

國立交通大學

平面顯示技術碩士學位學程

碩士論文

一種太陽光電集熱複合型系統能源性能研究分析

Energy Performance Analysis of A Photovoltaic Thermal System

研究生：宋賢超

指導教授：鄭泗東 博士

中華民國一百零一年六月

一種太陽光電集熱複合型系統能源性能研究分析

Energy Performance Analysis of A Photovoltaic Thermal System

研究生：宋賢超

Student : Hsien-Chao Sung

指導教授：鄭泗東 博士

Advisor : Dr. S-Tone Cheng



Submitted to Degree Program of Flat Panel Display Technology

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Degree Program of Flat Panel Display Technology

June 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一百零一年 六月

一種太陽光電集熱複合型系統能源性能研究分析

Energy Performance Analysis of A Photovoltaic Thermal System

研 究 生：宋賢超

指導教授：鄭泗東 博士

國立交通大學平面顯示技術碩士學位學程

摘要

地球初級能源蘊藏量有限，且全世界石油使用年限約 45 年後耗竭，為降低化石能源依賴，世界各國積極發展再生能源(如歐盟規劃 2010 年再生能源佔總發電量比例達 20%)。在則 IEA 預測 2008~2030 年未來全球初級能源需求年平均成長率約為 1.6%，由此可見人類對於能源的依賴已是密不可分。然而太陽能一年約可提供 23,000 TWy/year，此能量與其他能源相比遠遠大於人類所需求，故綜合以上太陽能優勢，若能積極發展與投入應用將是解決未來能源危機與再創能人類巔峰革命的最佳途徑之一。

目前太陽能的利用技術已是當今世界各國利用再生能源進行能源替代、節能、環保的重要研究項目之一，其主要應用分為太陽電能及太陽熱能兩個領域。在太陽電能方面，主要是利用太陽光電晶片吸收 400~1000nm 太陽光譜並將吸收之光子轉換成電能，其中未被轉換成電能的太陽光子在符合能量不滅定律下，60%~70%會被轉換成熱能並使太陽光電模組(PV Module)整體溫度上升，通常 PV 模組背溫可高達 75 或更高，此時太陽能電池的實際最大功率將比標準測試環境(STC)下的最大功率減少 18%~25%(相對值)。另外 PV 模組發電效率受溫度係數影響之特性，在結晶

矽型 PV 模組發電效率特性會隨著溫度每升高 1 則降低 0.4~0.5%發電效率，而在非晶矽型 PV 模組發電效率也會降低約 0.25%。故本研究提出太陽光電與集熱複合型(PV/T)設計應用概念，將 PV 模組背熱透過高導熱材料(如銅或鋁材)之集熱器，以熱傳導和熱對流的方式達到散熱與儲熱之目的。

研究 PV/T 模組最主要是希望能提升太陽能綜合應用的效益，另外台灣再生能源熱利用獎勵補助辦法中，明訂太陽能熱水器性能標準須大於等於 50%，故本研究以開發製作 PV/T 系統能源綜合效率(電能+熱能)大於 50% 為指標。然而開發 PV/T 模組的關鍵在於確保 PV 模組與集熱器之間是否有良好的結合、集熱器管道設計(管數、管徑、流道配置、材質)、封裝黏著材料其須具備高熱傳導性與極佳的電絕緣能力，另外在保溫能力方面也是決定集熱效率重點的要因。後續本研究也開發三款新型 PV/T 模組，並以 Type-1 PV/T 模組性能最佳，其在開路電壓狀態下，且入口溫度與環境溫度設定相同時，集熱效率(η_t)最高可達 60.55%。另外在併接上具有 MPPT 功能之電子負載狀態下，且入口溫度與環境溫度設定相同時，集熱效率(η_t)最高可達 47.45%，發電效率為 13.25%，其綜合效率為 60.70%。

最後本研究也針對所開發之 Type-1 PV/T 模組作系統全天性能測試，測試結果得到集熱效率最高可達 42.49%(水溫約可提升 10)，發電效率為 13.05%，能源綜合效率 55.54%，達成本實驗設計指標 另外也利用 TRNSYS 動態仿真軟體模擬與設計 PV/T 系統，其中，熱效率與電效率在實測數據與模擬數據相互比較下，TRNSYS 模擬之相對誤差小於 10%以內。

關鍵詞：太陽光電、太陽熱能、太陽光電集熱複合型系統、TRNSYS 模組化的動態仿真模擬軟體、發電效率、儲熱效率

一種太陽光電集熱複合型系統能源性能研究分析

Energy Performance Analysis of A Photovoltaic Thermal System

Student : Hsien-Chao Sung

Advisor : Dr. S-Tone Cheng

Degree Program of Flat Panel Display Technology

National Chiao Tung University

Abstract

Earth's primary energy reserves are limited, and the world's oil depletion in the useful life of about 45 years, to reduce fossil fuels dependence, the world is actively developing renewable energy. IEA forecast the future of global primary energy demand annual average growth rate of about 1.6% in 2008 and 2030 shows that the human energy dependence are inextricably linked. However, solar year, about 23,000 TWy / year, this energy compared and other energy sources is far greater than human needs. Actively develop and put into application will solve the energy crisis and one of the best way to create human pinnacle of revolution.

Nowaday the worldwide countries take the research on renewable energy,saving energy and environmental protection to take new resource from using technology of solar,which mainly applied on solar thermal energy and solar power. In solar electricity, solar cell absorb 400 ~ 1000nm solar spectrum and absorption of photons into electrical energy,which was not been transferred

are one of important research objects on saving energy and environmental protection , its mainly application under the law of conservation of energy ,60% to 70% will be converted into thermal energy and raise the back side temperature on photovoltaic modules (PV module) , usually the temperature came up to 75 ° C even higher, the actual maximum power (Pmax) of the solar cells was less than Standard test Condition(STC) reduced around 18% to 25%(relative value). PV module power generation efficiency is affected by the characteristics of the temperature coefficient, under STC model the photovoltaic chip with packaged we found its temperature coefficient of its power generation efficiency, when it in crystalline photovoltaic modules the characteristics of the power generation efficiency decrease from 0.4 to 0.5% as the temperature increases 1 , then in Amorphous Si photovoltaic modules will be reduced by about 0.25%. In this study provide the concept of design applications of solar photovoltaic and collector efficiency (PV / T), heat the back of the photovoltaic modules with high thermal conductivity materials (such as copper or aluminum) collector, to achieve the purpose of cooling and thermal storage by the thermal conduction and convection.

PV / T module is to enhance the effectiveness of the integrated solar applications, In addition, Taiwan's renewable energy incentive measures to aid the express solar water heater performance standards must be greater than or equal to 50%,in this research develop production of PV / T system energy efficiency (electricity & heat) is greater than 50% as an indicator.The key point in development PV / T modules is to ensure whether there is a good combination

between the PV modules and solar collector, the collector pipe design (tube number, diameter, flow channel configuration, material) package adhesive material shall with high thermal conductivity and excellent electrical insulation, insulation capacity also determine the collection efficiency. After that developed the three PV / T module, in which Type-1 PV / T module has the best performance, the collection efficiency (η_t) can come to 60.55% when the inlet and ambient temperature set as the same degree with the open circuit voltage state. In addition, if connected to the MPPT function electronic load state, when the inlet and ambient temperature is set the same degree, the collection efficiency (η_t) up to 47.45%, 13.25% power generation efficiency, the overall efficiency of 60.70%.

In this study, also development Type-1 PV / T module for system performance testing, as results the thermal efficiency up to 42.49% (water temperature is upgrade to 10 °C), the power generation efficiency to 13.05%, the comprehensive energy efficiency by 55.54%, it was reached the index of the experimental design. And also under TRNSYS, (Transient Cycle Systems, Dynamic Simulation Program) software simulation and designed PV / T system, compare the measured data and simulation data, TRNSYS simulation of the relative error is less than 10%.

Keywords : PV, Solar thermal, Photovoltaic Thermal System, TRNSYS, Electricity Efficiency, Thermal Efficiency

誌 謝

兩年的研究所生涯，終於告一段落。回首剛回到校園進修時的期待與雀躍，以及現在收成的喜悅，這一切都要感謝許多人對我的提攜與幫助。然而致謝對於我來說是一篇論文最後完美的結局，從前羨慕著別人能寫致謝，這次，終於輪到我為自己的論文寫致謝了。

學生能順利完成這篇論文，首先要感謝我的指導老師 鄭泗東教授。老師所給我的教導與啟發讓學生永難忘懷。在跟隨老師這兩年的時間，發現老師不管是在學術殿堂上的奉獻與成就，或是對於一件事情專注、要求完美的態度上，讓學生不得不敬佩，也學習到做事應有的態度。再來要感謝我的口試委員 傅武雄教授與 尹慶中教授，兩位老師在計劃書口試時對於我的指導，讓我發現本論文研究可以更深入多元化的思考邏輯，這在我的工作領域上有很大的幫助，能夠真正達到學以致用的目標，且讓學生論文更加完整。

然而，我也要感謝在這兩年求學階段的同學們，因為在這段時間給予了我很多的協助，真的好榮幸，交大的求學生涯感謝你們陪我一起走過。當然，還有很多曾經幫助過我的朋友，因為有大家的幫助，我才能有今天的成果。最終，也因為女朋友在背後的默默支持更是我前進的動力，沒有你的體諒、包容、支持，相信這兩年的生活將是很不一樣的光景。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親與所有親人。

目 錄

頁次

中文摘要	
英文摘要	
誌謝	
目錄	
表目錄	
圖目錄	XI
第一章	緒論	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	研究動機與目的.....	4
1.3	研究內容與範圍.....	6
1.4	文獻回顧.....	8
1.5	研究方法與流程.....	15
1.6	論文架構.....	17
第二章	理論與原理	18
2.1	太陽光電系統.....	18
2.1.1	太陽能電池原理.....	18
2.1.2	太陽能電池種類.....	23
2.1.3	太陽能電池電氣特性.....	26
2.1.4	太陽光電系統介紹.....	32
2.1.5	太陽光電產業趨勢.....	39
2.2	太陽光熱系統.....	47
2.2.1	太陽能熱水系統原理.....	49
2.2.2	太陽能熱水系統種類.....	50
2.2.3	太陽能熱水系統性能評估指標.....	55
2.2.4	太陽能熱水系統產業趨勢.....	60
2.3	太陽光電集熱複合型系統.....	61
2.3.1	太陽光電集熱複合型模組原理.....	62
2.3.2	太陽光電集熱複合型模組種類.....	65
2.3.3	太陽光電集熱複合型系統性能評估指標.....	68
第三章	系統模擬分析	74
3.1	TRNSYS 軟體簡介.....	74
3.2	氣象資料簡介.....	75

3.3	PV/T 系統模型建立.....	78
第四章	實驗設計與封裝	85
4.1	PV/T 模組開發.....	85
4.1.1	PV/T 模組設計.....	86
4.1.2	PV/T 模組封裝加工.....	88
4.2	PV/T 模組性能測試.....	94
4.2.1	PV/T 模組測試方法建立.....	95
4.2.2	PV/T 模組測試平台介紹.....	101
4.2.3	PV/T 模組性能實測分析.....	103
第五章	實驗結果與分析	107
5.1	PV/T 系統性能測試分析.....	107
5.1.1	PV/T 系統測試平台介紹.....	107
5.1.2	PV/T 系統性能實測分析.....	109
5.2	PV/T 系統性能模擬分析.....	112
第六章	結論與未來展望	113
6.1	結論.....	113
6.2	未來展望.....	115
參考文獻	116



表目錄

頁次

第一章

表 1-1、化石能源蘊藏量及使用年限-----	4
表 1-2、未來全球初級能源需求預測-----	4
表 1-3、PV/T 相關文獻整理表-----	9

第二章

表 2-1、太陽光電結構發展演進歷史-----	18
表 2-2、矽晶太陽電池與薄膜太陽電池技術發展預測-----	47
表 2-3、台灣地區可補助之太陽熱水器產品性能指標-----	59

第三章

表 3-1、TMY2 各種逐時氣象資料-----	76
表 3-2、TRNSYS 元件模組資料表-----	79

第四章

表 4-1、Kyocera 太陽光電模組規格特性-----	85
表 4-2、Kyocera 實際電性特性測試規格特性-----	86
表 4-3、保溫材料規格特性-----	88
表 4-4、Type-1 PV/T 規格銘牌-----	90
表 4-5、Type-2 PV/T 規格銘牌-----	92
表 4-6、Type-3 PV/T 規格銘牌-----	94

表 4-7、強制循環式液態型 PV/T 模組標準測試條件-----	100
表 4-8、測試系統儀器、設備精確度要求-----	101
表 4-9、12 種不同的 PV/T 模組熱性能-----	105
表 4-10 2010~2020 年馬來西亞 PV/T 研究 Roadmap -----	106

第五章

表 5-1、Type-1 PV/T 系統性能實測結果-----	109
表 5-2、TRNSYS 模擬 Type-1 PV/T 系統效率-----	112



圖目錄

頁次

第一章

圖 1-1、台灣各種能源供給量及成長率-----	2
圖 1-2、太陽能與其他能源比較-----	3
圖 1-3、太陽能光電及集熱整合系統-----	7
圖 1-4、研究步驟流程圖-----	16

第二章

圖 2-1、太陽電池結構-----	20
圖 2-2、太陽電池發電原理-----	20
圖 2-3、不同太陽電池材料所能吸收太陽光譜波長範圍圖-----	21
圖 2-4、P-N 接面太陽電池內部電荷分布圖-----	23
圖 2-5、各種太陽電池材料分類圖-----	24
圖 2-6、太陽光電模組總類-----	25
圖 2-7、各種太陽電池材料效率演進圖-----	26
圖 2-8、p-n 接面二極體電流-電壓(I-V)特性曲線圖-----	27
圖 2-9、太陽能電池的電流-電壓(I-V)特性曲線圖-----	28
圖 2-10、理想太陽能電池等效電路圖-----	29
圖 2-11、實際太陽能電池等效電路圖-----	30
圖 2-12、太陽能電池受溫度與日照強度影響之模擬性能特性曲線圖-----	32
圖 2-13、太陽光電系統主流應用-----	33
圖 2-14、PV 系統主要構成單線圖-----	33

圖 2-15、太陽光發電系統分類範例-----	34
圖 2-16、有逆送電併聯型 PV 系統-----	35
圖 2-17、無逆送電併聯型 PV 系統-----	35
圖 2-18 獨立型 PV 系統-----	36
圖 2-19 混合型 PV 系統-----	36
圖 2-20 防災型 PV 系統-----	37
圖 2-21、Photon International 預測全球 PV 裝置量-----	41
圖 2-22、Photon International 對 2011 年主要安裝國 PV 裝置量分析-----	42
圖 2-23、Photon International 對 2012 年主要安裝國 PV 裝置量預測-----	43
圖 2-24、德國太陽電池市場之配置情形-----	43
圖 2-25、2010~2050 年全世界太陽能市場預測-----	47
圖 2-26、1981 年加州 Solar One 系統-----	49
圖 2-27、自然循環太陽能熱水系統-----	50
圖 2-28、太陽能熱水系統集熱器種類-----	52
圖 2-29、自然循環式太陽能熱水器系統-----	54
圖 2-30、強制循環式太陽能熱水器系統-----	55
圖 2-31、儲置式太陽能熱水器系統-----	55
圖 2-32、自然循環式熱水器性能效率曲線圖-----	57
圖 2-33、強制循環式熱水器性能效率曲線圖-----	58
圖 2-34、台灣地區歷年安裝及熱面積統計圖-----	60
圖 2-35、歐盟太陽能級熱市場-----	61
圖 2-36、PV 發電效率之溫度係數特性-----	62
圖 2-37、典型 PV/T 模組組成結構圖-----	63

圖 2-38、不同太陽能應用-----	65
圖 2-39 PV/T 應用於各種產業歸納圖-----	66
圖 2-40 PV/T 與建築構造潛在設置地點-----	66
圖 2-41、各種氣體型 PV/T 模組型式-----	67
圖 2-42、各種液體型 PV/T 模組型式-----	68

第三章

圖 3-1、TRNSYS 軟體操作介面-----	75
圖 3-2 典型 TMY2 之標準氣象資料格式-----	78
圖 3-3、設計元件模組擺設圖-----	80
圖 3-4、Type-2 PV/T 系統雛型圖-----	81
圖 3-5、元件模組參數設定操作介面-----	81
圖 3-6、各元件模組之連接線設定介面-----	82
圖 3-7、輸入 TMY2 氣象資料介面-----	83
圖 3-8、設定暫態模擬起始與結束區間時程介面-----	83
圖 3-9、TRNSYS 模擬輸出介面-----	84

第四章

圖 4-1、Solidworks 3D 設計模擬介面-----	87
圖 4-2、AutoCAD 2D 設計模擬介面-----	87
圖 4-3、PV/T 模組封裝加工流程圖-----	89
圖 4-4 Type-1 PV/T 結構圖-----	90
圖 4-5 管板式結構圖-----	90

圖 4-6 Type-2 PV/T 結構圖	92
圖 4-7 Ω 型管板式結構圖	92
圖 4-8 強制循環式液態型 PV/T 模組集熱效率測試流程圖	100
圖 4-9 強制循環式液態型 PV/T 模組測試架構示意圖	101
圖 4-10 強制循環式液態型 PV/T 模組測試平台	103
圖 4-11 Type-1 PV/T 模組性能曲線圖	104
圖 4-12 Type-2 PV/T 模組性能曲線圖	104
圖 4-13 Type-3 PV/T 模組性能曲線圖	105

第五章

圖 5-1 Type-1 PV/T 系統架構圖	108
圖 5-2 Type-1 PV/T 系統現場測試平台	108
圖 5-3 2011/11/16 Type-1 PV/T 系統溫升變化	110
圖 5-4 2011/11/18 Type-1 PV/T 系統溫升變化	110
圖 5-5 2011/11/21 Type-1 PV/T 系統溫升變化	111
圖 5-6 2011/11/22 Type-1 PV/T 系統溫升變化	111
圖 5-7 2011/11/30 Type-1 PV/T 系統溫升變化	111
圖 5-8 Type-1 PV/T 模組與一般型 PV 模組熱影像分佈變化	112

第一章 緒論

1.1 研究背景

發展再生能源是全球政府因應地球暖化及能源浩劫刻不容緩之議題，也是實施節能減碳的重要施政目標，尤其以太陽能源系統(包含熱能、電能、複合型)設置，具有替代化石燃料的效果，也是世界先進國家努力推廣的再生能源重點項目。此外，台灣 99 年國內能源總供給量為 14,556 萬公秉油當量(詳如圖 1-1)，有高達 99.39%以上(能源局，2011)之能源皆需仰賴進口，顯然若再一次發生能源短缺危機，台灣勢必將再次遇到嚴重的衝擊，故台灣對於能源之自主供應以及替代能源之開發更是刻不容緩。由於台灣位於日照良好之地理位置，發展再生能源之太陽能源產業及應用已為勢在必行。我國政府自民國七十五年，即致力於投入太陽熱能的應用推展並實施設置補助辦法，並於八十九年起，即致力於投入太陽光電的應用推展並實施設置補助辦法，加上九十四年二月十六日「京都議定書」之生效以及近年之「哥本哈根會議」討論內容，皆對各國加諸龐大的溫室氣體減量之壓力。^[1]台灣在歷經近多年的再生能源推動努力，並參考世界各國之經驗，於 98 年全國能源會議共識結論(建構低碳家園)：1.推動低碳社區/低碳城市/低碳生活圈；2.再生能源示範生活圈(能源供應 50%以上來自再生能源)。展現政府發展再生能源決心，以順應世界潮流。立法院 98 年 6 月通過「再生能源發展條例」，明訂國內再生能源獎勵總量 650 至 1000 萬瓩，且於 98 年 7 月 8 日經總統府公告生效，是我國推動太陽光電設置的基本法源。

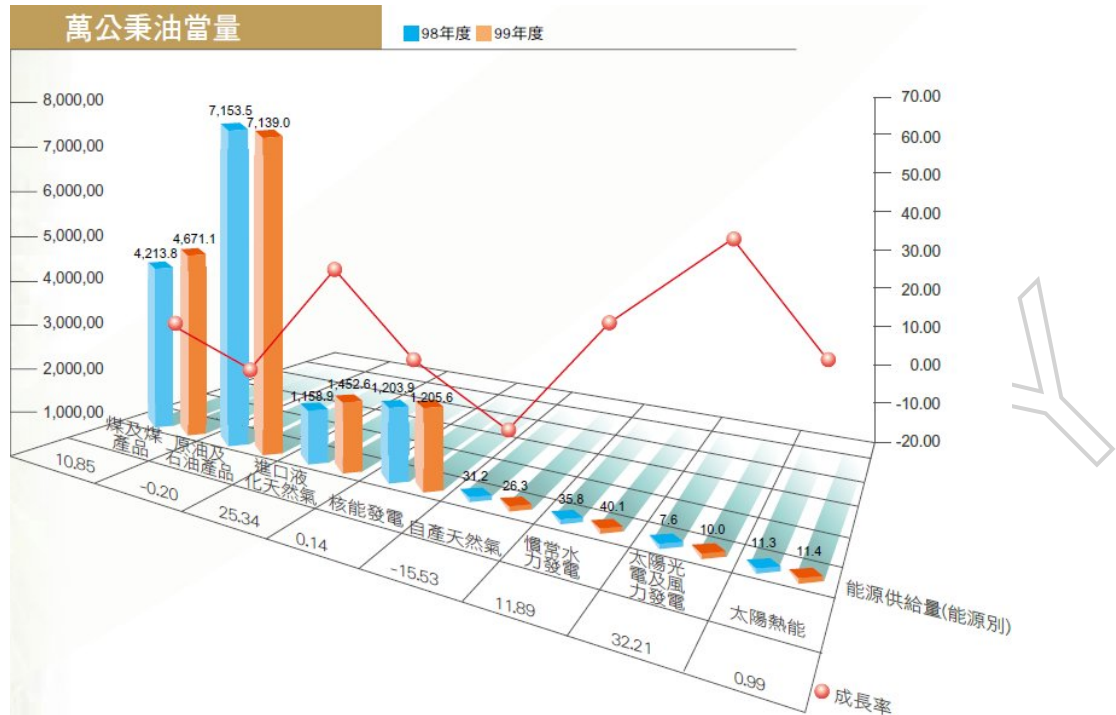


圖 1-1、台灣各種能源供給量及成長率^[2]

於 2011 年日本-福島發生重大核災事件各國政府紛紛開始檢討核能政策，大多數國家均已提出減少核能比例或廢核等國家政策，並以發展替代能源為目標，其中又以太陽能源、風能、水利、燃料電池最受重視。NREL 統計 2009 年整年全世界消耗能源約為 16 TWy/year，預估到 2050 全世界消耗能源約為 28 TWy/year，故尋找安全穩定的新能源將是全世界重要的課題之一。再諸多的新能源中，太陽能因其獨特的優勢，正受到越來越多的關注，其優勢如：

1. 能量無限性

太陽輻射每秒放射的能量大約是 $3.75 \times 10^{23} \text{ kW}$ ，其中到達地球陸地表面的輻射能量大約為 $1.7 \times 10^{13} \text{ kW}$ ，相當於目前全世界一年平均消耗總能源的 35,000 多倍，且太陽的壽命至少上有 40 億年，相對於人類歷史來說，太陽源源不絕供給地球能源的時間可以說是無限的。

2. 分布普遍性

相對於其他能源來說，太陽能對於地球上絕大部分地區存在普遍性，可就地取用，這對於常規能源缺乏的國家和地區解決能源問題並提供美好的前景。

3. 利用潔淨性

太陽能象風能、潮汐能等潔淨能源一樣，其開發利用幾乎對環境不造成任何污染。

4. 消費經濟性

太陽能的經濟性主要可分為兩方面：

- (1) 接收太陽能時不收任何的「稅」，可以隨地取用。
- (2) 以目前的科技技術發展，太陽能的利用不僅可能而且可行。

再由圖 1-2 可知太陽能若能完全充分利用一年約可提供 23,000 TWy/year，此能量遠遠大於人類需求與於其他能源一年可提供之能量，故綜合以上太陽能優勢，若能積極發展與投入應用太陽能相關技術研究將是解決未來能源危機與再創能人類巔峰革命的最佳途徑之一。

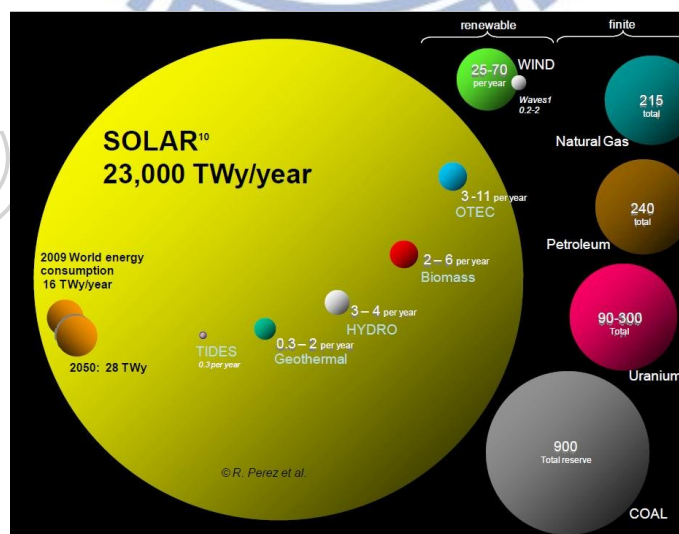


圖 1-2、太陽能與其他能源比較^[3]

1.2 研究動機與目的

自從 Thomas Seville 於 1698 年發明工業蒸汽機之後，人類文明從此邁向工業革命，大量工業設施的興建，使地球資源亦大量的被開發。並隨著 1859 年原油的開採，再次將人類的文明推向另一的巔峰。然而不過 200 年的時間全球化石能源蘊藏量已出現不足的危機，由表 1-1 可知世界初級能源蘊藏量有限，石油使用年限約 45 年後耗竭，為降低化石能源依賴，世界各國積極發展再生能源(如歐盟規劃 2010 年再生能源佔總發電量比中達 20%)，再由表 1-2 IEA 統計未來全球初級能源需求預測 2008~2030 年能源需求年均成長率約為 1.6%，由此可見人類對於能源的依賴已是密不可分。

表 1-1、化石能源蘊藏量及使用年限^[4]

能源別 項目	石 油	天 然 氣	煤 炭
總蘊藏量 (2010 年底)	13,832 億桶	187 兆立方公尺	8,609 億公噸
產量 (2009 年)	299.6 億桶	3.2 兆立方公尺	72.7 億公噸
可使用年數	46.2 年	58.6 年	118 年

表 1-2、未來全球初級能源需求預測^[5]

	2008	2015	2030	2008-2030
煤 炭	3315	4,023	4,908	1.0%
石 油	4,059	4,525	5,109	1.0%
天 然 氣	2,596	2,903	3,670	1.8%
核 能	712	817	901	0.9%
水 力	276	321	414	1.9%
生 質 能	1,225	1,375	1,662	1.4%
其他再生能源	89	158	350	7.2%
合 計	12,271	14,121	17,014	1.6%

台灣地處亞熱帶，日照充沛，具有足夠的淺力來發展太陽能。其中全球太陽能產業的發展與系統設置歷經五十年的發展，市場應用呈現多元而廣泛現象，而主要應用其一為太陽光電發電系統市場，在 2000 年後全球太陽光電發電容量急速增加，成為全球最主流快速成長的產業。另一項成熟的市場為太陽熱能系統，太陽熱能利用技術的研究自 1970 年代以來即受重視，特別是在美、日、歐、澳諸國，在許多應用領域已有相當成熟研究成果，其主要是接收或聚集太陽輻射能，並轉換為熱能使用。根據^[6]ESTIF(European Solar Thermal Industry Federation)的報告，太陽熱能經過 30 多年的發展，市場上已有各種不同類型的集熱器，適合各種氣候型態及使用條件，但在某些領域仍欠缺有力的商業化產品。在研究所遭遇的阻力主要在於，大部分太陽熱能業者屬中、小企業，故無足夠財力支持中長期的研究活動，且來自國家的研究經費通常很少，甚至沒有。再則太陽能熱水器面對冬季供應熱水往往不足，但在夏季因太陽輻射量大，因此太陽能熱水系統在夏季往往供應過多熱水，因此，本研究提出以太陽光電發電系統與太陽光熱系統整合在一起，簡稱太陽光電集熱複合型(Photovoltaic/Thermal, PV/T)系統，其原理為正面太陽電池吸收太陽光子並轉換成直流電能，同時利用背面集熱交換器中的流體帶走太陽電池的熱量並加以儲存利用，故本結構可在一定的集熱溫度下提高 PV/T 模組的發電量。在 2011 年是太陽光電有時以來最寒冷的一年，因隨著歐債危機與全球經濟不景氣原因，導致太陽光電整體需求大幅下滑，上游原料與中游太陽能電池崩跌及下游模組商、系統商倒閉，已將太陽光電整個產業鏈帶到谷底，故為使太陽光電產業再加值提升，因此本研究提出將太陽光電與集熱系統複合，使其具備產生電能、熱能等兩種能量效益，以提升太陽能的綜

合附加利用性，故本太陽熱電複合型系統為更具潛力之再生能源設備。

1.3 研究內容與範圍

太陽能在再生能源中扮演相當重要的角色，國內太陽光電系統仍以矽晶太陽光電系統為主，在太陽光電系統發電性能中，太陽光電模組(PV Module)所受到溫度影響對於 PV 發電效率仍佔有相當大的比例。由於太陽光電轉換效率不高，多數太陽光子會被太陽光電晶片所無效吸收並轉換成熱能，但一般結晶矽 PV 模組溫度每升高 1 卻會使 PV 模組整體效率約降 0.45%±1%，故如何有效降低或利用 PV 模組溫度將是一項重要的課題。

然而散熱設計一直是提升 PV 模組效率重要的一環，如改善 EVA 熱傳特性、背材熱傳特性、加裝散熱鰭片、強制通風等，^[7]在臺灣 PV 模組與熱水儲熱系統利用(Photovoltaic/Thermal)概念始於 2001 年台灣大學機械系教授 黃秉鈞教授在 Solar Energy 發表文章提到整合 PV 模組與熱水儲熱系統，其系統架構可參考圖 1-3 之系統示意圖。此系統設計採用 45L 儲水槽及 0.516m² 之 PV/T 多晶矽模組所組成之系統，以溫差控制的方式記錄全天之水溫變化、儲熱量及日照量，量測結果顯示儲熱效率為 12~44%，PV 發電效率為 9%。此篇論文針對太陽光電系統發電效率研究僅呈現單一效率定值，但 PV 模組發電效率卻是隨著日照升高而增加，可見此文 PV 模組發電效率未被反應在此研究結果中，但在研究中可以發現 PV 模組與集熱之整合系統對於熱能的再應用有相當的幫助。

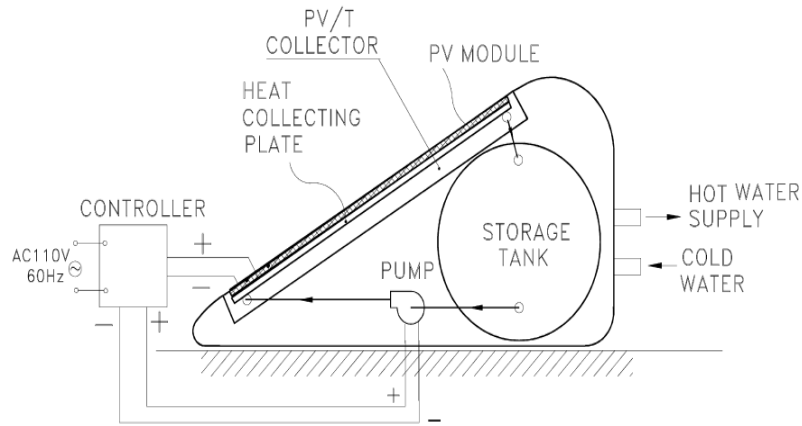


圖1-3、太陽能光電及集熱整合系統^[7]

