

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 工程學(二)科

052406

「綠」治「微」新-微生物燃料電池結合魚菜共生系統

學校名稱：國立中科實驗高級中學

作者： 高二 彭美娟 高二 吳沛陽 高二 朱詠蘭	指導老師： 王郁茜 何家齊
---	-----------------------------

關鍵詞：微生物燃料電池、廢水降解、魚菜共生系統

摘要

本研究旨在證實微生物燃料電池降解廢水的功能，以及實測其應用在魚菜共生中的可行性。在前期實驗中，首先探討微生物燃料電池的最佳產電環境，並推論改變其電量的因素，分別從微生物的生長環境及裝置的設置著手，在能穩定進行產電狀態時，開始測試其降解廢水的功能，得知 COD 去除率可達 81%，電壓值可達 500 毫伏特。

在實驗後期，我們架設小型的魚菜共生裝置，利用微生物燃料電池替代硝化池，取代其降解功能，並將其產出的電力再回饋到魚菜共生中，顯示微生物燃料電池結合魚菜共生系統，的確是一個節能、環保又符合經濟效益的方式。

壹、研究動機

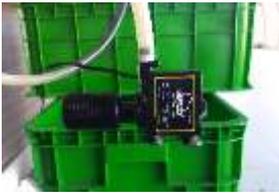
由於化石燃料使用所導致之全球暖化已達臨界點，再生能源的研究與應用已成刻不容緩的課題，高一化學的第四章補充了許多的綠色能源，其中「**微生物燃料電池(Microbial Fuel Cell, MFC)**」，可直接將化學能轉變成電能，且是以常見的微生物當作工具，深深的吸引了我們的，決定將此項目當作我們的研究對象，卻發現其有產電功率不高的缺點，無法作為生活中的發電工具，因此我們希望能發展出適合其應用的裝置。在搜尋文獻時得知有人將 MFC 結合魚缸發電(許佑瑄、許栢睿、沈敬耀，民國 102 科展)，我們決定參考它的綠能效益及經濟價值，設計出**魚菜共生系統結合 MFC**，目標是將產出的電能做適當的運用，且利用其降解的功能，設計並模擬小型農場，以往的研究將重點放在如何提升其產電效率，我們卻希望能找到適合應用的方法，製作出友善環境、符合兼顧產電效率與經濟效益的裝置，應用在農業中。

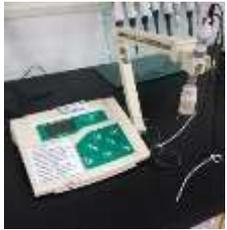
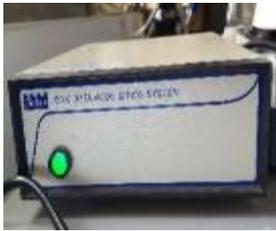
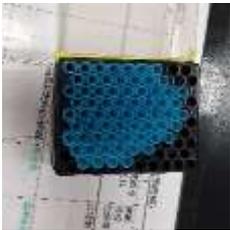
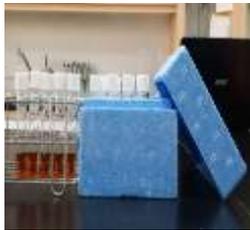
貳、研究目的

- 一、探討魚菜共生結合微生物燃料電池系統的連結性
- 二、探討出產電效率較高且符合環境的微生物燃料電池

參、研究設備及器材

一、實驗器材及設備

有蓋試管	量筒	燒杯	產氫菌培養瓶
			
磁石加熱攪拌器	玻璃漏斗	針筒	試管架
			
濾紙	導電膠	塑膠滴管	質子交換膜
			
蔬菜盆栽	沉水馬達	測量紙	血清瓶
			
魚飼料	電線和鱷魚夾	玻棒	電子秤
			

水管	磁石	金屬蓋	塑膠蓋
			
威尼爾主機	分光光度計	石英管	pH 計
			
加熱器	烘箱	電壓收集紀錄器	微量吸管
			
Tips	API 淡水全套測試組	COD 檢測劑	水浴槽
			
震盪培養箱	振盪器	雙槽型反應槽	真空抽濾機
			
電腦主機和螢幕	三用電表	金屬蓋夾	氮氣缸瓶
			

二、微生物菌種來源及藥品試劑

本研究之陽極槽菌種是由逢甲大學綠能中心，朱正永教授提供，而厭氧產氫菌乃自台中市黎明社區生活廢水處理場終沉池污泥而得(實驗前污泥以 95~100°C 熱處理持續 1 小時，以除去甲烷菌等菌種)。獲得之菌種皆為混和菌，使用表一之培養基，並置於厭氧狀態培養於震盪培養箱內。(劉俊敏，民 102)

陽極菌種培養基配方，成分與濃度如表一所示，研究前期，由於陰陽極菌種與前人配置不同，根據不同濃度成分所影響的產電量，配方濃度設置如下表一。

本研究之陰極則使用由台灣海邊海水中篩選出的小球藻作為陰極菌種(由逢甲大學綠能中心，賴奇厚教授提供)，而非使用一般的電解液。並以 10%的豬糞上澄清液於光照箱內培養。

陽極中另外添加磷酸緩衝容液，增加陽極中電解質，其溶液配置如下表二。

表一

陽極菌種培養基配方

藥品名稱	g/L	藥品名稱	ml/L
蔗糖	8	硫酸亞鐵濃縮液	1
碳酸氫銨	5.24	(25g/L)	
碳酸氫鈉	8	濃縮混和液(成分如下)	1
氯化鈣	0.1	硫酸錳(15g/L)	
磷酸氫二鉀	0.125	硫酸銅(5g/L)	
		氯化鈷(0.125g/L)	
		氯化鎂(100g/L)	

表二

磷酸緩衝溶液(pH7.415)

藥品種類	g/L
KH_2PO_4	1.179
Na_2HPO_4	4.303

三、菌種固定化所需要藥品

海藻酸鈉 (Sodium Alginate)、氯化鈣 (CaCl₂)、水

四、檢測試劑(總糖)

表三

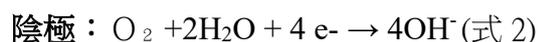
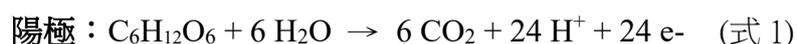
蒽酮(Anthrone)試劑 (須於實驗當場配置)

藥品種類	g/L(硫酸)
蒽酮	1

肆、研究過程或方法

一、微生物燃料電池(Microbial Fuel Cell)

微生物燃料電池(Microbial fuel cells，簡稱 MFC)。MFC 的基本構造如圖 1 所示，係由兩個陰、陽極槽體組成，中間以質子交換膜阻隔；其中陽極為生物厭氧槽，主要提供微生物進行代謝反應；陰極則置放電解液，並使其呈現好氧狀態。MFC 陽極槽內的微生物將有機物降解後，會釋放質子和電子(如式 1)。電子流經由外部迴路到達陰極，質子則通過質子交換膜到陰極，因此產生電流迴路。而在陰極槽內電子、質子與氧結合最終生成水(如式 2)。簡單而論，MFC 的運作即是利用陽極周圍之微生物的代謝作用所產生之能量並將其轉換成電流的一種技術(Logan and Rabaey, 2012)。



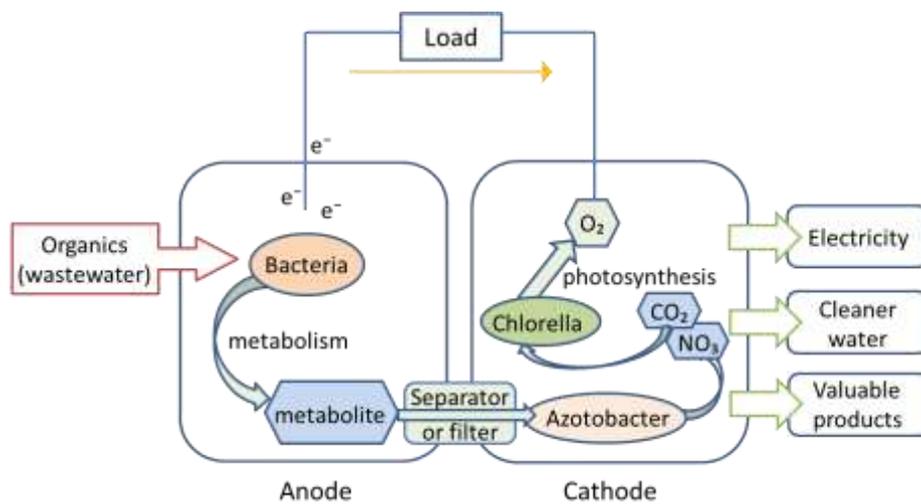


圖 1、微生物燃料電池(由作者繪製)

二、魚菜共生系統(Aquaponics)

利用魚的排泄物，經由幫浦送到有硝化作用的硝化桶(內含硝化桿菌、亞硝化桿菌)，進行沉澱過濾及硝化，再流到蔬菜水耕池。其中的水中懸浮物與有害元素(有機大分子)，經硝化菌等益菌的轉化為營養小分子(氮、磷、鉀、鎂…等)後，所剩下的殘渣會沉澱在硝化池下方，上方的濾液將會輸至水耕池給植物吸收，植物淨化了水質後，會再循環回魚池提供給魚類健康的生長環境，這種利用水循環交換所需，使三種生物(魚、細菌、植物)互惠互利共同生長的方式，就稱為魚菜共生(陳昱勳、顏泓淳、郭品峰，第 56 屆科展環境學科)。

