

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(二)科

團隊合作獎

032919

太陽能光熱分離複合發電的探討

學校名稱：臺北市立天母國民中學

作者： 國一 吳昱德 國一 吳泰澄	指導老師： 王禮章 陳育佐
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：太陽能、光電轉換、熱電轉換

摘要

從遮雨棚吸熱引發靈感，將太陽的光與熱分開來發電，讓太陽能板不因高溫降低發電並延長使用壽命，然後再將分離後的電並聯使用，便是光熱分離複合發電構想，過程發現太陽光的熱分離後，會使發電量降低，可利用提高熱電轉換方式：

- 1.選擇紅外線 IR 塗料來提高透光與吸熱率
- 2.利用傳導、對流、輻射原理提高熱電轉換效果
- 3.提高致冷晶片發電關鍵在於增加吸熱與散熱端的溫差

最後利用所學，改裝環保水冷式設計，除加速散熱增加溫差以提高致冷晶片發電外，冷卻後的水也能當熱水再利用。測試後發現：照射時間越久，光電轉換電力依舊可維持發電效果，而熱電轉換則會越來越好，甚至有機會彌補因吸熱降低透光率所減少的光電轉換電量。

壹、研究動機

某次在用衛星地圖時，發現我們學校頂樓有架設太陽能板，於是我們就抱著好奇的心態去問自然老師那些太陽能板能產生多少電量。老師解釋太陽能板是透過光來進行「光電轉換」，但當太陽能板過熱時，發電功率就會下降。因此我們就想設計出能將「光熱分離」的器材，然後利用光與熱進行發電。之後我們上網查詢相關文獻，發現致冷晶片及紅外線吸收劑，前者可以利用「溫差」進行發電，後者則可以將熱吸收而且光線可以透過，就可進行光熱分離，形成複合式發電。

貳、研究目的

- 一、探討太陽能板受光時，溫度對發電效能的影響。
- 二、設計並製作工具來檢測太陽光熱分離的效果。
- 三、探討光熱分離設計中，影響光熱與光電轉換的效能。
- 四、歸納太陽光熱分離變項中，光熱與光電轉換間的相互影響。
- 五、利用變項間的相互影響，設計並提升太陽能板的發電效率

參、研究設備及器材

一、太陽光熱分離實驗器材組

- (一)太陽能板發電實驗組：太陽能板、鹵素燈。
- (二)溫室增溫盒：透明壓克力盒、壓克力鏡面板、紅外線吸收片、玻璃片、鹵素燈。
- (三)太陽光分離器材：太陽能板、固定架、鹵素燈。
- (四)太陽熱分離器材：溫室增溫盒、致冷晶片、水冷頭、塑膠軟管、水龍頭、鹵素燈。


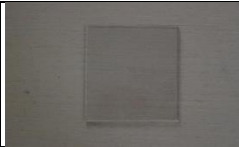


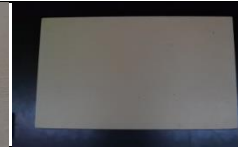


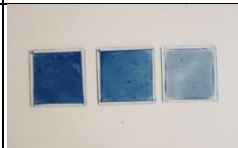





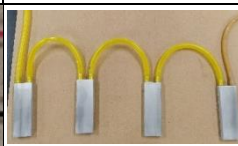


二、太陽光熱分離複合發電組

- (一)光電轉換發電實驗：太陽光分離器材、三用電表、電偶式溫度計、碼表、鹵素燈。
- (二)光熱轉換發電實驗：太陽熱分離器材、三用電表、電偶式溫度計、碼表、鹵素燈。







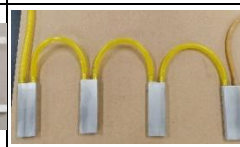

三、實驗儀器：三用電表、電偶式溫度計、碼表、鹵素燈。

四、研究器材照片

(一)太陽光熱分離實驗器材

紅外線吸收片製作					
	紅外線吸收劑	玻璃片	滴管	電器膠帶	固定板
溫室增溫盒					
	透明壓克力盒	壓克力鏡面板	紅外線吸收片	玻璃片	
光分離器材					
	太陽能板	鹵素燈			
熱分離器材					
	溫室增溫盒	致冷晶片	水冷卻系統	散熱膏	鹵素燈

(二)太陽光熱分離複合發電實驗

光電轉換發電實驗					
	太陽光分離器材	太陽能板	鹵素燈		
光熱轉換發電實驗					
	太陽熱分離器材	溫室增溫盒	固定木架	水冷卻系統	鹵素燈

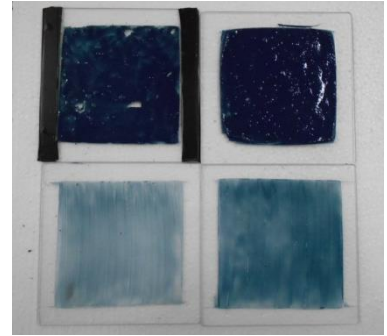
(三)實驗儀器

儀器照片					
	三用電表	電偶式溫度計	碼表	手機	電腦

肆、研究過程與方法

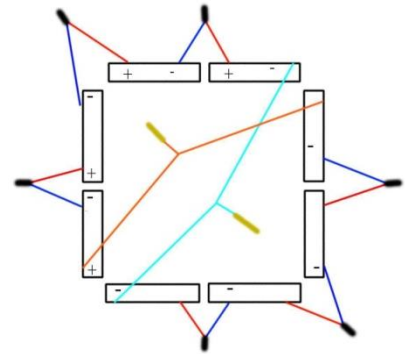
一、器材製作流程與實驗定義

(一)配置實驗所需的光熱分離片：為了避免放置在太陽能板上方的紅外線吸熱片影響透光，降低太陽能板的發電效果，於是利用自製透光度高的紅外線吸熱片，來吸收太陽光中的紅外線：



將市面上遮雨棚上所使用的紅外線吸收劑，以滴管塗抹在清洗乾淨後的透明玻璃板上(15cm²)靜置晾乾後，再依實驗需求重複塗抹 2~3 層。待乾後用電器膠帶將四周黏貼加固，以免加熱時玻璃因受熱不均而破裂。

(二)致冷晶片 電路連接：致冷晶片係採用先四個致冷晶片串聯，在將串聯後的電線並聯，如右圖所示：紅色線連接致冷晶片的正極，藍色線則是連接負極，黃色端將八片致冷晶片串接 (將兩組四片串聯後，最後再將兩組並聯)。

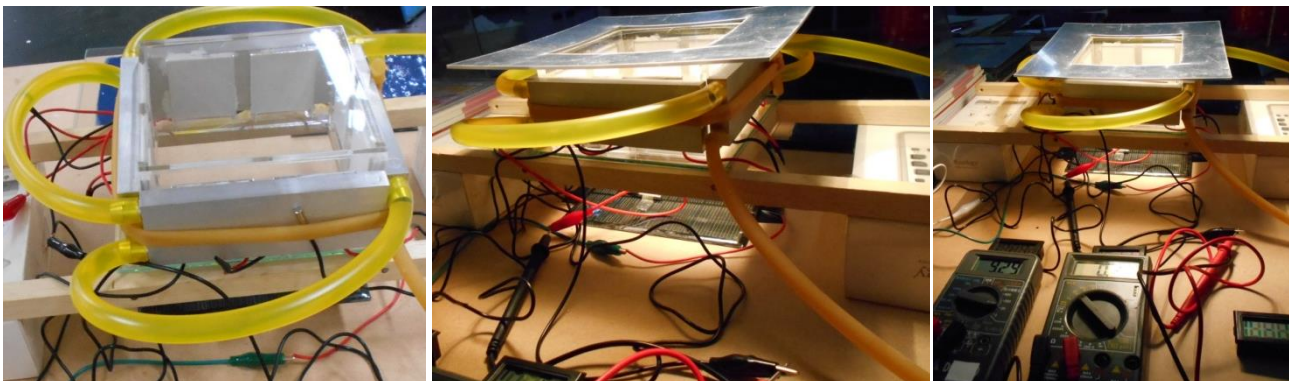


(三)水冷卻系統製作：將水冷頭接上橡皮管，使其連通，而後將首端接上水龍頭，末端則保持讓水順利流出，接著先將散熱膏均勻攪拌，塗抹在水冷頭上，再與溫室貼合。

並用粗橡皮筋將其系統綁於溫室盒上使其不易脫落。完成後即可開水測試。右圖為水冷頭內部的結構



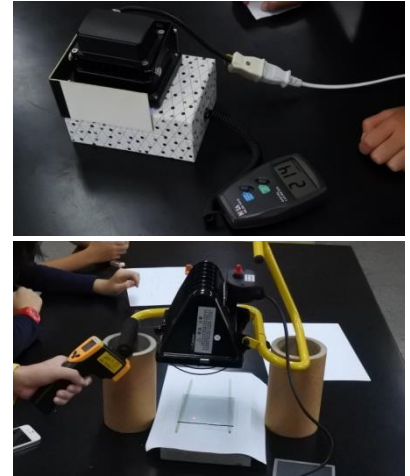
圖：



(四)測試太陽光能發電影響：吸收紅外線的目的在將熱分離回收，但如此也會降低透光率，

影響太陽能板的發電效果於是便透過檢測各種紅外線吸收片的透光率與吸熱率，希望找出吸熱(高)與透光率(高)之間的平衡點。

- 1.透光率測試：以 LED 探照燈照射兩種紅外線吸收片，並用光度計測量後，計算與透明玻璃片透光量的比值。
- 2.吸熱率測試：以鹵素燈模擬太陽光的全波段頻譜，照射紅外線吸收片使其升溫，接著每隔一分鐘以紅外線溫度計測量玻璃吸收面表面溫度變化。



(五)進行太陽光熱發電實驗：根據紅外線吸收片在吸熱與透光的平衡點的條件下，設計提高熱的回收利用，方式有：

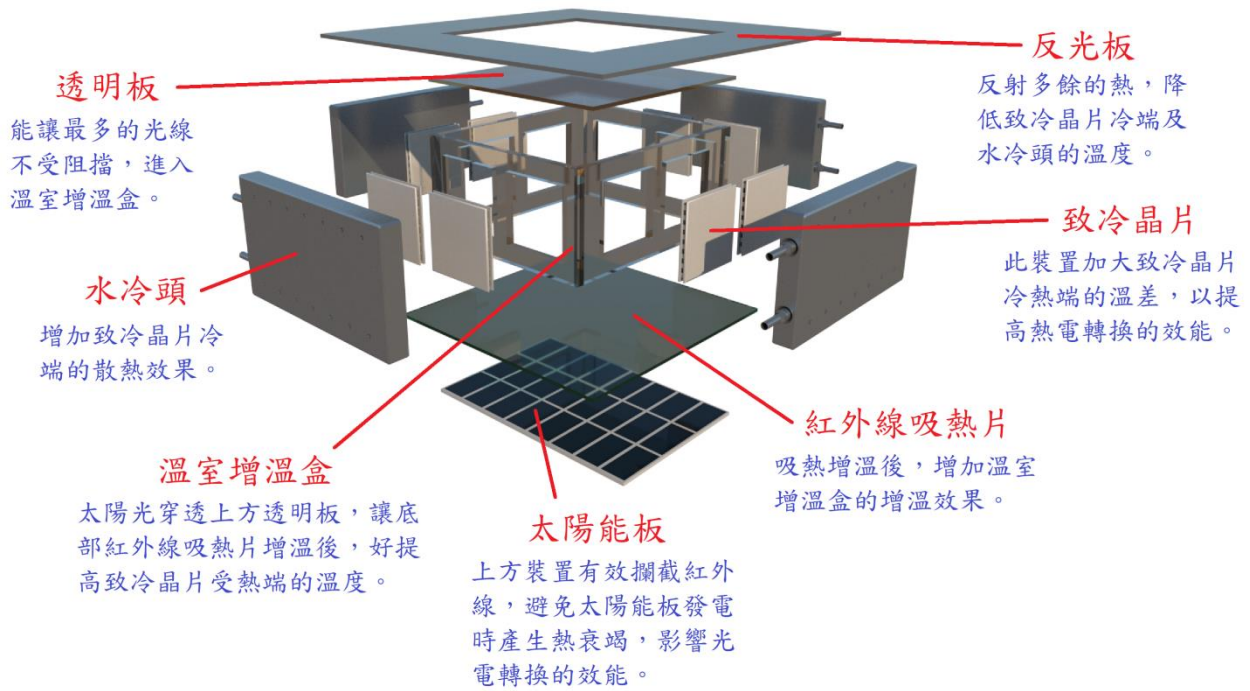
- 1.溫室效應原理：將紅外線吸收片上方以透明壓克力盒蓋住，當熱被紅外線吸收片吸收時，熱便無法離開壓克力盒，如此一來便可讓內部的空氣不斷被加熱。
- 2.提高熱的傳遞：利用紅外線吸收片將輻射熱吸收後，加熱密閉空間的空氣並產生對流後，再將熱透過散熱膏接觸時的傳導，讓致冷晶片產生溫差來發電。
- 3.致冷晶片發電：致冷晶片原本設計是在通電後會在兩側產生冷熱的溫差，通常都用它來降溫散熱，但要是反過來，設法讓兩側產生熱(紅外線吸收片)與冷(散熱)的溫差時，便能產生電力來發電。
- 4.利用熱回收提高發電效率：通常致冷晶片冷熱端的溫差越大，所產生的電力就越強，於是便可在冷端加裝水冷式的熱回收裝置，除了可以收集熱水外，同時又能保護晶片且提高發電量，可說是一舉兩得。

(六)定義光熱分離複合發電效率檢測：

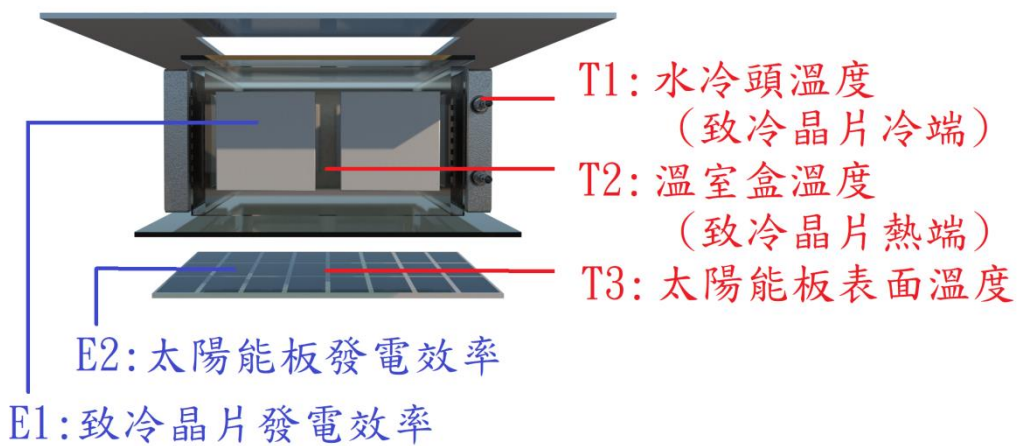
- 1.溫度測量方法：將一電偶式溫度計平貼於太陽能板；另一則綁於水冷卻系統上；最後一個則用鐵絲加固，並塞入盒中，使其不碰到盒子。

