

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 化學科

第一名

最佳(鄉土)教材獎

040210

微生物電力公司—微生物燃料電池之變因探討

學校名稱：國立臺中女子高級中學

作者： 高二 何念萱 高二 陳昕臨 高二 張藍心 高二 劉瑞臻	指導老師： 徐孟君
---	--------------

關鍵詞：微生物燃料電池 進流養分 兩極間距離

摘要

生物燃料電池是近十年來備受重視的新型能源，其中又以微生物燃料電池最為受到重視，其所具備的低污染、高穩定、低成本等諸多的特性，恰好符合現代社會的需求。微生物燃料電池產電的原理，是利用微生物的新陳代謝所產生的電子，將微生物體中的化學能轉變為可利用的電能。

本研究以連續進流模式操作兩組微生物燃料電池，利用綠川廢水作為微生物來源；並以蒸餾水作為陰極槽內的基質，以沉水馬達曝氣後的溶氧作為氧化劑。探討兩極間距、養分種類、黑暗，對 500Ω 外電阻的微生物燃料電池的影響。

壹、研究動機

人類目前所發展出的能源生產方式，不但無法利用再生資源，甚至造成了許多污染。例如石油，就造成了二氧化碳的過度排放。

眾所周知，化石燃料即將在一個世紀內消耗殆盡，能源危機已成為一項嚴重的問題，各式各樣的替代能源不斷地被開發，其中有關生質能源的利用亦受到熱切的關注。在一次的網路搜尋中，我們在科學人雜誌的專欄上，發現了「微生物燃料電池」這項極具環保價值的專題研究。

微生物燃料電池不但材料容易取得，產生的廢液沒有污染性，且具有高能量密度、高轉換效率的優點。於是我們決定利用學校附近綠川中的微生物，以及一些容易取得的器材進行組裝，並測試其發電效果。

貳、研究目的

由於微生物燃料電池尚未發展完備，許多操作條件的效果並不明確，電極的搭配、材料的選擇、微生物的種類和養分的使用都尚未被深入的研究與探討。因此，若能改進操作技術、提升微生物燃料電池的效能，將會成為未來能源發展的新趨勢。

本實驗藉由探討兩極間距、養分以及黑暗對微生物燃料電池的影響，希望所得的結果可提升其產電效能。

參、研究設備及器材

一、器材

- (一) 開放式壓克力實驗槽(規格：10cm × 10cm × 60cm 厚度：0.1cm)
- (二) 碳織布(廠牌：航天複材)
- (三) 防水膠
- (四) 不鏽鋼絲
- (五) 不鏽鋼的螺絲+螺帽(註 1)
- (六) DataStudio 程式之電壓檢測器
- (七) 石墨粉
- (八) Tubing Pump 蠕動幫浦(廠牌：Millipore corporation，序號：F95007185)
- (九) 500Ω 電阻
- (十) 鱷魚夾
- (十一) 蒸餾水
- (十二) 綠川河水
- (十三) 沉水馬達
- (十四) 電子天平
- (十五) 矽膠管
- (十六) 容量瓶(500mL)
- (十七) 吸量管(5mL)

註 1：電極(如圖 1-1)的製作(陰、陽極皆使用碳織布作為電極)

(1)將碳織布裁為長寬各 10cm，並將其周圍用針線縫一圈。

(2)取一段適當長度的不鏽鋼絲，以螺絲釘固定於碳織布上。

(3)將裸露之螺絲釘以防水膠包覆。



圖 1-1 電極

二、試劑

(一) 葡萄糖溶液($C_6H_{12}O_6$) Glucose 0.54g/L

三、COD 檢測

(一) 消化管及其封口器

(二) 加熱板

(三) 分光光度計 U-2800 spectrophotometer HITACHI

(四) 消化液 每升 $K_2Cr_2O_7$ 10.216g、 H_2SO_4 167mL、 $HgSO_4$ 33.3g

(五) 硫酸銀(Ag_2SO_4) silver sulfate 25g/2.5L

四、以螢光顯微鏡測總菌數

(一) 福馬林 formaldehyde 38%

(二) 黑色濾膜 nucleopore, 25mm, 2 μ , SN: 110656

(三) acridine orange (1mg/mL)

(四) 無菌蒸餾水

(五) immersion oil(不含螢光者)

(六) 薄膜過濾裝置 Sartorius 16306

(七) 抽氣裝置

(八) 異丙醇($CH_3CHOHCH_3$) isopropanol

(九) 螢光顯微鏡 (Nikon)

五、平板計數法

(一) 酒精(C_2H_5OH) ethanol 70%

(二) fireboy

(三) 無菌操作臺

肆、研究過程或方法

一、原理

當微生物分解葡萄糖時，會釋出電子，這些電子還原 NAD，將能量儲存於 NADH，再經由 NADH 傳遞至一系列的膜蛋白——電子傳遞鏈 (electron transport chain)。

以能量的階層來看，最高位能的 NADH 釋出氫離子與電子並還原一個膜蛋白，且釋放能量；接著這個膜蛋白再將電子與氫離子傳遞至下一個膜蛋白，同時再釋放能量。如此經過一系列膜蛋白的傳遞之後，氧氣接受最後的電子，與氫離子結合還原為水分子 (如圖 1-2)。

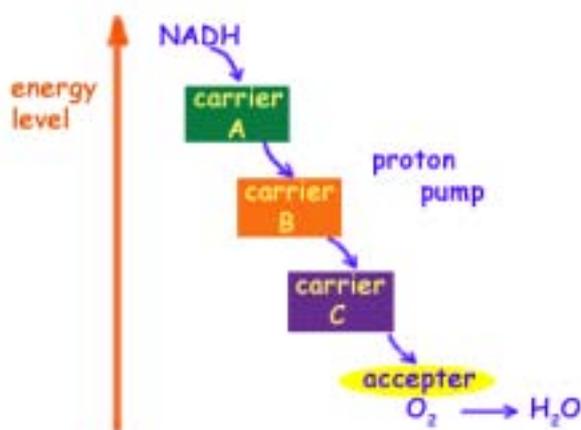


圖 1-2 電子傳遞鏈

因此，在缺乏氧氣的情況下，電子傳遞鏈會因為沒有接收者的存在而無法傳遞電子，造成能量無法釋放；此時若接通一電路到含氧量高的陰極槽中，電子便會被迫離開細胞膜，經由電路到達陰極並還原水中的溶氧。微生物燃料電池便是將微生物控制在無氧化劑的環境下，在其氧化有機物時，因周遭缺乏可還原的氧氣而釋出電子至電路中。