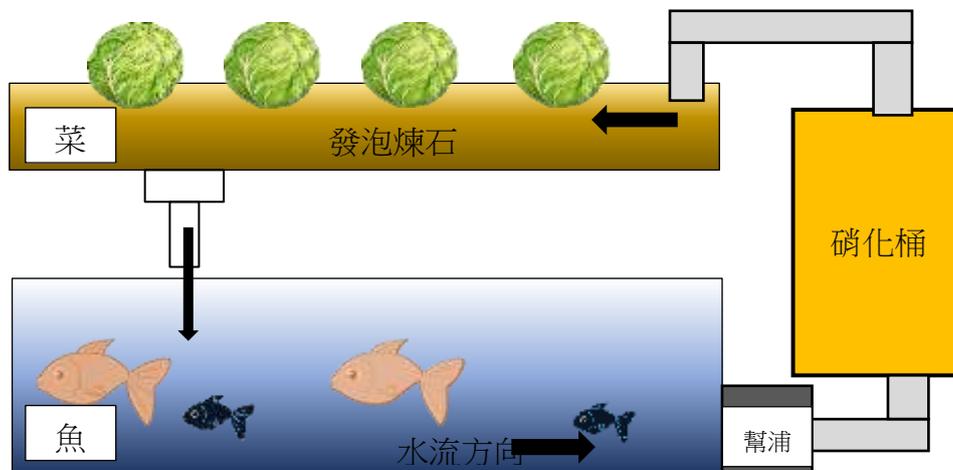
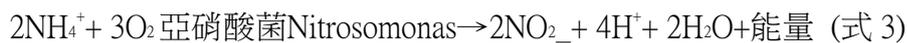
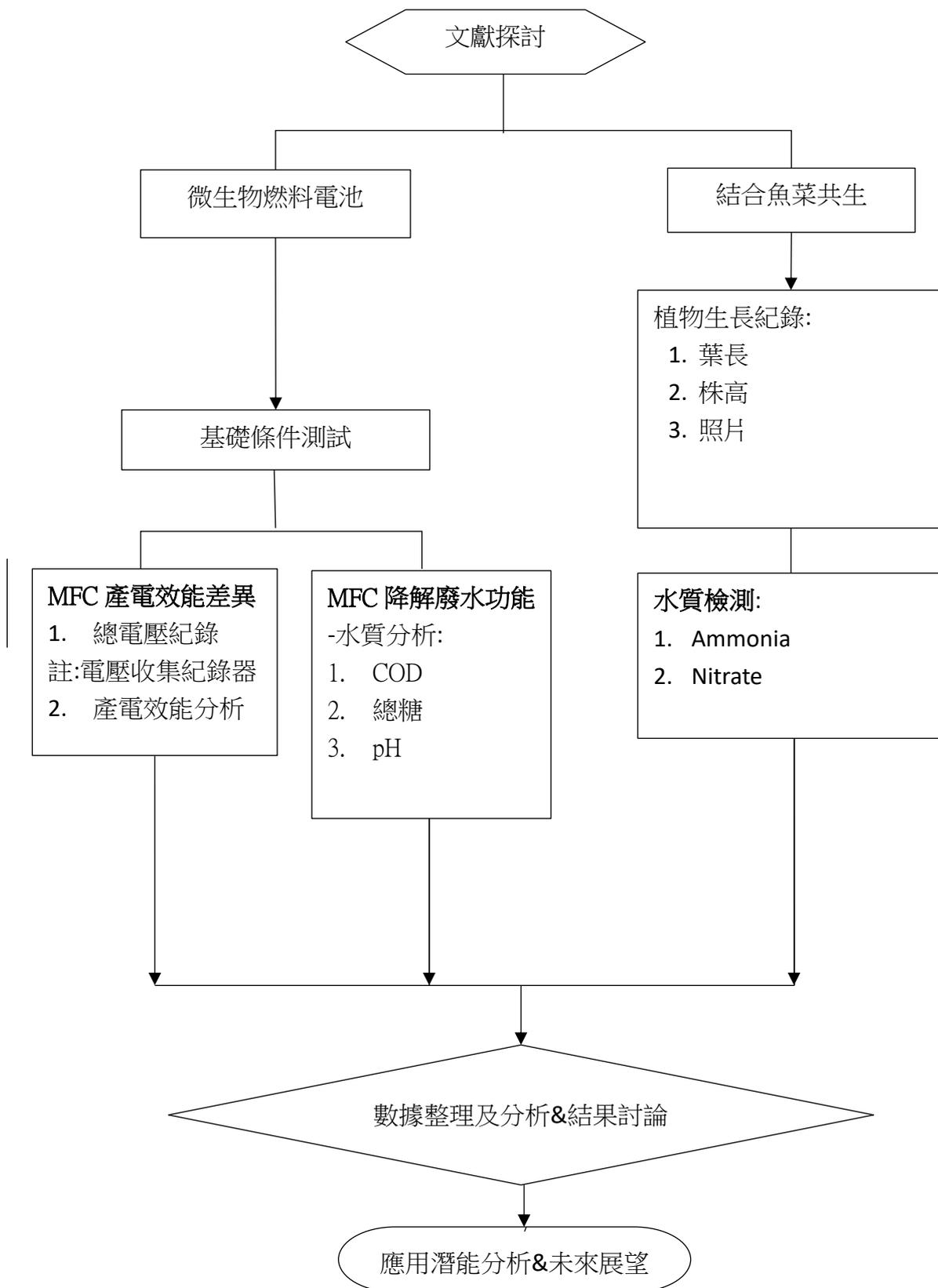


圖 2、魚菜共生系統(由作者繪製)

三、研究流程



三、MFC 裝置設計與架設

在文獻資料中我們得知有許多不同種類型態的微生物燃料電池 (B. E. Logan, et al., 2006)，本實驗最終採用雙槽型微生物燃料電池，槽體使用壓克力構成，外型為正方形結構，內部容積陰陽極相加，中間以質子交換膜相隔，上方均設有連接外部電路的孔洞，並於陽極槽上方裝有曝氣閥，為了製造厭氧環境，裝置如圖 3-1、4-1 所示，圖 3-2、4-2 為實際構造微生物燃料電池的架設。

系統組裝前，各設備需先經下列前處理：將反應槽清洗乾淨後，分別將質子交換膜、碳布浸泡於 5% 鹽水中一天，之後將碳布與外部導電電線連接，帶導電膠乾。組裝時，首先將質子交換膜放置於兩槽體的中間，其與玻璃交界面以墊片相隔，以防止在組裝兩槽體時產生孔隙。接著於玻璃槽體底端的開孔以血清塞塞住，燃料電池組裝大至完成。為了確保實驗進行中系統不會有漏水的情形產生，以蒸餾水注滿兩個槽體，進行一天的防漏試驗。

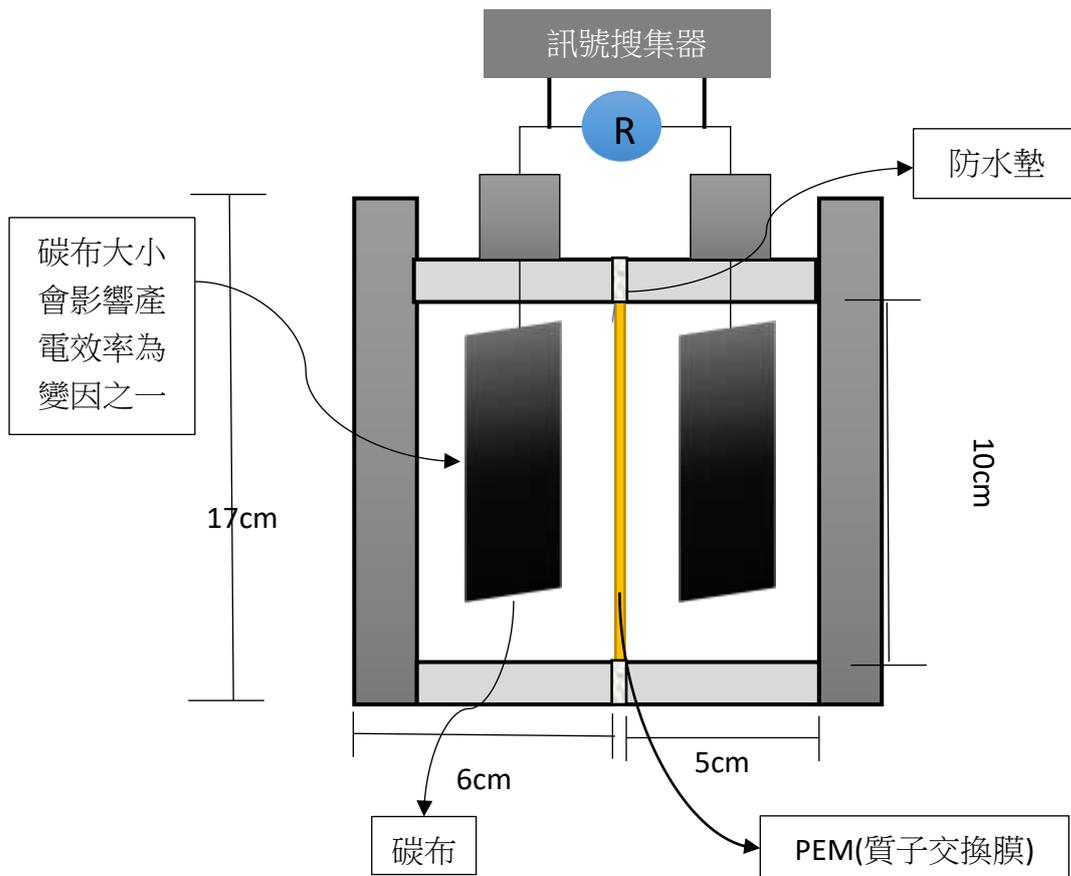


圖 3-1、MFC 側視示意圖(由作者繪製)

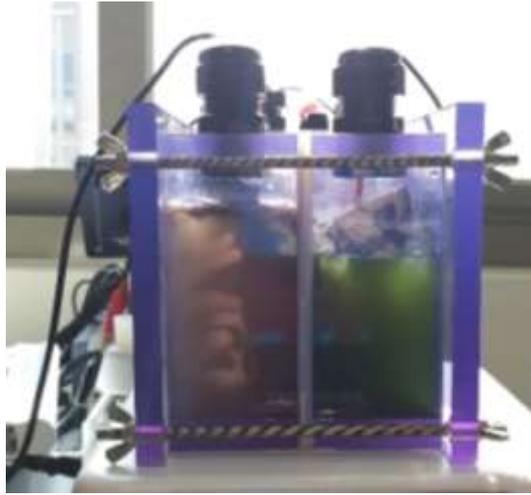


圖 3-2、MFC 側視實體圖

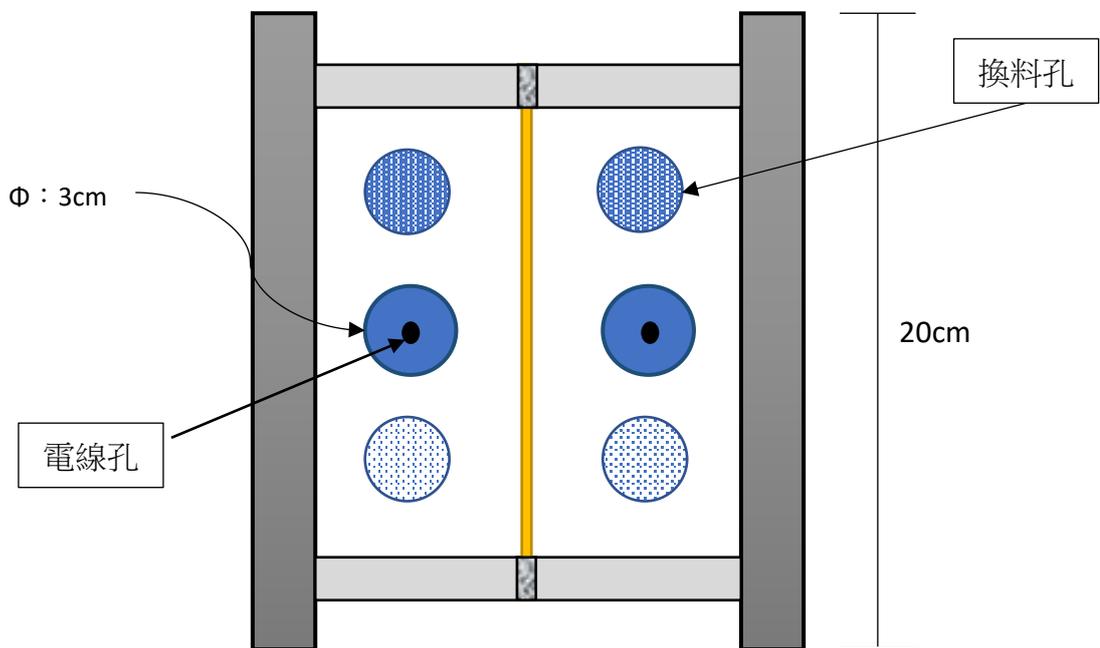


圖 4-1、MFC 俯視示意圖(由作者繪製)

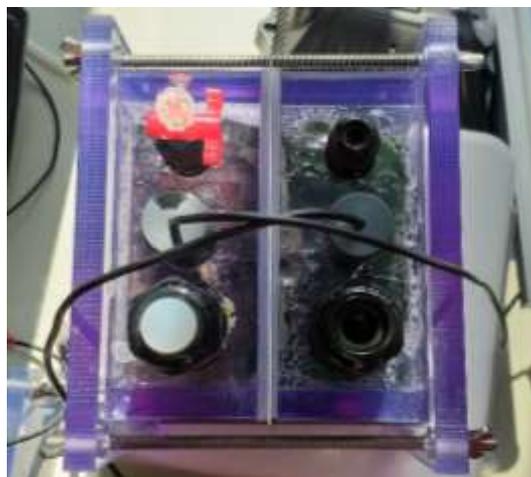


圖 4-2、MFC 俯視實體圖

四、魚菜共生系統裝置的架設及裝置

魚菜共生主要由三大要素所組成，分別是魚、植物、細菌，並仰賴水的循環形成一個系統，我們利用易於取得的塑膠盆與水管…等，在學校內架設了一個小型的魚菜共生系統（如下圖 5）。

1.水循環設置：

水位的高低落差，在整個系統中僅放置一個沉水馬達帶動水流運轉，我們將魚池放置在系統的最下層，接連著菜圃，並利用內部水管將底部含有魚糞的水接到硝化池，進行沉澱及硝化，再流回菜圃中，完成一次循環。