2.電功率測量方法：將接電口接到三用電表上，並以每十五秒轉換電流及電壓記下。

(七)光熱分離複合發電設計結構與測試說明圖：



光熱分離複合發電結構設計說明圖



光熱分離複合發電數據量測圖

二、變項探討與實驗設計

(一)紅外線吸收劑的厚度對透光度的影響

操作：測量比較塗佈一層、兩層與三層厚度的紅外線吸收片對透光度的影響。

記錄：透光度

分析：由透光度找出濃度與厚度間的關係。

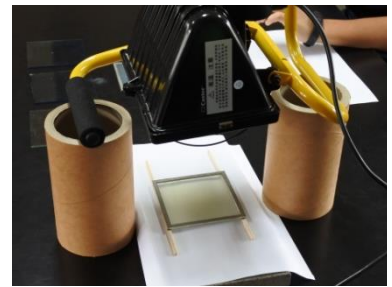


(二)紅外線吸收劑的厚度對吸熱度的影響

操作：測量比較塗佈一層、兩層與三層厚度的紅外線吸收片，對鹵素燈照射 5 分鐘後的吸熱程度。

記錄：溫度(每 1 分鐘記錄一次，共 5 分鐘)

分析：由吸熱度找出濃度與厚度間的關係。



(三)太陽能板熱衰竭對發電效率的影響

操作：測量太陽能板經加熱後所產生熱衰竭對發電之影響。

記錄：溫度、電壓及電流(每 15 秒記錄一次，共 15 分鐘)。

分析：由發電效率找出太陽能板熱衰竭對發電之影響。

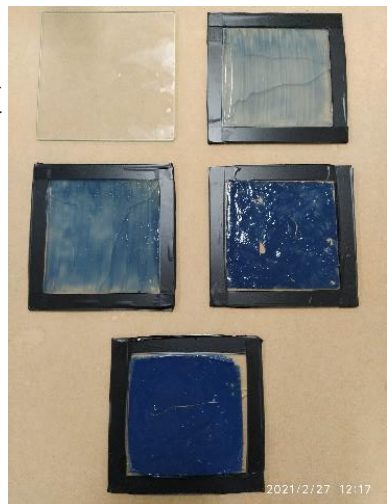


(四)熱分離對太陽能板光電轉換時發電的影響

操作：比較四種溫室盒中，紅外線吸熱片的配置(無溫室盒、無塗層、一層塗層、兩層塗層、三層塗層)對太陽能板發電的影響。

記錄：溫度、電壓及電流(每 15 秒記錄一次，共 15 分鐘)。

分析：由發電效率找出熱分離對太陽能板發電效率的影響。

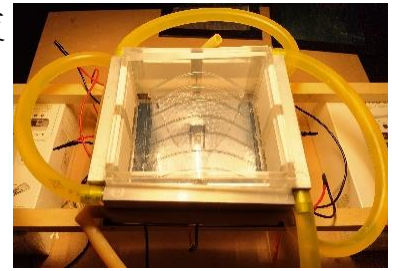


(五)冷卻水與反光罩對致冷晶片光熱轉換時發電效能的影響

操作：比較三種溫室盒的配置(純溫室盒、有水冷系統、有反光罩)對致冷晶片發電的影響。

記錄：溫度、電壓及電流(每 15 秒記錄一次，共 15 分鐘)。

分析：由發電效率找出溫室盒中，加裝水冷系統與反光罩對致冷晶片發電效率的影響。

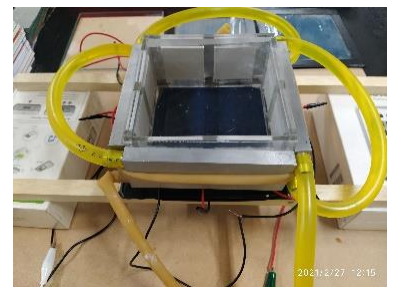



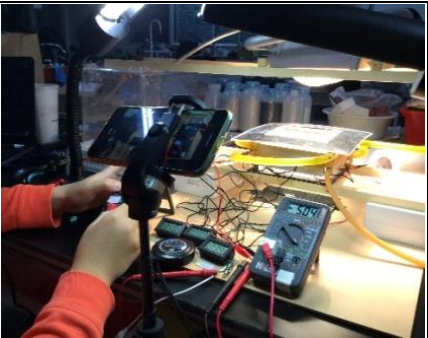
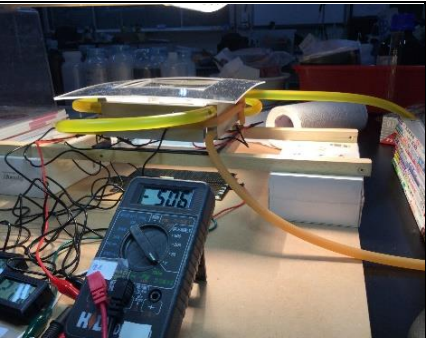
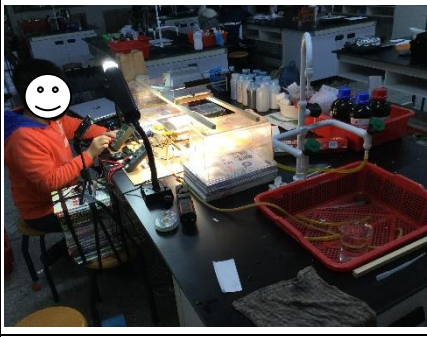
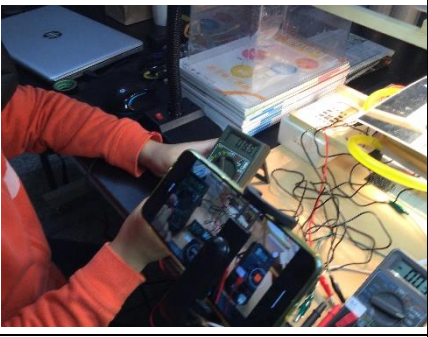
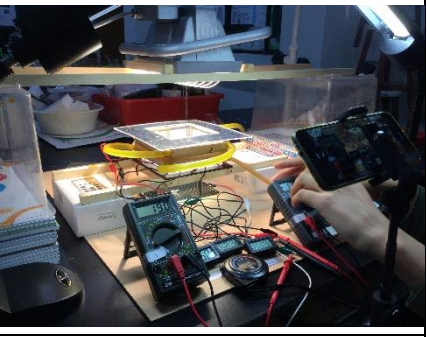
(六)提高熱分離效能對致冷晶片與太陽能板在光熱複合發電的影響

操作：比較四種加裝水冷系統與反光罩的溫室盒中，紅外線吸熱片塗層配置(無塗層、一層塗層、兩層塗層、三層塗層)對致冷晶片與太陽能板複合發電的影響。

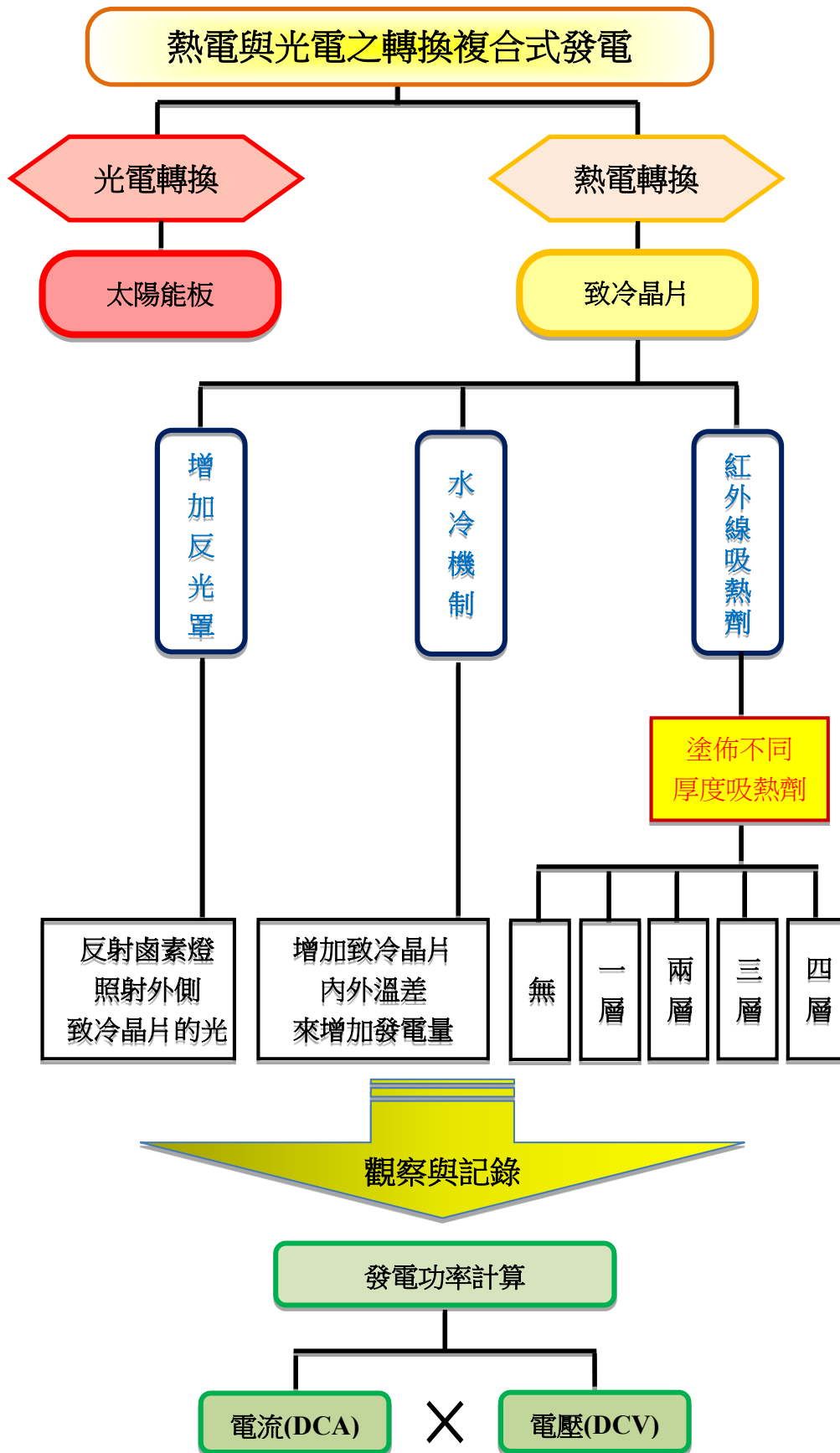
記錄：溫度、電壓及電流(每 15 秒記錄一次，共 15 分鐘)。

分析：由發電效率找出溫室盒中，紅外線吸熱劑塗層厚度，對致冷晶片發電效率的影響。



		
手機錄影視角	轉動三用電表測量電壓與電流	使用三用電表檢測電壓及電流
		
水冷卻系統全圖	使用手機錄影記下數據	使用鹵素燈模擬太陽光加熱

三、研究流程圖



伍、研究結果

實驗一：紅外線吸收劑的厚度對透光度的影響

結果：濃度與厚度對透光度的影響，如下表：

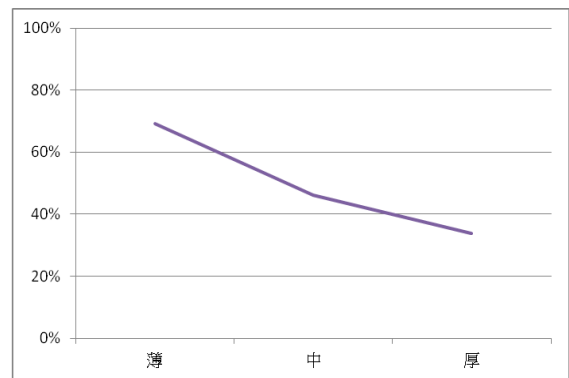
表：濃度與厚度對透光度的影響

透光度		一	二	三	平均	比率
IR 厚度	純玻璃片	25500	25000	25000	25167	100%
	塗佈一層	17100	11800	8900	17400	69%
	塗佈兩層	17300	11600	8700	11600	46%
	塗佈三層	17800	11400	8000	8533	34%

單位：Lux

發現：

- 1.紅外線吸收劑厚度增加三倍(一層→三層)，透光比率下降幅度相當明顯。
- 2.紅外線吸收劑的透光率介於 34%~69%之間。
- 3.紅外線吸收劑塗佈一層，透光率下降 31%、塗佈兩層則下降 23%、塗佈三層降幅有趨緩 12%。
- 4.紅外線吸熱劑塗層越厚，雖然可以吸收更多的熱，但透光度下降，則又會影響太陽能板的光電轉換的發電效果。



紅外線吸熱劑塗層厚度對透光的影響

思考：雖然透光度高，有利於太陽能板的發電，但吸熱度是否也會跟著降低，反而無法將紅外線過濾並吸收？因此，從濃度與厚度的比對中看出與透光率的關係外，還要找出與吸熱度之間的關聯，如此，才有辦法根據透光度與吸熱度兩者之間的平衡點，找出紅外線吸收劑的最佳濃度與厚度來。

實驗二：紅外線吸收劑的厚度對吸熱度的影響

結果：濃度與厚度對吸熱度的影響，如下表：

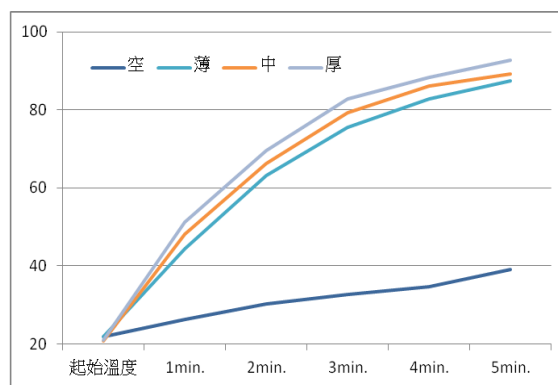
表：濃度與厚度對吸熱度的影響

吸熱度		光照時間						溫度增幅	每分鐘增幅
		0	1	2	3	4	5		
IR 厚度	純玻璃片	21.9	26.2	30.2	32.7	34.7	39.2	17.3	3.5
	塗佈一層	21.8	44.3	63.2	75.6	82.9	87.4	65.6	13.1
	塗佈兩層	20.8	48.2	66.2	79.3	86.2	89.3	68.5	13.7
	塗佈三層	21	51.2	69.5	82.8	88.3	92.8	71.8	14.4

單位：溫度(°C)

發現：

- 1.厚度越厚(一層→三層)，吸熱效果就越好(87.4°C→92.8°C，增幅 1.13 倍)。
- 2.厚度對紅外線吸熱片的吸熱效果不明顯(87.4°C→92.8°C，+1.13 倍)，但對透光率(一層(-31%)→三層(-66%)，降幅-35%)影響很大。
- 3.因此紅外線吸熱片厚度對提高吸熱較不明



各厚度 IR 片的吸熱度

顯，還會大幅降低透光率。評估單層紅外線吸熱片透光率(69%)稍低，但吸熱效果已足夠，因此決定降低紅外線吸熱片一半的厚度，預估可大幅提高透光率(>90%)，同時對吸熱效果降幅(45.3°C)也不會太大。

思考：從不同塗層厚度紅外線吸熱片的透光度與吸熱度比較後發現，雖然厚度越厚，吸熱效果越好，但若要維持一定的透光度，讓太陽能板進行光電轉換所需的光線，因此，可嘗試透過溫室效應原理，來讓紅外線吸熱片增溫的同時，又不會降低透光度，將是一個可行的方式。

