使用共生菌 CVPY2 能使 BPV 電壓小幅提高，若將 CVPY2 置於陰極則會反向降低 BPV 的電壓。

## (二)討論

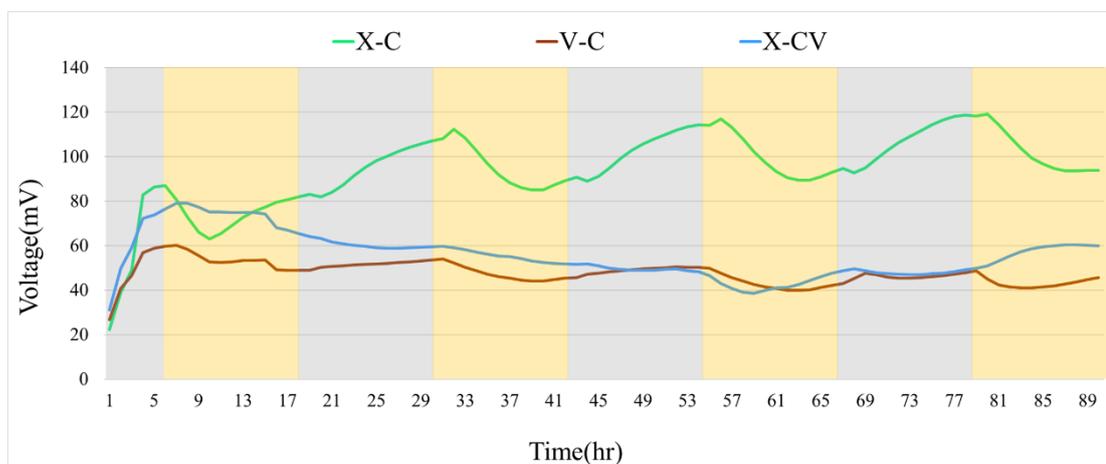
我們推測 CVPY2 可能為兼性厭氧菌，因為 X-V 組電池中並無小球藻可行光合作用，因此不論光照與否，X-V 組電池內部應為缺氧環境，CVPY2 中的呼吸酵素將其電子帶離至細胞體外，由於 CVPY2 被置放於陽極，放出電子的傾向使其裝置電壓較高。而 V-X 組的 CVPY2 被置放於陰極，在同樣缺氧的環境下，其釋放電子的傾向會使陰極的還原力減弱，而造成裝置電壓較低。而 V-X 雖然電壓偏低，但其電壓隨光週期而變動，在黑暗時間內上升，在光照時間內下降，我們推測這可能是溫度所造成的影響，因為 CVPY2 生長在室溫環境，光照時間內電池整體溫度上升約達 30°C，這可能影響到 CVPY2 釋放電子的能力。

## 三、共生菌 CVPY2 對小球藻固態 BPV 之影響

### (一)結果

為了瞭解 CVPY2 對小球藻 BPV 的作用，我們將 CVPY2 分別放置於陰極和陽極，並將小球藻置於陽極，構成陰極有 CVPY2，陽極有小球藻的 V-C 組別，以及陰極無藻無菌，陽極有小球藻及 CVPY2 的 X-CV 組別。X-C 為陽極含小球藻的 X-C 組。小球

藻濃度皆為  $1 \times 10^7$  cells/ml，CVPY2 菌量皆為 0.5ml OD<sub>600</sub>=1 的菌液。光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗。實驗結果如下圖(圖十三)。



圖十三、共生菌 CVPY2 對小球藻固態 BPV 之影響。X-C: 陰極無接種細菌，陽極有小球藻。V-C: 陰極有 CVPY2，陽極有小球藻。X-CV: 陰極無菌，陽極有小球藻與 CVPY2。