2.水產及植物養殖：

本次實驗所採用的魚種為朱文錦及蓋斑鬥魚，應用在實驗性模組及小型裝置上菜苗有美生菜、萵苣。

3.過濾系統設計：硝化槽內部擺放棉布，及發泡煉石，供硝化菌附著。

五、MFC 結合魚菜共生系統的設計

根據文獻資料，我們得知微生物燃料電池可具有降解以下物質的功能如下。其中本研究設想以微生物燃料電池可降解銨氮，及降解 COD 的能力（Nuan Yang , Hong Liu a , Guo-qiang Zhan b, Da-ping Li , 2019）取代魚菜共生系統中沉澱池的功能，並可以額外產電，提高整體系統的價值。

1. $\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^-$
2. $1.5\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{NO}_2^- + 0.5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{N}_2 + 5.5\text{OH}^- + 3\text{CO}_2$
3. $2.5\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{N}_2 + 6.5\text{OH}^- + 5\text{CO}_2 + 0.5\text{H}_2\text{O}$
4. $\text{NH}_4^+ + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$
5. $\text{NO}_2^- + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$
6. $\text{NO}_3^- + 5\text{e}^- + 6\text{H}^+ \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
7. $\text{NO}_2^- + 3\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
8. $\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

在本次實驗，我們所進行的是半批次的微生物燃料電池，無法真正將魚菜共生系統結合，所以將魚菜共生系統的硝化槽底部開闕，取出沉澱的魚糞，測量 COD 值後加入 MFC

內，並測量每日 COD 去除量，觀察其中的變化，將魚糞殘渣做良好的運用。
其裝置如圖 5 所示，圖 6 為實際構造。

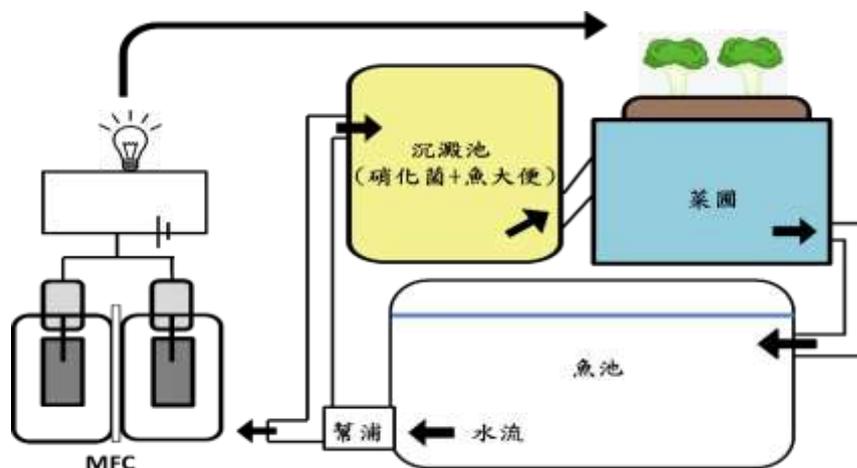


圖 5、魚菜共生結合微生物燃料電池構造圖(由作者繪製)



圖 6-1、魚菜共生裝置 (實體俯視圖)

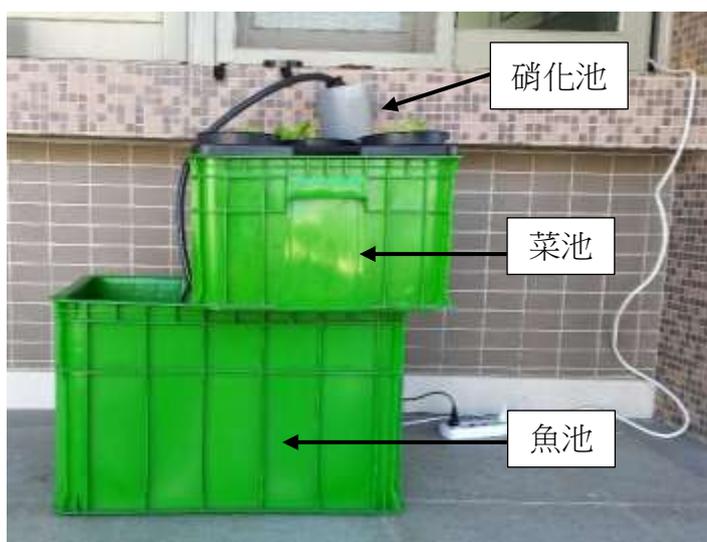


圖 6-2、魚菜共生裝置 (實體側視圖)

六、菌種濃度測定方法

濁度測定法的原理為應用分光光度計依一定波長，先測量同菌種不同濃度菌液，測其吸光值(Optical Density，以下簡稱 OD 值)，訂出標準曲線後，再測量未知溶液吸光值(陽極菌種波長 550nm、陰極微藻菌種波長 680nm)，並依標準曲線推算同菌種不同濃度菌液，來對照出未知菌液所含菌數。

分析操作步驟如下:



圖 7、菌種濃度檢測流程圖

七、COD 檢測法

測定所需的反應化學試劑，包括重鉻酸鉀、硫酸、硫酸銀及硫酸汞，按照比例加入，配置在消解瓶中，由於重鉻酸鉀為管制藥品，本實驗採用已配置完成的試劑。測量水樣 COD 時，只需將待側水樣放入消解瓶中消解 2 小時，再用分光光度計讀出 COD 的吸光值，間接測出試液的 COD 值。

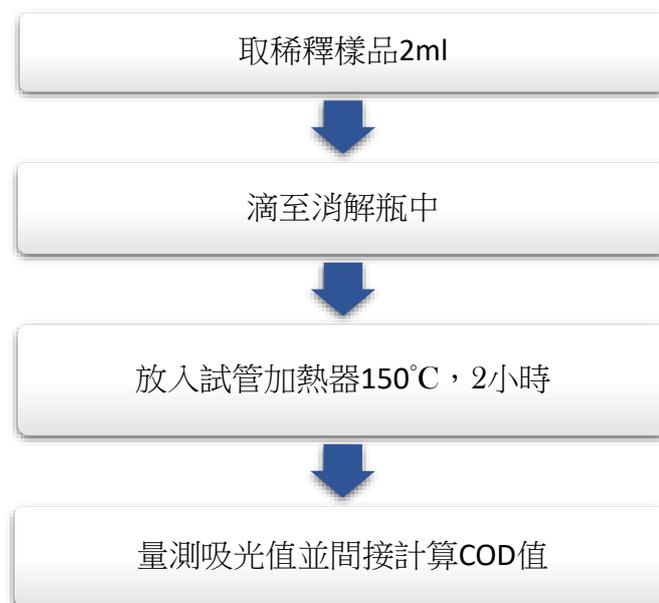


圖 8、COD 流程圖

八、總糖檢測法

蔥酮比色法，糖在硫酸的作用下生成糖醛，糖醛再與蔥酮作用，形成一種綠色的絡合物，顏色的深淺與糖含量有關。

1. 葡萄糖標準溶液：稱取已在 80°C 烘箱中烘至恒重的葡萄糖 100mg，配製成 500ml 溶液，即得每 ml 含糖為 200 μ g 的標準溶液。

蔥酮試劑：稱取 1g 經過純化的蔥酮，溶解於 1000ml 稀硫酸中即得。硫酸溶液由 760ml 濃硫酸（比重 1.84）稀釋成 1000ml 而成。

2. 繪製標準曲線：取標準葡萄糖溶液將其釋成一系列不同濃度的溶液，濃度分別為每 ml 含糖 0、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 μ g。按上述方法分別測得其吸光度，然後繪製糖濃度曲線。

3. 計算樣品中含糖%：

設 V 為樣品稀釋後的體積(ml)

C 為提取液的含糖量(μ g/ml)

W 為樣品幹重(g)

則得計算式：可溶性糖含量% = $C \times V / W \times 106 \times 100\%$



圖 9、總糖流程圖

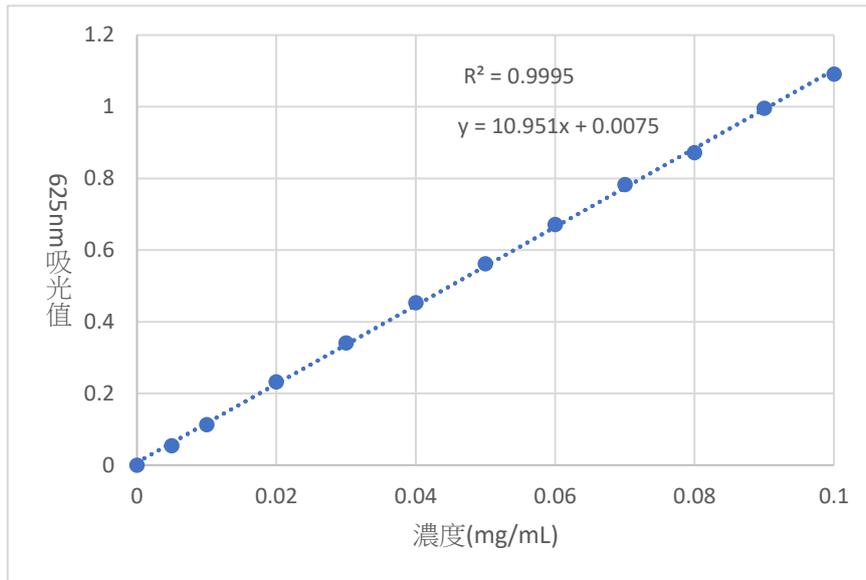


圖 10、總糖標準曲線

九、菌種固定化方法

(一) 配製溶液

1. 取海藻酸鈉 (Sodium Alginate) 約 2 克，放置於杯子中，再加水 25 mL，再加入 75ml 菌液，然後攪拌使海藻酸鈉充分溶解。
2. 取氯化鈣 (CaCl₂) 7 克，放置於杯子中，再加水一公升，並攪拌充分溶解。

