

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號

070003

參展科別

微生物學

作品名稱

第一電池-探討利用地衣共生真菌與藻類建構長
效微生物電池之可行性

就讀學校

新北市立安康高級中學

指導教師

莊瑞續

張雅菱

作者姓名

陳謙和

楊承叡

關鍵詞

微生物電池、地衣共生藻類與真菌、地衣晶球化電池

作者簡介



大家好，我們是陳謙和與楊承叡，目前就讀安康高中三年級，在高一時對於生物學的領域富有興趣，因而去參加了許多活動並學習相關知識，在高二時因為對於微生物以及能量代謝等等的研究主題有著興趣與探索的熱情，所以參與了科展的研究並共同發想以地衣為材料的「第一電池」，感謝莊老師與張老師的教導，也謝謝所有幫助過我們的人，希望未來能繼續在科學領域中學習和探索。

2025 年臺灣國際科學展覽會

區別：

科別：微生物學科

作品名稱：第一電池-探討利用地衣共生真菌與藻類建構長效微生物
電池之可行性

關鍵詞： 微生物電池、地衣共生藻類與真菌、地衣晶球化電池

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

摘要

本研究旨在探討如何利用地衣共生藻類與共生真菌天然的互利性來建構長效的微生物電池，此實驗將培養出的地衣共生真菌與藻類利用海藻酸鈉（SA）進行固化，並進一步製成不須添加質子交換膜的晶球地衣電池，並觀察其發電量。經觀察，本研究之地衣電池電壓高峰為 0.497 V，且目前已維持運作 1038 小時，電壓仍有 0.3 V。由上述可知，利用海藻酸鈉固化之方式能製作出穩定且高效能的地衣電池；而地衣取自於自然環境，亦不需添加質子交換膜，故對成本低廉且環境友善成本低廉，符合永續發展目標（SDGs）中的目標七：確保所有的人都可取得負擔得起、可靠、永續及現代的能源。期許未來能夠發展為具備實用性且低成本的綠色能源。

Abstract

This study aims to explore the development of a long-lasting microbial battery by utilizing the natural mutualistic relationship between symbiotic algae and fungi in lichens. In this experiment, the cultivated symbiotic fungi and algae of lichens were immobilized using sodium alginate (SA) to create spherical lichen batteries that do not require a proton exchange membrane, and their electrical output was observed. Observations indicated that the peak voltage of the lichen battery reached 0.497 V, and it has continued operating for 1,038 hours, maintaining a voltage of 0.3 V. The results indicate that the sodium alginate immobilization method facilitates the creation of a stable and efficient lichen battery. Moreover, as the lichen is naturally sourced and does not require a proton exchange membrane, this approach is cost-effective, environmentally friendly, and aligns with Sustainable Development Goal (SDG) 7: ensuring access to affordable, reliable, sustainable, as well as modern energy for all. This technology holds promise for future development as a practical and low-cost green energy solution.

壹、前言

一、研究動機與研究目的

能源的大量使用往往伴隨著環境汙染與社會成本，所以 2015 年聯合國提出的永續發展目標 SDGs (Sustainable Development Goals)，共有 17 個目標，其中目標 7 是確保所有的人都可取得負擔得起、可靠、永續及現代的能源（可負擔的潔淨能源）。因此開發綠色能源 (green energy) 又稱為清潔能源 (clean energy) 一直是近代科學家努力的方向。而大自然環境中，微生物是一個數量龐大且廣泛存在的微小生物，其本身在清潔能源的生產和利用中有特有的優勢（廖源，2019）。所以在研讀整理歷屆科展中微生物燃料電池的相關研究（表一）和研讀整理歷屆科展中藻類光伏特電池的相關研究（表二）後，經過互相驗證與討論後形成以下幾個想研究的方向。李(2020)在研究中指出，一般微生物電池多會使用到質子交換膜，來平衡陰陽極兩側的氫離子並避免微生物在兩極間移動，但因質子交換膜昂貴且在長期使用下容易因阻塞而造成電池內阻上升、壽命縮短。所以在微生物固化處理的技術日趨成熟的現在，微生物電池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，故此件作品將小球藻以瓊脂(AGAR)固定化技術取代質子交換膜製成固態光伏特電池來發電。這篇作品激發我們一個研究的方向：如果光伏特電池可製成固態電池，那酵母菌燃料電池是不是也可以做到。而後在經由文獻查找中發現，微生物固化技術除了用 AGAR 固定外，也有不少文獻是利用海藻酸鈉固定，因此本研究想進一步了解這兩種固定方法，何者較適合用來建立微生物電池。

當我們更了解藻類光伏特電池和酵母菌燃料電池後，本來最初研究方向是想整合利用光合作用的藻類光伏特電池和利用呼吸作用的酵母菌燃料電池，讓自營與異營微生物，建構成一個能互利共生的循環式微生物電池。

但後來我們進一步思考發現自然界中本就存在真菌與藻類互利共生的最佳範例—地衣。那我們能不能利用地衣共生真菌與共生藻類，將其分離培養出來後，利用兩者高度互利共生的特性，建立低成本且長效的地衣電池。

綜整以上幾個研究方向後本研究預期達成的研究目的有下列三項

- (一) 分離培養地衣中的共生藻類與共生真菌。
- (二) 比較用瓊脂(AGAR)或海藻酸鈉(SA)固化技術，何者較適合用來建構地衣電池。
- (三) 建構以地衣中共生藻類與共生真菌為主體的長效地衣電池。

表一、歷屆科展中微生物燃料電池的相關研究整理

來源	題目	陽極微生物	微生物培養方式
2014 年臺灣國際科學展覽會	綠色能源-天然微生物燃料電池之開發	酵母菌	葡萄糖溶液
中華民國第 52 屆中小學科學展覽會	酵中帶電－酵母菌燃料電池的初探	酵母菌	葡萄糖溶液
中華民國第 55 屆中小學科學展覽會	微生物燃料電池	酵母菌	椰子渣水解得到的葡萄糖溶液
中華民國第 57 屆中小學科學展覽會	石墨烯微生物燃料電池綠能研究	酵母菌	1.5M 葡萄糖溶液
中華民國第 59 屆中小學科學展覽會	食用酵母菌紙電池之探究	酵母菌	0.4M 葡萄糖溶液
中華民國第 61 屆中小學科學展覽會	酵母菌發電－單槽式微生物燃料電池的性質研究	酵母菌	混有石墨粉的糯米

表二、歷屆科展中藻類光伏特電池的相關研究整理

來源	題目	陽極微生物	微生物培養方式
中華民國第 53 屆中小學科學展覽會	藻出能源，發電我最行－探討影響藻類電池發電效率之影響	藍綠藻	營養液
2020 年臺灣國際科學展覽會	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	小球藻和特定共生菌	f/2 Agar
2021 年臺灣國際科學展覽會	Solar Powering Day and Night with Boxed Micro-Biosphere	小球藻及特定共生菌，硝化細菌	f/2 Agar

二、文獻回顧

(一) 生物光伏電池 (Bio-photovoltaic, BPV)

李(2020)指出最早的 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版來進行還原反應，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。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。

(二) 微生物燃料電池

微生物燃料電池是利用微生物的催化作用將化學能轉換成電能的生物電化學系統(bio-electrochemical system)。早在 1911 年，微生物燃料電池即被英國植物學家 Potter 提出，Potter 發現含有代謝作用的微生物燃料電池槽與含有無菌鹽類溶液槽之間會有電位差。因此 Potter 在玻璃罐中加入培養液，並在二極內均放入白金電極，其中一極放入多孔性材料並接種微生物，獲得量測電壓後，在兩槽間加入電阻以便能獲得電流，證明可藉由微生物產生電壓及傳輸電流，自此揭開生物燃料電池的序幕。在 1931 年 Cohen 延伸 Potter 的概念，嘗試以大腸桿菌 (*Escherichia coli*) 批次式的微生物燃料電池提高效能。隨後因為理論問題及技術層面無法克服，導致相關研究進展緩慢。直至 1970 年代受到石油危機的影響，生物燃料電池的發展再次受到各國學者的重視 (史、林，2015)。

(三) 微生物固化技術

自從固定化技術問世以來，固定化技術正在以空前的速度向前發展，並不斷完善。如今已涉及到酶固定化，細胞，微生物，動物，植物固定化，原生質體固定化，其固定方法也是多種多樣，包括吸附法、包埋法、結合法、交聯法以及後來出現的無載體固定法等。但是目前研究較多的是包埋法固定化技術，且其應用也比較成熟。包埋法是將酶或細胞包埋多孔載體內部而製成固定化酶或細胞的方法。根據壁材和方法的不同，分為凝膠包埋法和半透膜包埋法。凝膠包埋法是將細胞包埋在各種凝膠內部的微孔中而使細胞固定的方法。半透膜包埋法是將細胞包埋在由各種高分子聚合物制成的小球內而使細胞固定的方法(肖等人, 2002)。在目前生物應用上，利用海藻酸鈉包埋的凝膠機械強度較好，內部成多孔結構，對生物的毒性較小，其應用比較廣泛，而海藻酸鈉(Sodium alginate)是提煉自褐藻的化學物質，為一種直鏈狀、多醣類的天然高分子聚合物，易溶於水，水溶液的黏度因聚合度而不同，其分子式為 $(C_6H_7NaO_6)_n$ ，是由甘露醣醛酸(M)和葛蘿酸(G)這兩種結構單元以三種方式不同比例(M-M 段、G-G 段和 M-G 段)通過 α -1, 4 糖苷鍵線性鏈接所組成的共聚物。當海藻酸鈉與氯化鈣溶液混合，鈣離子會取代鈉離子，並且抓住海藻酸鈉分子之間的羧基產生交聯作用(cross-linking)使得分子間的連結性更強，形成網狀的結構，溶液流動性降低而固化形成一種半透膜。海藻酸鈉由於具有濃縮溶液、形成凝膠和成膜的能力，用途廣泛，經常做為增稠劑、穩定劑等(陳、沈等人, 2013)。海藻酸鈉晶球製作方法就是將菌懸浮液加入海藻酸鈉溶液中充分混勻，然後用注射器將其滴入一定濃度的氯化鈣溶液中，得到白色晶球體，洗淨備用。

