

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生活與應用科學科

040807

巧克力發電囉

學校名稱：國立蘇澳高級海事水產職業學校

作者： 職一 游捷涵 職一 李雅柔 職一 李宜芬 職一 莊雅雯	指導老師： 沈必正 廖文發
-------------------------------------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：巧克力、太陽能電池、紅外光區

摘要（300字以內）

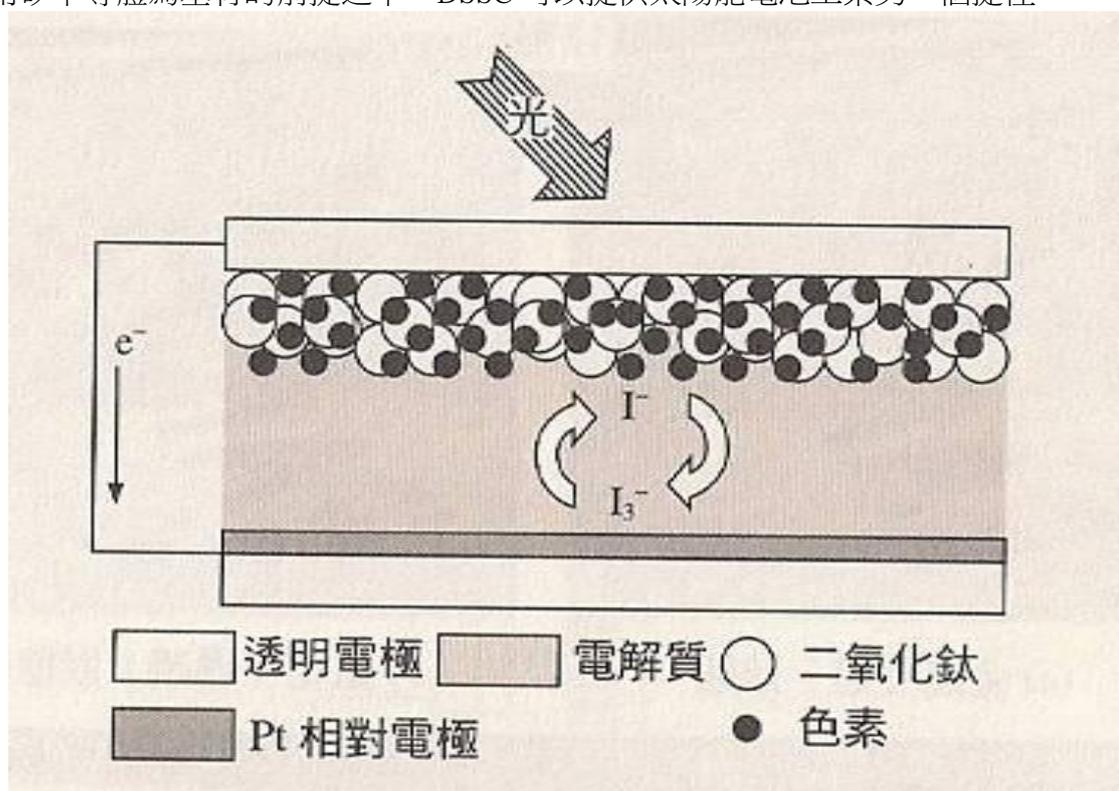
本研究的目的是探討以可可豆萃取物(即巧克力)作為染料敏化太陽能電池(Dye Sensitized Solar Cell, DSSC)的染劑之產電效率與其發電機制。染料敏化太陽能電池是薄膜太陽能電池的一種，具有製程簡單與設備進入門檻低等優點，目前已經有商業化產品問世。食品級巧克力製備的 DSSC，其入射光電子轉換效率(IPCE)介於 1~3.5%，且在紅外光區(800-1000 nm)有最大的轉換效率 3.5%，可以大量的利用葉綠素所無法利用的太陽能產生較多的電能，在 800 Lux 下即可產生近 0.4V 的電壓，較海藻 DSSC 提升了近兩倍的電壓，一周的保存實驗，電壓僅下降約 7.48%，遠較膠體 DSSC 的 58%為佳。可可粉，可可脂，巧克力的酒精溶液全波段掃描圖譜顯示，可可豆萃取物製備的太陽能電池，同時具有染料敏化太陽能電池與溫差電池之功能。三種可可豆萃取物所製備的 DSSC 中，可可粉 DSSC 產生的光子電子轉換效率最高，可達 85%以上。

關鍵字：巧克力、太陽能電池、紅外光區

壹、研究動機

根據經濟部《太陽光電產業分析及投資機會》報告，全球太陽光電累計裝置容量在 2005 年達 4.6GW（10 億瓦），2006 年累積至 6.3GW，2007 年再增加到 9.1GW。全球太陽光電產業產值則從 2006 年的 145 億美元成長到 2007 年的 186 億美元；依此約 30% 的成長率，估計到 2010 年，市場將達 364 億美元，2020 年可望超過 1000 億美元。在全球太陽能電池生產部分，台灣已名列全球第 4 大生產國，僅次於中、日、德。去年台灣太陽能電池廠商整體產值達 430 億元，今年將首度突破千億元關卡，生產的太陽光電裝置容量預計達 1148MW（百萬瓦），成長十分迅速。其中又以宜蘭利澤工業區的設廠廠家最多，已達十家以上，成為全台灣最大的太陽能聚落。

染料敏化太陽能電池(Dye Sensitized Solar Cell, DSSC)是由基板(玻璃或薄膜基板)、透明導電膜、半導體膜、染料、電解質、溶劑，和由基板上鍍有透明導電膜、鉑觸媒之相對電極等所組成。這種太陽電池的特徵而是於具有導電膜的基板上將奈米尺寸的二氧化鈦微粒塗佈成糊狀，使用 450~550°C 的高溫對其進行燒結而得半導體光電極；而相對電極，則係使用玻璃的導電膜進行鉑的蒸鍍而形成。二氧化鈦的厚度約為 10 μ m，因為奈米大小的尺寸效應，故可供發電的表面積可達到基板面積的 1,100 倍以上，使二氧化鈦多孔質膜能吸附更多染料，並獲得更多光吸收，因而大幅提升電流值。在不與電子產業競爭使用矽半導體為基材的前提下，DSSC 可以提供太陽能電池工業另一個捷徑。



圖一 染料敏化太陽能電池組的構造示意圖(日本太陽能學會，2009)

染料敏化太陽電池相較於傳統矽基太陽電池，具有可接受日照光譜範圍大、30°C 以

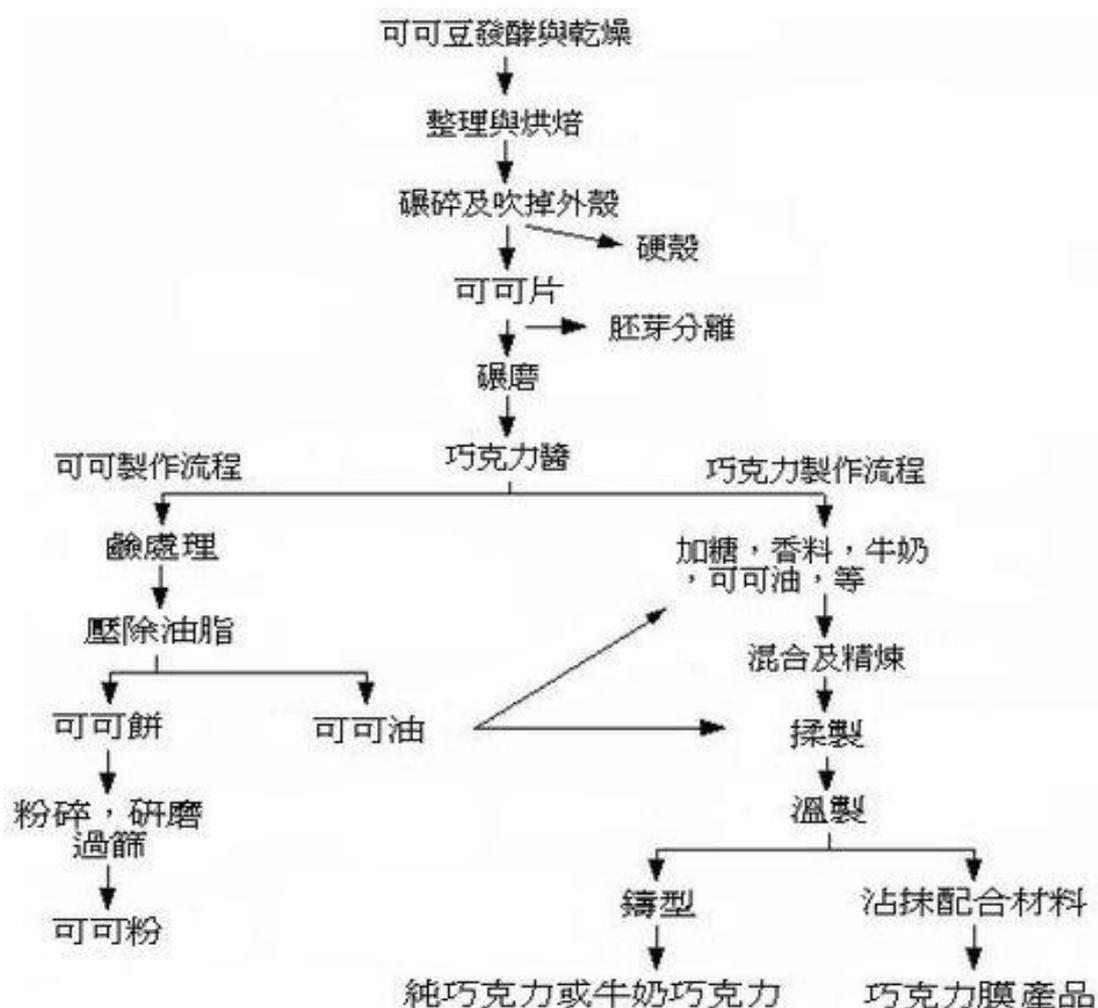
上高溫條件下電力輸出較高、及低光量下仍有高轉換效率等優點；並且，由於不使用昂貴的高純度矽，以及製程簡易不需真空設備等經濟型加工條件之特性，使太陽能電池低價化與普及化可能性大幅的增加。依據國外廠商之評估，在年產量 10MW 條件下，50 平方公分、6~7%效率之 DSSC 模組成本僅約 61 元新台幣，相較於矽基太陽能電池組成本約 160 元新台幣降低了超過 50%以上。所以，染料敏化太陽電池在低功率、輕量、可撓性、可攜式等用途上再度被寄予厚望。加上電解液固定化技術的開發，DSSC 之安全性與耐久性獲得大幅度的改進，目前美國已經有商業化大規模生產的染料敏化太陽能電池，並且供應到亞洲市場，作為登山客緊急供電之用。

目前最成功的 DSSC 當屬以鈦錯合物作為染料的設計，而其總光電轉換效率 (photovoltaic conversion efficiencies) 為 10% (O' Regann and Grätzel, 1991; Nazeeruddin et al., 2001). 由於鈦錯合物的吸光光譜特性，要改善它的未來表現，增加可見光或是紅外光的吸收能力是極為重要的一環，Jianjun 等人在 2001 年與 2002 年提出以 Metallophthalocyanines 來提高 DSSC 在可見光光譜範圍中的吸收率，但是鈦錯合物或是 Metallophthalocyanines 均含有重金屬成分，在環境永續發展方面，並不是一個很好的選擇。目前，台灣地區學者的研究幾乎都集中在開發有機染料的技術，觀察 2009 年國際染料敏化太陽能電池研討會中所發表的文章，幾乎都集中在葉綠素或其衍生物的產電效能改進之探討。但是葉綠素染料敏化太陽能電池的最大吸收光譜均在紫外光區，對 400-1000 nm 波長的光線，跟本就是浪費而只是造成電池溫度上昇而已。可見光的波長範圍在 380nm 到 720nm 之間，如果能夠提升這一段的太陽能的吸收，對太陽能電池的實際應用是非常重要的。