由於微生物燃料電池產電的機制，係利用微生物的新陳代謝反應，作為電池所需的氧化還原反應，因此在部分文獻中，認為微生物在此反應中所扮演的角色為催化劑。總而言之，微生物燃料電池就是以微生物作為媒介，將養分的化學能轉變為電能(如圖 1-3)。

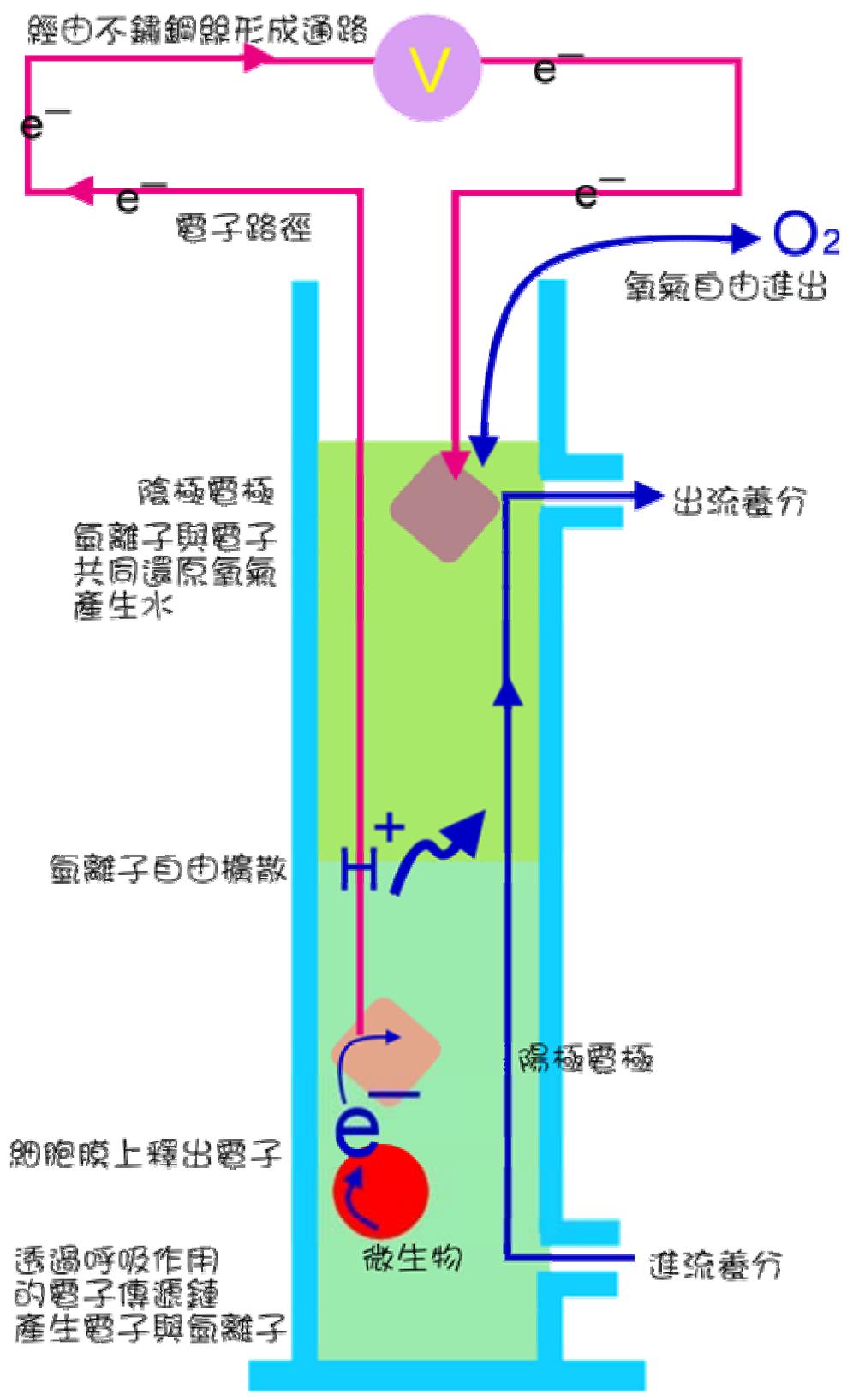
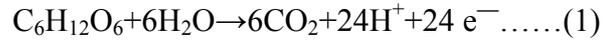


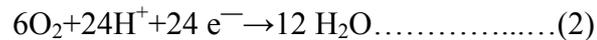
圖 1-3 反應機制圖

各反應方程式如下：

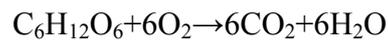
陽極中，養分以葡萄糖為例，所產生的氧化反應



電子及質子到達陰極還原氧氣



故總反應為(1)+(2)



基本上，微生物燃料電池中可發電的微生物只限於部分的細菌。與真核生物不同的是，細菌為原核生物，其電子傳遞鏈的位置在細胞膜上，電子易於攜出。理論上，所有的細菌應皆可作為微生物燃料電池的菌種，只是電壓大小差異相當懸殊，因為細胞膜上有肽鏈或肽聚醣等不導電物質，會阻礙電子在細胞膜上的傳遞。

二、基本裝置

- (一) 將兩條矽膠管的一端分別塞入壓克力槽上下的小孔，接上蠕動幫浦。
- (二) 取綠川廢水，並測其 COD 值。
- (三) 將廢水與碳粉混合後，與陽極電極一同置入壓克力槽，沉澱後碳粉高度為 30cm，並將陽極電極控制在高度 20cm 處，此部分為陽極。
- (四) 加入蒸餾水至約 50cm，在陽極上部加入蒸餾水，並置入沉水馬達和陰極電極，沉水馬達固定於液面，而陰極電極的高度為操縱變因，此部分為陰極。