圖中黃底部分為光照時間，灰底部分為黑暗時間。在開始測試 24 小時後，X-CV 組在第 88 小時達到最高電壓 60.5 mV，最低電壓為 38.7 mV(第 59 小時)，電壓高峰平均值為  $59.33 \pm 5.65$  mV，電壓谷底平均值為  $45.9 \pm 5.46$  mV。V-C 組在第 31 小時達到最高電壓 54.1 mV，最低電壓為 39.9 mV(第 63 小時)，電壓高峰平均值為  $51.13 \pm 2.24$  mV，電壓谷底平均值為  $41.73 \pm 1.76$  mV。X-C 組在第 80 小時達到最高電壓 119.3 mV，最低電壓為 85 mV(第 39 小時)，電壓高峰平均值為  $116.23 \pm 2.92$  mV，電壓谷底平均值為  $87.96 \pm 4.48$  mV。由結果可得知多數時間 X-CV 組的電壓數值是高於 V-C 組的。在陽極有小球藻的情況下，CVPY2 無論置於陰極或陽極都會導致電壓下降，且 V-C 組電壓還會隨光照週期產生規律性變化。在光照時間內電壓緩慢下降，在黑暗時間內電壓則緩慢上升，將 V-C 組的電壓曲線與 X-C 比較，我們可以發現兩者隨光照週期會產生相同的電壓走勢變化，皆是在光照時間內電壓下降，黑暗時間內電壓上升，只是 X-C 組的電壓變化幅度較大，變化較為明顯。而 X-CV 組的電壓則沒有特殊的規律性，電壓不受光週期影響。

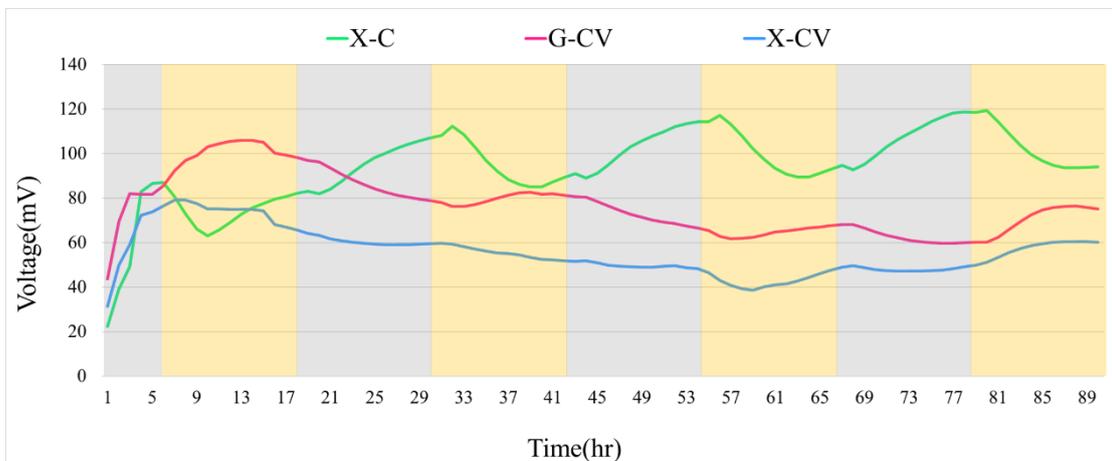
## (二)討論

由上圖(圖十三)的實驗結果能發現不管是在陰極或是陽極加入 CVPY2 的組別電壓都比 X-C 低。推測其電壓下降原因同樣為 CVPY2 會在缺氧環境進行厭氧呼吸釋出電子，再加上 V-C 組中小球藻數量因不明原因減少導致 BPV 氧氣量不足，使陰極區形成缺氧環境，造成 CVPY2 在陰極釋出電子而進一步降低陰極區的還原力，因此使 V-C 組的電壓低於 X-C 組。而在 X-CV 組的陽極區中 CVPY2 由於較為靠近小球藻，在光照期間會受到較多氧氣的影響而抑制了 CVPY2 釋放電子的能力，因此使整個裝置的電壓更為降低。因此我們推測共生菌 CVPY2 可能是一種能夠進行厭氧呼吸的兼性厭氧菌。

## 四、共生菌 G76 置於陰極對 BPV 裝置的影響

### (一)結果

為了瞭解將共生菌 G76 置於陰極對小球藻 BPV 裝置的電壓影響，並探討雙重共生菌(CVPY2 及 G76)對小球藻 BPV 裝置所造成的電壓變化，我們將共生菌 G76 放置於陰極，構成陰極有 G76，陽極有小球藻及 CVPY2 的 G-CV 組別。X-CV 組為陽極有小球藻及 CVPY2 之組別。X-C 為對照組。所有組別之小球藻濃度皆為  $1 \times 10^7$  cells/ml，G76 與 CVPY2 菌量皆為 0.5ml OD<sub>600</sub>=1 的菌液。實驗光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗。實驗結果如下圖(圖十四)。



圖十四、共生菌 G76 置於陰極對 BPV 裝置的影響。X-C: 陰極無接種細菌，陽極有小球藻。G-CV: 陰極有 G76，陽極有小球藻與 CVPY2。X-CV: 陰極無接種