(二) 製作

取配置好的氯化鈣水溶液約 100mL，然後以滴管吸取海藻酸鈉水溶液，在氯化鈣水溶液上方一滴一滴的滴入，形成 1 顆 1 顆如小球般的形狀。

伍、研究結果

一、MFC 基礎條件測試

在研究過程中，由於 MFC 的產電電壓會隨著培養時間延長而增加，使我們的實驗結果在不同變因中的電壓值有些許差異，因此本實驗只針對施加變因期間的電壓做討論。

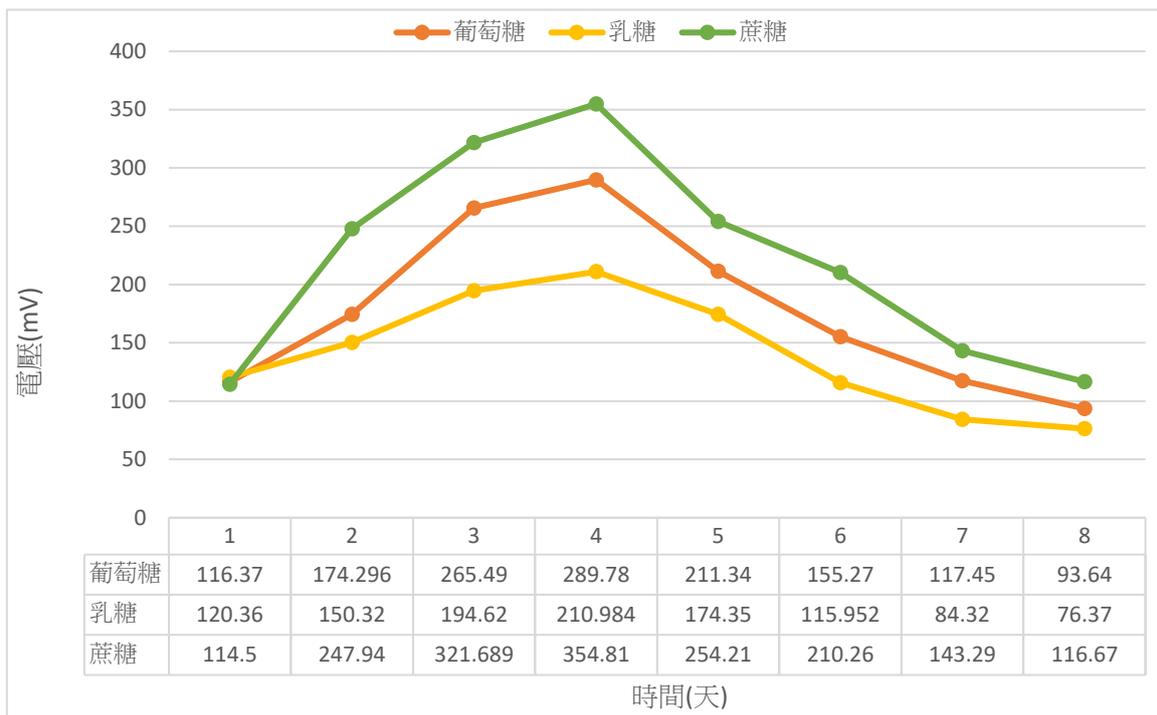


圖 11、不同糖類作為 MFC 基質對產電電壓的差異

由圖 11 可知，於 MFC 運轉一週時間內添加 8g/L (0.8%) 蔗糖作為碳源的產電電壓較以乳糖及葡萄糖佳→得知蔗糖為最佳碳源來源。

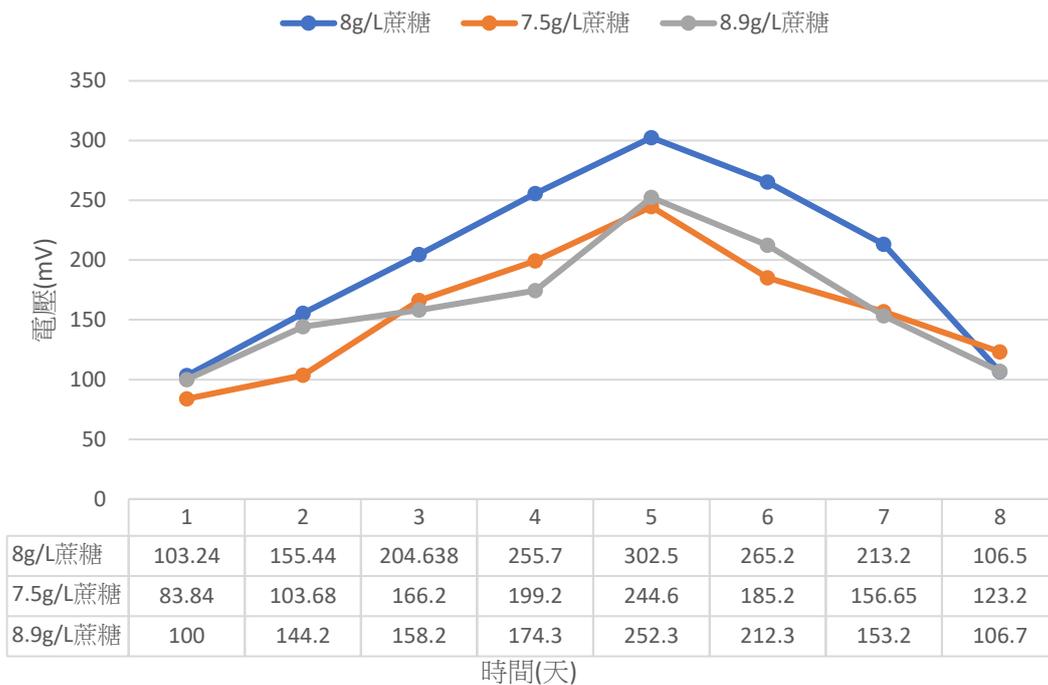


圖 12、不同濃度蔗糖作為 MFC 基質對產電電壓的差異

由圖 12 可知，添加 8g/L 蔗糖作為碳源的產電電壓經 8 天培養，在第 5 天得最高 302.5mV，平均電壓 176.7mV→得知施加 8g/L 的蔗糖較為符合 MFC 所適合的濃度。

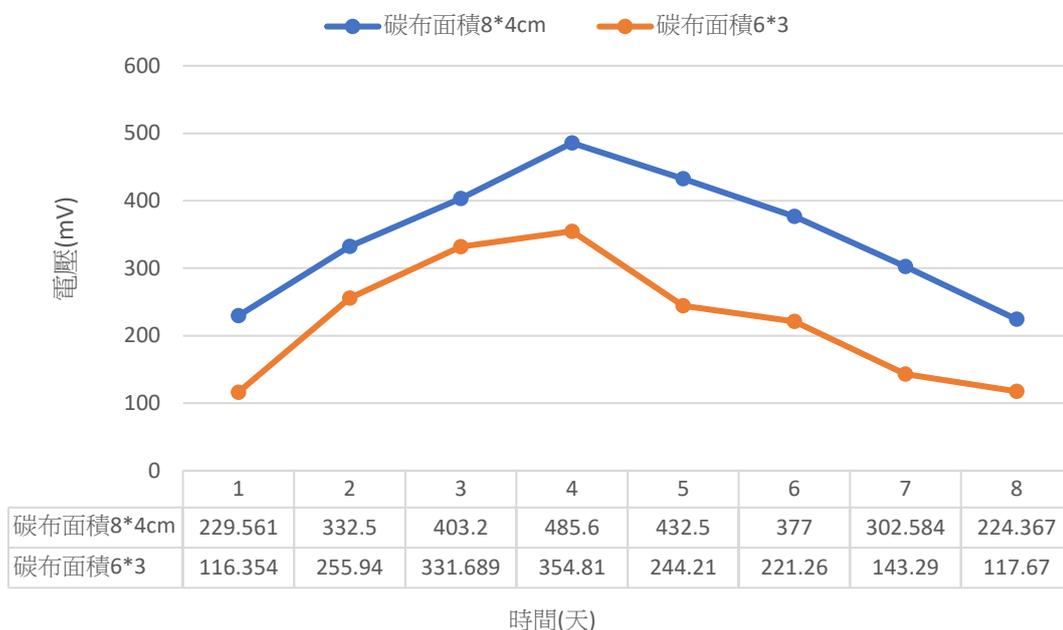


圖 13、碳布大小對 MFC 產電電壓的影響

由圖 13 可知，陰陽極電極碳布表面積 8*4cm²時，微生物可附著的面積較大，且產電電壓 485.6mV 高於碳布面積 6*3 cm²時。

二、微生物燃料電池 MFC 的產電效益

(一) 電壓圖

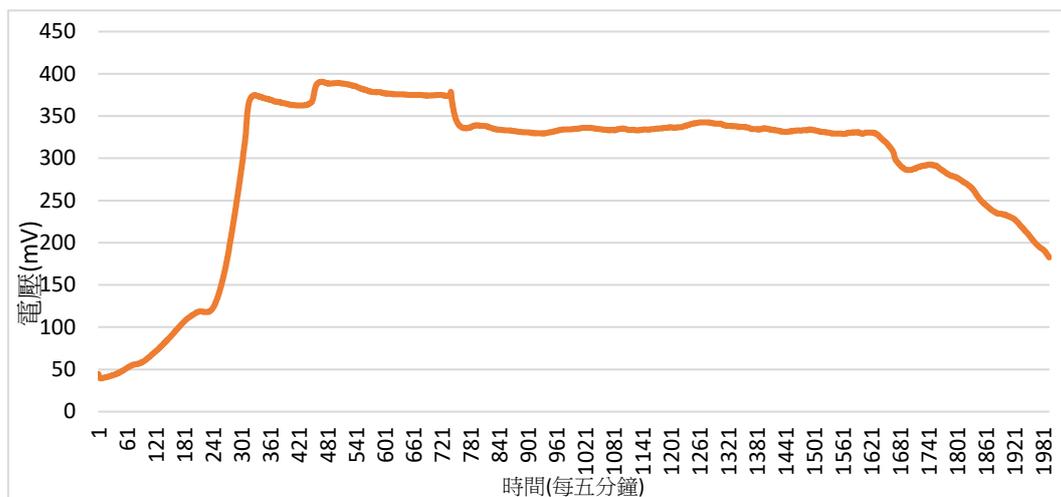


圖 14、MFC 產電電壓週期

此圖使用 5000 DATA Acquisition System 連接電腦輸出製成，可以看出 MFC 從極短的時間內達到最高電壓約 390 毫伏特，並可以維持其電壓值於 340 毫伏特約 6 天左右。

(二) 極化曲線圖

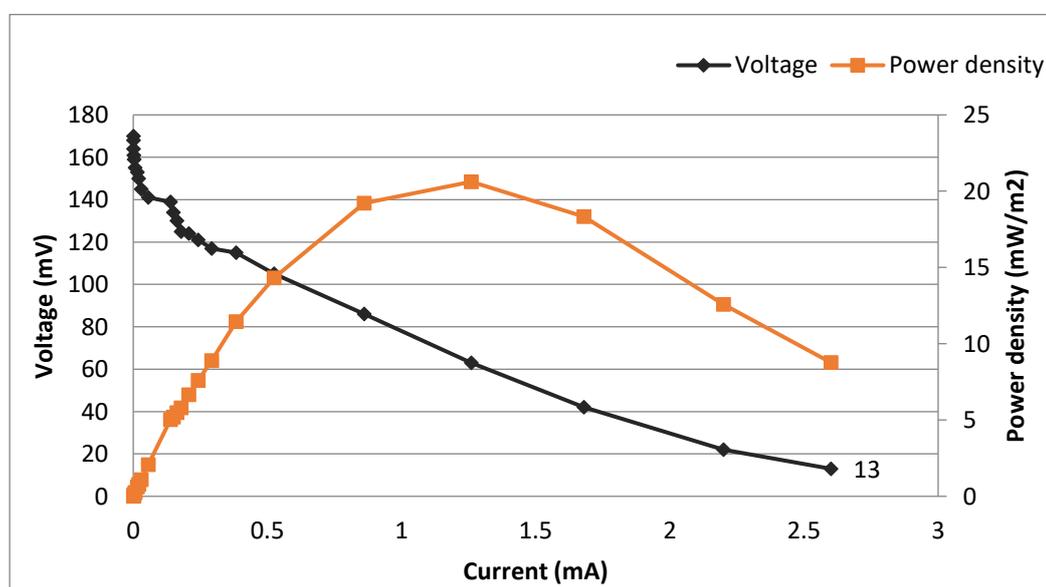


圖 15、MFC 極化曲線

經研究結果計算後，得出內電阻值(Ω)為 84.9206，從本圖可看出本實驗之 MFC 電功率密度值最高達 20.6182(mW/m^2)，電流密度值 675.3 (mA/m^2)。本紀錄之內電阻值相比台灣海洋大

學河海工程學系在民 102 年所研究的連續流式 MFC 的數據 340Ω 較低，電功率密度值為 $7.2(\text{mW}/\text{m}^2)$ ，並依文獻資料，我們得知內電阻值低時，電功率密度較高。

三、水質檢測

(一) COD 去除率(COD removal efficiency)

水中有機物的去除能力通常以 COD 去除率(%)作為衡量指標，計算公式如下所示：

$$\text{COD}(\%) = \frac{\text{COD in} - \text{COD out}}{\text{COD in}} \times 100\% \quad (\text{式 4})$$