(五) 連接電路，串聯 500Ω 電阻，以數位電壓計測電壓。

(六) 開始進流廢水(圖 1-4)，讓廢水中的微生物生長在陽極，待電壓趨於平穩後，即表裝置槽環境中的微生物負載量已達飽和，此時可以開始進行正式試程。

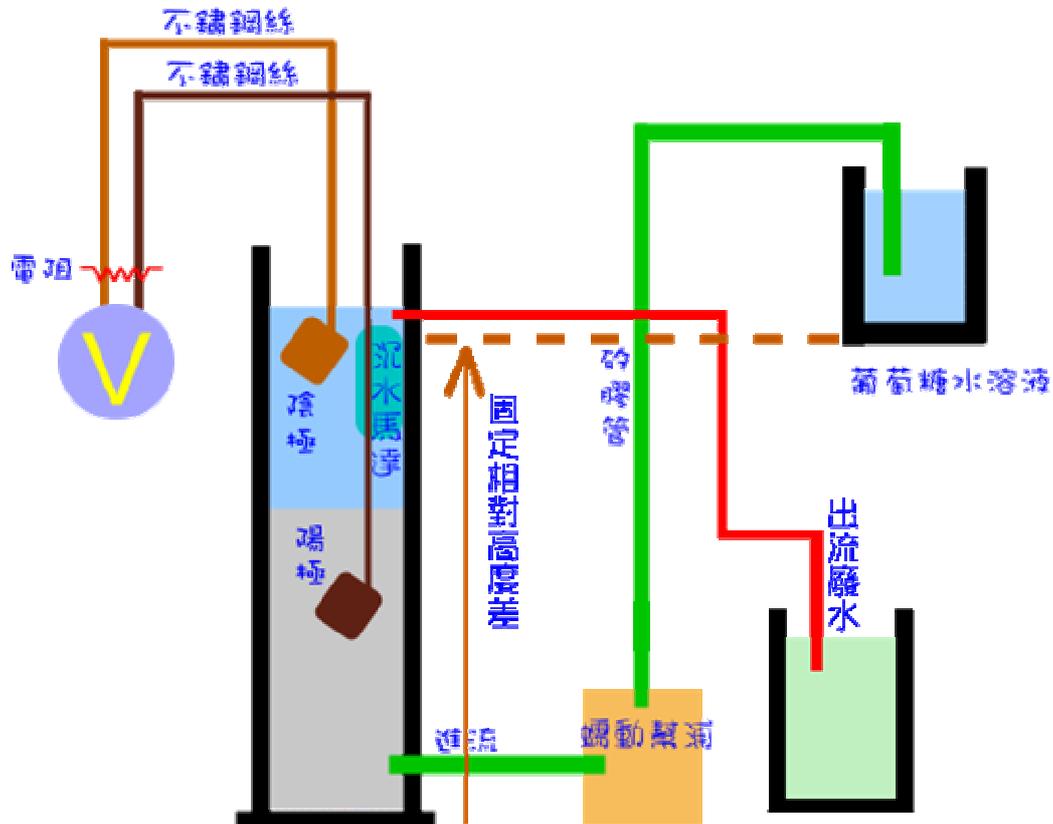


圖 1-4 微生物燃料電池的裝置槽

三、實驗裝置演進

(一) 裝置槽的演進

一開始，我們割開兩個 1000mL 的寶特瓶，以矽利康膠(silicone)相黏，然後在上下兩端各挖一小孔用來連接進出流的矽膠管，做出裝置槽 (如圖 1-5)。優點是成本低，製作容易，且十分環保；缺點是槽體形狀不一，很難控制，且又有漏水的問題。於是我們向廠商訂做兩個透明壓克力槽，規格是 10cm×10cm×60cm(如圖 1-6)，優點是槽體形狀固定，黏接部分較為牢固。



圖 1-5 自製的裝置槽

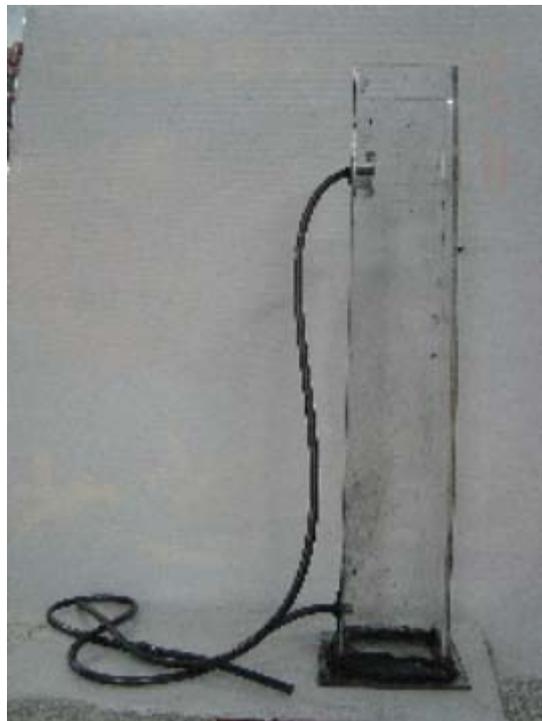


圖 1-6 訂做的裝置槽

為了控制進流速度與加快實驗的進行，我們同時進流兩個裝置槽(如圖 1-7)。



圖 1-7 兩個裝置槽同時進行試程

(二) 裝置相對高度的演進

最初，由於槽內水壓太大，蠕動幫浦馬力太小，無法將養分進流到裝置槽內，甚至有槽內的液體從矽膠管倒流出來的情形。

為了克服強大水壓的問題，利用「連通管原理」，進流養分的管口控制在比槽內液面高的位置，如此便成功的將養分進流至槽內(如圖 1-8)。



圖 1-8 裝置的相對高度

(三) 進流廢水 COD 比較

我們採集生活周遭易取得的廢水，並進行 COD 檢測，結果如表 1：

表 1 進流廢水的 COD

地點	COD(mg/L)
學校池塘廢水	74.67
柳川	43.00
綠川	92.11

因學校池塘廢水水量不足，且養分較少，所以我們決定以水量充足，有機物含量高的綠川廢水做為我們使用的廢水來源。

(四) 廢水菌數

綠川廢水



螢光顯微鏡計算菌數：
總菌數： 1.47×10^6 個/mL
活菌數： 7.69×10^5 個/mL
死菌數： 6.96×10^5 個/mL



平板計數法：
 3.55×10^6 cfu/mL

四、檢測法

(一) 電壓檢測法

1. 以 DataStudio 程式之電壓檢測器連續測量電壓，每五分鐘計一次，歷時五到七天為一組，並求其平均。

(二) 水質檢測法

1. 化學需氧量(COD)：以酸化後的重鉻酸鉀氧化水中的有機物，再用分光光度計及檢量線(如圖 2-1，2-2，2-3)得其化學需氧量，可表示水中可用化學方法氧化的有機物量。