(四) 微膠囊固化法

微膠囊化技術是利用天然或合成的高分子材料，把液體、固體甚至氣體包裹起來，藉由壁材的包覆提供心材與外界環境間的物理屏障，能賦予心材以往所沒有的特性，在食品、紡織、化妝品、造紙、醫藥、生物技術、農藝、畜牧等領域中都可以應用。在食品的應用上，更使許多以往做不到的事情變成可能，並把傳統的技術加以簡化，對於食品產業技術水準的提升與高價值產品的開發，有極大的貢獻。微膠囊化能改變物料的狀態，隔絕外界環境的影響，提供使用的方便及貯藏的安定(金, 2009)。

(五) 地衣

地衣是真菌和綠藻門或藍綠菌的共生體，一般呈灰白、暗綠、淡黃、鮮紅等多種顏色，長在乾燥的岩石或樹皮上，可依形態分成枝狀地衣、葉狀地衣與殼狀地衣（圖一）。光合作用的綠藻（或藍細菌）提供營養物質，真菌（通常屬於子囊菌門，少數屬於擔子菌門）提供水、礦物質以及保護功能，防止水分過度蒸發。而在結構上，地衣體一般可分為上皮層、藻胞層、髓絲層及下皮層（圖二）。

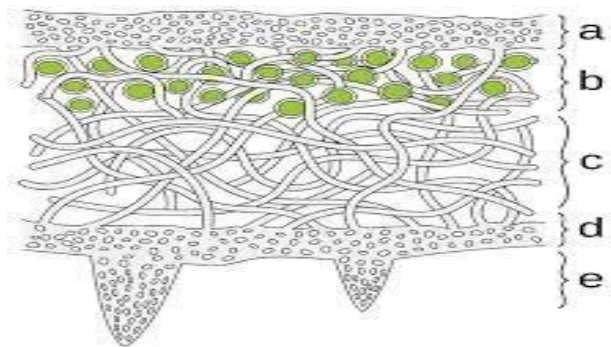
上下皮層：由菌絲緊密交織而成，特稱為假皮層，下皮層一般能長出假根。

藻胞層：上皮層的下部，在排列疏鬆的藻胞層之間夾雜有許多藻細胞，這些細胞成層排列稱異層細胞，若散生則稱為同層細胞。

髓絲層：藻細胞下面為髓層，由較疏鬆而粗大的菌絲體交織而成，專門貯存空氣、水分。



圖一、地衣外觀圖
(由作者於校內拍攝)



圖二、天然地衣結構示意圖，a、d 為上下皮層，
b 為藻胞層，c 為髓絲層，e 為假根(圖片來源取自於維基百科)

(六) 地衣應用性

地衣作為指標植物的應用價值主要體現在以下幾個方面：

1. 地衣對空氣污染物如二氧化硫等非常敏感,在含有二氧化硫的區域,地衣會立即枯死。因此可以利用地衣的生長情況來判斷空氣污染程度。
2. 地衣對空氣汙染非常敏感，故可作為空氣汙染的指標生物。透過觀察地衣的生長情況，可以判斷空氣汙染的程度，並制定有效的環境保護措施，減少汙染對環境的影響。
3. 地衣中的真菌可提煉出各種抗生素與地衣酸。北美印第安人與北歐人常以地衣作衣物染料，創造出各種獨特的天然顏色。愛斯基摩人則以地衣作馴鹿飼料。

貳、 研究方法或過程

一、研究設備與器材

- (一)、器具：手術刀、燒杯、筆刷、無菌操作台、滅菌膠帶、研鉢、鑷子、培養皿、微量離心管、微量吸管、玻璃滾珠、錐形瓶、封口石臘膜 (parafilm)、培養皿、量筒、細胞計數器、攪拌棒、注射針筒、血清瓶、剪刀、鑽孔器、尖嘴鑷、不鏽鋼網、電線、SUS 304 不鏽鋼網電極版 (面積 $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ 、100 目)、碳布 (面積 $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$)、方形組培盒 ($7.5 \times 7.5 \times 10 \text{ cm}$)、焊錫槍。
- (二)、設備：去離子水過濾系統、高溫高壓滅菌鍋、振盪培養器、植物培養箱、數位蹺蹺板式振盪器、夜間攝影機、三用電表。
- (三)、試劑：氯化鈣、海藻酸鈉
- (四)、培養基：AGAR、Potato Dextrose Broth (PDB) 成分如表三、Blue Green Medium (BG11) 成分如表四
- (伍)、實驗材料：麩皮石蕊地衣(*Cladonia ramulos*) (圖三、圖四)



圖三、本實驗用地衣體與原生環境圖
(由作者親自拍攝)



圖四、本實驗用之地衣(由作者親自拍攝)

表三、PDB 培養基內含成分

Potatoes , infusion from	200.000 g
Dextrose	20.000 g
Final pH (at 25°C)	5.1±0.2

表四、BG11 培養基內含成分

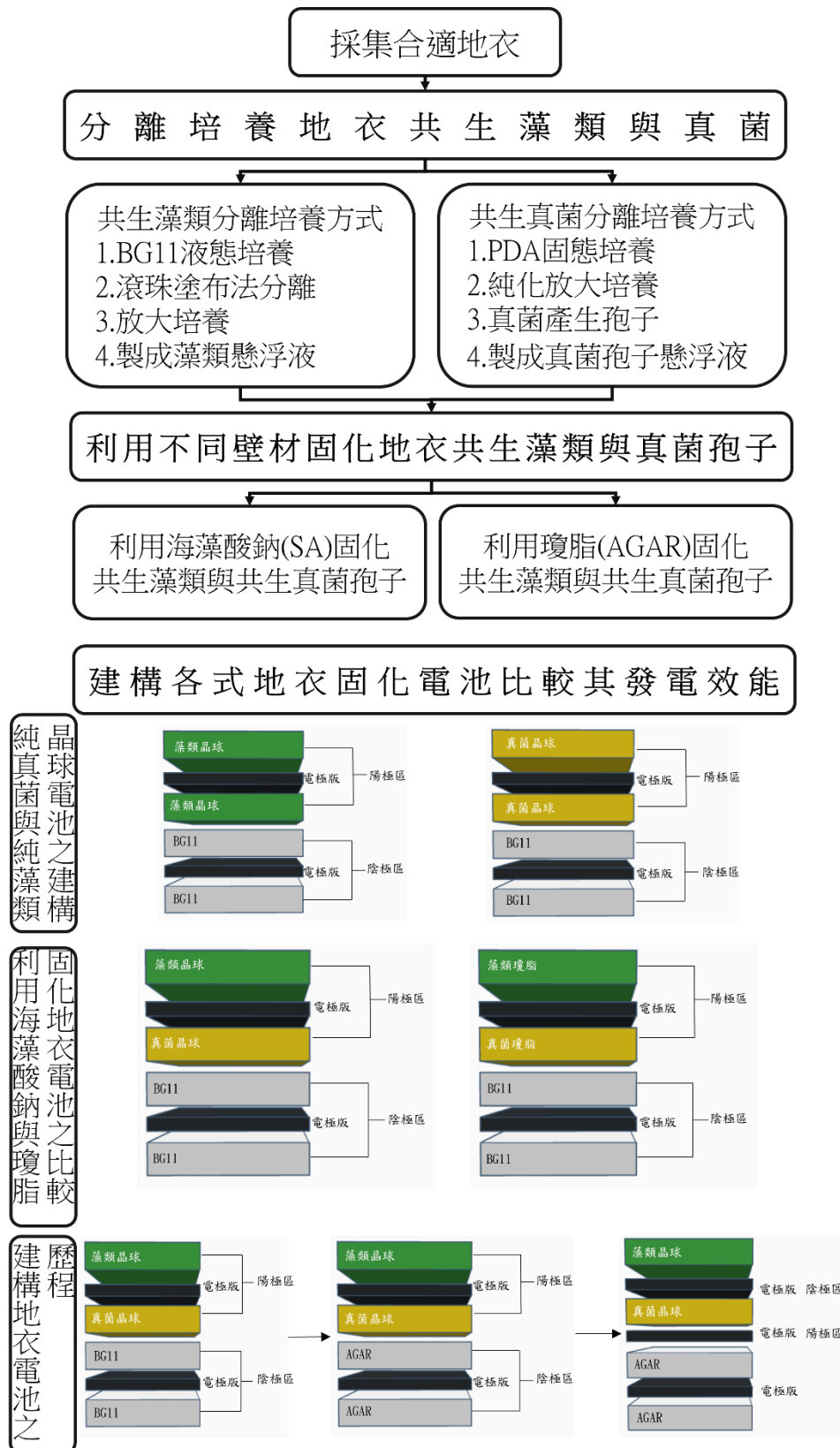
Ingredients Gms / Litre:

Sodium nitrate (NaNO_3)	1.5 g
Dipotassium hydrogen phosphate (K_2HPO_4)	0.040 g
Magnesium sulphate , heptahydrate (MgSO_4)	0.075 g
Calcium chloride dihydrate	0.036 g
Citric acid	0.006 g
Ferric ammonium citrate	0.006 g
EDTA , disodium salt	0.001 g
Sodium carbonate	0.020 g
Trace metal mix	1.000 ml

Trace metal mix Gms / Litre:

Boric acid (H_3BO_3)	2.860 g
Manganese chloride , tetrahydrate	1.810 g
Zinc sulphate , heptahydrate	0.222 g
Sodium molybdate , dihydrate	0.390 g
Copper sulphate , pentahydrate	0.079 g
Cobalt nitrate , hexahydrate	0.0494 g
Final pH (at 25°C)	7.1

二、 研究流程



圖五、實驗流程圖(由作者親自製作)

三、研究方法

(一) 分離培養地衣中的藻類與真菌

1、分離培養地衣中的共生藻類

步驟一、從地衣體頂端切下約 1 cm³。

步驟二、放在自來水中浸泡 5~10 分鐘，如圖六(a)。

步驟三、用畫筆刷在流動的自來水中清理地衣體表面，如圖六(b)。

步驟四、移至無菌操作台並用無菌水清洗。

步驟五、將清洗後的地衣體在無菌操作台中用研鉢磨碎成地衣碎塊，並放置於裝有液態 BG11 的離心管中培養，待其生長 3-5 天，如圖六(c)。

步驟六、使用微量吸管取 0.5 ml 藻類溶液，置於固態 BG11 培養基上，並用玻璃珠在培養基上滾動，以均勻將藻類懸浮液塗布於 BG11 培養基上，如圖六(d)。

步驟七、將固態培養的地衣藻類利用白金絲棒移植至 50 ml BG11 中並置於植物培養箱中搖晃培養。

2、分離培養地衣中的共生真菌

步驟一、從地衣體頂端切下約 1 cm³。

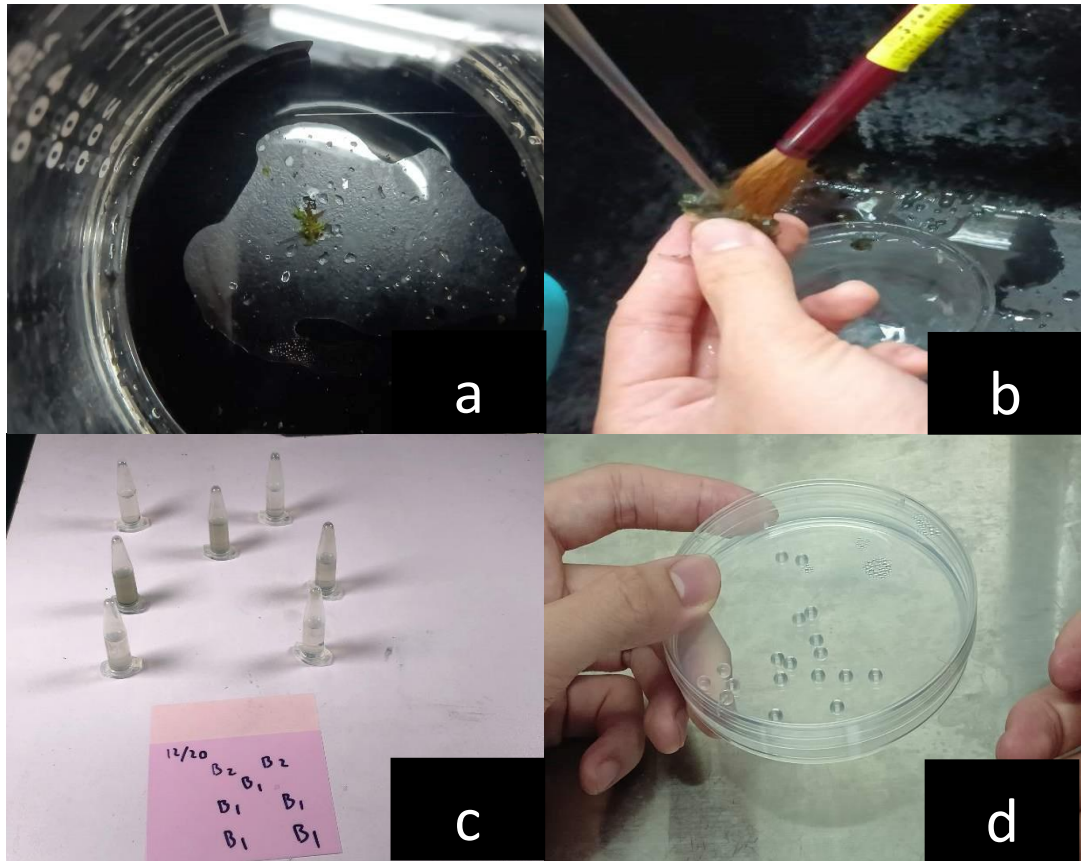
步驟二、放在自來水中浸泡 5~10 分鐘。

步驟三、用畫筆刷在流動的自來水中清理地衣體表面。

步驟四、移至無菌操作台中並用無菌水清洗。

步驟五、將清洗後的地衣體用研鉢磨碎成地衣碎塊，並置於多盤 PDA 培養基上，在 30 °C 下培養 24 小時。

步驟六、從盤上挑選外觀有明顯差異的單一菌落做純化培養。



圖六、清洗並培養地衣中藻類之過程。(a)浸泡清洗中的地衣體。(b)於流動自來水中刷洗的地衣體。(c)於微量離心管中液態培養的共生藻類。(d)利用滾珠塗佈法固態培養共生藻類。(由作者於校內拍攝)

(二) 利用不同壁材固化地衣共生藻類與共生真菌孢子

1、藻類懸浮液

步驟一、將液態培養的藻類溶液在無菌操作台中利用量筒量至 333ml 並置於燒杯中

步驟二、利用細胞計數器計量其濃度。

步驟三、333 ml 濃度為 6×10^6 cell/ml 的藻類溶液加入 333 ml 的 BG11 使濃度稀釋成 666 ml 濃度為 3×10^5 cell/ml 的藻類懸浮液，其中 225 ml 的藻類懸浮液分配給 AGAR 固化版地衣電池，441 ml 的藻類懸浮液分配給海藻酸鈉固化版地衣電池

2、真菌孢子懸浮液

步驟一、準備真菌培養基 6 盤並移至無菌操作台中。

步驟二、各加入 10 ml PDB 後水平搖晃將孢子搖勻至溶液中再倒至量筒內，總得 60 ml 真菌孢子懸浮液（圖七）。

步驟三、利用細胞計數器計量其濃度。

步驟四、將 60 ml 濃度為 1×10^9 cell/ml 的孢子懸浮液加入 540 ml 的 PDB 使其形成 600 ml 濃度為 1×10^8 cell/ml 的孢子懸浮液，其中 225 ml 的真菌孢子懸浮液分配給 AGAR 固化版地衣電池，375 ml 的真菌孢子懸浮液分配給海藻酸鈉固化版地衣電池。

3、利用海藻酸鈉為壁材製作品球

步驟一、將 40.8 g 海藻酸鈉加入至 816 ml 無菌水當中加熱溶解形成 5 % 海藻酸鈉溶液並高溫高壓滅菌。

步驟二、秤取 30 g 無水氯化鈣，溶於 1000 mL 蒸餾水中，配製成 3 % 的氯化鈣溶液並高溫高壓滅菌。

步驟三、將 441 ml 的藻液加入至 441 ml 的海藻酸中，使其形成 882 ml 的混合液。

步驟四、將 375 ml 的孢子懸浮液加入至 375 ml 的海藻酸鈉中形成 750 ml 的混合液。

步驟五、利用注射針筒將兩種混合液個別滴入兩杯氯化鈣溶液中使其形成晶球（圖八）並個別量測藻類晶球與真菌晶球的重量。



圖七、孢子懸浮液製作過程(由作者於校內拍攝)



圖八、海藻酸鈉晶球擠出法之過程
(由作者於校內拍攝)

4、利用瓊脂為壁材製作品球

步驟一、將 22.5 g 瓊脂加入至 225 ml 無菌水當中加熱溶解形成 2 %瓊脂溶液並高溫高壓滅菌。

步驟二、將 75 ml 藻類懸浮液與 37.5 ml 45°C 尚未凝固的 AGAR 混合並攪拌均勻。

步驟三、將 75 ml 孢子懸浮液與 37.5 ml 45°C 尚未凝固的 AGAR 混合並攪拌均勻。

(三)、建構各式地衣固化電池比較其發電效能

1、建構以固態 BG11 為陰極的第一代地衣電池

步驟一、將 7.5×7.5×10 cm 的方形組培盒在蓋子的對角處用鑽孔機鑽洞並高溫高壓滅菌後移至無菌操作台。

步驟二、將面積 5.5× 5.5 cm²、孔徑 100 目的 SUS 304 不鏽鋼網電極版利用鉚錫槍與電線焊接在一起，如圖九(a)。

步驟三、將 361 g 真菌晶球和 389.7 g 藻類晶球平均分配至各電池中，如圖九(b)，其中 240 g 真菌晶球與 259.8 g 藻類晶球分配給純真菌電池與純藻類電池，120 g 真菌晶球與 129.9 g 藻類晶球分配給陰極為固態 BG11 的地衣電池。