實驗三：太陽能板熱衰竭對發電效率的影響

結果：溫度對太陽能板發電效率的影響，如下表：

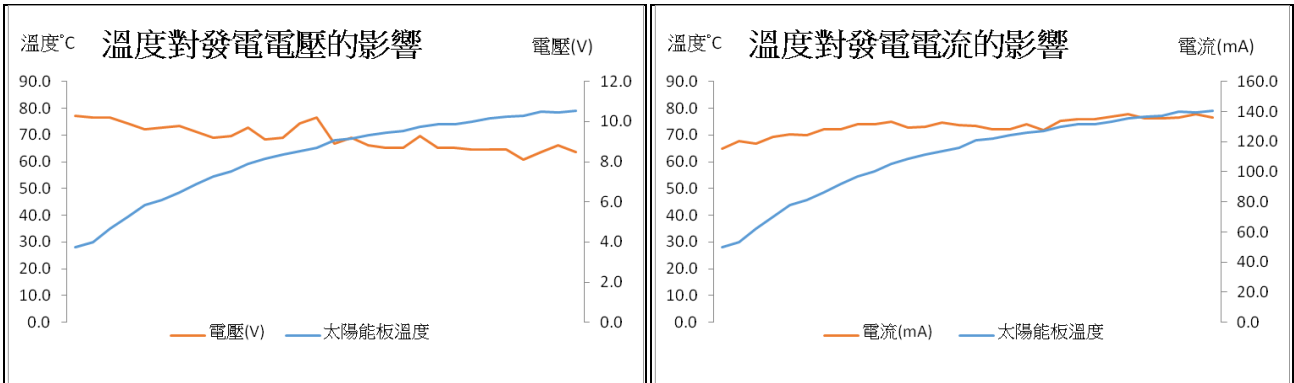
表：溫度對太陽能板發電效率的影響

照光時間(min)	太陽能板溫度(°C)	電壓(V)	電流(mA)	發電功率(mW)
0.5	28.1	10.3	115.1	1185.5
1.0	29.9	10.2	120.2	1226.0
1.5	35.1	10.2	118.8	1211.8
2.0	39.4	9.9	123.1	1218.7
2.5	43.9	9.6	124.9	1199.0
3.0	45.8	9.7	124.2	1204.7
3.5	48.6	9.8	128.4	1258.3
4.0	51.7	9.5	128.3	1218.9
4.5	54.4	9.2	131.4	1208.9
5.0	56.3	9.3	131.8	1225.7
5.5	59.3	9.7	133.1	1291.1
6.0	61.2	9.1	129.3	1176.6
6.5	62.7	9.2	130.0	1196.0
7.0	64.0	9.9	132.5	1311.8
7.5	65.3	10.2	131.2	1338.2
8.0	67.9	8.9	130.2	1158.8
8.5	68.7	9.2	128.1	1178.5
9.0	69.9	8.8	128.1	1127.3
9.5	70.8	8.7	127.6	1110.1
10.0	71.6	8.7	127.5	1109.3
10.5	73.0	9.3	127.6	1186.7
11.0	74.0	8.7	128.9	1121.4
11.5	73.9	8.7	130.2	1132.7
12.0	74.9	8.6	131.7	1132.6
12.5	76.2	8.6	132.2	1136.9
13.0	76.8	8.6	132.7	1141.2
13.5	77.3	8.1	133.5	1081.4
14.0	78.6	8.5	132.9	1129.7
14.5	78.3	8.8	133.4	1173.9
15.0	79.1	8.5	133.0	1130.5
增幅	+51.0	-1.8	+17.9	-55.0
平均	61.9	9.2	128.8	1184.1

發現：

1. 太陽能板照光發電時，表面溫度上升幅度先快後慢，接著增溫的幅度趨緩，直到溫度上升至 70 度以上時，太陽能板依舊還是可以發電。
2. 照光 15 分鐘後，太陽能板表面溫度升高(+51°C)，發電的電壓有微幅下降(-1.8V, -17.5%)；相反的，電流則是呈微幅升高(+17.9mA, +15.6%)。
3. 太陽能板照光發電的電壓與電流，雖然呈現相互的消長，但最後的發電效能(功率 mW)，便呈現下降的趨勢(-29.5mW, -4.6%)，顯示太陽能板照光發電時，因表面溫度的上升而

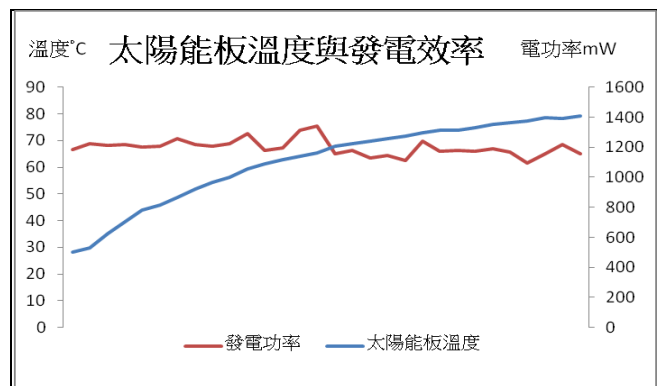
呈現發電衰竭的現象。



溫度對發電電壓的影響

思考：由實驗發現，太陽能板照光發電時有一個理想的溫度範圍(約 30°C~60°C)。溫度較低時(<30°C)，發電電流相對偏低，但電壓不受影響；溫度較高時(>60°C)，發電電壓下降，但電流反而不受影響。但整體的

溫度對發電電流的影響



溫度對發電效率的影響

發電功率依舊呈下降趨勢，因此若能將太陽光能中的紅外線濾掉，並將熱能回收再利用，將可有效保護太陽能板的運作。

實驗四：熱分離對太陽能板光電轉換時發電的影響

結果：熱分離對太陽能板發電的結果，如下表：

表：熱分離對太陽能板發電結果

塗層	空溫室盒		無 IR 塗層		一層 IR 塗層		兩層 IR 塗層		三層 IR 塗層		四層 IR 塗層	
	太陽能板溫度 (°C)	發電功率 (mW)	太陽能板溫度 (°C)	發電功率 (mW)	太陽能板溫度 (°C)	發電功率 (mW)	太陽能板溫度 (°C)	發電功率 (mW)	太陽能板溫度 (°C)	發電功率 (mW)	太陽能板溫度 (°C)	發電功率 (mW)
開始	23.5	909.3	29.9	665.4	24.7	474.1	26.0	246.3	23.4	106.3	21.7	67.2
結束	62.2	709.3	59.4	786.6	43.1	481.5	37.4	246.8	33.6	105.0	32.7	77.0
增幅	38.7	-200.0	29.5	121.2	18.4	7.3	11.4	0.6	10.2	-1.3	11.0	9.9
平均	50.3	774.7	50.7	740.9	35.4	466.3	32.1	226.9	28.6	102.5	27.1	71.7

發現：

1. 太陽能板照光發電時，表面溫度上升幅度：

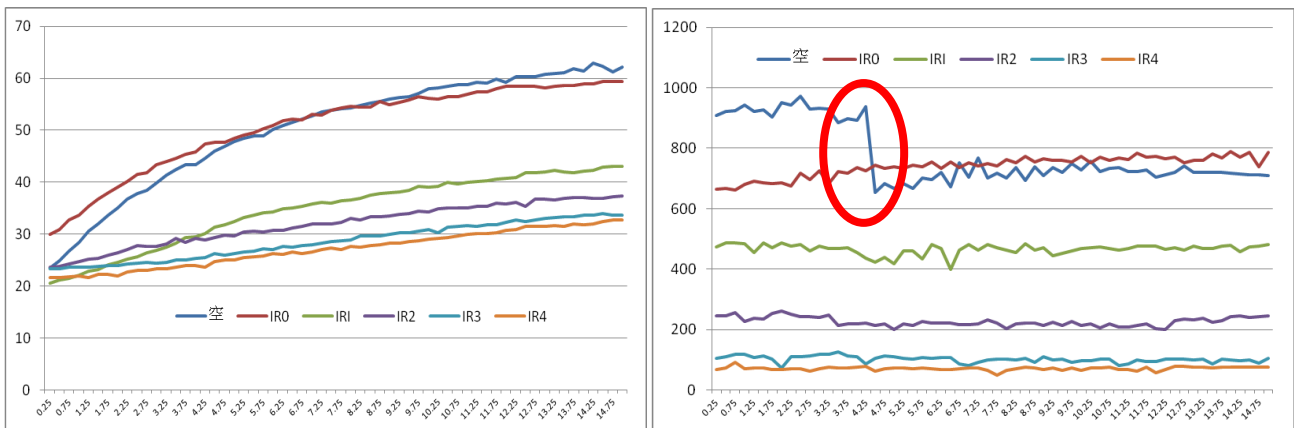
空溫室盒 > 無 IR 塗層 > 一層 IR 塗層 > 兩層 IR 塗層 > 三層 IR 塗層 > 四層 IR 塗層

看出紅外線吸熱塗層可以有效降低太陽能板照光發電時的溫度。

2. 太陽能板的發電效果，也因為紅外線吸熱塗層阻隔的關係而降低了發電量，發電效率剛好和塗層的厚度相反。

3. 比對實驗三，太陽能板在完全沒有阻擋物之下的發電功率為 **1184.1mW**。若上方加上透明空盒(空溫室盒)，發電效率便會遞減為 **774.7mW**。即使加上不發電用的致冷晶片作為對照組(無 IR 塗層)，發電效率依舊會降到 **740.9mW**。

4. 在完全沒有阻擋物之下的太陽能板，在照光發電時的 **4 分 15 秒**左右(右下塗紅圈處)，發電效能有明顯的下降，證明的確能有效的維持穩定的發電，進而保護太陽能板。



紅外線吸熱塗層對太陽能板表面溫度的影響

紅外線吸熱塗層對太陽能板發電效果的影響

思考：由實驗四發現，雖然紅外線吸熱劑的塗層越厚，越能有效擋住紅外線，進而降低太陽能板表面的溫度，但同時也濾掉了能夠使太陽能板發電的波段頻譜。因此，如何減少紅外線吸熱片，阻擋過多太陽能板發電所需的光線，又能有效提高溫室效應盒所回收的熱源，可朝溫室增溫盒配置的設計，來嘗試進行解決。

實驗五：冷卻水與反光罩對致冷晶片光熱轉換時發電效能的影響

結果：冷卻水與反光罩對致冷晶片發電效能的結果，如下表：

表：冷卻水與反光罩對致冷晶片發電效能的結果

配置	無水冷+無反光罩				有反光罩				有水冷系統				有水冷+有反光罩			
	溫室 盒內 溫度 (°C)	溫室 盒外 溫度 (°C)	致冷 晶片 溫差 (°C)	發電 功率 (mW)	溫室 盒內 溫度 (°C)	溫室 盒外 溫度 (°C)	致冷 晶片 溫差 (°C)	發電 功率 (mW)	溫室 盒內 溫度 (°C)	溫室 盒外 溫度 (°C)	致冷 晶片 溫差 (°C)	發電 功率 (mW)	溫室 盒內 溫度 (°C)	溫室 盒外 溫度 (°C)	致冷 晶片 溫差 (°C)	發電 功率 (mW)
開始	22.4	22.9	-0.5	0.0	22.6	21.0	1.6	0.0	24.6	20.9	3.7	0.0	28.7	20.8	7.9	36.4
結束	69.9	35.4	34.5	20.0	74.0	38.8	35.2	56.0	57.8	22.1	35.7	432.5	58.4	21.5	36.9	518.4
增幅	47.5	12.5	35.0	20.0	51.4	17.8	33.6	56.0	33.2	1.2	32.0	432.5	29.7	0.7	29.0	482.0
平均	53.6	29.1	24.5	9.9	57.0	30.1	26.9	26.0	48.0	21.6	26.4	224.5	50.1	21.3	28.8	271.7

發現：

1. 溫室增溫盒中反光罩與水冷系統的配置，對致冷晶片冷熱端溫差的影響：

有水冷系統與反光罩 > 有反光罩 > 有水冷系統 > 無水冷系統與反光罩

2. 溫室增溫盒中反光罩與水冷系統的配置，對致冷晶片降溫效果的影響：

有反光罩 > 無水冷系統與反光罩 > 有水冷系統 > 有水冷系統與反光罩

3. 溫室增溫盒中反光罩與水冷系統的配置，對致冷晶片發電效果的影響：

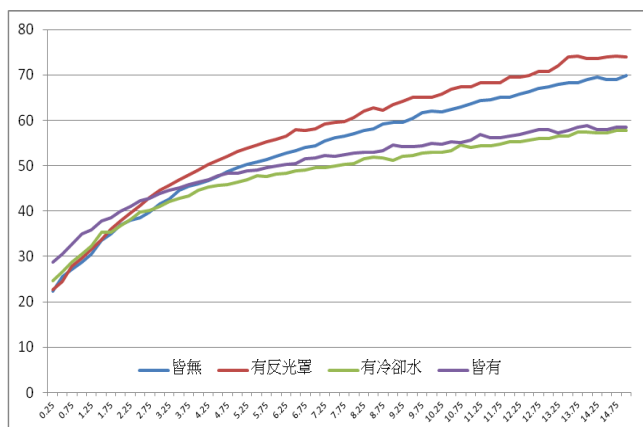
有水冷系統與反光罩 > 有水冷系統 > 有反光罩 > 無水冷系統與反光罩

4. 無水冷系統與反光罩溫差小，發電效果卻是最高，其實是還要再看降溫效果來進行比

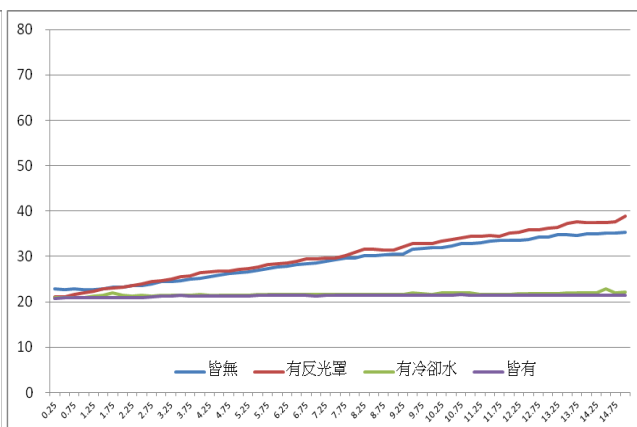
對。由於致冷晶片冷熱端的熱傳導作用，使得四種配置溫室增溫盒的溫差，都介於

24.5°C~28.8°C之間，此時冷端的溫度(有水冷系統與反光罩、21.3°C)VS(無水冷系統與反

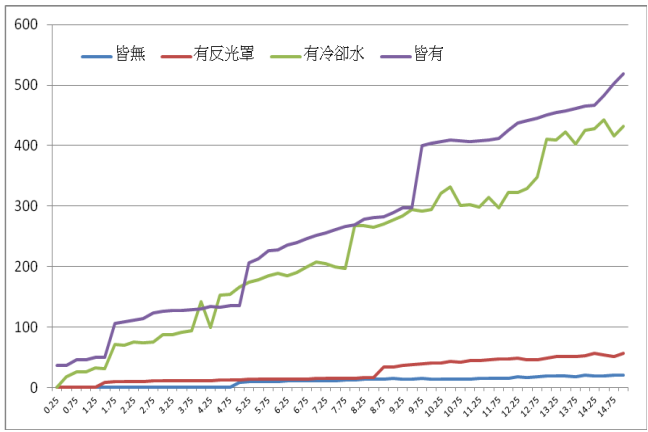
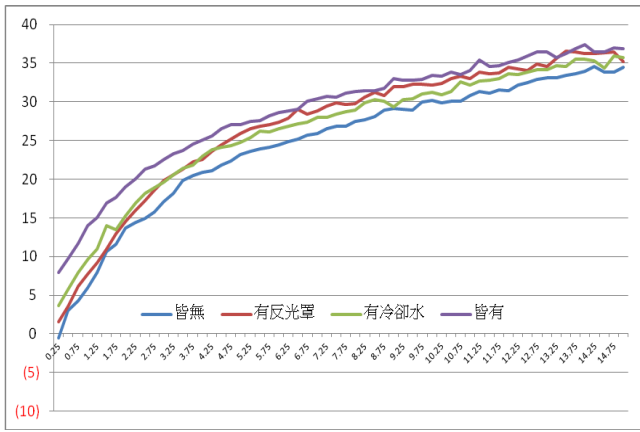
光罩、29.1°C)，推測應該是造成致冷晶片發電效率差異的可能原因。