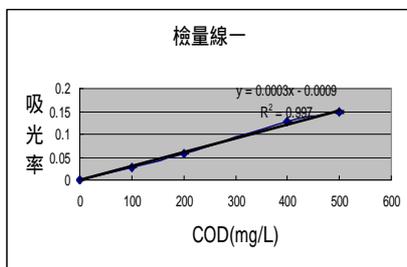


圖 2-1

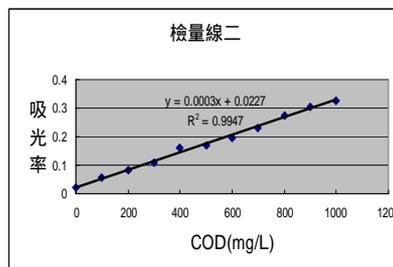


圖 2-2

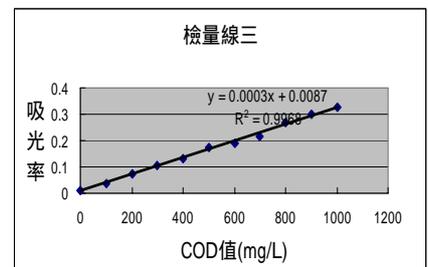


圖 2-3

(三) 總菌數的測定

1. 螢光顯微鏡觀察法(Direct Epifluorescent Filter Technique, DEFT)：將樣品用 acridine orange 染色後，在螢光顯微鏡下呈現綠色的為死菌，呈現紅色的為活菌。
2. 平板計數法：將水樣稀釋成稀釋系列，培養於培養基上，24 小時與 48 小時後，計算其生長菌落，即可得水中的菌數。

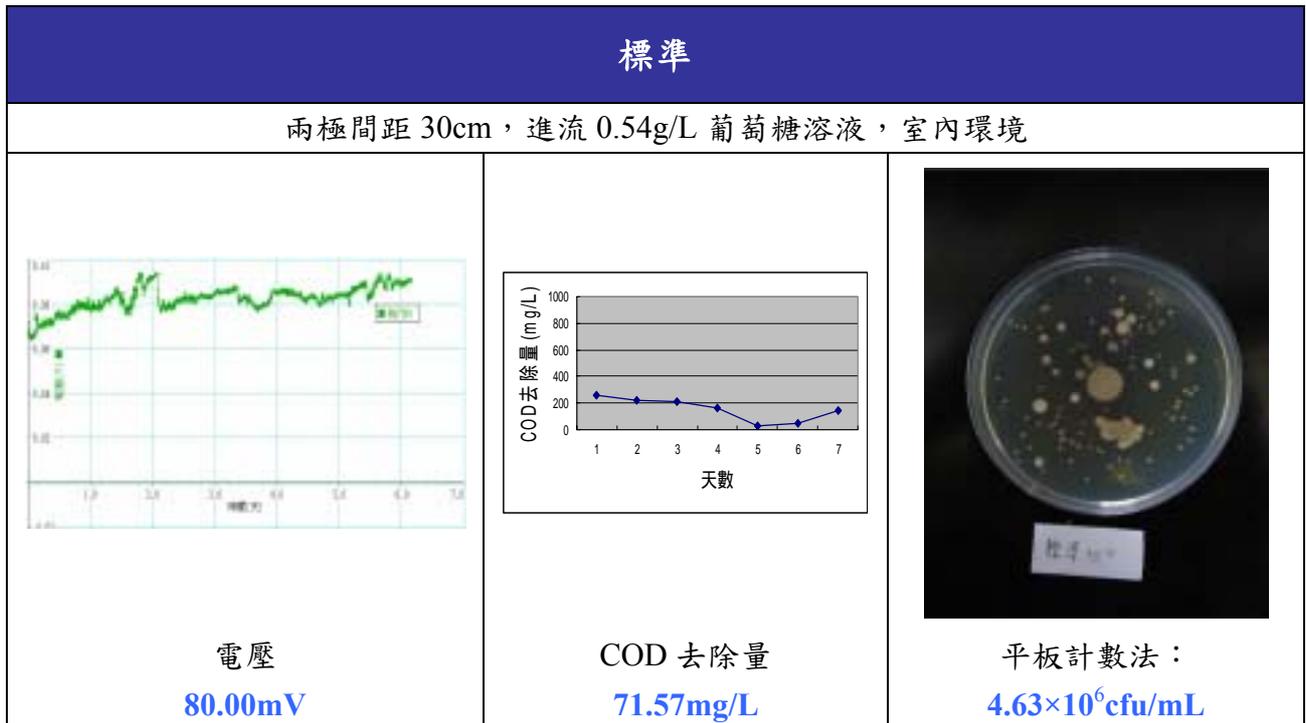
註：培養基的物理和化學條件無法滿足所有細菌的需求，所以測出的菌數量要比實際的少，但只要採標準化的步驟仍可以作比較。

