

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

HCPV 太陽能發電模組效能與耐久性實地測試評估  
Evaluation on the Climate Durability of HCPV Modules and its  
Energy Rating

計畫編號：1002001INER047

受委託機關(構)：國立屏東科技大學

計畫主持人：傅龍明

聯絡電話：08-770-3202 轉 7553

E-mail address：loudyfu@mail.npust.edu.tw

核研所聯絡人員：徐耀東

報告日期：100 年 12 月 6 日

## 目 錄

中文摘要 .....	1
ABSTRACT .....	2
壹、計畫緣起與目的 .....	3
貳、研究方法與過程 .....	4
一、HCPV 模組溫度測量 .....	4
二、HCPV 模組方位與自然風風向關係推導 .....	7
三、HCPV 模組發電功率測量 .....	10
四、HCPV 模組實驗模組與對照模組測量系統製作 .....	11
參、主要發現與結論 .....	14
一、太陽光照度資料收集與分析 .....	14
二、HCPV 模組溫度與氣象資料收集與分析 .....	18
三、HCPV 太陽能電池效能評估 .....	22
四、HCPV 太陽電池模組戶外長期測試與發電量分析 .....	24
五、HCPV 模組發電功率(實驗組與對照組的比較) .....	26
肆、結論 .....	30
伍、參考文獻 .....	31

## 中文摘要

本計畫之研究對象為架設於屏東科技大學的聚光型太陽電池模組。透過實際測量，本計畫成功建立一個只需輸入環境溫度、直射日照值(DNI)、相對溼度、風速和風向就可以估算上述聚光型太陽電池模組溫度的經驗公式。此外，本計畫也成功建立另一個經驗公式適用於估算該聚光型太陽電池模組的發電功率。為了追蹤聚光型太陽電池模組長期於戶外曝曬而老化的效果，本計畫也製作了一個繼電器以幾乎同時記錄實驗模組與對照模組的輸出功率。為了評估以上效果，本計畫定義一個參數稱為「有效性」，發現研究對象在使用兩年後，其「有效性」降至 80%~90%。

關鍵字：聚光型太陽電池模組，環境溫度，直射日照。

## **Abstract**

The subject of this project is the CPV module currently installed in NPUST. A correlation was proposed for this module to predict the module temperature based on ambient temperature, direct normal irradiance, ambient relative humidity, wind speed and its direction. Also, another correlation was proposed to predict the power generation of the HCPV module. To study the deterioration of the HCPV module installed in NPUST, a relay was built so that SUNNY BOY 700U can be used to keep track of the experimental HCPV unit and the control HCPV unit almost simultaneously. Furthermore, effectiveness, a parameter, was proposed to characterize the deterioration of the HCPV module. It was found that the effectiveness of the HCPV installed in NPUST remained 80%~90% after about two years of sun exposure.

Key word: CPV module, Ambient temperature, Direct normal irradiance

## 壹、計畫緣起與目的

在能源危機的影響下，太陽能電池陸續發展出來。其中，成熟的太陽能電池技術包含單晶矽、多晶矽、非晶矽及 III-V 電池。單結晶矽的轉換效率為 18~25%，多晶矽為 18~21%，非晶矽為 13%，效率不足。因為矽是間接能隙，所以若要提高太陽能電池的轉換效率，因此太陽能電池的發展勢必放棄使用矽而使用直接能隙的 III-V 族材料[1]。目前 III-V 族電池的轉換效率約可以達 40%，但其價格遠高於矽太陽能電池。為了減少其成本，高聚光型太陽能模組(HCPV)系統使用聚光鏡聚集陽光，大幅度減少 III-V 族電池的面積[2]。而為了讓陽光能持續聚集在 III-V 族電池上，此系統必須搭配太陽追蹤器，持續追蹤太陽位置，使太陽能模組的發電效率一直維持最佳狀況。然而模組溫度影響發電效率，而模組溫度為材料、結構、外界環境等因素所影響[3]。King[4]和 Skoplaki 等人[5]就曾經提供估算模組溫度的方法。本計畫為了探討太陽能模組的溫度及其發電效率，所以研究目標包含了下列四點：

1. 建立 HCPV 太陽電池實地觀測(Field Test)分析環境，完成測試分析方法及程序建立。
2. 蒐集與分析太陽光照度資料，建立局部區域的年度日照分佈特性曲線，作為太陽能電池效能評估重要參考依據。
3. 建置太陽電池模組戶外測試平台，持續追蹤電池模組額定輸出功率，評估模組輸出功率特性曲線。
4. 長期測量戶外太陽電池模組發電量，並定期進行標準模組比對測試，建立太陽能發電系統架設參考依據。

## 貳、研究方法與過程

本計畫共有三個主要研究目標。由於 HCPV 模組的溫度對該模組發電功率有著極大的影響，再加上模組溫度又與環境溫度、環境相對溼度、太陽直射日照、風速及風向等因素有著密切的關係，因此本計畫第一個目標就是透過實驗測量、長期追蹤、收集並整理這些環境溫度、環境相對濕度、太陽直射日照、風速及風向等數據，以提供一個可用來估算 HCPV 模組溫度的經驗公式。

### 一、HCPV 模組溫度測量

當中，模組相關的溫度都使用 FLUKE 2640A 資料擷取器並搭配一台筆記型電腦來完成擷取與記錄。FLUKE 2640A 資料擷取器，如圖 1 所示。FLUKE 2640A 資料擷取器背面可以插入一個卡匣，如圖 2 所示。卡匣中擁有 20 個通訊管道可接上 K-Type 熱電偶線，而熱電偶線的另一端利用導熱膠(如圖 3 所示)直接黏接在太陽能電池的正後方的背板上。FLUKE 2640A 資料擷取器與筆記型電腦是利用網路線做連接的，可直接把溫度的數據紀錄在筆記型電腦裡。本計畫先利用 15 條 K-Type 熱電偶線，多次測量模組背板不同位置的溫度。綜合結果後，發現同一水平列上的模組背板溫度由左至右有逐漸上升的趨勢，但溫差大約只有  $1^{\circ}\text{C}$ ，而同一垂直欄上的模組溫度由上至下溫度分佈也不一樣。其實模組背板上方的溫度較高，下方較低。這溫度變化與 HCPV 模組內熱空氣自然對流有關。最後本研究共使用 7 條 K-Type 熱電偶線，接在太陽能模組背板上、中、下三個位置，左右兩邊，各接一組，另外還有一條接在太陽能實驗平台上以記錄太陽能模組周圍的環境溫

度。黏接在太陽能模組上的 6 條熱電偶線，如圖 4 所示。HCPV 背板的 6 個溫度紀錄，取其平均值為本計畫的 HCPV 模組溫度。而環境溫度、直射日照、風速與風向的數據，則是透過核能所架設於本校工學院頂樓的簡易氣象站，如圖 5 所示。本團對於每個月月底就會透過 e-mail 向核能所的鐘正邦先生索取氣象資料。之後鐘先生會利用 e-mail 寄來氣象數據。環境濕度則是由實驗室舊有的濕度計 CENTER 310(如圖 6 所示)來進行測量與記錄。所收集的模組溫度與環境氣象數據都得先利用 EXCEL 整理。因為每個季節的日出、日落時間都不同，所以收集每天早上 5 至傍晚 7 點的數據來分析。接下來，本團隊使用 17.0 版的 SPSS 統計軟體進行線性迴歸來求導出各參數與模組溫度的經驗公式。在進行測量與分析的過程中，本團隊發現日照量對模組溫度的影響最為顯著，日照量越高，模組溫度也越高。但是，有時候會發生直射日照量很小，但模組溫度卻還是很高的情況。這是因為當太陽持續照射 HCPV 太陽能模組期間，中途受到雲朵短暫的遮蔽，加上太陽能模組本身是採用被動式降溫，熱能只能經由背板傳導出來再藉由吹風將其熱量帶走，模組溫度無法在短時間內反應變化。