溫室增溫盒配置對致冷晶片熱端溫度的影響



溫室增溫盒配置對致冷晶片冷端溫度的影響



溫室增溫盒配置對致冷晶片冷熱端溫差影響

溫室增溫盒配置對致冷晶片發電效果的影響

思考：由實驗五發現，溫室增溫盒的設計，不儘是要提高致冷晶片冷熱端的溫差外，同時又要儘量降低冷端的溫度，讓致冷晶片在溫差大且較低溫的環境下，才能產生較高的發電效能。由於實驗已證實，可利用水冷系統加上反光罩的輔助，已經可以有效控制致冷晶片的冷端溫度(21.3°C~21.6°C)，若結合實驗四，利用紅外線吸熱塗層的厚度吸熱，來提高致冷晶片熱端的溫度(加大溫差)，也能讓光線透過溫室盒，讓下方的太陽能板發電，如此一來光熱複合發電的設計，才能具有實用的價值。

實驗六：提高熱分離效能對致冷晶片與太陽能板在光熱複合發電的影響

結果：溫室盒的配置對致冷晶片發電的影響，如下表：

表：溫室效應盒對吸熱片的熱電轉換結果

配置	有水冷卻系統+有反光罩																			
	無 IR 塗層				一層 IR 塗層				兩層 IR 塗層				三層 IR 塗層				四層 IR 塗層			
	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片	太陽能板	致冷晶片		
表面溫度	發電功率	冷熱溫差	發電功率	表面溫度	發電功率	冷熱溫差	發電功率	表面溫度	發電功率	冷熱溫差	發電功率	表面溫度	發電功率	冷熱溫差	發電功率	表面溫度	發電功率	冷熱溫差	發電功率	
照光時間 (min)	°C	mW	°C	mW	°C	mW	°C	mW	°C	mW	°C	mW	°C	mW	°C	mW	°C	mW	°C	mW
開始	29.9	665.4	7.9	7.3	24.7	474.1	2.6	7.2	26.0	246.3	5.7	15.9	23.4	106.3	4.7	12.2	21.7	67.2	2.6	10.0
結束	59.4	786.6	36.9	90.9	43.1	481.5	57.7	611.8	37.4	246.8	55.2	554.8	33.6	105.0	66.5	623.0	32.7	77.0	65.0	712.3
增幅	29.5	121.2	29.0	83.6	18.4	7.3	55.1	604.6	11.4	0.6	49.5	538.9	10.2	-1.3	61.8	610.8	11.0	9.9	62.4	702.3
平均	50.7	740.9	28.8	52.1	35.4	466.3	42.0	308.2	32.1	226.9	39.6	327.3	28.6	102.5	47.8	340.9	27.0	71.6	44.1	359.0
合併功率	793.0 mW				774.5 mW				554.2 mW				443.3 mW				430.6 mW			

發現：

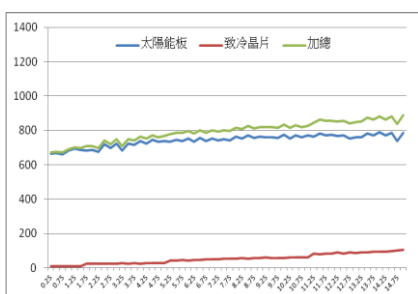
1.光熱複合發電時，**太陽能板**在光電轉換時發電的效果：

無 IR 塗層 > 一層 IR 塗層 > 兩層 IR 塗層 > 三層 IR 塗層 > 四層 IR 塗層

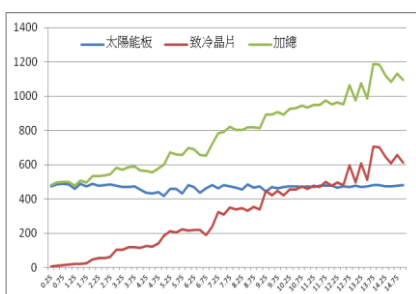
2.光熱複合發電時，**致冷晶片**在光電轉換時發電的效果：

四層 IR 塗層 > 一層 IR 塗層 > 三層 IR 塗層 > 兩層 IR 塗層 > 無 IR 塗層

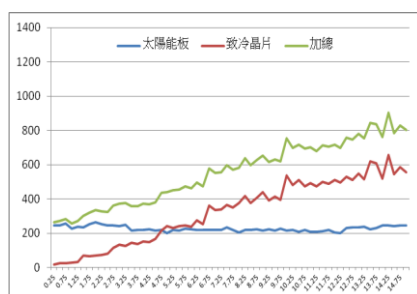
3.光熱轉換的效果看出，當控制致冷晶片冷端的溫度後(21.3°C~21.6°C)，紅外線吸熱劑的確能有效提高致冷晶片熱端的溫度，進而提升熱電轉換的效果。



無 IR 塗層的光熱複合發電

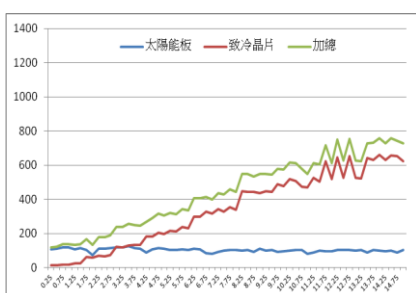


一層 IR 塗層的光熱複合發電

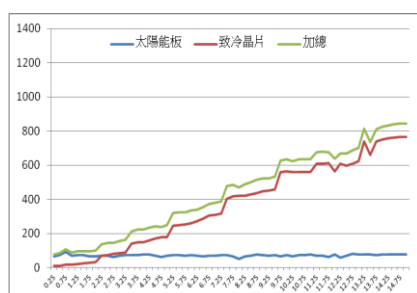


兩層 IR 塗層的光熱複合發電

4.光熱轉換的效果看出，當控制致冷晶片冷端的溫度後(21.3°C~21.6°C)，紅外線吸熱劑的確能有效



三層 IR 塗層的光熱複合發電



四層 IR 塗層的光熱複合發電

提高致冷晶片熱端溫度

，進而提升熱電轉換的效果。

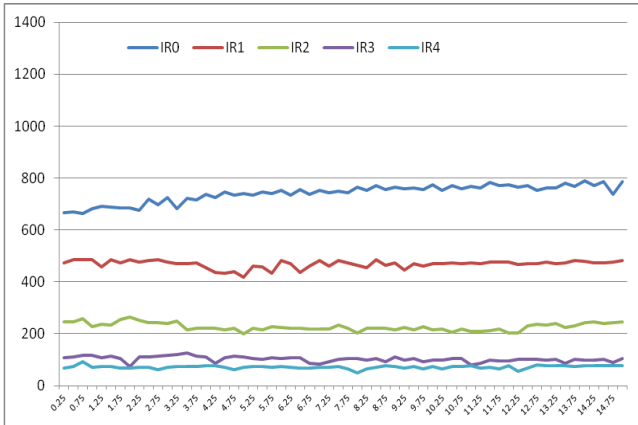
5.太陽能板照光發電時，若沒有產生熱衰竭現象時，是一直處於穩定的發電狀態，而致冷晶片的發電特性，則是隨著溫室增溫盒溫差的增加，而跟著提升發電的效果。

6.隨著 IR 塗層的增加(一層~四層)，其實對致冷晶片熱電轉換發電效果的提升有限 (**308.2mW→359.0mW**)，但卻會因此大幅降低太陽能板光電轉換發電的效率 (**466.3mW→71.6mW**)。

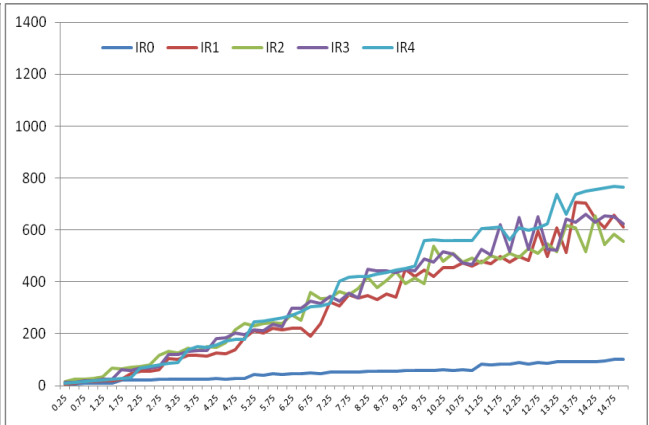
7.由 IR 塗層的厚度與複合發電的效果看出，**致冷晶片熱電轉換發電多**，就會降低**太陽能板光電轉換發電的效果**，但兩者之間似乎可以看到一個平衡點：

沒有 IR 塗層：740.9mW(光電轉換)+52.1mW(熱電轉換)=**793.0mW**(光熱複合發電)

一層 IR 塗層：466.3mW(光電轉換)+308.2mW(熱電轉換)=**774.5mW**(光熱複合發電)



IR 塗層厚度對**太陽能板**發電的影響



IR 塗層厚度對**致冷晶片**發電的影響

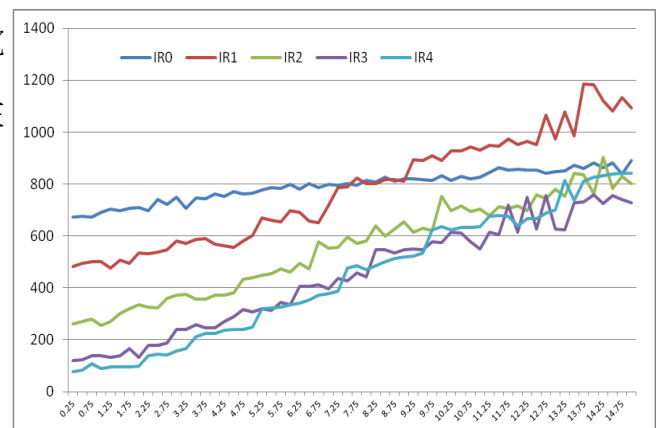
8.由 IR 塗層厚度(IR0~IR4)對太陽能板發電影響看出，有大幅下降的趨勢，尤其是在兩層 IR 塗層時的降幅最明顯。

9.在比對 IR 塗層厚度(IR1~IR4)對致冷晶片發電影響看出，差異反而不大。

10.最後再比對 IR 塗層厚度(IR0~IR4)對**光電**

與**熱電轉換複合發電**加總的結果看出，

在一層 **IR 塗層**厚度(IR1)下，總體的發電量反而是超過只有單一太陽能板的發電量。



IR 塗層厚度對**光熱複合發電**的影響

思考：所以透過紅外線線吸熱片吸熱，再利用溫室增溫原理產生的熱，來讓致冷晶片進行熱電轉換的構想可行，不僅可以有效降低太陽能板的熱，避免因過熱而損壞，同時還可以將熱轉換成電，雖然在吸熱過程中會降低發電量，但可以朝：

- (1)加大致冷晶片的功率(換成大片)與數量(增加片數)。
- (2)利用熱的傳遞特性(傳導、對流、輻射)，來增加溫室增溫的效果。
- (3)致冷晶片可以透過加裝水冷式設計加大溫差，以提高發電量，也能回收冷卻後的熱水進行再利用。

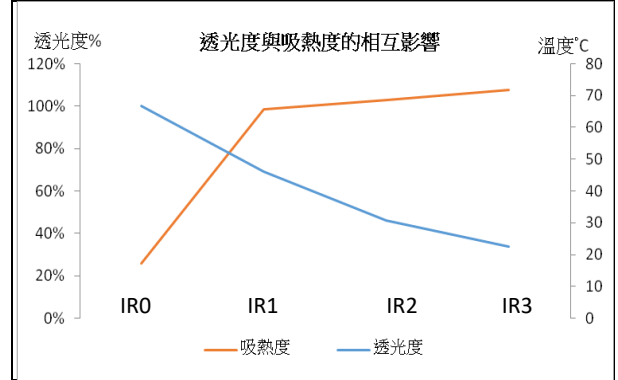
如此一來，因為吸熱片所降低的發電，便可以透過提高致冷晶片發電量來彌補，過程中保護了太陽能板，同時又有熱水可以利用，可說是一舉數得啊！

陸、討 論

討論一：歸納影響光熱分離與複合發電因素的相互影響

一、從紅外線吸熱片的厚度歸納透光度與吸熱度的相互影響

- (一)紅外線吸熱片厚度與吸熱度成正比關係，與透光度成反比關係。
- (二)透光度與吸熱度兩者呈反比的關係。
- (三)紅外線吸熱片的厚度對吸熱度的影響要比透光度明顯。
- (四)一層 IR 片的吸熱度已足夠，對透光度影響較小；但 IR 片厚度增加，對吸熱效果的升幅有限，但透光度卻會大幅下降。



吸熱片濃度厚度對透光吸熱的相互影響

二、從溫室盒配置歸納溫室盒增溫效果與致冷晶片發電效能的相互影響

溫室盒增溫效果與致冷晶片發電效能的相互影響

溫室增溫盒配置	反光罩	無	有	無	有				
	冷卻水	無	無	有	有				
IR 塗層		IR0	IR0	IR0	IR0	IR1	IR2	IR3	IR4
溫室盒增溫效果 °C	開始	22.4	22.6	24.6	28.7	23.3	26.2	25.2	23
	結束	69.9	74.0	57.8	58.4	79.1	76.1	87.6	86.1
	增幅	47.5	51.4	33.2	29.7	55.8	49.9	62.4	63.1
	平均	53.6	57.0	48.0	50.1	63.2	60.4	68.6	65.1
致冷晶片發電效能 mW	開始	0.0	0.0	0.0	36.4	7.2	15.9	12.2	10.0
	結束	20.0	56.0	432.5	518.4	611.8	554.8	623.0	712.3
	增幅	20.0	56.0	432.5	482.0	604.6	538.9	610.8	702.3
	平均	9.9	26.0	224.5	271.7	308.2	327.3	340.9	359.0

(一)溫室盒配置對增溫的影響

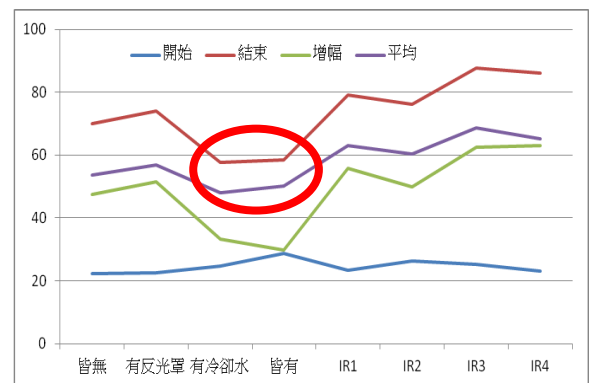
IR 塗層 > 水冷系統 > 反光罩

(二)有水冷系統與反光罩的結束溫度與溫差

明顯降低，主要是受到致冷晶片冷端快速散熱而抑制升溫幅度(右圖紅圈處)。

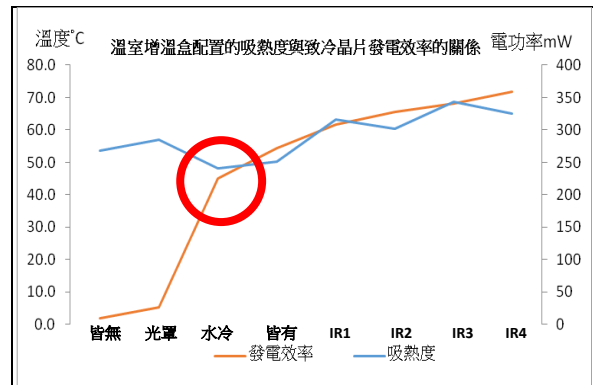
(三)加上 IR 片增溫後，冷端因水冷系統作用

而維持低溫，但 IR 片在熱端強制增溫，提高結束溫度，進而加大溫差。



溫室盒配置的增溫效果

(四)對照溫室增溫盒配置，對致冷晶片發電的影響後發現，水冷配置降低冷端的溫度(上圖紅圈處)，而 IR 片則是增加熱端的溫度，兩者是造成致冷晶片發電效果大幅提升的主要原因(右圖紅圈處)。