伍、研究結果

一、標準狀態

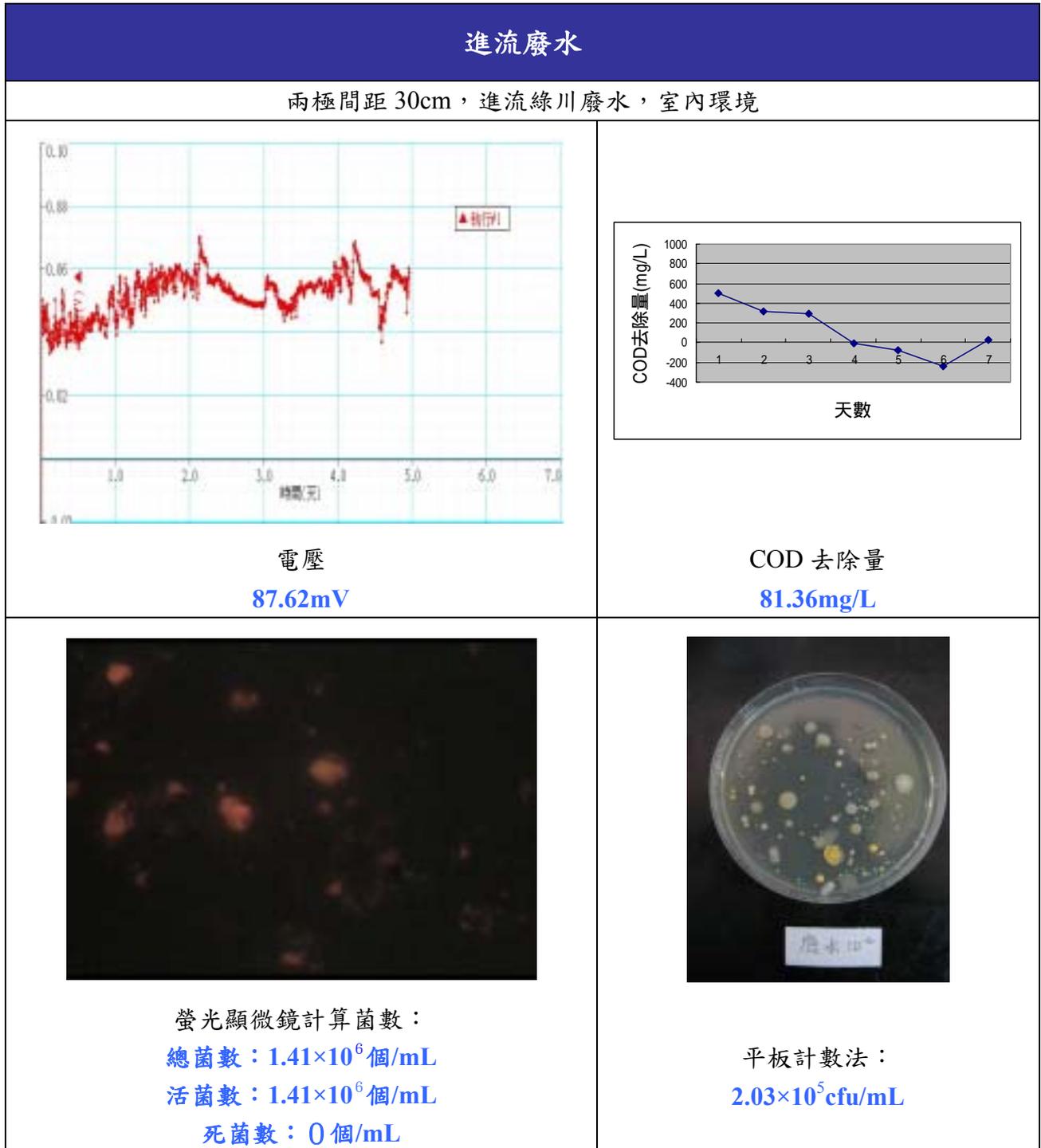
為了與各項變因比較，我們選定一個狀態作為標準，編號實驗 1：

在室內，以一定速率連續進流 0.03M 的葡萄糖溶液，兩極間的距離固定為 30cm，電極大小為 $10 \times 10 \text{cm}^2$ ，電阻 500Ω 。