巧克力，是以可可做為主料的一種混合型食品，主要原料可可豆產於赤道南北緯 18 度以內的狹長地帶。巧克力含有豐富的鎂、鉀和維他命 A 以及可可鹼，因而具有高能值。由於可可鹼是一種健康的反鎮靜成分，故食用巧克力有提升精神，增強興奮等功效。巧克力中的可可含有苯乙胺 (phenylethylamine)，能夠使人有戀愛的感覺。可可豆經過發酵、乾燥、烘焙、研磨，製成可可汁。可可汁可製成可可脂與可可粉，或選高品質的粗製可可汁經進一步加工製成巧克力(其加工流程如下圖一)。可可脂是在製作巧克力和可可粉過程中自可可豆抽取的天然食用油。它只有淡淡的巧克力味道和香氣，是製作真正巧克力其中一項材料。一般稱為白巧克力的糖果便單是由它製成。可可脂熔點約為攝氏 34-38 度(因此巧克力在室溫時是固體而又很快在口中融化。可可脂是已知最穩定的食用油，含有能防止變質的天然抗氧化劑，令它能儲存 2 年到 5 年，使它用於食品以外的用途。由於它潤滑的質感和香甜的氣味它是不少化妝品和護膚用品如肥皂和沐浴露會用到的原料。可可脂有 α , γ , β' , 和 β 結晶, 熔點分別為 17, 23, 26, 和 35 - 37 °C 。製作巧克力通常只會用到熔點最高的 β 結晶，而單一結晶結構會令質地細滑。(維基百科)

製作蛋糕的時候，可可粉是常添加作為巧克力戚風捲的味道和顏色來源，在上基礎化學課程的時候，指導老師示範了先前所製作的海藻葉綠體染料敏化太陽能電池，而且說明了太陽光波的組成，紅色光譜區是沒有被探討的一塊區域，可可粉成分中含有多種礦物質，鋅、銅、鎂、鐵、鉀、磷……都是我們身體所需要的元素。巧克力與可可產品

含有多量的多酚抗氧化成分，能夠進行氧化還原反應，減緩老化過程，對抗環境中過多的自由基，以及預防癌症與心臟病。巧克力還含有一種脂肪酸，稱做 PEA，這種特殊物質屬於一種叫做腦內嗎啡（endorphin）的化學元素，具有刺激神經傳導的功能，顯示其可能具備作為染料敏化太陽能電池染劑的可能性。所以我們決定採用女生最喜歡的紅色食品—巧克力，作為染料來源，製作染料敏化太陽能電池。



巧克力的製造流程

貳、研究目的

由以上的文獻資料，可以看出，巧克力中所含的化合物對太陽能的轉換效率可能會較傳統的染料效果為佳，且其成分中不具有重金屬，在回收或是意外洩漏時，也不會對環境造成影響。故本次科展研究的目的，就是要利用這些巧克力所含有的化合物—黃烷醇，作為 DSSC 的敏化染料來源，生產純植物性，無污染的太陽能電池，探討製備完全有機的染料敏化太陽能電池的可行性。

預期可以建立可可豆萃取物中黃烷醇作為 DSSC 染料的製備方法，並且可以得到其所能產生的電流或電壓量，巧克力與奈米級二氧化鈦層結合的實際情形與 DSSC 太陽能電池轉換之速率，建立植物性油脂類作物適合做為 DSSC 的染料來源之依據，進一步增加這些生質資源利用價值。配合政府節能減碳的既定政策與新竹科學園區，宜蘭縣龍德工業區與利澤工業區進駐之太陽能工廠的產業需求，本研究可以開發一種植物資源與太陽能科技結合的模式與探討機制，可以提供各校參考發展太陽能電池科學研究或是科展活動之依據。

爲了提高這些經濟作物可可豆全作物的應用範圍，達到低成本的染料來源而可賣得較高價錢，增加農民的收益的穩定性，並且可以作為其他高油脂作物的高經濟利用模式之開發。所以利用這些可可豆中的化合物成分作為 DSSC 染料來源，是值得探討與開發的。本研究的成果，可以增加國家在太陽能電池領域的競爭力，如果產電效率能達到合理標準，尚可申請新型專利，進一步增強教育部中部辦公室之擴大內需補助方案對台灣太陽能產業人力與研究能量之貢獻。

參、研究設備及器材

材料：

本研究所採用的染料敏化劑，巧克力，係購自(H&C Co. Ltd., Taiwan)；可可粉(欣新烘焙食品公司，台灣)；可可脂(第一化工公司，台灣)。綠茶(悅氏公司，台灣)，可口可樂與綠茶雪碧(可口可樂公司，台灣)，氫化豬油(強冠企業股份有限公司，台灣)，魚油(杏輝公司，台灣)，沒食子酸(Sigma Co. Ltd., USA)

DSSC 製備材料

二氧化鈦(Degussa P25 奈米級粉末)，碘酸鈉，Triton 100 界面活性劑(HLB=13.0)，碘，醋酸等均購自 Sigma, USA。導電玻璃(ITO，電阻約為 23-30 歐姆)，購自台灣的 AimCore Technology 公司。酒精購自台糖公司。塑膠培養皿，1 ml 吸管，安全吸球，塗抹棒，洗瓶，蠟燭，矽膠，滴管，等均購自市售品。

使用的設備：

- A.全波段分光光度計(V630 series, Jasco Co. Ltd., Japan)，
- B.三用電錶(Kilter 249 DMM,連騰電錶廠，台灣)
- C.正立位相差研究級顯微鏡(Eclipse 50i, Nikon Co. Ltd., Japan)，
- D.可定溫之加熱器(SP131825, Thermo Sci. Co. Ltd., USA)，
- E.光照度計(TES 1333, TES Co. Ltd., Taiwan)
- F.單波長之光子-光電流檢測儀(Newport U.S.A)，



肆、研究過程或方法

1. 染料敏化太陽能電池的製備：用微量天平稱取數克的奈米級二氧化鈦結晶型粉末。放入研鉢中，加入數滴 0.05M 之醋酸溶液，反覆研磨。加入少許的 Triton X-100 乳化劑，繼續研磨直到獲得近似膏狀之均勻膠體。以三用電表判別導電玻璃之導電面，把導電玻璃的導電面朝上，用魔術膠帶將其中四個邊緊緊的貼在實驗檯面上。用顯微鏡專用的拭鏡紙將導電玻璃表面擦亮即可。
2. 將二氧化鈦稀態膠體，以棉花棒均勻的平鋪在導電玻璃的導電面上。塗佈完成後待完全乾燥後把膠帶移除。
3. 用平板加熱器將塗有此導電玻璃以 350 度加熱烘烤 10~20 分鐘至完全乾燥。
4. 將完成之二氧化鈦電極，浸泡巧克力，50%的可可粉液或是可可脂中四十八小時，另取一片等面積的導電玻璃，將導電面用蠟燭燃燒的火焰來回移動，鍍上一層碳膜。
5. 把兩電極鍍膜面相對組裝起來，三邊塗上矽膠留下一邊準備加入電解液。配製電解液(0.5M 的碘化鉀和 0.05M 的碘，用乙二醇作為溶劑)。以吸管沿兩電極間之縫隙，加入少許之電解液，將電池直立後，利用滲透現象，讓整個電池充滿電解液，以矽膠封好第四邊，即製備完成。



圖一 (A)奈米級二氧化鈦研磨；(B)導電玻璃測試；(C)二氧化鈦奈米層燒結。(D)對應電極碳膜燒結



圖二 (A)太陽能電池組裝；(B)添加電解液；(C)好吃的黑巧克力。(D)也很好吃的可可粉



圖三 (A)光照度計；(B)產出電壓實測，走廊；(C)產出電壓實測，集合場。(D)產出電壓實測，活動中心

6. 不同光照度下產生電壓的比較：將所製備的 DSSC 電池(三重複)，分別在不同光照強度下，以光照度計測得其光照度後(以 Lux 為單位)，以三用電錶量測在此光照度下，巧克力 DSSC 所能產生的電壓，以瞭解巧克力 DSSC 的產生電壓的能力。
7. 巧克力 DSSC 長期儲存實驗：取一個檯燈，測定其對桌面上照射後之光照度後，每天量測巧克力 DSSC 之電壓，記錄其電壓之變化。
8. 巧克力 DSSC 的微細結構觀察：將燒結完且染色後之 DSSC 電極以正立式顯微鏡調整不同倍率下，觀察其染劑附著情形與燒結狀態。
9. 巧克力 DSSC 的即時電壓電流關係圖：利用一個 1000W 的鹵素燈泡作為光源來探討光電流和光伏特的特性，並以兩組六位半的電錶來測定電流與測定電壓，依據 Amao and Komori(2004)的設計，將燈源調至距離測試的電池表面四公分處，並計算其光能轉換效率。
10. 巧克力 DSSC 的太陽能光子電子轉換效率：將巧克力、可可粉、可可脂所製備之 DSSC 以單波長之光子-光電流檢測儀(Newport U.S.A)，測定其在不同波長下的光能轉換效率，繪製入射光波長與轉換效率關係圖。
11. 染劑吸光特性測定：取 1 g 巧克力，可可粉，可可脂分別溶於 9 ml 的酒精溶液中，均勻混合後，以一號濾紙過濾，取濾液 1 ml 放入厚度 1 mm 的石英試管中，並以全波段分光光度計，在 200-1000 nm 波長下測定其吸收光譜，繪製波長和吸光值的關係圖。

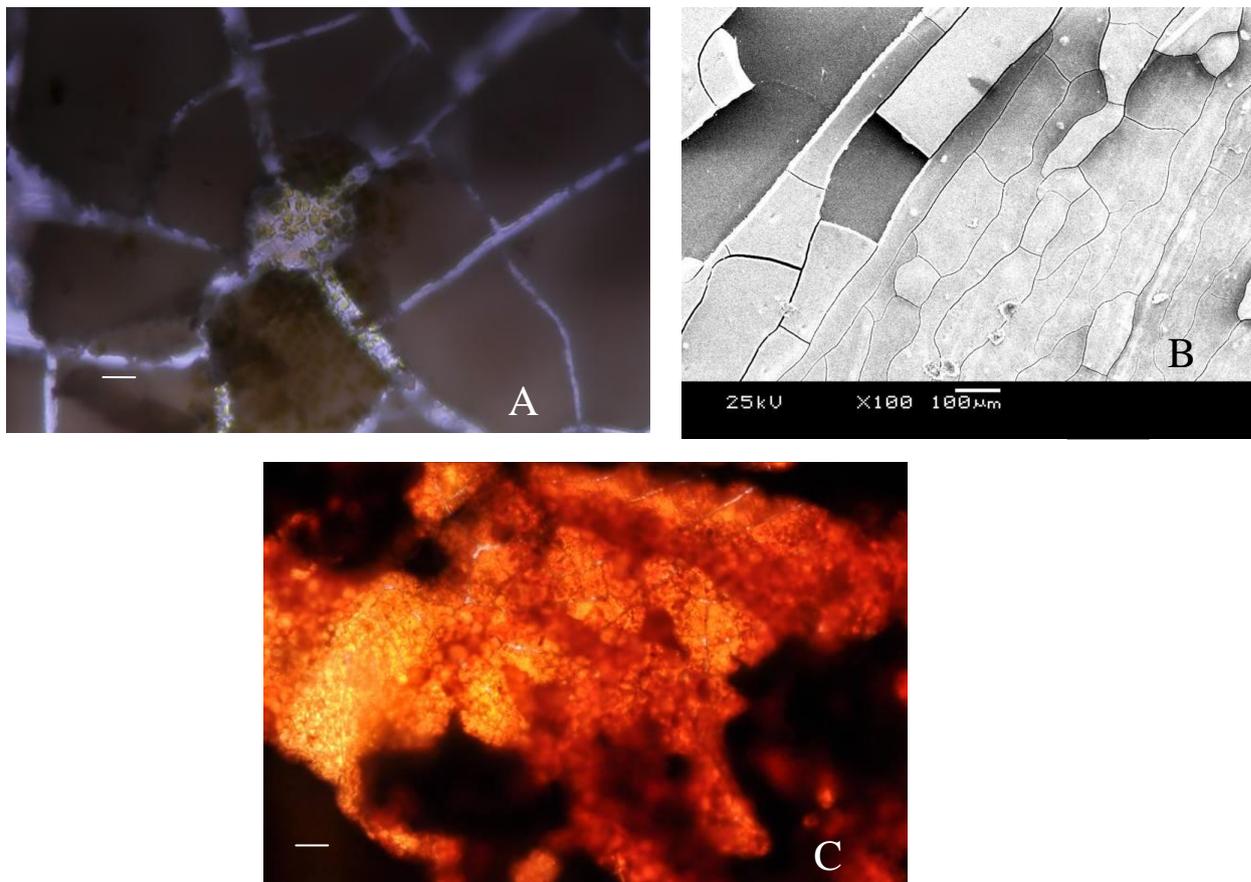


圖四 (A)可可脂染色中；(B)黑巧克力DSSC；(C)可可粉DSSC；(D)可可脂DSSC。

12. 取綠茶，綠茶可樂與雪碧各 20 g 後，倒入培養皿後，按照步驟 1-11 的方式，測試其產電效率。
13. 取 15g 氫化白油在加熱攪拌器上，以 100 度加熱融解後，倒入培養皿，另外取魚油 15g，迅速倒入培養皿，按照步驟 1-11 的方式，測試其產電效率。
14. 以蒸餾水配置沒食子酸溶液，其濃度分別為 10，30，50，70 與 90%後，取 20 g 置於培養皿中，按照步驟 1-11 的方式，測試其產電效率。