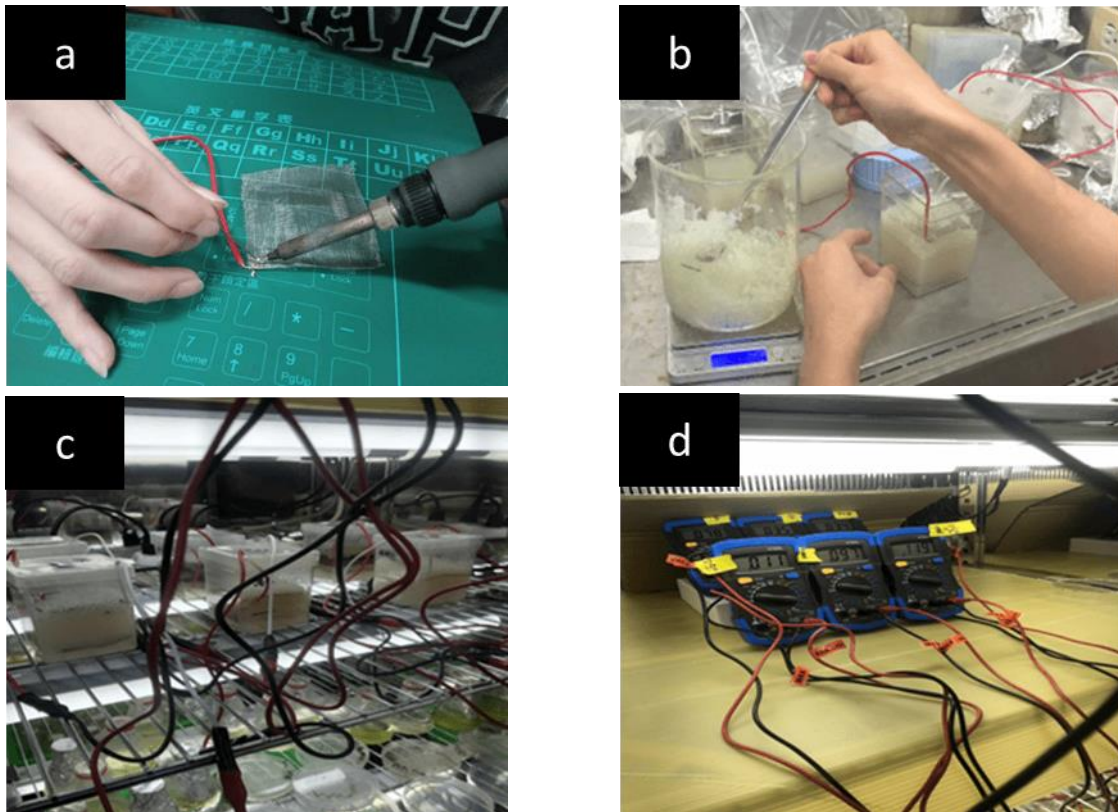
步驟四、將電極版利用固態 BG11 固定在組培盒底部。

步驟五、將 40 g 真菌晶球平均鋪在陽極區的電極版下方，再將 43.3 g 藻類晶球均勻鋪在電極版上方，製作三盒地衣電池，而純真菌與純藻類電池也各製作三盒。

步驟六、用蓋子蓋住組培盒，並利用瞬間膠封住電線口，防止汙染。

步驟七、將電線連接至三用電表，並用絕緣膠帶包住電線接口，防止電線脫落或影響電壓數值。

步驟八、將電池放入植物培養箱中（光照強度 571 LUX，攝氏溫度 25 度，光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗），利用夜間攝影機紀錄電壓數值變化，如圖九(c)、(d)。



圖九、建構並紀錄地衣電池之過程，(a)利用焊錫槍焊接電極版。(b)秤取並平均分配微生物晶球。(c)置於植物培養箱中的電池。(d)測量用的三用電表。(由作者於校內拍攝)

2、建構以 AGAR 為陰極的第二代地衣電池

步驟一、將 $7.5 \times 7.5 \times 10$ cm 的方形組培盒在蓋子的對角處用鑽孔機鑽洞並高溫高壓滅菌後移至無菌操作台。

步驟二、將面積 4.3×4.3 cm²、孔徑 100 目的 SUS 304 不鏽鋼網電極版利用鉚錫槍與電線焊接在一起。

步驟三、將 120 g 的真菌晶球和 129.9 g 的藻類晶球平均分配至各電池中，製作三盒電池。

步驟四、電極版將利用尚未凝固的 AGAR 固定在組培盒底部並待其凝固。

步驟五、將 40 g 的真菌晶球平均鋪在陽極區的電極版下方，再將 43.3 g 的藻類晶球均勻鋪在電極版上方。

步驟六、用蓋子蓋住組培盒，並利用瞬間膠封住電線口，防止汙染。

步驟七、將電線連接三用電表，並用絕緣膠帶包住電線接口，防止脫落或影響電壓數值。

步驟八、將電池放入植物培養箱中（光照強度 571 LUX，攝氏溫度 25 度，光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗），利用夜間攝影機紀錄電壓數值變化。

3、改變電極片材料和擺放位置的第三代地衣電池

步驟一、將 7.5×7.5×10 cm 的方形組培盒在蓋子的對角處用鑽孔機鑽洞並高溫高壓滅菌後移至無菌操作台。

步驟二、將面積 5×5 cm²的碳布用鉚錫槍與電線焊接在一起。

步驟三、將電極版利用尚未凝固的 AGAR 固定在底部並待其凝固後再鋪上一片碳布。

步驟四、將 225 g 濃度為 1.28×10^7 cell/ml 的真菌晶球鋪在碳布上方並再鋪上一片碳布，接著再鋪上 225 g 濃度為 7.67×10^5 cell/ml 的藻類晶球於碳布上方，製作三盒電池。

步驟五、用蓋子蓋住組培盒，並利用瞬間膠封住電線口，防止汙染。

步驟六、將電線連接至三用電表，用絕緣膠帶包住電線接口，防止電線脫落或影響電壓數值。

步驟七、將電池放入植物培養箱中（光照強度 571 LUX，攝氏溫度 25 度，光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗），利用夜間攝影機紀錄電壓數值變化。

（四）、建構地衣電池（AGAR 固化版）

步驟一、將 7.5×7.5×10 cm 的組培盒在蓋子對角處鑽洞並高溫高壓滅菌後移至無菌操作台。

步驟二、將面積 4.3×4.3 cm²、孔徑 100 目的 SUS 304 不鏽鋼網電極版利用鉚錫槍與電線焊接在一起。

步驟三、將電極網版利用尚未凝固的 BG11 固定在組培盒底部並待其凝固。

步驟四、將 75 ml 懸浮液與 37.5 ml 45°C 尚未凝固的 AGAR 混合並攪拌均勻。

步驟五、將真菌混合液鋪在陽極區的電極網版的下方，再將藻類混合液鋪在電極網版上方，製作三盒電池。

步驟六、用蓋子蓋住組培盒，並利用瞬間膠封住電線口，防止汙染。

步驟七、將電線連接至三用電表，並用絕緣膠帶包住電線接口，防止脫落或影響電壓數值

步驟八、將電池放入植物培養箱中（光照強度 571 LUX，攝氏溫度 25 度，光週期為 12 小時

光照 12 小時黑暗)，利用夜間攝影機紀錄電壓數值變化。

(五)、地衣電池對照組

步驟一、將 7.5×7.5×10 cm 的方形組培盒在蓋子的對角處用鑽孔機鑽洞並高溫高壓滅菌後移至無菌操作台。

步驟二、將面積 4.3×4.3 cm²、孔徑 100 目的 SUS 304 不鏽鋼網電極版利用鉚錫槍與電線焊接在一起。

步驟三、將 120 g 的 PDA 晶球和 129.9 gBG11 晶球平均分配至各電池中，製作三盒電池。

步驟四、電極版將利用尚未凝固的 AGAR 固定在組培盒底部並待其凝固。

步驟五、將 40 g 的 PDA 晶球平均鋪在陽極區的電極版下方，再將 43.3 g 的 BG11 晶球均勻鋪在電極版上方。

步驟六、用蓋子蓋住組培盒，並利用瞬間膠封住電線口，防止汙染。

步驟七、將電線連接三用電表，並用絕緣膠帶包住電線接口，防止脫落或影響電壓數值。

步驟八、將電池放入植物培養箱中（光照強度 571 LUX，攝氏溫度 25 度，光週期為 12 小時光照 12 小時黑暗），利用夜間攝影機紀錄電壓數值變化。

參、研究結果與討論

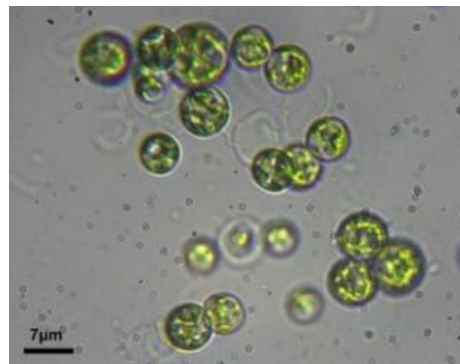
一、研究結果

(一) 分離培養藻類結果如下：

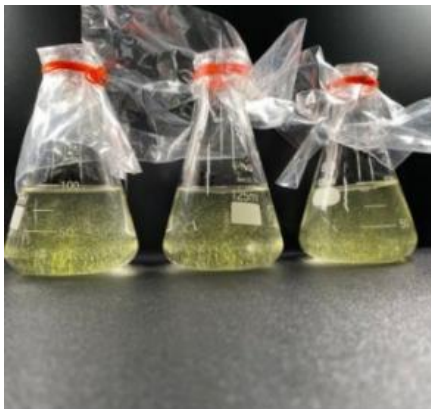
經由上述實驗後取得的藻液利用玻璃珠均勻塗抹在 BG11 培養基上，使藻類均勻生長，如圖十所示，再利用複式顯微鏡確認生長出的藻類，如圖十一所示，再將長出的藻類移植至錐形瓶中成功放大培養，如圖十二所示。並且經由分子鑑定的結果得知此藻類為經紋球藻屬 (*Coelastrella*)，如圖十三。