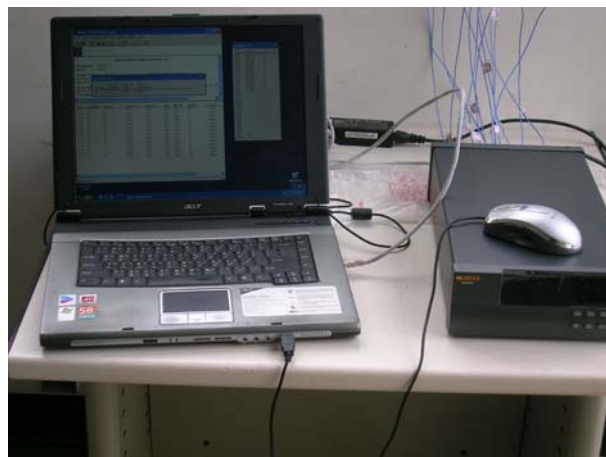


圖 1、FLUKE 2640A 資料擷取系統



圖 2、FLUKE 2640A 卡匣



圖 3、導熱膠



圖 4、HCPV 背板溫度量測點





(a)感測器



(b)資料處理器

圖 5、簡易氣象站



圖 6、濕度計

## 二、HCPV 模組方位與自然風風向關係推導

由於 HCPV 太陽能模組需要隨時保持聚光，所以必須持續跟著太陽的移動而調整其方向，所以模組背板在長期太陽熱輻射聚

焦照射後，局部溫度會急速攀升。因為 HCPV 太陽能模組不斷的移動，所以就算是風向與風量都完全一樣的自然風在不同的時間吹向 HCPV 模組，其降溫的效果是不一樣的。有鑑於此，直接利用風向資料來建構 HCPV 模組的經驗公式較不適合因為 HCPV 模組方向是隨時間而改變的。就物理與幾何觀念而言，考慮原始風向資料必須搭配 HCPV 模組方向才是有意義的。為了歸類出不同的風向對應不同的太陽能模組位置，本研究先透過計算太陽的位置，算出直射日照的單位向量。換言之，HCPV 模組聚焦鏡在不同時間點的表面向量就可以輕易從太陽的位置推算出來。

本計劃設正南方為正  $x$  方向、正東方為正  $y$  方向。首先利用緯度、時角、太陽赤緯角、太陽高度角、太陽方位角、太陽天頂角等公式，計算出太陽的位置。所用的方程式如下：

$$\text{時角：} \quad \omega = 15 \text{ deg } (12 - t) \quad (1)$$

$$\text{太陽赤緯角：} \quad \delta = 23.45 \text{ deg } \sin[2\pi (384+n) / 365] \quad (2)$$

$$\text{太陽高度角：} \quad h = \sin^{-1}[\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)] \quad (3)$$

$$\text{太陽方位角：} \quad \gamma = \cos^{-1}\{[\sin(h) \sin(\phi) - \sin(\delta)] / \cos(h) \cos(\phi)\} \quad (4)$$

$$\text{太陽天頂角：} \quad \theta = \pi/2 - h \quad (5)$$

其中， $t$ 為時間， $n$ 為天數， $\phi$ 為緯度。為了方便結合核能研究所的風向資料，本計畫取朝向正南方為正 $x$ 方向，朝向正東方為正 $y$ 方向。因此，太陽的位置向量可以分解成為 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三個分量。其計算方式如下：

$$x\text{分量：} \quad i_{sum} = \sin(\theta) \cos(\omega) \quad (6)$$

$$y\text{分量：} \quad j_{sun} = \sin(\theta) \sin(\omega) \quad (7)$$

$$z\text{分量：} \quad k_{sun} = \cos(\theta) \quad (8)$$

核能研究所的風向資料介於 0 度~360 度之間。0 度與 360 度代表北風，90 度代表東風，以此類推，如圖 7 所示。則風向向量可表示為  $Wind = \cos(\theta_{wind})\mathbf{i} - \sin(\theta_{wind})\mathbf{j}$ 。舉例：若  $\theta_{wind}$  為 0 度時， $Wind = \mathbf{i}$ ，代表風向為正  $x$  方向，即北風吹向正南方。若  $\theta_{wind}$  為 270 度時， $Wind = \mathbf{j}$ ，代表風向為正  $y$  方向，即西風吹向正東方。

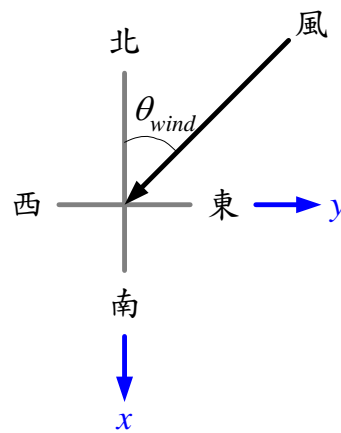


圖7、風向與座標定義示意圖

為了考量風向與 HCPV 方位的關係，本研究定義了兩個參數，分別為  $W_{d_x}$ ( $x$  方向二維水平風向角度因子)和  $W_{d_y}$ ( $y$  方向二維水平風向角度因子)。這兩個參數的計算方式如下：

$$x\text{方向：} \quad W_{d_x} = i_{sun} \cdot \cos(\theta_{wind}) = \sin(\theta) \cos(\omega) \cos(\theta_{wind}) \quad (9)$$

$$y\text{方向：} \quad W_{d_y} = j_{sun} \cdot [-\sin(\theta_{wind})] = -\sin(\theta) \sin(\omega) \sin(\theta_{wind}) \quad (10)$$

因為風向是水平的，所以本研究不考量  $z$  方向。當然，如果日後出現了 3D 的風向計，則直射日照的單位向量就可以進一步分成  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向。如果以上因子為負數，表示風的對應分量吹向 HCPV 太陽能模組的鏡片。反之，因子為正數則表示風的對應分量吹向 HCPV 太陽能模組背板。若因子剛好為零，風就剛好吹向 HCPV 太陽能模組側邊。除了二維水平風向角度因子，本研究也探討了一個綜合風向角度因子( $W_d$ )。其定義為  $W_d = W_{d_x} + W_{d_y}$ 。定義此因子之目的是為了簡化經驗公式。

### 三、HCPV 模組發電功率測量

本計畫第二個目標為提供 HCPV 模組發電功率的經驗公式，其中經驗公式為模組溫度和直射日照的函數。本研究使用 SUNNY BOY 700U 搭配桌上型電腦來量測並記錄模組的發電功率，如圖 8 所示。太陽能模組所發出的直流電壓輸入到 SUNNY BOY 700U，而 SUNNY BOY 700U 可直接將直流電壓轉換成一般室電的交流電壓再輸出到電腦進行記錄。然而，SUNNY BOY 700U 需透過如圖 9 所示的訊號轉接器，將輸出的 RS-485 訊號成功轉換成能夠輸入電腦的 RS-232 訊號。雖然 SUNNY BOY 700U、模組溫度、氣象數據都是設定每分鐘紀錄一筆，但若模組不發電，SUNNY BOY 700U 就會跳過該筆數據。在整理資料時，本團隊得先確保 HCPV 模組發電功率之時間與直射日照的時間作完美匹配，再輸入由 FLUKE 2640A 所測量到的模組溫度。當上述數據都整理好後，本團隊使用 MATLAB R2009b 裡的 SFTOOL 指令，再選擇多種的計算方法做迴歸分析來運算出模組發電功率、模組溫度與直射日照的經驗公式。