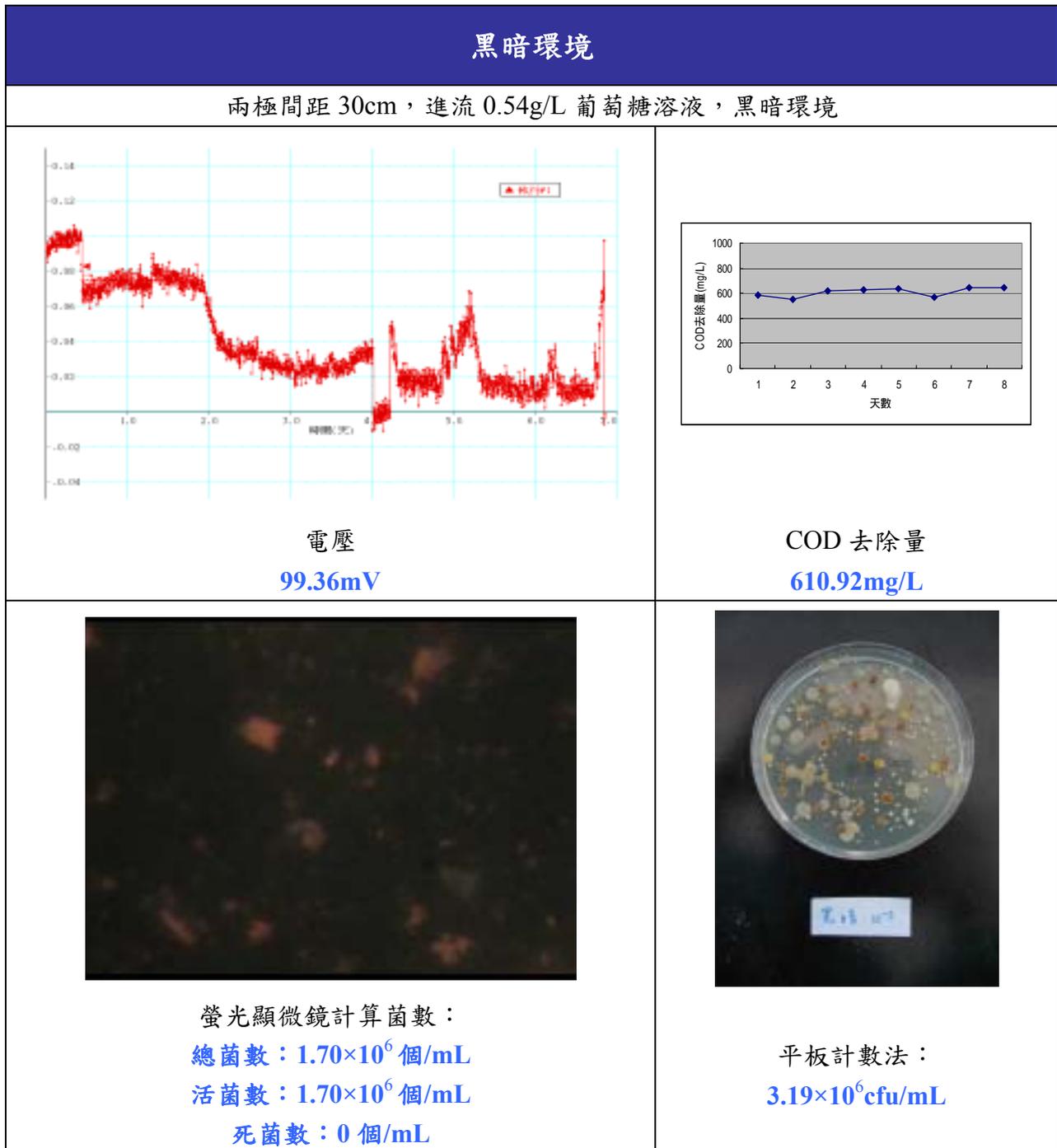
二、進流綠川廢水

為了比較以廢水和葡萄糖做為燃料的差異，故以固定速率進流綠川廢水，編號實驗 2，其餘變因皆與實驗 1 相同。



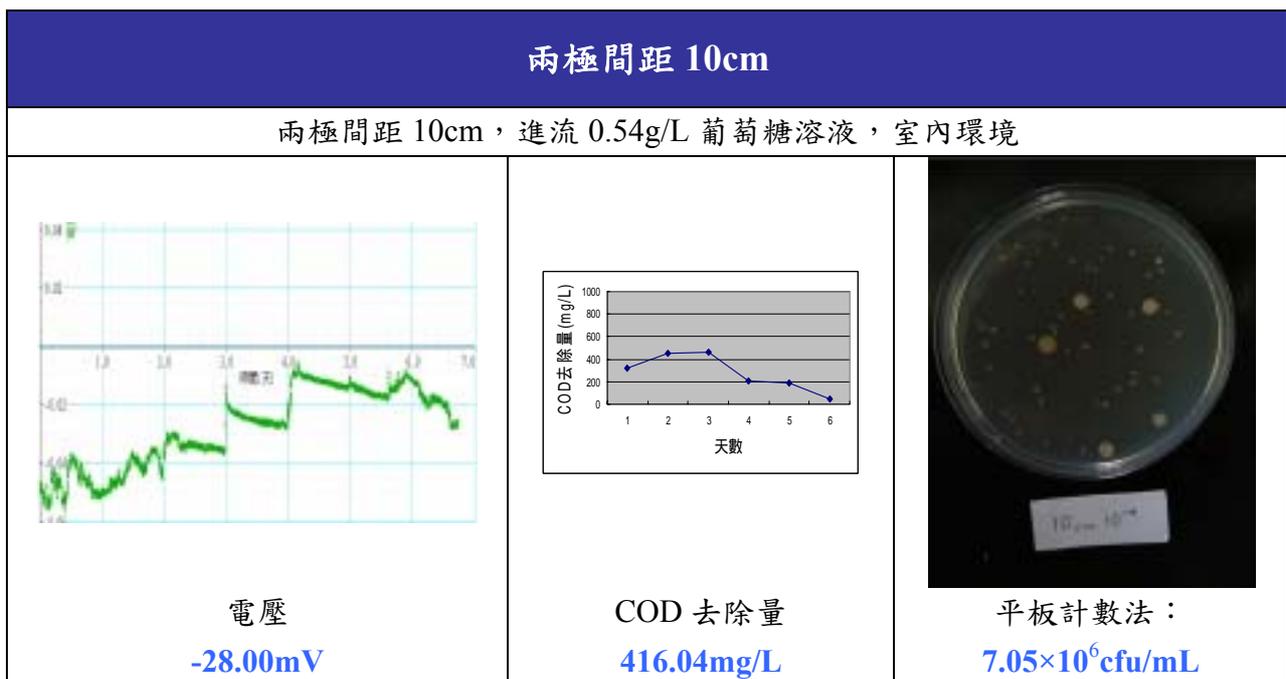
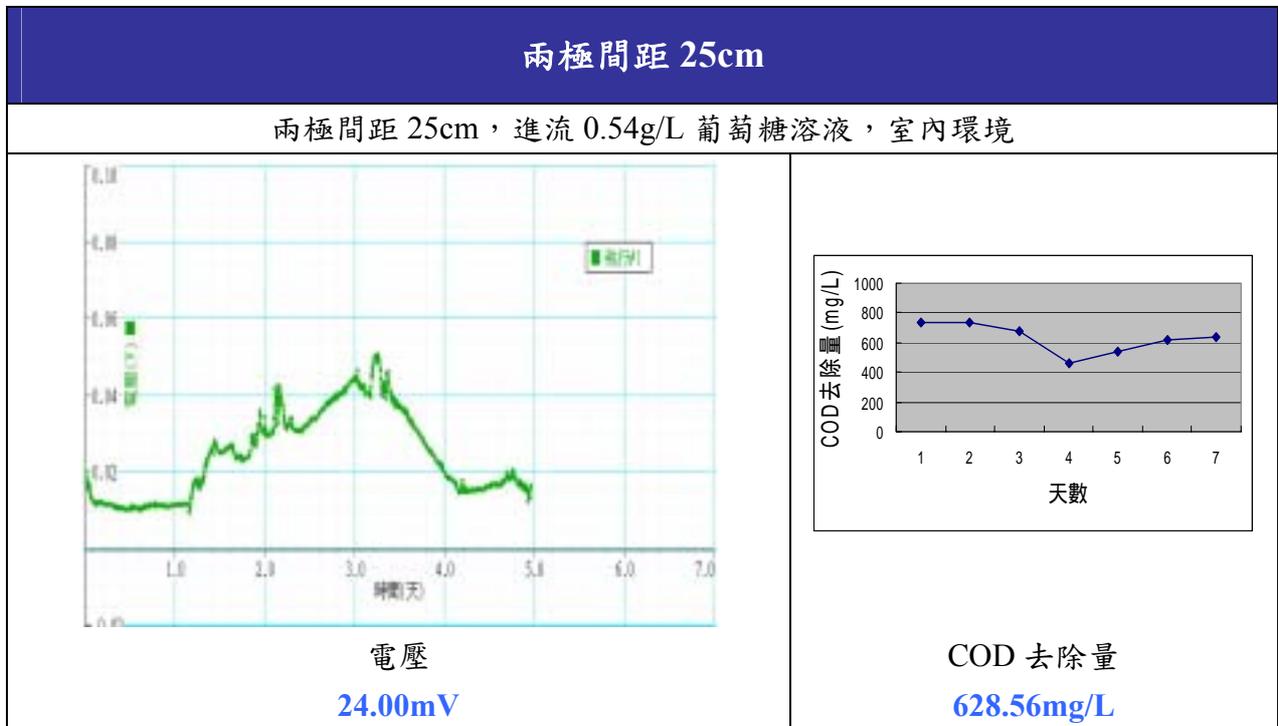
三、黑暗環境