圖十、以珠塗佈法培養的共生藻
(由作者於校內拍攝)



圖十一、圓形的綠色細胞為顯微鏡下
觀測到的藻類細胞 (400X)
(由作者於校內拍攝)



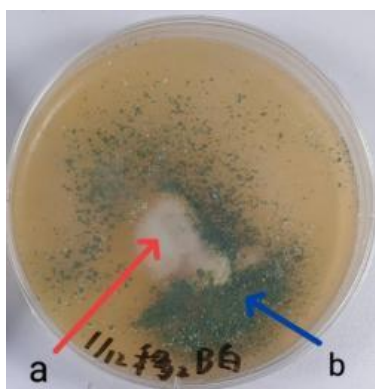
圖十二、大批液態培養的藻類(由作者於校
內拍攝)

Accession	Length	Score	E-value	Identity	Positives	Matches
Coelastrella sp. (Accession: JX011111.1)	1100	1000	0.0	100%	1000	1000
Coelastrella sp. (Accession: JX011112.1)	1100	1000	0.0	100%	1000	1000
Coelastrella sp. (Accession: JX011113.1)	1100	1000	0.0	100%	1000	1000
Coelastrella sp. (Accession: JX011114.1)	1100	1000	0.0	100%	1000	1000
Coelastrella sp. (Accession: JX011115.1)	1100	1000	0.0	100%	1000	1000

圖十三、經由分子鑑定得知此藻的親緣關係與經紋球藻屬 (*Coelastrella*) 最為接近
(由作者親自拍攝)

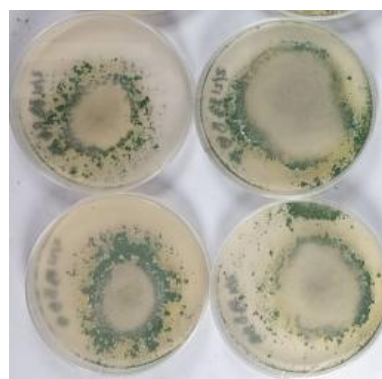
(二) 分離培養真菌的結果如下：

經上述實驗培養後，如圖十四所示，將培養出的真菌利用白金耳棒培養到多盤 PDA 培養基，取得大量的菌種，如圖十五所示，且利用複式顯微鏡觀察其真菌孢子(圖十六)。並且經由分子鑑定的結果得知此真菌為木黴菌屬(*Trichoderma*)，如圖十七。



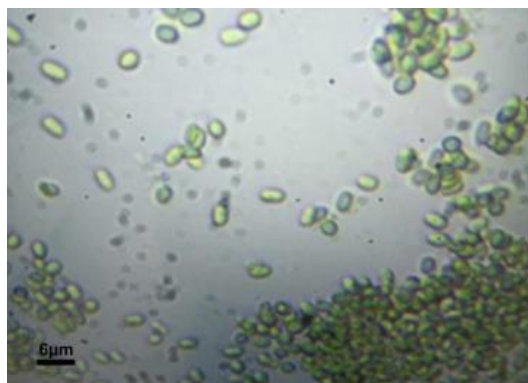
圖十四、長出菌絲和孢子的真菌培養基

a 處為真菌的菌絲，b 處為真菌的孢子(由作者於校內拍攝)



圖十五、大批長出菌絲和孢子的真菌培

養基(由作者於校內拍攝)



圖十六、利用顯微鏡下觀測的真菌孢子(400X)

(由作者於校內拍攝)

[illegible]

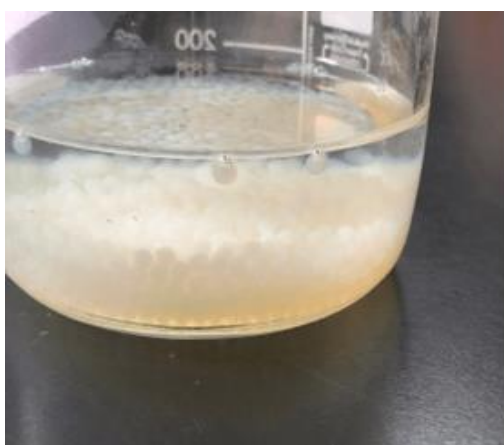
圖十七、經由分子定序得知此真菌的親緣關係

與木黴菌屬(*Trichoderma*)最為接近

(由作者親自拍攝)

（三）藻類晶球

將藻類晶球放入液態 BG11 中並置於植物培養箱中培養，一開始藻類晶球呈現白色的狀態且液態 BG11 呈現清澈狀態（圖十八），在培養 5 天時間後，觀察到藻類晶球的顏色有逐漸變綠的跡象，並且液態 BG11 也呈現混濁的狀態（圖十九），推測共生藻類即使是被微膠囊製作成了藻類晶球，其在球體中仍然具有增殖活性。



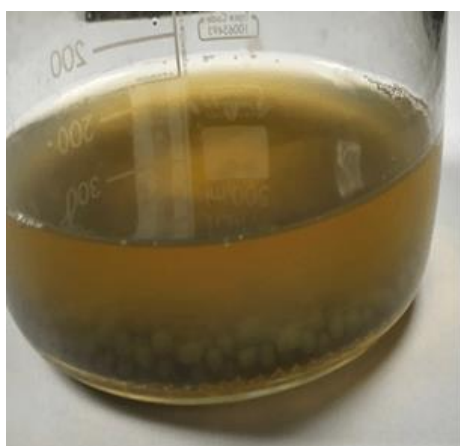
圖十八、包覆著剛製作完成的藻類晶球之培養液，此時的培養液尚為澄清狀態(由作者於校內拍攝)



圖十九、5 天後包覆著藻類晶球之培養液，此時的培養液呈現混濁狀態(由作者於校內拍攝)

(四) 真菌晶球

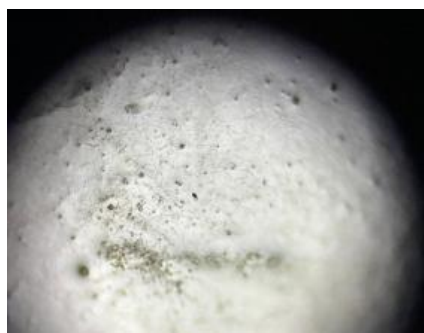
將真菌晶球放入 PDB 中，並置於生長箱中，一開始裝有真菌晶球的 PDB 呈現清澈且無雜質的狀態，(圖二十)，在培養 3 天後，觀察到 PDB 溶液呈現混濁的狀態，並且在溶液中飄散著細小的白色絲狀物(圖二十一)，在進一步將晶球用顯微鏡觀察在 400 倍的倍率下可以看到晶球表面有白色菌絲(圖二十二)，所以共生真菌的孢子即使是被製作成了真菌晶球，其在球體中仍然具有生命活性。



圖二十、包覆著剛製作完成的真菌晶球之培養液，此時的培養液尚為相對澄清的狀態(由作者於校內拍攝)



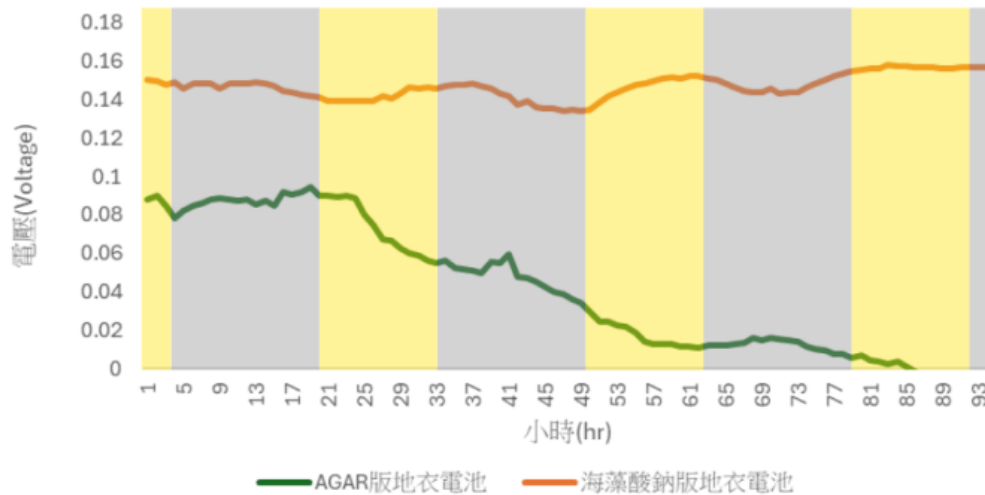
圖二十一、3 天後包覆著真菌晶球之培養液，此時的培養液呈現混濁狀態(由作者於校內拍攝)