本研究內容與範圍將針對以下四大主題拓展延伸並深入研究：

1. 設計開發 3 款新型太陽光電集熱複合型模組

本研究檢索並閱讀國內外相關文獻，並自行提出三款不同新型高性能太陽光電集熱複合型模組設計方式，並成功將 PV 模組(單晶矽、多晶矽)與集熱板(平板型式、超音波型式、 Ω 型式)製作組合成 PV/T 產品。

2. 提出太陽光電集熱複合型模組標準化性能測試方法

在國內熱水器已有一套標準化性能測試方法，但尚無太陽光電集熱複合型系統標準化性能測試方法(國外也沒有 PV/T 標準性能測試方法)，故本研究將研擬提出一套太陽光電集熱複合型系統標準化性能測試方法，並實際建置測試平台與測試並提出相關數據結果。

3. 建立 TRNSYS 模型並與實測性能比較，以探討 TRNSYS 模型準確性

本研究利用 TRNSYS 建立太陽光電集熱複合型系統動態模擬模型並與實驗量測數據進行驗證比對分析，以探討 TRNSYS 模擬模型之性能精確度。

4. 研究探討太陽光電集熱複合型系統性能

利用已開發之三款太陽光電集熱複合型模組，並挑出性能最佳之 Type-1 PV/T 模組設計並搭建 PV/T 熱水系統性能測試實驗平台，並提出採用太陽光電集熱複合型系統綜合效率做為 PV/T 整體系統性能指標。另對多晶矽液態型 PV/T 系統在強制循環模式下其發電效率與儲熱性能實驗測試，且一並與一般型多晶矽系統比較在相同條件與氣象環境下，其發電效率測試。

再則探討了 PV/T 初始水溫對系統性能之影響，並深入分析了系統發電效率和在系統電壓開路、電流短路時儲熱性能變化情況。

1.4 文獻回顧

早在 1978 年 Kern 和 Russel 已提出太陽光電集熱複合型系統的研究，而再 1980 年代初期麻省理工學院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) S.D. Hendrie 即對 PV/T 展開了各項結構方面設計研究工作，另於 1981 年 P. Raghuraman 在 PV/T 系統參數模擬模型方面進行深入的探討，後續 80 年代與 90 年代 J.J. Loferski(1988 年)、 K. Sopianet(1996 年)、 H.P. Garg(1997 年)、 Tonui(2006 年)等人分別對於太陽光電集熱複合氣冷式系統進行相關研究與應用開發，而在最早在太陽光電集熱複合水冷式系統之相關研究與應用開發為 90 年代的 Bhargava(1991 年)、 J. Prakash(1994 年)等人，爾後 90 年代末期開始 R. Platz(1997 年)、 P. Affolter(2000 年)等人更著重於實證研究，並發表多篇實驗結果論文，2000 年之後 Y. Tripanagnosto、 H.A. Zondag 等人開始以新型模擬模型與實測試驗方式比對分析，並加入 PV/T 系統生命週期成本運算分析，在近十年來相關 PV/T 研究領域更是蓬

勃發展，下表 1-3 整理 PV/T 相關文獻回顧之主要內容：

表 1-3、PV/T 相關文獻整理表

項次	出版日 (西元)	作者	題目	出版單位
1	2000	A. A. Hegzy	Comparative study of the performance of four photovoltaic/thermal solar air collectors	Energy Conversion and Management
2	2001	B.J. Huang	Performance evaluation of solar photovoltaic/Thermal systems	Solar Energy

Table 1. Test results of IPVTS ($V_f/A_c = 82 \text{ l/m}^2$)									
Date	Daily total solar radiation H_t ($\text{MJ/m}^2 \text{ day}$)	Water temperature in tank ($^{\circ}\text{C}$)		T_a ($^{\circ}\text{C}$)	Efficiency				
		Initial T_i	Max		η_h	η_e	η_o	E_f	
1999									
05/02	6.9	25.4	33.3	25.4	0.385	0.09	0.475	0.622	
05/03	7.3	28.1	37.3	28.8	0.411	0.09	0.501	0.648	
05/08	15.7	28.2	45.8	29.8	0.372	0.09	0.462	0.609	
05/11	15.9	25.7	43.1	27.3	0.363	0.09	0.453	0.600	
05/13	12.2	34.5	44.3	30.0	0.271	0.09	0.361	0.508	
05/17	10.0	32.9	42.8	32.1	0.337	0.09	0.427	0.574	
05/18	15.3	35.7	49.0	34.0	0.291	0.09	0.381	0.528	
05/21	15.2	28.0	47.7	31.5	0.445	0.09	0.535	0.613	
05/23	9.6	35.0	46.2	32.1	0.376	0.09	0.466	0.613	
05/24	9.7	40.0	43.9	31.7	0.122	0.09	0.212	0.359	
05/25	6.6	35.3	40.6	29.6	0.232	0.09	0.322	0.469	

3	2001	Soteris A. Kalogirou	Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus	Renewable Energy
	<p>(1).本研究對於混合式 PV/T 系統如何獲得最大儲熱量做探討，並提出 PV/T 系統最佳水流量設計值為 25 l/h。</p> <p>(2).另作者探討年平均發電效率，其中一般標準 PV 系統年平均發電效率為 2.8%，但混合型 PV/T 系統設計在最佳水流量時，其年平均發電效率可達 7.7%。若考慮混合型 PV/T 系統總效率(發電+儲熱)可達 31.7%。</p>			
4	2001	M.J.M. Jong	System studies on combined PV thermal panels	
	<p>本研究探討倫敦附近一間學校宿舍利用 PV/T 系統對空調做預熱，經由模擬 PV/T 集熱器面積為 183m²，熱交換水桶容量為 150m³，空調輸出總流量為 3600m³/h，室內溫度則可維持 16 ~21，其中本 PV/T 系統發電效率可達 6.9%，熱效率為 27%。</p>			
5	2001	S. Tselepis	Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules	Proceedings of the International Conference PV in Europe 7-11 October
	<p>本研究對於 PV/T 系統、一般型 PV 系統、太陽熱水系統進行投資回收年限分析，結果顯示一般型多晶矽 PV 系統比一般型非晶矽 PV 系統投資回收年限短，但投資回收年限均大於 20 年。在 PV/T 系統卻是非晶矽 PV/T 系統比多晶矽 PV/T 系統投資回收年限短，其原因為非晶矽 PV/T 系統輸出熱量大於多晶矽 PV/T 系統，但兩者回收年限均小於 10 年。另太陽熱水系統為此三種系統中投資回收年限最低，約僅不到 3 年。</p>			
6	2002	Y. Tripanagnostopoulos	Hybrid photovoltaic/thermal solar system	Solar Energy

作者對水冷式與氣冷式 PV/T 系統進行比對分析研究，於實驗結果顯示水冷式 PV/T 系統總效率高於氣冷式 PV/T 系統總效率，其中水冷式 PV/T 系統發電效率可達 13%，儲熱效率 60%。另該研究將漫反射鏡與 PV/T 系統結合，其發電效率可增加 3.2%，儲熱效率可提高約 12%。

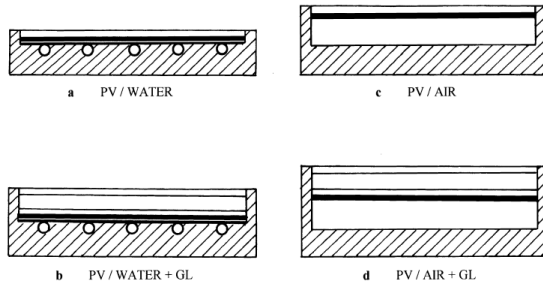


Table 1. Steady state thermal efficiency η_{th} results of all tested hybrid PV/T systems

PV/T System	Thermal efficiency
pc-PV/WATER	$\eta_{th} = 0.55 - 11.99 (\Delta T/G)$
a-PV/WATER	$\eta_{th} = 0.60 - 12.02 (\Delta T/G)$
pc-PV/AIR	$\eta_{th} = 0.38 - 9.33 (\Delta T/G)$
a-PV/AIR	$\eta_{th} = 0.46 - 10.69 (\Delta T/G)$
PV/WATER	$\eta_{th} = 0.55 - 11.99 (\Delta T/G)$
PV/WATER + GL	$\eta_{th} = 0.71 - 9.04 (\Delta T/G)$
PV/WATER + REF	$\eta_{th} = 0.66 - 11.89 (\Delta T/G)$
PV/WATER + GL + REF	$\eta_{th} = 0.80 - 9.03 (\Delta T/G)$
PV/AIR	$\eta_{th} = 0.38 - 9.33 (\Delta T/G)$
PV/AIR + GL	$\eta_{th} = 0.59 - 7.88 (\Delta T/G)$
PV/AIR + REF	$\eta_{th} = 0.60 - 12.68 (\Delta T/G)$
PV/AIR + GL + REF	$\eta_{th} = 0.75 - 8.89 (\Delta T/G)$

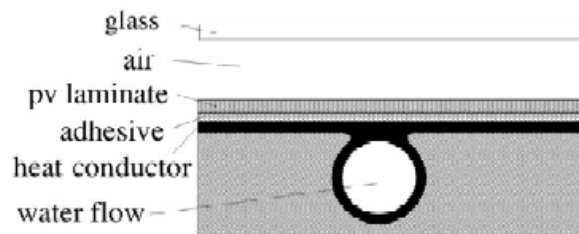
Table 2. Test results of the compared systems PV/WATER, PV/AIR, PV/FREE and PV/INSUL, regarding PV module temperature T_{pv} and electrical efficiency η_{el} under different weather conditions

T_a (°C)	G ($W m^{-2}$)	PV/WATER		PV/AIR		PV/FREE		PV/INSUL	
		T_{pv} (°C)	η_{el}	T_{pv} (°C)	η_{el}	T_{pv} (°C)	η_{el}	T_{pv} (°C)	η_{el}
15.0	850	32.0	0.134	31.9	0.134	33.9	0.132	50.2	0.118
29.0	910	38.1	0.128	41.2	0.126	42.7	0.124	55.2	0.113
35.0	898	47.2	0.123	48.4	0.121	54.1	0.114	68.7	0.098

2003	H.A. Zondag	The yield of different combined PV-thermal collector designs	Solar Energy
------	-------------	--	--------------

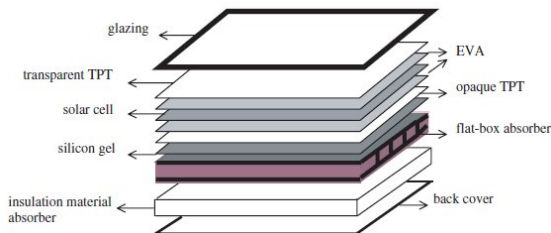
(1). 作者提出管板式 PV/T 在正面增加玻璃保溫上蓋板層數可增加系統的保溫與熱效率，但相對的發電效率也會因而減少。由實驗數據得知，PV/T 太陽電池背面管板式水冷式系統中，當 PV/T 入口溫度與環境溫度相同時，且太陽日照強度 $800W/m^2$ 、流量 $76kg/m^2h$ 、風速 $1m/s$ 、設置傾斜角度 45° ，兩層保溫上蓋板比無保溫上蓋板集熱效率高 10%，但發電效率將降低 23%。

類型	儲熱效率(%)	發電效率(%)	年平均儲熱效率(%)	年平均發電效率(%)
管板式無保溫上蓋板	52	9.7	24	7.6
管板式1層保溫上蓋板	58	8.9	35	6.6
管板式2層保溫上蓋板	58	8.1	38	5.8
一般太陽光電模組	-	9.7	-	7.2
一般太陽集熱器	83	-	51	-



8	2006	T.T. Chow	Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application	Solar Energy
---	------	-----------	---	--------------

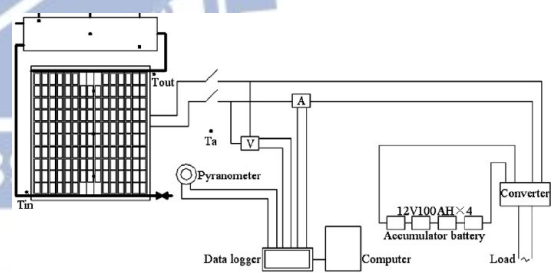
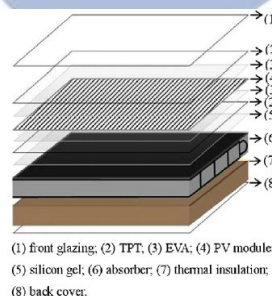
2006年香港城市大學教授 T.T Chow 於 Solar Energy 發表採用自然對流設計之複合型太陽光電熱水系統每日平均儲熱效率約為 37.6~48.6%，PV 發電效率為 10.3~12.3%。平均 PV 發電效率約低於標準測試條件下(STC)之 PV 發電效率 15~29%。



9

2007	J.J. Lu	A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation	Applied Energy
------	---------	--	----------------

(1).此研究製作 Thermo-siphon flat plate glazed 之 PV/T 系統，其中 PV/T 模組面積 17.6m²、PV Cell Covering factor : 0.63、Front Glazing Transmissivity : 0.83。作者對此其 PV/T 系統做測試，當流量為 157kg 時，發電效率最高可達 10.15%，儲熱效率最高為 48.73%，PV/T 系統綜合效率可達 58.88%。



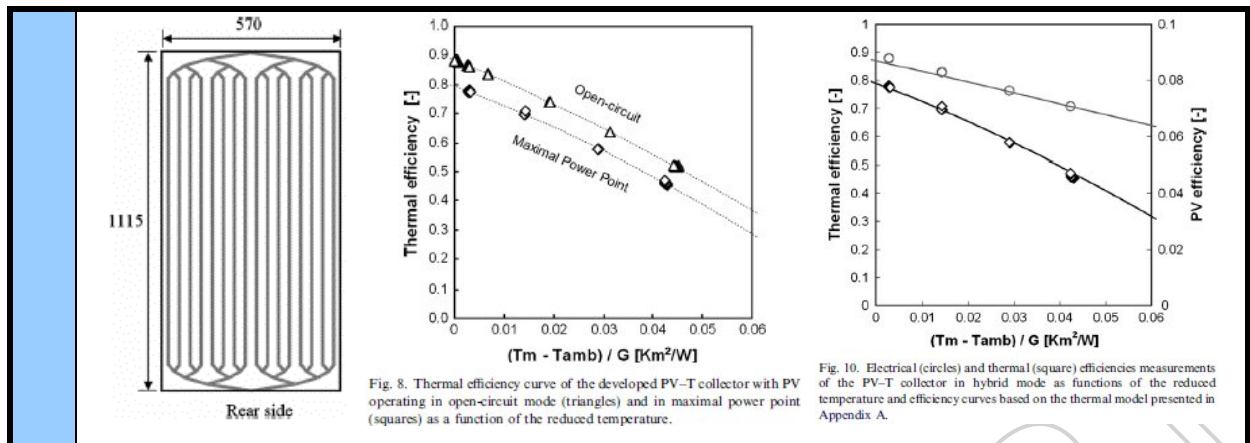
Characteristic efficiencies of the PV/T system for different water masses

m (kg)	95	145 ± 2	151 ± 2	157 ± 2
m/A_c (kg/m ²)	53.98	82.39	85.80	89.20
η_c (%)	9.44	10.18	10.08	10.15
η_p^* (%)	31.21	45.46	46.71	48.73
η_o^* (%)	36.94	51.88	53.01	55.02
E_p^* (%)	46.29	62.36	63.30	65.28

(2).另外作者也探討初始入口水溫與平均環境溫度對熱效率之影響，由下圖可明顯得到初始入口水溫若小於平均環境溫度則熱效率將會比較高。

10	2007	G. Fraisse	Energy Performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of direct solar floor type	Solar Energy
	<p>本研究探討 PV/T 系統全年發電效率與一般同型 PV 模組系統全年發電效率，其實驗結果 PV/T 系統全年發電效率(6.8%)低於一般同型 PV 模組系統全年發電效率(9.4%)。</p>			
11	2011	黃朝揚	太陽光電發電及集熱雙效系統實驗量測與模擬	中國機械工程學會第二十八屆
	<p>本篇 PV/T 採用 Sanyo HIT 單晶矽高性能 PV 模組(PV 模組效率為 16.2%，面積 0.812×1.443 (m))，並利用超音波焊接技術銜接銅管及銅板之集熱結構，再將集熱結構以高導熱黏合膠封裝於太陽光電板之背材上。此系統設計採用 120L 儲水槽 1.17m² 之 PV/T 模組所組成之系統(PV/T 模組設置方位為面南向，傾斜角為 10 度)，利用溫差控制方式控制直流泵浦，溫差大於 4 時為啟動模式；當溫差低於 2 時為停止模式，並記錄全天之水溫變化、儲熱量及日照量，量測結果顯示 PVT 系統之總效率為 38.3%，若換算成能源儲存效率可達 62%。另以同一天實驗 PV/T 模組累積發電量 0.935kWh 與一般 Sanyo HIT 單晶矽 PV 模組累積發電量 0.916kWh 比較，PV/T 模組發電量約較一般 PV 模組高出 2%。</p>			
12	2011	郭中豐	太陽電熱複合系統運轉效能分析	中國機械工程學會第二十八屆

	<p>此研究利用 TRNSYS 模擬台灣各地區 PV/T 的運轉效能，台灣年輻射量最高的地區在台東，最低的地區在台北，並且台東是台北的 1.5 倍左右，因此東南部比北部在氣候上更有優勢發展太陽能。對於 PV/T 儲水槽上所儲存的熱量，儲熱量也是隨著年輻射量增加而升高，東部的儲熱量是北部的 1.7 倍左右，台灣各地區儲熱效率隨不同地區變化範圍較大，因此儲熱效率是影響總效率的主要因素。在台北、台中、高雄這 3 區，北中南的發電量和儲熱量皆與日照量有很高的線性關係，以節能效率來看，北部 PV/T 的運轉效能受到季節的影響較大，而中部影響最小。為了改善 PV/T 的運轉效能，同時調整水的質量和管道數目到最佳值時，可以大幅地提升 PV/T 的總運轉效率。</p>		
13	2011	Z. Olymaip	<p>Experimental validation of an improved concept of building integrated photovoltaic panels</p> <p>Renewable Energy</p>
<p>(1).文中實驗結果，垂直立面氣冷式 PV/T 模組(Gap150mm)，其電效率未超過 9%。 (2).此實驗使用兩種不一樣容量的風扇，不管使用大容量或小容量風扇，其 PV/T 模組背溫並未有明顯下降。 (3).大容量風扇其流量較大，但輸出空氣的溫度略低於小容量風扇，大容量風扇其 PV/T 模組背溫下降幅度略大於小容量風扇，而效率提昇部份還有待研究。 (4)自然通風雖然流量低，但輸出空氣溫度高於使用風扇時的溫度，且效率部份略優於小容量風扇。</p>			
14	2011	Patrick Dupeyrat	<p>Efficient single glazed flat plate photovoltaic-thermal hybrid collector for domestic hot water system</p> <p>Solar Energy</p>
<p>(1).Single glazed flat plate photovoltaic-thermal hybrid module (2).A : 0.57×1.1 (m) (3).Single crystalline PV module (4).Packing factor : 0.67 (5).Testing method : EN12975 (module test) (6).The modular thermal efficiency at zero reduced temperature is 0.88 in open circuit mode. (7).The modular thermal efficiency at zero reduced temperature is 0.79 in MPPT mode.</p>			



1.5 研究方法與流程

本論文研究方法將依據圖 1-4 規劃流程執行，首先進行相關資料檢索與文獻回顧，並歸納相關技術能量與研究方法後，擬定本研究之範圍與內容及目的，在來將針對本研究設定之目標提出三種新型 PV/T 模組設計方法，並利用 TRNSYS 軟體(參數因子包含：管排數量、管徑尺寸、管排型式、隔熱材料、封裝材料、水量、水溫...等)模擬輔助設計新型 PV/T 模組，後續綜合設計結果資料實際製作新型 PV/T 模組 完成新型 PV/T 模組開發製作後，將參考 IEC61215 與 ISO9806 標準測試方法提出並制定 PV/T 模組發電與儲熱之性能測試標準，並且架測標準性能測試平台做實際測試。其中，將選擇其中一款綜合效率最高之新型 PV/T 模組，依系統設計條件實際架設 PV/T 系統，並對其系統發電效率與儲熱性能做探討，再來利用 TRNSYS 建立 PV/T 系統模型，請經由模擬數據與實測數據比對分析研究，最終將提出結論與成果。



圖1-4、研究步驟流程圖

1.6 論文架構

本論文研究太陽光電集熱複合型系統之各章節主要架構內容說明如下：

1. 第一章 緒論

本章節將以研究背景、研究動機與目的、研究內容與範圍、文獻回顧、研究方法與流程、論文架構等依序撰寫。

2. 第二章 理論與原理

本章節就太陽光電系統、太陽光熱系統、太陽光電集熱複合型系統等三大主題分別介紹探討，其中每個主題將針對其原理、類型、性能特性、產業與趨勢等一一闡述。

3. 第三章 系統模擬分析

本章節將介紹所使用之 TRNSYS 軟體，並介紹 TMY2 氣象資料之架構與如何使用，後續也會利用 TRNSYS 軟體實際建立 PV/T 系統模型。

4. 第四章 實驗設計與封裝

本章節從一開始探討本實驗所開發之三款新型 PV/T 模組之設計概念與加工製作流程，也針對 PV/T 模組性能測試之方法、平台架構作介紹，並實際量測 PV/T 模組性能效率。

5. 第五章 實驗結果與分析

本章節主要針對 PV/T 系統性能做模擬分析與實際量測，並比較探討兩者數據之差異，後續也介紹 PV/T 系統量測平台。

6. 第六章 結論與未來展望

本章節對本文作綜合結論，並提出未來展望。

第二章 理論與原理

2.1 太陽光電系統

太陽電池的發展，最早是 1954 年由貝爾實驗室製造，主要目的是提供偏遠地區通訊的電力，不過效率低(6%)，成本高。在 1958 年美國發射的人造衛星更以太陽能電池(GaAs)做為能量的來源。1970 年中東戰爭，第一次石油危機出現，世界各國警覺到石化能源的獨佔性及有限性，因此積極開發太陽能源應用科技，以其利用太陽能源應用之技術減低對石化能源的依賴性。另美國於 1983 年在加州建立世界上最大的太陽能電廠，它的發電量可以高達 16 百萬瓦特。1990 年開始人們開始將太陽能與民生用電結合，且將太陽能與建築物設計整合在一起，直到 2000 年開始太陽能產業開始蓬勃發展，表 2-1 為 IEK 整理從 1970 年~至今之太陽光電發展演進歷史。

表2-1、太陽光電結構發展演進歷史^[8]

	1970~1990	1990~2003	2003~2008	2008~現在
主導國家	美國	日本	歐洲	亞洲
發展原因	太空競賽	能源多元化	綠色概念盛行	產業化，賺錢
趨動力	科技發展	補助金	刺激政策	成本下降
技術競爭		單晶VS多晶	矽晶VS矽薄膜	矽晶VS化合物薄膜

2.1.1 太陽能電池原理

太陽能電池是一種能量轉換的光電元件，它是經由太陽光照射後，把光的能量轉換成電能，這個現象稱之為光伏效應(photovoltaic effect)，此種光電元件稱為太陽能電池(Solar Cell)。光伏效應在 19 世紀即被發現，早期用來製造硒光電池，直到電晶體發明後半導體特性及相關技術才逐漸成

熟，使太陽光電池的製造變為可能。其基本構造是運用 P 型與 N 型半導體接合而成的(如圖 2-1)。從物理學的角度來看，有人稱之為光伏電池 (Photovoltaic，簡稱 PV)，其中的 photo 就是光(light)，而 voltaic 就是電力 (electricity)。簡單來說，太陽光電的發電原理是以 P 型與 N 型半導體材料結合構成正負極介面(如圖 2-2-a)，再將太陽光照射在太陽電池上，使太陽電池吸收太陽光能透過 p-型半導體及 n-型半導體材料將矽原子中的電子激發出來，而產生電子和電洞的對流(如圖 2-2-b)，這些電子和電洞均會受到內建電場的影響，分別被 N 型(負極)及 P 型(正極)半導體吸引，而分別移動聚集在正負兩端(如圖 2-2-c)。此時外部如果用電極連接起來，即形成一個迴路，再經由導線傳輸至負載(如圖 2-2-d)。另太陽電池是利用吸收 $0.4\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$ 波長的太陽光(如圖 2-3)，並將光子直接轉變成電能輸出的一種發電方式，其中每個光子所攜帶的能量為 E_{ph} ；

$$E_{ph}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

式中：

h ：普朗克常數(Planck Constant)； 4.14×10^{-15} (eV·S)

c ：光速； 3×10^8 (m/s)

λ ：光子波長；(nm)

但不同製程材料之太陽能電池所吸收之光波段也有所不同，且並非所有光子都能順利轉換成電能，在符合能量不滅定律下，大多數照射在太陽能電池的光能會以熱能型式逸散掉而無法產生電能。隨著 PV 模組背溫的上升，伴隨而來的是：(1)太陽能電池的逆向飽和電流增加，使開路電壓下降 (2)

太陽能電池吸收的能帶降低，電池的短路電流增加 (3) 太陽能電池的效率下降。平均 PV 模組每上升 1 則 PV 模組整體效率約降 0.45%，故如果能夠降低停滯在 PV 模組內的熱能，PV 模組整體的效率將可以在往上提昇，並且可以延長使用壽命。由於太陽電池產生的電是直流電，因此若需提供電力給家電用品或各式電器則需加裝直/交流轉換器，將直流電轉換成交流電，才能供電至家庭用電或工業用電。

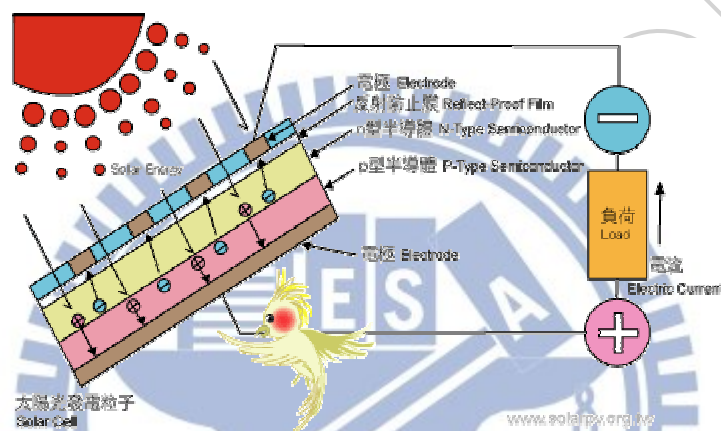


圖2-1、太陽電池結構^[9]

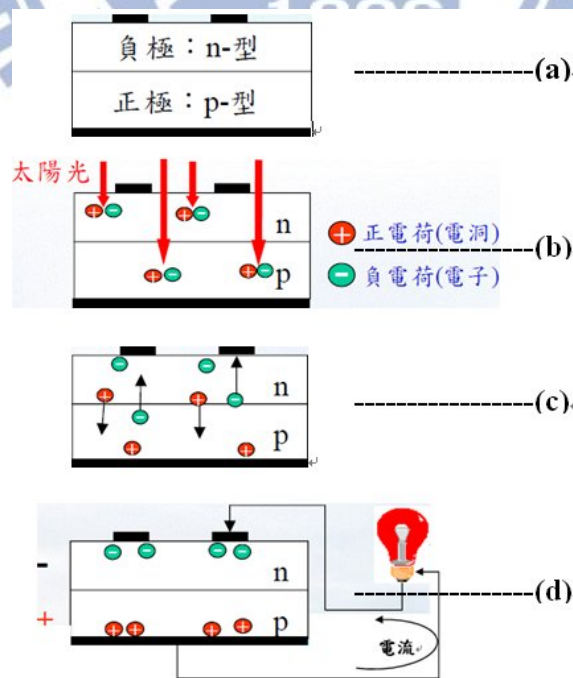


圖2-2、太陽電池發電原理

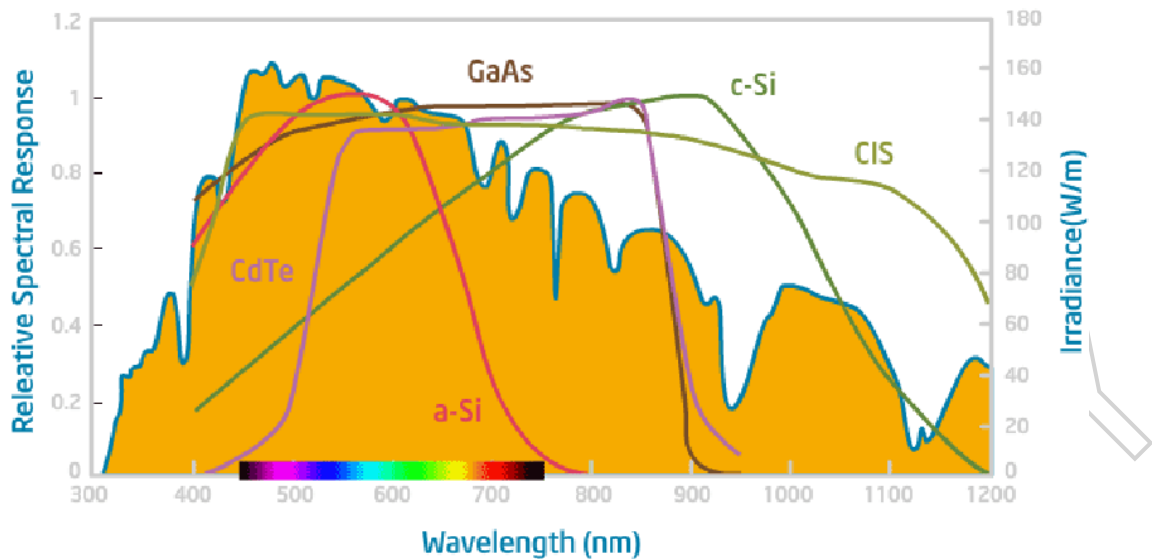


圖2-3、不同太陽電池材料所能吸收太陽光譜波長範圍圖

^{[10][11]} 太陽能電池之所以能將光能轉換成電能主要有兩個因素：一是光導效應(photo conductive effect)，二是內部電場，因此在選取太陽能電池的材料時，必須要考慮到材料的光導效應及如何產生內部電場。太陽光照射在物質上時，部份的光會被物質吸收，部份的光則經由反射或穿透等方式離開物質，選取太陽光電池材料的第一考量就是吸光效果要很好，如此才能使輸出功率增加。選取太陽光電池材料的第二考量是光導效果，欲選取光導效果佳的材料首先必須瞭解太陽光的成分及其能量分佈狀況，進而找出適當的物質作為太陽光電池的材料。

當電子從外界獲得能量時將會跳到較高的能階，獲得的能量越多跳的能階也越高，電子處在較高的能階時並不穩定，很快就會把獲得的能量釋放回到原來的能階。如果電子獲得的能量夠高就擺脫原子核的束縛成為自由電子，電子空出來的位置則稱為電洞。自由電子可能會因為摩擦或碰撞等因素損失能量，最後受到電洞的吸引而復合。例如，矽的最外層電子要成為自由電子需要吸收1.1eV的能量，當矽最外層子吸收到的光能量超過

1.1eV時將會產生自由電子及電洞，稱之為光生電子電洞對(light-generated electron-hole pairs)。電子電洞對的數目越多導電的效果也越好，因為光使得導電效果變好的現象稱之為光導效應(photo conductive effect)。

自由電子與電洞的多寡對電氣特性有很大的影響，越多的自由電子與電洞可以使導電性增加，同時也可以使輸出電流增加，因此可以推測陽光越強時生成的自由電子與電洞越多，則輸出電流也越大。然而如果只是單純的產生自由電子與電洞，將會因為摩擦及碰撞等因素失去能量，最後自由電子會與電洞復合而無法利用。為更有效的利用自由電子與電洞來產生電流，因此必須加入電場使自由電子與電洞分離進而產生電流。產生電場的方式很多如PN接面、金屬半導體接面等，其中最常用的方式為PN接面。