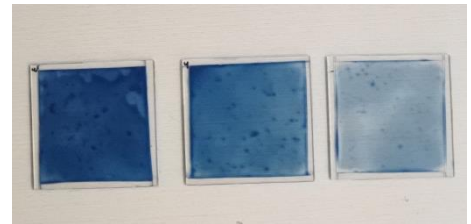


溫室盒增溫效果對致冷晶片發電影響

討論二：探討提高光熱分離複合發電效能的方法

一、平衡紅外線吸熱片透光與吸熱的效果

紅外線吸熱片厚度越厚，吸熱效果提升有限，但透光率卻大幅降低，所以決定兼顧光電與光熱轉換平衡，將紅外線吸熱片厚度減少一半，預估可大幅提高透光率(>90%)，同時對吸熱效果降幅(45.3°C)也不會影響太大。



二、提高致冷晶片的發電效果

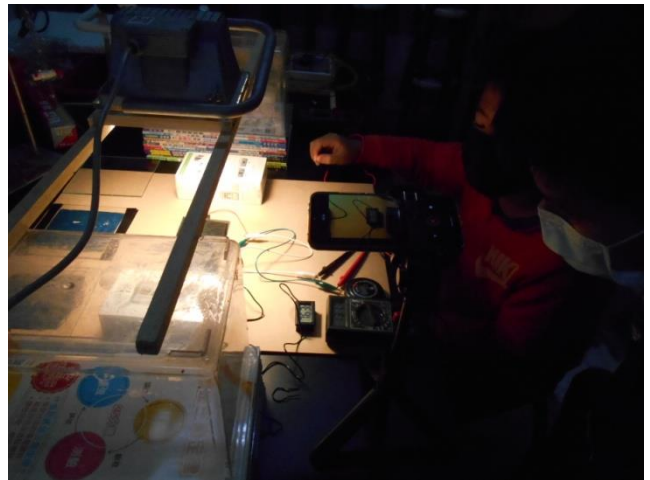
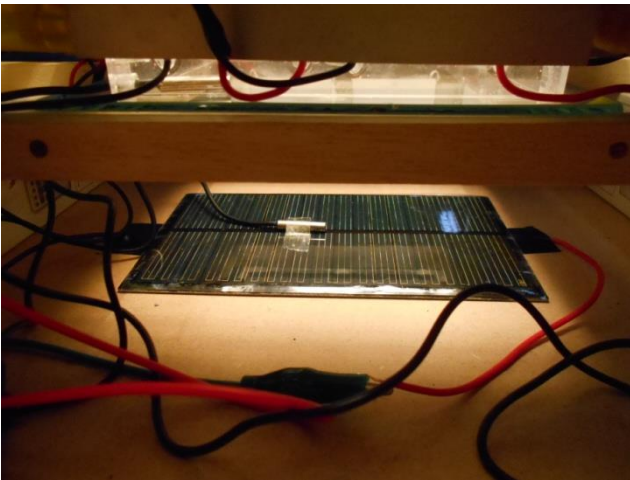
原本為了節省經費，採用了八片 TEC1-12706 型號的致冷晶片(又圖藍框)，實驗後發現，雖然最高可達 359mW，但平均一片卻只有 44.9mW，熱電轉換效率其實並不高。因此，決定改用相同尺寸，但價格比較貴的 TEC1-12712 型號致冷晶片(又圖紅框)，希望能藉此提升熱電轉換的效能。

型式	Standard Thermo-modules(ceramic substrate)					contour size(mm)	
	Th=27°C				Length	Width	
MODEL	Lmax (A)	Vmax (Volts)	Tmax (°C)	Ocmx (Watts)			長
TEC1-12730	30	12	67	360	62	62	
TEC1-12715	15	15.4	67	150	55	55	
TEC1-12715	15	15.4	67	150	50	50	
TEC1-12712	12	15.4	67	109	40	40	
TEC1-12708A	8	15	67	69	30	30	
TEC1-12708	8.5	13.5	62	60	40	40	
TEC1-12706	6.4	13.5	62	50	40	40	
TEC1-12704	4.4	13.5	62	36	40	40	
TEC1-12703	3.4	13.5	62	27	40	40	
TES1-12703	3	12	62	22	30	30	
TES1-7103	3	8	62	18	23	23	
TEC1-7103	3.4	8	62	18	30	30	
TEC1-4905	5.4	5.5	62	16	25	25	
TEC1-3105	5.4	3.5	62	10	20	20	
TEC2-19006	6	12	62	60	40	40	
致冷片隔熱棉 - KT料號:					30	30	
ORM07203030							
致冷片隔熱棉 - KT料號:					40	40	
ORM07204040							
致冷片隔熱棉 - KT料號:					50	50	
ORM07205050							

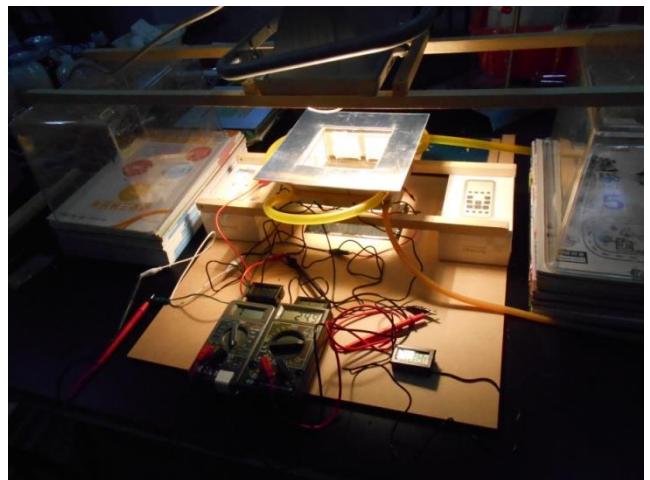
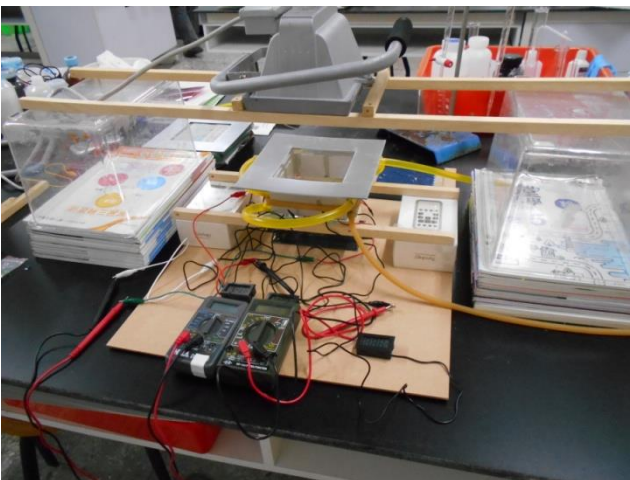


三、組裝改良光熱分離複合發電的設計

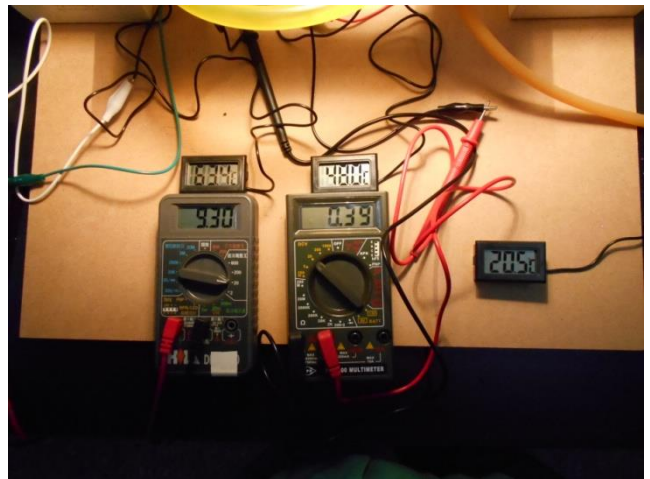
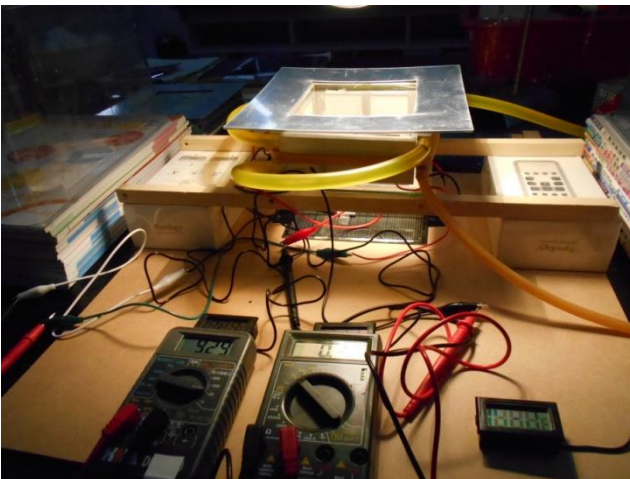
(一)光電轉換設計



(二)熱電轉換設計



(三)光熱複合發電量測



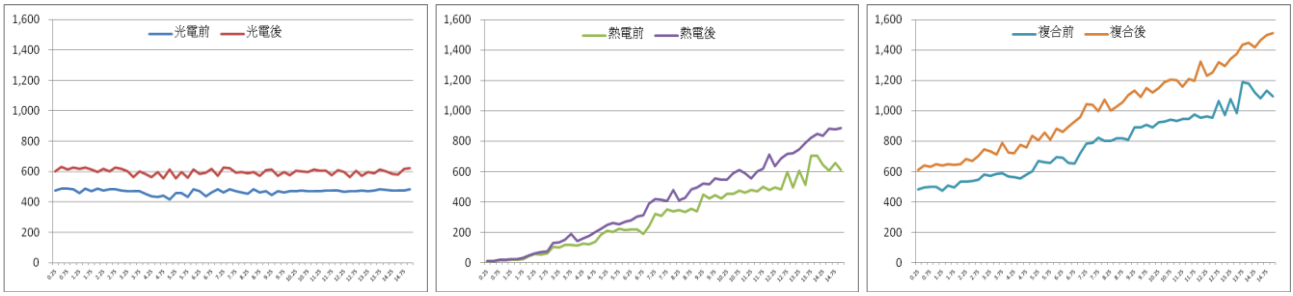
討論三：改良太陽能光熱分離複合發電設計實測效能

表：改良後的光熱分離複合發電測試結果

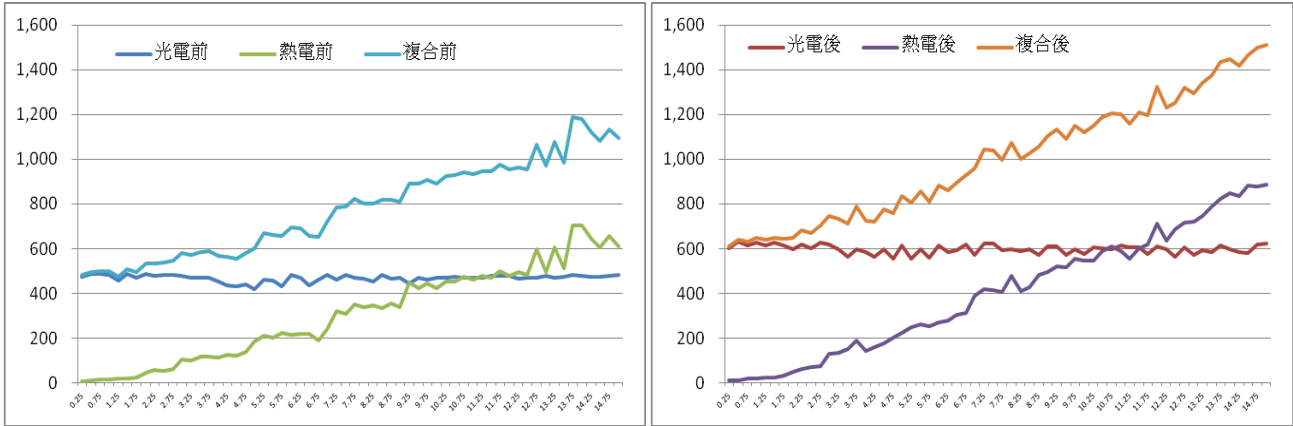
配置	有水冷卻系統+有反光罩											
	TEC1-12706 致冷晶片				TEC1-12706 致冷晶片				TEC1-12712 致冷晶片			
	無 IR 塗層				一層 IR 塗層				半層 IR 塗層			
	太陽能板		致冷晶片		太陽能板		致冷晶片		太陽能板		致冷晶片	
照光時間 (min)	表面溫度 °C	發電功率 mW	冷熱溫差 °C	發電功率 mW	表面溫度 °C	發電功率 mW	冷熱溫差 °C	發電功率 mW	表面溫度 °C	發電功率 mW	冷熱溫差 °C	發電功率 mW
開始	28.1	1185.5			24.7	474.1	2.6	7.2	24.1	600.8	2.3	9.3
結束	79.1	1130.5			43.1	481.5	57.7	611.8	40.1	622.4	55.5	887.9
增幅	51.0	-35.0			18.4	7.3	55.1	604.6	17.1	21.6	52.3	878.6
平均	61.9	1184.1			35.4	466.3	42.0	308.2	32.9	597.7	39.8	402.6
合併功率	1184.1 mW				774.5 mW				1000.3 mW			

發現：

- 1.由於紅外線塗層厚度減半，雖然使致冷晶片冷熱端的溫差小幅降低(42.0°C→39.8°C)，但只要透過水冷系統，將致冷晶片的冷端控制在 20°C 的範圍。便能因此提高透光度，進而增加光電轉換效果，再加上換成 TEC1-12712 較高效率的致冷晶片，也能同時增加熱電轉換的效果。
- 2.只要不因過熱產生熱衰竭現象，太陽能板便能維持發電穩定，但致冷晶片發電是靠冷熱端的溫差而來，所以發電的特徵是隨溫差的增加而逐漸提升。
- 3.光熱複合發電初期來源是以光電轉換為主(維持穩定)，隨著溫室增溫盒的溫差增加，使得熱電轉換的比例也隨之增加(逐步增加)。
- 4.改良後的光熱複合發電有明顯增加，和純太陽能板的發電量(實驗三)幾乎相當(1184.1mW vs 1000.3 mW)，但由於實驗只進行 15 分鐘，從趨勢圖看出致冷晶片的發電依舊持續提升，而純太陽能板的發電效能因熱衰竭(表面溫度 79.1°C)，有逐步下降的趨勢。以此推估，光熱複合發電的設計，不僅能彌補因阻隔熱源，而喪失光電轉換所需的光源缺口，還能保護太陽能板，避免產生熱衰竭現象，這尤其是對於容易因過熱而產生發電衰竭現象的染料敏化太陽電池的幫助將會更明顯。