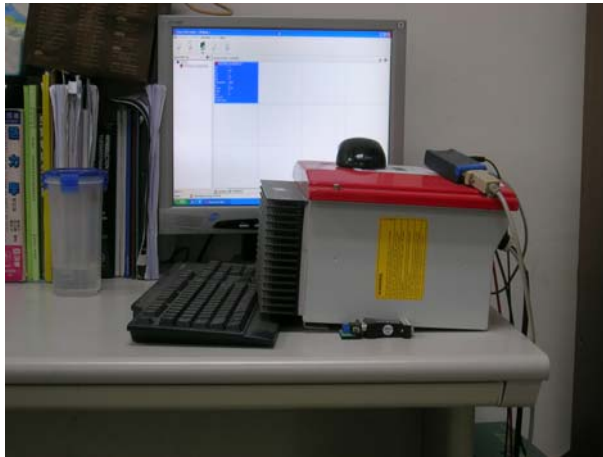


圖 8、SUNNY BOY 700U



圖 9、訊號轉換器

#### 四、HCPV 模組實驗模組與對照模組測量系統製作

本計畫第三個目標為測量且比較 HCPV 實驗模組與對照模組的發電功率，以了解戶外太陽能模組的轉換效率是否會隨著使用時間的長短而降低。HCPV 實驗模組與對照模組，如圖 10 所示。研究過程中，實驗模組裝置於戶外實驗平台上以促使模組在正常使用環境下老化，而對照模組則每月從戶內取出並裝置於戶外實

驗平台上 1~2 次。如果要同時測量與記錄 HCPV 實驗模組與對照模組的發電功率，理應設置兩套資料擷取系統，各別包含一個 SUNNY BOY 700U 及一台電腦，如圖 11(a)所示。這是因為 SUNNY BOY 700U 一次只能記錄一個太陽能模組的發電效率。在此方法下，實驗模組與對照模組同時各別接上一組 SUNNY BOY 700U，以同時測量該實驗模組與對照模組太陽能模組的發電功率及分析其轉換效率。由於 SUNNY BOY 700U 無法同時記錄實驗模組與對照模組的發電功率，而購買多一組 SUNNY BOY 700U 又得考量到其經費不足，故修改圖 11(a)之流程成為如圖 11(b)所示的。第二種擷取方法只需要一套資料擷取系統，但在發電資料進入 SUNNY BOY 700U 之前需要加裝一個繼電器。此計畫設計並自製一個繼電器，如圖 12 所示。此繼電器裝設在太陽能模組與 SUNNY BOY 700U 之間，因為在繼電器的切換之下，實驗模組與對照模組的發電功率都能被記錄下來，故使用繼電器則無需添購一組新的 SUNNY BOY 700U 擷取器。若要精準的記錄實驗模組與對照模組各別的發電功率，繼電器內部的切換時間可設定為 1 秒或更短。但由於 SUNNY BOY 700U 最快只能每 30 秒記錄一筆數據，所以本計畫將繼電器的切換時間也設定為 30 秒和 SUNNY BOY 700U 的記錄時間一致，如此便可同時記錄到兩個模組的發電功率。雖然繼電器每 30 秒切換一次且 SUNNY BOY 700U 也是每 30 秒記錄一次，但礙於在 HCPV 模組不發電的時候 SUNNY BOY 700U 會跳過記錄步驟，導致數據不連續，因此先要將其數據細心分類。分類好了之後，再分析兩個模組發電量的差異。