提高自由電子濃度常用的方法是在矽中加入少量的五價原子，五價原子的四個價電子與矽鍵結後剩下一個價電子，使剩下的價電子游離只需要0.05eV，比原來的1.1eV小很多，在室溫超過300K時即可使所有雜質產生自由電子，同樣在矽中加入少量的三價原子可以提高電洞濃度。所以在矽中加入五價原子後稱之為N型半導體，加入三價原子後稱之為P型半導體。N型半導體及P型半導體雖然帶有自由電子或電洞但本身仍然保持電中性，如果N型半導體及P型半導體內雜質濃度均勻分佈則內部沒有電場存在。

如圖2-4所示，若將N型半導體及P型半導體接和在一起，會因為兩邊自由電子與電洞的濃度不同產生擴散。N型半導體中自由電子濃度較高，因此自由電子由N型半體向P型半導體擴散，同樣的電洞會由P型半導體向N型半導體擴散。擴散的結果使得接面附近的N型半導體失去電子得到電洞而帶正電，P型半導體失去洞得到電子而帶負電。因為電荷密度不均因此在接面附近產生電場，如果有自由電子或電洞在電場內產生，則會因為受到電場的

作用而移動，自由電子向N型半導體移動，而電洞向P型半導體移動，因此這個區域缺乏自由電子或電洞而稱之為空乏區。當光照射在空乏區內將矽原子的電子激發產生光生電子與電洞對，電子與電洞對會因為電場作用而使電池內的電荷往兩端集中，此時只要外加電路將兩端連接即可利用電池內的電力，這即是所謂的光電效應，也是太陽光電池的轉換原理。

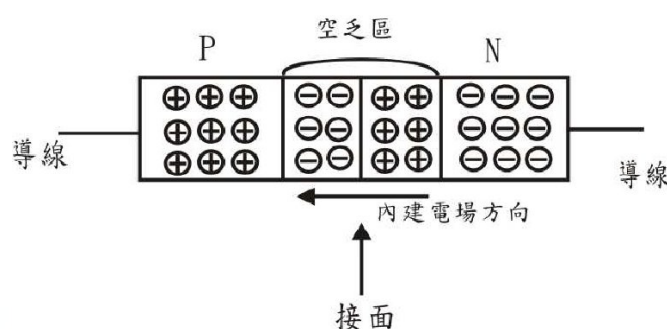


圖2-4、P-N接面太陽電池內部電荷分布圖^[11]

2.1.2 太陽能電池種類

太陽電池的材料種類非常的多，大致分為晶矽型、化合物型、有機材料型太陽能電池等三種(如圖 2-5 所示)，其中晶矽型太陽能電池又可分為單晶矽 (Monocrystalline silicon)、多晶矽 (Polycrystalline silicon)、非晶矽 (Amorphous silicon)、微晶矽(Microcrystalline silicon)等。而在化合物型方面則包含 III-V 族材料的砷化鎵(GaAs)、II-VI 族的碲化鎘(CsTe)、I-III-VI 族的銅銦鎳硒(CIGS)...等。最後一總類型為有機材料(Organic material)太陽能電池，其主要是以染料敏化太陽電池(Dye-sensitized solar cell,DSSC)以及聚合物(Polymers)為主。另太陽電池不同世代的演進分別為：

1. 第一代太陽能電池發展最長久技術也最成熟。可分為，單晶矽 (Monocrystalline Silicon)、多晶矽 (Polycrystalline Silicon)、非晶矽

(Amorphous Silicon)。以應用來說是以前兩者單晶矽與多晶矽為大宗。

2. 第二代薄膜太陽能電池以薄膜製程來製造電池。種類可分為多晶矽 (Polycrystalline Silicon)、非晶矽 (Amorphous Silicon)、碲化鎘 (Cadmium Telluride CdTe)、銅銦硒化物 (Copper Indium Selenide CIS)、銅銦鎵硒化物 (Copper Indium Gallium Selenide CIGS)、砷化鎵 (Gallium arsenide GaAs)。
3. 第三代電池與前代電池最大的不同是製程中導入有機物和奈米科技。種類有光化學太陽能電池、染料光敏化太陽能電池、高分子太陽能電池、奈米結晶太陽能電池。
4. 第四代則是針對電池吸收光的薄膜做出多層結構。

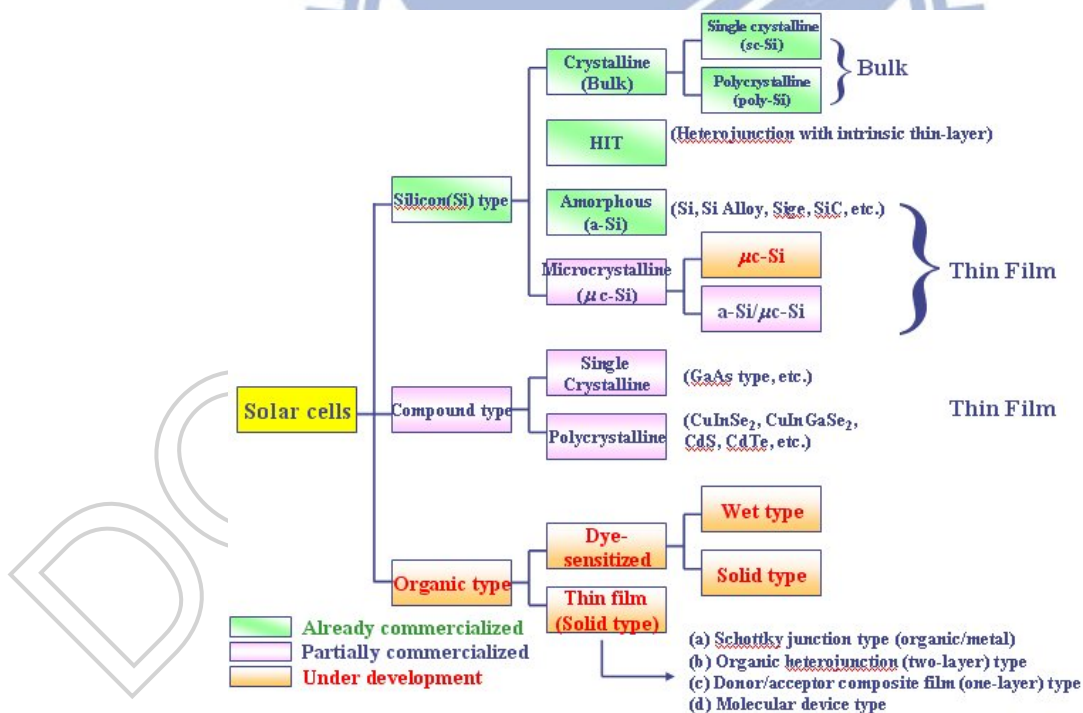


圖2-5、各種太陽電池材料分類圖

另外 PV 模組也一太陽電池總類而有所差異，其分類如圖 2-6 所示，分

別為結晶矽結構、薄膜型製程、有機材料製程、高聚光型結構等。

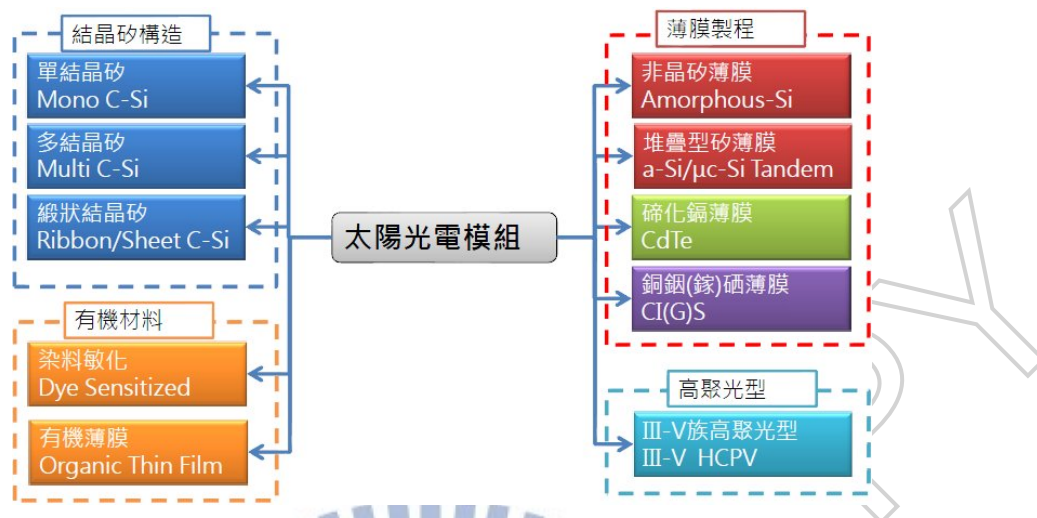


圖2-6、太陽光電模組總類^[8]

圖 2-7 為 NREL 所統計的各種太陽電池材料效率演進圖，屬三五族的多接面太陽電池效率最高，目前實驗室所展示的最高電池效率已可達 43% 以上，但此類型電池昂貴，多用在太空衛星的用途，另需同步開發聚光與冷卻技術。目前實驗室所展示的矽晶電池技術，最高電池效率可推昇至 ~24%，但低成本的量產技術還在研發當中。CIGS 薄膜電池技術，最高電池效率可推昇至 ~18%，但量產設備與製造技術還未定論，投資成本高、材料昂貴、污染控制..等問題是量產的重要課題。CdTe 薄膜電池技術，最高電池效率可推昇至 ~16%，但鎘(Cd)具有環保問題，歐盟列為管制品，量產所遇到的問題與 CIGS 薄膜電池相似。矽薄膜太陽電池，a-Si 已是接近成熟的技術，也有 20 多年的量產經驗，單純 a-Si 薄膜太陽電池最高效率可提昇至 ~9%，而 a-Si/uc-Si 的堆疊式電池最高效率可提昇至 ~14%，已有日商 MHI、Sharp、Kaneka 宣稱要在近期內量產，但穩定可用的製造設備是最大的挑戰，整體製程用到 CVD&PVD 真空設備，投資成本是矽晶圓的數以倍

計。染料敏化電池最高效率可提昇至~10%，高分子電池最高效率可提昇至~4%，需克服的問題繁雜，研發時程長，屬於下一世代的電池技術。

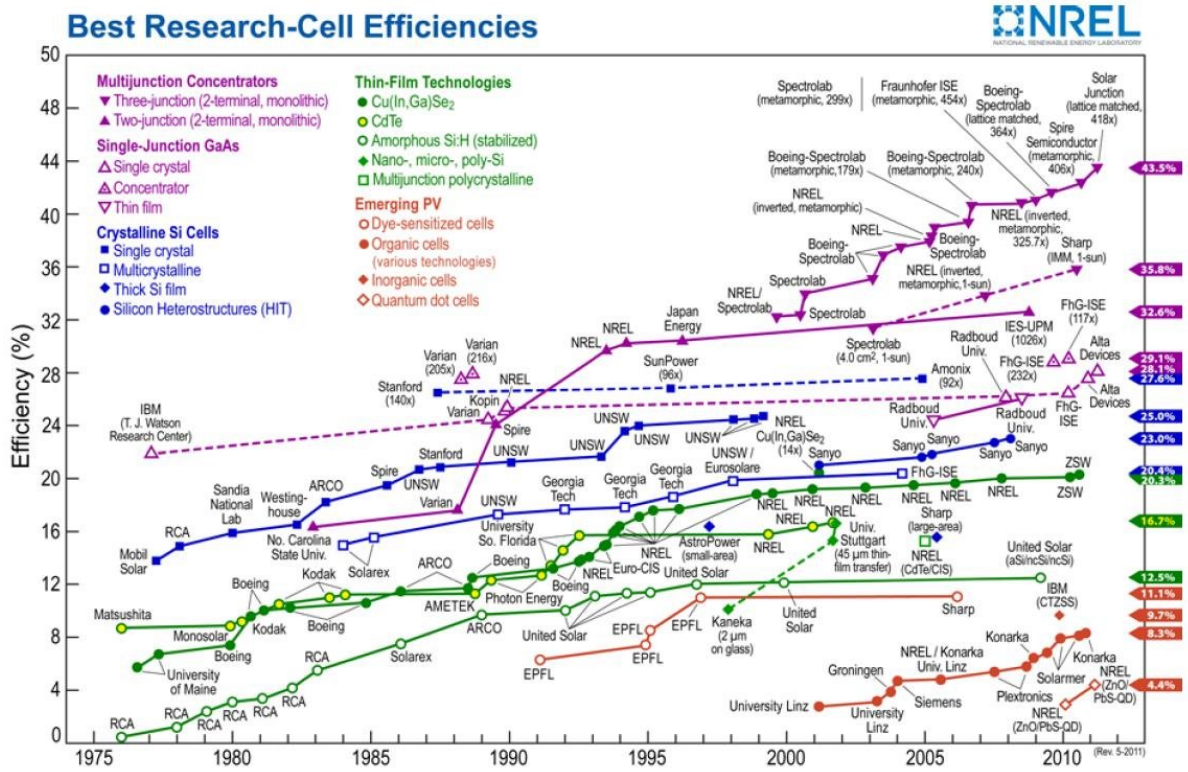


圖2-7、各種太陽電池材料效率演進圖^[12]

2.1.3 太陽能電池電氣特性

1. p-n 接面二極體電流-電壓特性

太陽能電池的光電轉換是應用 p-n 接面之光伏效應(photovoltaic effect)原理所產生。近一步可由圖 2-8 了解一個 p-n 接面二極體之電流-電壓(I-V)特性曲線圖，其關係可用下列(2.2)方程式表示：

$$\begin{aligned}
 I_{pn} &= I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \\
 &= I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_T}\right) - 1 \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

式中：

I_{pn} : p-n 接面二極體之電流；電流的方向是定義在元件內從 p 型流向 n 型；(A)

V_{pn} : p-n 接面二極體之電壓；電壓的正負值則是定義為 p 型端電壓減去 n 型端電壓；(V)

I_S : 等效二極體之逆向飽和電流(saturation current)；(A)

n : 介電常數

K_B : 波茲曼常數(Boltzmann Constant)； 1.38×10^{-23} (J/°K)

q : 電子電荷量； 1.602×10^{-19} (庫倫)

T : 絕對溫度；(°K)，在室溫下 $qV/KBT=0.026$

V_T : 熱電壓(Thermal Voltage)；25.68 (mV)

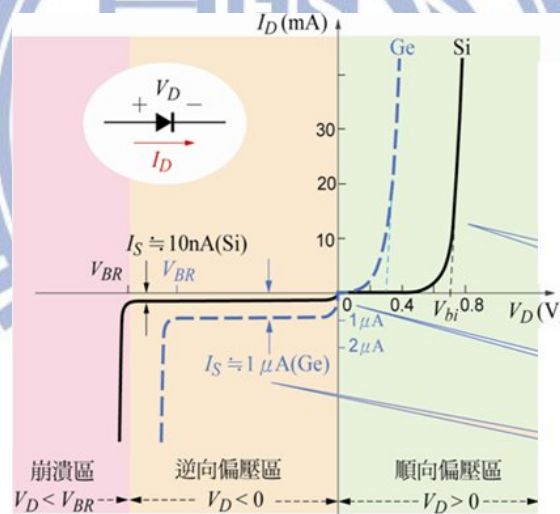


圖2-8、p-n接面二極體電流-電壓(I-V)特性曲線圖

2. 太陽能電池等效模型

如圖 2-9 所示為太陽能電池的電流-電壓(I-V)特性曲線，其照光產生的光電流為負向電流，所以太陽電池的電流-電壓關係就是理想二極體加上一個負向的光電流 I_L 。另圖 2-9 中的最適動作點即為可

獲得最大供電量之動作點，該時點的最大供電 P_m 即為 I_{pm} 與 V_{pm} 相乘所得，但太陽電池實際運轉供電時，會受到其負荷及照射等條件影響，因此實際動作點可能會偏離最適動作點。於基準狀態時，圖中所示之點各自擁以下之意義。

- (1) 最大功率點(P_m)： $(V_{pm}) \times (I_{pm})$
- (2) 開放電壓(V_{oc} , Open-Circuit Voltage)：當太陽能電池開路時，也就是負載為無限大，此時迴路上的電流 $I = 0$ ，太陽能電池兩端的輸出電壓即為開路電壓。
- (3) 短路電流(I_{sc} , Short-Circuit Current)：當太陽能電池的負載為零時所輸出的電流，也就是輸出電壓 $V = 0$ 時所對應的電流。
- (4) 最大功率點電壓(V_{mp})：供電最大時之電壓
- (5) 最大功率點電流(I_{mp})：供電最大時之電流

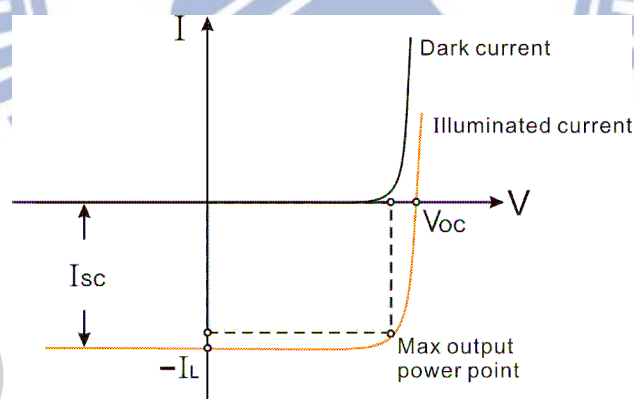


圖2-9、太陽能電池的電流-電壓(I-V)特性曲線圖

一般理想太陽能電池等效電路如下圖 2-10 所示，其可視為一個光電流源與二極體併聯，在太陽能電池理想狀態下，電流-電壓關係可用下列(2.3)方程式表示：

$$\begin{aligned}
 I_{pv} &= I_{sc} - I_d \\
 &= I_{sc} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{nV_T}\right) - 1 \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

式中：

I_{pv} ：代表 PV 之電流；(A)

I_{sc} ：短路電流(short-circuit current)；(A)

I_d ：二極體之電流；(A)

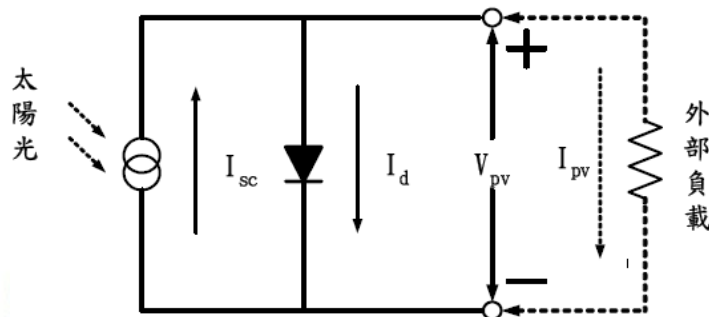


圖2-10、理想太陽能電池等效電路圖^[13]

在實際太陽能電池等效電路如下圖 2-11 所示，其可視為一組光電流源與二極體及一個並聯電阻 R_{sh} 相互併聯後，在串聯一個電阻 R_s ，其中 R_s 為太陽能電池在上、下表面所引出之電極網並呈歐姆性接觸電阻，在高日照強度下，由於電流絕大部分由 R_s 通過，所以對太陽能電池效率有很大的影響。其電流-電壓關係可用下列(2.4)方程式表示：

$$I_{pv} = I_{sc} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_{sh}}
 \tag{2.4}$$

式中：

R_{sh} ：太陽能電池內部材料因呈現界面不完全之等效並聯電阻；(A)

V_{pv} : 代表 PV 之電壓 ; (V)

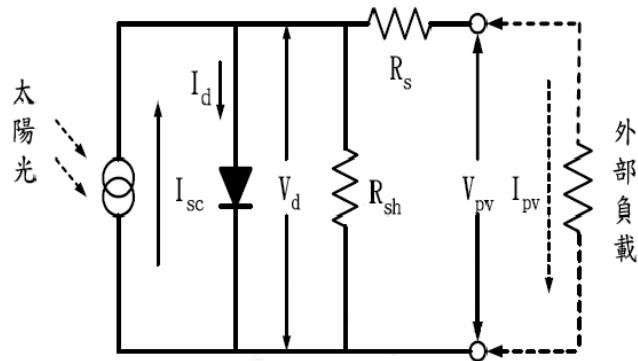


圖2-11、實際太陽能電池等效電路圖^[13]

另外在圖 2-11 中,流經二極體的電流 I_d 可用下列(2.5)方程式表示^[14]:

$$I_d = n_p I_s \left\{ \exp \left[K_o \left(\frac{V_{pv}}{n_s} + I_{pv} R_s \right) \right] - 1 \right\} \quad (2.5)$$

式中:

n_p : 元件併聯各數

n_s : 元件串聯各數

K_o : 常數係數

其中逆向飽和電流 I_s , 同時也是溫度函數, 其可用下列(2.6)方程式表示^[14]:

$$I_s = I_{sr} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{q E_{Gap}}{nk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.6)$$

式中:

I_{sr} : 太陽能電池在溫度 T_r 時之逆向飽和電流 ; (A)

T_r : 太陽能電池參考溫度 ; (°K)

E_{gap} : 半導體材料躍遷能隙所需能量 ; (J)

再則短路電流 I_{SC} 隨著日照強度和大氣溫度的變化而改變，其可用下列(2.7)方程式表示^[14]：

$$I_{sc} = \left[I_{scr} + \frac{K_i}{1000} (T - T_r) \times S_i \right] \quad (2.7)$$

式中：

I_{scr} : 太陽能電池工作在參考溫度和日照強度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 條件下，所量測到的短路電流；(A)

K_i : 太陽能電池短路電流的溫度係數；(mA/°C)

S_i : 太陽日照強度；(W/m^2)

經由以上各關係式可求的太陽能電池輸出功率 P 可用下列(2.8)方程式表示^[14]：

$$P = IV = I_{sc}V - I_sV \left[\exp\left(\frac{q}{kTA} \frac{V}{n_s}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

3. 太陽能電池性能曲線探討

影響太陽能電池輸出性能曲線之原因有日照強度 (Irradiance ; W/m^2)、環境溫度、風速、光源波長與受遮蔭程度等。當太陽能電池於相同溫度但不同日照強度下之模擬特性曲線如圖 2-12(a)(b)所示，其輸出電流變化會隨日照強度上升而上升，但輸出電壓僅微幅波動。另外，太陽能電池於相同日照強度但不同溫度下之模擬特性

曲線如圖 2-12(c)(d)所示，其輸出電壓變化會隨溫度升高而下降，但輸出電流僅微幅波動。另外因輸出電壓受溫度變化之斜率大於輸出電流受溫度變化，因此在設計 PV 系統時，須考量上述特性並使系統組列(串列)輸出電壓工作在電力調節器之最大功率追蹤電壓(MPPT)範圍內，以得到較佳之系統效率。在則，由上關係可知 PV 模組輸出功率是會隨著溫度升高而下降。

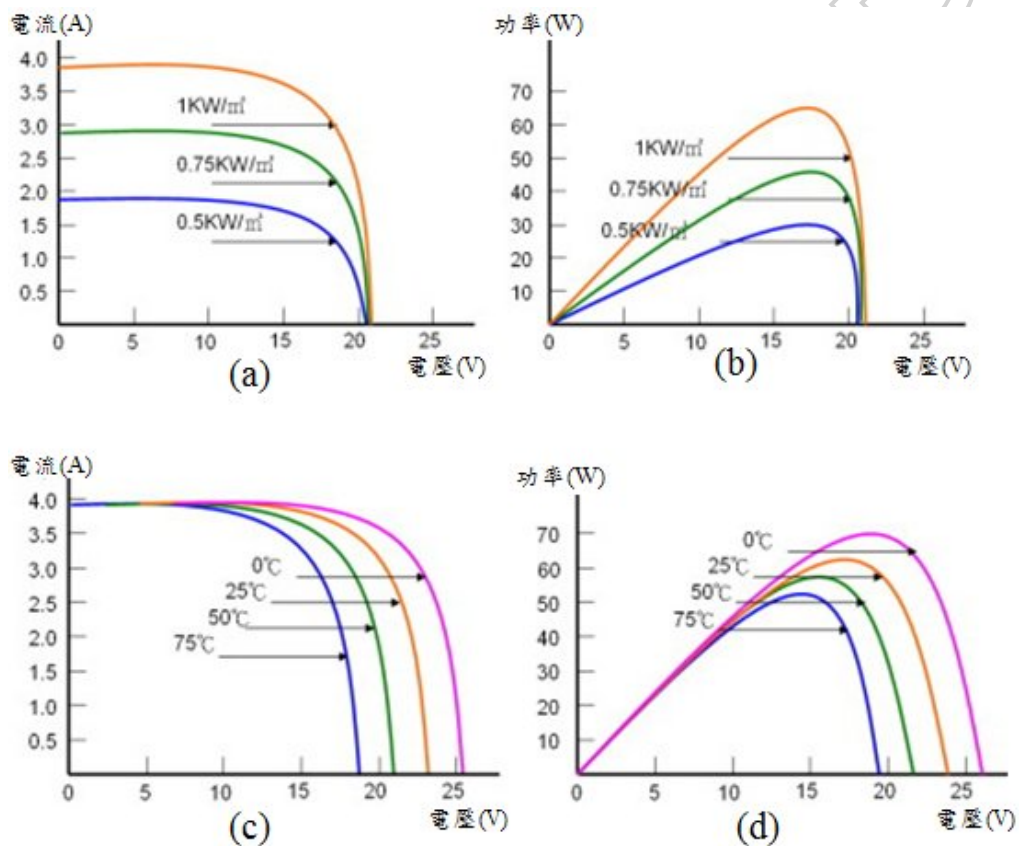


圖2-12、太陽能電池受溫度與日照強度影響之模擬性能特性曲線圖

2.1.4 太陽光電系統介紹

就太陽光電(PV)系統的應用依據全球統計主要可區分為四大類，分別為商用屋頂型、地面電廠型、住宅應用型、分散式電源型等，其佔有比例以商用屋頂型最多約為 52%(詳如圖 2-13 所示)。

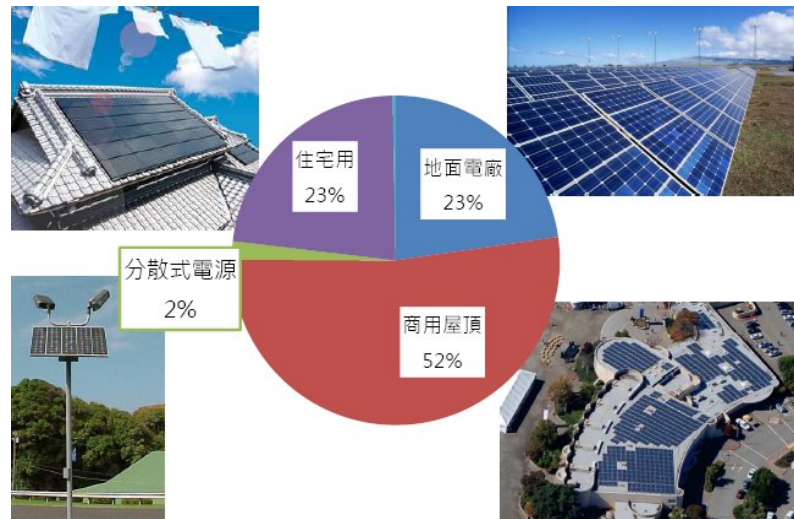


圖2-13、太陽光電系統主流應用^[8]

PV 系統主要構成項目以併聯型系統舉例，分別有 PV 模組組列、PV 模組支撐構架、直流接線箱(內含端子台、串列隔離開關、阻絕二極體、直流離斷開關、突波吸收器、接地設備、監測設備、系統連結保護裝置...等)、電力調節器(變流器)、交流開關箱(內含端子台、交流斷路器、突波吸收器、接地設備、監測設備、系統連結保護裝置...等)等組成(詳如圖 2-14 所示)，由於太陽電池之供電為直流電，因此必須透過電力調節器轉換後，方能與電力公司之供電合併使用。

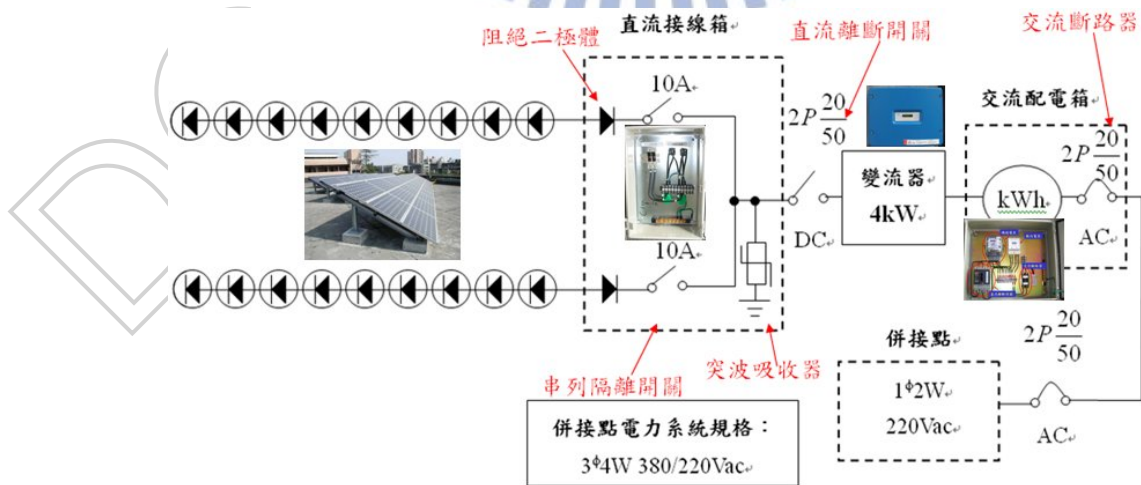


圖2-14、PV系統主要構成單線圖

[15]PV 系統，可依該系統組成及電力負載之種類等分類。大致區分如圖 2-15。首先，可大致分為併聯型與獨立型。接著可再依電力負載型態(直流、交流)及是否有蓄電池等作更進一步的分類。建構、導入 PV 系統時可依用途做適當的選擇。以下將以較具代表性的系統型態作簡介：

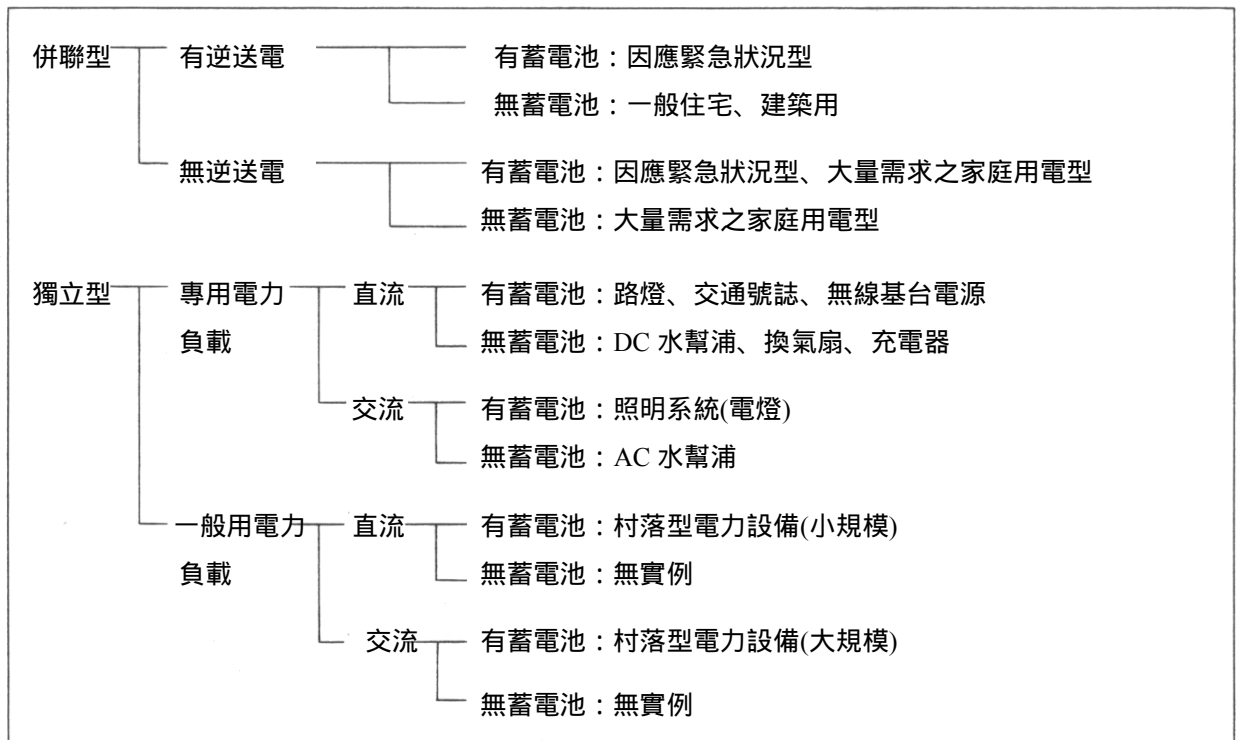


圖2-15、太陽光發電系統分類範例^[15]