細菌，陽極有小球藻與 CVPY2。

圖中黃底部分為光照時間，灰底部分為黑暗時間。在開始測試 24 小時後，G-CV 組在第 25 小時達到最高電壓 84.2 mV，最低電壓為 59.7 mV(第 76 小時)，電壓高峰平均值為  $85.1 \pm 9.49$  mV，電壓谷底平均值為  $65.87 \pm 7.35$  mV。X-CV 組在第 88 小時達到最高電壓 60.5 mV，最低電壓為 38.7 mV(第 59 小時)，電壓高峰平均值為  $59.33 \pm 5.65$  mV，電壓谷底平均值為  $45.9 \pm 5.46$  mV。X-C 組在第 80 小時達到最高電壓 119.3 mV，最低電壓為 85 mV(第 39 小時)，電壓高峰平均值為  $116.23 \pm 2.92$  mV，電壓谷底平均值為  $87.96 \pm 4.48$  mV。由上圖(圖十四)可看出，在開始測試 24 小時後，陰極有加入 G76 的 G-CV 組電壓均比陰極無菌的 X-CV 組高，兩組電壓差距最大值為 29.8 mV(第 42 小時)，電壓差距最小值為 9 mV(第 80、81 小時)。在陽極有小球藻及 CVPY2 共培養的情況下，若再將 G76 放置於陰極，可提升裝置電壓。由上圖也可發現 G-CV 組的電壓會隨光照週期而產生規律性變化，G-CV 組的電壓在黑暗時間內多有下降的趨勢，但在每一次進入光照時間 2~3 小時後，電壓會緩慢爬升，直到再次進入黑暗時間。G-CV 組的電壓走勢與 X-C 組恰好相反。X-CV 組的電壓和光照週期的變化則無明顯關聯性。

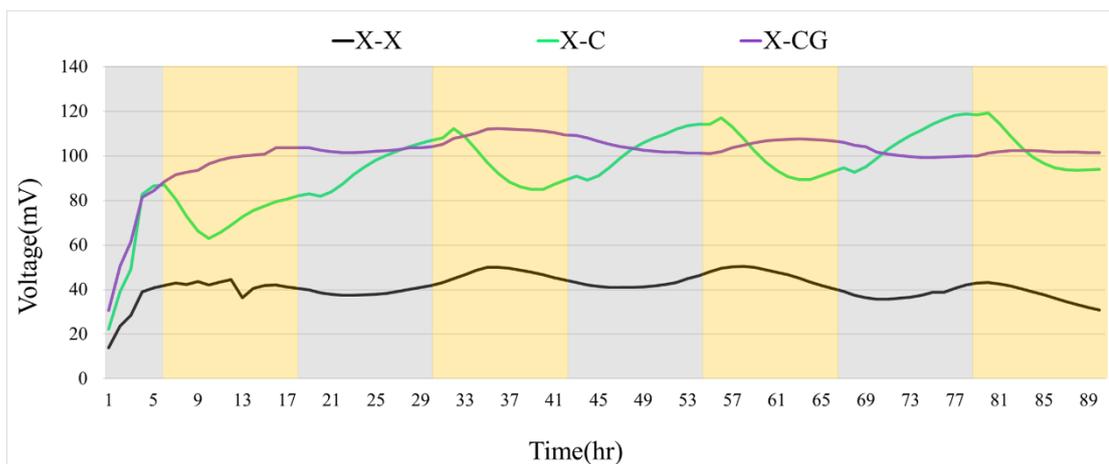
## (二)討論

以 X-CV 組為對照組探討在陰極加入 G76 對裝置電壓的影響，可發現 G-CV 組的電壓均比 X-CV 組高，我們推測在 CVPY2 存在的情況下，G76 可加速陰極還原反應，使氫離子、電子與氧氣還原成水分子的效率提升，使 G-CV 的電壓提升。而 G-CV 電壓在光照時間提升在黑暗時間下降的原因，則是因光照時間內光反應持續進行，氧氣濃度提高並擴散至陰極，使陰極區還原反應效率提高導致裝置電壓提升。而黑暗時間氧氣量減少使得陰極區還原效率下降而降低了 G-CV 組的電壓。