為了測試光線對微生物電池的影響，我們以紙箱覆蓋實驗裝置，使環境變為完全黑暗，編號實驗 3，其餘條件與實驗 1 相同。



四、改變兩極間距

為了比較兩極間距對微生物燃料電池的影響，我們改變兩極間距為 25cm 和 10cm，分別編號為實驗 4 和實驗 5，其餘變因皆與實驗 1 相同。



陸、討論

一、微生物的因素

一般而言，河川中應含有細菌及其他微生物。其中，因為細菌的電子傳遞鏈 (Electro-transport system) 在細胞膜上，所以僅細菌能將代謝產生的電子帶出細胞膜，經電極收集後便形成電流。而細菌種類與基質的差異，會影響細菌攜出電子的能力，因此，選擇親電性 (electro-phile；註一) 高的菌種及適當的基質十分重要。

另外，提供正確的養分與環境可以使細菌順利地生長，影響的因素有：基質、細菌、養分之間的搭配、細菌將養分氧化的效果以及微生物的有機負荷等。

註一：所謂親電性高的菌種即是能快速傳遞電子於細胞及電極間的菌種。

二、電化學的因素

在一般電池中，影響電功率的因素有：氧化還原電位差、電解質種類及反應物濃度。對微生物燃料電池而言，氧化還原電位差最主要決定於細菌在細胞膜上的電子傳遞。

至於氧化劑以氧氣最為常見，因為氧氣還原後產生的水無毒且不改變環境，故在實驗中也採取氧氣做為氧化劑。

有關電解質的選擇則以導電度及不妨礙細菌生長為主，為了使控制變因，實驗中並未加入電解質，所以電解質種類並不影響我們的實驗結果。

反應物濃度對微生物燃料電池最重要的莫過於充足的養分及氧化劑。故本實驗中，進流養分控制在一充足的狀態。

三、實驗裝置的探討

本裝置為單槽式無電子梭型，養分採連續進流。為了使陽極槽中充滿養分，我們由陽極下方進流，出流於陰極上方，控制在每日 2.7L。為了避免陽極接觸氧氣，我們使用沉水馬達連續曝氣於陰極最上方。在實驗前置動作中，我們連續進流河川廢水數日以培養菌種，電壓呈現緩緩上升的現象，約一週後，電壓呈現一穩定值。為了解此時陽極內細菌生長的狀況，我們以螢光顯微鏡觀察，計算綠川廢水與陽極中的總菌數：廢水中的活菌數約為 7.69×10^5 個/mL，死菌數約為 6.96×10^5 個/mL；陽極中的活菌數約為 1.41×10^6 個/mL，幾乎沒有死菌。由此可知，此實驗裝置確實可以將死菌及廢物帶走，並提供細菌生長的環境。

就我們的過程而言，微生物燃料電池是一項操作十分繁複、成本高的燃料電池，雖然養分易取得、無污染，但環境控制不易，且完整的實驗過程須歷時約一個月左右，無法與一般電池相提並論。光是不同時間、不同地點、不同深度的廢水就有非常高的不穩定性。

分析完各項因素後，我們設計了三個變因，分別為兩極間距、黑暗、養分，以下根據本實驗的項目與結果作討論：

四、養分的探討

改變養分為葡萄糖及廢水所產生的電壓為 80.00mV 及 87.62mV；其 COD 去除量為 71.57mg/L 及 81.36mg/L。

養分與微生物的搭配是影響產電效果的重大因素，葡萄糖為生物體內最基本且最易利用的養分，廢水則擁有微生物所需的其他物質，例如金屬離子、核酸等，COD 去除量較高。同時，廢水因為內容物十分多樣化，可提供較多類型的細菌生長，但其中也可能含有未知的氧化劑，會直接接收細菌在陽極中釋出的電子，導致電壓降低。所以，養分的不同會影響電子的接收狀況、槽內的菌種組成以及細菌的生長情形。

我們採用平板計數法(Plate Count Method)，計算進流廢水與葡萄糖時陽極中的總菌數：進流廢水時約為 2.03×10^5 cfu/mL，進流葡萄糖時約為 4.63×10^6 cfu/mL，以進流葡萄糖為多。我們觀察培養基，發現進流葡萄糖的菌落大多為同一種呈現白色的菌落，而此

種菌落在進流廢水時數量較少，但在進流葡萄糖的培養基上明顯呈現優勢(如圖 3-1)。由結果推測，進流葡萄糖時槽內的細菌雖然數量較多，但此白色的優勢菌種產電效果較差，因此電壓較低；而進流廢水時的總菌數雖較少，但這些較多樣化的菌種產電效果較佳，因此可以產生較高的電壓(如圖 3-2)。

另外，我們推測不斷的進流葡萄糖溶液，會使環境改變，使細菌無法生存。若要長期進流葡萄糖，則須添加 NaCl、CaCl₂、KH₂PO₄、NH₄Cl 等細菌生長所需的鹽類。



圖 3-1 標準狀況



圖 3-2 進流廢水

五、黑暗環境的探討

微生物燃料電池在置入黑暗環境後電壓約為 99.36mV，較標準為高。推測可能原因有二：

- (一) 水中有兩類的細菌，一類為生長在陽極裡層，不需光源的細菌，即所謂化學異營菌(chemolithoautotrophy)；另一類為生長在表層，需光源的細菌，即光合異營菌(photoorganoheterotrophy)。當環境改為黑暗時，光合異營菌死亡，留下空間供化學異營菌生長。結果顯示，黑暗中的電壓較高，原因可能是菌數增加，或化學異營菌的產電效果較好。
- (二) 剛開始細菌行光合異營，環境轉為黑暗後，細菌改變代謝方式行化學異營。根據此假設，裝置中的菌種並無太大改變，而且細菌行化學異營的產電效果較好。但若發生以上狀況，需要在十分嚴苛的環境，就我們的裝置來說較不可能。

為了印證我們的假設，我們培養細菌，比較不同類型的細菌在黑暗及正常環境下的生長情形。結果顯示，正常環境下的菌數約為 4.63×10^6 cfu/mL，黑暗環境下的菌數約為 3.09×10^6 cfu/mL，兩者差不多。且由菌落外觀可知，黑暗環境有許多正常環境下較少的褐色菌落，即菌種明顯改變(如圖 3-3、圖 3-4)。所以，應是符合假設〈一〉：黑暗中，化學異營菌取代光合異營菌在槽中生長，且總菌數與正常環境差不多，所以應是化學異營菌的產電效果較好，使電壓增加。