圖二十二、顯微鏡下觀測的真菌球，表面上有菌絲纏繞，表示真菌在晶球狀態下仍然有活性，且在持續生長中(400X) (由作者於校內拍攝)

(五)AGAR 和 SA 固化法電池之電壓變化比較

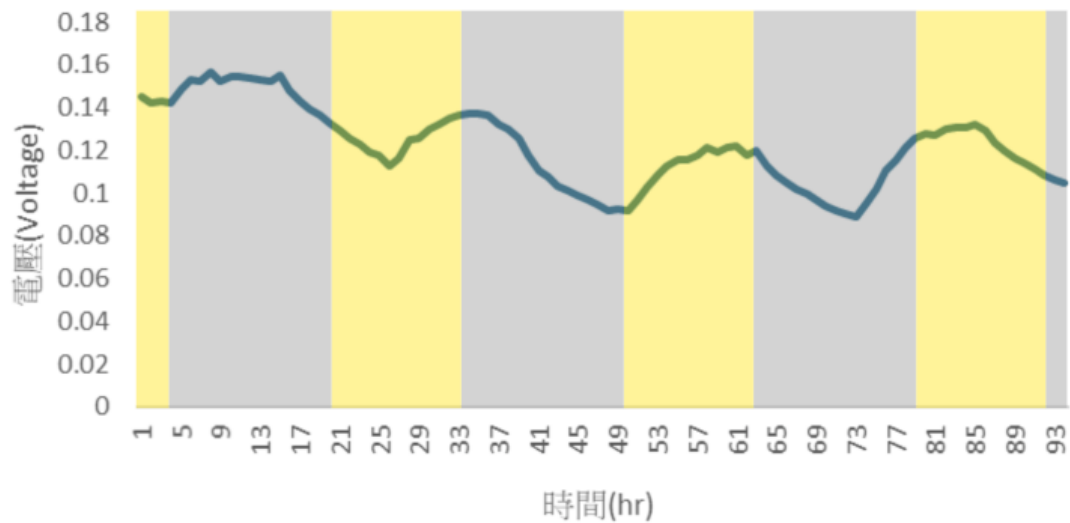
SA 版電池在測試一開始的電壓即達到 1.5 V，在經過 93 小時後，電壓仍在 1.5 V 區間，且數值並不會因為光週期引發明顯波動，而 AGAR 版電池在測試一開始的電壓達到 0.09 V，在經過 25 小時後，數值急劇下降，直至 85 小時後，電壓降至 0 V（圖二十三）。



圖二十三、AGAR 和 SA 固化法電池之電壓變化比較。圖黃底部分為光亮時間，灰底部分為黑暗時間（n=3）(由作者親自製作)

(六) 純藻類電池之電壓變化結果

在測試一開始的電壓為 0.15 V，在經過 33 小時後，數值隨光週期出現規律波動，但數值皆在 0.1 V~ 0.15 V 區間浮動(圖二十四)，電壓並無地衣電池高。

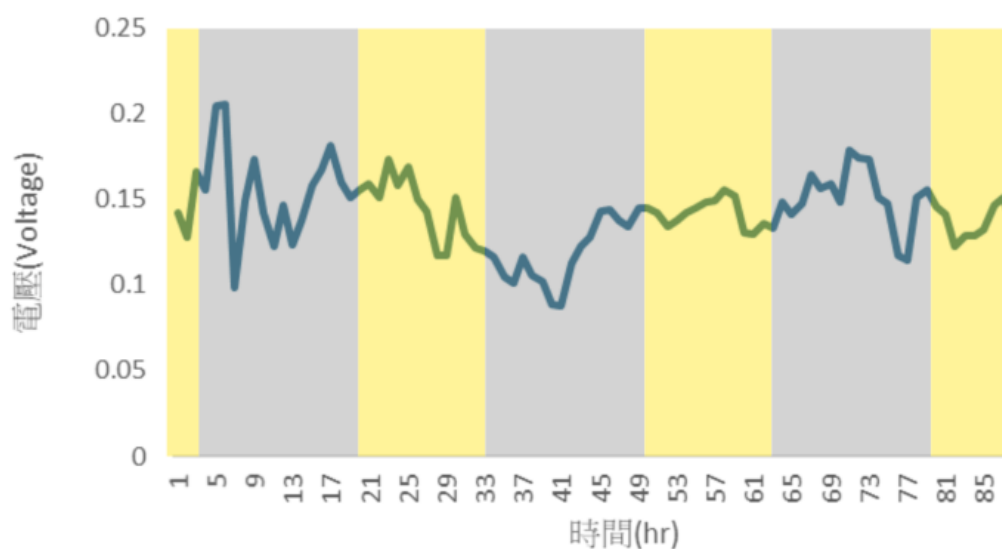


圖二十四、純藻類電池之電壓變化圖。黃底部分為光亮，灰底部分為黑暗時間（n=3）

(由作者親自製作)

(七) 純真菌電池之電壓變化結果

在測試一開始的電壓為 0.14 V，電壓變化出現不規律波動，在經過 49 小時後，數值落在 0.15 V 區間浮動（圖二十五），但數值並無地衣電池高。

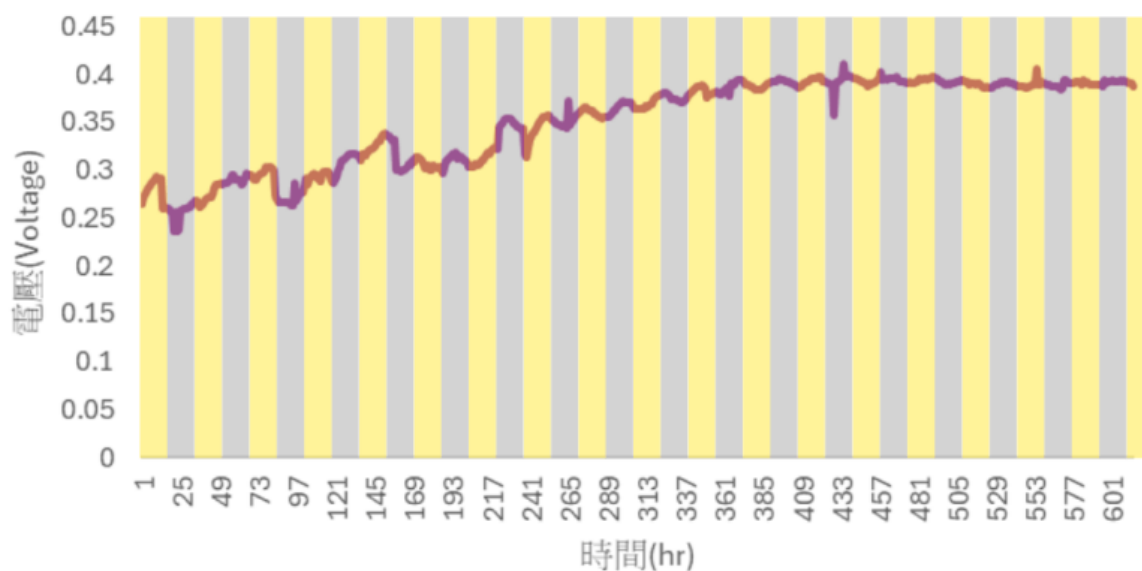


圖二十五、純真菌電池之電壓變化圖。黃底部分為光亮，灰底部分為黑暗（n=3）

(由作者親自製作)

(八) 改變電極片材料和擺放位置之第三代地衣電池之電壓變化

海藻酸鈉版地衣電池在觀測一開始的電壓為 0.26 V，經過 410 小時後，電壓達到目前高
峰值 0.4 V，如圖二十六所示，整體電壓變化呈現穩定且持續上升的趨勢，並且光照有無對
地衣電池的電壓影響並不明顯。

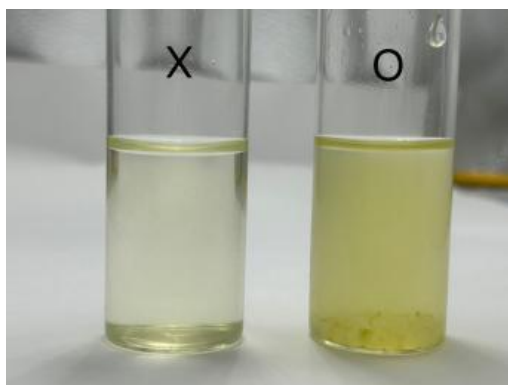


圖二十六、第三代地衣電池電壓變化圖。黃底部分為光亮，灰底部分為黑暗（n=3）

(由作者親自製作)

(九)、地衣真菌刺激共生藻類成長之實驗

經觀察發現培養十日後，有添加真菌晶球之藻液較無添加真菌晶球之藻液，顏色較深(圖二十七)。進一步進行藻類的細胞計數也發現，有無添加真菌晶球的藻液濃度也有明顯差異，如表五所示。



圖二十七、有無放置真菌晶球的藻液瓶之對比圖，○：
有添加真菌晶球之藻液；×：無添加真菌晶
球之藻液(由作者於校內拍攝)

表五、有無添加真菌晶球之藻液，培養十日後濃度比較表

	有無放置真菌球	初始濃度 (cell/ml)	十天後濃度 (cell/ml)
藻液瓶	X	6.2×10^4	2.3×10^5
藻液瓶	O	6.2×10^4	3.7×10^6