上式中 COD in 為進流燃料之 COD 濃度(mg/L)，COD out 為陽極槽或陰極反應消耗後出流之 COD 濃度(mg/L)。

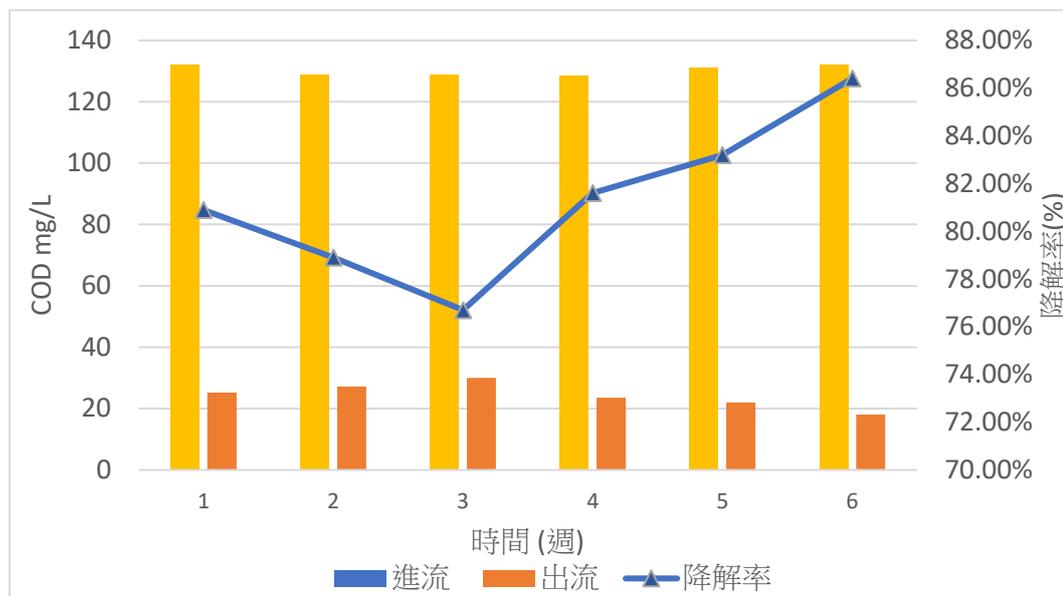


圖 16、MFC 之魚糞廢水 COD 降解率

本檢測主要針對陰極槽藻類降解魚菜共生系統中魚糞廢水溶液的 COD 降解率(實際添加濃度為稀釋 10 倍後的溶液)。由上圖可知，每週 COD 平均進流值 $130.25\text{mg}/\text{L}$ ，MFC 平均出流值為 $24.3\text{mg}/\text{L}$ ，COD 平均降解率達 81.3% ，可以推得 MFC 確實具有降解有機物質的功能。

(二) NH₄-N

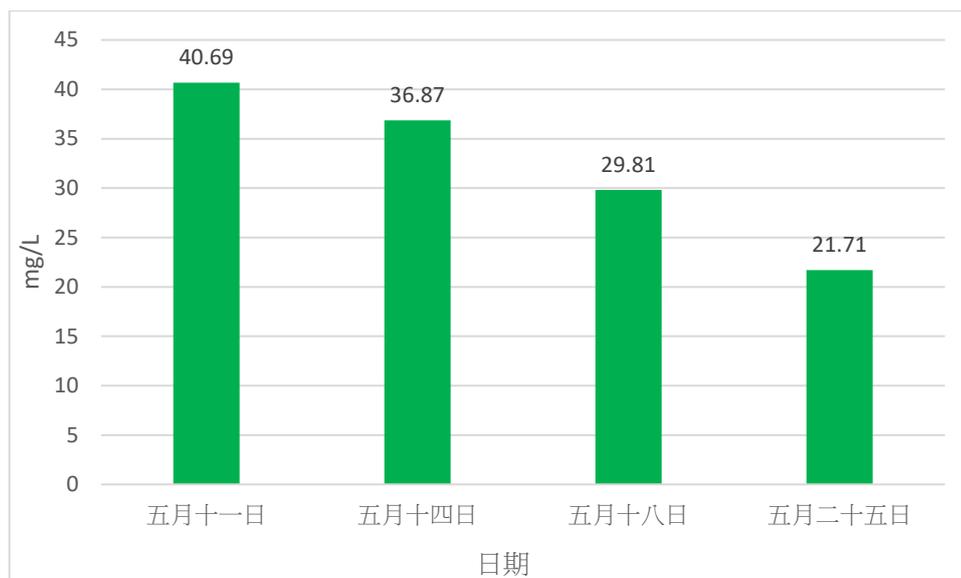


圖 17、NH₄-N 含量變化圖

本檢測主要針對陰極槽藻類中所含 NH₄-H 的含量變化進行記錄，在操作過程中，我們以半批次實驗進行，每隔 3~4 日抽取 15ml 的槽內溶液，並補充魚糞溶液，並測量其中含量，從圖中可看出 NH₄-N 含量逐漸降低，符合預期結果。

(三) MFC 之 pH 值

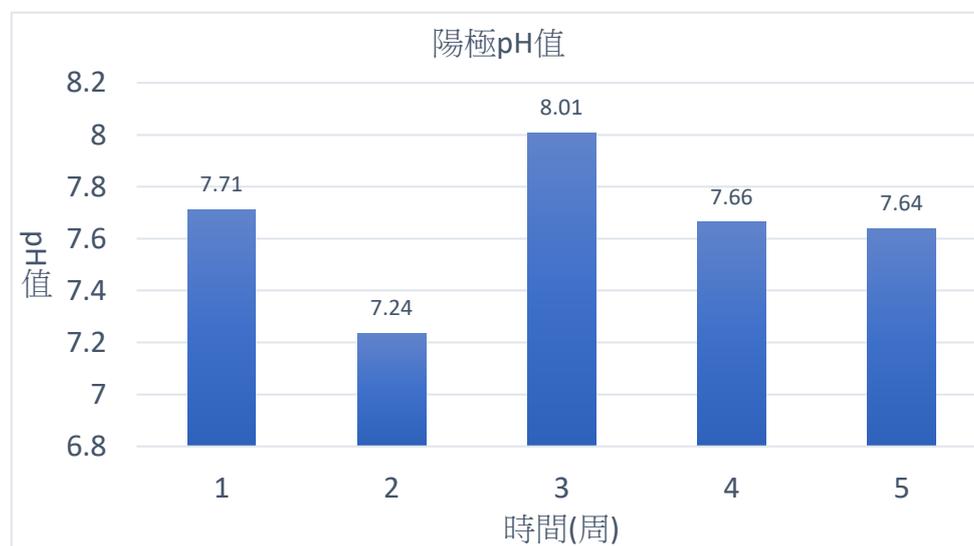


圖 18、MFC 陽極產電後 pH 值

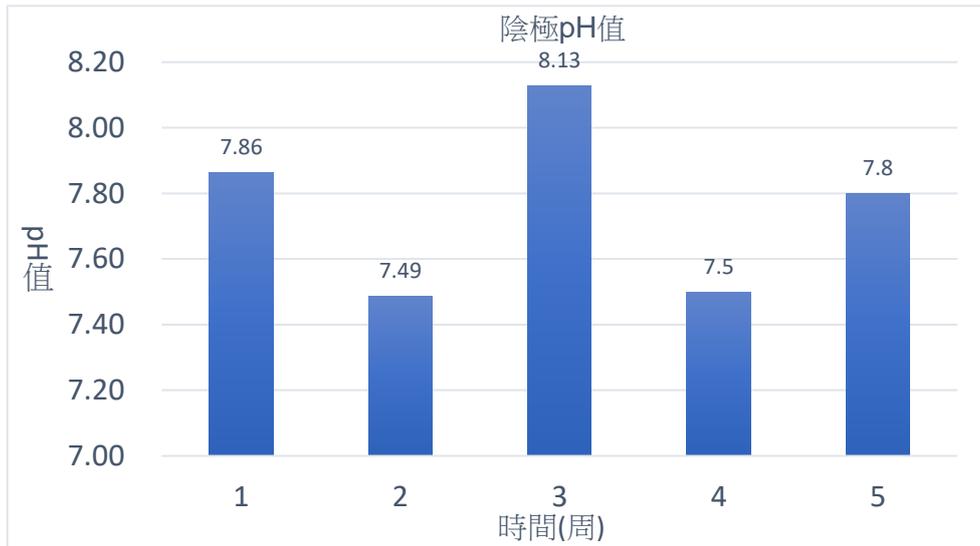


圖 19、MFC 陰極產電後 pH 值

由圖 18、19，可以看出實驗後 MFC 陰極陽極 pH 值皆為鹼性，此結果與原先假設不同。推測原因將於討論中提及。

(四) 魚菜共生水質變化

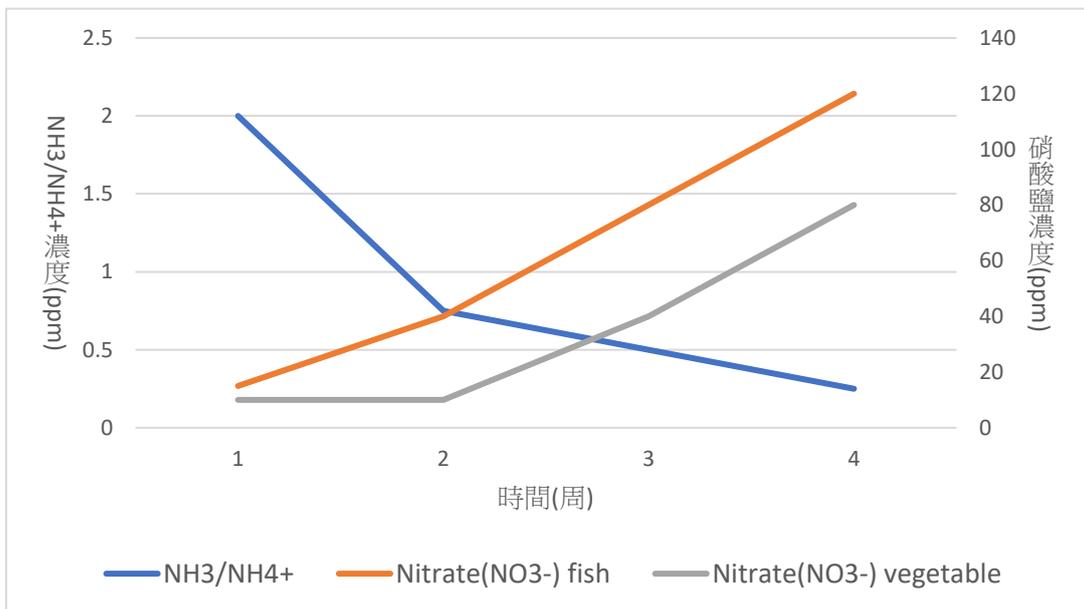


圖 20、魚菜共生的水質變化

由上圖可知，NH₃/NH₄⁺在水中的濃度經一段時間後逐漸下降；魚池與菜池內硝酸鹽的濃度則逐漸上升，與 NH₃/NH₄⁺呈負相關，與預期相符。亦可看見魚池內的硝酸鹽濃度大於菜池。

四、植物生長狀況-萵苣

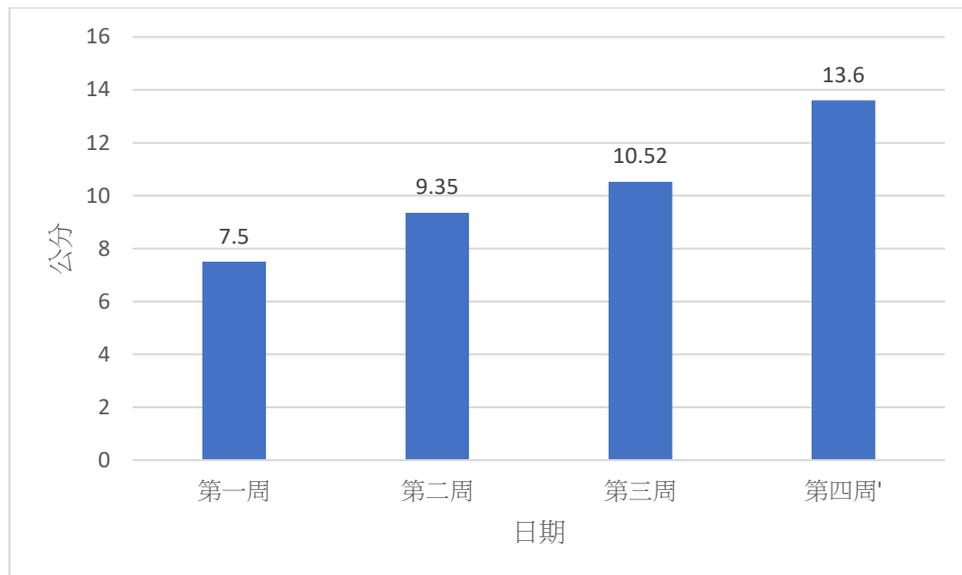


圖 21、累積株高

由此圖可以得知我們以本系統所種植出的萵苣居穩定成長，下圖為實體照片。



圖 22、萵苣的生長照片

陸、討論

一、探討魚菜共生結合微生物燃料電池系統的連結性

根據本次實驗設計，我們可以將整個系統視為一個生態系，微生物燃料電池中的微生物為分解者，而魚菜共生中的魚與菜分別代表生態系中的消費者及生產者。反應槽中的小球藻可分解魚糞以取代原先在魚菜共生中的菌種，將魚類所排放的糞便分解成可供植物吸收的硝酸鹽類，並可額外產電可增加產值；反應槽可以降低 COD 值和氨氮濃度以達到淨化水質，維護朱文錦的生活環境，並協助沉澱池的硝化作用。