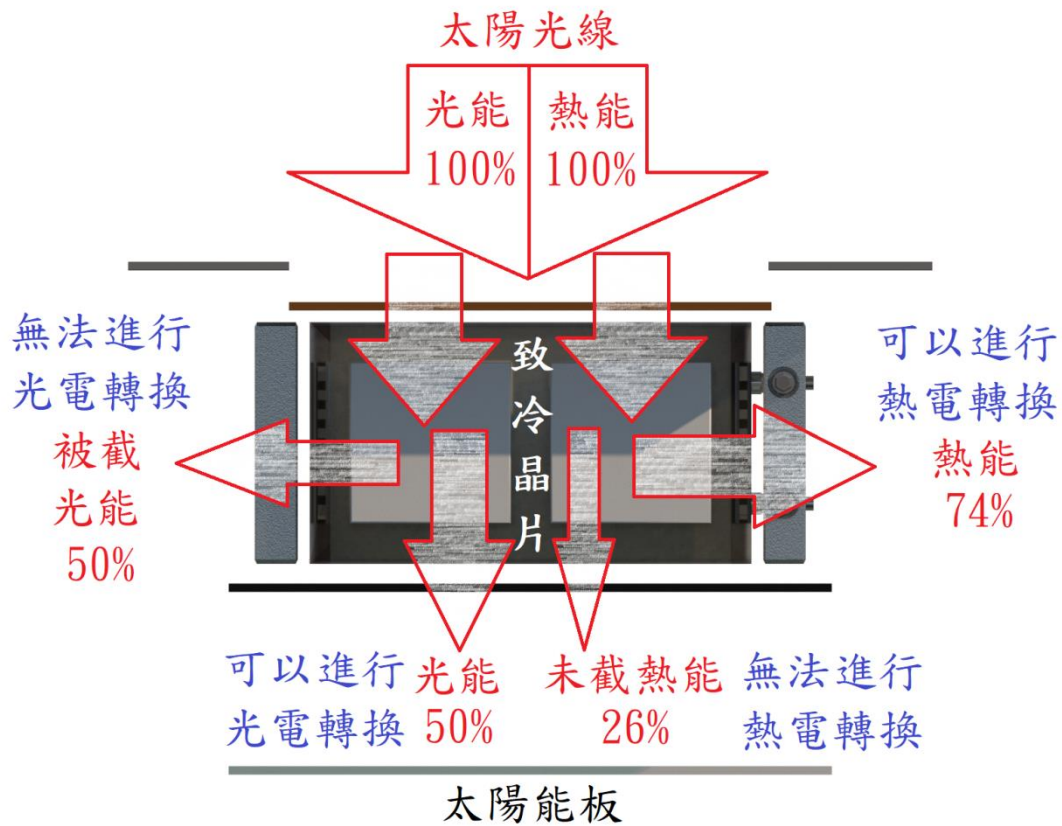


光電轉換(左)、熱電轉換(中)、複合發電(右)，改良前、後發電效能比較(mW)



光熱複合發電改良前發電效能(mW)

光熱複合發電改良後發電效能(mW)



光熱分離複合發電能量轉換發電效能

柒、結 論

- 一、原本是從透光的遮雨棚吸熱所引發的靈感，發展出將太陽的光與熱分開來發電，讓太陽能板不會因高溫而降低發電量，並藉此保護並延長使用壽命，然後再將分離後的電並聯，便是光熱分離複合發電的基本構想。
- 二、將太陽光的熱分離後，因透光率下降，會使光電轉換的發電量降低，所以便要設法利用收集的熱以熱電轉換的方式來彌補缺口。

三、研究結果摘要

(一)太陽能板照光發電，會因為吸收紅外線的增溫，而使發電效能降低。

(二)太陽能光熱複合發電的特性：

- 1.只要不因過熱產生熱衰竭現象，太陽能板便能維持發電穩定，但致冷晶片發電是靠冷熱端的溫差而來，所以發電的特徵是隨溫差的增加而逐漸提升。
- 2.光熱複合發電初期來源是以光電轉換為主(維持穩定)，隨著溫室增溫盒的溫差增加，使得熱電轉換的比例也隨之增加(逐步增加)。

(三)溫室盒配置對增溫的影響：IR 塗層 > 水冷系統 > 反光罩。

- 1.一層 IR 片吸熱度已足夠，對透光度影響較小，厚度增加對吸熱的升幅有限，但透光度卻會大幅下降。
- 2.水冷系統與反光罩，使致冷晶片冷端快速散熱，降低冷端溫度，同時抑制熱端升溫幅度，但由於熱端 IR 片的增溫，加大了冷熱端的溫差，使致冷晶片發電效果大幅提升。

(四)提高光熱分離複合發電效能：

- 1.平衡紅外線吸熱片透光與吸熱的效果，將 IR 吸熱片厚度減少一半，以提高透光率(>90%)，吸熱降幅也不會太大(42.0°C→39.8°C)。
- 2.將 TEC1-12706 型號致冷晶片改為 TEC1-12712，以提高發電效果。
- 3.實測改良太陽能光熱分離複合發電設計效能：IR 塗層厚度減半，雖然使冷熱端的溫差小幅降低(42.0°C→39.8°C)，但透過水冷系統將冷端控制在 20°C 範圍。便能因此提高透光度，增加光電轉換效果，加上 TEC1-12712 致冷晶片，也能同時增加熱電轉換效果。

四、改良後的光熱複合發電設計，不僅能彌補因阻隔熱源，而喪失光電轉換所需的光源缺口，還能保護太陽能板，避免產生熱衰竭現象，這尤其是對於容易因過熱而產生發電衰竭現象的染料敏化太陽電池的幫助將會更明顯。

五、光熱分離複合發電的關鍵在於

(一)增加熱的吸收且透光率要好的塗料。

(二)設法提高溫室效應盒的溫度以利吸熱端吸熱，同時又要加速散熱端的冷卻效果。

(三)提高致冷晶片的發電量不是只有提高加熱端溫度，還要設法降低散熱端的溫差才行。

六、研究的重要性

(一)一般將太陽光的熱回收，大多只有用在將水加熱或以高溫熱水推動渦輪發電，而我們所的做法則是直接將熱吸收來使致冷晶片產生溫差來發電，在做法上不同於以往。

(二)經過最佳化之後的設計，可以直接應用在日常生活中，對於多元發電型態的推廣，相當有意義。

七、未來發展

(一)目前希望將光、熱分離的光電轉換與熱電轉換並聯後，發電量能超過一般純粹只有照光的太陽能板。受限於技術和材料，離目標還有一段距離，但從趨勢來看，光熱分離複合發電的構想確實可行，同時對於保護太陽能板與穩定發電方面也有相當程度的幫助。

(二)在實驗致冷晶片散熱端的水冷頭時，發現可利用回收冷卻過後的熱水，以提高光熱複合發電系統的應用價值。

(三)可利用光熱分離的概念，設計其他需要熱電轉換需求的產品上，如：直接利用廢熱發電，就可以免除因能源轉換所造成的耗損。

八、心得與感想：

在參加這次科展前，我只有和同學一起做小科展的經驗，這次參加科展讓我獲益良多。首先，參加科展後，交到了許多新朋友，和他們的默契也愈來愈好，只要跟他們說一聲，他們便能意會到，一起完成實驗。再來，參加這次科展，學到了許多新東西，例如學到如何一起設計器材，找出吸熱片的吸熱與透光之間的關係，還有許多有關太陽能發電的知識等。我覺得這不只是場比賽，也是一個難得的團隊合作機會。

捌、參考文獻資料

- 聶偌安、吳紹齊、孫鍾維、陳禹婷(2017)：光與熱的複合發電-太陽能光熱分離複合發電的探討與設計。台北市第 50 屆中小學科學展覽會。
- 王育涵、王子洋(2015)：神奇的太陽光熱分離之旅！。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 陳柏驊(2015)：增光擠熱拚綠能--探討太陽能板發電效能提升及應用。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。

【評語】 032919

1. 本作品設計出光熱分離的複合式發電。太陽光先經致冷晶片及紅外線吸收劑，將熱吸收利用「溫差」進行發電，光線透過後經太陽能板「光電轉換」，並聯兩者產電使用。探討吸收劑的厚度對透光度、吸熱度的影響，熱分離對太陽能板光電轉換時發電的影響。研究指出致冷晶片熱電轉換與太陽能板光電轉換發電的效果，可取得平衡點，以期提升太陽能電池發電效能。建議提升吸收劑塗層的均勻度。
2. 研究架構清晰有條理，能運用科技解決生活中問題，善用科技輔助實驗，數據整理用心，自製實驗設備，並加以進化改善，實驗過程細膩，數據圖表呈現詳實用心，實驗設計合理，唯探索過程描述可更清楚。
3. 建議太陽能電池之基礎學理需要多多加以琢磨，其中實驗量測的電壓數值屬於開路電壓、電流數值屬於短路電流，兩者相乘並不是真正的發電功率。作品內主要此此數值作為發電功率探討提升效能指標，並非正確。建議須多了解以三用電表量測太陽能電池所獲得的電壓、電流的實際物理意義。此外實驗發現溫度效應對於太陽能電池效能之影響主要在於開路電壓的下降，但卻可以些微增加短路電流，須先行探討其原因以利探索散熱裝置在此方面數值改變的討論。
4. 太陽能產業所出產之太陽能電池皆提供開路電壓、短路電流、發電功率之溫度係數(Temperature Coefficients)，可多加以理解其物理係數數值並轉化探討溫度效應之現象，將能更全面了解並發展提升太陽能電池發電效率之進階研究。

作品簡報

太陽能光熱分離複合發電的探討

國中組 應用科學科(二)

前言

• 因為觀察學校頂樓的太陽能板過熱問題因此我們想要設計出：

- 能延長太陽能板壽命；
- 能將紅外光能(IR) 轉換成電能
- 能將轉換的熱能再利用於溫差發電裝置
- 能提高整體發電效率

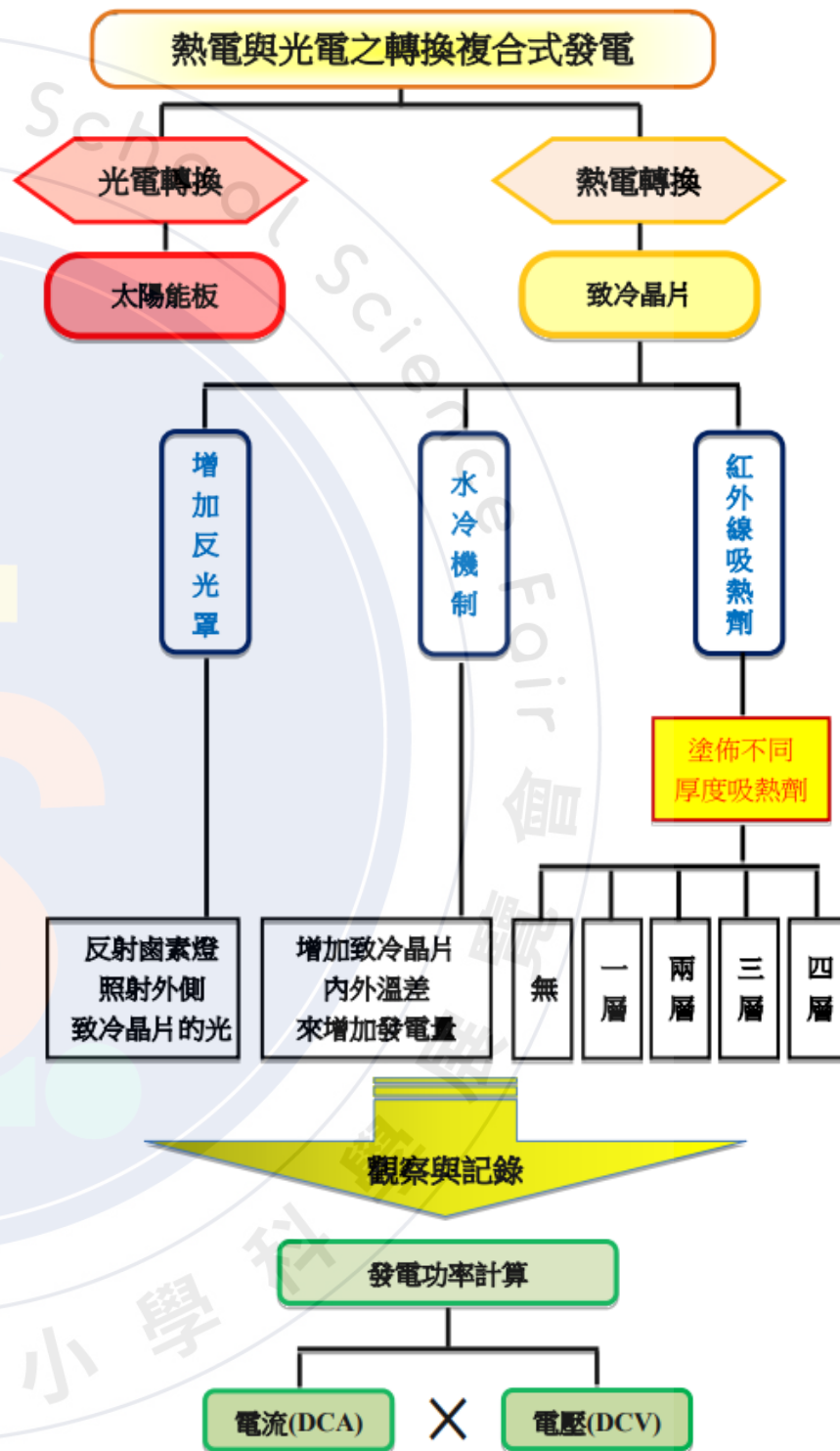
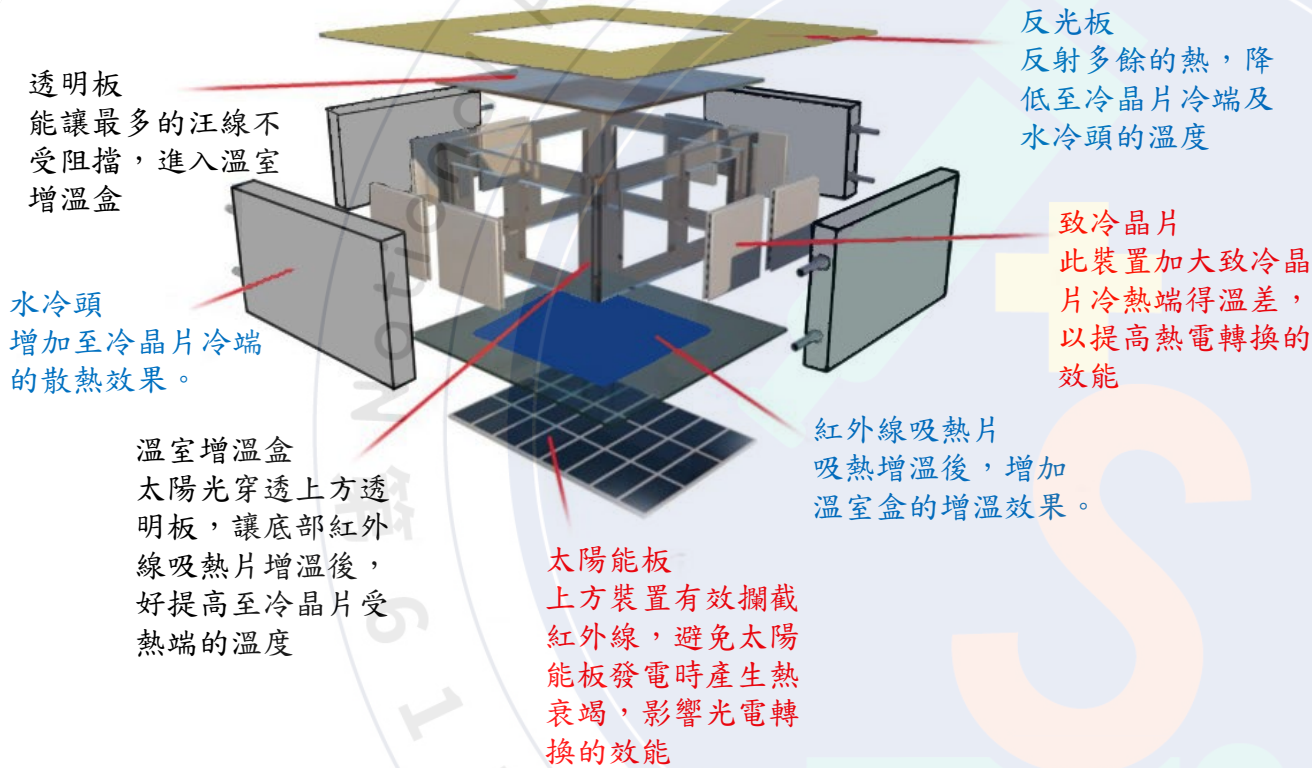