圖 3-3 標準狀況



圖 3-4 黑暗環境

六、兩極間距的探討

改變兩極間距為 30cm、25cm、10cm 的狀況下，所產生的電壓分別為 80.00mV、24.00mV、-28.00mV；COD 去除量依次為 71.57mg/L、628.56mg/L、416.04mg/L。為了排除菌數可能對電壓的影響，我們進行平板計數法，結果：兩極間距 10cm 時總菌數為 7.05×10^6 cfu/mL，與標準狀況下相去不遠，因此可以確定，菌數不是影響兩極間距電壓的因素。

槽內的兩極間距可能影響電壓的因素有溶氧量與氫離子擴散速率。但是因為槽中氫離子的濃度極低，所以不是影響電壓的主因；至於溶氧量，根據勒沙特列原理 (Le Chatelier's Principle)，陰極槽表層接觸空氣且接近沉水馬達的位置，溶氧量較陰極槽底部高，有利於反應的進行。所以在兩極間距 30cm 時，溶氧量最高，氧氣被還原的狀況最為順利，電壓最高。至於兩極間距 10cm 時，陰極位置過於接近陽極，電子可能改變傳遞路徑，使電壓為負值。

但是，文獻中的實驗結果因為曝氣效果的不同，造成與我們的結果相違背。其所採取的曝氣裝置可均勻的將氧溶於陰極槽中，並且添加電解質，如 HCl，提高氫離子濃度；因此，與本實驗的裝置比較，文獻中所探討的變因以氫離子的擴散速率為重。

柒、結論

一、綜合本研究結果，可對以下三項變因作出結論：

- (一) 根據實驗結果顯示，兩極間距離越遠，電壓越高，主要原因是陰極槽內各高度溶氧量不均。
- (二) 進流廢水時產生的電壓較高，主要是此時的菌種發電效果較好；廢水能提供細菌較多方面的營養需求，因此 COD 去除量較高。
- (三) 黑暗環境下，化學異營菌有較多空間生長，又因其產電效果較光合異營菌好，因此電壓較標準為高。

二、未來發展

我們認為可由以下幾項對微生物燃料電池進行改進：

(一) 菌種與電子梭：

基本上，微生物燃料電池的產電效能最主要還是決定於可發電的菌種，可運用分子生物技術對菌種與電子梭進行改進。

(二) 陰陽極材料的選擇與加工：

大部分的微生物會附著在陽極電極上，所以可對電極進行加工，提供較完整的生長空間，或是提高其收集電子的效果。

(三) 兩極間的距離：

本實驗由於氫離子濃度極低所以沒有討論，但若增加氫離子濃度使反應加快，則氫離子濃度可變為一重要的影響因素。未來可配合氫離子濃度與曝氣效果找到產電效能最佳的兩極間距。

(四) 養分：

廢水能提供多種養分使微生物生存，而葡萄糖能使微生物產生較高的電壓，若能將兩種養分混合，或許能提升微生物燃料電池的產電效能。

(五) 體積縮小化：

為因應現代發展的需求，縮小電池的體積已是時代所趨，微生物燃料電池除了受限在電壓小之外，體積龐大也是一有待改進之處。

目前已知，微生物燃料電池已計劃應用於軍事海底探測器的電源：由於海底無法方便地更換電池，所以若能將海底底泥充分地利用，則能提供海底的軍事設施一穩定且不需更換的電源。

另外一項微生物燃料電池可應用的領域為小型的機械產品。由於近來鋰電池已不敷使用，微生物燃料電池若能取代鋰電池作為可攜式電源，手機、筆記型電腦等通訊器材有可能一個月內都不須充電。如此一來，小型的燃料電池將改變通訊技術的發展。引述一段文獻中的話：當你手機沒電的時候，加一匙砂糖到手機裡，哇！又有電了！

捌、參考資料及其他

余菟婷(民 95)。操作條件對微生物燃料電池性能之影響。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文，臺北縣。

許株綾(民 95)。探討操作參數影響高外電阻微生物燃料電池之績效。國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文，臺北縣。

Charles Choi(民 93 年 5 月)。垃圾變黃金—以細菌為動力，以污水為燃料！科學人雜誌網站。取自：<http://sa.ylib.com/news/newsshow.asp?FDocNo=475&CL=26>

Charles Choi(無日期)。細菌電池—看科學家如何用細菌來發電！科學人雜誌網站。取自：<http://sa.ylib.com/news/newsshow.asp?FDocNo=358&CL=26>

賴彥融(無日期)。金屬還原菌的前世今生。取自：http://www.e-safety.com.tw/1_main/103_learning/1037_news/ENS45/pdf/A1.pdf

陶光恆(民 94 年 5 月)。提昇環保工程價值的微生物燃料電池。工研院 IEK-ITIS 計畫。取自：<http://www.itri.org.tw/chi/services/ieknews/200509290113074EAB2-0.doc>

美科學家發明“細菌電池”細菌吃糖就有電(民 92 年 9 月 15 日)。大洋網。取自：<http://big5.southcn.com/gate/big5/www.southcn.com/tech/news/cl/200309150156.htm>

太平洋科技新聞組 Conney(民 92 年 9 月 9 日)。細菌=電池？美國國防部已對其虎視眈眈。取自：<http://arch.pconline.com.cn/news/importantnews/10309/216111.html>

微生物營養代謝與能量。<http://web.ncyu.edu.tw/~jgtsay/jg4-13-4.html>

厭氧呼吸(Anaerobic respiration)
http://science.scu.edu.tw/micro/1024/micro_encyc/09/04/001.htm

SRANDARD METHODS For the Examination of Water and Wastewater(1985)
16TH EDITION APHA AWWA WPCF。Page 537-538。

環境微生物實驗。環工系 李季眉編者。(民 81 年 2 月)國立中興大學教材。

微生物學實驗。環工系 編著。(民 77 年 9 月)國立中興大學教材。

污水分析實習教材 第三版。環工系 陳秀卿編著。(民 90 年 8 月)國立中興大學教材。

【評語】 040210 微生物電力公司—微生物燃料電池之
變因探討

本作品使用微生物菌種作成生物燃料電池切入角度極佳，在方法使用廢水作來源設計了陰極的基質與空氣溶氧作氧化劑，所以有獨特創新之處。本作品的發現可將廢水轉變為可用的電能，具有實用的價值。如果能對菌種與菌數對本燃料的效能有何影響且加以探討可以使本件作品的價值更高。