二、產電效率較高且符合環境的系統裝置

(一)根據實驗一，我們比較不同醣類對 MFC 產電的影響，由圖 11 可知，蔗糖為本次實驗所使用的最佳碳源來源。我們推測也許是因為陽極菌種內可分解蔗糖的酵素較多，可分解乳糖及葡萄糖的酵素比較少；或因為蔗糖是雙糖，是由 2 個單糖所組成，利用率較僅有一個單糖的葡萄糖好。

(二)根據實驗二，我們比較不同蔗糖濃度對 MFC 產電的影響，由圖 12 可知，8g/L 為最佳的碳源濃度。我們原先假設蔗糖濃度越高，微生物的代謝作用越好，但由圖 14 及平時觀察 MFC 的變化發現，並不是糖濃度越高越好，而需要找到適當的濃度。我們推測由於本實驗是採半批次 MFC，使用一周一次抽取樣本和補充基質，且非連續流裝置，如果液體濃度太高，會導致下次抽取樣本並補加基質時，造成之後液體濃度會越來越高，進而導致微生物的死亡和產電效能不佳。同時也會導致兩槽滲透壓的改變，進而造成液面高度不一樣，使得質子交換膜變形，導致材料耗損加快、影響實驗數據。

(三)根據實驗三，碳布大小對 MFC 產電的影響，由圖 13 可知，碳布表面積越大，則產電量越高。由於碳布為我們所使用的陰陽極電極，且 MFC 的運作原理是由電極接收微生物代謝過程中所釋出的電子，若增加微生物可附著的表面積，則能提高 MFC 接收電子的效率，提高產電效能。

(四)根據 MFC 檢測結果，我們原本預期陽極會因行代謝作用而酸化，但卻皆呈現鹼性。

我們猜測是由於陽極槽內為雜菌系統，而其中的光合菌因長時間的照光，且由於實驗上的疏失，並無在換料後切實地立即曝氣，使光合菌的生長加速，取代原先的優勢菌種。我們從 MFC 的外觀上也發現一開始操作時的菌種顏色為白色混濁，卻於實驗後期觀察到成紫紅色現象，由文獻中我們得知產氫菌代謝後的產物為有機酸，而光合菌則可以有機酸當作食物來源，故我們推論可能是因為此原因，使其 pH 值仍呈現鹼性。

(五)與其他綠能電池的比較

表四

MFC 與其他綠能電池的比較

	本次實驗製作的 半批次電池	連續流式電池
正極	小球藻	磷酸鹽
負極	印泥火山菌或產 氫菌	合成葡萄糖液與碧砂人工漁市汙水廠之汙 水
平均工作電壓	0.3~0.4V	1.7~3.2V
電解液	質子交換膜	氯化鈉
製作成本	中	低
安全性	高	中等

本次實驗所製作的 MFC 半批次電池，雖然與其他電池相比，工作電壓相對較低，但卻具有可降解廢水的功能，對於環境而言既可以降解有機廢棄物，亦可產出電力，對環境友善。

(六)與以往半批次式 MFC 電池的比較

表五

MFC 與半批次式 MFC 電池的比較

	本次實驗製作的半批次電池	半批次電池 (第 47 屆科展作品)
正極	小球藻	鐵氰化鉀溶液
負極	印泥火山菌或產氫菌	酵母菌
平均工作電壓	0.3~0.4V (最高電壓 0.7V)	0.6V
製作成本	低	低
安全性	高	低

與女中在第 47 屆科展(何念萱、陳昕臨、張藍心、劉瑞臻，第 47 屆科展)所製的微生物燃料電池相比，在正極使用的為小球藻，而非一般使用的鐵氰化物，對環境較無汙染，且安全性提高。

三、微生物燃料電池降解廢水的功能

(一) 本次 MFC 處理廢水的功效紀錄

在測試降解廢水的實驗中，可以證實 MFC 確實具有降解的功能且 COD 降解率可達 81%，但卻缺少了 BOD 及磷、氮等其他檢測的數據，未來可持續檢驗，更加完善的了解 MFC 對於降解廢水的功用，表六為本次實驗與文獻中 MFC 所做的比較，可以得知本實驗的平均降解率可達連續流式電池降解率之水準。

表六

半批次實驗與連續流式電池比較

	本次實驗製作最佳效率的半批次電池	連續流式電池
正極	小球藻	磷酸鹽
負極	印泥火山菌或產氫菌	碧砂漁市汙水廠之汙水
基質	蔗糖	葡萄糖
平均降解率	81%	45%~90%

(謝銘季，民國 102)

與台灣海洋大學河海工程學系在民 102 年所研究的連續流式 MFC 相比，本實

驗之 COD 降解率可以達到其水準，未來也希望可以運作連續流式的 MFC，增加整個實驗的發展性。

四、本實驗研究所遭遇的困難

- (一) 在研究過程中，由於沒有考量菌種及基質會沉澱在反應槽底，在抽取檢測時，僅抽取上澄清溶液，造成檢測數據有所偏差。
- (二) 一開始參考的陽極菌種基質配方為單一培養產氫菌之配方，其中添加的緩衝溶液及添加的基質配方所含的蔗糖及鹼性物質，為增加產氫菌的產氫量所做的配置，且為了抑制產氫菌代謝糖類所產生之大量酸類，並不適用於本實驗 MFC 菌種培養。
- (三) MFC 為一長時間培養研究的項目，在進行變因調整，及實驗重複時，並無控制溫度恆定，從實驗結果中，可觀察出於溫度較高的夏季所量測得電壓值較高。
- (四) 在實驗過程中，部分應當日檢測的數值未能即時檢測，可能造成些許偏差。

五、魚菜共生結合微生物燃料電池系統的發展性

本次的實驗為了將 MFC 推廣到實際應用的層面想了許多的辦法，最終決定將 MFC 與魚菜共生系統做結合，在校內架設系統並進行實驗。以 MFC 的產電量及萵苣的生長狀況研究此系統的發展性，由圖 15 可知 MFC 的產電電功率密度為 $20.6182(\text{mW}/\text{m}^2)$ ；由圖 22 可見，萵苣的生長狀況良好，我們推測本實驗有巨大的可行性，並且製作了 SWOT 圖如下表七。但在結合 MFC 與魚菜共生系統的完整性仍須多加研究，若未來能將 MFC 以連續流的方式操作，並控制兩槽電位在理想狀態，就可將魚菜共生的沉澱池與 MFC 的陰極槽結合成為回饋系統，進而提高一體性，如圖 23 所示。

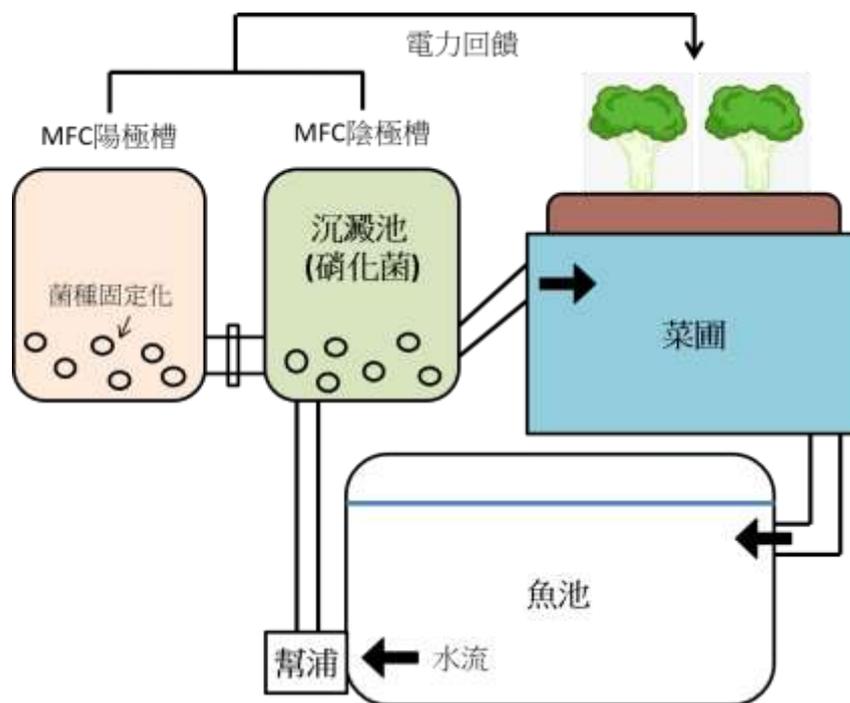


圖 23、魚菜共生結合微生物燃料電池所形成之回饋系統

表七

MFC 結合魚菜共生系統的 SWOT 圖

	內部	外在
優勢	1. 可以節省水資源 2. 生產有機無農藥的蔬菜，並產出微薄電力 3. 以潔淨無汙染的方式淨化水質	機會 1. 若使用於降解經濟養殖漁業廢水可降低成本 2. 資源有效重複利用，有零廢棄、全循環之特點，具環保價值 3. 若能應用在大型的魚菜共生工廠內，則兼具經濟性價值
弱勢	1. 系統完整性、效率仍有待提升 2. 陽極槽需另耗人力培養	威脅 1. 因質子交換膜需常汰換，故成本較昂貴 2. 若使用訂製壓克力槽體，則成本提高且不易推廣

柒、結論

一、微生物燃料電池結合魚菜共生系統的連結性

本實驗為結合微生物燃料電池與魚菜共生系統，利用微生物燃料電池可降解 COD 及 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的特性，取代魚菜共生原有的沉澱池，並額外產出電力。經實驗後，從魚、菜生長狀況及產出電壓值，推測本實驗裝置設計具有一定的可能性，未來可以將微生物燃料電池以連續流形式操作，提升整體裝置的連結性。

二、微生物燃料電池的變因控制

從微生物燃料電池的各要素分別進行變因探討，得知碳源濃度及種類將影響其電壓值，另有碳布電極的表面積大小，將影響電子接收效率，影響電壓值的高低，實驗後並得知碳布表面積較大者電壓值較高。

三、探討微生物燃料電池降解廢水的功能

- (一) 在陰陽極的配置上，不同於以往的資料，我們在兩極添加不同的菌種，在陰極以小球藻代替鐵氰化物電解液，利用**兩邊皆可代謝**的優勢，提高降解的功能，並且增加產電效率。
- (二) 本實驗對魚豬糞廢水 COD 的平均降解率可**達 81%**，可以推知其確實具有降解廢水的功能。

四、探討魚菜共生結合微生物燃料電池系統的發展性與實際應用

- (一) 在校內實際架設小型的魚菜共生系統與 MFC 裝置，過程中量測菜的生長狀況與一般土耕的差異，並串聯 4 組 MFC 連結 LED 燈泡，當作**照明裝置**。
- (二) 同步量測水耕萵苣與土生萵苣的生長狀況，並得知本次實驗所種植的萵苣與土耕所種植的成果無太大差異，本魚菜共生系統可確實耕種出**無農藥且又有機**的食用蔬菜。
- (三) 可以節省一般種植蔬菜所需的大量水資源、肥料及土地面積，又具有**降解魚糞殘渣**，及**產出電力**供應水循環系統的多重效果，進而達到**永續、潔淨的綠色能源利用**。