1. 併聯型 PV 系統

此系統可分為有逆送電與無逆送電兩種(如圖 2-16、2-17)。逆送電系統又稱雙相系統，因 PV 系統的供電量會受到天氣左右，然而因為住宅等地方需要使用較穩定的電力，因此必須和電力公司的電力系統連結併聯，並於 PV 系統的供電量若不足以讓該區域使用時，則將會由電力公司的配電線路流入以彌補不足的電力，相反的 PV 系統如有剩餘的電量則可透過配電線路逆送並賣回給電力公司。目前幾

乎所有的住宅用 PV 系統皆為此逆送電系統。此外，亦有一種系統是搭載蓄電池可於停電等情況以提供緊急用(廣播設備、緊急用照明等)電力。

無逆送電系統通常使用於區域內所需電力比 PV 系統所提供的電力大，而無法產生逆送電的情況。由於該系統被認定為無法透過配電線路逆送電力回電力公司，因此為了防止會有部分逆送的電流產生，因此設有機制控制只要有任何一點電流通過，PV 系統就會減少或停止運作。

此外，由於 PV 系統所連接的電力系統電壓必須根據「屋內、外線路裝置規則」區分，並據此訂定保護裝置設置、併聯等條件規定，尚需視「接電處」的電壓是為「低壓併聯」或「高壓併聯」等進行更進一步的分類。

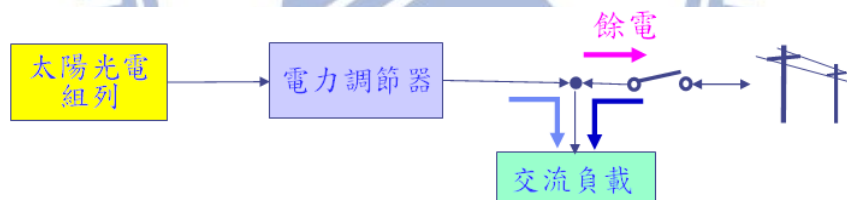


圖2-16、有逆送電併聯型PV系統

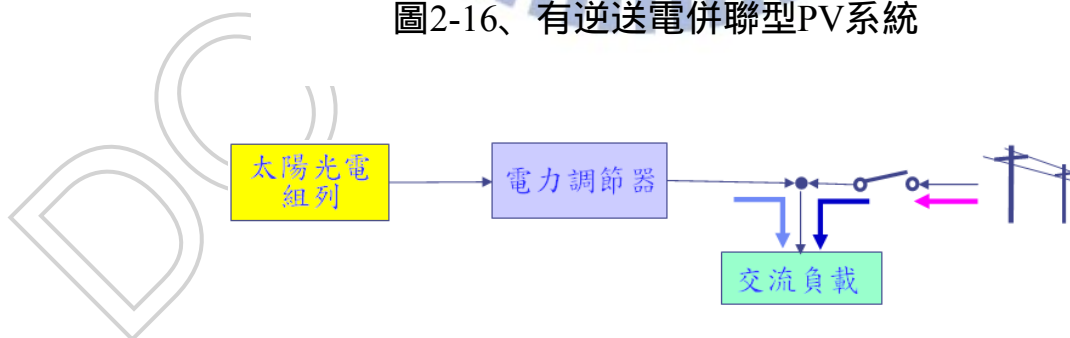


圖2-17、無逆送電併聯型PV系統

2. 獨立型 PV 系統

此系統並沒有與電力公司配電線路併聯。一般來說其構造如圖 2-18。該系統通常用於電力限制小於 PV 系統發電量的情況，或者當晚間、下雨天等無法期待可透過 PV 系統發電時，即必須另外連接蓄電池以補充電力。此系統大多使用於偏遠的山區或離島等地。亦可使用於各類情況如小型電子計算機等未滿 1W 電力，甚至是道路資訊看板等數十 W 到數十 kW 的系統。

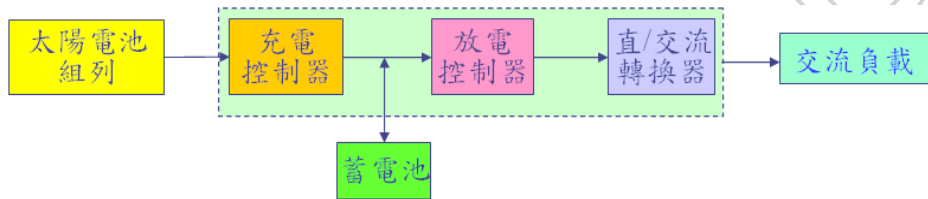


圖2-18、獨立型PV系統

3. 混合型 PV 系統

一般來說其構造如圖2-19，由多種發電設備所組成之混合系統。這些電源可能包含光電、風力、微型水力發電機、引擎驅動發電機及其他電源，但不包括發電暨配電網路。能源儲存子系統，如蓄電池，不構成本定義所指之發電設備。其特點為利用地區性PV發電與風力發電時段互補之特性，可減少太陽電池組列、蓄電池設置容量之投資。

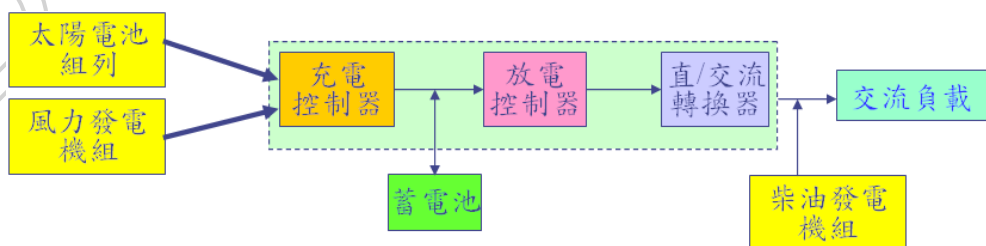


圖2-19、混合型PV系統

4. 防災型 PV 系統

一般來說其構造如圖2-20,其具緊急防災功能的太陽光電發電系統。當電力系統正常時輸出電力直接饋入電力系統並能對蓄電池充電；電力系統異常時，太陽光電組列之輸出電力可對蓄電池充電並提供緊急負載使用。

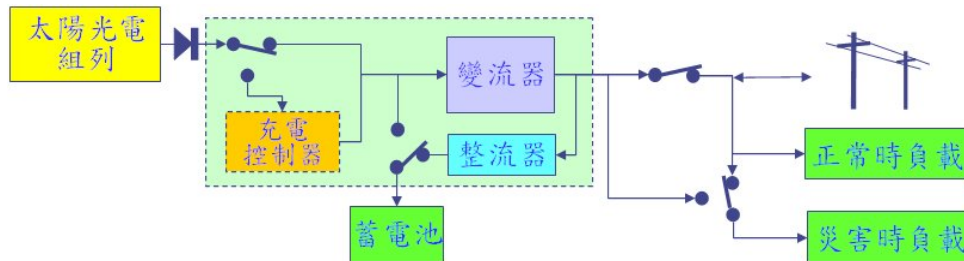


圖2-20、防災型PV系統

^[16]另外談到PV系統性能評估方式，當太陽光電發電系統完工運轉後，可分為以下四種性能指標來評估系統的長期運轉性能：

1. 日平均發電量 (Daily Mean Yield, DMY)

日平均發電量為 PV 系統一段評估期間的發電量除以該段期間的天數，再除以該系統的額定容量，即每 kW_p 每日平均發電量，單位為 kWh / d / kW_p。其可用下列(2.9)方程式表示：

$$DMY = \frac{E_{out}/day}{P_0} \quad (2.9)$$

式中：

E_{out} : 評估期間的發電量；(kWh)

P_0 : 系統額定功率；(kW_p)

day : 評估期間之天數

2. 性能比(Performance Ratio , PR)

性能比乃代表 PV 系統的真實性能接近理想性能之程度的指標,基本上與 PV 系統之所在位置、傾斜角、方位角、額定容量無關,允許跨系統間的性能比較。PR 值的高低與 PV 系統之真實容量(PV 模組實測功率)、組列(PV 模組)遮蔭、PV 模組表面灰塵、PV 模組溫度系統損失、線損、電壓調節器效率、電力調節器最大功率點追蹤能力、系統設計、元件匹配設計、天候等有關。因此為評估 PV 系統發電性能的重要指標。針對併聯型系統,其可用下列(2.10)方程式表示:

$$PR = \frac{E_{out} / P_0}{H_I / G_0} \quad (2.10)$$

式中:

H_I : 期間日射量 ; (kWh/m^2)

G_0 : 標準日照強度 ; (1000W/m^2)

3. 系統效率 (System Efficiency , η_{tot})

系統效率用來評估整體 PV 系統的轉換效率,等於組列效率乘以系統性能比,越高的性能比,系統轉換能量損失越少,系統效率即越高。針對併聯型系統,其可用下列(2.11)方程式表示:

$$\begin{aligned} \eta_{tot} &= \frac{E_{out}}{H_I \times A_a} \\ &= \frac{P_o}{G_0 \times A_a} \times PR \end{aligned} \quad (2.11)$$

式中:

A_a : 組列總面積 ; (m^2)

4. 直流發電比(R_A)

直流發電比用來評估整體 PV 系統順時直流性能比,在系統性能查驗標準,條件在 $300W/m^2$ 日照強度以上,直流發電比 R_A 80%,其可用下列(2.12)方程式表示:

$$R_A = \{ [P_A/P_0] \times [1000(W/m^2)/G_I] \} \quad (2.12)$$

式中:

G_I : 現場瞬時日照強度 ; (W/m^2)

P_A : 組列瞬時輸出功率 ; (W)

2.1.5 太陽光電產業趨勢

回顧 2009 與 2010 年全世界太陽能電池(Photovoltaic, PV)市場裝置量成長變化,2009 年全世界總裝置量為 7.24 GW ((109)giga-watts); 2010 年全世界呈現倍數成長,總裝置量達到 17.6 GW,最大的太陽光伏裝置國家由德國 7.4 GW (市占率 42 %)奪冠,第二、三名分別為:義大利 3.6 GW (市占率 20 %),捷克 1.3 GW (市占率 7 %),美國與日本也有 900 MW 以上的裝置量。近年世界各國政府能源政策支持太陽能收購補貼(feed-in-tariffs, FITs); 其中,歐洲國家對新能源政策施行的步程最快,2009 年的最大裝置國西班牙,2010 年的德國。最近幾年,歐洲政府的補貼施行,提高民眾安裝的意願,刺激市場需求,使得太陽電池產業景氣蓬勃發展,甚至出現供不應求現象。即使後來德國、義大利政府在今年陸續發佈刪減補貼政策,但民眾在預期心理因素之下,紛紛趕在補貼政策刪減施行之前提前拉貨,反而讓太陽電

池業績更上層樓。2010 年第四季(Q4)就是在這樣得氛圍之下，即使已預期 2011 年補貼政策將被刪減，但是 2010 年年底，市場需求除了受當時大雪稍微影響，大體來說，市場需求仍非常強勁，這樣的樂觀情形，讓市場需求一直延續到 2011 年上半年。當時市場樂觀預測，2011 年全世界的市場裝置量將增到 20.6 GW 以上，甚至於 23.3 GW。

圖 2-21 為^[17]Photon International 在 2011 年 2 月與 2011 年 9 月時，預測全球 PV 裝置量預估量與後來 9 月修正；2 月份時預測 2011 年全年度太陽電池總裝置量低標 15.3 GW，高標 25.4 GW，平均 18.6 GW；到了同年 9 月份，市場修正總裝置量低標 17.5 GW，高標 26.2 GW，平均 20.6 GW。特別在八月時，發生歐債風暴與美國信評調降產生的金融危機，預期消費市場受到債信危機影響，將使得需求減緩；但是由圖 2-21 來看，2011 年的裝置量反而是呈現成長趨勢，並沒有受到歐債風暴影響。裝置量成長的可能原因主要是終端價格下降，帶動市場安裝意願；另一方面，在刪減補貼政策施行之前，在預期心理因素之下，紛紛提前拉貨安裝，太陽電池價格下降在某些程度上也彌補了補貼刪減造成的影響。所以到了 2011 年 9 月修正預測預測值，全年度之總裝置量，從由原先預測的平均值為 18.6GW，微幅增加了 2 GW，到達 20.6 GW。而 2012 年的總裝置量，Photon International 預測約為 26.2 GW。

Global PV demand estimate 2/2011 vs 9/2011

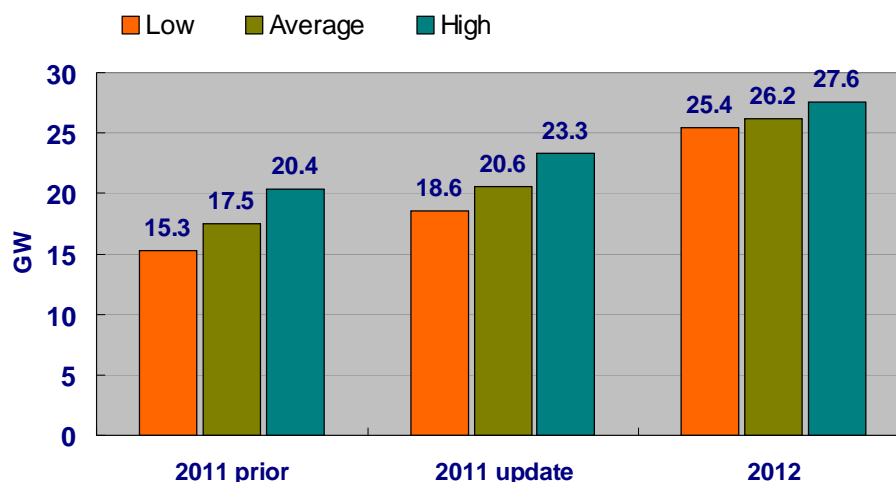


圖 2-21、Photon International 預測全球 PV 裝置量^[17]

^[17]而 Photon International 雜誌報告列出前十大 PV 裝置國家之分析，如圖 2-22 所示。2011 年前十大 PV 裝置國家分別為：德國、義大利、美國、日本、法國、加拿大、印度、斯洛伐克及澳洲。圖 2-23 為 Photon International 預測 2012 年，前十大 PV 裝置國家變化與之裝置量預測。德國增加幅度不大，甚至也有市調單位預測 2012 年德國裝置量會比 2011 年更低，可只有 5.0 GW。未來市場成長較多的國家為美國、中國與日本。

圖 2-24 為德國太陽電池市場之配置情形，^[18]目前德國境內已有超過 86 萬套太陽能系統，據統計有超過 84 % 的德國民眾支持太陽能。圖 2-24 中可知 85 % 的太陽電池系統是安裝於屋頂，使用於戶外大面積裝置(電廠)僅 15 %。35 % 的系統是小於或等於 30 kW，23 % 的系統是小於 30~100 kW，23 % 的系統是大於 100 kW~1 MW，19 % 的系統大於 1 MW。

儘管美國經濟不穩定，但是 2011 年太陽能市場卻成長迅速，將成為第三大市場。美國聯邦政府、州政府與各地方政府過去一年的政策激勵下，

2011 年美國太陽能市場依照不同區隔市場都將有不同程度的成長。今年 PV 模組價格下跌，也是刺激美國太陽能市場安裝量增長主因，隨著 PV 模組出廠價格的快速下跌，廠商與經銷商迫切想要消化庫存，住宅(residential)、商業(commercial)及政府公共設施(utility)等終端市場需求都迅速成長。成本正迅速降低。太陽能面板價格已連續數年下跌，反映作為主要原料的多晶矽成本大幅滑落。^[19]根據研究機構的資料，2011 年 9 月中旬 PV 模組的價格約每瓦 1.3 美元，低於 2010 年初的 1.9 美元，以及 2008 年每瓦 4 美元的高峰價位。太陽能面板價格自 2008 年來下跌 66%，有助推廣太陽能設備的使用，吸引希望節省電費的用戶安裝。Solarbuzz 預測美國太陽能市場在 2015 年將成長至 6.4 GW 規模。

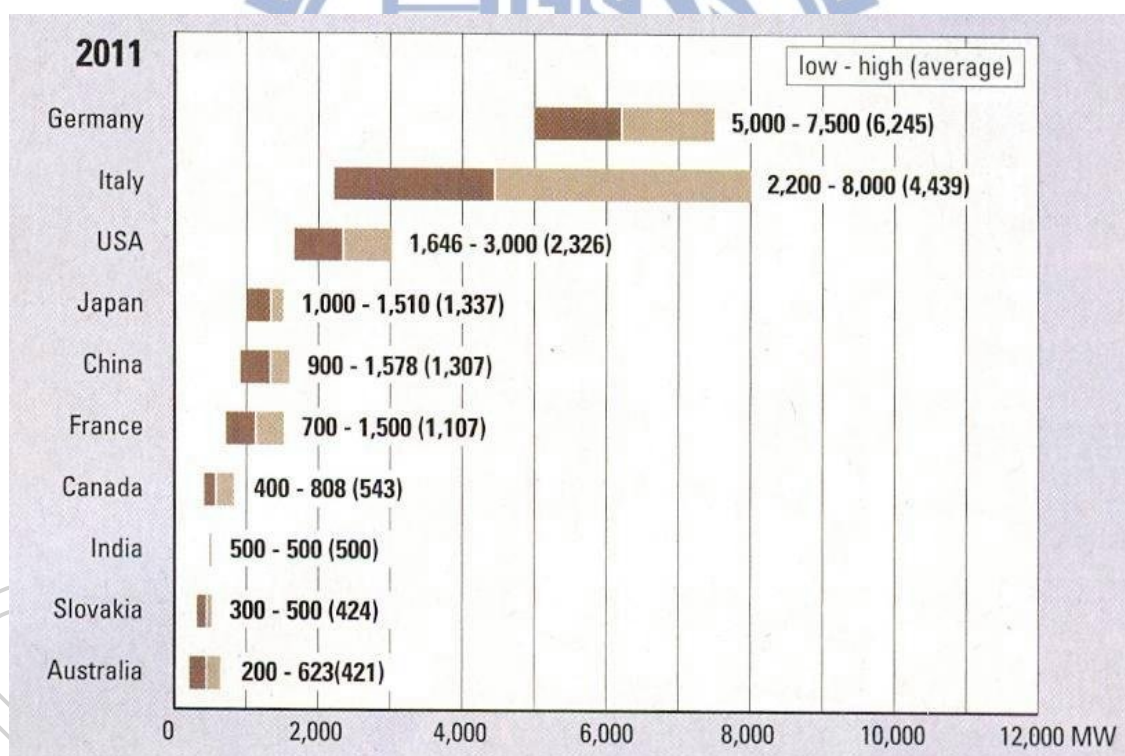


圖 2-22、Photon International 對 2011 年主要安裝國 PV 裝置量分析^[17]

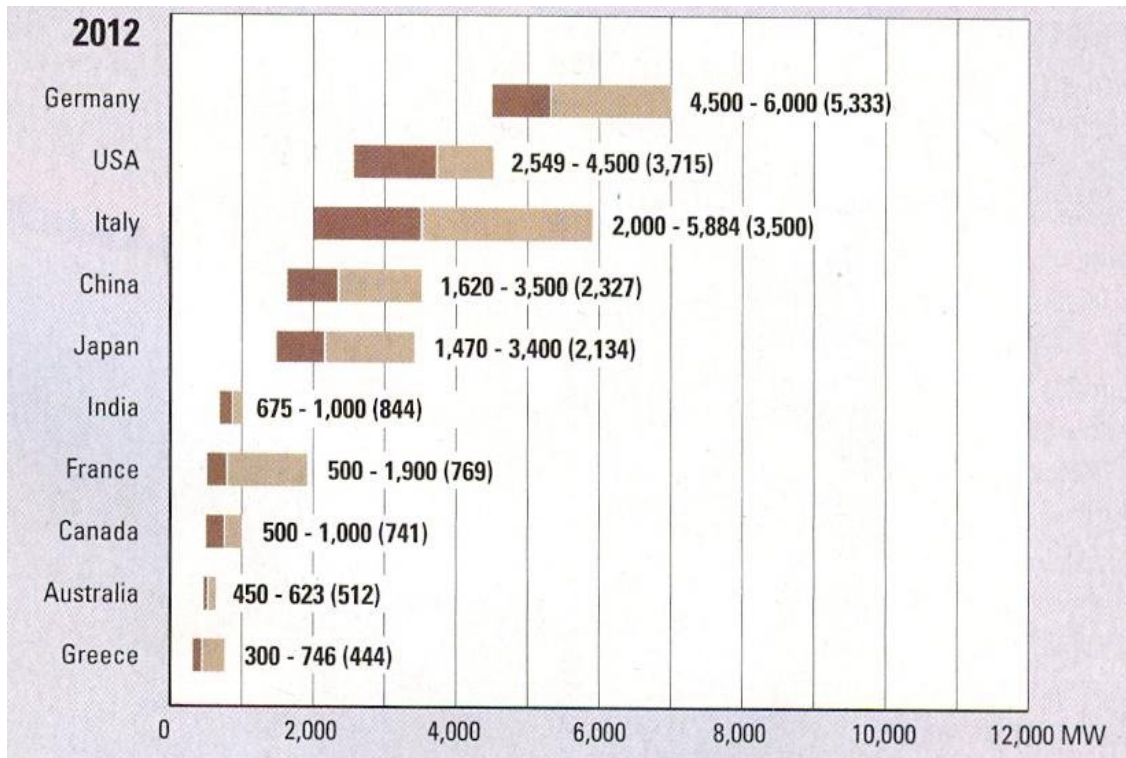


圖 2-23、Photon International 對 2012 年主要安裝國 PV 裝置量預測^[17]

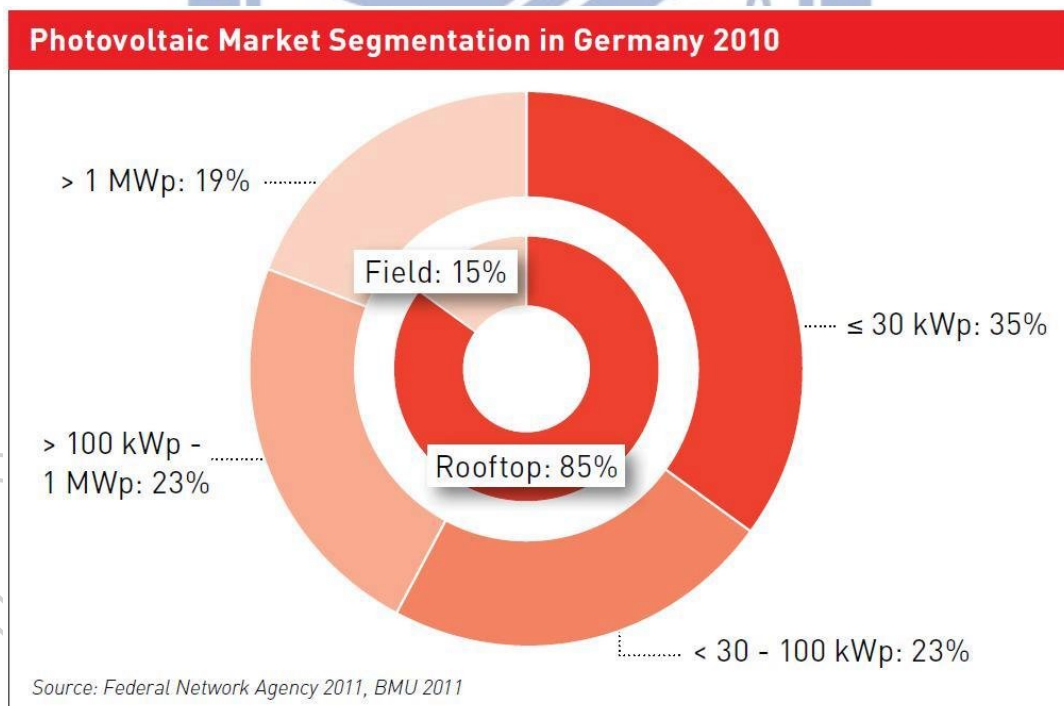


圖 2-24、德國太陽電池市場之配置情形^[18]

中國大陸自 2011 年 7 月實施上網電價補貼政策於以來，中國的太陽能發電專案開發活動顯著增加。中國西北地方日照充足、幅員遼闊，適於開發大型地面太陽能發電站，目前西北地方專案占全國待安裝太陽能發電項目總額的 66 %。待安裝量前 5 大省份分別為青海、甘肅、寧夏、內蒙古和四川。由於 2011 年 PV 模組價格的大幅下滑，太陽能發電上網電價同一核定每千瓦小時 1.15 元人民幣，上網電價可以獲得合理的內部收益率(IRR)，超過 10 MW 以上的地面電站專案平均系統安裝價格已低於每瓦 15 元人民幣，並持續下降。上網電價補貼政策，促進了中國太陽能發電專案爆發式成長。Solarbuzz 認為補貼政策的實施，帶動更多招標專案和太陽能發電訂單。2012 年中國太陽能發電市場將成長 1.4 GW 以上。

日本方面，隨著回購電價補助政令的落實，日本太陽能發電市場在 2011 年至少有 1.29 GW 的新增安裝量，相當於 35 % 的年成長率，與目前低迷的歐洲太陽能市場形成鮮明的對比。非住宅類型的安裝雖然還不是安裝量最多的類型，但 2011 年成長率卻是住宅類型安裝成長的兩倍以上。在 2010 年，日本是全球第四大太陽能市場，2011 年安裝量較過去也成長了兩倍達到 960 MW，歸功於政府重新啟動全面的住宅型補貼及收購電價鼓勵。福島核災也讓日本國內太陽能電池片廠大聲疾呼提高可再生能源發電法案。同時，由國外進口的 PV 模組數量也有 138 % 的年成長率，佔去年日本 PV 模組總量的 13 %。

2011 年對整個太陽能(光伏)產業是有史以來最嚴峻的一年，主要安裝國陸續刪減補貼政策；產能過剩造成原料端到末端電池、PV 模組價格一路崩跌，廠商幾乎已到無利可圖境地，甚至已經有廠商因無法承受虧損而關門倒閉，有人稱之為太陽電池景氣的寒冬。

即使眼前烏雲罩頂，未見太陽探頭，International Energy Agency (IEA) 仍樂觀預測未來太陽能市場將不斷擴大。IEA 預測 2010 年到 2050 年全世界太陽能發展趨勢，如圖 2-25 所示。2010 年時，太陽能發電僅佔全球總電力能源比重約 0.02 %；提供年發電量 40 TWh(1012 度)。到了 2020 年，全球太陽能安裝胃納總量將達到 200 GW，年裝置量約 34 GW，太陽能發電佔全球總電力能源比重約 1 %；此時，太陽能發電系統相較 10 年前已減少 50 %，大部分地區住宅與商業系統價格全面達成市電同價(grid-parity)。2030 年，全球太陽能安裝胃納總量將達到 900 GW，年裝置量約 105 GW，太陽能發電佔全球總電力能源比重約 5 %，此時併網電路架構、管理，以及能源儲存是競爭關鍵。2040 年，總量將達到 2,000 GW，年裝置量約 127 GW，太陽能發電佔全球總電力能源比重約 9 %。

再由圖 2-25 可知 2010~2050 年全球各區域太陽能發電比重，^[20]歐洲市場佔全世界太陽電池比重將逐年遞減，由 2020 年 25 %下降到 2050 年只剩 5 %；北美市場與亞洲發展中國家市場，約佔 22~25 %，比重變化不大。未來，主要成長區域是非洲、中東地區與拉丁美洲；非洲、中東地區未來將成長到市佔 25 %比重。

預測到了西元 2050 年，全球太陽能安裝胃納總量將達到 3,000 GW，提供年發電量 4,500 TWh(1012 度)，年裝置量約 141 GW，太陽能發電佔全球總電力能源比重約 11 %，約可減少二氧化碳排放量 2.3 GT ((109)giga-tonnes)。

表 2-2 為 IEA 針對矽晶太陽電池(crystalline silicon)與薄膜太陽電池技術

發展預測^[20]，上方為矽晶(crystalline silicon)太陽電池，下方為薄膜太陽電池。預計 2010-2015 年，單晶矽的轉換效率可達 21 %，多晶矽的轉換效率 17 %，矽晶的使用消耗量每瓦小於 5 克，研發重點在於 cell 接面、射極(emitter)與阻障層(passivation)。矽薄膜轉換效率 10 %，CIGS 轉換效率 14 %，CdTe 轉換效率 12 %；薄膜工業製造重點在於高鍍率製程，roll to roll 製程與封裝製程，薄膜研發重點在於大面積沉積製程，基板與透明導電層 TCO (transparent conductive oxides)。

2015-2020 年，單晶矽的轉換效率可達 23 %，多晶矽的轉換效率 19 %，矽晶的使用消耗量每瓦小於 3 克，研發重點在元件結構、產品價格更趨合理。矽薄膜轉換效率 12 %，CIGS 轉換效率 15 %，CdTe 轉換效率 14 %。薄膜工業製造重點在於製程簡化，低成本封裝，研發重點在於改善 cell 製程，改善沉積技術。

2020-2030 年，單晶矽的轉換效率可達 25 %，多晶矽的轉換效率 21 %，矽晶的使用消耗量每瓦小於 2 克，研發重點在新式元件結構、wafer 技術。矽薄膜轉換效率 15 %，CIGS 轉換效率 18 %，CdTe 轉換效率 15 %，研發重點在於更大、更高效率產品與新材料被開發出來。未來，人類對能源的需求依賴只會不斷增加，屬於綠色能源的太陽能發電仍是不可或缺。