伍、研究結果與討論

實驗一 染料敏化太陽能電池的微細構造觀察

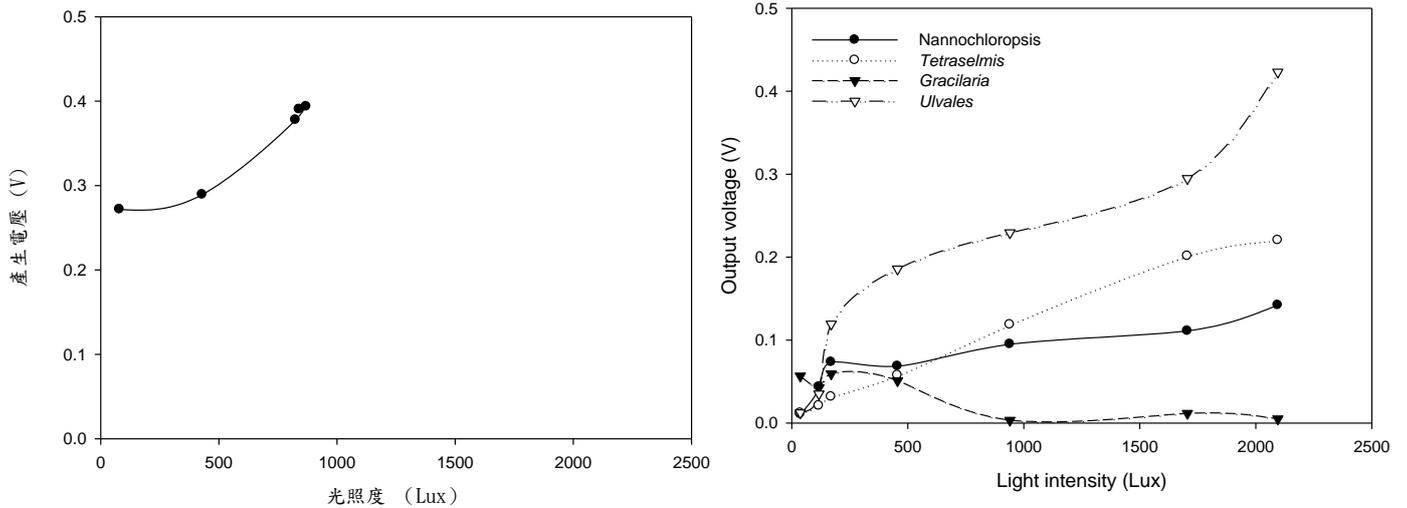


圖一 海藻葉綠體附著在二氧化鈦奈米層上的情形(A)海藻葉綠體 DSSC 的電子顯微鏡觀察圖 (B) 巧克力敏化太陽能電池的微細結構。放大倍率 400 倍，比例尺=10 μm (C)。

利用正立位相差顯微鏡觀察所製備的巧克力敏化太陽能電池，從圖一可以很清楚看到，染劑深深的染紅了奈米級二氧化鈦層，使得整個視野看起來，呈現血紅色，顯示巧克力中的可可粉的確可以作為染料的來源，在觀察的過程中，我們看到深色的巧克力油脂也緊密的黏著在兩片導電玻璃間，這和先前的海藻葉綠體染料敏化太陽能電池的結構(右圖)有最大的不同之處，就是巧克力的油脂填補了經過燒結而破裂的奈米級二氧化鈦層の間隙，提供了太陽能轉換後的電子在各層之間流動的通路，根據學者的研究指出，二氧化鈦奈米層的燒結緻密程度，顯著地影響了染料敏化太陽能電池的光電轉換效率，所以染料敏化太陽能電池在大專院校的製作時，均採用蒸鍍法，使二氧化鈦能生成一片完整的結構層，以減少產生電能的損耗，以巧克力作為染料來源，填補了斷裂，增加了染料敏化太陽能電池的產電能力。

根據張等人(2008)指出，染料與二氧化鈦奈米層的化學鍵結越強，其產生的電子不至於陷入電子洞中，可以減少電流的損耗，後續的研究擬利用電鍍法製備二氧化鈦奈米管，減少不連續層的形成，配合巧克力染劑的特性，提高所產生的電流。

實驗二 光照度對巧克力 DSSC 的影響



圖二 巧克力敏化太陽能電池(左)與海藻葉綠體敏化太陽能電池(右)在不同光照度下的產生電壓圖

由圖二可以看出，巧克力敏化太陽能電池在低光照度下就有接近 0.3V 的產生電壓，隨著光照度的上昇，僅需要約 1000 Lux 的光照度，巧克力太陽能電池就可以產生 0.4V 的電壓，較相同光照度下的海藻太陽能電池高出近兩倍，幾乎跟海藻太陽能電池在日正當中的空曠操場(2000 Lux)的產生電壓相近。太陽能電池的實用最大限制，就是在低光照的時候，產生的電壓大幅度下降，所以必須架設在屋頂，而且架設方向受到限制，必須南北向，而且只要有陰影，就整片電池不會工作，必需另外開發太陽追日系統，調整對太陽最適的角度才能實用。實測的時候，我們所製備的巧克力染料敏化太陽能電池，可以隨意擺放，就可以產生電壓，此一特點相較目前的商用太陽能電池只要改變太陽照射的角度，就完全不會發電的情況來看，其應用的可能性就擴大了很多。

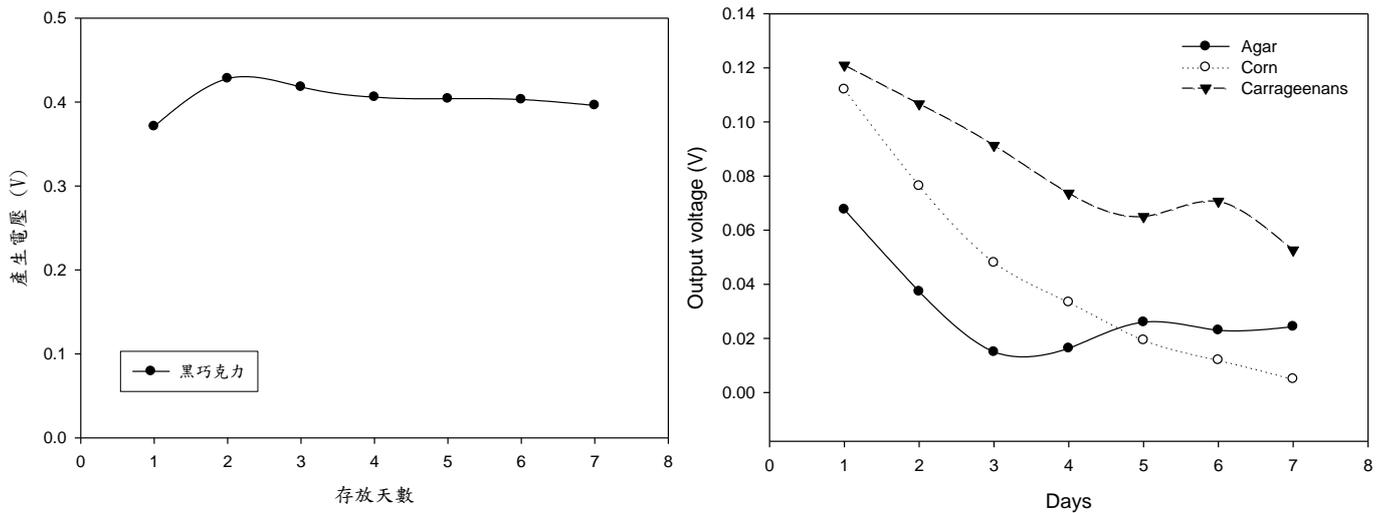


太陽下測試，傾斜也能測



有陰影的地方也能測

實驗三 巧克力 DSSC 一週保存實驗



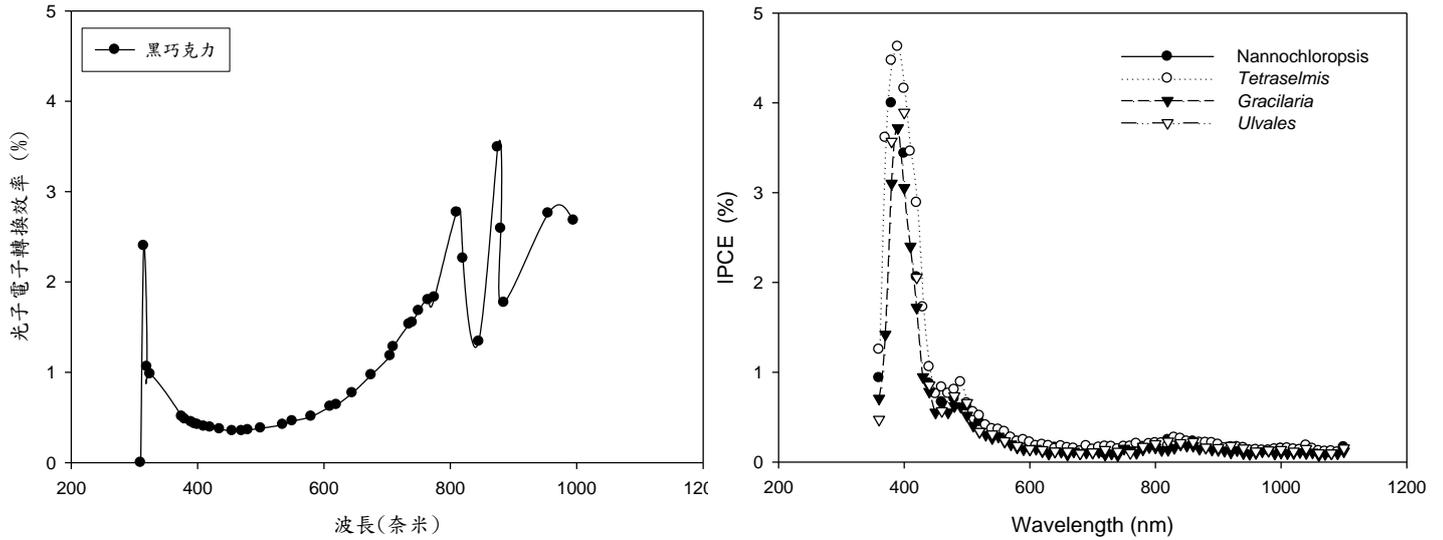
圖三 巧克力敏化太陽能電池(左)與膠體電解液葉綠體敏化太陽能電池(右)在不同光照度下的產生電壓圖

由圖三可以看出，在一週的使用之後，巧克力敏化太陽能電池的產生電壓，跟剛製備時候幾乎沒有太大差異，七天中電壓僅下降約 7.48%，遠較膠體敏化太陽能電池的 58% 為佳。染料敏化太陽能電池另外一個很難克服的問題，就是電解液洩漏的問題，所以學者提出各種不同電解液的狀態，諸如膠體電解液，固體電解液，金屬溶液等形態，希望能讓電解液的損失降低到最少，但是其產生的入射光子電子轉換效率卻遠不及液態電解液(液態 11.1%，膠質 8.2%，固態大約百分之三點多)，我們的試驗結果顯示，巧克力成分中的固態油脂發揮了障壁效應，防止了電解液中的水分因為滲透壓而喪失到空氣中，進一步使太陽能電池因為電解液乾涸而失去了產生電壓的能力。後續我們會將巧克力油脂利用乳化劑(例如卵磷脂等食品級乳化劑)和電解液進行乳化混合，增加其保護水分散失能力，並且簡化巧克力敏化太陽能電池的製程步驟。