圖 10、實驗模組與對照模組

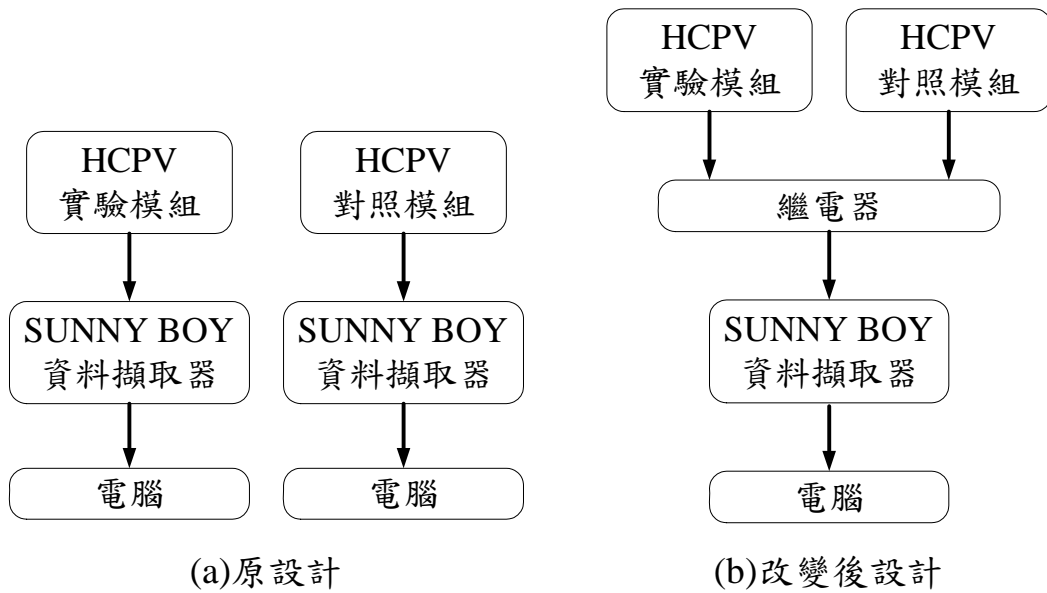


圖 11、資料擷取流程



圖 12、繼電器

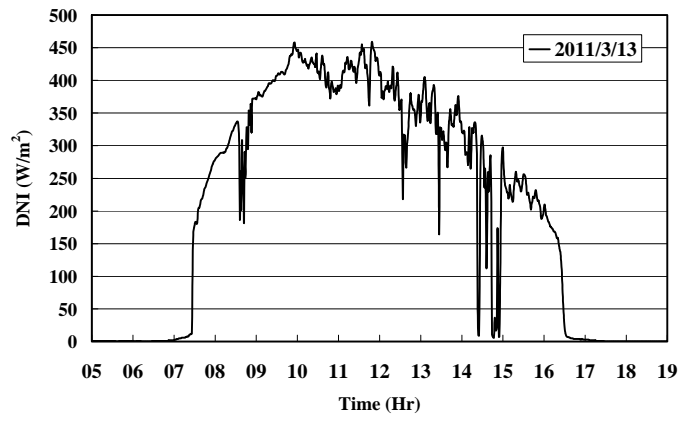
## 參、主要發現與結論

經過快要一年的實際操作、除錯、測量、整理，本團隊已經對安裝於屏東科技大學的 HCPV 太陽能模組相當了解。以下是本計畫執行後所歸納出來的主要發現。

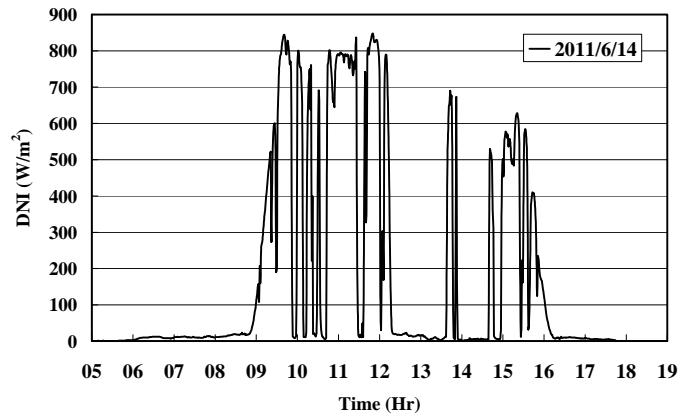
### 一、太陽光照度資料收集與分析

圖 13 所示為本年度 3 月、6 月、9 月、11 月的日照強度變化，分別代表春季、夏季、秋季、冬季。日期之選定主要是隨意的，但還是避開 HCPV 發電量偏低的日子，如：雨天或大陰天等。從圖中可發現三月時候(春季)的日照強度較低約  $460 \text{ W/m}^2$ ，六月(夏季)的約為  $850 \text{ W/m}^2$ ，9 月(秋季)的約為  $810 \text{ W/m}^2$ ，而 11 月(冬季)的約為  $700 \text{ W/m}^2$ ，發現與一般的認知相符合。圖 13(a)當天(2011/03/13)為晴天，日照從早上 7:30 開始大幅度增加，到了下午 4:30 才開始大幅減弱。在中午至下午，太陽因略為受到雲朵的遮蔽，日照度(DNI 值)陸續出現上下震盪的情形。到了下午 3:00 左右，雲層變厚，日照度數度出現短期偏低的狀況。圖 13(b)當天(2011/06/14)晴天但多雲，所以日照度偏低的狀況特別多且持續很久。圖 13(c)當天(2011/09/17)早上晴天而午後雷陣雨，這時屏東地區暑假期間常見的氣候。早上日照正常而到了下午下起大雨來，日照幾乎變成零，圖 13(d)當天(2011/11/02)早上為晴天，中午過後雲量較多，所以太陽被雲朵遮蔽，導致日照量不但下降還出現日照度波動的情形。

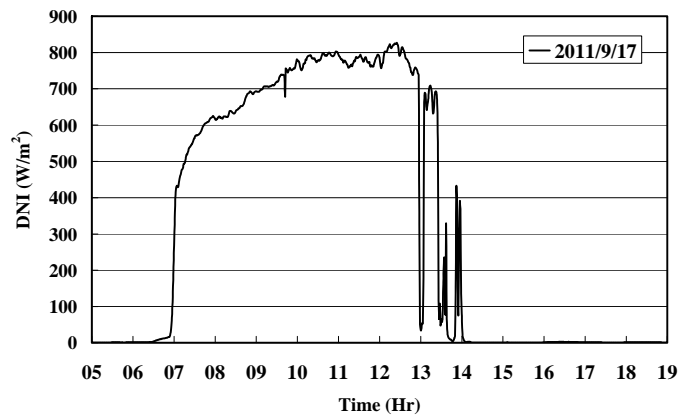




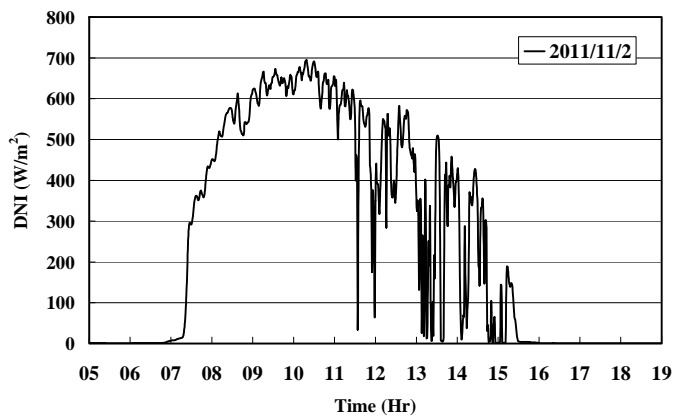
(a) 2011/03/13



(b) 2011/06/14



(c) 2011/09/17



(d) 2011/11/02

圖 13、整天日照變化

圖 14 可看出 2011 年 1 月~11 月的當月最大日照度。本研究覺得探討當月最大日照度比當月平均日照度有意義，因為從當月最大日照度可推估每月的最多 HCPV 總發電，甚至一年的最大電量。然而當月平均日照度跟當月的氣象條件關聯性非常高，不適合作為一整年日照度變化的探討，所以本研究沒有提供當月平均日照度。如圖 14 所示，2011 年的每月最高 DNI 值呈現雙峰分佈的狀況，波峰分別為 2 月與 8 月，兩個波谷則分別為 3 月與 11 月(或 12 月)。因為屏東地區氣候炎熱，夏季的氣候較長，所以 8 月的 DNI 值波型佔幅較 2 月的廣。在 2011 年，8 月的最大 DNI 值約為  $910 \text{ W/m}^2$ ，其次是 2 月的約為  $880 \text{ W/m}^2$ 。3 月的最大 DNI 值約為  $660 \text{ W/m}^2$ ，11 月的則約為  $700 \text{ W/m}^2$ 。

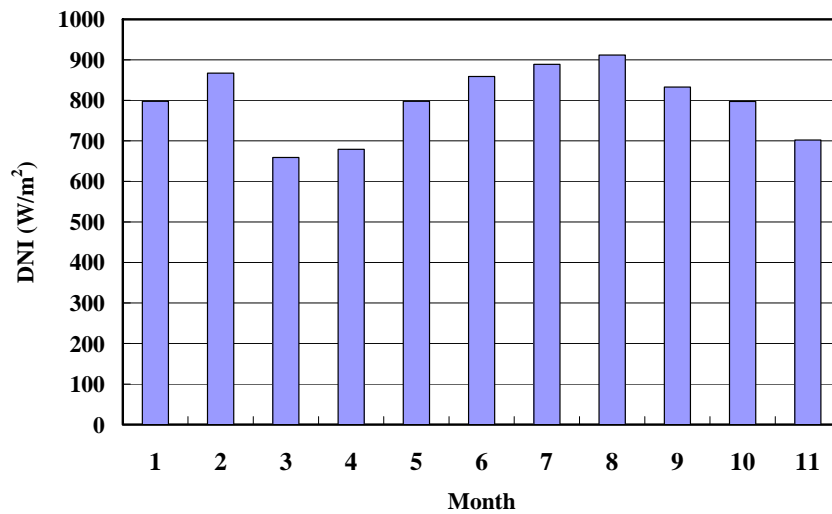


圖 14、2011 年度 1 月~11 月每月最大 DNI 值

圖 15 所示為本校區之 DNI Irradiance 值。為了更進一步探討本校區附近之可用太陽能能量，本團隊探討 DNI Irradiance，即 DNI 值隨時間之積分，定義如下：

$$\text{DNI Irradiance} = \int \text{DNI} dt \quad (11)$$

圖中呈現當月最大與平均 DNI Irradiance 值的分佈。雙峰分佈還是相當明顯，但是 6 月的數據出現了一個局部偏低的現象，主要原因為該月雲層量較多，雖然最大 DNI 值不低，但是太陽照射的時間不長。就當月最大 DNI Irradiance 而言，最高值出現於 8 月，約 7.6 kWh/m<sup>2</sup>，其次為 2 月，約 5.8 kWh/m<sup>2</sup>，最低值則出現於 10 月與 11 月，約 3.5 kWh/m<sup>2</sup>。若以當月平均 DNI Irradiance 值作考量，2 月的略比 8 月高一些，但都約 2.75 kWh/m<sup>2</sup>，最低則出現於 3 月，少於 1.0 kWh/m<sup>2</sup>。綜合以上結果，可見 DNI Irradiance 的變化對應春季太陽日照較弱，夏季