## 五、將 G76 置於陽極對小球藻固態 BPV 之影響

### (一)結果

為了瞭解將共生菌 G76 置於陽極對小球藻固態 BPV 之影響，我們將 G76 與小球藻同時置於陽極構成 X-CG 組。X-C 為對照組。小球藻濃度皆為  $1 \times 10^7$  cells/ml，G76 菌量為 0.5ml OD<sub>600</sub>=1 的菌液。光照週期為 12 小時光照 12 小時黑暗，實驗結果如下圖(圖十五)。



圖十五、將 G76 置於陽極對小球藻固態 BPV 之影響。X-X: 陰陽極皆未接種藻菌。X-C: 陰極無接種細菌，陽極有小球藻。X-CG: 陰極無藻無菌，陽極有小球藻與 G76。

圖中黃底部分為光照時間，灰底部分為黑暗時間。在開始測試 24 小時後，X-CG 組在第 36 小時達最高電壓 112.2 mV，最低電壓為 99.4 mV(第 74、75 小時)。由上圖(圖十五)資料進行統計分析後，可以得知在第 18 小時後的三個光週期內，X-CG 的電壓高峰平均值為  $109.23 \pm 2.45$  mV，電壓谷底平均值為  $100.63 \pm 0.9$  mV，電壓波動幅度 8.6 mV。而同一時期的控制組 X-C 其電壓高峰平均值為  $116.23 \pm 2.92$  mV，電壓谷底平均值為  $87.96 \pm 4.48$  mV，電壓波動幅度 28.27 mV。兩者相比可以發現在陽極添加 G76 會使小球藻 BPV 的電壓高峰下降 6.02%，但可提高電壓谷底電壓 14.4%，同時可使電壓波動幅度縮小 69.58%。而且目前 X-CG 已運轉超過 1032 小時(第 42 光週期)，電壓高峰仍高達 95.2mV，其衰減幅度僅為 19.35%。同時期控制組 X-C 電壓高峰卻已下降至 61.1mV，其衰減幅度高達 90.22%。

電壓波動幅度計算方式如下：

電壓高峰平均值-電壓谷底平均值

電壓衰減幅度計算方式如下：

$$\frac{\text{前三個光週期的電壓高峰平均值} - \text{第42光週期的電壓高峰}}{\text{前三個光週期的電壓高峰平均值}} \times 100\%$$

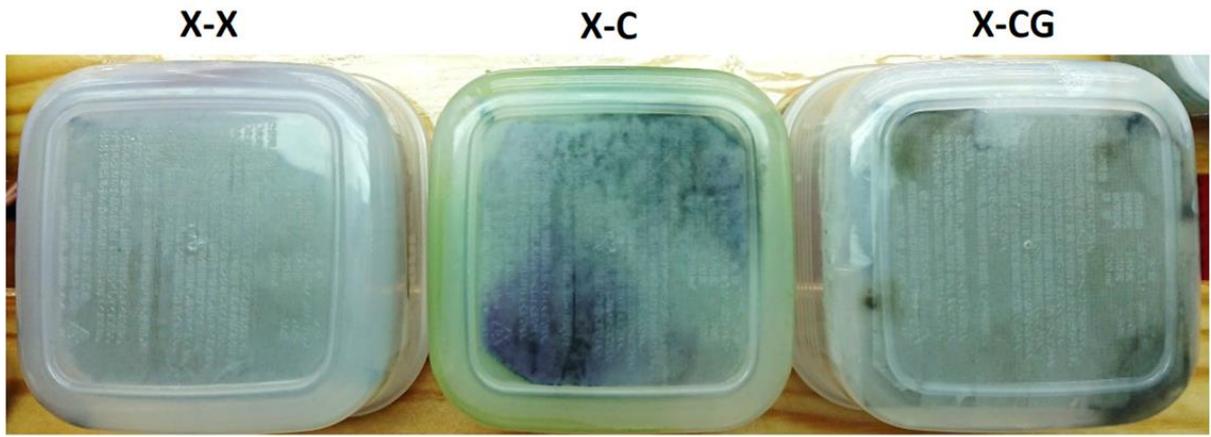
## (二)討論

比較 X-CG 組和 X-C 組的電壓曲線可以發現，X-CG 組電壓高於 X-C 組的時間佔了 66%，且 X-CG 組的平均電壓波動幅度(8.6 mV)僅有 X-C 組(28.27 mV)的 30.42%，而在 42 個光週期的時間內，X-CG 組的電壓衰減幅度(19.35%)亦僅有 X-C 組電壓衰減幅度(90.22%)的 21.44 %。上述結果證明小球藻 BPV 在陽極加入共生菌 G76 可明顯提升電池穩定性與壽命，但由於 X-CG 組和 X-C 組的陰極區都有其他深色菌落產生(圖十六)，因此上述電池性能的提升可能不僅是 G76 造成的影響。