根據日本太陽能學會(2008)指出，如果以鈦化合物 N3 系列的染劑製備染料敏化太陽能電池，其使用壽命可達 20 年，顯示 DSSC 已經到了可以實用的程度，張等人(2008)指出，在尋找代替鈦化合物染料的替代方案中，有機化合物仍然是第一選擇，除了它具有環保無污染的優勢外，CdSe 等染劑除了效能較差外，還有殘留污染性物質的疑慮。巧克力其中油脂的特性，受高溫後產生構型的改變，在晚上低溫下又迅速凝固的物性，的確非常適合製作太陽能電池。

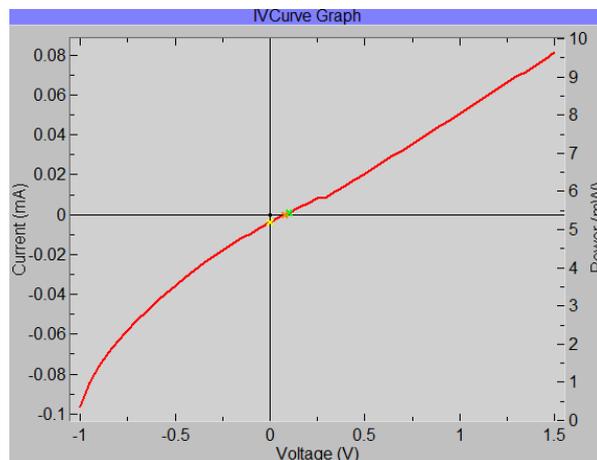
後續的研究，擬將所製備的巧克力太陽能電池放在戶外太陽光下，進行長期間實地測試，探討在真實的使用環境下，巧克力 DSSC 的產電效率衰退速率，進一步作為大量生產的參考係數來源。

實驗四 巧克力 DSSC 和海藻 DSSC 的能量轉換效率比較



圖四 巧克力敏化太陽能電池之入射光波長與光子電子轉換效率的關係圖(左)。不同海藻之葉綠體製備之 DSSC 其波長與 IPCE 的關係圖。●：擬球藻，○：周氏扁藻 ▼：龍鬚菜 ▽：石蓴 (右)

光電轉化效率,即入射單色光子-電子轉化效率(monochromatic incident photon-to-electron conversion efficiency, 用縮寫 IPCE 表示), 定義為單位時間內外電路中產生的電子數 N_e 與單位時間內的入射單色光子數 N_p 之比, 數值越高, 太陽光被轉換成電能的效率越高。通常用百分比(%)來表示。從圖四可以看出, 食品級巧克力製備的敏化太陽能電池, 其入射光子電子轉換效率(IPCE)介於 1~3.5%, 且有兩個區段可以產生近 3%的光電轉換效率, 首先, 是在紫外光區的第一個波峰, 約有 2.5%, 隨著入射光波長由 600 奈米開始增加, IPCE 的效率越來越高, 最高可以在紅外光區(800-1000 nm)有最大的轉換效率 3.5%, 相較於海藻敏化太陽能電池僅在紫外光區有最大的光電轉換效率(4.5%), 此結果顯示, 巧克力成分中含有可以大量的利用葉綠素所無法利用的太陽能產生較多的電能的染劑, 所以才能在產生電壓的實驗中, 產生較海藻葉綠體敏化太陽能電池多出近兩倍的電壓。

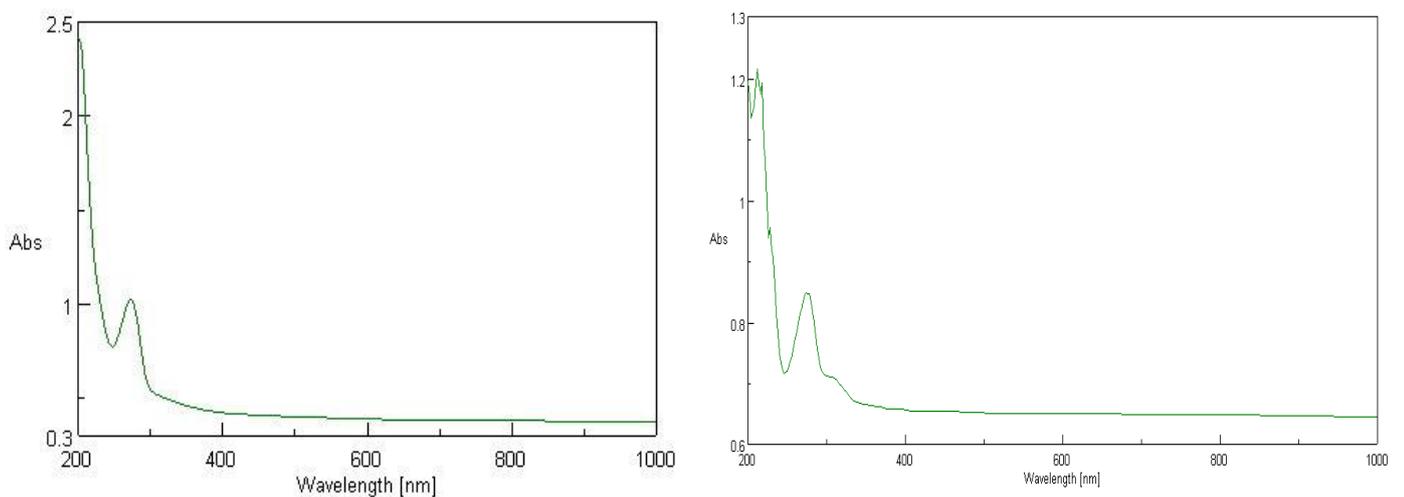


圖六 巧克力敏化太陽能電池之即時電流電壓關係圖。

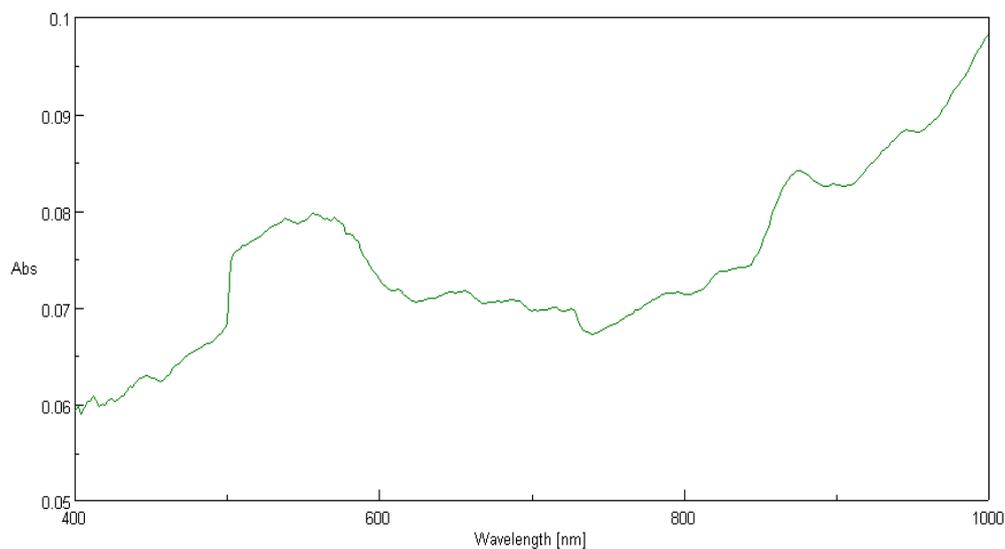
從圖六可以看出，在 1000W 的燈泡下同時測量巧克力 DSSC 的即時電流電壓數值明顯的為低，這可能是因為我們的對應電極採用簡易的蠟燭燒結碳膜的方法，在添加電解液的時候的衝擊力，使得鍍上去的碳層受到了破壞，導電能力下降，張等人(2008)的作法指出，可以利用電鍍法將鉑金屬鍍到 ITO 玻璃上，此種對應電級的持久性會較強，而且所產生的電流也是鍍碳法的兩倍(1700 mA 對 850 mA)，本研究所使用之碳膜的穩定度不高，擬於後續的研究中改採用電鍍法或是蒸鍍法製備對應電極，或是購買市售奈米碳管作為對應電極的來源，進一步減少電流的損耗。

另外，Amao and Komori(2004)利用螺旋藻所製備的 DSSC 其電流最高也僅有 0.3 mA，故無法測量到電流，也無法依據文獻中的公式計算產能效率。

實驗五 可可粉，可可脂與巧克力的全波段掃描分析圖譜



圖七 可可粉的全波段掃描圖譜(左)。市售巧克力全波段掃描圖譜(右)



圖九 市售可可脂全波段掃描圖譜。

爲了了解巧克力成分中，到底是哪些提供了產生電壓的化合物，利用全波段分光光度計對可可豆加工後生產的三種主要產品，可可粉，可可脂與巧克力進行不同波長光線照射後，其最大的吸收光譜分析，分析結果顯示於圖七到圖九，市售三種可可豆加工產物的全波段掃描圖譜，大致相近，多在 200-300 奈米附近有最大的吸收波長，此現象和參考文獻中葉綠素的圖譜相近，對照圖四，也可以看到在近 300 奈米處，入射光子電子轉換效率也可以達到近 2.5%，顯示可可豆中也具有相關化合物可以在紫外光區吸收太陽能產生電能，此化合物應該是巧克力中含量豐富的黃烷醇。

存在於植物性食物中有益於健康的類黃酮物質是促進人們心臟健康的原因，黃烷醇屬於類黃酮物質的一種，它在蘋果、葡萄、紅葡萄酒、茶、可可粉和巧克力中的含量十分豐富。巧克力中黃烷醇含量的多寡，與可可豆加工製程中的發酵、烘烤溫度會受到影響，黃烷醇的外觀呈現棕黃、淡黃或淡黃綠色粉末；在水及乙醇中溶解度很高，味苦澀，在 pH4-8 穩定。遇強鹼、強酸、光照、高熱及過渡金屬易變質。最高耐熱溫度在 1 個半小時內，可達 250℃ 左右，因爲是天然食品萃取物，基本上是無毒性的。錢與孫(2007)以綠茶茶葉中提取的色素作爲染料對敏化太陽能電池性能的影響，結果顯示綠茶敏化太陽能電池其開路電壓和短路電流最大，電池效果最好，其原因是綠茶茶葉的主要成份茶多酚與二氧化鈦的結合以化學吸附爲主，且其中有較多的羥基，這些羥基起著染料生色和與催化劑表面鏈結的作用。參考圖一的太陽能電池結構來看，本研究的情況應該與之相近。