日照較強，6~8 月雨天數較多，秋季太陽日照稍微轉弱等節氣變化。

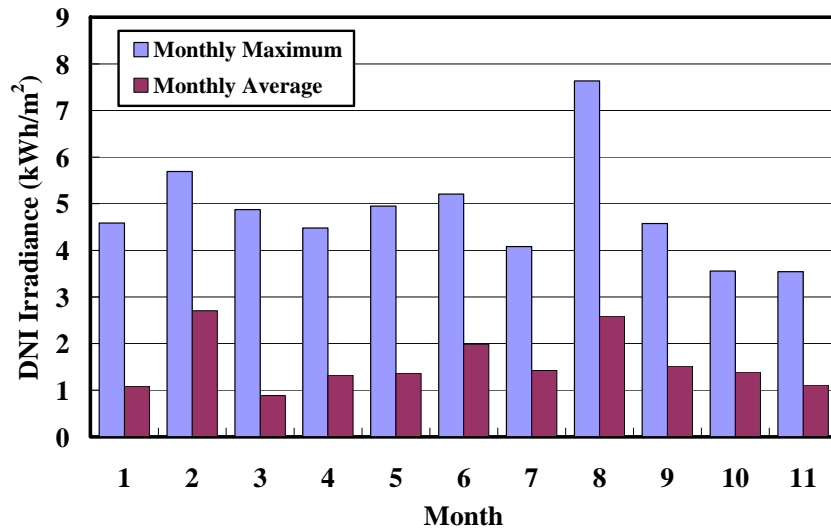
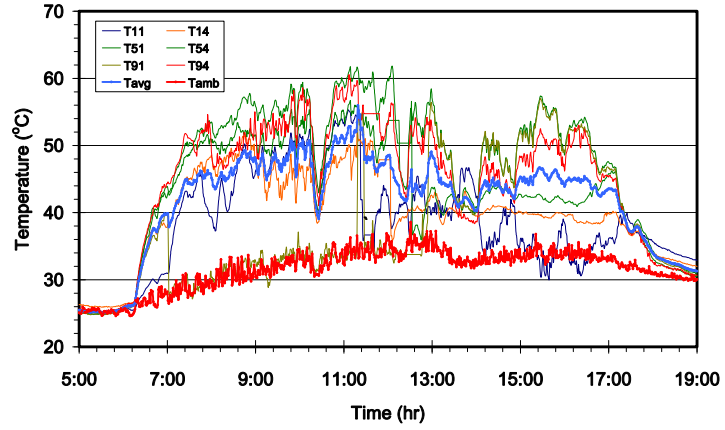


圖 15、2011 年度 1 月~11 月 DNI Irradiance 值

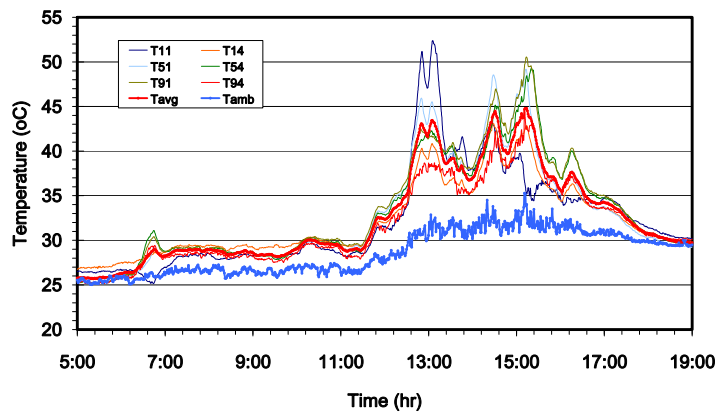
## 二、HCPV 模組溫度與氣象資料收集與分析

本研究使用 6 條 K-TYPE 熱電偶線量測 HCPV 太陽能模組背板的溫度，再取其平均值作為該模組溫度。HCPV 太陽能模組背板溫度與其對應平均值，如圖 16 所示。於 2011/07/27 模組背板溫度從早上 6:00 至傍晚 7:00 都出現比較明顯的變化。於 2011/07/28，當天早上下雨，所以模組背板溫度從早上 6:00 至 11:00 只有略為提升，但一直都保持相當均勻。到了中午 12:00，太陽開始露臉，模組背板才開始有明顯受熱的情形。當天下午還是間斷性下雨，所以從中午 12:00 致傍晚 7:00 溫度還是出現一些變化。於 2011/09/07，天空多雲。在 HCPV 沒有被雲朵遮蔽時，模組背板溫度持續升高，但是一旦被雲遮蔽，溫度出現下降的情形。於 2011/10/20，上午太陽猛烈，到了中

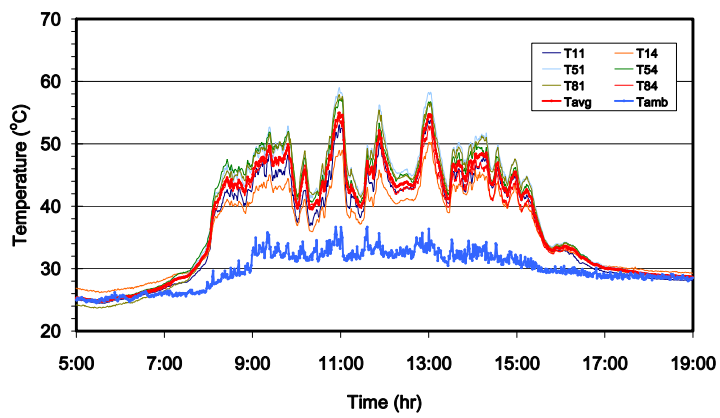
午左右開始陰天。因此，模組背板的溫度在早上明顯比下午高出了許多。



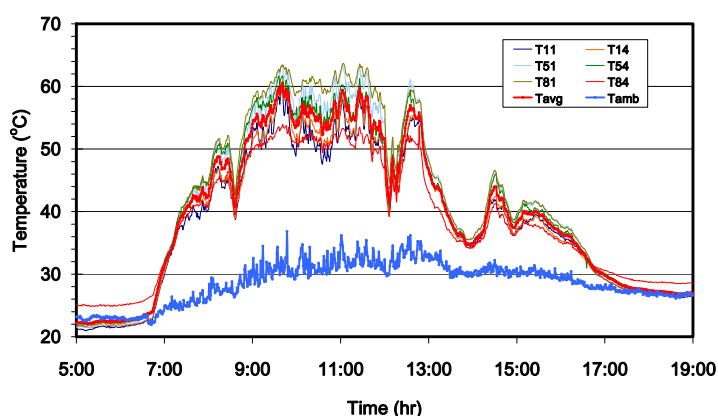
(a) 2011/07/27



(b) 2011/07/28



(c) 2011/09/07



(d) 2011/10/20

圖 16、模組各點溫度及平均值

本計劃也紀錄了架設於本校之氣象站資料，並將氣象與 HCPV 模組溫度等數據作統計分析，當中使用 SPSS 統計軟體來進行運算。為了把風向的影響納入考量，本研究考量風向與 HCPV 太陽能板面向的關係。換言之，風大致上可能吹向 HCPV 太陽能板正面、側面、背面三種狀況，而這三種狀況對於 HCPV 模組的散熱效果又不一樣。因此，本計畫分別探討綜合風向角度因素( $W_d$ )以及二維水平風向角度因素( $W_{d_x}$  與  $W_{d_y}$ )。架設於本校之 HCPV 太陽能電池模組溫度與氣象的關係式如下：

$$T_{mod} = C_1 + C_2 \cdot T_{amb} + C_3 \cdot G_i + C_4 \cdot W_S + C_5 \cdot W_{d_x} + C_6 \cdot W_{d_y} + C_7 \cdot \Phi \quad (12)$$

$$T_{mod} = C_1 + C_2 \cdot T_{amb} + C_3 \cdot G_i + C_4 \cdot W_S + C_5 \cdot W_d + C_6 \cdot \Phi \quad (13)$$

其中， $T_{mod}$  為太陽能電池模組溫度[°C]， $T_{amb}$  為大氣溫度[°C]， $G_i$  為日照強度(即 DNI 值) [ $W/m^2$ ]， $W_S$  為風速[m/s]， $W_{d_x}$  為 x