圖1：實驗架構圖

器材架構



光熱分離複合發電結構設計說明圖

圖2：裝置結構圖
(制冷晶片X8、反光照、太陽能板)

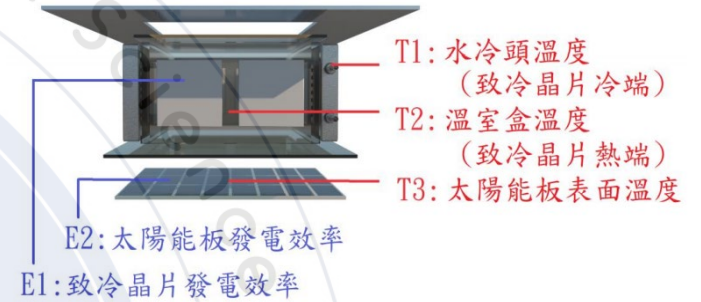
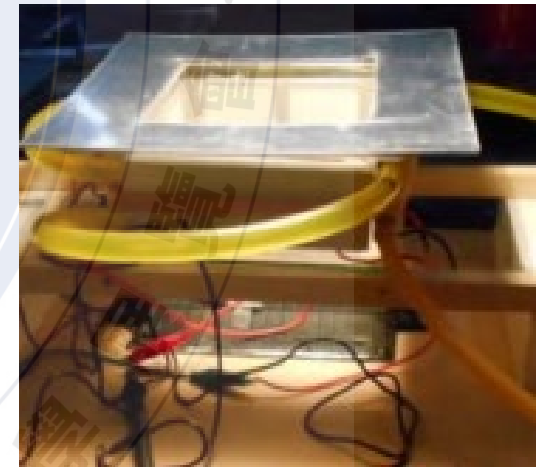


圖3：資料採集點



複合裝置實體樣貌

器材架構

- 我們先將光與熱分離，再讓**最有效能**光照到太陽能板。
- 致冷晶片採三串兩並連接，共有八片。(圖4)(圖7)
- 實驗持續十五分鐘，分別採計電壓及電流，相乘後可得到電功率。(圖5)
- 我們使用鹵素燈來模擬太陽。

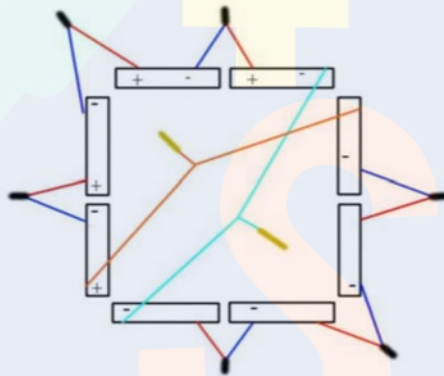


圖4：致冷晶片連接方式

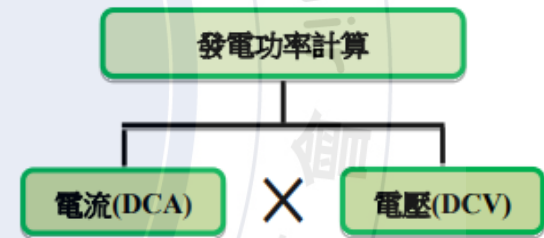


圖5：發電功率計算方式



圖6：實驗實境

型號	電流(A)	電壓(Volts)	功率(Watt)	最大溫差
TEC1-12706	6.4	13.5	86.4	62度攝氏

圖7：致冷晶片發電功率及型號

研究結果 1/2

IR塗層

- 測試不同紅外線吸熱劑 (IR) 厚度(圖8)對透光度(圖9)及吸熱度(圖10)的影響。
- 結果發現透光度和吸熱度不成正比，當吸熱度明顯上升，透光度只有些微上升。

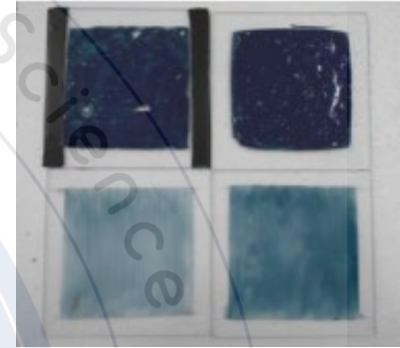


圖8：IR塗層

與沒有塗相比(百分比)

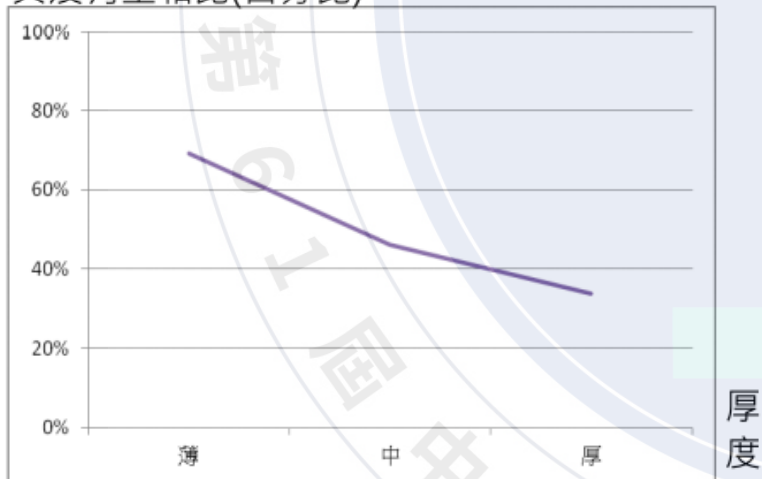


圖9：IR厚度對透光度的關係(沒有塗層為100%)

溫度(攝氏)

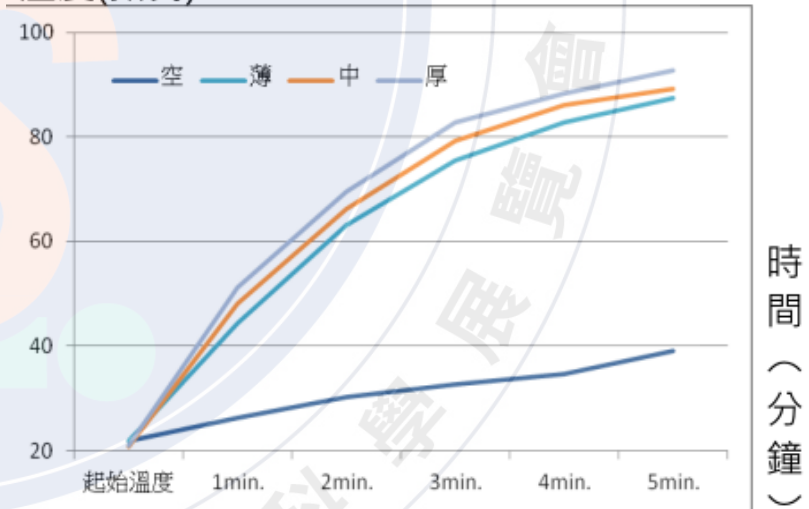


圖10：IR厚度對吸熱度的關係

研究結果 2/2 IR塗層厚度對光電發電的影響

發電功率(mW)

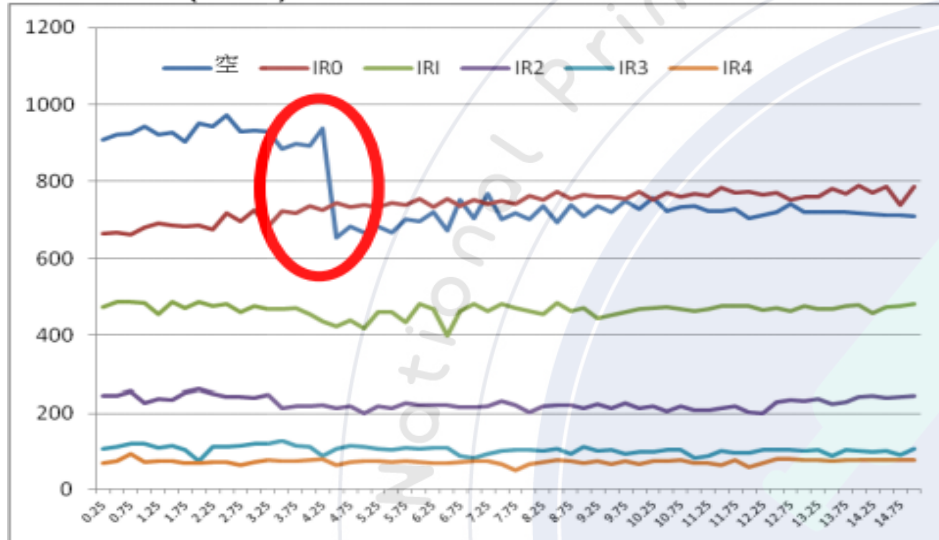


圖11:光電轉換的發電功率

溫度(攝氏)

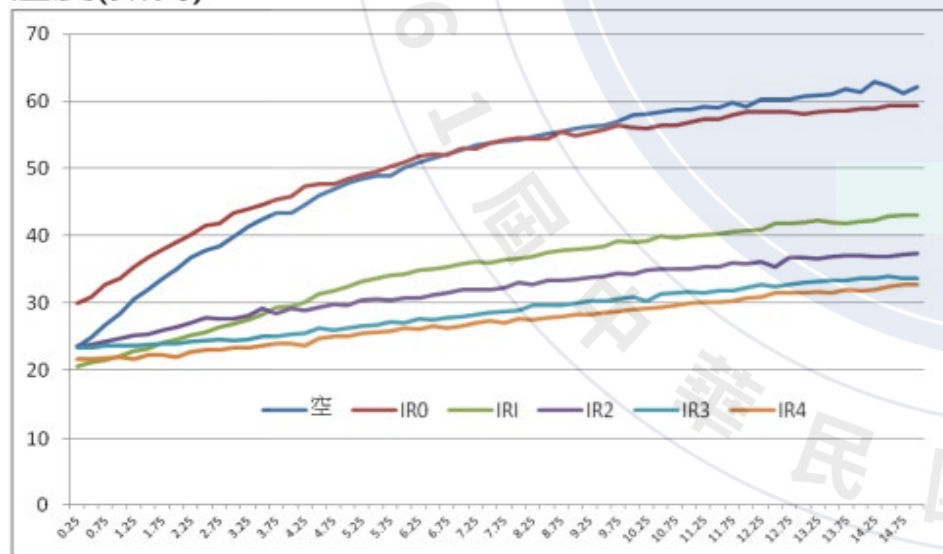


圖12: 太陽能板表面溫度

時間
(分鐘)

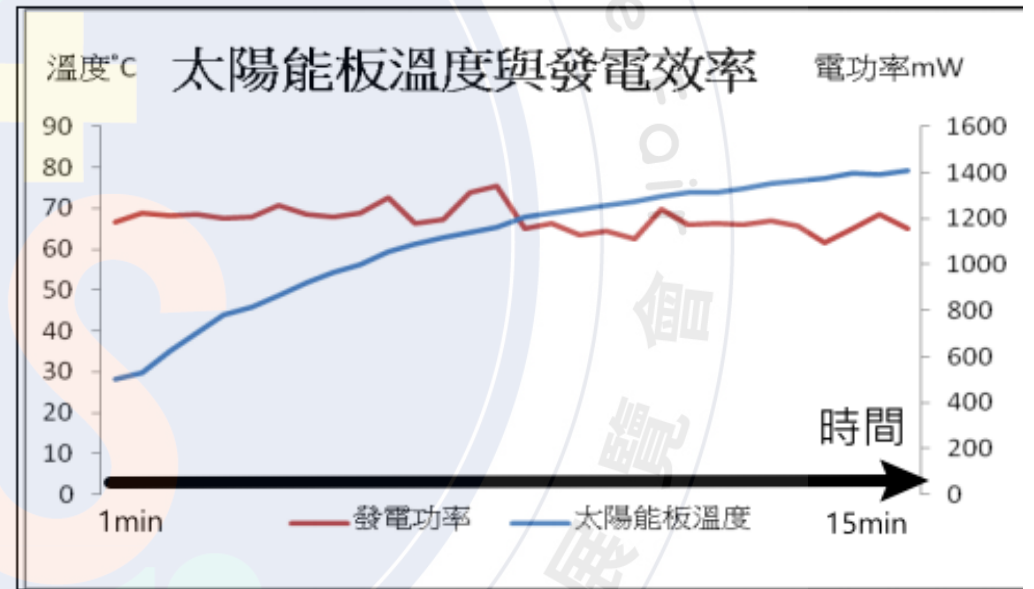


圖13: 太陽能板發電功率

時間
(分鐘)