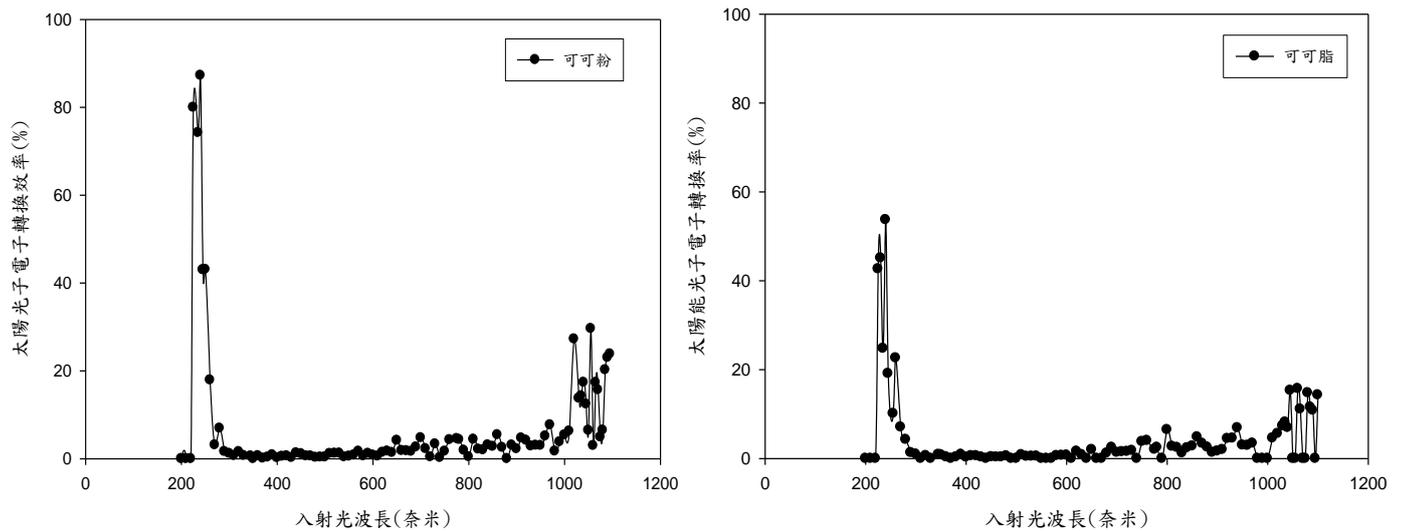
全波段分光光度分析三種主要的巧克力成分，均未發現在紅外光區有較高的吸收波長，對照圖四，隨著吸收光波長的增加，吸光值也增加，入射光子電子轉換效率也增加，由此可以看出，這裡產生的電能可能不是由光子激發電子產生激態，跳躍到較高的能階而產生的電能，應該用另一個角度去觀察，隨著太陽光中波長增長，紅外光中所能提供的熱能也越多，目前家中的紅外線電暖爐，爐體本身不發熱，被照的人卻能感覺到溫暖，就是紅外線的功勞，而這些熱能照射到巧克力中所含的油脂，造成了巧克力分子的重組，構型的改變意味著分子內電子組態的改變，因此而產生電流。

這時候，我們想起了老師上課提到的，本縣外海非常適合做爲海洋溫差發電的基地，颱風比我們多的日本甚至已經開始建築外海的海洋溫差發電廠，所使用的理論基礎就是 1821 年，德國物理學家賽貝爾 (T.J Seebeck, 1780~1831) 發現的“溫差電”現象。他將銅導線和鉍導線連成一個閉合回路 (中間未加任何電源)，然後用手握住結點，這樣就使兩結點之間產生了溫差，有趣的現象出現了，導線上居然產生了電流。同樣，用冷卻結點的方法也可觀察到這樣的現象。這就是“溫差電”效應。對照圖九和圖四，可以看到，隨著入射的波長越來越長，雖然光線沒有被吸收，但是其所攜帶的熱能，卻造成了巧克力溫度的上昇，構型的改變，溫差下產生了大量的電流，所以入射光子電子轉換效率儀很忠實的記錄了產生出的電子。也就是說，本次研究所製備的太陽能電池已經不純然是染料敏化太陽能電池了，我們製備的太陽能電池，同時具備了能將太陽光照射到地球時，其中紅外線所提供的熱能，透過溫差發電，產生電子的能力。這也可以解釋巧

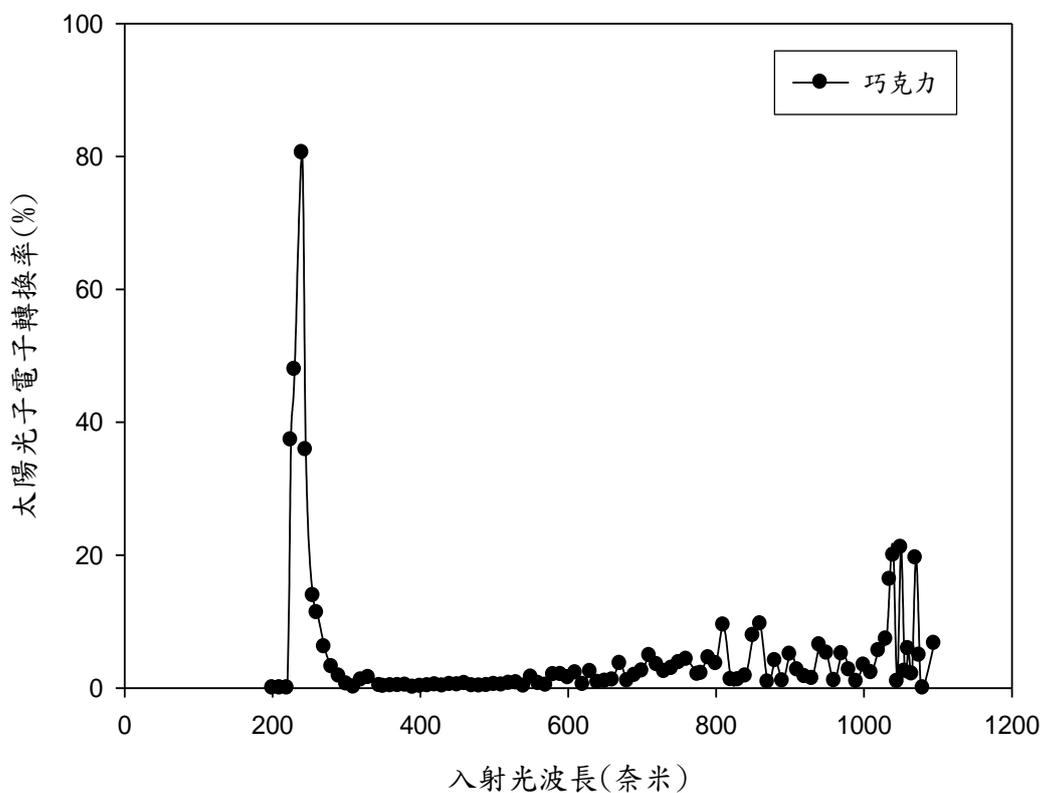
克力太陽能電池的產電能力竟然遠較先前的海藻敏化太陽能電池高出兩倍的原因。

實驗六 可可粉，可可脂與巧克力的太陽光子電子轉換效率

為了進一步確認可可豆三種主要的食品加工產物，可可粉，可可脂與巧克力中，何者對所製備的太陽能電池的光電轉換效率貢獻最大，我們另外製備了這三種染劑的太陽能電池，測量其太陽能光子電子轉換效率。其結果如下圖十到圖十二。



圖十 可可粉(左)與可可脂(右)製備之 DSSC 其波長與太陽光子電子轉換效率的關係圖。



圖十二 巧克力製備之 DSSC 其波長與太陽光子電子轉換效率的關係圖。

圖十一的結果可以看出，可可粉太陽能電池的最大光子電子轉換效率可達 85%以上，是三種可可豆食品加工產物中最高的，根據可可粉的加工製程來看，這個部份正好是黃烷醇類化合物最多的，加工業者甚至爲了要增加可可粉的風味，還得想盡辦法將黃烷醇去除，所以黃烷醇在可可粉加工業者的心目中是無用的廢棄物，卻是本研究之所以可以產生很高的太陽能光子電子轉換效率的原因。

圖十二的結果更讓我們確認了，巧克力油脂可以作爲染料敏化太陽能電池的染劑之一，其光子電子轉換效率可達 56%，雖然是三種可可豆加工產品中最低的，但是可以看出，它在紫外光區也能產生電，顯示富含不飽和脂肪酸的油脂類，也可以作爲太陽能電池的染劑之來源。同樣地，在紅外光區它也有近 20%的轉換效率，能夠把太陽光中的熱能轉變成爲電能，這點對很害怕高溫的太陽能電池而言，是最好的結果，如果能成功大量製造出巧克力太陽能電池，配合行政院農業委員會漁業署補助養殖業設置太陽光電發電設備作業計畫，將此一新式太陽能電池，設置於養殖池面上方吸收太陽能產生電力，供應給養殖業使用，同時可以節能產電，還爲養殖戶找到了源源不絕的電力來源，可謂一舉三得。

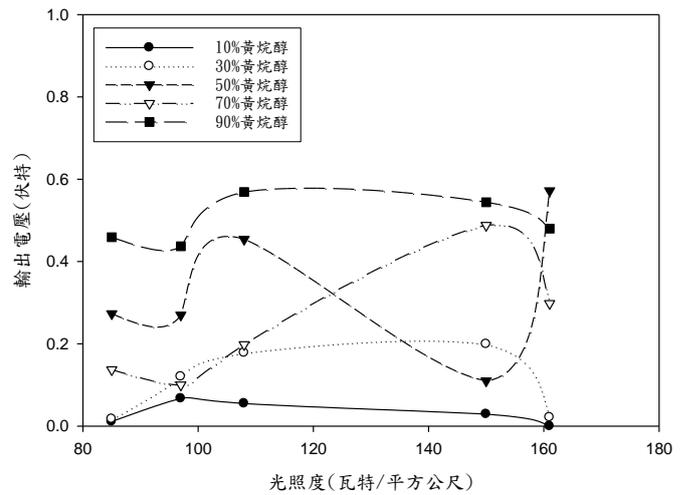
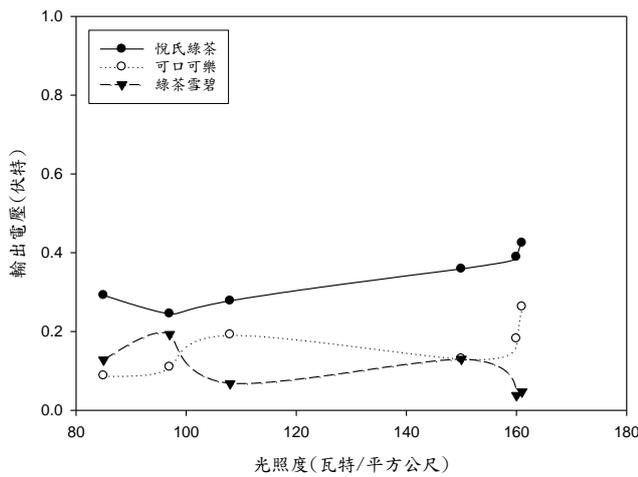
圖十三再次確認了，黑巧克力的確可以作爲染料敏化太陽能電池的染劑來源，其光電轉換效率在紫外光區可達 80%，比較文獻的結果，已經達到實用的水準，此結果也可以看出，可可粉中的黃烷醇產生最多的光電轉換效率，被可可脂稀釋後，所以巧克力的光電轉換效率介於可可粉>巧克力>可可脂之間。

研究到此，原來的題目「可可豆萃取物製備染料敏化太陽能電池之研究」已經不再適用，經過我們熱烈的討論與辯論，我們把這個科展題目定名爲，「巧克力發電囉」，象徵我們製作出來的不僅僅是染料敏化太陽能電池而已，同時也是熱溫差電池。

爲了進一步探討影響巧克力太陽能電池的產電因子，決定嘗試各種不可能的染劑來源，來證明巧克力發電的機制是什麼。我們重新選擇了不同的染劑來證明先前的推論與文獻資料。綠茶中的兒茶素是黃烷醇的一種，參考文獻中錢等人(2007)指出可以利用綠茶來製作 DSSC，以茶類萃取技術而言，台灣地區綠茶產品眾多，我們相信一定能找到更好的綠茶來源，證明兒茶素可以透過氧化還原反應作爲 DSSC 的優良染劑來源，預備實驗的結果顯示，學校販賣機所販賣的綠茶，可以產生 0.5V 的電壓，所以我們選擇了悅氏礦泉茶品作爲我們的綠茶來源，另外，班上同學家長在可口可樂公司上班，提供了我們可口可樂和綠茶雪碧作爲實驗材料；我們也購買了黃烷醇中的沒食子酸(試藥級，Sigma Co. Ltd., USA)作爲黃烷醇濃度實驗的染劑來源。跟可可脂比較方面，我們決定利用兩個極端的油脂，氫化豬油(白油)，這是一種不飽和雙鍵都被高壓催化反應後，加上了氫原子，所以使得分子黏性增加，幾乎不會產生氧化還原反應，指導老師表示，我們科曾經把氫化白油放在窗戶旁邊給太陽曬，根本不會融解，而且也沒有酸敗味產生；作爲對照的，是由家長所提供的食用級魚油，魚油中富含多元不飽和脂肪酸，如二十二碳六烯酸等，必須放在陰涼處避光，否則很容易產生氧化還原反應，造成油脂的酸敗。