二、討論

(一)、建構地衣電池之地衣條件及特徵

起初本實驗培養四種地衣，相較之下，最終選定的地衣品種其共生真菌與共生藻類各自在 PDA 培養基與 BG11 培養基中的生長狀況較為理想，且真菌能順利產孢子，有利於後續真菌的固化處理，。

故本研究採用此種地衣進行實驗，此地衣經圖鑑查詢及專家諮詢確認為石蕊屬的麩皮石蕊(*Cladonia ramulosa*) (圖二十八) 且在後續的分子鑑定結果顯示本實驗用之真菌為木黴菌屬(*Trichoderma*)，而藻類為經紋球藻屬(*Coelastrella*)此真菌與此藻類在文獻中也顯示了兩者能夠在地衣中被分離出來 (Sanders et al., 2021)。



圖二十八、顯微鏡下的實驗用地衣體，
此地衣為麩皮石蕊地衣(*cladonia ramulosa*)
(由作者於校內拍攝)

(二)、SA 與 AGAR 於固化微生物電池效能之比較

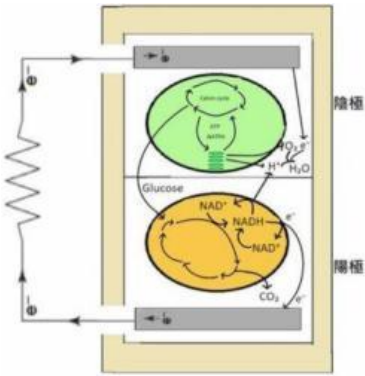
經實驗結果發現 SA 電池電壓較 AGAR 電池電壓來的高，也更加持久。其可能原因是因為在製作 AGAR 固化版電池時，由於 AGAR 須保持在 43°C 以上才能保持液態，故可能在製作混合液時溫度過高，導致傷害到微生物使微生物含量減少，使電池的電壓偏低且數值不穩定；而使用 SA 製作電池則不需考量溫度因素，並且晶球更有利於營養物質的交換，故能夠使其微生物活性穩定且持續升高（肖，1978）

(三)、電池構造改良之原因

第一代地衣電池：一開始我們考量到 BG11 中足量的礦物質和營養物質有著良好的導電性，能夠使量測到的數值更高，但是在觀測途中發現電壓數值呈現負值，代表電子的流向和我們所設想的相反，我們推測是因為海藻酸鈉球中的微生物含量太少，導致陰極區放電大於陽極區，故數值呈現負數。

第二代地衣電池：第二代電池沿用了第一代電池的架構，但是我們將陰極主體改為純水 AGAR，希望能夠減少陰極的放電，結果是雖然比第一代電池數值還高，但是數值仍然是負數，我們就推測可能是原本作為電極版的不鏽鋼網材質相對較差以及真菌晶球釋放的電子逸散到了陰極區，導致電子被陰極的電極版給接收，才會使數值呈現負數。

第三代地衣電池：我們將電極材料改為品質較佳的碳布，並層多加裝了一片碳布，結果測量到的數值雖然比一、二代的地衣電池高的地衣電池高，卻也依舊是負數，在研讀了陳柔安(2023)的論文中，我們知道了藻類行光合作用釋放的氧氣能夠作為電子的接收者，故放置於陰極，於是我們改變了陰陽極的接法再去量測數據，結果測量到的電壓數值為正數。



表六:三代電池的構造表(由作者親自製作)

	陽極	陰極	電極材質	發電效能	改進方案
第一代	藻類晶球 真菌晶球	BG11+AGAR	不鏽鋼網	電壓為負值	將BG11培養基改成純AGAR
第二代	藻類晶球 真菌晶球	純AGAR	不鏽鋼網	電壓為負值	改變電極片材質和擺放的位置
第三代	真菌球	藻類球	碳布	電壓為正值	

圖二十九、地衣電池的作用機制圖

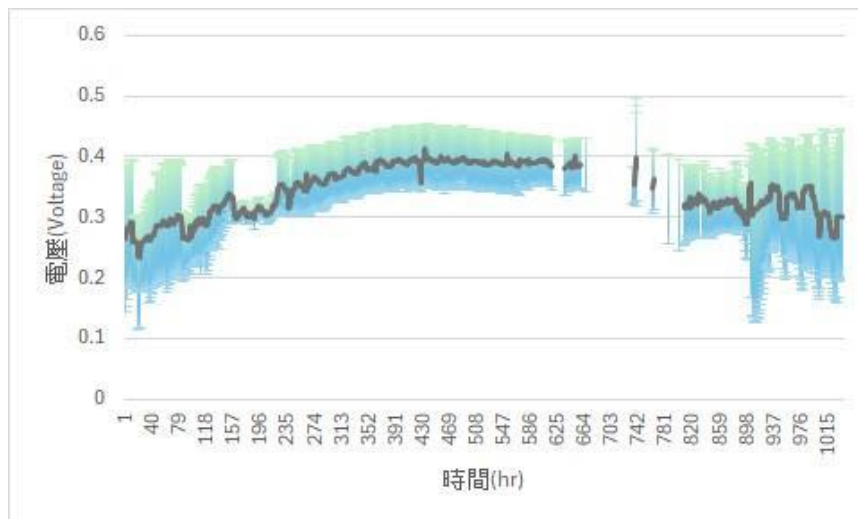
(由作者親自製作)

(四)、本研究建構的地衣電池優勢

1.壽命優勢:我們參閱的資料中顯示目前已發表的光合微生物燃料電池，在使用壽命上受到諸多限制無法長時間穩定發電，例如 2021 年由 Hmang 研究研究團隊發表的光合微生物燃料電池，其運作週期僅能維持 5 天或是 Song 的研究團隊，其裝置的光合微生物燃料電池，也僅能運作約兩通的時間(陳,2023),而我們所建構的地衣電池，目前地衣電池已運轉 1038 小時，電壓還有 0.3V，在電池使用壽命有顯著的優勢。

2.電池效能優勢:大多歷屆科展生物燃料電池的電壓值最高都落在約 0.1 V ~ 0.2 V 區間，而我們所建構的地衣電池，電壓多在 0.4 V 區間波動，電壓值最高達 0.497 V，在電池效能上有顯著的優勢。

3.綠色能源優勢:國內外微生物電池研究大多會用到質子交換膜和電子傳遞介質，如下表所示。而本研究建構的地衣電池，不需添加昂貴的質子交換膜也不用添加可能會危害環境的電子傳遞介質，且本實驗用的地衣體取自於大自然,故對自然生態與環境也較不會造成負面影響，因此本研究建構的地衣電池,具備潛力發展成長效且無害的綠色能源。



圖三十、第三代地衣電池數據與標準差圖，圖中的空白處是由於學校設備斷電導致的數據缺失(由作者親自製作)

表七：與歷屆微生物電池研究之比較(由作者親自製作)

來源	題目	最大電壓	質子交換膜	電子傳遞媒介物	電池續航力
本研究	第一電池-探討利用地衣共生真菌與藻類建構長效微生物電池之可行性	0.497 V	不需要	不需要	1038小時後電壓為0.3V
2014國際科展	綠色能源-天然微生物燃料電池之開發	0.620 V	需要	陰極以金屬修飾葉綠素來催化	無數據
53屆全國科展	藻出能源，發電我最行-探討影響藻類電池發電效率之影響	0.115 V	需要	不需要	無數據
55屆全國科展	微生物燃料電池	0.300 V	需要	5%的赤血鹽溶液	無數據
57屆全國科展	石墨烯微生物燃料電池綠能研究	0.700 V	需要	EDTA-Fe ³⁺	2小時
59屆全國科展	食用酵母菌紙電池之探究	1.142 V	使用鹽橋	使用鋅銅電極，非傳統微生物電池	無數據
61屆全國科展	酵母菌發電-單槽式微生物燃料電池的性質研究	0.823 V	雙層玻璃紙	加入鐵圈到微生物底泥	起始電壓0.832 V，但是瞬間下降到0.532 V且無續航力數據
2020國際科展	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	0.179 V	不需要	不需要	1032小時後電壓為0.095 V

(五)、特定真菌對於藻類生長刺激之原因探討

由於真菌和藻類在原本的地衣體中有著良好的共生關係，所以我們推測真菌能夠釋放刺激藻類生長的物質，使藻類在生長速度更快，此外，在查找到的文獻中提及到真菌在與藻類互動的過程中會釋植物激素及酚醛聚酮等物質影響地衣的代謝，而酚醛聚酮（Polyphenolic compounds）是地衣中的一種重要成分。通過酚醛反應和聚合反應形成。酚醛聚酮具有抗氧化和抗菌的功能，幫助地衣抵抗環境污染和病原菌的感染（Gregor Pichler et al., 2023），故在本實驗中加入了真菌晶球的藻液濃度才能夠比無放置真菌晶球的藻液濃度來得高，所以日後會設計更多實驗以研究此物質，並加以應用在藻類培養等方面。

(六)、地衣電池效能提升的可能方向

目前針對地衣電池效能之提高，本實驗發想了以下計畫方案：

1.建構不同型態的地衣電池

本實驗只使用一種地衣作為材料，而地衣生長環境的分布很廣，也有能夠在極端環境下生存的地衣品種，後續可使用其他種地衣以建構不同型態的地衣電池，應用於不同情境。

2.改變電極材料

在相關研究提到當以陰極面積為操作參數，其最大功率密度隨著陰極電極面積增大而增加（許、余等人，2006）；而在陳(2023)中的研究中所使用的電極材料是碳毯加 sus306 不鏽鋼片，這也代表了不同的材料及電極面積均會在一定程度上影響電壓數值，故將於日後探討不同條件下的電極會如何影響電壓數值。