我們推測 G76 可能為耗氧性細菌，X-C 組與 X-CG 組陰極區的菌落可能是一群在缺氧環境下可吸收電子進行還原反應的微生物。在光照時間，X-CG 組因 G76 的存在使其擴散至陰極的氧氣量較 X-C 組少，導致陰極區中氫離子與氧氣還原成水的反應速率下降，所以 X-CG 組的最高電壓會比 X-C 組低。

黑暗期間 X-CG 組陰極區的氧氣將更為減少，使得 X-CG 組陰極區中能吸收電子進行還原反應的微生物代謝速率加快，因此 X-CG 組在黑暗期間的電壓不至於因陽極區光反應停止而快速下降，所以 X-CG 組的電壓波動幅較 X-C 組小。

而 G76 因為能行有氧呼吸，可與小球藻的光合作用互補，因此 X-CG 組的小球藻生長較佳，發電持續時間也較 X-C 組大幅延長。

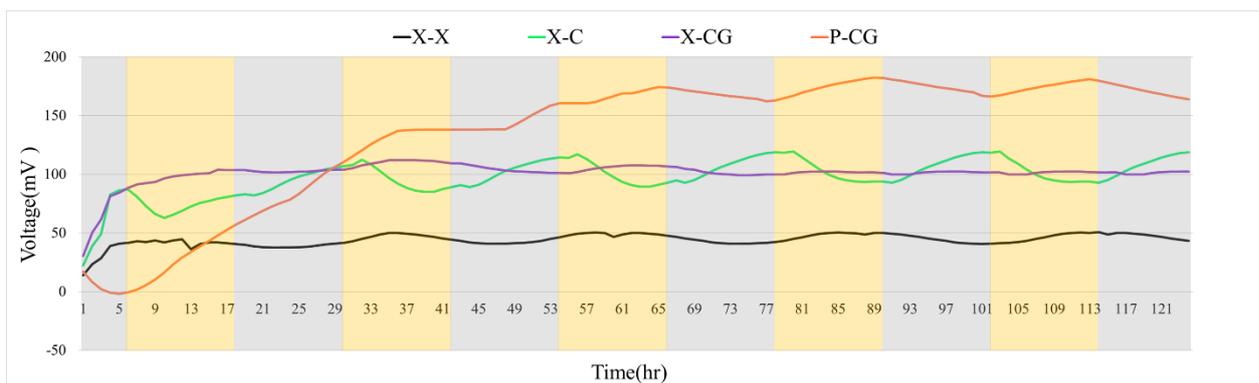


圖十六、不含藻之控制組(X-X)、陽極接種小球藻的(X-C)以及在陽極區接種小球藻與 G76 之實驗組(X-CG)於光照培養箱運作一個月後的底部(陰極)照片。

## 六、將共生菌 G76 置於陽極且陰極加入 PB1 對小球藻固態 BPV 的影響

### (一)結果

為了進一步瞭解 X-C 組及 X-CG 組中陰極區的紫黑色菌落對小球藻 BPV 裝置的影響，我們將其純化培養並命名為 PB1(圖)，放入小球藻 BPV 中進行電壓測試。我們將 PB1 置於陰極，構成陰極有 PB1，陽極有小球藻及 G76 的 P-CG 組別。X-CG 為陽極有小球藻及 G76 之組別。X-C 為對照組。X-X 為控制組。所有組別之小球藻濃度皆為  $1 \times 10^7$  cells/ml，G76 與 PB1 菌量皆為 0.5ml OD<sub>600</sub>=1 的菌液。實驗光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗。實驗結果如下圖(圖十七)。



圖十七、將 G76 置於陽極且陰極加入 PB1 對小球藻固態 BPV 之影響。

X-X: 陰陽極皆未接種藻菌。X-C: 陰極無接種細菌，陽極有小球藻。X-CG: 陰極無藻無菌，陽極有小球藻與 G76。P-CG: 陰極有 PB1，陽極有小球藻與 G76。