其實驗結果如圖十三到圖十五。

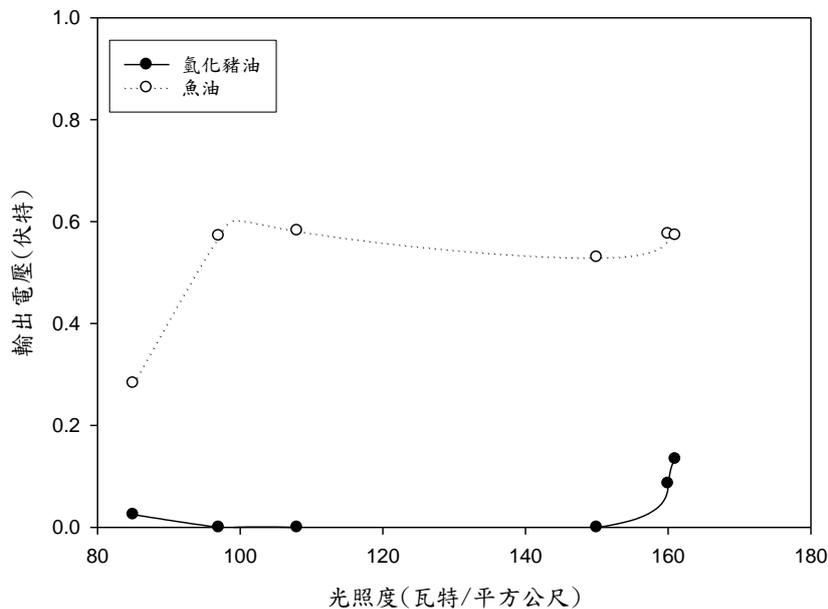
實驗七 不同黃烷醇濃度所製備之 DSSC 其光照度與產生電壓的影響



圖十三 含不同比率綠茶飲料所製備之 DSSC 的光照度與輸出電壓關係圖

圖十四 含不同濃度黃烷醇溶液所製備之 DSSC 的光照度與輸出電壓關係圖

實驗八 油脂不飽和程度對其所製備 DSSC 其光照度與產生電壓的影響



圖十五 氫化豬油與魚油所製備之 DSSC 的光照度與輸出電壓關係圖

實驗七的結果顯示，綠茶的確如預備實驗的結果一樣，隨著光照度上升到 160 瓦特/每平方公尺時，可以產生電壓約 0.4V，可口可樂也可以產生 0.2V 的電壓，根據可口可樂的配方中顯示，其所含咖啡因約為 20 mg/ml 左右，咖啡因也是黃烷酮的衍生物之一，也有文獻指出，咖啡因可以作為染料敏化太陽能電池的染劑來源之一。比較特殊的是綠茶

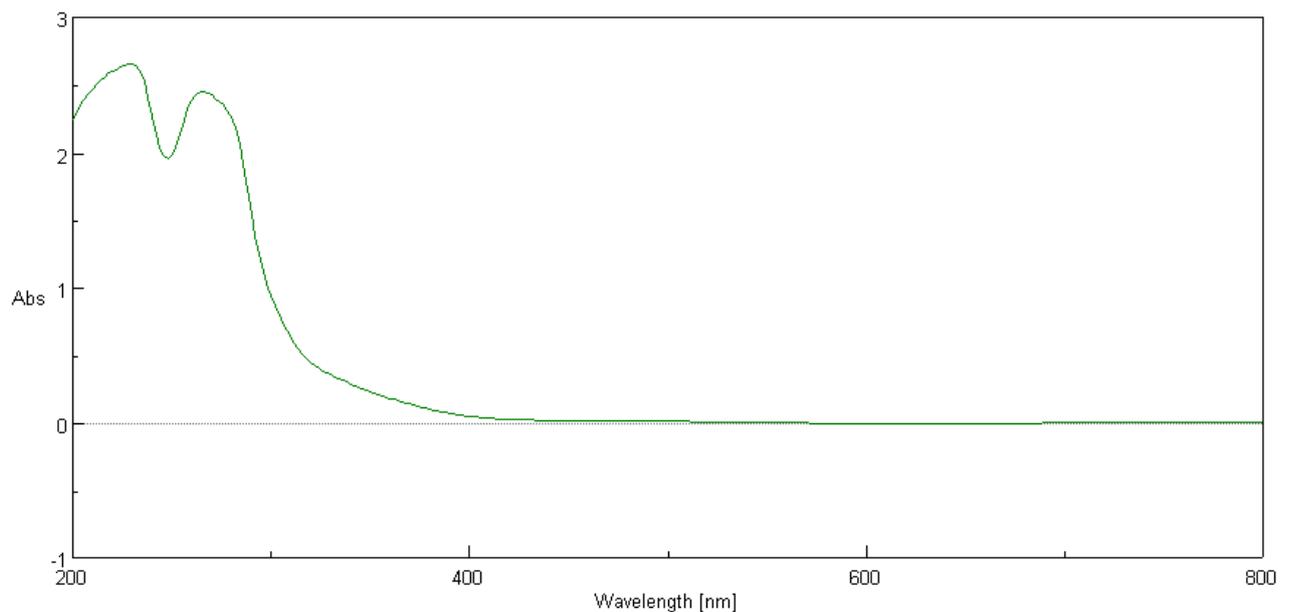
雪碧在室內低光照下，可以有 0.2V 左右的電壓，隨著光照度上升，其產生電壓漸漸減少，推測可能是雪碧中的高濃度碳酸水，在光線照射後，產生氧化還原反應後，增加了電解液的電子供應量，後續的研究，擬利用冷泉水(碳酸濃度高達二氧化碳產量 2000 mg/L)作為黃烷醇的溶液，與巧克力以乳化劑均質乳化後，作為固態染劑的來源之一。

圖八的結果，更證明了隨著黃烷醇濃度的上升，其所製備的 DSSC 產生電壓越高，甚至到了 0.6V 以上，顯示先前的推論是正確的，可可粉 DSSC 的產電能力，是由黃烷醇類化合物行氧化還原反應所產生。以沒食子酸為例，其染劑的最佳濃度為 90%，其次是 50%>70%>30%>10%，後續的研究，擬以不同的溶劑(如酒精，丙酮，異丙醇，正己烷等)萃取可可粉中的黃烷醇化合物後，凍結乾燥成粉末，探討何種劃分是可可粉中產電效率最高的。

實驗八的結果更令我們振奮，氫化後的豬油，幾乎完全不具備產電能力，只在非常高的光照度下(大太陽底下)，才有 0.1V 的電壓，顯示油脂構型改變時，也就是融化時，產生了電子的轉移，此結果和可可脂一模一樣，更令我們振奮的是，魚油在低光照的教室走廊，就能夠產生近 0.6V 的電壓，而且一直維持在此一電壓下，在高光照度下，也產生了電壓的增高現象，三種油脂都有這種現象，顯示我們原先的推論是完全正確的，而且魚油可從台灣最大漁港的最大量漁獲—鯖魚這種高油脂的低價魚種之廢棄物中萃取，碳足跡極低。

綜合實驗七和實驗八，本研究證明了巧克力發電的主要機制，係可可粉中黃烷醇的氧化還原反應與可可脂之油脂不飽和脂肪酸的氧化還原反應同時進行，產生了大量的電壓。其次才是油脂構型改變時，電子流動所提供的電壓。