方向二維水平風向角度因子[-]， $W_{d,y}$  為 y 方向二維水平風向角度因子[-]， $W_d$  為綜合風向角度因子[-]， $\Phi$  為環境相對濕度[-]， $C_1 \sim C_7$  為統計分析所得之係數。透過 SPSS 取得之  $C_1 \sim C_7$  數值列於表 1 與表 2 中。由於方程式(12)的係數比較多，所以本研究也試著結合方程式(12)中的兩個風向角度因子而成為一個新的綜合風向角度因子。發現方程式(12)的  $R^2$  值為 0.818 而方程式(13)的  $R^2$  值則為 0.776。可見方程式(12)雖然比較複雜一點，但其精準度略為高一些。圖 17 顯示實際模組溫度值與利用方程式(12)所預測的溫度值。

表 1、方程式(12)之係數與其數值

係數 數值	$C_1$ [°C]	$C_2$ [-]	$C_3$ [°C/(W/m <sup>2</sup> )]	$C_4$ [°C/(m/s)]	$C_5$ [°C]	$C_6$ [°C]	$C_7$ [°C]
無分類	4.462	1.241	0.016	-1.436	-0.276	0.686	-5.026
背面	-4.221	1.439	0.017	-1.2	2.849	-4.485	1.846
正面	-3.608	1.438	0.013	-2.158	-1.729	5.332	1.513
側面	2.288	1.280	0.018	-1.132	-1.179	-0.512	-4.426

表 2、方程式(13)之係數與其數值

係數 數值	$C_1$ [°C]	$C_2$ [-]	$C_3$ [°C/(W/m <sup>2</sup> )]	$C_4$ [°C/(m/s)]	$C_5$ [°C]	$C_6$ [°C]
無分類	9.483	1.101	0.017	-1.596	-5.771	-1.969
背面	-4.202	1.464	0.017	-1.207	-4.582	2.111
正面	-3.073	1.473	0.013	-2.242	-3.915	0.549
側面	7.683	1.139	0.018	-1.258	-5.344	-2.071

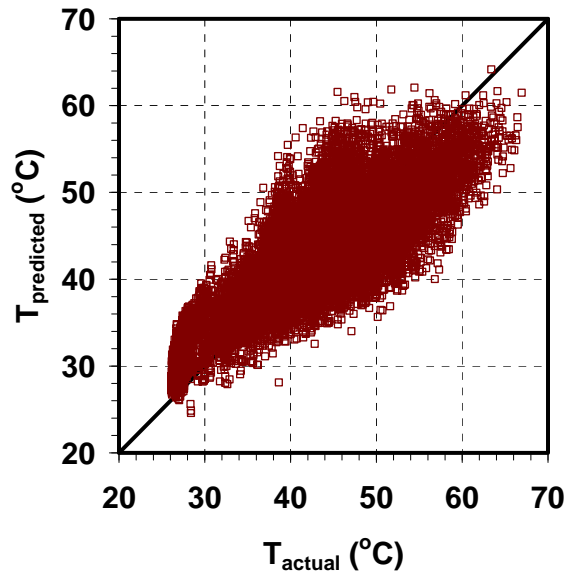


圖 17、模組溫度預測

### 三、HCPV 太陽能電池效能評估

本計畫使用 SUNNY BOY 700U 記錄 HCPV 模組發電資料，並且使用上述氣象站所記錄的氣象資料來進行氣象資料與 HCPV 模組發電資料的統計分析。此過程利用 MATLAB 軟體。透過分析，HCPV 模組發電功率與氣象資料的關係為：

$$P_m = C_1 \cdot \{ P_{m,STC} \cdot \Delta G \cdot (1 + C_2 \cdot \Delta T) \cdot [1 + C_3 \cdot \ln(\Delta G)] \} + C_4 \cdot [\ln(\Delta G)] + C_5 \cdot \Delta T \quad (14)$$

其中，

$$\Delta T = T_{mod} - T_o \quad (15)$$

$$\Delta G = G_i - G_o \quad (16)$$



以上方程式中， $P_m$  為太陽能電池模組發電功率[W]， $P_{m,STC}$  為標準測試狀態下太陽能電池模組發電功率[W]， $T_{mod}$  為太陽能電池模組溫度[°C]， $T_o$  為標準測試狀態下太陽能電池模組溫度[°C]， $G_i$  為日照強度[W/m<sup>2</sup>]，而  $G_o$  為標準測試狀態下的日照強度[W/m<sup>2</sup>]， $C_1 \sim C_5$  為統計分析所得之係數。分析所得之  $C_1 \sim C_5$  數值列於表 3 中。圖 18 顯示本 HCPV 太陽能電池模組發電功率與利用方程式(4)-(6)所預測的功率值。

表 3、方程式(14)之係數與其數值

係數	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
數值	0.6665	0.008511	0.6563	-5.42	-0.5419

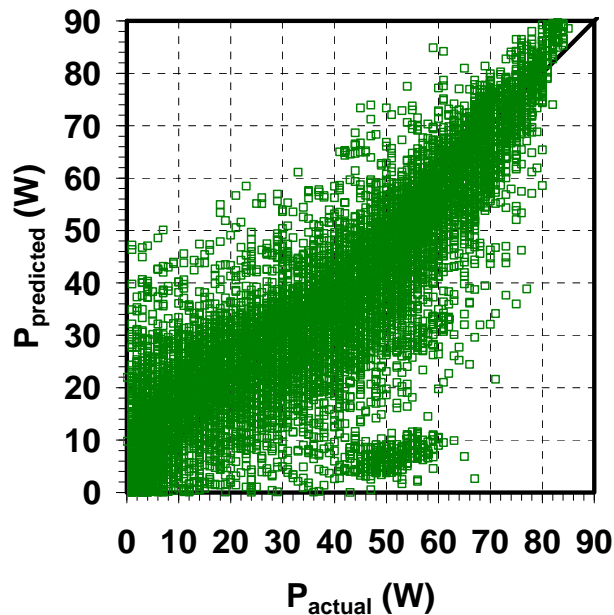
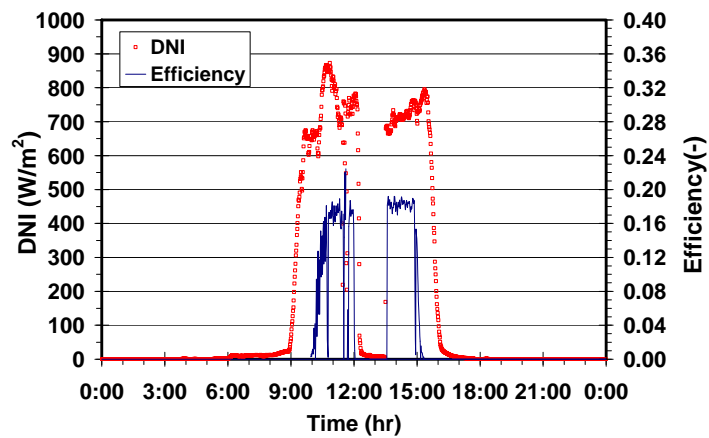