捌、參考資料及其他

1. Logan, B.E., Rabaey, K., 2012, “*Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies*” . Science 337, 686-690.
2. B. E. Logan, et al., 2006, “*Microbial Challenges and Fuel Cells Applications*” , Environmental Science & Technology, 40(17), pp. 5172-5180
2. 余菀婷(民 95) · 操作條件對微生物燃料電池性能之影響未出版的碩士論文 · 基隆：國立臺灣海洋大學河海工程學系。
3. 王思凱(民 97) · 燃料型態與有機負荷對微生物燃料電池績效之影響未出版的碩士論文 · 基隆：國立台灣海洋大學河海工程學系。
4. 謝銘季(民 102)陰極槽藻類對微生物燃料電池產電之影響未出版的碩士論文 · 基隆：國立臺灣海洋大學河海工程學系。
5. 劉俊敏(民 102) · 低耗能木質纖維素酸水解與暗醱酵產氫之研究(未出版的碩士論文) · 台中：逢甲大學。
6. 徐培庭(民 104) · 以自然光源作為能量來源之藍綠菌生物燃料電池產電效能評估未出版的碩士論文 · 台中：國立中興大學環境工程學系。
7. 洪祥耀(民 105) · 具太陽能與燃料電池發電之魚菜共生系統之充電控制器設計未出版的碩士論文 · 南投：南開科技大學電子工程學系。
8. 陳昱勳、顏泓淳、郭品聿 · 魚菜共生系統延伸-永續發展裝置組合 · 第 56 屆科展環境學科。
9. 許佑瑄、許栢睿、沈敬耀 · 會發電與自循環的魚缸-底泥微生物燃料電池之探討與應用 · 第 53 屆科展生活與應用科學科。
10. 莫絲羽、陳美琳 · 綠色能源-天然微生物燃料電池之開發 · 2014 年臺灣國際科學展覽會
11. 何念萱、陳昕臨、張藍心、劉瑞臻 · 微生物電力公司-微生物燃料電池之變因探討 · 第 47 屆科展化學科
12. Nuan Yang , Hong Liu a , Guo-qiang Zhan b, Da-ping Li.2019“*Sustainable ammonia-contaminated wastewater treatment in heterotrophic nitrifying /denitrifying microbial fuel cell*”

【評語】 052406

本作品設計魚菜共生系統結合微生物燃料電池(MFC)，符合兼顧產電效率與經濟效益的裝置並可應用於農業中，是相當不錯的方向。然而，本構想大致源於文獻已有資料，作者整合這些概念與實驗裝置，重新設計與架設系統並進行實驗，因此，作者的創意何在比較不容易看出。利用微生物燃料電池可降解 COD 及 NH₄-N 的特性，取代魚菜共生原有的沉澱池，實測降解廢水的功能，並額外產出電力。微生物燃料電池操作以半批次方式，尚無法達成系統結合。另外，本作品在實驗過程也似有一些疏忽，成果未如預期。建議掌握更多實驗數據，以達連續操作。作者引用相關文獻，MFC 所得電壓較文獻值略低。建議驗證實驗再現性。

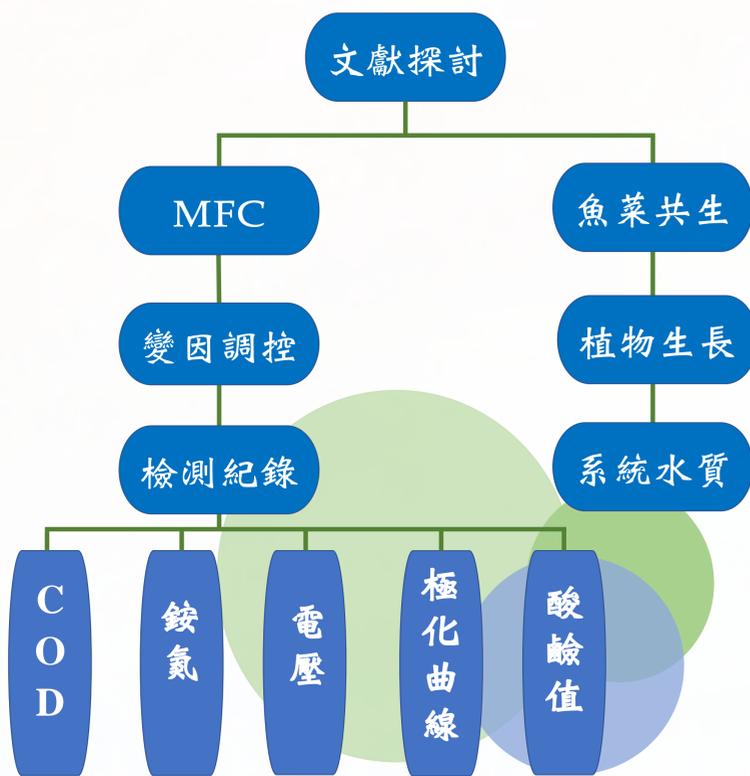
研究動機

由於化石燃料使用所導致之全球暖化已達臨界點，再生能源的研究與應用已成刻不容緩的課題，其中「微生物燃料電池 (Microbial Fuel Cell, MFC)」深深的吸引我們的眼光。在閱讀文獻後，本研究設計魚菜共生系統結合MFC，目標是將產出的電能做適當的運用，且利用其降解有機物的功能，設計並模擬小型農場，希望能找到適合應用的方法，製作出友善環境、符合兼顧產電效率與經濟效益的裝置，應用在農業中。

研究目的

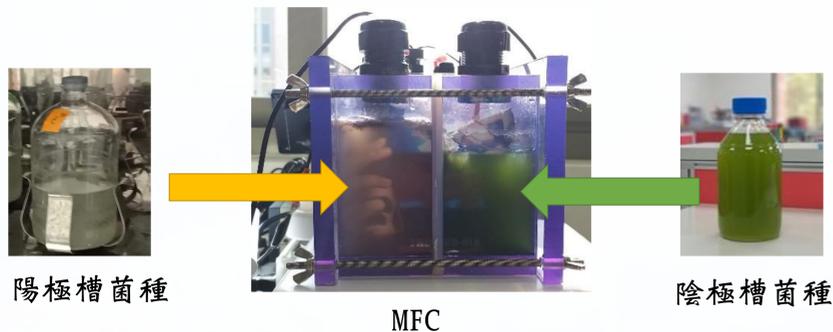
- 一、探討魚菜共生結合微生物燃料電池系統的連結性
- 二、探討產電效率較高且符合環境的微生物燃料電池

研究架構

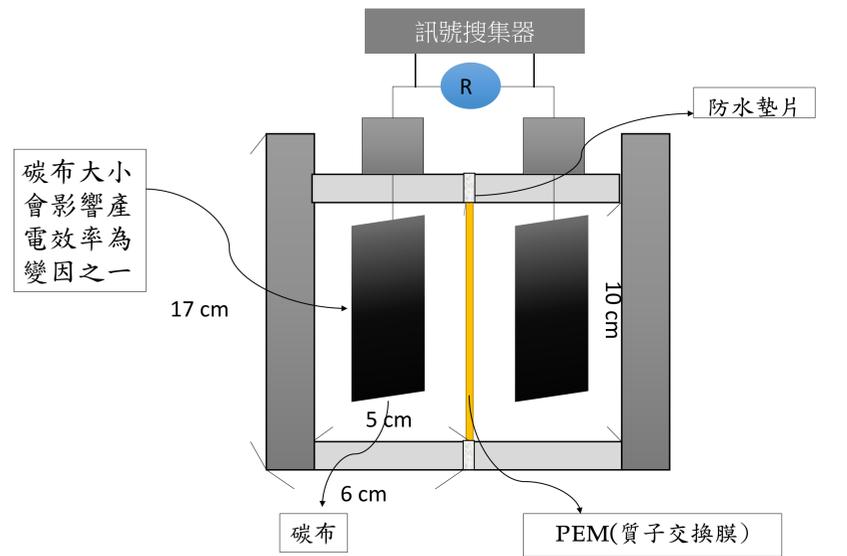
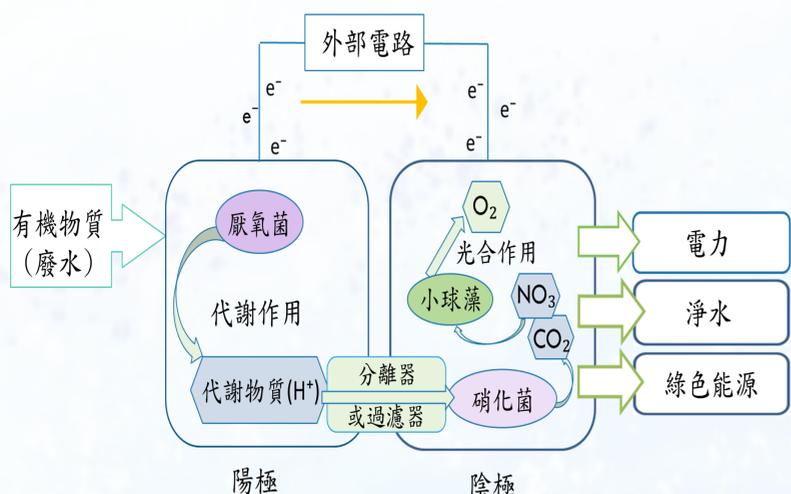


研究方法

微生物來源

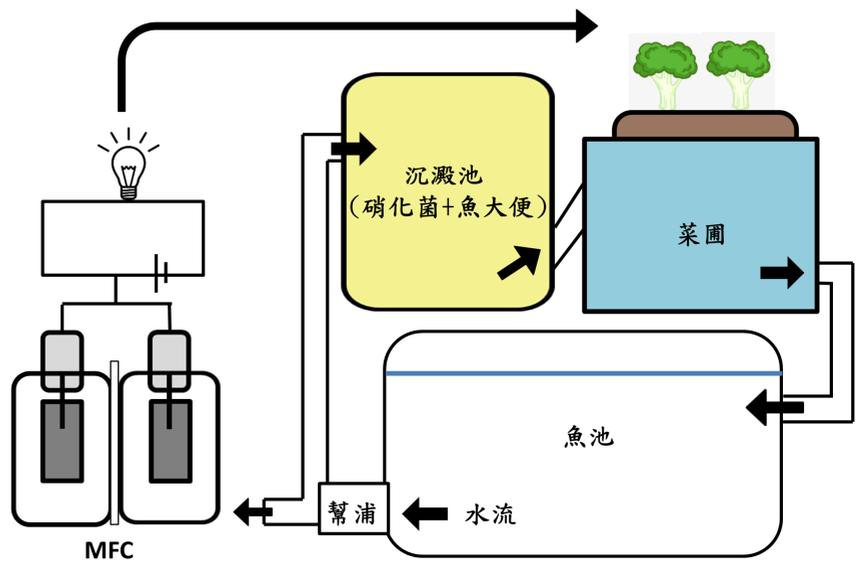


微生物燃料電池運作原理



本實驗採用雙槽型微生物燃料電池，槽體使用壓克力構成，外型為正方形結構，中間以質子交換膜相隔，兩槽上方均設有連接外部電路的孔洞，並於陽極槽上方裝有曝氣閥，以氫氣曝氣，製造厭氧環境。

MFC魚菜共生實驗構造設計圖



魚菜共生裝置實體圖



本研究設想以微生物燃料電池可降解銨鹽及降解COD的能力取代魚菜共生系統中沉澱池的功能，並可以額外產電，提高整體系統的價值。

魚菜共生系統裝置的架設

魚菜共生主要由三大要素所組成，分別是魚、植物、細菌，並仰賴水的循環形成一個系統，我們利用易於取得的塑膠盆與水管...等，在學校內架設了一個小型的魚菜共生系統。

設計要點：

1. 水循環設置
2. 水產及植物養殖
3. 過濾系統



微生物燃料電池的基礎條件最佳化

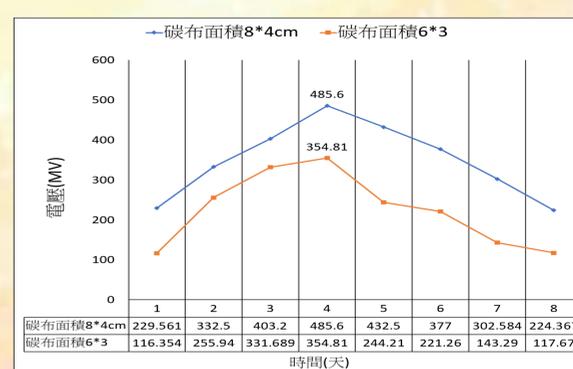
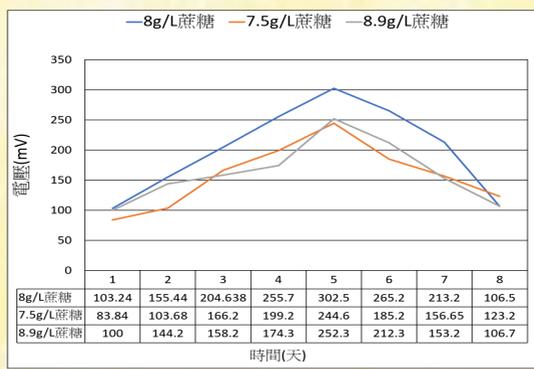
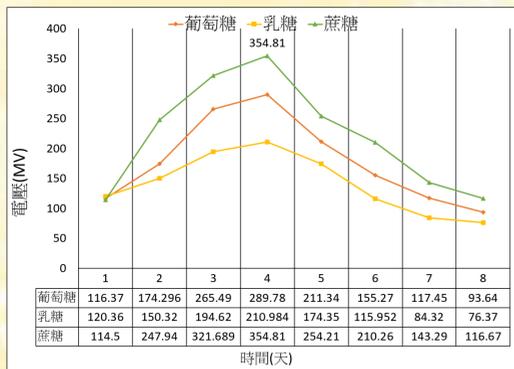