圖中黃底部分為光照時間，灰底部分為黑暗時間。在開始測試 24 小時後，P-CG 組在第 89 小時達到最高電壓 182.6 mV，最低電壓為 83.5 mV(第 25 小時)，電壓高峰平均值為  $179.3 \pm 3.66$  mV，電壓谷底平均值為  $162.37 \pm 1.38$  mV，電壓波動幅度 16.93 mV。X-CG 組在第 36 小時達最高電壓 112.2 mV，最低電壓為 99.4 mV(第 74、75 小時)，電壓高峰平均值為  $109.23 \pm 2.45$  mV，電壓谷底平均值為  $100.63 \pm 0.9$  mV，電壓波動幅度 8.6 mV。X-C 組在第 80 小時達到最高電壓 119.3 mV，最低電壓為 85 mV(第 39 小時)，電壓高峰平均值為  $116.23 \pm 2.92$  mV，電壓谷底平均值為  $87.96 \pm 4.48$  mV，電壓波動幅度 28.27 mV。由結果可得知在陽極有小球藻及 G76 的情況下，陰極加入 PB1 可提升裝置電壓。P-CG 組與 X-CG 組的電壓差距最大值為 81.1 mV(第 89、91 小時)，電壓差距最小值為 56.7 mV(第 58 小時)。與 X-CG 相比，P-CG 可在光照時間內提高電壓高峰 64.15%，並在黑暗時間內提高谷底電壓 61.35%。與 X-C 相比，P-CG 可提高電壓高峰 54.26%，並提高谷底電壓 84.6%，P-CG 也能降低電壓波動 40.11%。

P-CG 組的電壓也會隨光照週期產生規律性變化。在光照時間內電壓上升，在黑暗時間內電壓下降，其電壓波動趨勢與 X-CG 一致。

即使在黑暗時間，X-CG 組仍然能保持光照時間電壓的 92.13%，而 P-CG 仍能保持光照時間電壓的 90.56%。

## (二)討論

為了探討並驗證在 X-C 組及 X-CG 組陰極區紫黑色微生物 (PB1) 的假設，我們將 PB1 置於陰極，構成 P-CG 組，與 X-C 組及 X-CG 組進行電壓測試比較。我們發現陰極加入 PB1 後可大幅提升複合型 BPV 的電壓，我們更加推測 PB1 為一種還原性兼性厭氧菌。在 P-CG 組中，由於有 G76 的存在，使一部份固定量的氧氣被 G76 消耗掉，而我們推測這可以使陰極區的氧氣量不至於抑制 PB1 的還原反應，因此不論是在光照時間或黑暗時間，G76 均可維持運作吸收電子行還原反應。在光照時間內，位於陽極的小球藻釋放電子的推力使電壓上升，而光照後期擴散至陰極的氧氣也可吸收電子提高電壓，但此氧氣量因部分受 G76 的消耗而不影響 G76 的運作，使光照

時間內，P-CG 的電壓上升。在黑暗時間內，雖然少了陽極小球藻光反應的電子推力，而使電壓下降，但因為陰極的 PB1 可以持續行還原反應，電壓因而不會劇烈下滑。

## 肆、結論與應用

### 一、結論

- (一)共生菌 G76 能大幅降低小球藻 BPV 的電壓波動幅度且延長發電時間。
- (二)在陰極加入 PB1 能顯著提升複合型小球藻 BPV 的電壓。
- (三)即使在夜間，X-CG 組仍然能保持日間電壓的 92.13%，而 P-CG 仍能保持日間電壓的 90.56%。
- (四)X-CG 目前已運轉超過 1032 小時，其電壓高峰還能維持在 95.2mV，總衰減幅度僅為 19.35%，可延長 BPV 發電時間。
- (五)我們建構出此低成本，穩定度高且能自我維持的複合型 BPV，且其在運作過程中不須補充新鮮培養基。

### 二、進行中研究

- (一)篩選、分離在 X-CG 陰極中可提高 BPV 發電能力的微生物
- (二)製作厚度不同的電池，測試不同裝置構型對小球藻 BPV 輸出電壓的影響。

### 三、應用

由本研究結果可得知，共生菌 G76 能使小球藻 BPV 成為一個供電能力穩定，且使用壽命長的太陽能光電轉換裝置。不但有機會解決矽晶光電板生產過程的環保問題，還能在光照強度波動時持續穩定供電。此種含有 G76 的創新 BPV 即使在夜間仍能保有日間電壓的 82.1%，此一特質將使太陽能光電轉換不再需要為了短暫的光照波動去搭配昂貴的儲能系統，也不需要為了克服夜間缺電的問題而興建更多的備用電廠。

穩定度高、夜間能發電且不需添加額外培養基為此種複合型固態 BPV 的三大優勢。此種低成本複合型生物光電轉換裝置若能進一步提高發電功率，未來將能以此建構一套不須儲電系統且不需要添加額外培養基的生物太陽能發電裝置。

## 伍、參考文獻

葉奕廷(2019)。利用藻類沉積物中的共生體採收擬球藻。天主教輔仁大學生命科學研究所碩士論文，新北市。

蔡語(2019)。利用共生菌提升生物光伏電池產電效率。天主教輔仁大學生命科學研究所碩士論文，新北市。

Barbaro S., Cannata G., Coppolino S. and Sinagra L. C. E. (1981) **Correlation between relative sunshine and state of the sky.** *Solar Energy.*,26, 537–550.