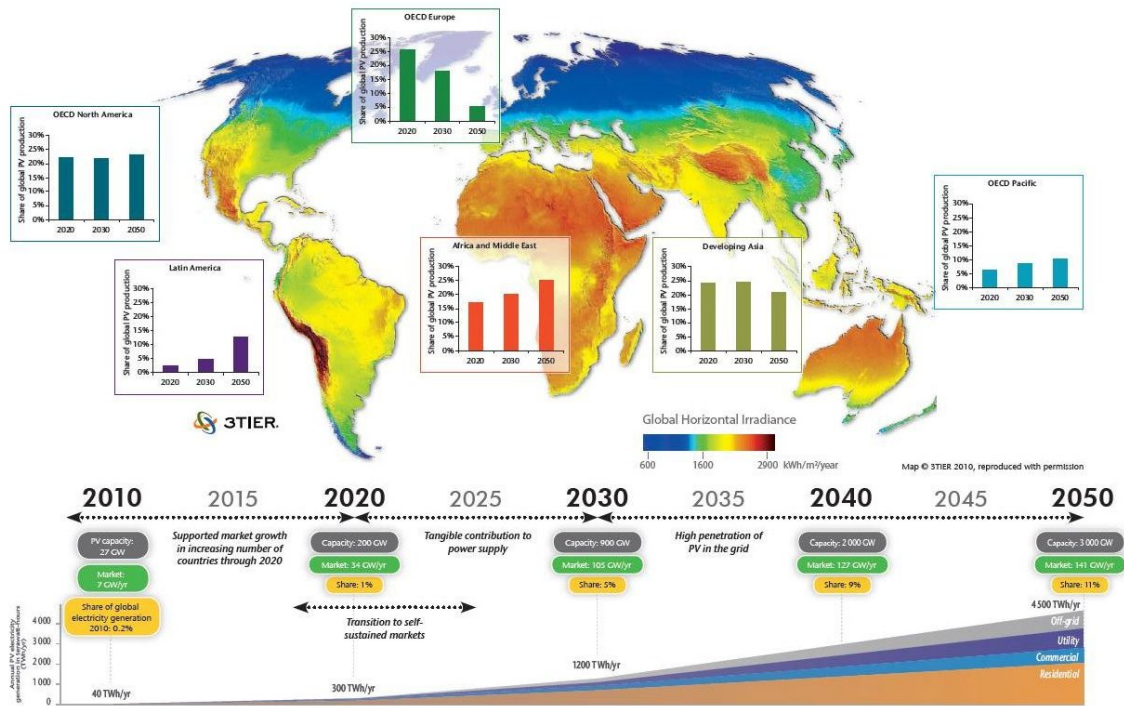


圖 2-25、2010~2050 年全世界太陽能市場預測^[20]

表 2-2、矽晶太陽電池與薄膜太陽電池技術發展預測^[20]

Crystalline silicon technologies	2010 - 2015	2015 - 2020	2020 - 2030 / 2050
<i>Efficiency targets (commercial modules)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Single-crystalline: 21% Multi-crystalline: 17% 	<ul style="list-style-type: none"> Single-crystalline: 23% Multi-crystalline: 19% 	<ul style="list-style-type: none"> Single-crystalline: 25% Multi-crystalline: 21%
<i>Industry manufacturing aspects</i>	<ul style="list-style-type: none"> Silicon (Si) consumption < 5 grams / watt (g/w) 	<ul style="list-style-type: none"> Si consumption < 3 g/W 	<ul style="list-style-type: none"> Si consumption < 2 g/W
<i>R&D aspects</i>	<ul style="list-style-type: none"> New silicon materials and processing Cell contacts, emitters and passivation 	<ul style="list-style-type: none"> Improved device structures Productivity and cost optimisation in production 	<ul style="list-style-type: none"> Wafer equivalent technologies New device structures with novel concepts
Thin film technologies	2010 - 2015	2015 - 2020	2020 - 2030
<i>Efficiency targets (commercial modules)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Thin film Si: 10% Copper-indium/gallium (CIGS): 14% Cadmium-telluride (CdTe): 12% 	<ul style="list-style-type: none"> Thin film Si: 12% CIGS: 15% CdTe: 14% 	<ul style="list-style-type: none"> Thin film Si: 15% CIGS: 18% CdTe: 15%
<i>Industry manufacturing aspects</i>	<ul style="list-style-type: none"> High rate deposition Roll-to-roll manufacturing Packaging 	<ul style="list-style-type: none"> Simplified production processes Low cost packaging 	<ul style="list-style-type: none"> Large high-efficiency production units
<i>R&D aspects</i>	<ul style="list-style-type: none"> Large area deposition processes Improved substrates and transparent conductive oxides 	<ul style="list-style-type: none"> Improved cell structures Improved deposition techniques 	<ul style="list-style-type: none"> Advanced materials and concepts

2.2 太陽光熱系統

太陽光熱系統的利用主要是接收或聚集太陽輻射能，使其轉換為熱能或電能來使用，

熱水系統的應用，目前大致可分為已商業化的家用熱水系統及研究中的工業預熱系統。家用熱水系統已具有一定的市場，主要為間接加熱式的太陽能熱水系統，以期能對水垢堵塞管路的問題能有所幫助。該項系統係利用熱管吸收太陽能的能量，再於儲水桶中與水進行熱交換，加熱成所需熱水。

在工業預熱方面，太陽熱能主要應用於鍋爐系統的輔助加熱，以節省燃料用油。目前的主要發展瓶頸在於仍未具經濟效益，因此尚處於研發階段。中溫系統的開發研究即是針對此項需求而進行的。此項研究又分為兩部分，一是改良式太陽能平板集熱器，可將熱水溫度加熱至 90℃，而其集熱效率仍可維持在 50%。

另太陽熱能發電系統一直以來都吸引了許多人的注意，其主要是利用集熱器將太陽輻射能轉換成熱能，此時加熱流體介質呈高壓蒸氣後進入蒸汽輪機，並帶動發電機轉動發電。主要分為中央聚光塔是集熱器、拋物線槽是聚焦發電系統、碟型發電系統等三種型式。在美國加州於 1981 年建造世界第一座 Solar One 系統(設置面積 50 公頃，約可產生 10MW 電力)，亦有太陽熱能發電廠的設立。而工研院亦曾就國內太陽熱能發電系統進行研究，以瞭解太陽熱能發電於國內應用的可行性，所得的研究結論為於台灣恆春地區的日照條件下，一座十萬千瓦的太陽熱能電廠，需一百五十公頃的土地面積，而台灣地區受到土地面積狹小，人口密度高的限制，且其發電成本較台灣電力公司的發電成本高出許多，因此現階段尚不宜建造。惟近幾年來，太陽熱能發電系統在降低成本及提高效率方面皆有顯著的進展，漸漸成為國內發展的重點研究項目。



圖 2-26、1981 年加州 Solar One 系統

2.2.1 太陽能熱水系統原理

^[21]太陽能熱水器的作用原理是將來自太陽的輻射能量吸收下來並用以加熱水溫。以下以平板式太陽能熱水器為例，說明其熱吸收及傳導的原理。當一物體本身之溫度在絕對零度以上時，就會對外以電磁波的方式釋放出輻射能量，稱為熱輻射；而放射之能量則與絕對溫度四次方成正比。太陽輻射能之波長約在 $0.2 \sim 4\mu\text{m}$ 間，涵蓋紫外線到紅外線範圍。若一個物質可以吸收這個波長範圍內之電磁波，當陽光照射其上時，其溫度將隨著所吸收之輻射能量而上升。實務上，當熱輻射入射到一個物質表面時，僅部分能量會被吸收，其他部分能量會被反射或透射（對非透明體，透射率為零）。其次，太陽輻射經由太陽能熱水器之集熱板吸收後，所吸收的熱能則經集熱板藉由熱傳導模式傳到分佈其間的水管外壁。熱傳導的原理在於物體中的分子及自由電子分別因受熱產生之振動及移動，帶動能量由高溫傳至低溫；其熱通量(單位面積上熱傳量)與熱傳方向的溫度梯度成正比(傅利葉傳導定律，Fourier's heat conduction law)。接下來再藉由熱對流模式將傳至水管管壁之高溫能量傳送給流經管內之液體，完成加熱水溫的目的。

發生在流體與固體表面間或流體與流體間，高溫物體把熱量傳給接觸

到的流體或固體表面上之熱傳機制，稱之為熱對流模式；其中包含了流體之能量儲存、熱傳導及流體分子間之混合運動等三種現象。熱對流量正比於溫差，其結果亦取決於對流熱傳係數（convective heat-transfer coefficient、或稱薄膜熱傳係數）之大小，這又與流體種類、接觸面的幾何形式、表面狀態、流速及流動狀態(穩或紊態)等因素有關。流經附設於集熱板上集水管路中之水，經所吸收太陽能加熱後產生一個溫度梯度：位置愈高，溫度也跟著愈高，反應在管內流水之密度上就是形成一個隨著位置上升而下降之比重梯度，導致較熱之水(比重較小)經集水管路往置放於集熱板上方之儲熱桶流動；而儲熱水桶內亦因水溫差異形成比重梯度，底部較低溫、較冷(密度較大)的水往下經輸送管路流至集熱器底部，而形成一連續加熱之自然循環模式，此一模式稱之為「自然循環太陽能熱水器」，如圖 2-27 所示。

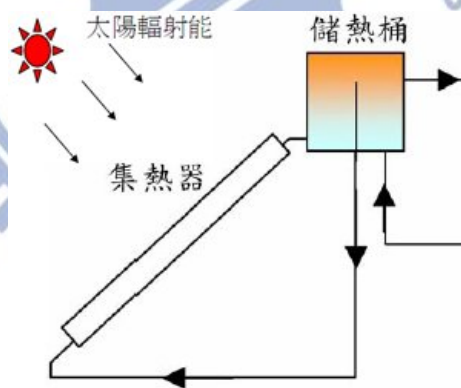


圖 2-27、自然循環太陽能熱水系統

2.2.2 太陽能熱水系統組成與種類

1. 太陽能熱水系統組成

^[21]太陽能熱水系統的組成構造主要是由集熱器、儲水桶、管路和控制系統等四部份構成。

(1) 集熱器

集熱器為太陽能熱水系統的心臟，主要功能是將太陽能輻射能轉換成熱能，再傳給循環工作流體。太陽光穿過透明面蓋到達吸收板，經板面之特殊處理轉換成熱能由吸收管內之流體帶出。整個吸收板、吸收管以及面蓋以外框固定，而中間填塞隔熱材料以防止熱損失。面蓋的作用為防止對流熱損失並可保護吸收板，多使用高強度高透射率強化玻璃製成。台灣目前使用較多的為金屬材料作成的板管式集熱板，吸收板一般的材料為銅板、鋁板或不銹鋼板，也有使用有機聚合體製成者。吸收板表面需經特殊處理，一般常用者有噴漆、烤漆、電鍍等方式附上一層選擇性吸收膜，其中以電鍍效果最佳。吸收管多為銅管製成，管內流體一般都直接用水，但亦有使用其它流體為傳熱媒介者，如圖 2-28(a)所示。另一種最近較為流行的集熱裝置為真空管集熱器(如圖 2-28(b)所示)其基本構造為內外雙層玻璃管套，中間為真空層，外層玻璃為透明，內層玻璃鍍有深色吸收膜，太陽輻射光波經由外層玻璃進入，經過真空層，被吸收膜吸收進入內層玻璃管中，並加熱其中流通的熱水，而鍍膜與真空層皆具有阻斷熱能散失的功能，其所得到的熱水溫度比上述的板管式為高，所以適合高緯度的北部地區及高山地區使用。

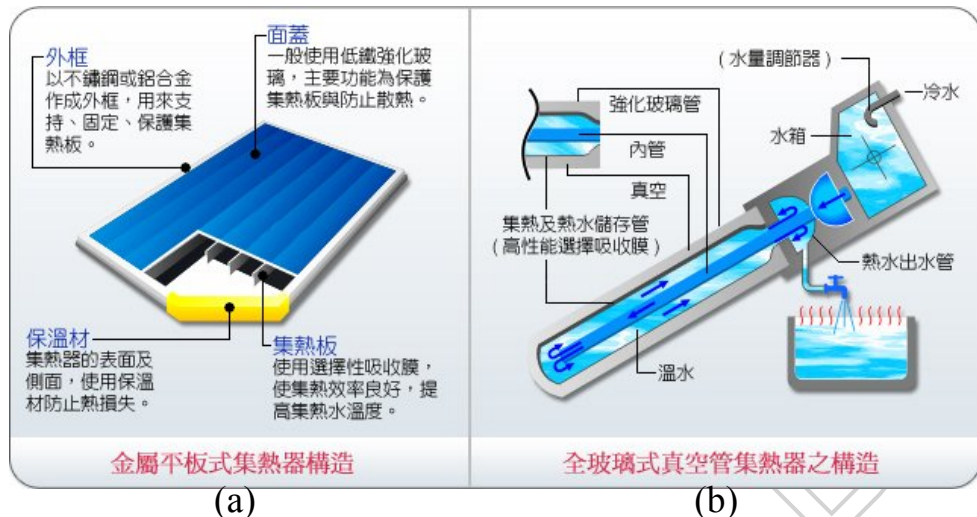


圖 2-28、太陽能熱水系統集熱器種類^[21]

(2) 儲水桶

因太陽光並非隨時穩定照射，由集熱器流出之熱水需暫時儲存，以供使用需要。一般儲水槽多用不銹鋼桶加一層或數層絕熱材料而成。儲水槽可分立式、臥式兩種，其結構大致相同，都是內外各一層水桶，中間填塞隔熱材料保溫。一般而言，直立效果較佳，但市面上多使用臥式，因結構上較易固定，外表較美觀，且不佔空間，為減少冷熱水之混合，儲水儲內亦有種種設計，如分層隔板，進水檔板及進水噴管。

(3) 管路配件

管路的配置，依不同裝設環境、系統及需求而異，一般用戶如另裝有瓦斯熱水器，可將太陽能熱水器與其串聯，亦即以太陽能熱水器之熱水出口接於瓦斯熱水器之冷水入口，如果太陽能熱水器出水溫度夠高，則可直接使用，如果水溫不夠，可當成預熱設備，再經瓦斯熱水器加熱，亦能節省部分燃料費。小型太陽能熱水器的管

路材質有鍍鋅鋼管、不銹鋼管、PB管、銅管。較常用的為銅管與PB管。集熱器與儲水槽之間的管路與往浴室之管路，必須要有保溫，且須要有外覆材。對於自然循環或管路，必須避免管路先向上而後向下彎。中大型系統之管路，通常是用鍍鋅鋼管或不銹鋼管，PB管不適用。管路要有保溫及外覆材（鋁皮、亞鉛皮、塑膠布或橡膠布）每片集熱器之冷水管與熱水管長度和最好相等，且熱水管愈短愈好。至於溫水游泳池，則管路可用塑膠管。最近流行一種新材質 - “開泰管” 應用於熱水系統管路易於彎曲施工且耐高溫，雖然傳熱性能差但仍須外敷保溫材料，而價錢僅比普通PB管略貴一點而已。

(4) 控制系統

控制系統包括溫度控制及時間控制，可依所選定時間控制儲水槽內水溫。大部分家用太陽能熱水器如單獨使用時，都裝有輔助電熱器，可在日射量不足時，輔助加熱達到所需溫度。在大型強制式熱水系統之儲水桶與集熱器間裝有溫差控制器，如果溫度差達到一定值，將自動啟動泵浦將儲水桶內較冷之水打至集熱器吸收太陽輻射能加熱。

2. 太陽能熱水系統組成

太陽能熱水系統的分類^[21]以加熱循環方式可分為：自然循環式、強制式、儲置式等三種。

(1) 自然循環式太陽能熱水器：

集熱器內的工作流體，吸收太陽輻射熱，溫度升高密度變小往上升至儲水桶，儲水桶內較冷的水往下流至集熱器，產生自然對流

循環而將儲水桶內的水加熱的裝置，如圖 2-29 所示。自然循環式絕大部份用在小型家用熱水自然循環中，如果集熱器與儲水桶內循環的工作流體即為盥洗用水則屬於直接加熱型（單循環）；如果工作流體本身負責吸收太陽能，再間接加熱儲水桶內的用水則屬間接加熱型（雙循環），熱管集熱器即屬此型。

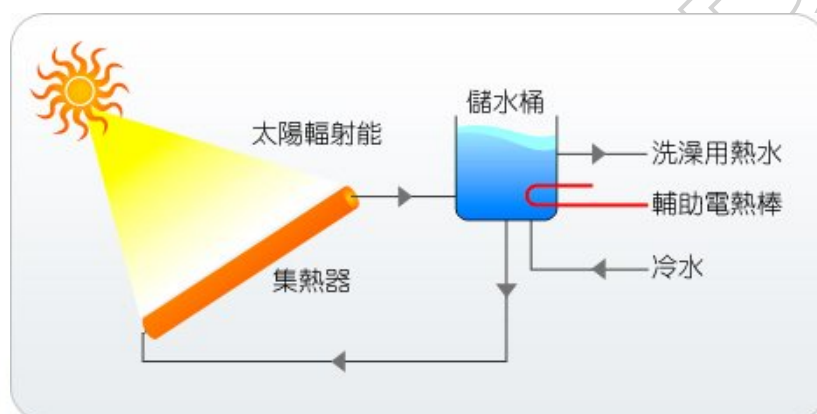


圖 2-29、自然循環式太陽能熱水器系統^[21]

(2) 強制循環式太陽能熱水系統：

利用集熱迴路泵浦，藉溫差控制器使儲水槽內的水，強制流經太陽能集熱器，將集熱器所吸收的太陽輻射熱帶回儲熱槽，如圖 2-30 所示。強制式主要是用在大型太陽能熱水系統。通常本系統之集熱器管內流體介質流速較快，因而集熱效率較佳，且可順應部分特殊安裝屋頂環境或大型系統；但較耗電(幫浦需用電)，且因其管路長期處於加壓環境中，管路轉接處或與集熱器接縫處較可能產生漏水的現象。

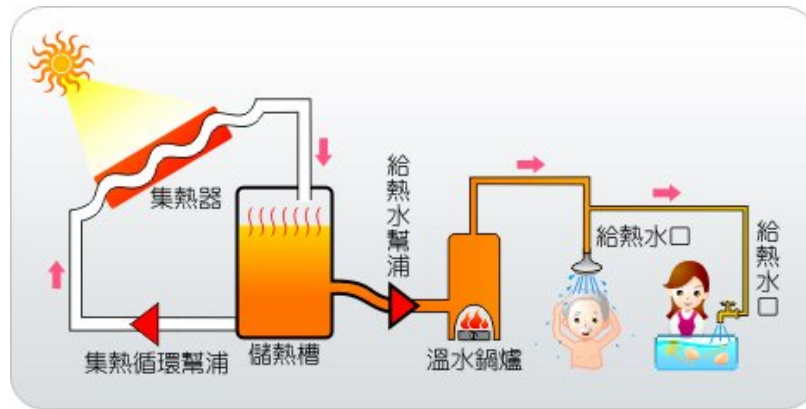


圖 2-30、強制循環式太陽能熱水器系統^[21]

(3) 儲置式太陽能熱水器：

其定義是一種把集熱器和儲水桶合而為一的太陽能熱水器，如圖 2-31 所示。本系統儲水桶本身不只有儲水功能，同時又具有收集太陽熱能功用之裝置，此種裝置構造簡單，價格低廉但集熱效率較低，在日射量充足的地方，適於使用此系統。

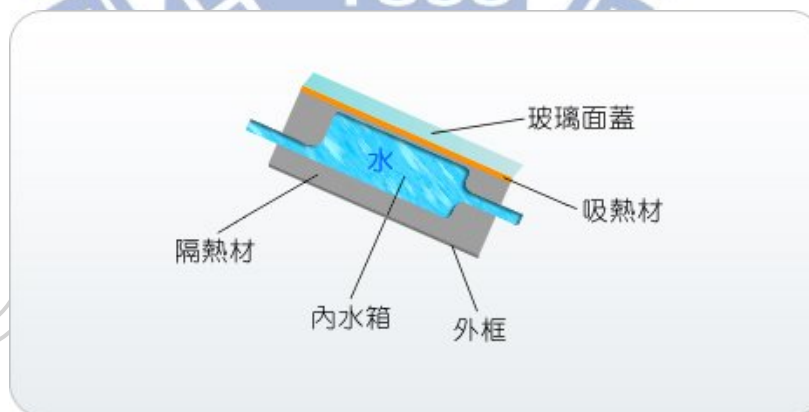


圖 2-31、儲置式太陽能熱水器系統^[21]

2.2.3 太陽能熱水系統性能指標

^[22]任何集熱器之有效能量為：有效之集熱量 = (熱水器所吸收能量)-(熱

水器熱損失)。其中自然循環式太陽能熱水器之熱損失通常分為：(1)集熱器底部熱損失；(2)集熱器邊緣熱損失；(3)集熱器上部熱損失；(4)儲熱桶熱損失；(5)管路熱損失等五種。另強制循環式太陽能熱水器之熱損失通常分為：(1)底部熱損失；(2)邊緣熱損失；(3)上部熱損失等三種。以下將探討自然循環式與強制循環式太陽能熱水器系統性能指標：

1. 自然循環式太陽能熱水器系統性能效率

本系統之性能效率為在一天時間內，儲熱桶收集之有效集熱量與此時間日照量之比。此性能效率曲線，主要是作為太陽熱水系統之模擬與評估之用，並可為熱水器組件改良的依據。對一熱水器在全天收集日照能量條件下，其效率可用下列(2.13)方程式表示：

$$\eta_c = \frac{\text{所收集之有效熱量}}{\text{照射在集熱器之日照量和}} = \frac{MC_p(T_f - T_i)}{Ag G} = \alpha_o - U_s \left(\frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (2.13)$$

式中：

η_c : 集熱效率；(%)

M : 儲熱桶內熱傳流體總重量；(kg)

C_p : 熱傳遞流體比熱；(kcal/(kg ·))

T_i : 儲熱桶內熱傳遞流體之初始平均溫度；()

T_f : 儲熱桶內熱傳遞流體之最終平均溫度；()

Ag : 集熱器之透明面蓋有效面積；(m²)

G : 單位面積照在集熱器上之全天日照量；(MJ/(m² · day))

α_o : 熱水器最佳集熱效率

U_s : 熱水器散熱係數

T_a : 大氣溫度 : ()

以縱軸為 η_c , $(T_i - T_a)/G$ 為橫軸 , 則可繪出如圖 2-32 所示。

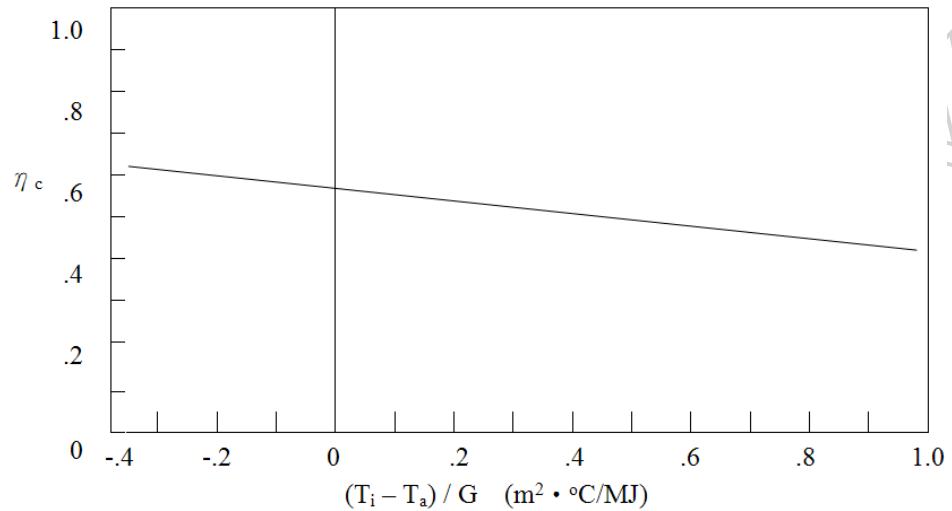


圖 2-32、自然循環式熱水器性能效率曲線圖

2. 強制循環式太陽能熱水器系統性能效率

集熱器之性能效率為在某段時間內，集熱器之有效集熱量與此時間日照量之比。此性能效率曲線，主要是作為太陽熱能系統之模擬與評估之用，並可為集熱器組件改良的依據。對平板式集熱器在穩定狀態下而言，其效率可用下列(2.14)方程式表示：

$$\eta_c = \frac{\text{所收集之有效熱量}}{\text{照射在集熱器之日照量和}} = \frac{mC_p(T_{out} - T_{in})}{AgI}$$
$$= F_R (\tau \alpha)_e - F_R U_L \left(\frac{T_{in} - T_a}{I} \right) \quad (2.14)$$

式中：

m : 熱傳遞之質量流率； (kg/sec · m²)

T_{out} : 集熱器之熱傳遞流體出口溫度 ; ()

T_{in} : 集熱器之熱傳遞流體入口溫度 ; ()

I : 單位時間單位面積照在集熱器上之日照量 ; (W/m^2)

F_R : 移熱因子

$(\tau\alpha)_e$: 穿透吸收因子

U_L : 總熱傳導係數

以縱軸為 η_c , $F_R U_L$ 為斜率 , $(T_{in} - T_a)/I$ 為橫軸 , 則可繪出如下圖所示之曲線。

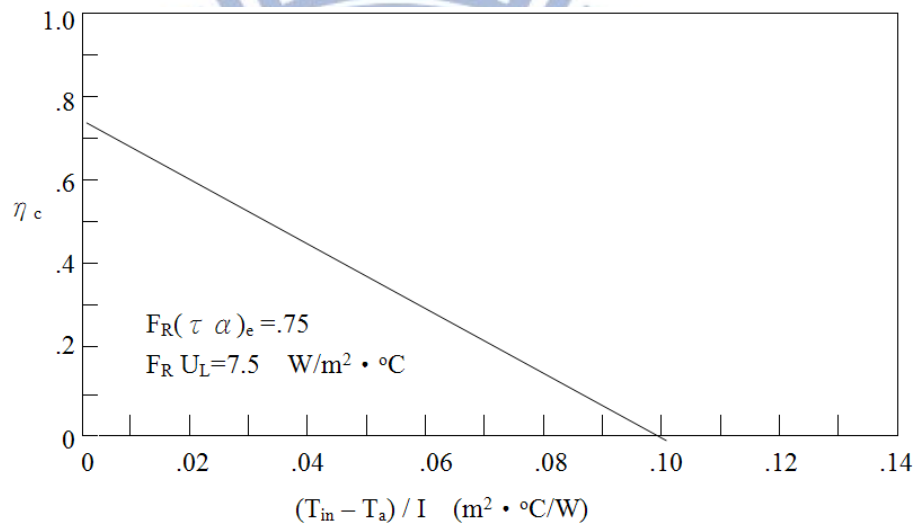


圖 2-33、強制循環式熱水器性能效率曲線圖

綜和以上說明 , 有關於集熱效率指標在民國 89 年 3 月經濟部能源委員會公佈對於可補助之太陽熱水器產品性能要求如表 2-3 所示。

表 2-3、台灣地區可補助之太陽熱水器產品性能指標

太陽能集熱器性能標準					
金屬平板或真空管集熱器		非金屬平板集熱器		無面蓋集熱器	
$F_R(\tau\alpha)$	F_{RU_L}	$F_R(\tau\alpha)$	F_{RU_L}	$F_R(\tau\alpha)$	F_{RU_L}
≥ 0.75	≤ 7.0	≥ 0.65	≤ 7.5	≥ 0.85	≤ 20.0
太陽能熱水器性能標準					
集熱器種類 特性效率	有面蓋 熱水器	儲置式 熱水器	無面蓋 熱水器	真空管 熱水器	
η	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5	

【備註】

$F_R(\tau\alpha)$ ：集熱器由表面受照射之日射量中獲得可用能量之最大比

F_{RU_L} ：集熱器表面在與大氣溫度的溫差條件下，集熱器表面散失熱量的速率；（ W/m^2 ）。

【註 1】金屬、非金屬平板及無面蓋集熱器之性能曲線全部高於表列性能曲線為合格；無面蓋集熱器之性能曲線於 $T_{in}-T_a/I$ 小於 0.02 時，高於表列性能曲線為合格。

T_{in} ：集熱器入口溫度；（ $^{\circ}C$ ）

T_a ：大氣溫度；（ $^{\circ}C$ ）

I ：日照強度；（ W/m^2 ）

【註 2】特性效率 η 為熱水器在全天測試中儲熱桶累積收集之能量淨值佔全天照射在集熱器表面之累積日照總量的最大比值。

2.2.4 太陽能熱水系統發展趨勢

台灣地區自實施「太陽能熱水系統推廣獎勵補助」措施以來，^[23]國內太陽能熱水系統市場穩定成長，每年新增安裝面積從 2000 年的 7 萬 2,800 平方公尺，提高至 2006 年的 12 萬 2,200 平方公尺，雖然之後由於全球金融海嘯問題，降至 2008 年之 11 萬 7,200 平方公尺(如圖 2-34 所示)，但仍成為世界第 14 大市場。在 2000 年至 2008 年間的市場年平均複成長率約為 6.1%。至 2008 年底，全國累計安裝面積達 178 萬平方公尺，僕即率 4.9%。

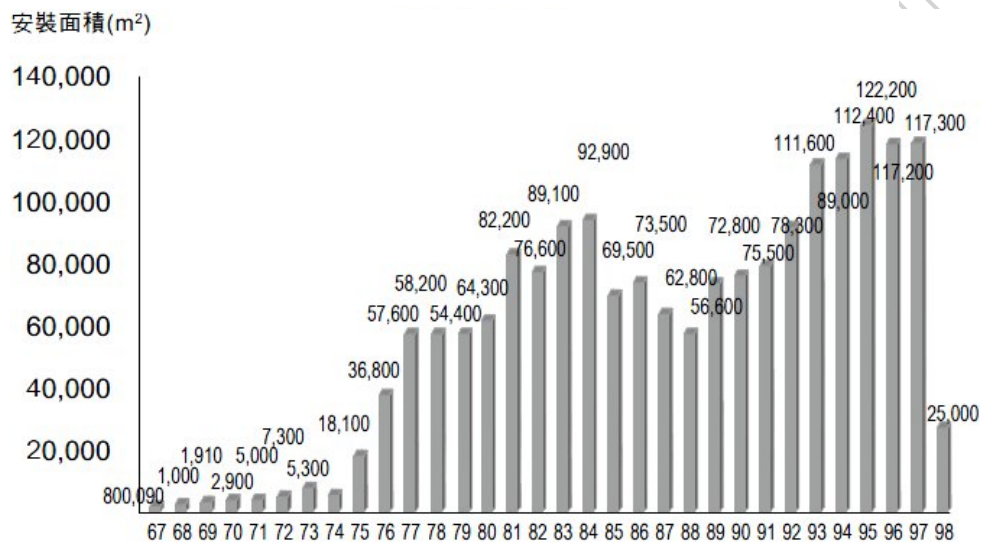


圖 2-34、台灣地區歷年安裝及熱面積統計圖^[23]

如圖 2-35 為歐盟諸國自 1990 年至 2007 年有面蓋集熱器的年安裝面積統計。2006 年歐盟 EU 的太陽能熱水器市場成長 47%，年裝設面積達 3 百萬平方公尺(2.1GW_{th})，累計裝設容量 13.5 GW_{th}，主要以德國、奧地利、法國、義大利、西班牙增加最多。證明太陽熱能以開始受到重視，2020 年前將裝設 91 GW_{th}。由 ESTIF 的資料指出，歐州諸國在太陽能領域的技術非常進步，但產品僅佔全球市場的 9%，而中國卻獨佔全球市場的 78%。

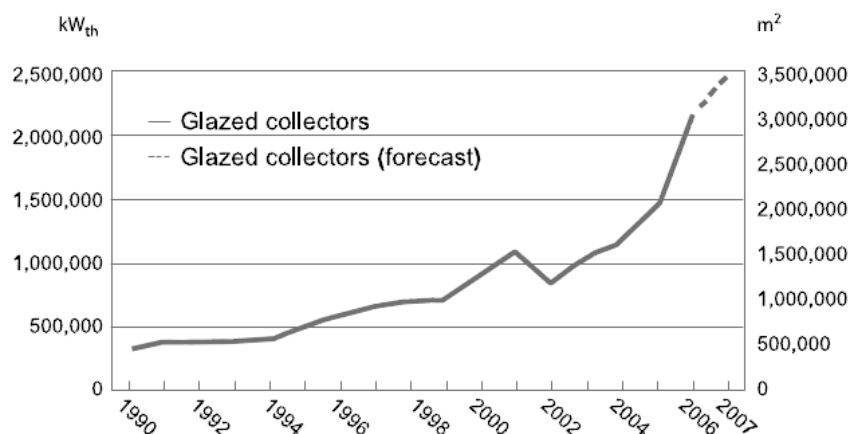


圖 2-35、歐盟太陽能級熱市場^[24]