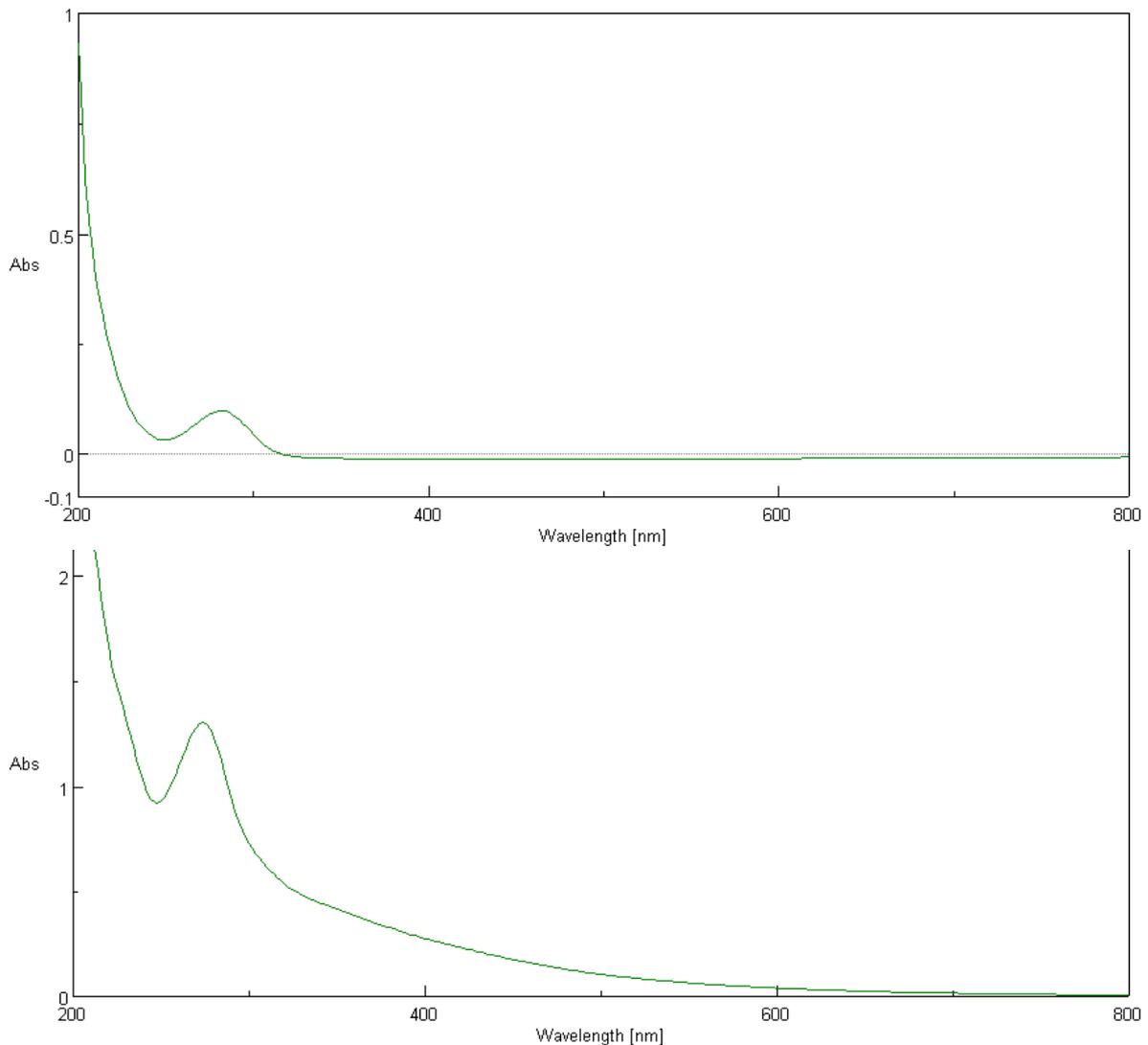
實驗九 染料的全波段掃描分析圖譜



圖十六 悅氏綠茶的全波段掃描圖譜。

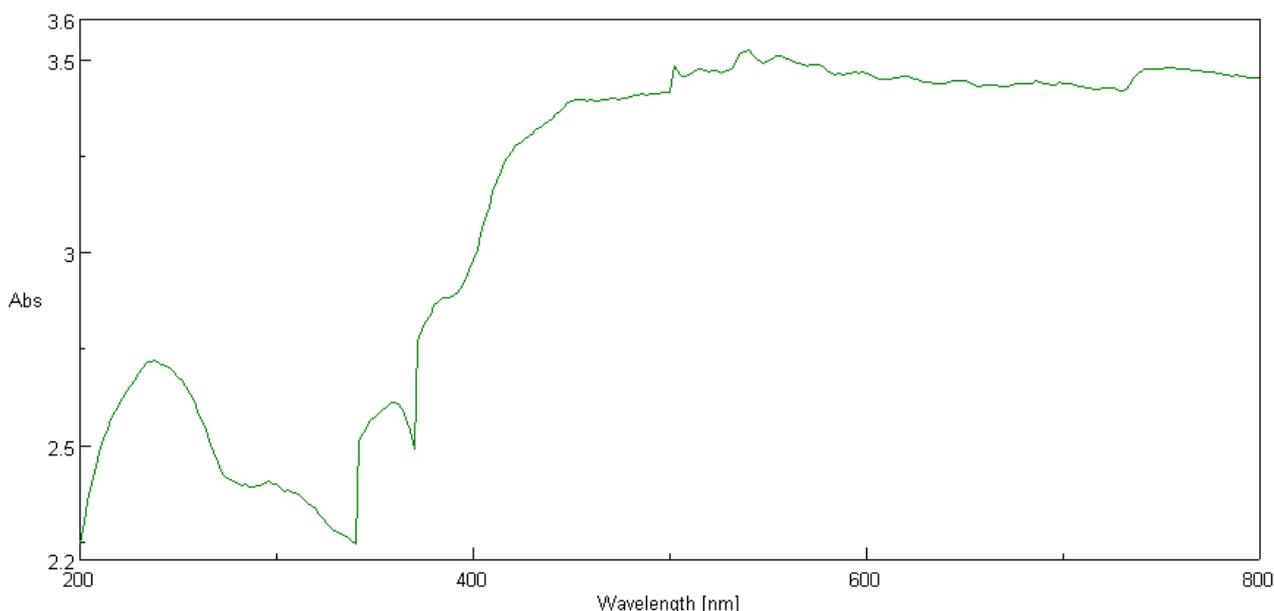
從綠茶的全波段掃描圖譜中可以看出，在紫外光區，綠茶有兩個面積與高度都相近的

吸收波峰，這是跟巧克力或是可可粉有較大不同的地方，也跟我們班上另外一組測定海藻葉綠素全波段的圖譜不同，顯示綠茶的萃取液中，應該含有兩種(以上)的成分，可以作為染料敏化太陽能電池的染劑來源，李與賴(2000)指出，280 nm 那個波峰應該是兒茶素，而 220 nm 附近那個則可能是類黃酮，兩者均已被證明具有抗氧化能力，是優良的抗氧化食品材料，亦即兩者均具有良好的產生氧化還原反應的能力，可以作為 DSSC 的染劑來源。後續的研究，我們將購買試藥級兒茶素，茶多酚與類黃酮等純試藥，並以綠茶粉作為正向對照組，探討茶葉萃取液的成分中，哪一個最適合製作染料敏化太陽能電池。



圖十七 可口可樂全波段掃描圖譜 (上)。綠茶雪碧的全波段掃描圖譜 (下)

從圖十七來看，可口可樂的配方中的咖啡因的確可以在紫外光區有吸收光譜，這個結果和實驗七的結果完全符合，顯示咖啡因具有作為染料的可能性。同樣地，加入綠茶的雪碧在紫外光區有兩個吸收波峰，也是跟綠茶一樣，具有兒茶素與類黃酮的波峰，所以我們認為，未來要選擇染料敏化太陽能電池的染劑，可以先將染劑溶解在蒸餾水，配置 10% 的濃度，並以全波段掃描來作為其適不適合作為染料的重要依據之一。

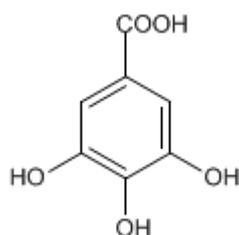


圖十八 黃烷醇的全波段掃描圖譜。

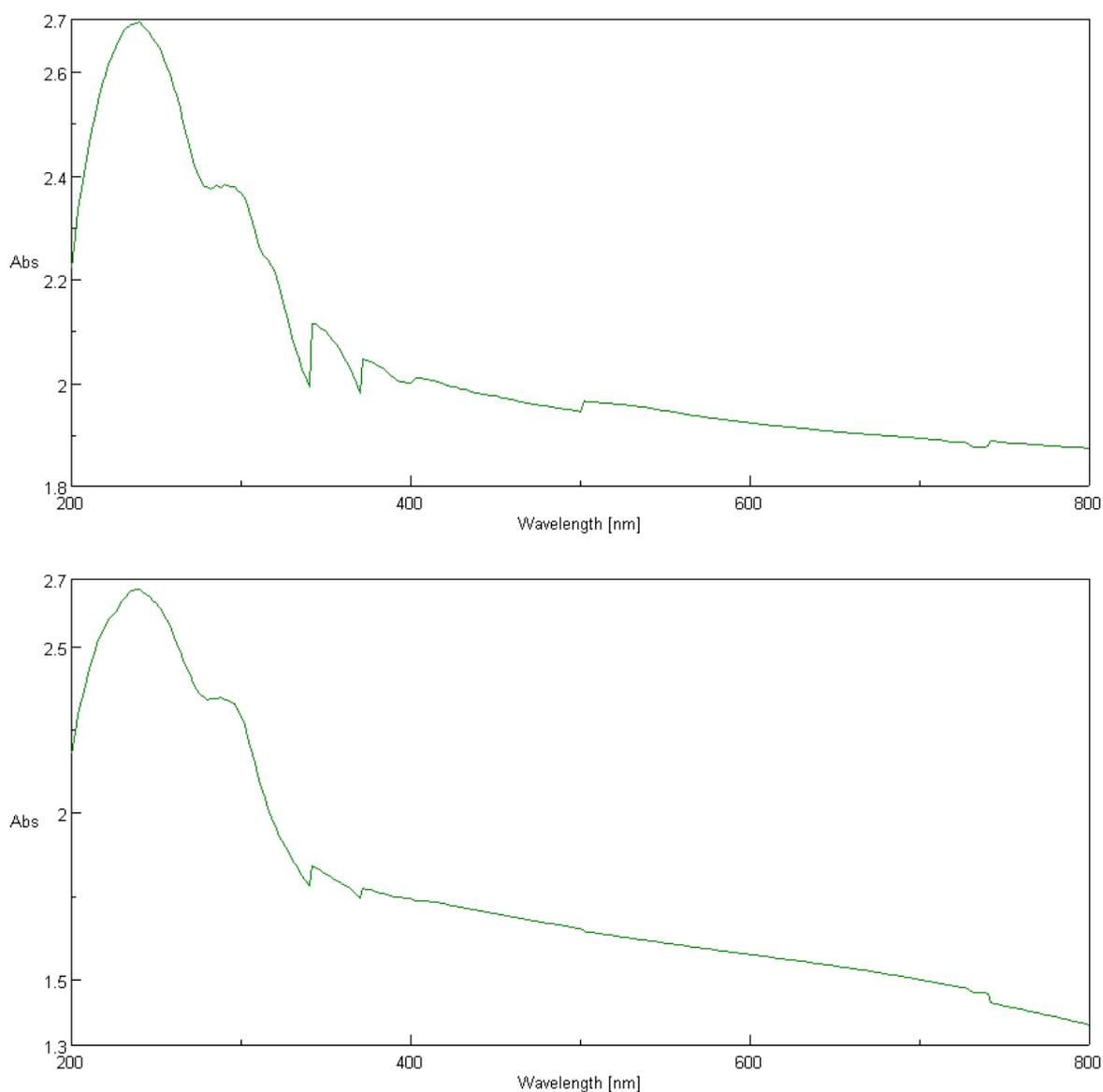
本次研究，我們選擇沒食子酸作為黃烷醇的代表物質，經過全波段掃描結果顯示，沒食子酸除了在紫外光區有吸收波峰外，380 nm，400-800 nm 之間均能大量的吸收不同的單色光，產生很大範圍的吸收區域，我們認為，沒食子酸可能具有在可見光區甚至紅外光區，作為染料敏化太陽能電池染劑之一的能力。

沒食子酸（Gallic acid）是一種有機酸，可見於五味子、漆樹、茶等植物中。化學式 $C_6H_2(OH)_3COOH$ 。常用於製藥工業上。沒食子酸鹽是抗氧劑。它保護免細胞受氧化作用由過氧化氫和氧氣暢通的基礎，它的作用機制與超氧歧化酶相似，都是把化合物上所帶多餘電子或是電子對透過氧化還原反應帶走，是紅酒，茶汁中多酚化合物的代表，沒食子酸也是測定多酚化合物的主要參考標準。

以下為沒食子酸的化學結構式，從結構式上可以看出，它具有三個 OH 基與一個 COOH 基，根據張(2008)的整理指出，這種化合物非常適合作為染料敏化太陽能電池的染劑，因為這些官能基可以和二氧化鈦結構層產生良好的鍵結，使得生產出來的電子可以很快速的流到導電玻璃之上。



沒食子酸的結構式

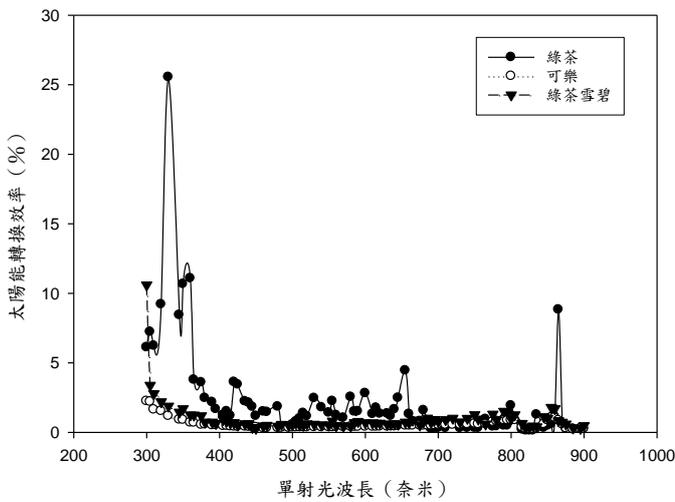


圖十九 魚油全波段掃描圖譜 (上)。氫化豬油的全波段掃描圖譜 (下)

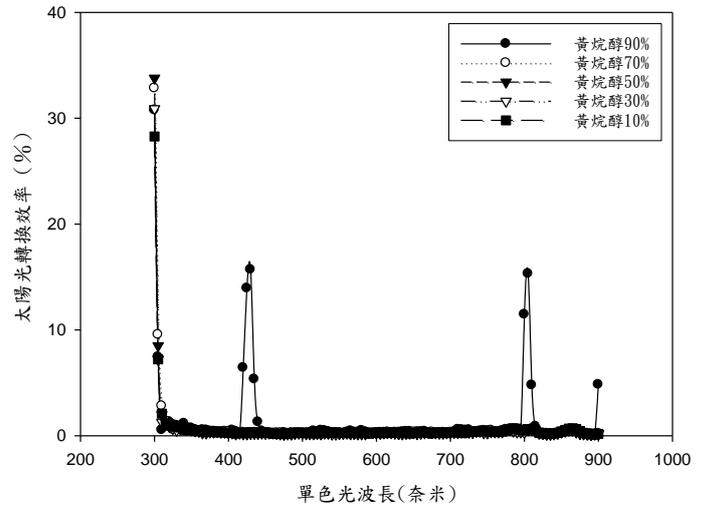
圖十九是氫化豬油與魚油的全波段掃描圖譜，從圖譜中來看，兩者的吸收波峰幾乎都在紫外光區，且沒有其他的波峰，顯示它有可能在紫外光區有作為染料敏化太陽能電池的可能性，此圖譜也和可可脂的結果相近，我們認為，全波段掃描僅能作為染料篩選過程中的一個初步的依據，確實的光電轉換效率，必須利用更精密的儀器，如入射光子電子轉換效率儀來分析。

綜合實驗一到實驗九，我們的結論是，先利用顯微鏡觀察染劑和二氧化鈦層的結合情形，並將染劑進行全波段掃描，找出吸光能力強或是在可見光區能產生極大的吸光波峰後，再進行後續的研究，是探討染料敏化太陽能電池有機染劑的一個有效而快速的篩選步驟。