圖1、醣類基質對MFC產電效能之影響

圖2、蔗糖濃度對MFC產電效能之影響

圖3、碳布表面積對MFC產電效能之影響

- 由圖1可知，**蔗糖**基質之產電電壓最高。推測是陽極菌種內可分解蔗糖的酵素較多，或因為蔗糖是雙糖之緣故。
- 由圖2可知，**蔗糖濃度在8 g/L**時有最大產電電壓。我們原先假設蔗糖濃度越高，微生物的代謝作用越好，但由平時觀察MFC變化發現，並不是糖類濃度越高越好，而需要找到適當的濃度。
- 由圖3可知，**碳布表面積越大**，則產電量越高。MFC的運作原理是由電極接收微生物代謝過程中所釋出的電子，若增加微生物可附著的表面積，則能提高MFC接收電子的效率，提高產電效能。

微生物燃料電池的產電效能檢測



圖4、MFC產電電壓週期

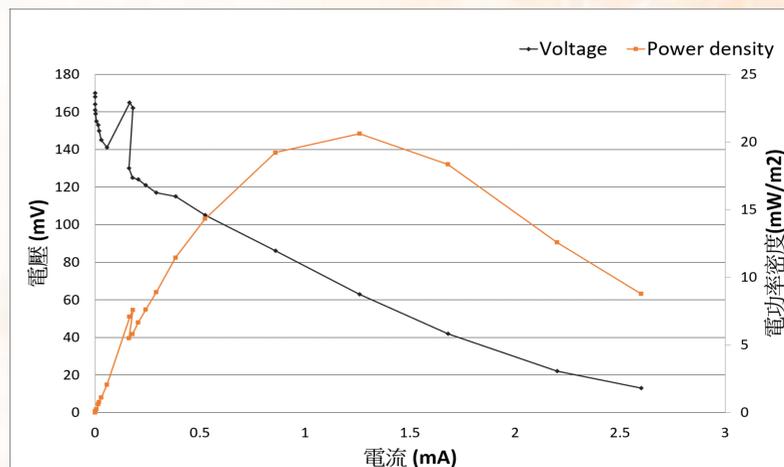


圖5、MFC極化曲線

- 圖4使用5000 DATA Acquisition System連接電腦輸出製成，可以看出MFC從極短的時間內達到最高電壓約**390毫伏特**，並可以維持其電壓值於340毫伏特約6天左右。
- 經極化曲線分析結果顯示，**內電阻值(Ω)為84.92歐姆**。從圖5可看出本實驗之MFC**電功率密度值最高達20.62 mW/m²**，**電流密度值675.3 mA/m²**；當內電阻值低時，電功率密度較高。

微生物燃料電池與魚菜共生的水質檢測

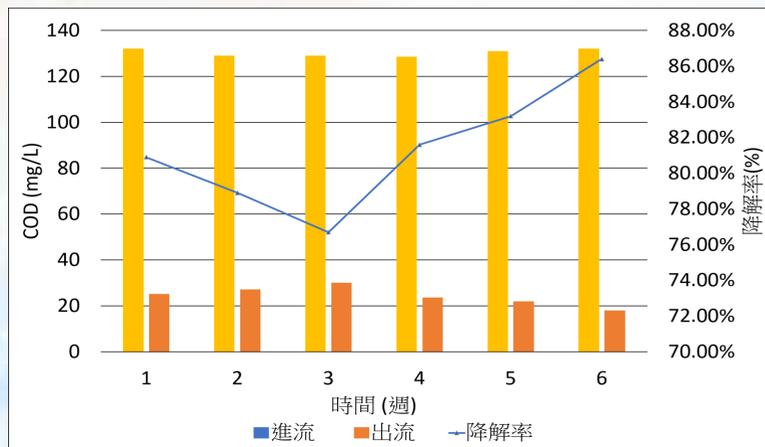


圖6、MFC之魚糞廢水COD降解率



圖7、NH₄-N含量變化圖

- 本檢測主要針對陰極槽藻類降解魚菜共生系統中魚糞廢水溶液的COD降解率。由圖6可知，每週COD平均進流值130.25 mg/L，MFC平均出流值為24.3 mg/L，**COD平均降解率達81.3%**。可以推得MFC確實具有降解有機物質的功能。
- 本檢測主要針對陰極槽藻類中所含NH₄-N的含量變化進行記錄，在操作過程中，我們以半批次實驗進行，每隔3-4日抽取15 ml的槽內溶液，並補充魚糞溶液，並測量其中含量，從圖7中可看出**NH₄-N含量逐漸降低**，符合預期結果。

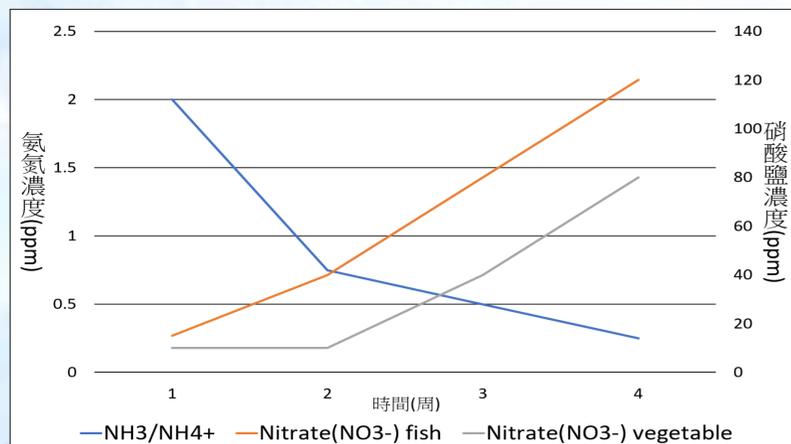


圖8、魚菜共生的水質變化

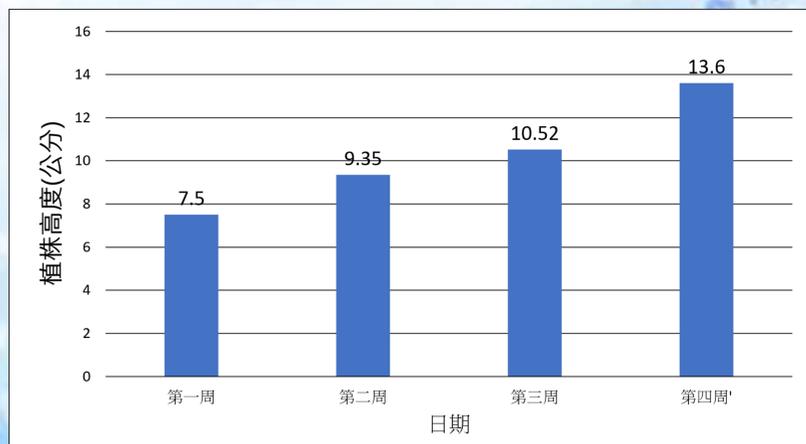


圖9、累積植株高度

- 由圖8可知，NH₃/NH₄⁺在水中的濃度經一段時間後逐漸下降；魚池與菜池內**硝酸鹽的濃度則逐漸上升**，與NH₃/NH₄⁺呈負相關，與預期相符。亦可看見魚池內的硝酸鹽濃度大於菜池。
- 由圖9萬苜植株高度的變化可以得知我們以本系統所種植出的萬苜可利用水中之營養源穩定成長。

研究結果分析

	陰極	陽極	平均工作電壓	製作成本	安全性
本次實驗製作最佳效率的半批次電池	小球藻	印泥火山菌 或產氫菌	0.3~0.4V (最高電壓0.7V)	低	高
以往的半批次電池 (第47屆科展作品)	鐵氰化鉀 溶液	酵母菌	0.6V	低	低

探討魚菜共生結合微生物燃料電池系統的連結性

根據本次實驗設計，我們可以將整個系統視為一個生態系，微生物燃料電池中的**微生物為分解者**，而魚菜共生中的魚與菜分別代表生態系中的消費者及生產者。反應槽中的小球藻可分解魚糞以取代原先在魚菜共生中的菌種，將魚類所排放的糞便分解成可供植物吸收的硝酸鹽類，並可**額外產電可增加產值**；反應槽可以**降低COD值和氨氮濃度**以達到淨化水質，維護朱文錦的生活環境，並協助沉澱池的硝化作用。

魚菜共生結合微生物燃料電池系統的發展性

本次的實驗為了將MFC推廣到實際應用的層面想了許多的辦法，最終決定將MFC與魚菜共生系統做結合，在校內架設系統並進行實驗。以MFC的產電量及萵苣的生長狀況研究此系統的發展性，並可知MFC的產電電功率密度為 $20.6182(\text{mW}/\text{m}^2)$ ，萵苣的生長狀況如右圖，我們推測本實驗有巨大的可行性，並且製作了SWOT圖。但在結合MFC與魚菜共生系統的完整性仍須多加研究，若未來能將MFC以**連續流**的方式操作，並控制兩槽電位在理想狀態，就可將魚菜共生的沉澱池與MFC的陰極槽結合成為**回饋系統**，進而提高一體性，如改良設計圖所示。



△ 萵苣生長狀況

	內部		外在
優勢	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可以節省水資源 2. 生產有機無農藥的蔬菜，並產出微薄電力 3. 以潔淨無汙染的方式淨化水質 	機會	<ol style="list-style-type: none"> 1. 若使用於降解經濟養殖漁業廢水可降低成本 2. 資源有效重複利用，具環保價值 3. 若能應用在大型的魚菜共生工廠內，則兼具經濟性價值
弱勢	<ol style="list-style-type: none"> 1. 系統完整性、效率仍有待提升 2. 陽極槽需另耗人力培養 	威脅	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因質子交換膜需經常汰換，故成本較昂貴 2. 若使用訂製壓克力槽體，則成本提高且不易推廣

文獻資料

1. 余菀婷(民95)·操作條件對微生物燃料電池性能之影響(未出版的碩士論文)·基隆：國立臺灣海洋大學河海工程學系。
2. 王思凱(民97)·燃料型態與有機負荷對微生物燃料電池績效之影響(未出版的碩士論文)·基隆：國立臺灣海洋大學河海工程學系。
3. 謝銘季(民102)·陰極槽藻類對微生物燃料電池產電之影響(未出版的碩士論文)·基隆：國立臺灣海洋大學河海工程學系。
4. 劉俊敏(民102)·低耗能木質纖維素酸水解與暗醱產氫之研究(未出版的碩士論文)·台中：逢甲大學。
5. 徐培庭(民104)·以自然光源作為能量來源之藍綠菌生物燃料電池產電效能評估(未出版的碩士論文)·台中：國立中興大學環境工程學系。
6. Logan, B. E., Rabaey, K., 2012. *Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies*. Science 337, 686-690.
7. B. E. Logan, et al., 2006, "Microbial Challenges and Fuel Cells Applications", Environmental Science & Technology, 40(17), pp. 5172-5180
8. Nuan Yang, Hong Liu a, Guo-qiang Zhan b, Da-ping Li. 2019 "Sustainable ammonia-contaminated wastewater treatment in heterotrophic nitrifying /denitrifying microbial fuel cell"

改良設計圖