2.3 太陽光電集熱复合型系統

太陽能應用主要分為太陽電能及太陽熱能，太陽光電晶片(Solar Cell)主要吸收 400~1000nm 太陽光譜轉換成電能，高於 1000nm 波長之近紅外光波長則被晶片所吸收轉換成熱能，熱能被吸收使得太陽光電晶片溫度升高，通常 PV 模組背溫可高達 75 或更高，此時太陽能電池的實際功率將比標準測試環境(Standard Test Condition,STC；需求條件為，光照度：1000 W/m²、光譜分佈：AM1.5、PV 模組溫度：25、相對溼度 75%)下的功率減少 18%~25%(相對值)。且太陽光電晶片封裝後之 PV 模組在 STC 下，測試其發電效率之溫度係數特性，如圖 2-36 在結晶矽型 PV 模組發電效率特性會隨著溫度升高每 1 則降低 0.4~0.5%發電效率，而在非晶矽型 PV 模組發電效率也會降低約 0.25%，故本研究應用太陽光電與集熱复合設計概念，將 PV 模組背熱透過高導熱材料如銅或鋁材，並以熱傳導和熱對流的方式達到散熱與儲熱之目的。

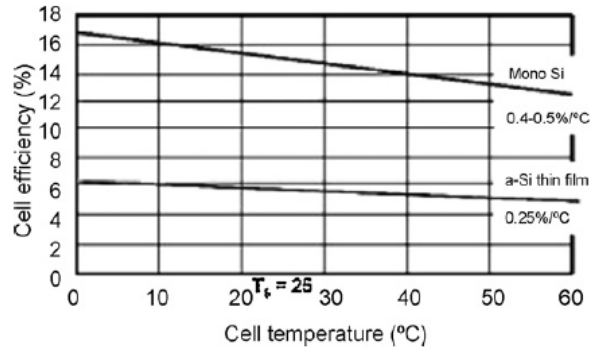


圖 2-36、PV 發電效率之溫度係數特性^[25]

2.3.1 太陽光電集熱複合型模組原理

太陽光電集熱複合型(Photovoltaic/Thermal, PV/T)模組是將 PV 模組與太陽能集熱器利用層壓封裝或黏著技術結合在一起，其典型組成結構詳如圖 2-37 所示包含如下：

1. 隔熱保溫材料(Insulation)：在 PV/T 集熱器背面會放置或填塞熱傳導低的隔熱保溫材料，以減少熱量逸散增加集熱器保溫效果。
2. 吸收板(Absorber)：為集熱器主要結構之一，其功能為吸收 PV 模組背面熱量，通常為高導熱材料如銅或鋁材，其型式有平板式、扁盒式、波浪式、Ω 式、ω 式等。
3. 流道(Flow channels)：為集熱器主要結構之一，其利用黏著方式、超音波焊接、特殊封裝機台等與吸收板接合，運作模式以熱傳導及熱對流的方式將吸收板上的熱量待走，通常流道為高導熱材料如銅或鋁材，其型式有管排式(直管、S 彎管、扇形管)、扁盒式、鰭片式、真空管式、特殊流道式等，其流道內之流體速度與 PV/T 的熱效率為絕對關係。
4. 黏著封裝材料(Adhesives)：為 PV 模組與集熱器結合之黏著封裝材

料，其須採用高熱傳導方式製作，如高熱傳導性能 EVA、VHB、SILICONE、導熱膏、金屬奈米膠等。

5. 太陽能電池(Solar cell)：一般選用市面上商用產品，如單晶矽、多晶矽、非晶矽、微晶矽、CIGS、- 族...等。
6. 氣體隔離層(Air gap)：本結構目的為阻絕熱量逸散，以增加集熱效率。
7. 框架結構(Frame set)：具結構性且保護內部元件不受外部環境干擾(如水密、灰塵、腐蝕、熱損)。
8. 蓋板(Glazing cover)：在 PV/T 模組正面會放置或不放置高透明玻璃蓋板或高透明隔熱材，以減少熱量逸散增加集熱器保溫效果。在無蓋板的 PV/T 模組具有較高的電池效率，但集熱量不高；而有蓋板的 PV/T 模組具有較高的集熱效率，但蓋板卻會使電池效率下降。目前的應用研究中主要採用單層、雙層或無蓋板設計。^[26]實驗顯示於 PV/T 太陽電池背面管板水冷式系統中，當 PV/T 入口溫度與環境溫度相同時，且太陽日照強度 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，兩層玻璃蓋板比無玻璃蓋板集熱效率高 10%，但發電效率將降低 23%。

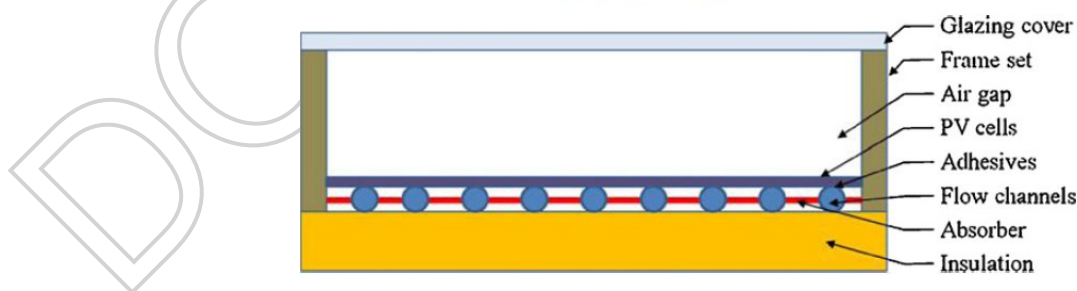


圖 2-37、典型 PV/T 模組組成結構圖^[25]

PV/T 基本原理為正面太陽電池吸收太陽光子並轉換成直流電能，其中

未被轉換成電能的太陽光子在符合能量不滅定律下，60%~70%會轉換成熱能並使 PV 模組整體溫度上升，在當下將利用太陽電池背面集熱器中的流體介質帶走太陽電池的熱量並加以儲存利用，故 PV/T 系統可同時產生電能與熱能兩種能量(如圖 2-38 所示)，以增加太陽能綜合利用效益。且 PV/T 系統可防止 PV 模組在高溫下運轉，若在一定的集熱溫度下將可提高 PV 模組的發電量效率，並且可以延長使用壽命。另外 PV/T 模組與一般 PV 模組和太陽能熱水器相比，其優點如下：

1. 在材料上可節省上蓋板、框架、支撐結構、相關安裝構件...等，故初期投資成本或安裝面積將變得更有競爭力。
2. PV/T 模組能提升太陽能綜合應用效益，即同一個單位面積下，可獲得電能與熱能兩種能源效益。
3. PV/T 系統可防止 PV 模組在高溫下運轉，且在一定的集熱溫度下將可提高 PV 模組的發電量效率，並且可以延長使用壽命。通常 PV 模組在不採取冷卻措施下，其工作溫度通常會高達 60 ~80 或更高。
4. PV/T 系統產生之熱量一般約在 40~60 ，故適合家庭用熱水、空調暖房和其他對低溫熱能有大量需求之公用、商用(游泳池)、工業用(製程預熱、乾燥)等單位。
5. 近年來各國對於太陽光電在地面設置越來越嚴謹，且在城市中，可供利用之屋頂或立面牆越來越有限，故 PV/T 模組若與建築結構結合一體型(BIPV/T)，除了得到電能與熱能(用於熱水或暖房)外，並能提高建築物外部結構的隔熱性能，以改善室內熱舒適度品質，所以 PV/T 系統的市場潛力將十分巨大。

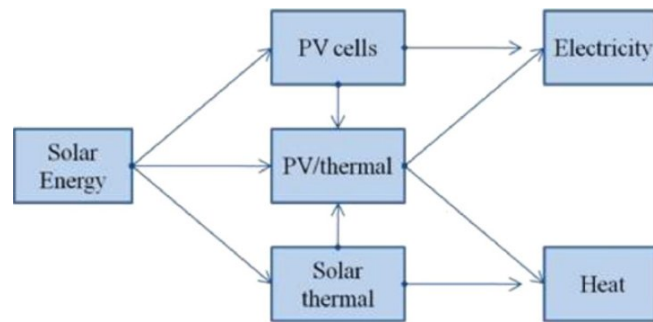


圖 2-38、不同太陽能應用^[25]

2.3.2 太陽光電集熱複合型模組種類

PV/T 系統的種類與功能有很多種，其產生之熱量一般約在 40~60℃，故適合家庭用熱水、空調暖房和其他對低溫熱能有大量需求之公用、商用(游泳池、自然通風、空調暖房)、工業用(製程預熱、乾燥)...等單位，詳如圖 2-39 所示。應用在集熱或散熱之 PV/T 上大致上可分為氣態型、液態型、熱泵型、真空管型、拋物面型幾種類型，此五種型式 PV/T 又可在其結構上方表面分有蓋板和無蓋板型式，另外此五種型式 PV/T 也經常透過熱傳介質(常用的有水、空氣、乙二醇等)做熱傳導和熱對流以達到散熱與儲熱之目的。在則 PV/T 模組在物理結構上，大致也可分為平板型、建築物整合型、聚光型。以下將針對應用在集熱散熱 PV/T 模組做介紹：

1. 氣態型 PV/T：

一般氣態型 PV/T 集熱器大多與商用 PV 模組或 BIPV(Building integrated Photovoltaic)模組結合，並在 PV 模組上方或下方做自然或機械強制通風流道結構。其中，氣態型 PV/T 常用於增加 PV 發電量效率，另外也常與建築物做整合，設置於立面牆、斜面或屋頂上(如圖 2-40 所示)，並且可將其熱能拿來做自然通風效應、空調暖房、低溫製程預熱、乾燥等。圖 2-41 為習用幾款氣態型 PV/T 模組型式，

本研究分別以下命名之：

- (1) 圖 2-41-(a)：無蓋板背面流道式氣體型 PV/T 模組。
- (2) 圖 2-41-(b)：無蓋板背面流道間接吸收式氣體型 PV/T 模組。
- (3) 圖 2-41-(c)：單層透明蓋板背面流道式氣體型 PV/T 模組。
- (4) 圖 2-41-(d)：雙層透明蓋板背面流道式氣體型 PV/T 模組。
- (5) 圖 2-41-(e)：單層透明蓋板雙流道式氣體型 PV/T 模組。
- (6) 圖 2-41-(f)：單層透明蓋板雙流道間接吸收式氣體型 PV/T 模組。

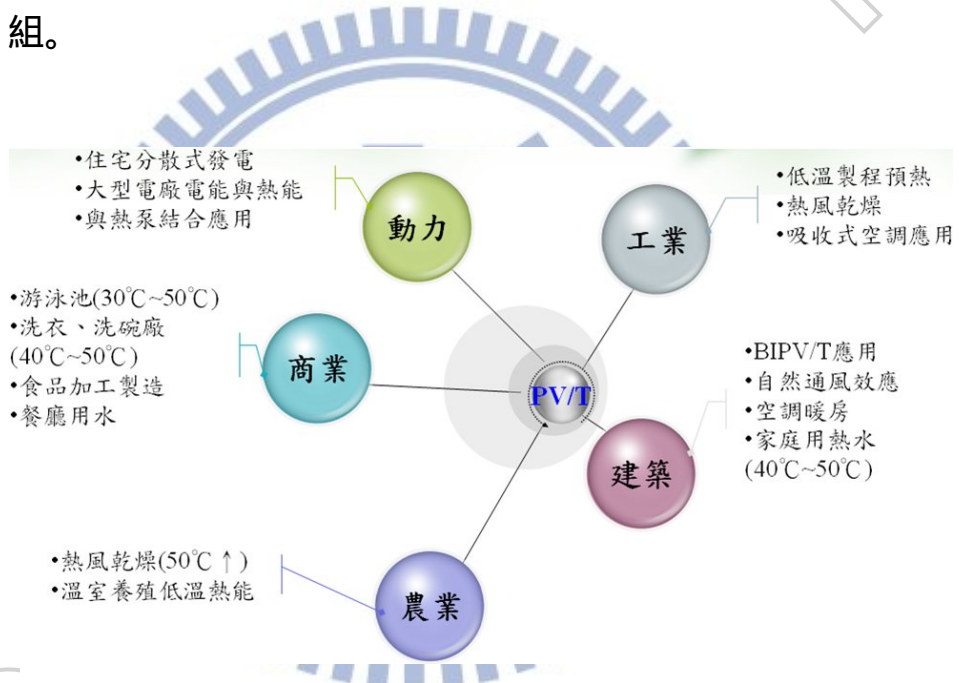


圖 2-39、PV/T 應用於各種產業歸納圖

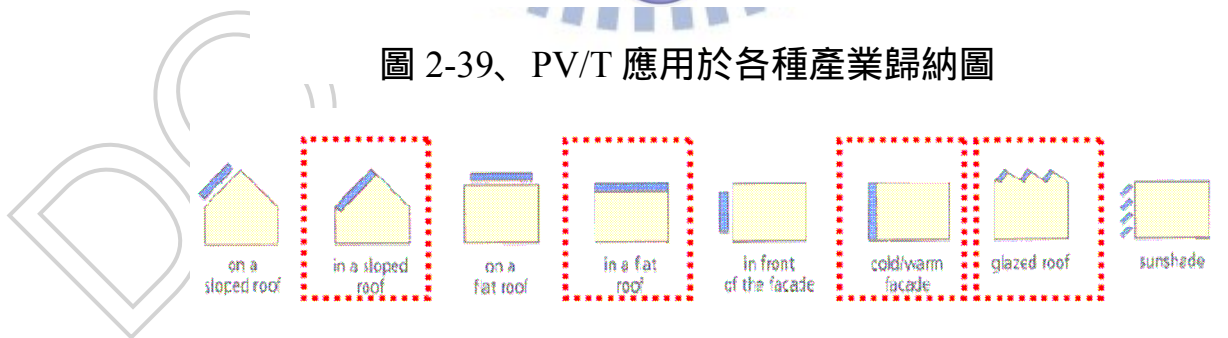


圖 2-40、PV/T 與建築構造潛在設置地點

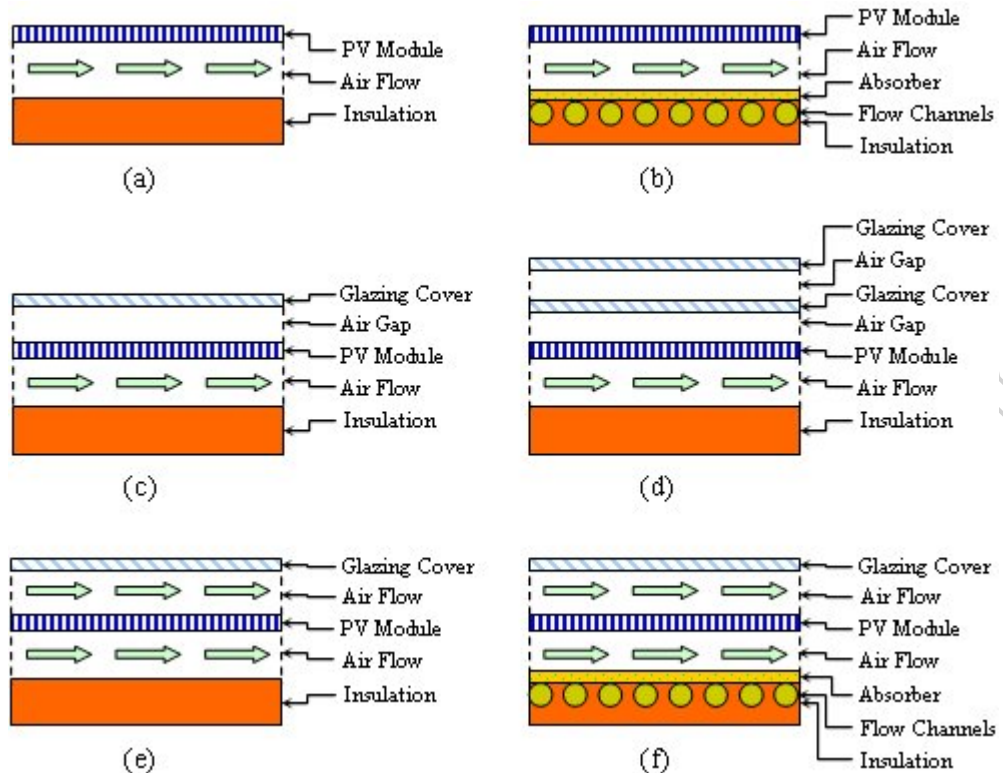


圖 2-41、各種氣體型 PV/T 模組型式

2. 液態型 PV/T :

一般液態型 PV/T 集熱器的熱傳性能比氣態型 PV/T 集熱器佳，因此液態型 PV/T 模組集熱效率遠比氣態型 PV/T 模組高。在液態型 PV/T 模組其典型結構常為平板式集熱器如圖 2-37 所示，其集熱器吸收板上方平面與 PV 模組背面相結合，其下方常與高導熱材料如銅或鋁管材結合，流體介質則通入管板內，經由熱傳導和熱對流吸收太陽能熱量，並且在一定的集熱溫度下增加 PV 發電效率。圖 2-42 為習用幾款液態型 PV/T 模組型式，本研究將分別以下命名之：

- (1) 圖 2-42-(a) : 無蓋板扁盒式液體型 PV/T 模組。
- (2) 圖 2-42-(b) : 有透明蓋板扁盒式液體型 PV/T 模組。
- (3) 圖 2-42-(c) : 無蓋板管排式液體型 PV/T 模組。
- (4) 圖 2-42-(d) : 有透明蓋板管排式液體型 PV/T 模組。

- (5) 圖 2-42-(e) : 雙層透明蓋板流道式液體型 PV/T 模組。
- (6) 圖 2-42-(f) : 單層透明蓋板自由流動式液體型 PV/T 模組。
- (7) 圖 2-42-(g) : 雙層透明蓋板流道管排複合式液體型 PV/T 模組。
- (8) 圖 2-42-(h) : 雙層透明蓋板雙層吸收式液體型 PV/T 模組。

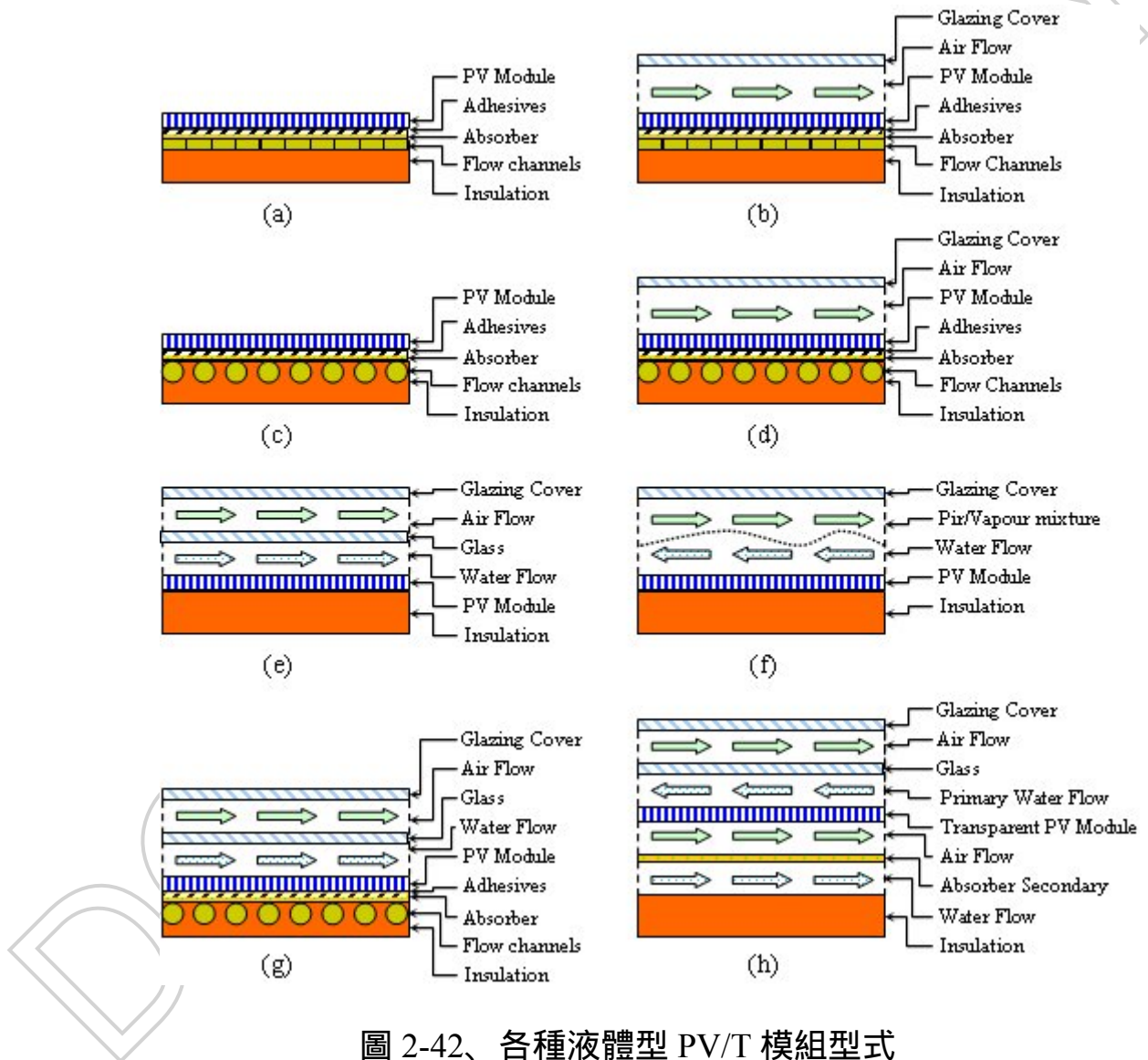


圖 2-42、各種液體型 PV/T 模組型式

2.3.3 太陽光電集熱複合型系統性能評估指標

目前的相關研究與文獻中提到，在 PV/T 系統眾多參數中，要使 PV/T

系統發電或集熱效率提升的重要參數有集熱器結構樣式、集熱器材質的熱傳導率、循環介質流量、循環介質入口溫度、太陽輻射量、蓋板數量、PV 模組與集熱器接合的熱阻、太陽電池是否透光、太陽電池的效率、管排的 尺寸與數量、設置方位與傾斜角度...等。另外 PV/T 模組型式就如本文中提 到有很多種，在此將針對本研究之管板式液體型 PV/T 系統做討論。

1. 綜合性能效率分析：

PV/T 系統性能的指標除了系統本身的能力外，也因為系統同時 產生電能與熱能，導致評估比較時較複雜，故需要一種標準的評估 方式來評估系統的綜合性能，它等於 PV/T 系統電效率與熱效率的加 總，其可用下列(2.15)方程式表示：

$$\eta_o = \eta_e + \eta_t \quad (2.15)$$

式中：

η_o : PV/T 系統輸出綜合效率，即 PV/T 系統所有能量效益；(%)

η_e : PV/T 系統發電效率；(%)

η_t : PV/T 系統集熱效率；(%)

但是很多研究人員或許會質疑電效率與熱效率是不等效的，故 以相加方式表示會較突兀，故 B.J. Huang 提出了另一種 PV/T 系統電 效率與熱效率的綜合等效能源效率(Primary-Energy Saving)，即假設 電能與熱能均以同一種傳統能源轉換得到，其可用下列(2.16)方程式 表示^[7]：

$$\eta_f = \eta_t + (\eta_e / \eta_{power}) \quad (2.16)$$

式中：

η_f : PV/T 系統綜合等效能源效率(Primary-Energy Saving) ; (%)

η_{power} : 為一般標準火力發電廠的發電效率，一般以 0.38 代入 ; (%)

另外也有學者^[25]提到電能和熱能在能量上的評價等級有所差別，如果 PV/T 系統產生的熱能是用來熱力循環作工，則可利用「焓」值來評價等效性能，即將低級別的熱能透過卡諾循環(Carnot cycle)理論算出熱能「焓」值，在把高級別的電能也透過卡諾循環(Carnot cycle)理論算出電能「焓」值，再把兩者做比較。PV/T 系統輸出熱能「焓」值(e_o)，其可用下列(2.17)方程式表示：

$$\begin{aligned} e_t &= \eta_c \cdot Q_t \\ &= \eta_c \cdot \eta_i \cdot G \\ &= \xi_t \cdot G \end{aligned} \quad (2.17)$$

式中：

e_t : PV/T 系統輸出熱能「焓」值

η_c : 卡諾循環效率 ; (%)

G : 太陽日照強度 ; (W/m^2)

ξ_t : 熱能「焓」值係數

(2.17)方程式中， η_c 為卡諾循環效率，其可用下列(2.18)方程式表示：

$$\eta_c = 1 - \left(\frac{293K}{293K + (t_{vm} - t_a)} \right) \quad (2.18)$$

式中：

t_{wm} : 流體介質的終點溫度 ; ()

t_a : 環境溫度 ; ()

PV/T 系統輸出電能「焓」值(e_e) , 其可用下列(2.19)方程式表示 :

$$\begin{aligned} e_e &= \eta_e \cdot G \\ &= \xi_e \cdot G \end{aligned} \quad (2.19)$$

式中 :

e_e : PV/T 系統輸出電能「焓」值

ξ_e : 電能「焓」值係數

PV/T 系統輸出總「焓」值(e_o) , 其可用下列(2.20)方程式表示 :

$$\begin{aligned} e_o &= e_t + e_e \\ &= (\xi_t + \xi_e) \times G \\ &= \xi_o \cdot G \end{aligned} \quad (2.20)$$

式中 :

e_o : PV/T 系統輸出總「焓」值

ξ_o : 總「焓」值係數

(2.20)方程式中, ξ_o 為總「焓」值係數, 其可用下列(2.21)方程式表示 :

$$\xi_o = (\eta_c \times \eta_t) + \eta_e \quad (2.21)$$

2. 熱能效率分析 :

影響 PV/T 集熱性能的因素有很多, 例如環境溫度、日照強度、初始水溫、循環介質流量、集熱器面積...等, 且對一般 PV/T 系統來說, 其發電效率大部分遠低於集熱轉換效率, 故評價 PV/T 系統的優

略在很大程度上是由集熱效率來決定。其中 PV/T 集熱效率(η_t)是指單位集熱面積輸出的熱量與太陽輻射日照強度之比，其可用下列

(2.22)方程式表示：

$$\begin{aligned}\eta_t &= \frac{V \times \rho \times C_p \times (T_f - T_i)}{G \times A_t} \\ &= \frac{m \times C_p \times (T_f - T_i)}{G \times A_t} \\ &= \frac{Q_t}{G \times A_t}\end{aligned}\tag{2.22}$$

式中：

G : 太陽日照強度；(W/m²)

A_t : 有效集熱器面積；(m²)

V : 每秒流過的體積；(m³/s)

ρ : 流體介質的密度；(kg/m³)

C_p : 流體介質的比熱；(kJ/kg-)

m : 流體介質的流量；(kg/s)

T_f : 測試期間儲水槽最終水溫；()

T_i : 測試期間儲水槽初始水溫；()

Q_t : PV/T 系統輸出的熱量；(kJ)

3. 電能效率分析：

在 PV/T 的電能效率主要是由太陽電池本身效率來決定，但在一

定散熱工作溫度下也會提升發電效率。其中 PV/T 發電效率(η_e)是指單位發電面積輸出的電能與太陽輻射日照強度之比，其可用下列

(2.23)方程式表示：

$$\begin{aligned}\eta_e &= \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{G \times A_e} \\ &= \frac{Q_e}{G \times A_e}\end{aligned}\quad (2.23)$$

式中：

V_{mp} ：最大功率點電壓；(V)

I_{mp} ：最大功率點電流；(A)

A_e ：太陽光電模組面積；(m²)

Q_e ：PV/T 系統輸出的電能；(W)

第三章 系統模擬分析

3.1 TRNSYS 軟體簡介

TRNSYS(Transient System Simulation)是模組化的動態仿真模擬軟體，早是由美國威斯康辛(Wisconsin)大學 Solar Energy 實驗室所開發的，後來在歐洲的一些研究所，如法國的建築技術與科學研究中心(CSTB)、德國的太陽能技術研究中心(TRANSSOLAR)等共同努力研究下逐步修正完善，另外美國的熱能研究中心(TESS)也針對空調系統做出各種模組化。所謂模組化，即認為所有系統均由若干個小的系統（即模組）組成，一個模組實現一個特定的功能，因此，在對系統進行類比分析時，只要調用實現這些特定功能的模組，給定輸入條件，就可以對系統進行類比分析。某些模組在對其他系統進行類比分析時同樣用到，此時，無需再單獨編程式來實現這些功能，只要調用這些模組，給與其特定的輸入條件就可以了。瞬間系統仿真程式（Transient System Simulation Program TRNSYS）可用於 HVAC 系統分析、尺寸定位、太陽能設計、自然採光、建築物的熱性能及控制方案等分析，並且利用組成程式處理天氣輸入或其他與時間有關的壓力函數及仿真結果輸出。由於它利用了模擬法，所以在不同的複雜程度下仿真多種熱系統很靈活，其所提供的能源代碼及文獻為用戶修改或把非標準構建添加到程式庫中提供了簡便方法。它可以在任一支援標準 FORTRAN77（DOS、Unix、VMS）的平臺中使用，並且可建立自己所需的特製元件模組。

TRNSYS 軟體應用的領域很廣，且可對多種系統的運行狀況進行動態模擬，其主要應用分別有：

1. 太陽能系統分析模擬(太陽熱能、太陽電能)。
2. 建築物能耗分析模擬。
3. 優化空調、通風系統設計方案，預測系統運行費用。
4. 蓄冷、敘熱系統分析模擬。
5. 冷熱發電系統、燃料電池系統分析模擬。

圖 3-1 為 TRNSYS 軟體操作介面，其中間主要編輯區為 TRNSYS 內建太陽熱水系統模型範例，左半部為快捷元件按鈕，另外右半部為軟體本身內建資料元件模組資料庫(包含氣象資料模組、設備模組、各項輸出模組、運算模組等)。

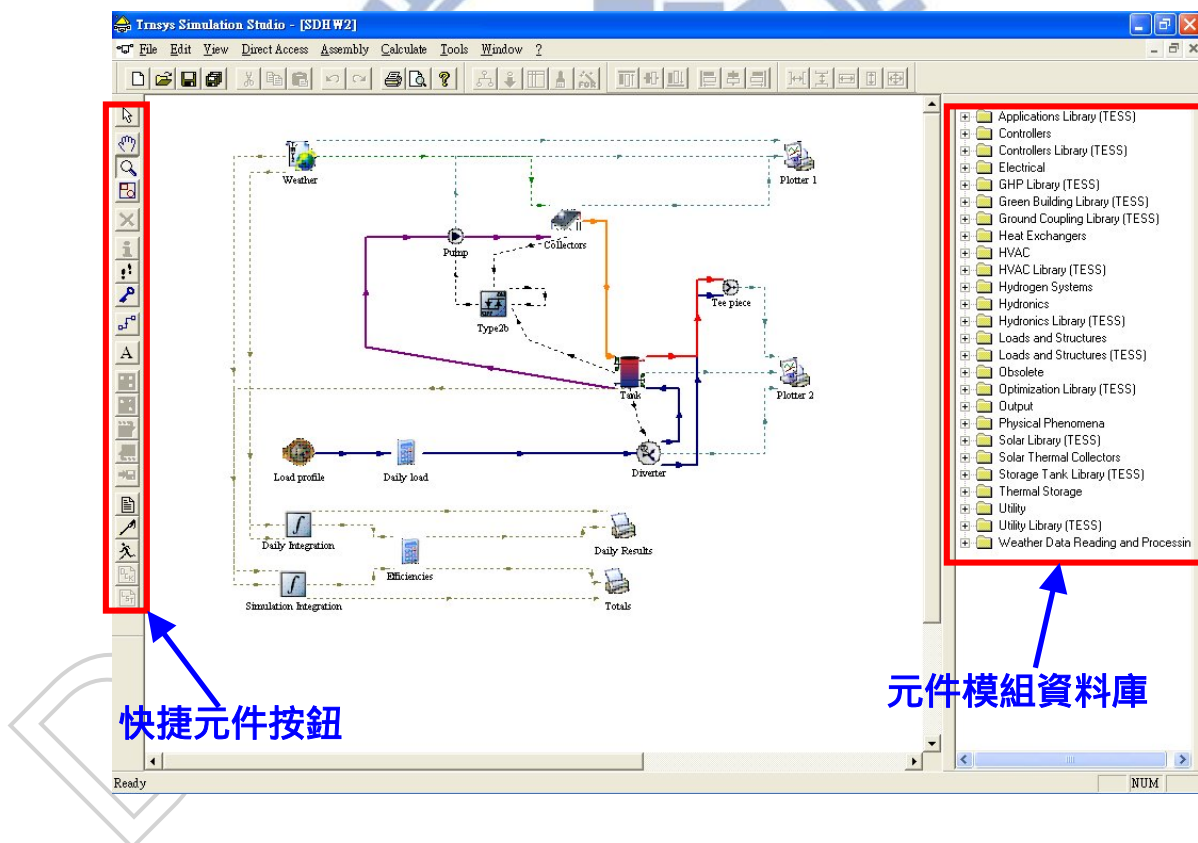


圖 3-1、TRNSYS 軟體操作介面

3.2 氣象資料簡介

TMY(Typical Meteorological Years)^{[27][28]}是由美國再生能源實驗室

(National Renewable Energy Laboratory, NEAR) 根據國際太陽日輻射資料庫 (National Solar Radiation Data Base, NSRDB) 之氣象資料庫開發而來，目前所使用之 TMY2 標準氣象年是 NEAR 於 1995 年改進 TMY 對候選月選取之權重係數而成。其製作方法可分為兩種形式，第一種是由真實氣象資料所構成，即透過氣象局長期監測氣象資料，選取在氣候長期變動和耗能特性上，最具代表的氣象資料，成為一個「平均氣象年」。第二種是由各月份氣象要素中選取最具代表性的「平均月」，再將十二個平均月份數據結合成一個「平均氣象年」。

所謂「平均氣象年」(Average Year Weather Data)，是足以精確地掌握氣象變化特性並解析出符合當地氣候的建築耗能情形，且需具備長期氣候代表性，以代表氣候平均年的變異狀況，因此一個完整的年氣象資料應該包含 8760 小時的氣象資料。而氣象年當中的氣象要素必須是對熱負荷計算有影響的氣候因子，其包含如下表 3-1 所示 24 種逐時氣象資料。

表 3-1、TMY2 各種逐時氣象資料^[29]

Element		Data Completeness	
		Class A	Class B
Extraterrestrial Horizontal Radiation	大氣圈外水平輻射量	1	1
Extraterrestrial Direct Normal Radiation	大氣圈外直射輻射量	1	1
Global Horizontal Radiation	水平輻射量	1	1
Direct Normal Radiation	直射輻射量	1	1
Diffuse Horizontal Radiation	水平漫射輻射量	1	1
Global Horizontal Illuminance	水平照度	1	1
Direct Normal Illuminance	直射照度	1	1
Diffuse Horizontal Illuminance	水平漫射照度	1	1
Zenith Luminance	最大亮度	1	1
Total Sky Cover	天空所有遮蔽總量	1	1
Opaque Sky Cover	天空不透光遮蔽量	1	1

Dry Bulb Temperature	幹球溫度	1	1
Dew Point Temperature	露點溫度	1	1
Relative Humidity	相對濕度	1	1
Atmospheric Pressure	大氣壓力	1	1
Wind Direction	風向	1	1
Wind Speed	風速	1	1
Horizontal Visibility	能見度	2	2, 3, 4
Ceiling Height	雲層高度	2	2, 3, 4
Present Weather	目前天氣	2	2, 3, 4
Precipitable Water	降雨量	1	1
Broadband Aerosol Optical Depth	氣溶膠光學厚度	1	1
Snow Depth	積雪深度	1	5
Days Since Last Snowfall	降雪量	1	5
Notes:			
1. Serially complete, no missing data.			
2. Data may be present only every third hour.			
3. Nighttime data may be missing.			
4. Data may be missing for up to 47 hours.			
5. Serially complete, except for Colorado Springs, CO.			