研究結果解釋 1

IR塗層、IR塗層對光電發電

1. IR塗層塗太多並不會明顯增加吸熱度，透光度反而會受影響。
2. 只須一層IR能有效穩定太陽能板發電。IR塗層超過2-3層太陽能板發電效率會快速下降。
3. 太陽能板若沒有保護，發電效率會在一定時間後明顯降低。

研究結果 2

致冷晶片熱電轉換發電效能

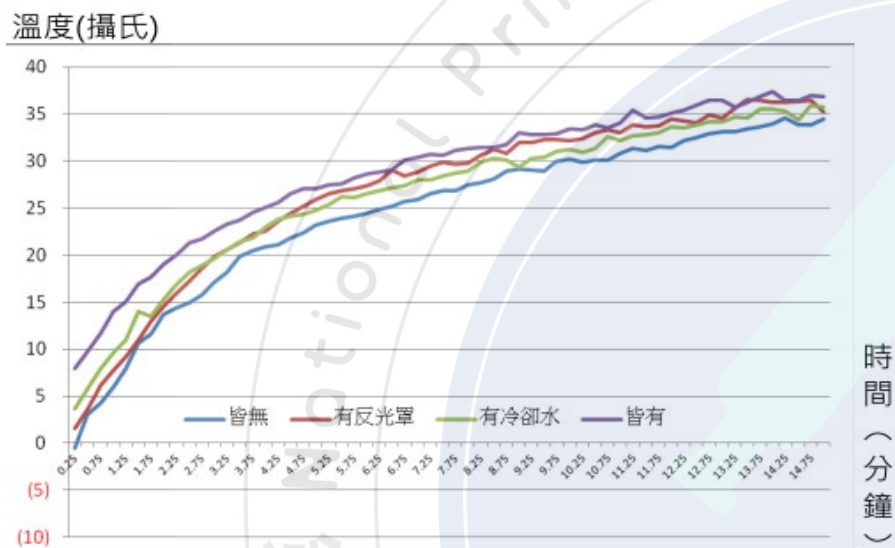


圖14：熱電轉換中熱端溫度的變化

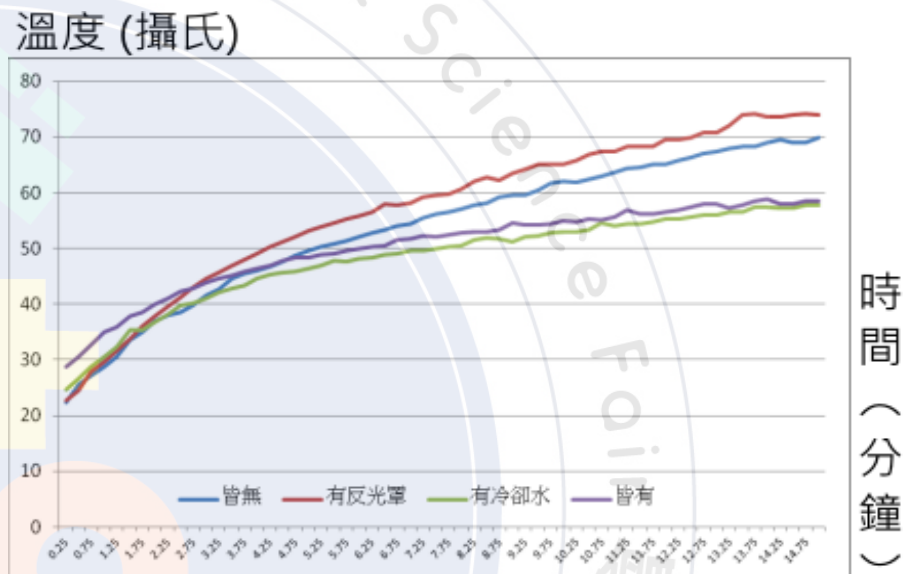


圖16：熱電轉換中冷端與熱端的溫差變化

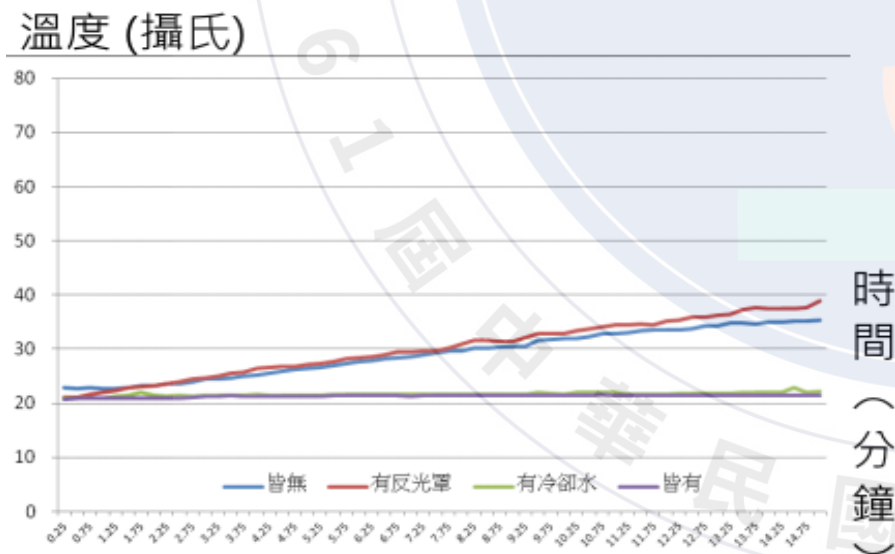


圖15：熱電轉換中冷端溫度的變化

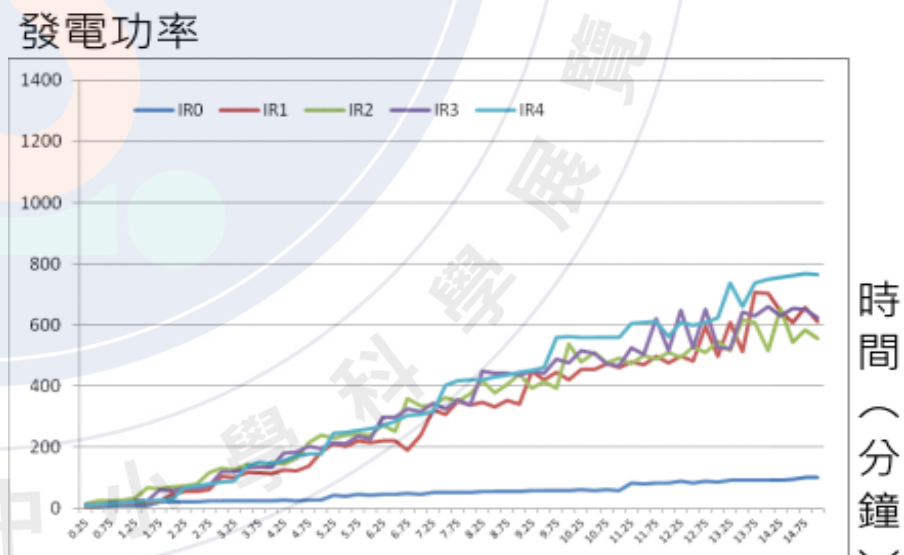


圖17：熱電轉換的發電效率

研究結果 3

各輔助裝置對複合發電

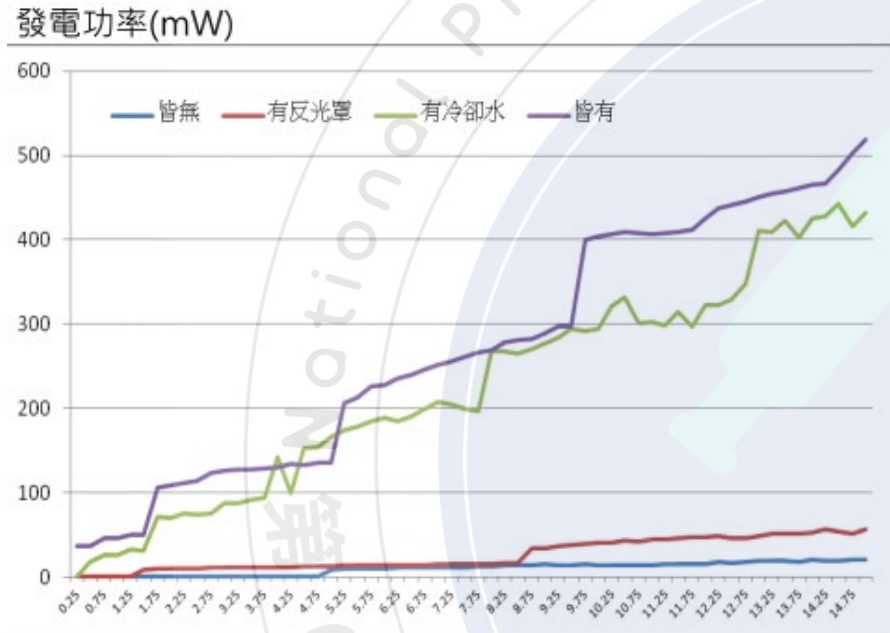


圖18: 各輔助裝置對複合發電效能

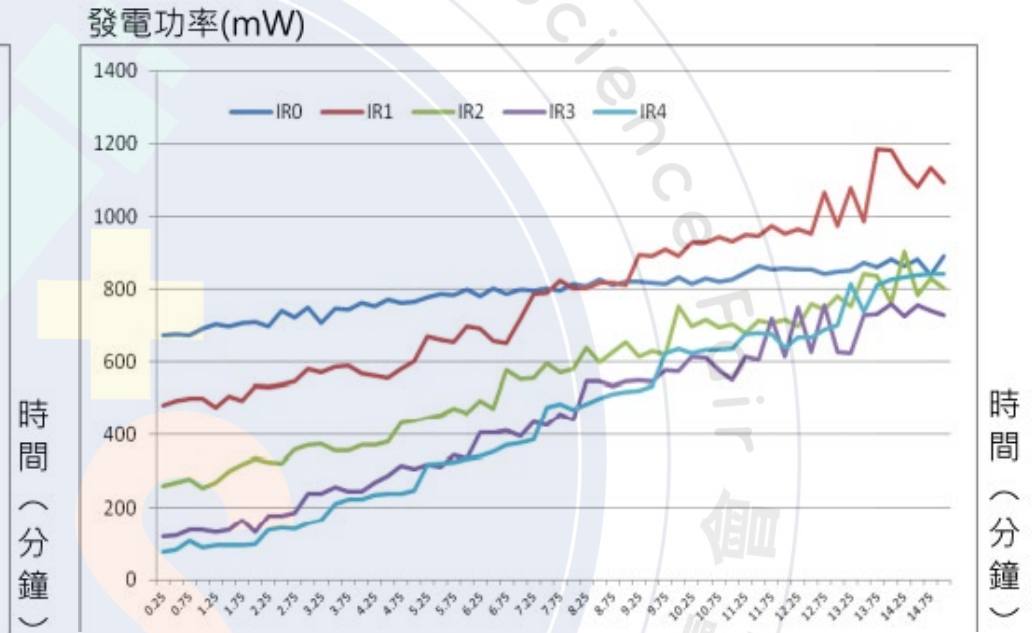


圖19: 不同IR塗層對複合發電 (含所有輔助裝置)

- 同時有冷卻水及反光罩效能較佳(圖18)
- 反光罩作用輕微(圖18)
- 加上IR塗層後, IR0-1為最佳範圍(圖19)

研究結果解釋 2

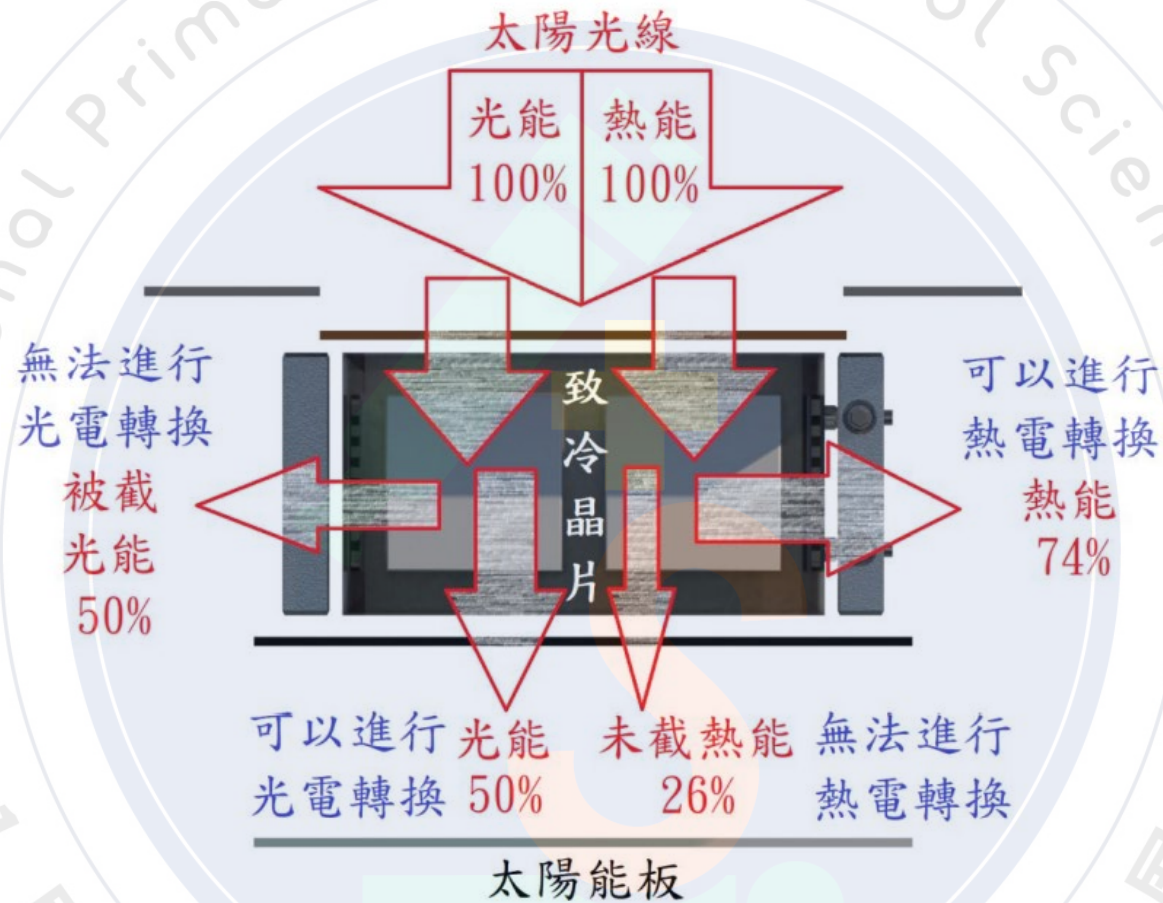


圖20：裝置獲得的能量之應用

- IR塗增厚；反而使太陽能板發電量下降。
- IR塗層則可有效攔截熱能。(圖20)
- 太陽能板減少的發電量，可由熱能發電彌補。(圖20)

研究結果討論&改進

配置	有水冷卻系統+有反光罩								
	TEC1-12706 致冷晶片 無 IR 塗層				從實驗結果可以得知，最佳化後的發電效率在最後是上升的，原本的則是下降。	TEC1-12712 致冷晶片 半層 IR 塗層			
	太陽能板		致冷晶片			太陽能板		致冷晶片	
照光時間 (min)	表面溫度 °C	發電功率 mW	冷熱溫差 °C	發電功率 mW	表面溫度 °C	發電功率 mW	冷熱溫差 °C	發電功率 mW	
開始	28.1	1185.5			24.1	600.8	2.3	9.3	
結束	79.1	1130.5			40.1	622.4	55.5	887.9	
增幅	51.0	-35.0			17.1	21.6	52.3	878.6	
平均	61.9	1184.1			32.9	597.7	39.8	402.6	
合併功率	1184.1 mW				1000.3 mW				



•從實驗結果中我們得知，以下為最佳化後的配置：

-有水冷卻系統；有反光罩；IR 0-1層；

•我們進一步加入調整：IR 0.5層；

-致冷晶片升級(TEC1-12706=>TEC1-12712)

結論

- 最佳化後的複合發電裝置發電功率**比較傳統太陽能板**更能：
 - **利用分離光熱能技術**:有效充分利用太陽能；
 - 利用塗層技術:降低長期熱衰竭問題➡有效保護太陽能板；
 - 長時間發電，發電功率較高、且更穩定
- 設計水冷卻系統能夠有效降低**冷端**溫度
- 冷卻水可以回收後，再次流回冷卻系統，**進行有效能源替換**

參考資料

- 聶倣安、吳紹齊、孫鍾維、陳禹婷(2017)：光與熱的複合發電-太陽能光熱分離複合發電的探討與設計。台北市第 50 屆中小學科學展覽會。
- 王育涵、王子洋(2015)：神奇的太陽光熱分離之旅！。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 陳柏驊(2015)：增光擠熱拚綠能--探討太陽能板發電效能提升及應用。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會