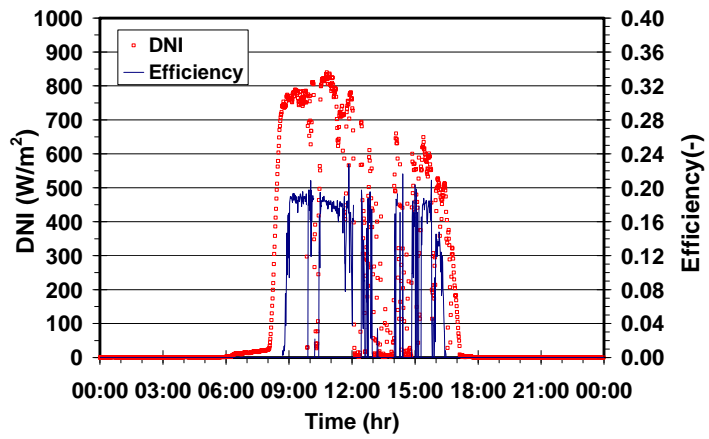
圖 18、太陽能電池模組發電功率預測

#### 四、HCPV 太陽電池模組戶外長期測試與發電量分析

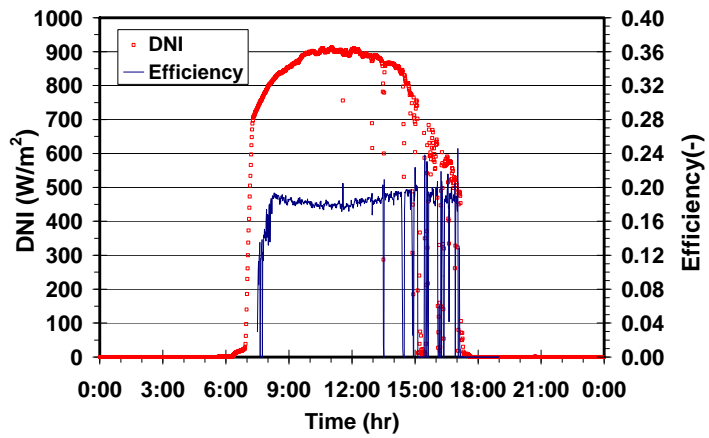
如圖 19 所示，太陽日照度的變化基本上是會反應在 HCPV 太陽能發電效率的變化上。縱然如此，還是可以發現架設於本校的 HCPV 模組發電效率大約為 20% 左右。然而，在 6 月~9 月期間，此模組發電狀況並未能完全與所接收到的太陽直射日照同步。如圖 19(a)-(b) 所示，此模組在太陽直射日照大幅增加後約半小時才開始發電，卻又在太陽直射日照大幅遞減前約半小時就開始停止發電。到了 8 月，以上情況開始好轉。如圖 19(c) 所示，此模組已經可以在太陽直射日照大幅遞減時才停止發電。到了 9 月，此模組發電狀況會完全與所接收到的太陽直射日照同步，如圖 19(d) 所示。



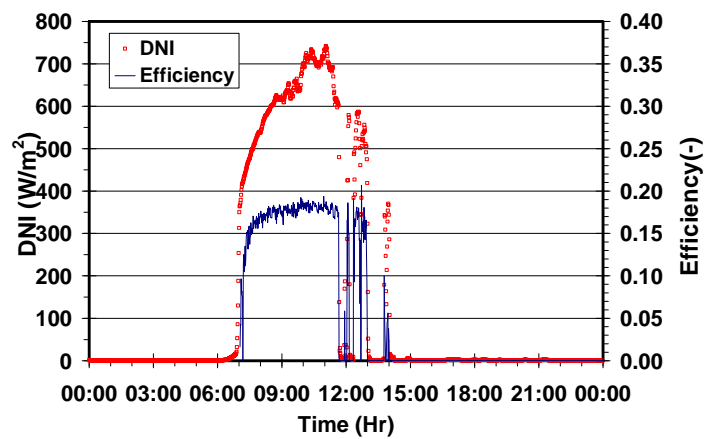
(a) 2011/06/17



(b) 2011/07/27



(c) 2011/08/17



(d) 2011/09/17

圖 19、光照與太陽能電池發電

## 五、HCPV 模組發電功率(實驗組與對照組的比較)

本研究 HCPV 實驗模組其實已經安裝於戶外進行測試約兩年之久，所以改模組原件難免在受到太陽曝曬的影響下材料開始老化。雖然一般太陽能電池模組的壽命估算都查過 25 年，然而其封裝是影響模組壽命的關鍵因素之一。其中，惡劣或極端的環境條件更是傷害封裝效果的主要元兇。一旦太陽能電池材料開始會發生老化現象，其模組發電效率必定隨之降低。為了探討安裝於本校之 HCPV 模組發電效率隨著曝曬時間增加而降低的變化，本研究提出一個可量化的參數稱為有效性(Effectiveness)，定義為

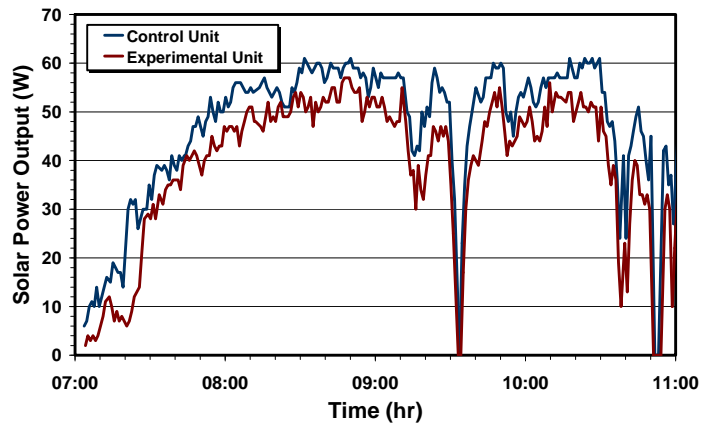
$$Effectiveness = P_{used} / P_{new} \quad (7)$$

式中， $P_{new}$  為全新 HCPV 模組的發電功率，而  $P_{used}$  則為置放於戶外使用中 HCPV 模組的發電功率。最佳情況是全新與置放於戶外的兩組 HCPV 模組皆在完全相同的環境下進行發電，如此有效性之計算將會非常精準。然而，如實驗方法與過程所述，本研究只能使用一台 SUNNY BOY 700U 計錄 HCPV 模組的發電功率，所以本研究在實驗的系統中添加了一台繼電器以連接 HCPV 實驗與對照模組。因為使用了繼電器，SUNNY BOY 700U 資料輸入端變可以在設定的頻率下自動切換讀取 HCPV 實驗與對照模組的發電量。然而，所讀取的發電量無疑並非同步(synchronized)的。就理論而言，若繼電器的頻率趨近無窮小時，所讀取的發電量就可逼近同步了。根據以上的發想，針對本研究 HCPV 的有效性(Effectiveness)之定義