台灣的「平均氣象年」是由林憲德教授於 1987 年所建立的（林憲德，1987.04），其內容具備建築耗能解析上必備的氣溫、濕度、日射量、雲量、風向、風速等 8760 小時逐時的氣象資料。它由 10 年長期氣象中選取在氣候長期變動和耗能特性上最具代表性和平均性的 12 個月份的氣象資料所組成。以它來作為耗能解析的輸入資料，較能保證其解析所得的耗能量具有長期的平均代表性。現在「平均氣象年」資料具備台北、台中、台南、高雄、花蓮、台東等六處資料檔，同時已經被轉換成 DOE 程式的輸入格式，而廣為一些大學所使用。

如圖 3-2 所示為典型 TMY2 之格式，其中每列為逐時氣象資料，共 142 個字元，其編輯順序分別為年、月、日、時、大氣圈外水平輻射量、大氣

析。

在建立本 Type-1 液態型 PV/T 系統模擬專案時，首先要先確定所需元件模組，其中包含 Type-1 PV/T 模組、儲水桶模組、氣象資料模組、水泵模組、水泵控制器模組...等(如表 3-2 所示)。

表 3-2、TRNSYS 元件模組資料表

項次	主類別	子類別	模組型號	圖式	功能說明
1	Green Building Library(TESS)	PVT Collectors	Type563		PV/T 模組
2	Thermal Storage	Stratified Storage Tank	Type4		儲水桶模組
3	Weather Data Reading and Processing	Standard Format	Type109		氣象資料模組
4	Hydronics	Pumps	Type3		水泵模組
5	Controllers	Differential Controller w Hysteresis	Type2		水泵控制器模組
6	Output	Printer	Type25		輸出模組
7	Output	Online Plotter	Type65		繪圖模組
8	Utility	Integrators	Type24		數據整合模組
9	Hydronics	Pipe_Duct	Type31		管路模組
10	Utility	Forcing Function	Type14		時序控制模組

第二步驟是將所需元件模組從 TRNSYS 視窗左邊的元件模組資料庫拖曳至專案圖面上，並按照設計所需位置適當擺設(如圖 3-3 所示)。

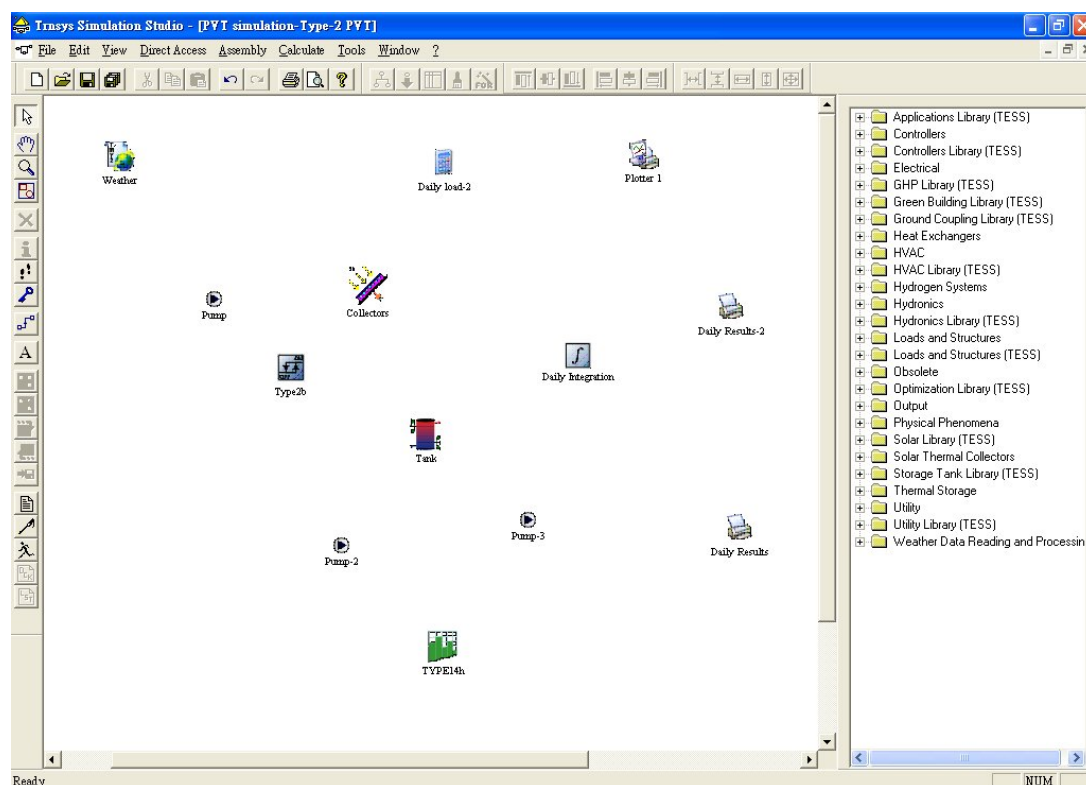


圖 3-3、設計元件模組擺設圖

第三步驟是將每個元件模組輸出端與輸入端依邏輯關聯性相互連結(如圖 3-4 所示)。因此若系統設計不同關聯連結時，整個模擬結果亦隨之改變。

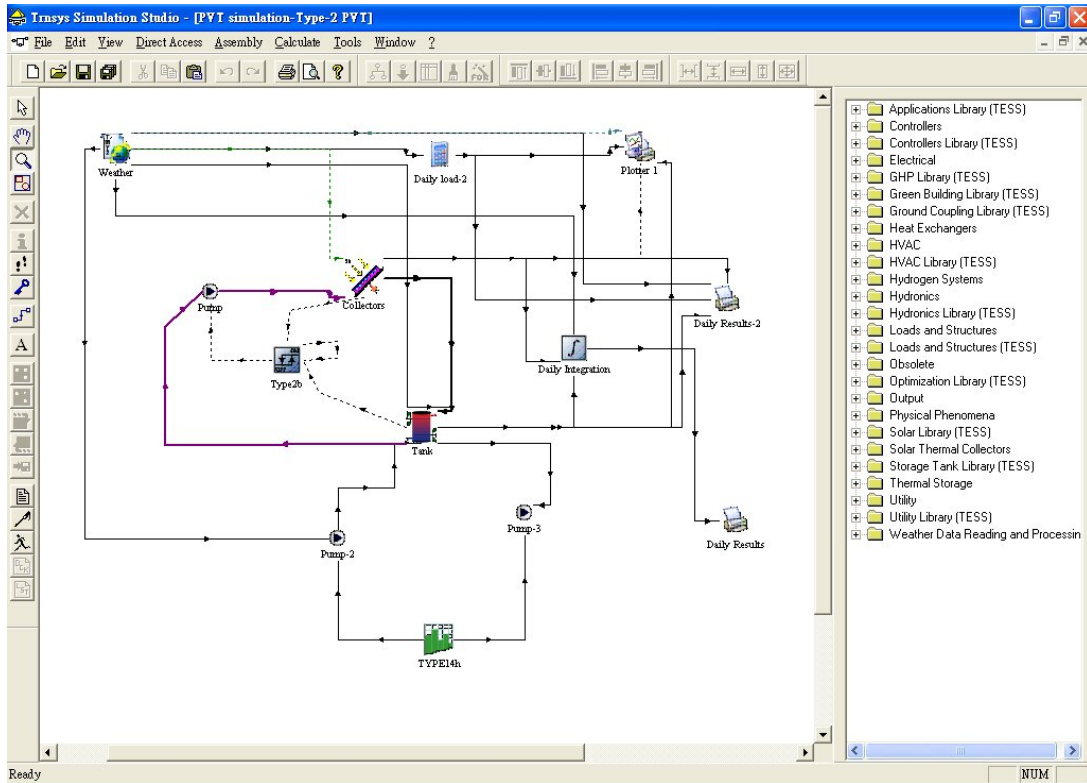


圖 3-4、Type-2 PV/T 系統雛型圖

第四步驟是選取每個元件模組，並個別設定其參數(包含 Parameter、Input、Output...等)，如圖 3-5 所示為 PV/T 模組範例。

The screenshot shows the 'Collectors' parameter setting window in Trnsys Simulation Studio. The window has tabs for Parameter, Input, Output, Derivative, Special Cards, External Files, and Comment. The 'Parameter' tab is active, displaying a table of parameters for a PV/T collector.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
14	Reflectance	0.01	Fraction	Mcoe...		
15	Emissivity	0.95	Fraction	Mcoe...		
16	1st order IAM	0.1	-	Mcoe...		
17	PV cell reference temperature	25	C	Mcoe...		
18	PV cell reference radiation	1000	W/m ²	Mcoe...		
19	PV efficiency at reference condition	0.1414	Fraction	Mcoe...		
20	Efficiency modifier - temperature	-0.0042	1/C	Mcoe...		
21	Efficiency modifier - radiation	0.000025	h.m ² /kJ	Mcoe...		

圖 3-5、元件模組參數設定操作介面

第五步驟是選取各元件模組之連接線,並設定關聯性邏輯連結(如圖 3-6 所示)。

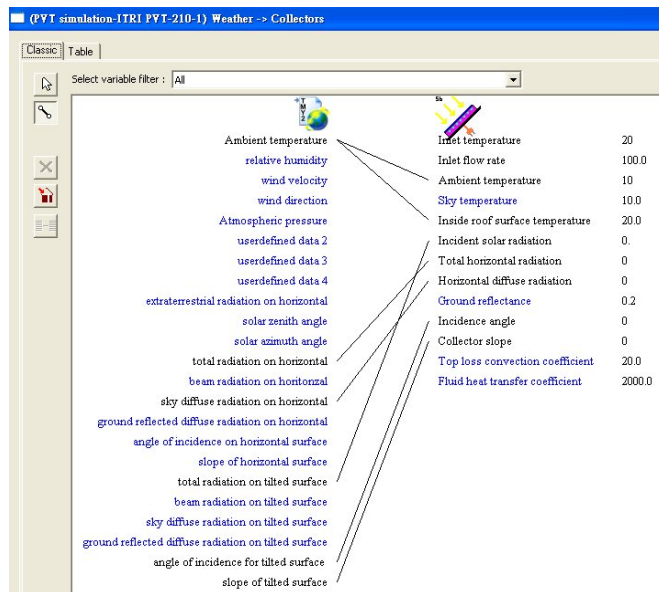


圖 3-6、各元件模組之連接線設定介面

第六步驟首先點選到氣象資料模組並進入參數設定視窗中,選擇 External Files 在瀏覽到指定的 TMY2 路徑,如圖 3-7 所示。在來須設定每日暫態模擬起始與結束區間時程,如圖 3-8 所示。

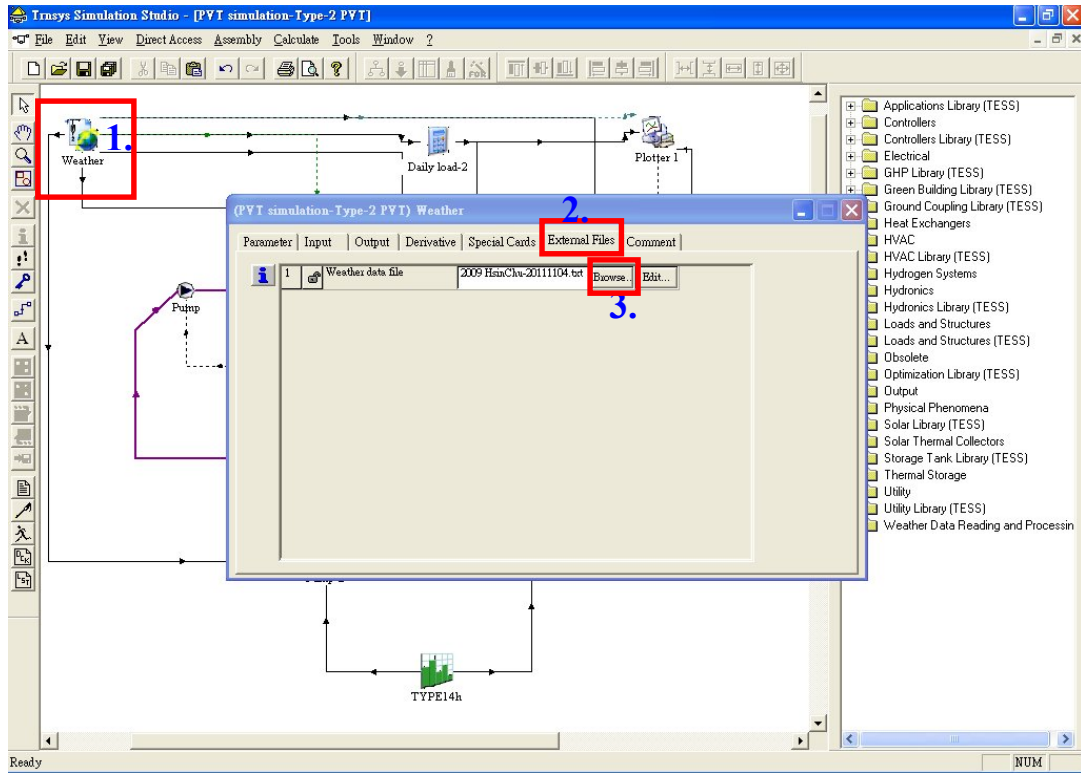


圖 3-7、輸入 TMY2 氣象資料介面

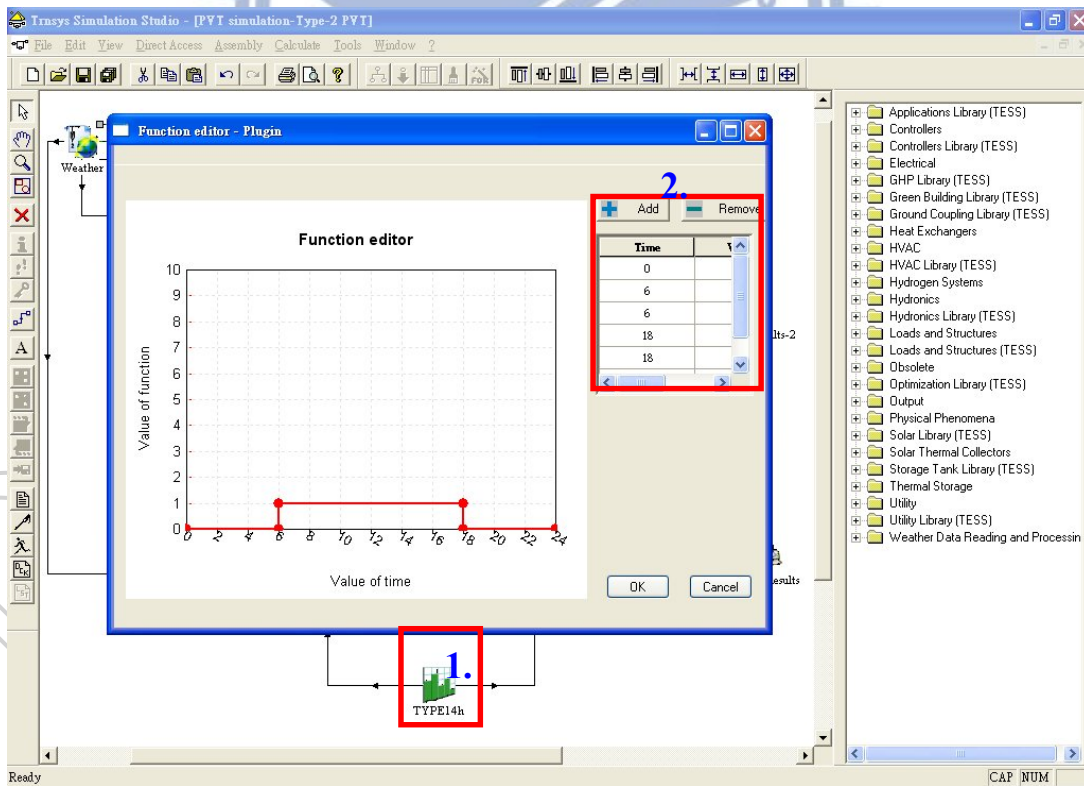


圖 3-8、設定暫態模擬起始與結束區間時程介面

第七步驟最後即可按 F8 進行模擬運算(如圖 3-9 所示為輸出模擬結果)，最後即可得到日射量、PV/T 發電量、PV/T 發電效率、PV/T 儲熱量、PV/T 儲熱效率、PV/T 總效率等。若出現錯誤資訊，可透過 List File 錯誤來源表修正各項步驟或參數。



圖 3-9、TRNSYS 模擬輸出介面

第四章 實驗設計與封裝

4.1 PV/T 模組開發

研究 PV/T 模組最主要是希望能提升太陽能綜合應用的效益，另外再生能源熱利用獎勵補助辦法中，明訂太陽能熱水器性能標準須大於等於 50%，故本研究將開發製作 PV/T 系統能源綜合效率(電能+熱能)大於 50% 為指標。然而開發 PV/T 模組的關鍵在於確保 PV 模組與集熱器之間是否有良好的結合、集熱器管道設計(管數、管徑、流道配置、材質)、封裝黏著材料其須具備高熱傳導性與極佳的電絕緣能力，另外在保溫能力方面也是決定集熱效率重點的要因。

本實驗將開發三款不同設計型式之無蓋板液態型 PV/T 模組，並選取日本 Kyocera 太陽光電模組(型號：KD210GH-2P)進行加工製作，其中，此片 PV 模組原始標準測試環境(STC)下之規格特性如表 4-1 所示。

表 4-1、Kyocera 太陽光電模組規格特性

Kyocera	
Model	KD210GH-2P
Cell	Polysilicon
No. of Cells	54
Maximum Power (W)	210
Optimum Power Voltage (Vmp)	26.6
Optimum Operating Current (Imp)	7.9

Open Circuit Voltage (Voc)	33.2
Short Circuit Current (Isc)	8.58
Cell Efficiency (%)	15.98
Module Efficiency (%)	14.14
Size (mm×mm×mm)	1500×990×40
Weight (kg)	18.5
Certification	IEC 61215 ISO 9806-1
STC(光照度：1000 W/m ² 、光譜分佈：AM1.5、PV 模組 溫度：25 、相對溼度 75%)	

另外在 PV/T 加工製作前，已將 4 片 Kyocera 太陽光電模組送至 IEC61215 認證實驗室，進行相關電性特性測試(測試數據如表 4-2 所示)，以便後續實驗比對其發電效率性能之相對誤差。

表 4-2、Kyocera 實際電性特性測試規格特性

Kyocera				
SER NO.	7200	7201	7202	7203
Maximum Power (W)	207.519	209.652	209.044	207.994
Optimum Power Voltage (Vmp)	26.65	26.96	26.93	26.89
Optimum Operating Current (Imp)	7.78	7.77	7.76	7.73
Open Circuit Voltage (Voc)	33.22	33.29	33.24	33.15
Short Circuit Current (Isc)	8.46	8.48	8.48	8.44
Module Efficiency (%)	13.974%	14.118%	14.077%	14.006%
PV/T TYPE	TYPE-2	對照組	TYPE-3	TYPE-1

4.1.1 PV/T 模組設計

本 PV/T 模組為了達到設定綜合能源效率(電能+熱能)大於 50%指標，首先定義本 PV/T 模組之熱量設計概念屬於中低溫(30 (冬天)~60 (夏天)，在台灣北部地區)使用，此舉是為了盡量不影響原來 PV 之發電效率，

並且希望能在一定的集熱溫度下提升或不降低發電量。

首先本實驗選定最大功率 210W 之 Kyocera 太陽光電模組當作基材,在來利用 Solidworks 3D(如圖 4-1 所示)、AutoCAD 2D(如圖 4-2 所示)、TRNSYS、Flow Simulation 等軟體設計三款不同型式之無蓋板液態型 PV/T 模組。其中包含 Type-1 無蓋板直管超音波液態型 PV/T、Type-2 無蓋板 S 管歐姆式液態型 PV/T、Type-3 無蓋板直管歐姆式液態型 PV/T 等三種形式。

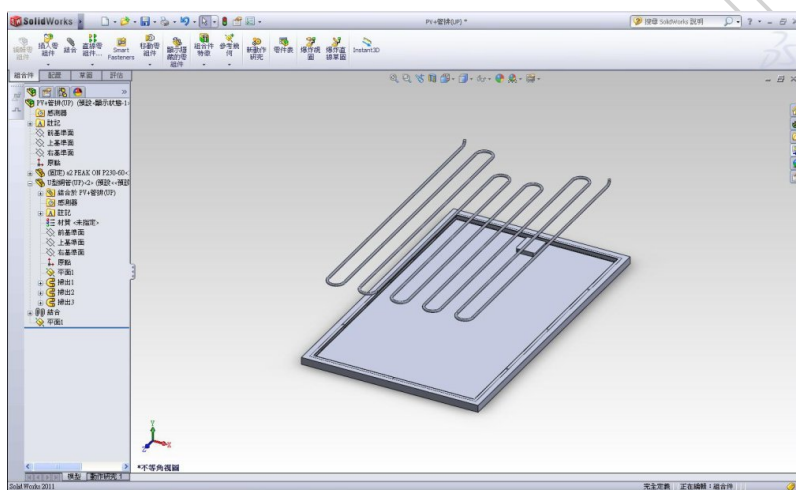


圖 4-1、Solidworks 3D 設計模擬介面

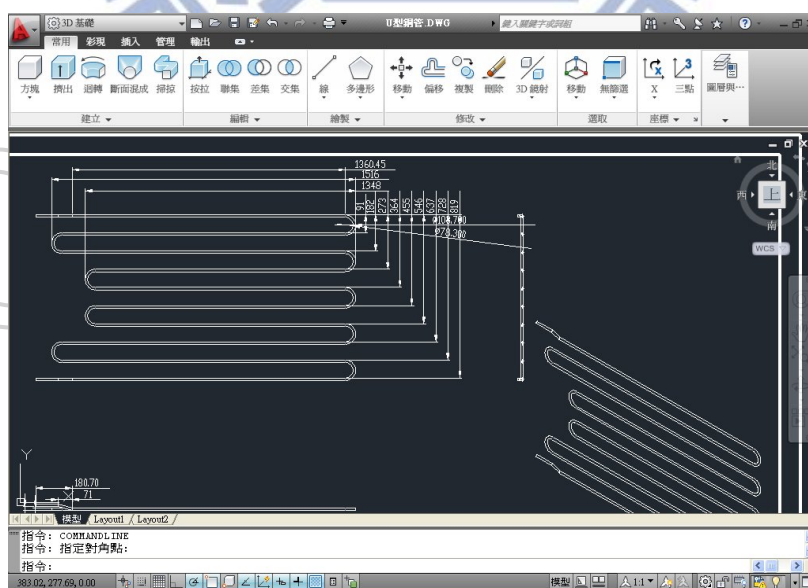


圖 4-2、AutoCAD 2D 設計模擬介面

在則，本實驗對於 PV 模組與集熱器之間封裝製程方式，初步評估有以下三種方式，第一種為一般製造 PV 模組所使用之熱壓封裝機，並搭配 EVA、PVB 或 TPT 等封裝膠合材料，本製程方式優點為黏著緻密性最佳，且具有良好的電絕緣能力，但其缺點為製程成本高，不易與市面上 PV 模組做二次加工。第二種為超音波焊接製程，本方式為一般熱水器業界所大量使用之製程方式，其優點為製作量產快速、技術成熟、熱傳導性佳，其缺點為超音波焊接點較易受外力影響導致焊道脫離。第三種為所有高導熱性能黏膠封裝製程，其優點為簡易方便、初期投資成本較低，其缺點為投入工時較長、熱傳導性較差。

最後本實驗另一向重點在於保溫環節，固也選擇幾種保溫材料，其規格特性如表 4-3 所示，一其隔熱特性選擇 Phenovaboard 材料。

表 4-3、保溫材料規格特性

項目	材質	熱傳導係數(W/mk)
1	活性碳發泡軟木	0.036~0.04
2	岩棉	0.034~0.41
3	6P 陶瓷棉	0.034~0.36
4	矽酸鈣板	0.24
5	Phenovaboard	0.019

4.1.2 PV/T 模組封裝加工

本研究屬於學術性研究，且熱壓封裝製程屬於商業運作行為，經過綜合評估封裝製程方式選擇超音波焊接製程搭配高性能黏膠封裝製程共同完成製作。以下圖 4-3 為本 PV/T 模組封裝加工流程：

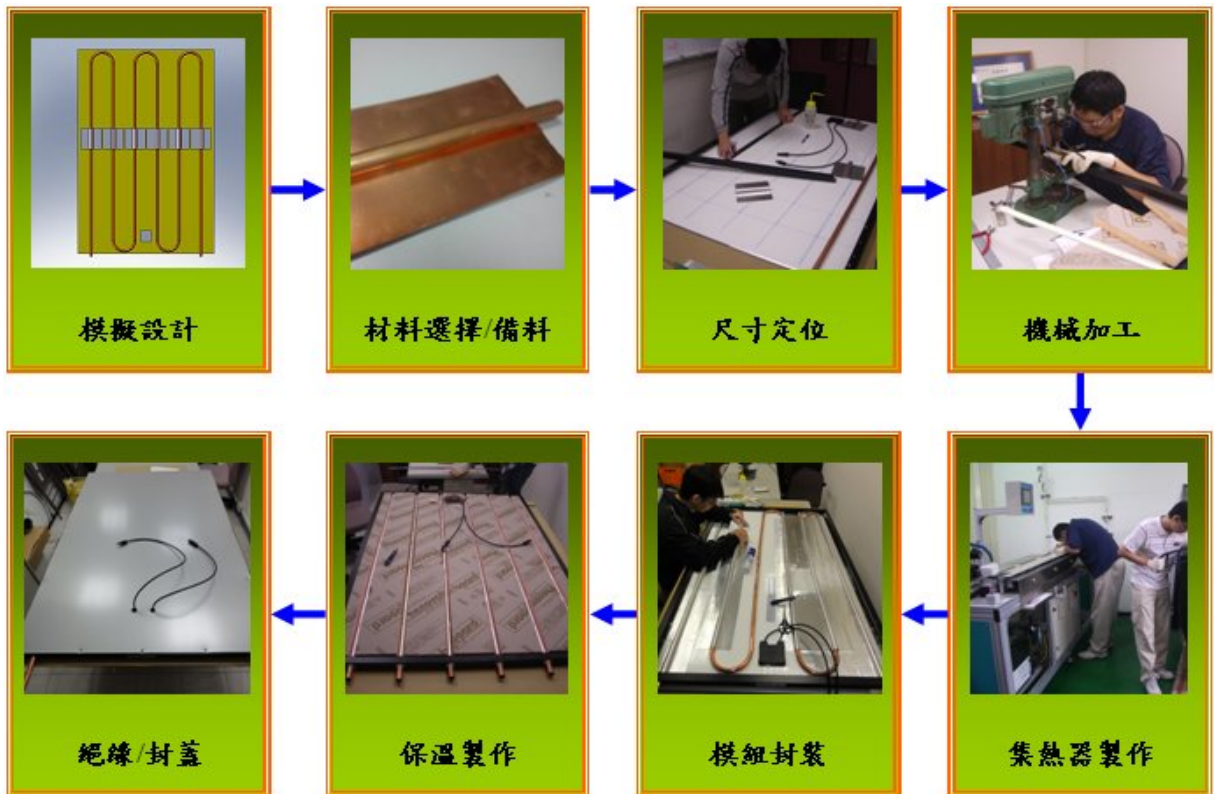


圖 4-3、PV/T 模組封裝加工流程圖

以下將分別對三種不同設計型式 PV/T 做說明：

1. Type-1 無蓋板直管超音波液態型 PV/T

此款設計結構如圖 4-4 所示採無蓋版型式，其詳細說明如下：

- (1) 首先在集熱器結構方面採用管板式流道結構，故將流道【採用 4 分(12.6mm)直型銅管(管長 154cm、管壁厚 1mm)】置中擺放於吸收板【採用厚度 0.15mm 銅片(規格 142 x 9.7 cm)】上，並利用超音波焊接製程結合成一組(如圖 4-5 所示)，後續取 10 組相同規格併聯排列結合成一式集熱器，其中，上方管排右側作為入水口左側封閉，下方管排右側封閉左側作為出水口。
- (2) 在來以 Kyocera 太陽光電模組當作基材並與集熱器封裝膠合，其中封裝方式以高導熱性能黏膠施做處理。