肆、結論與應用

一、討論

- (一) 將地衣清洗並切碎置於液態 BG11 培養後再將藻類溶液塗抹於固態 BG11 上能夠分離培養地衣中的共生藻類。
- (二) 將地衣清洗後並磨碎放置於 PDA 培養基中能夠分離培養出地衣中的共生真菌。
- (三) 利用海藻酸鈉固化的地衣電池相較於利用 AGAR 固化的地衣電池，其電壓數值來得較高且較穩定。
- (四) 此地衣電池經過不斷改良，能夠穩定發電，且目前新地衣電池以維持運轉 1038 個小時，而目前最高電壓值達到 0.497 V，故本實驗成功建構出利用地衣共生真菌與藻類的長效微生物電池。
- (五) 成功建構不需添加質子交換膜等昂貴材料，且符合永續發展目標 (SDGs) 中的第七項永續經營與綠色能源的目的的低成本長效地衣電池。

二、應用

以現在電壓來說，一顆地衣電池的電壓很難有實際應用面，但將多顆地衣電池進行串聯，就能使電壓變高，使其可以供給於一些小型電子裝置，例如 LED 燈或是小型馬達，但我們的電池決不止於此，我們後續會在進行調整，使電壓值提高，那調整方法就例如可以改變電極的材質或電極版的面積，而且 0.4 V 絕對不是我們這一顆電池的最高值，隨著真菌與藻類濃度的持續提高電壓還會上升。一般的 LED 工作電流只要有 0.5 mA 以上，即可發光，其電流最大可承受到 100 mA，而兩端電壓約在 1.8 V~2 V 之間（電流愈大，其端電壓會略微上升）。在實用上，基於所發光度及功率消耗上的考量，我們可定 LED 的工作電流在 10 mA，而其兩端所跨的電壓降為 1.8 V 作為電路設計上的依據。以現況可能 3~4 個地衣電池就可以讓一個 LED 燈發光了，甚至以現在電壓上升的趨勢未來有機會 1~2 個電池就夠，且可用於戶外的小夜燈白天黑夜都可發光，加上我們製作過程皆有進行滅菌處理，所以污染機率極低。

三、未來展望

(一)、若後續要提升地衣電池的發電效率可以更改電極版材料或是加大電極版面積。

(二)、若後續要將地衣電池進行應用方面的改良，可以設計能夠批次更換晶球的補充包。

(三)、本實驗只使用一種地衣當作材料，後續可使用其他種地衣以建構不同型態的地衣電池，應用於不同情境。

(四)、可嘗試將能夠儲存電荷的電容設備與地衣電池結合，盡可能改善微生物電池中儲能不易且電壓微弱等問題。

(五)、本研究期許開發一個結合地衣電池與養藻固碳的綠能發電系統，如圖三十一所示，展現了多層次的环境友善潛能。首先，利用地衣電池所產生的電力點亮 LED 燈，再將真菌晶球加入藻液中，促進藻類的生長。隨後，將培養出的藻液固化成晶球，補充至地衣電池中，持續發電。同時，無活性的藻類晶球也可以作為養殖場的飼料供應。這一系統不僅有效固碳，還能夠為企業提供一種全新的碳封存解決方案。整個系統的運作不僅減少了對傳統污染發電方式的依賴，還對環境保護和能源節約做出了積極貢獻。我們希望藉由此創新系統，為地球的永續發展與節能減碳出一份力量。



圖三十一、台電企業養藻固碳系統

(圖片來源: 台電月刊 724)

伍、參考文獻

- 1、方偲庭、陳宣愛、楊舒惠(2010)。酵中帶電－酵母菌燃料電池的初探。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會。
- 2、史經平、林宏殷(2015)。生物燃料電池。國立高雄大學化學工程及材料工程學系。
- 3、李芊葳(2020)。利用共生菌與小球藻建構不須添加培養基。2020 台灣國際科學展覽會。
- 4、李芊葳(2021)。Solar Powering Day and Night with Boxed。台北市立第一女子高級中學。
- 5、吳紋沂、黃詩涵(2019)。酵母菌發電－單槽式微生物燃料電池的性質研究。中華民國第 61 屆中小學科學展覽會。
- 6、肖美燕，徐尔尼，陈志文(2003)。包埋法固定化细胞技术的研究进展。食品科学，24(4)，158-161。
- 7、巫小丹，徐尔尼，徐颖宣，罗玉芬，刘玉环(2011)。固定化酵母乙醇发酵及固化小球微生物生态的研究。中国生物工程杂志，31(03)，71-75。
- 8、金安兒(2009)。乳酸菌的微膠囊化。國內學術電子期刊系統，441 期，36~41 頁。
- 9、秋偉誠、翁瑋辰、柯驊原(2011)。微生物燃料電池的研究。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 10、陳柔安(2023)。在光合微生物燃料電池中加入動物性浮游生物以增加發電功率。天主教輔仁大學生命科學研究所碩士論文。
- 11、陳宥豪、沈承緯(2013)。“催” 燦晶亮 --- 活性酵母微米晶球的設計。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會。
- 12、李志源(2007)。改善電極條件以提升壽命電池燃料發電效率。國立海洋大學河海工程學系暨研究所。
- 13、梁峙，赵孝华(2002)。海藻酸钠固定化酵母菌的应用研究。食品工业科技，23(12)，34-35。
- 14、劉俊良(2008)。可攜式酵母菌微生物燃料電池系統與發電特性研究。國立中興大學碩士論文。

- 15、廖源(2019)。微生物燃料电池中产电微生物的研究现状。节能，(1)，103-104。
- 16、廖翊廷、呂靜怡、謝志昂、賴怡涵(2004)。免費空氣污染偵測器—地衣與環境污染的探討。中華民國第四十四屆中小學科學展覽會。
- 17、Cohen, B. (1931). The bacterial culture as an electrical half-cell. *J. Bacteriol*, 21(1), 18-19.
- 18、Biosca, E. G., Flores, R., Santander, R. D., Díez-Gil, J. L., & Barreno, E. (2016). Innovative approaches using lichen enriched media to improve isolation and culturability of lichen associated bacteria. *Plos one*, 11(8), e0160328.

- 19 、Hwang, J.-H., Ryu, H., Rodriguez, K. L., Fahad, S., Domingo, J. S., Kushima, A., Lee, W. H.(2021). A strategy for power generation from bilgewater using a photosynthetic microalgal fuel cell(MAFC). *Journal of Power*.
- 20 、Potter,M. C.(1911).Electrical Effects Accompanying the Decomposition of Organic Compounds,Proceedings of the Royal Society of London. Series B,Containing Papers of a Biological Character,260-276 .
- 21 、Pichler, G., Muggia, L., Carniel, F. C., Grube, M., Krasner, I. (2023). How to build a lichen: from metabolite release to symbiotic interplay. *New Phytologist*, 238(4), 1362-1378.
- 22 、Song, X., Wang, W., Cao, X., Wang, Y., Zou, L., Ge, X., Zhao, Y., Si, Z., Wang, Y. (2020). *Chlorella vulgaris* on the cathode promoted the performance of sediment microbial fuel cells for electrogenesis and pollutant removal. *Sci Total Environ*, 728, 138011.
- 23 、Sanders, W. B. (2023). Is lichen symbiont mutualism a myth?. *BioScience*, 73(9), 623-634.
- 24 、Zakeri , Z., Junne, S., Jäger, F., Dostert, M., Otte, V., Neubauer, P.(2022).Lichen cell factories: methods for the isolation of photobiont and mycobiont partners for defined pure and co-cultivation.*Microb Cell Fact*.
- 25 、Sanders, W. B., & Masumoto, H. (2021). Lichen algae: the photosynthetic partners in lichen symbioses. *The Lichenologist*, 53(5), 347-393.

【評語】 070003

本研究利用地衣共生藻類與共生真菌的互利關係為基礎，利用海藻酸鈉（SA）進行固化製成晶球型地衣電池。實驗結果顯示，第三代電極材料為碳布、藻類置於陰極的地衣電池，最高電壓可達 0.497 V，且長時間穩定運作 1038 小時，電壓維持在 0.3 V，證明具良好的穩定性。本研究以顯示以地衣共生藻類與真菌發展的晶球型地衣電池，相較其他以微生物開發的電池，呈現較高的電壓及穩定性，持續優化至目前第三代電池的努力，值得肯定。

唯研究內容及論文撰寫，建議如下：

1. 標的麩皮石蕊地衣(*Cladonia ramulos*)，經鑑定為經紋球藻屬(*Coelastrella*)及木黴菌屬(*Trichoderma*)。木黴菌屬為地衣共生真菌，是否有文獻報導?應提出佐證。
2. 純藻類電池，或純真菌電池數值之電壓變化結果數值，皆無地衣電池高。是否能以快速生長非共生藻類及真菌種類，同樣利用海藻酸鈉分別固化，進行測試。結果或可支持地衣電池共生關係的特殊性及重要性。
3. 目前結果尚無滿足一般功率需求，實際呈現初步發電應用，因此仍有改善空間，期許未來能夠發展為具備實用性且低成本的綠色能源。