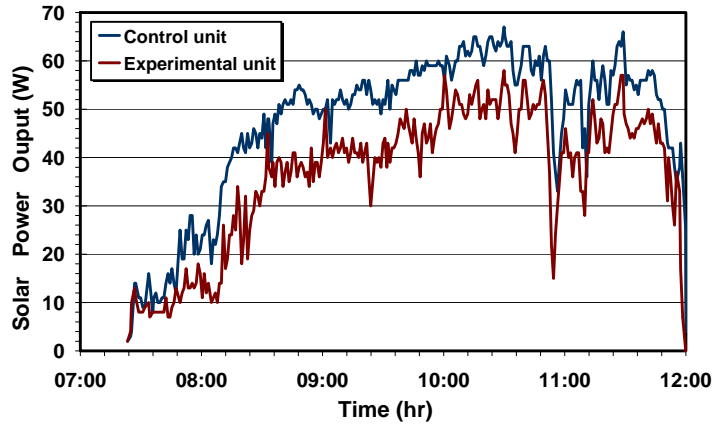
可略為修改成

$$Effectiveness = P_{exp} / P_{control} \quad (8)$$

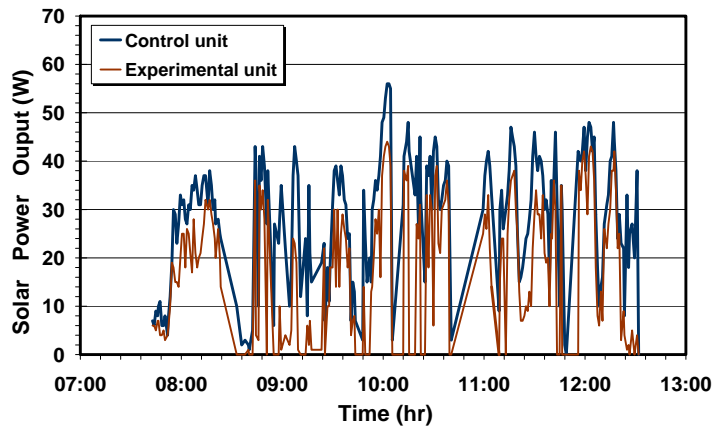
式中， $P_{exp}$  代表置放於戶外使用中之 HCPV 實驗模組 (Experimental Unit) 的發電功率，而  $P_{control}$  則為只有定期短暫戶外之 HCPV 對照模組 (Control Unit) 的發電功率。實驗模組與對照模組發電功率的變化如圖 20 所示，可見對照組的發電功率一般都比實驗組的大，這是因為實驗組在戶外常曝曬於陽光下，零件開始出現老化的情形。圖 20(a) 與 (b) 只展示早上的資料因為午後開始陰天。而圖 20(c) 中的則為陰天時實驗組與對照組的發電情況。由於 2011 年 11 月初幾乎每天都陰天多雲，陽光不足，所以兩組的發電量都出現非常嚴重的波動。雖然圖 20 中三天的氣象條件不同，HCPV 發電的規律也不盡相同，但從圖 21 還是可看出有效性大概介於 80% 與 90% 之間。一旦出現雲朵遮蔽 HCPV 太陽能板，有效性一般都會劇降，但是也有可能變成超過 100%。後者必定是不合理的，追究其原因為繼電器切換 HCPV 數據所致。例如：前一筆數據為無雲遮蔽下的實驗組發電功率，而後一筆數據剛好為有雲遮蔽下的對照組發電功率。如此一來，有效性當然就超過 100% 了。儘管如此，上述狀況其實並不常發生，無須過於質疑利用有效性來評估 HCPV 太陽能模組老化情形之可行性與正當性。如圖 21 所示，有效性一般都在 0%~90% 之間變動。



(a) 2011/09/26

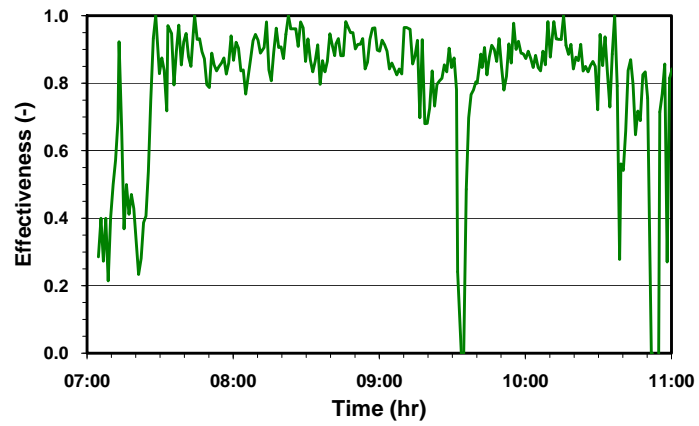


(b) 2011/10/28

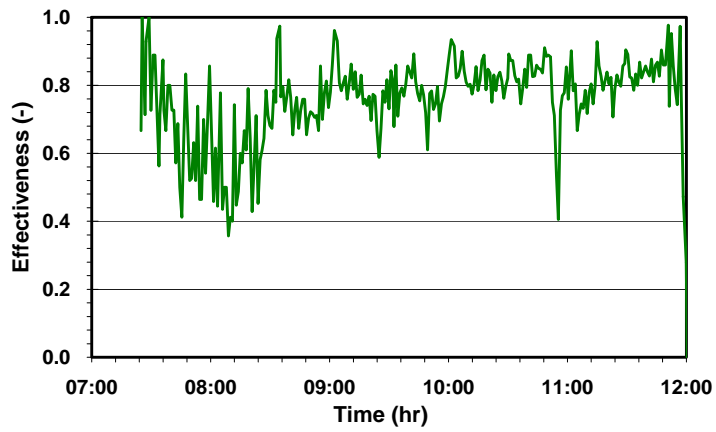


(c) 2011/11/04

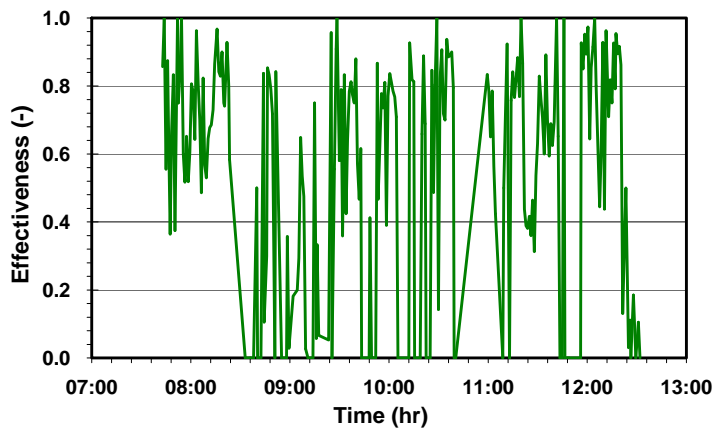
圖 20、實驗組與對照組輸出功率比較



(a) 2011/09/26



(b) 2011/10/28



(c) 2011/11/04

圖 21、實驗組有效性(Effectiveness)分析

## 肆、結論

本研究成功如期完成所有預計工作項目並取得相當不錯的成果。研究成果歸納如下：

- 一、就屏東科技大學地區而言，當月最高或當月平均 DNI Irradiance 值皆以 8 月為最高，而 11 月和 3 月的則明顯最低。
- 二、本研究透過在屏東科技大學所收集的資料，成功建立兩個估算模組溫度的經驗公式。此經驗公式需要輸入環境溫度、DNI 值、風速、風向、環境相對濕度為參數。這兩個經驗公式的  $R^2$  值都約 0.8 左右。
- 三、若利用 2D 風向角度因子估算模組溫度，其準確度較高。若使用綜合風向角度因子，其準確度略低一些。
- 四、本研究也成功建立估算模組發電功率的經驗公式。此經驗公式只利用模組溫度與 DNI 值即可。此公式  $R^2$  值超過 0.9。
- 五、實驗組經過兩年在屏東科技大學戶外的使用後，與對照組比較發現其有效性約為 80%~90%。



## 伍、參考文獻

1. P. Perez-Higueras, E. Munoz, G. Almonacid, P.G. Vidal, “High Concentrator PhotoVoltaics Efficiencies : Present Status and Forecast,” Renewable Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 1810-1815, 2011.
2. W.T. Xie, Y.J. Dai, R.Z. Wang, K. Sumathy, “Concentrated Solar Energy Applications using Fresnel Lenses : A Review,” Renewable Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 2588-2606, 2011.
3. G. Notton, C. Cristofari, M. Mattei, P. Poggi, “Modelling of a Double-Glass Photovoltaic Module using Finite Differences,” Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 2854-2877, 2005.
4. D.L. King, “Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions,” NREL/SNL Program Review, AIP Press, pp. 347-368, 1996.
5. E. Skoplaki, J.A. Palyvos, “Operating Temperature of Photovoltaic Modules : A Survey of Pertinent Correlations,” Renewable Energy, Vol. 34, pp. 23-29, 2009.