Bombelli P., Bradley R.W., Scott A.M., Philips A. J., McCormick A. J., Cruz S.M., Anderson A., Yunus K., Bendall D.S., Cameron P. J., Davies J.M., Smith A.G. , Howe C. J. and Fisher A.C. (2011) **Quantitative analysis of the factors limiting solar power transduction by *Synechocystis sp.* PCC 6803 in biological photovoltaic devices.** *Energy Environ. Sci.*,4 , 4690.

Bradley R. W., Bombelli P., Rowden S. J. and Howe C. J. (2012) **Biological photovoltaics: intra- and extra-cellular electron transport by cyanobacteria.** *Biochem Soc Trans.*, 40(6), 1302-1307

Carrillo A.J, González A. J., Romero M. and Coronado J.M. (2019) **Solar Energy on Demand: A Review on High Temperature Thermochemical Heat Storage Systems and Materials.** *hem Rev.*, 119 (7), 4777-4816.

Cooper M. B., Kazamia E., Helliwell K. E., Kudahl U. J., Sayer A., Wheeler G. L. and Smith A. G. (2019) **Cross-exchange of B-vitamins underpins a mutualistic interaction between *Ostreococcus tauri* and *Dinoroseobacter shibae***. *ISME J.*, 13(2), 334-345.

Croft M.T., Lawrence A.D., Raux-Deery E., Warren M.J. and Smith A.G. (2005) **Algae acquire vitamin B12 through a symbiotic relationship with bacteria**. *Nature*, 438, 90–93.

Gevertz D., Telang A. J., Voordouw G. and Jenneman G.E. (2000) **Isolation and characterization of strains CVO and FWKO B, two novel nitrate-reducing, sulfide-oxidizing bacteria isolated from oil field brine**. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66(6), 2491-501.

Gorby Y.A., Yanina S., McLean J. S., Rosso K. M., Moyles D., Dohnalkova A., Beveridge T. J., Chang I. S., Kim B. H., Kim K. S., Culley D. E., Reed S. B., Romine M. F., Saffarini D. A., Hill E. A., Shi L., Elias D. A., Kennedy D. W., Pinchuk G., Watanabe K., Ishii S., Logan B., Nealson K. H. and Fredrickson J. K. (2006) **Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms**. *PNAS*, 103 (30), 11358-11363.

Jenny T., Bin L., and Jens O. K. (2019) **Biophotovoltaics: Green Power Generation From Sunlight and Water** *Front. Microbiol.*, 10, 866.

Kadi L. S., Bombelli P., Lea-Smith D. J., Call T., Aro E. M., Müller T., Howe C. J. and Knowles T.P.J. (2018) **Enhancing power density of biophotovoltaics by decoupling storage and power delivery**. *Nature, Energy* ,3, 75–81.

Marsili E., Baron D. B., Shikhare I. D., Coursolle D., Gralnick J. A. and Bond D. R. (2008)

***Shewanella* secretes flavins that mediate extracellular electron transfer.** *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105, 3968–3973.

McCormick A. J., Bombelli P., Bradley R. W., Thorne R., Wenzel T. and Howe C. J. (2015) **Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems.** *Energy Environ. Sci.*, 8, 1092-1109.

Men Y., Achermann S., Helbling D. E., Johnson D. R. and Fenner K. (2016) **Relative contribution of ammonia oxidizing bacteria and other members of nitrifying activated sludge communities to micro pollutant biotransformation.** *Water Res.*, 109, 217-226.

Newman D. K. (2006) **Bacteria Are Beautiful.** *Engineering & Science.*, 2, 12.

Ng F. L., Phang S. M., Periasamy V., Yunus K. and Fisher A. C. (2017) **Enhancement of Power Output by using Alginate Immobilized Algae in Biophotovoltaic Devices.** *Scientific Reports.*, 7, 16237.