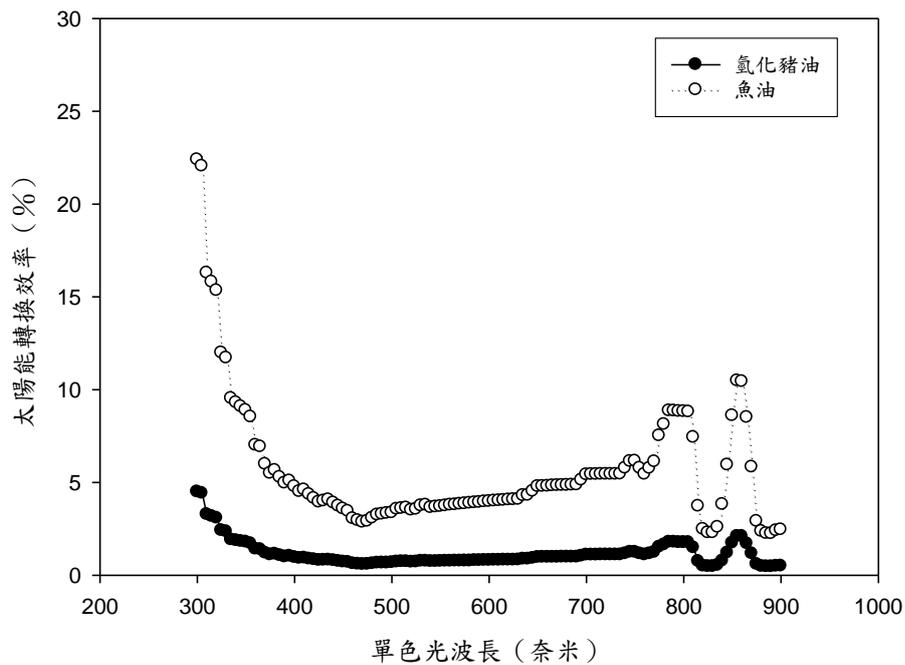
實驗十 不同特性的染劑所製備的 DSSC 其太陽能轉換效率



圖二十 含不同比率綠茶飲料所製備之 DSSC 的入射光波長與太陽能轉換效率關係圖



圖二十一 含不同濃度黃烷醇溶液所製備之 DSSC 的入射光波長與太陽能轉換效率關係圖



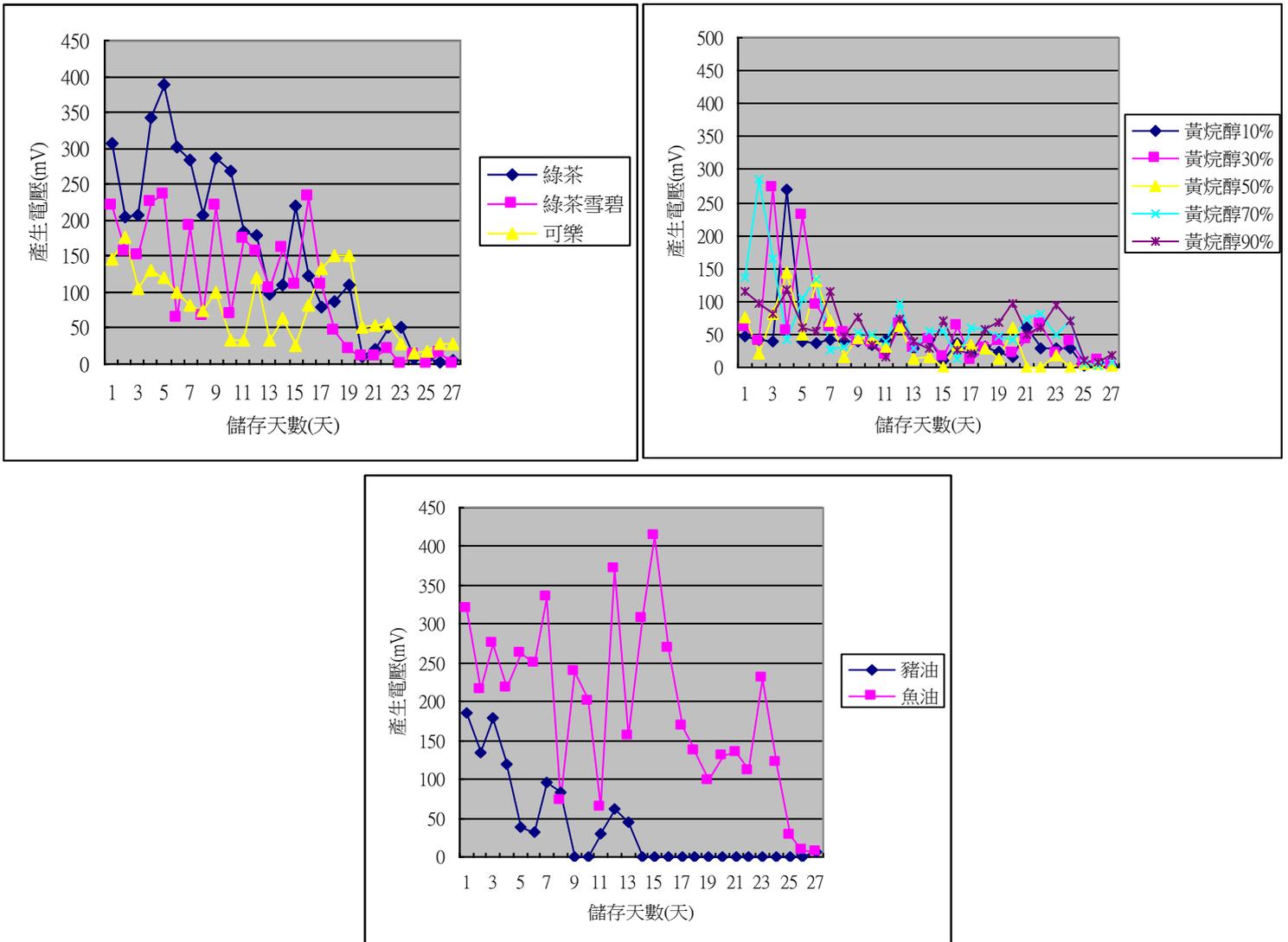
圖二十二 氫化豬油與魚油所製備之 DSSC 的入射光波長與太陽能轉換效率關係圖

從圖二十來看，綠茶 DSSC 之太陽能轉換效率已經達到 25%，顯示綠茶中的黃烷酮化合物的確可以產生很強的氧化還原反應，添加綠茶的雪碧，其最大太陽能轉換效率也可以達到 10%，可樂中的咖啡因並不像先前圖十三的結果，其轉換效率很低，不到 5%。後續的研究，我們建議可以運用台灣各地不同的綠茶品種，採收後，凍結乾燥儲存，並以超臨界二氧化碳法萃取其黃烷酮，作為 DSSC 有機染料來源之一。

因為我們時間有限，黃烷酮的代表化合物—沒食子酸 DSSC 我們只做了五組濃度，實驗結果顯示，30%黃烷酮所製備的 DSSC，其太陽能轉換效率幾乎是 10%的兩倍，說明黃烷酮濃度與 DSSC 的太陽能轉換效率，具備正比關係，隨著沒食子酸濃度增加到 90%，DSSC 之轉換效率越高，可達 39%以上，而且在可見光區 430 nm 與 800 nm 處各有另外兩個波峰，約可以轉換 15%的太陽光能量，此結果與全波段掃描圖譜相符合，顯示可可粉中的高太陽能轉換效率，的確是由高濃度的黃烷醇所提供的。

同樣的，IPCE 的測定結果，呼應了光照度與產生電壓的結果，魚油可以產生近 22%的轉換效率，氫化豬油最高也只有 5%，兩種油脂都與巧克力(可可脂)的情形一樣，在紅外光區也能產生光電轉換作用，魚油更可以達到近 10%以上，顯示油脂類的染劑，可以在紅外光區產生光電轉換效率，三種不同油脂，三次重複都說明了先前的巧克力太陽能電池，的確不只是染料敏化太陽能電池，同時也是溫差電池。

實驗十一 長期室溫保存實驗



綠茶 DSSC 在放置 16 天後，產生電壓下降了一半，黃烷醇更在一週後幾乎都沒有電了，只有魚油 DSSC 在放置 16 天後，所產生電壓沒有明顯下降。後續會利用乳化法製備凝膠型 DSSC，將海藻葉綠體，綠茶萃取液與魚油乳化後，製備可以長期使用的 DSSC。

陸、結論

太陽能是上帝賜給我們地球最珍貴的能源，學者統計過，如果能把一小時內太陽照射到地球表面的太陽能全部吸收起來，就可以供應全體人類五十年的全部能源需求，如果做得到這一點，也不用討論要不要蓋核四，也不用擔心台灣沒有石油來源，發生戰爭的時候怎麼辦，蓋太陽能發電廠就結束了，沒有廢棄物，沒有污染，誰都願意住在太陽能廠旁邊，永遠不怕沒有電。本研究的結果可以看出，可可豆中富含的黃烷醇和油脂，同時具備了染料敏化發電與溫差發電兩種功能，而且黃烷醇本來就是巧克力加工的時候，想盡辦法要用有機溶劑除去的廢棄物，加上巧克力油脂特殊的熔點特性，在日正當中時，傳統的太陽能電池常會因為過熱而失去功能，巧克力油脂這時候融化成為液態，大量發電，到了晚上，氣溫降低，巧克力又凝固成為固態，防止了電解液的喪失，真可謂一兼兩顧的優質染劑來源。

本研究後續擬繼續探討，利用不同的萃取技術，從綠茶中萃取兒茶素，類黃酮等具高氧化還原能力的天然染劑或其衍生物製備染料敏化太陽能電池的功能，進一步找尋低價而環保的染劑來源，取代高價而有環保疑慮的鈦系列染料。另外，後續我們也想要自行由本省大宗漁獲—鯖魚中萃取其油脂中富含的多元不飽和脂肪酸，利用多重相乳化技術，將兩種染劑均勻乳化後，燒結在 DSSC 上，以完全台灣本地的天然植物與水產資源，作為更優質，更廉價，碳足跡更低的太陽能電池媒介。

本研究提出以下結論：

- 1.巧克力與其衍生物可以作為太陽能電池的良好染劑來源。
- 2.巧克力太陽能電池的產生電壓較海藻 DSSC 高出約兩倍。
- 3.巧克力太陽能電池在一週的使用後，產生電壓僅減少約 7%。
- 4.巧克力太陽能電池的太陽能轉換效率可達 3.5%以上。
- 5.巧克力太陽能電池同時可以光能與熱能的形式利用太陽能。
- 6.可可粉太陽能電池的太陽光子電子轉換效率可達 85%，高於巧克力組(80%)，可可脂組最低(58%)。
- 7.巧克力染料敏化太陽能電池的產電能力來自可可粉中的黃烷醇。可可脂則因為其中不飽和脂肪酸之氧化還原反應與紅外線加熱，產生溫差發電，提高了產生電壓。
- 8.黃烷醇製備 DSSC 的最佳濃度是 90%。
- 9.富含多元不飽和脂肪酸的魚油，可以作為太陽能電池的染劑來源之一，其太陽能轉換效率可達 23%，且可以保存 16 天以上。

柒、謝誌

本研究承教育部中部辦公室國立高級中等學校充實實習教學設備實施計畫—區域產業教學特色發展設備補助，謹此致謝。

捌、參考資料及其他

1. 張正華，李陵嵐，葉楚平，楊平華(2008)有機與塑膠太陽能電池。五南出版社
2. 日本太陽能學會(2009)圖解太陽能應用技術。譯者：張萍。世茂出版社。
3. 胡濱,劉國軍,胡志強,張桂霞,王晶,李慧連(2008)染料敏化太陽能電池中凝膠電解質的研究進展。現代化工 28(1)31-34。
4. 張苑,蔡寧,趙穎,趙大偉,劉廣陸,紀偉偉,楊瑞霞(2008) Triton X-100 對染料敏化太陽電池性能影響的研究。影像科學與光化學。26(2):125-130.
5. 錢崑,孫彥平(2007)天然染料敏化 TiO_2 太陽能電池陽極製備優化條件。山西化工。27(3)150-155。
6. 李秀與賴滋漢(2000)食品檢驗分析。華香園書局出版，台北市。

【評語】 040807

本作品利用可可豆相關萃取物做為染料敏化太陽能電池（Dye sensitized solar cell）之染劑，並探討相關之發電效率與發電機制，是一件有趣的作品。若在數據的處理與現有、常用之敏化染料做更為量化，客觀之比較，當能更彰顯作者原有之創意與構思。在同一基礎下比較，並探討有機太陽能板之運作機制，可為本作品進一步之發展。