Ortiz-Marquez J. C., Do Nascimento M., Dublan Mde L. and Curatti L. (2012) **Association with an ammonium-excreting bacterium allows diazotrophic culture of oil-rich eukaryotic microalgae.** *Appl Environ Microbiol.*, 78, 2345–2352.

Rabaey K., Boon N., Hofte M., and Verstraete W. (2005) **Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells.** *Environ. Sci. Technol.*, 39, 3401–3408.

Rivas M.O., Vargas P. and Riquelme C. E. (2010) **Interactions of *Botryococcus braunii* cultures with bacterial biofilms.** *Microb Ecol.*, 60, 628–635.

Sawa M., Fantuzzi A., Bombelli P., Howe C. J., Hellgardt K. and Nixon P. J. (2017). **Electricity generation from digitally printed cyanobacteria.** *Nat. Commun.*,8, 1327.

Sun J., Zhang Q., Ding R., Lv H., Yan H., Yuan X. and Xu Y. (2014) **Contamination-resistant silica antireflective coating with closed ordered mesopores.** *Phys Chem Chem Phys.*,16(31):16684-16693.

Tanaka K., Tamamushi R. and Ogawa T. (1985) **Bioelectrochemical fuel-cells operated by the cyanobacterium, *Anabaena variabilis*.** *J. Chem. Technol. Biotechnol. Ser. B Biotechnol.*,35, 191–197.

Tanaka K., Kashiwagi N. and Ogawa T. (1988) **Effects of light on the electrical output of bioelectrochemical fuel-cells containing *Anabaena variabilis* M-2: mechanism of the post-illumination burst.** *J. Chem. Technol. Biotechnol.*,42, 235–240.

Vijayakumar M., Adduru J., Rao T.N. and Karthik M. (2018) **Conversion of Solar Energy into Electrical Energy Storage: Supercapacitor as an Ultrafast Energy-Storage Device Made from Biodegradable Agar-Agar as a Novel and Low-Cost Carbon Precursor.** *Glob Chall.*, 2(10), 1800037.

Wenzel T., Härtter D., Bombelli P., Howe C. J., and Steiner U. (2018) **Porous translucent electrodes enhance current generation from photosynthetic biofilms.** *Nat. Commun.*, 9, 1299.

Yagishita T., Horigome T. and Tanaka K. (1993). **Effects of light, CO<sub>2</sub> and inhibitors on the current output of biofuel cells containing the photosynthetic organism *Synechococcus* sp.** *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 56, 393–399.

Zarezadeh S., Moheimani N. R., Jenkins S. N., Hülsen T., Riahi H. and Mickan B.S. (2019) **Microalgae and Phototrophic Purple Bacteria for Nutrient Recovery From Agri-Industrial Effluents: Influences on Plant Growth, Rhizosphere Bacteria, and Putative Carbon- and Nitrogen-Cycling Genes.** *Front Plant Sci.*, 10, 1193.

Zhang J. Z., Bombelli P., Sokol K. P., Fantuzzi A., Rutherford A. W. and Howe C. J. (2018). **Photoelectrochemistry of photosystem II in vitro vs in vivo.** *J. Am. Chem. Soc.*, 140, 6–9.

Zhu H., Meng H., Zhang W., Gao H., Zhou J., Zhang Y., and Li Y. (2019) **Development of a longevous two-species biophotovoltaics with constrained electron flow.** *Nat. Commun.*, 10, 4282.

## 【評語】 070002

利用藻類及共生菌設計與建構生物光伏電池並得到一些初步結果，難能可貴，研究報告書寫具有一定程度，值得嘉獎。口語報告清晰有自信。本研究利用共生菌 G76 創造不須補充培養基的固態複合型 生物光伏電池(BPV)。以陽極只含小球藻的 BPV 為控制組 (X-C)，結果發現在實驗開始 24 小時之後，BPV 電壓開始隨著光照週期產生規律變化。與 X-C 相比，添加 G76 會使電壓高峰下降 2.28%，但提高谷底電壓 14.4% 且縮小電壓波動幅度 60.07%。目前 XCG 已運轉超過 1032 小時，電壓高峰為 95.2mV，衰減幅度 19.35%。由於共生菌有可能提高單細胞藻的產電能力並延長 BPV 的使用壽命，本研究有應用的潛力，此低成本複合型生物光電轉換裝置若能進一步提高發電功率，可能建構不須儲電系統的太陽能發電裝置。