(3) 最後採用 Phenovaboard 隔熱材料做保溫，並於上方在施做絕緣水密封膠步驟，最後外表在封上一層塑鋁板及貼附銘牌(如表 4-4 所示)即完成整個製造作業。

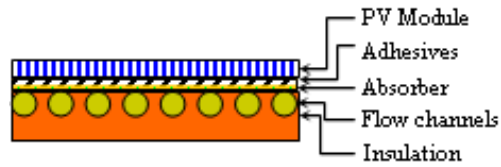


圖 4-4、Type-1 PV/T 結構圖

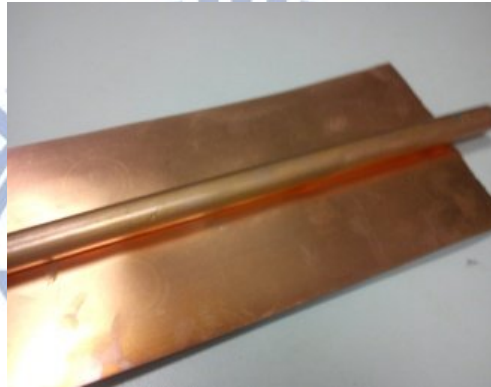


圖 4-5、管板式結構圖

表 4-4、Type-1 PV/T 規格銘牌

Type-1 PV/T	
Model	Type-1
Cell	Polysilicon
No. of Cells	54
Maximum Power (W)	210

Optimum Power Voltage (Vmp)	26.6
Optimum Operating Current (Imp)	7.9
Open Circuit Voltage (Voc)	33.2
Short Circuit Current (Isc)	8.58
Cell Efficiency (%)	15.98
Module Efficiency (%)	14.14
Size (mm×mm×mm)	1500×990×40
Weight (kg)	50
Thermal Efficiency (%)	60.55
NOCT ()	47±2
電性能在 STC 下測得，熱性能在 NOCT 下測得。	

2. Type-2 無蓋板 S 管歐姆式液態型 PV/T

此款設計結構如圖 4-6 所示採無蓋版型式，其詳細說明如下：

- (1) 首先在集熱器結構方面採用串聯管板式流道結構，故將流道【採用 6 分(18mm)S 型一體化銅管(管長 875cm、管厚 1mm)】置中擺放於 Ω 吸收板【採用 0.15mm 厚度鋁片(規格 15.6 x 15.6 cm)】槽內，並利用高導熱性能黏膠結合(如圖 4-7 所示)，其中每列用 9 片 Ω 型吸收板施做，全部共 6 排，總計 54 片 Ω 型吸收板組成一式集熱器，其中，上方管排右側作為入水口左側作為出水口。
- (2) 在來以 Kyocera 太陽光電模組當作基材並與集熱器封裝膠合，其中封裝方式以高導熱性能黏膠施做處理。
- (3) 最後採用 Phenovaboard 隔熱材料做保溫，並於上方在施做絕緣水密封膠步驟，最後外表在封上一層塑鋁板及貼附銘牌(如表 4-5 所示)即完成整個製造作業。

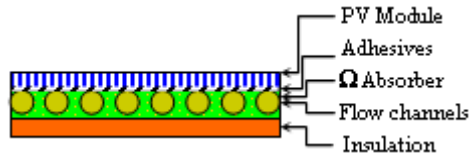


圖 4-6、Type-2 PV/T 結構圖

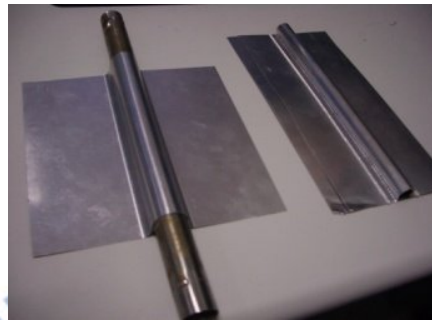
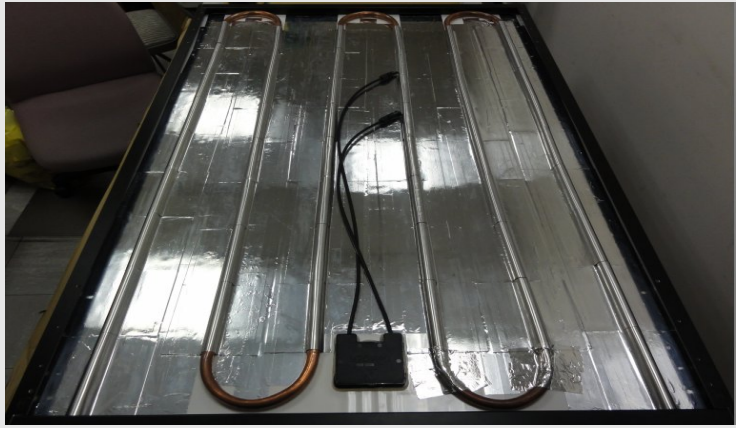


圖 4-7、Ω 型管板式結構圖

表 4-5、Type-2 PV/T 規格銘牌

Type-2 PV/T	
	
Model	Type-2
Cell	Polysilicon
No. of Cells	54
Maximum Power (W)	210
Optimum Power Voltage (V _{mp})	26.6
Optimum Operating Current (I _{mp})	7.9
Open Circuit Voltage (V _{oc})	33.2
Short Circuit Current (I _{sc})	8.58
Cell Efficiency (%)	15.98
Module Efficiency (%)	14.14

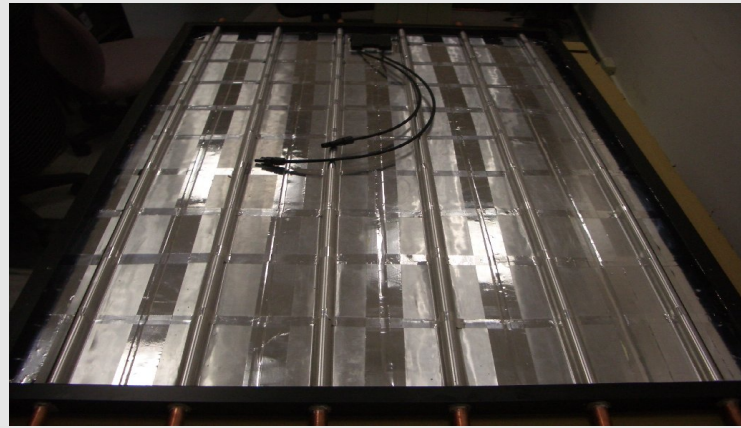
Size (mm×mm×mm)	1500×990×40
Weight (kg)	50
Thermal Efficiency (%)	41.30
NOCT ()	47±2
電性能在 STC 下測得，熱性能在 NOCT 下測得。	

3. Type-3 無蓋板直管歐姆式液態型 PV/T

此款設計結構與 Type-2 相似採無蓋版型式，其詳細說明如下：

- (1) 首先在集熱器結構方面採用併聯管板式流道結構，故將流道【採用 6 分(18mm)直銅管(管長 154cm、管厚 1mm)】置中擺放於 Ω 吸收板【採用 0.15mm 厚度鋁片(規格 15.6 x 15.6 cm)】槽內，並利用高導熱性能黏膠結合(如圖 4-7 所示)，其中每列用 9.5 片 Ω 型吸收板施做，全部共 6 排，總計 57 片 Ω 型吸收板組成一式集熱器，其中，上方管排右側作為入水口左側封閉，下方管排右側封閉左側作為出水口。
- (2) 在來以 Kyocera 太陽光電模組當作基材並與集熱器封裝膠合，其中封裝方式以高導熱性能黏膠施做處理。
- (3) 最後採用 Phenovaboard 隔熱材料做保溫，並於上方在施做絕緣水密封膠步驟，最後外表在封上一層塑鋁板及貼附銘牌(如表 4-6 所示)即完成整個製造作業。

表 4-6、Type-3 PV/T 規格銘牌

Type-3 PV/T	
	
Model	Type-3
Cell	Polysilicon
No. of Cells	54
Maximum Power (W)	210
Optimum Power Voltage (Vmp)	26.6
Optimum Operating Current (Imp)	7.9
Open Circuit Voltage (Voc)	33.2
Short Circuit Current (Isc)	8.58
Cell Efficiency (%)	15.98
Module Efficiency (%)	14.14
Size (mm×mm×mm)	1500×990×40
Weight (kg)	50
Thermal Efficiency (%)	41.33
NOCT ()	47±2
電性能在 STC 下測得，熱性能在 NOCT 下測得。	

4.2 PV/T 模組性能測試

在國內至今尚無 PV/T 模組之標準性能測試方法，學生將參考太陽能熱水器標準測試性能方法並依據 ISO 9806-1 及 CNS 15165 之強制循環式太陽能集熱器標準測試性能方法作為建立 PV/T 模組測試規範之基礎。另外，關於 PV/T 模組電性能特性依舊參照 IEC61215 標準測試規範辦理。

4.2.1 PV/T 模組測試方法建立

本小節學生將建立強制循環式液態型 PV/T 模組集熱效率測試方法。以下將針對本法之使用範圍、測試依據規範、標準測試條件、測試平台規格、測試前處理程序、測試程序等六大部分做撰述。

1. 使用範圍：

- (1) 本方法適用集熱器類別為有面蓋/無面蓋、金屬/非金屬之平板集熱器等。
- (2) 測試時，限制集熱器加熱流體為水。
- (3) 測試場所在戶外，以太陽輻射為熱源。

2. 測試依據規範：

- (1) 依據 CNS 15165 及 ISO 9806-1 國際標準。

3. 標準測試條件：(測試條件詳如表 4-7)

- (1) 於測試期間，PV/T 模組受日曬之日照強度需大於 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，於每個測試點測試期間日照強度振幅變化不能超出 $\pm 50\text{W}/\text{m}^2$ 範圍。
- (2) PV/T 模組測試平台須為追日型機構(最少兩軸)。於測試期間，在 PV/T 模組受光面上，須要求直達日射為正(垂直)入射角，且於每個測試點測試期間正射角瞬時變化量須小於 $\pm 2\%$ 以內之入射角。
- (3) 於每個測試點測試期間，PV/T 模組週圍環境大氣溫度變化不能超出 ± 1 範圍。
- (4) 於每個測試點測試期間，PV/T 模組入水口水溫變化量不能超出 ± 0.1 標準差範圍。

- (5) 於每個測試點測試期間，PV/T 模組出水口水溫變化量不能超出 ± 0.1 標準差範圍。
- (6) 若指定使用之流量接近層流與紊流的暫態區時，將導致 PV/T 集熱器效率測試變異性提高，因此，為提高效率測試結果之再現性，應將流量提高，但在測試報告中應註明。
- (7) 於測試期間，當入口溫度設定在 40 以下，則 PV/T 模組入口溫度與出口溫度差必須大於 1 以上，以確保儀器量測之精準度與基本集熱效率。
- (8) 於測試期間，PV/T 模組受環境風速影響需小於 10 m/s 範圍以內才可受測。
- (9) 在有蓋板 PV/T 模組中，流經集熱管板之水量，以集熱器面積每平方公尺 0.02 kg/s 計算，且於每次測試期間，須要求流量穩定度需控制在 $\pm 1\%$ 標準差範圍內，不同的測試點流量變化亦需在 $\pm 10\%$ 範圍內。
- (10) 在無蓋板 PV/T 模組中，流經集熱管板之水量，以集熱器面積每平方公尺 0.04 kg/s 計算，且於每次測試期間，須要求流量穩定度需控制在 $\pm 1\%$ 標準差範圍內，不同的測試點流量變化亦需在 $\pm 10\%$ 範圍內。
- (11) 完成一片 PV/T 模組集熱效率測試，至少需測試三點入口溫度的效率，以建立完整性能曲線。其中，三個點的入口溫度應均勻分佈。第一點之入口溫度應設定在大氣溫度 ± 1 以內，第三點之設定入口溫度須大於 45。另外，每個設定入口溫度點也需重複測試三次，以確認再現性。

4. 測試平台規格：

- (1) 於測試期間，測試平台所在位置不許有任何遮蔭現象影響 PV/T 模組受光面。
- (2) 測試平台應無建築物反射日光現象，且 PV/T 模組受光面視界範圍內之障礙物面積不得超過 5%，測試平台前方水平起 15°角以上不應有建築物或大型障礙物。大多數粗糙面如草地、風化水泥地或水泥片塊之反射對測試影響不嚴重。但在測試平台視線範圍內應避免大片玻璃、金屬或水之存在。
- (3) 有些集熱器對熱輻射影響敏感，故測試平台鄰近之物體表面溫度應盡可能接近大氣溫度以降低熱輻射影響，如避免集熱器視線內有煙囪、冷卻水塔、或排熱管。
- (4) 許多集熱器性能對風速極為敏感，為提高測試結果再現性，PV/T 模組安裝應能使氣流自然流通面蓋、背部、四周。平行於 PV/T 模組面蓋上之平均風速應為小於 10 m/s 以內。
- (5) 安裝日射計應避免水氣累積於內部表面或遮蔭現象而影響量測值讀取。
- (6) 日射計應與 PV/T 模組受光面置於同一平面，並與 PV/T 模組 Y 軸平行設置，且固定於 X 軸中心位置，誤差在 $\pm 1^\circ$ 以內，另不得對 PV/T 模組造成遮蔭。日射計之設置應取得與 PV/T 模組受光面獲得相同日照之直射、漫射、反射條件。
- (7) PV/T 測試系統之入口溫度感測器離入口不得超過 200mm，測試期間，並於上下管路保溫。
- (8) 大氣溫度計應置於白色、通風良好之遮蔽箱內，以避免太陽輻

射直射或反射之影響。最好使用強制通風式。大氣溫度計應置於 PV/T 模組中間位置之高度，但至少需高於地面 1m，以確保降低地面熱反射效應。大氣溫度計應朝向集熱器之一邊，且距離不得超過 10m 以上。假如使用人工風速產生器時，產生器出口之氣流溫度應確保在大氣溫度 ± 1 以內。

- (9) 風速計應置於 PV/T 模組中間位置之高度，但不可對 PV/T 模組造成陰影。
- (10) PV/T 測試系統之入口管路應保溫，以避免環境因素干擾。保溫材使用熱傳導係數小於 0.2 W/mK。
- (11) 過濾器至少需使用 200 μm 。建議使用 5 μm ，以避免流量計受損。

5. 測試前處理程序：

- (1) 測試前，檢查 PV/T 模組是否有濕氣進入，若有，則需將 PV/T 模組置於預測區台架上，進行空曬，以去除濕氣。空曬後，PV/T 模組需放在蔭涼處 1 小時才可開始量測。
- (2) 將 PV/T 模組依規定角度架設，另 PV/T 模組受光面須徹底擦拭清潔乾淨。
- (3) 裝置相關量測儀器、循環系統及出入水管路。
- (4) 全部部件安裝妥當後，開啟循環系統，並聯開通水管，注意是否有漏水現象？或其他異常現象。
- (5) 連結訊號線並啟動所有控制系統及電腦，輸入集熱板面積和儲水桶容量於測試軟體內。
- (6) 測試一切線路與訊號正常。

6. 測試程序：

- (1) 測試前應檢查日射計除濕劑狀況或是否遮蔭現象，與各表計讀值顯示是否正常。
- (2) 基本上，依集熱器三種不同入口水溫分別進行三次量測，故完成一片 PV/T 模組集熱效率測試共需 9 個點。9 個量測點數據其收斂相關性(R^2)若低於 0.95 時，則增加測試點數，必要時可超過 18 點以上。第一點設定入口水溫在大氣溫度 ± 1 範圍內，第三點之設定入口溫度須大於或等於 45 ，其中，三個點的入口溫度應均勻分佈。
- (3) 每點量測時間為 15 分鐘，資料讀取速率每秒 1 筆，當所有的有關物理量和變異量皆需符合前述的量測條件要求，方為有效的量測；若之間有不合之量測條件發生時，則須重新讀取記錄。
- (4) 用於測試時每點間之平均流量誤差須控制在 $\pm 10\%$ 以內。
- (5) 完成一片 PV/T 模組集熱效率測試共需 9 個點，其測試期間，相同設定溫度點不可連續測試，即每次完成一個溫度點測試時，下一個設定溫度點不可與前一個設定溫度點相同。
- (6) 在每一量測點有下列若干物理量需擷取：總集熱器面積、受光截面積(aperture area)、照射在集熱板的水平日射量、周圍風速、大氣溫度、集熱器入口水溫、集熱器出口水溫和工作流體流量。

綜合以上各程序原則，學生繪製強制循環式液態型 PV/T 模組集熱效率測試流程圖，如圖 4-8 所示。

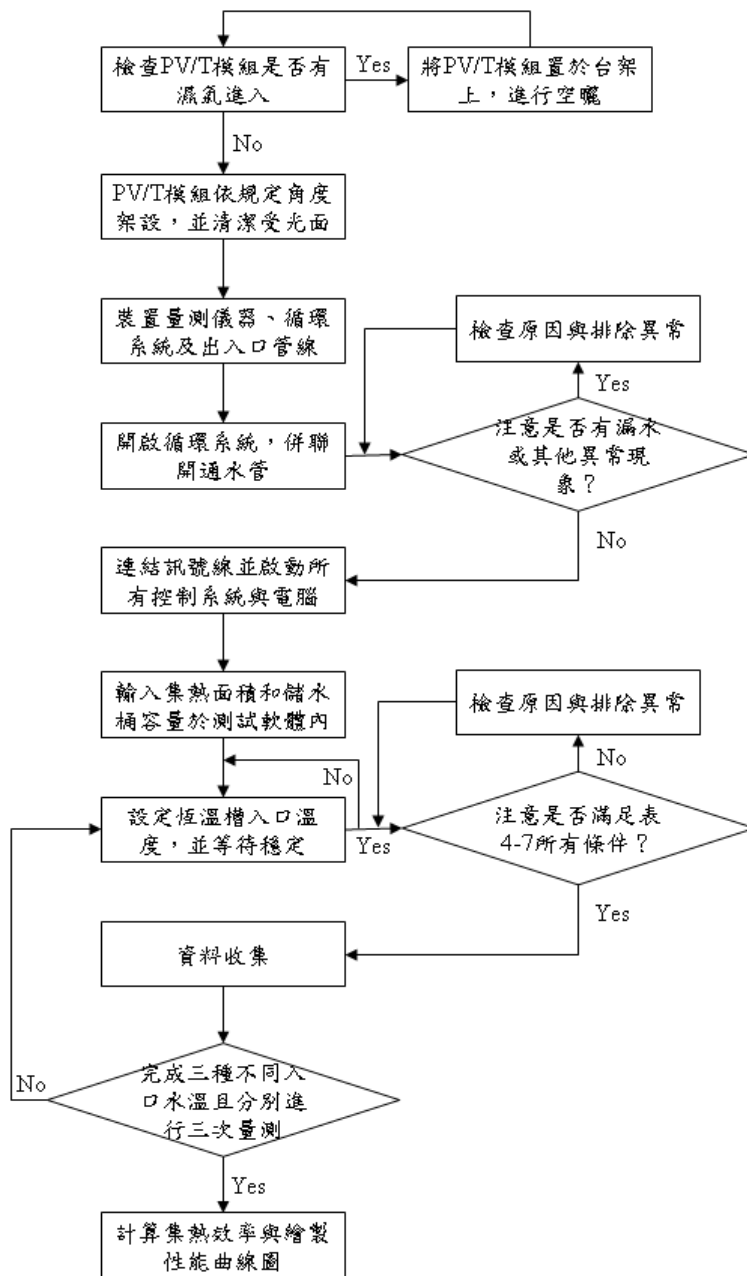


圖 4-8、強制循環式液態型 PV/T 模組集熱效率測試流程圖

表 4-7、強制循環式液態型 PV/T 模組標準測試條件

	日照強度 (W/m ²)	日照強度變化 (W/m ²)	風速 (m/s)	流量 (L/min)	環境大氣溫度 ()	入口溫度 ()	出口溫度 ()	正射角瞬 時變化量
誤差範圍	800W/m ²	±50W/m ²	10m/s	±1%	±1	±0.1	±0.1	<±2%

4.2.2 PV/T 模組測試平台介紹

本實驗架構平台架設於台南-成功大學歸仁校區，其測試架構如圖 4-9 所示。其中包含有追日型支撐機構(雙軸)、儲水槽(120L)、恆溫槽、流量控制泵浦、全天空日照計、溫度感測器(PT-100)、壓力計、大氣環境遮蔭溫度計、風速計、流量計、釋氣閥、手動閥件、監控電腦、PLC 控制系統、資料收集器等。另外，本實驗平台各項使用儀器、設備規格如表 4-8 所示，在圖 4-10 為本實驗平台現場實際照片。

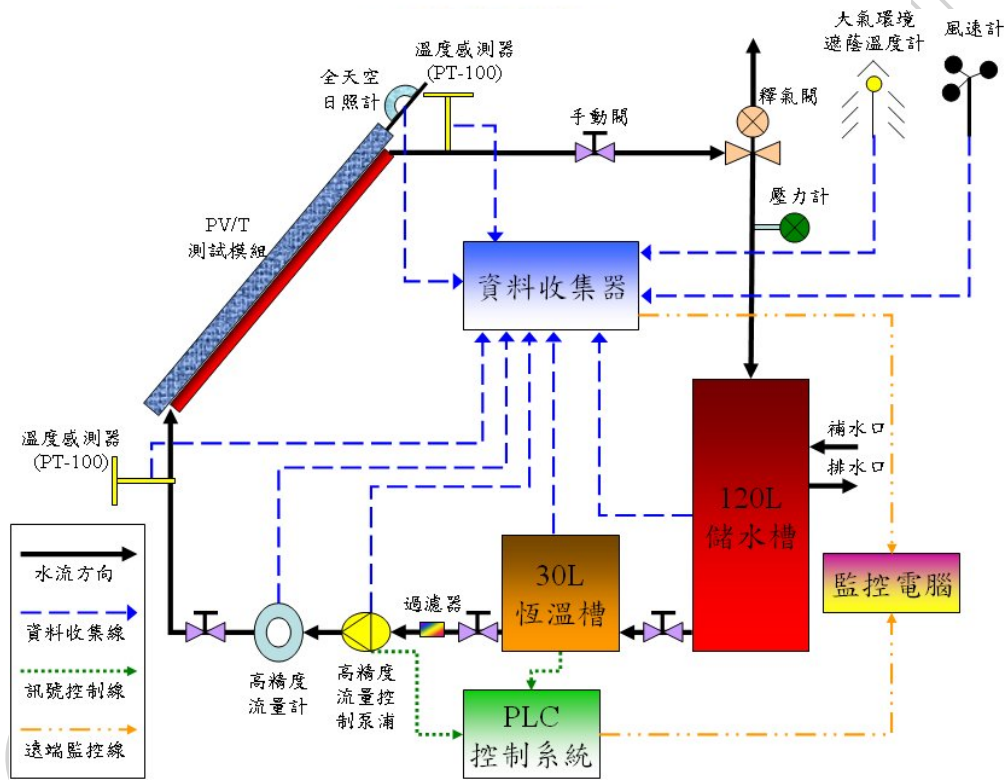


圖 4-9、強制循環式液態型 PV/T 模組測試架構示意圖

表 4-8、測試系統儀器、設備精確度要求

名稱	精 度	說 明
大氣溫度計	± 0.5 以內。	使用四線式 RTD 溫度感應

		器。
入出口溫度計	± 0.1 以內。	使用四線式 RTD 溫度感應器。 為避免飄移，溫度訊號解析度為 ± 0.02 或至少 12-bit 數位記錄器。
流量計	讀值 $\pm 1.0\%$ 以內。	使用 Flow Technology 之 FT-6 流量計量測流量。 使用 Flow Technology 之 FC70A-L 顯示流量值，以供參考。
風速計	± 0.5 m/s 以內。	使用三杯風速計。
全天日射計	± 20 W/m ² 以內。	使用一級水平日射儀 --Eppley PSP, 乾燥劑保持有效，玻璃罩內無水氣凝結。
時間	$\pm 0.2\%$ 以內。	以 AMD K-6 PC 時間為基準。
計錄器	$\pm 1.0\%$ (量測值) 以內。 $\pm 0.5\%$ (FS) 以內。 1 s (時間常數) 以內。 記錄器輸入阻抗高於感應器阻抗之 1000 倍或 10M Ω	使用具備 20 Channel 之 Fluke 2640A 記錄器。 記錄器之使用切記保持乾燥。



圖 4-10、強制循環式液態型 PV/T 模組測試平台

4.2.3 PV/T 模組性能實測分析

本實驗依據前述章節之強制循環式液態型 PV/T 模組測試方法與理論，測試本實驗室所開發之三款液態型 PV/T 模組，其集熱性能效率如下：

圖中：

η_t : PV/T 系統集熱效率；(%)

G : 太陽日照強度；(W/m^2)

T_i : 測試期間儲水槽初始水溫；()

T_a : 環境大氣遮蔭溫度；()

1. Type-1 PV/T 模組：

如圖 4-11 為 Type-1 PV/T 模組性能曲線圖，其中本款 PV/T 模組其在電壓開路狀態，入口溫度與環境溫度設定相同時，其集熱效率(η_t)最高可達 60.55%，也是此三款 PV/T 模組之中集熱效率最高者，故學生後續也對其短路狀態下作測試，其中當入口溫度與環境溫度設定相同時，集熱效率(η_t)最高可達 56.24%。另外在併接上具有 MPPT 功能之電子負

載狀態下，當入口溫度與環境溫度設定相同時，集熱效率(η_t)最高可達 47.45%，發電效率為 13.25%，其綜合效率為 60.70%。

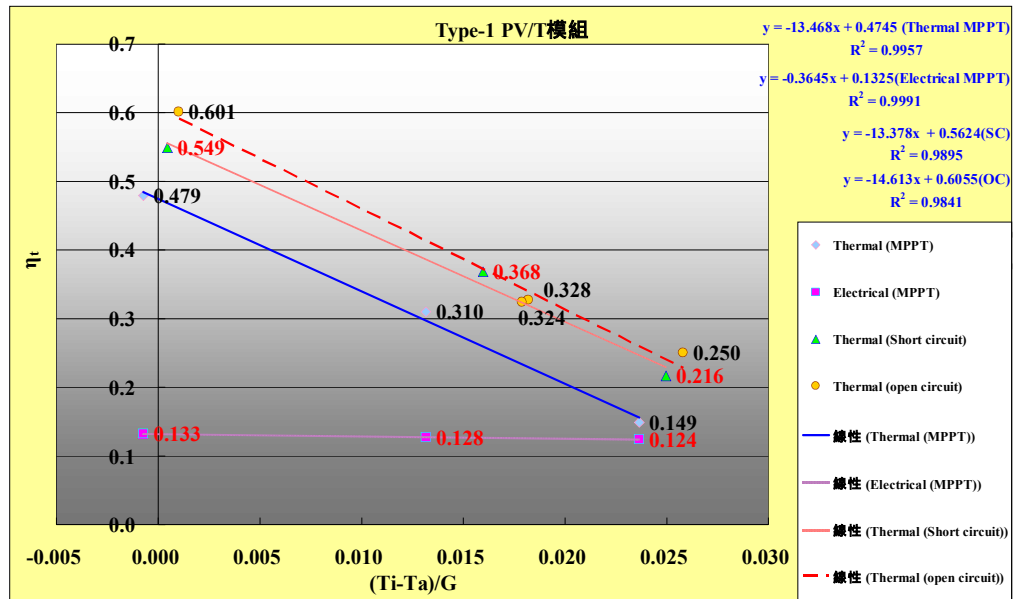


圖 4-11、Type-1 PV/T 模組性能曲線圖

2. Type-2 PV/T 模組：

如圖 4-12 為 Type-2 PV/T 模組性能曲線圖，其中本款 PV/T 模組其在電壓開路狀態，入口溫度設定與環境溫度相同時，其集熱效率(η_t)最高可達 41.30%。當入口溫度設定在 45 時，其集熱效率(η_t)可達 18.90%。

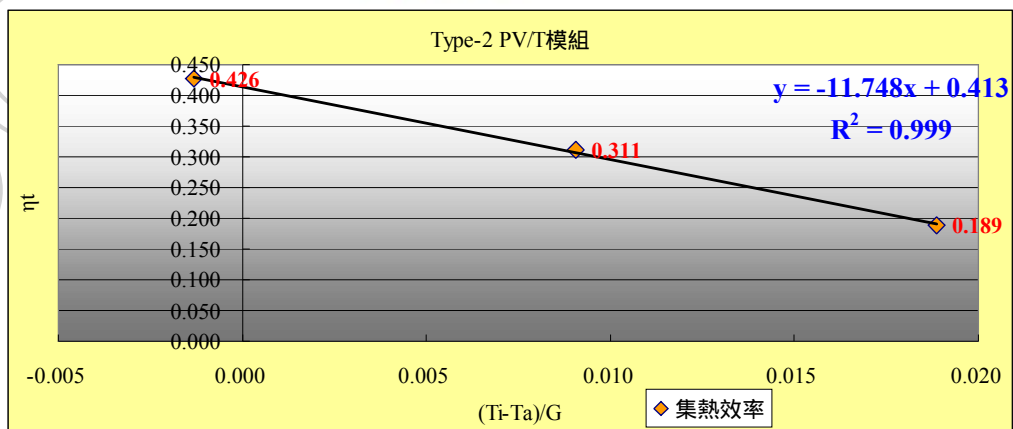


圖 4-12、Type-2 PV/T 模組性能曲線圖

3. Type-3 PV/T 模組：

如圖 4-13 為 Type-3 PV/T 模組性能曲線圖，其中本款 PV/T 模組其在電壓開路狀態，入口溫度設定與環境溫度相同時，其集熱效率(η_t)最高可達 41.33%。當入口溫度設定在 45 時，其集熱效率(η_t)可達 16.60%。

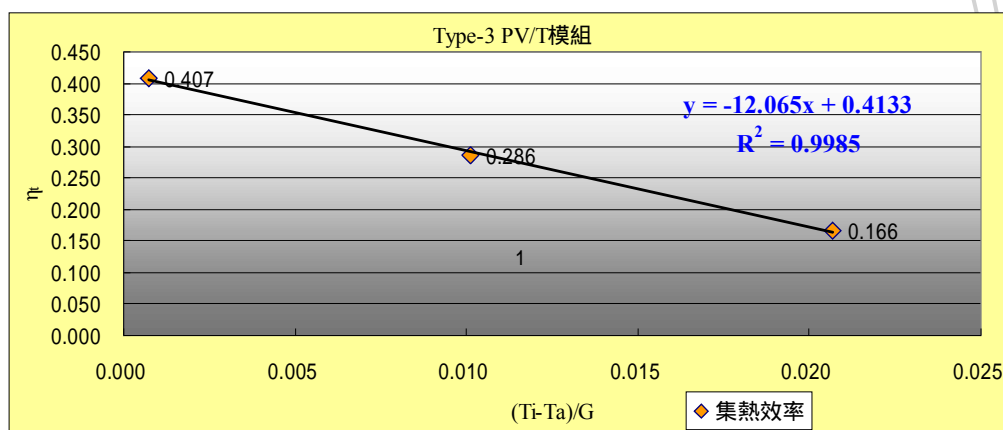


圖 4-13、Type-3 PV/T 模組性能曲線圖

本研究開發之三款 PV/T 模組，經由實驗測試後可知 Type-1 PV/T 模組集熱效率最高，而從相關文獻得知，Y. Tripanagnostopoulos 提出 12 種不同的 PV/T 模組並進行室外測試，如表 4-9 所示，當 $T_i < T_a$ 時，多晶矽水冷式 PV/T 模組熱效率為 55%。

表 4-9、12 種不同的 PV/T 模組熱性能^[30]

PV/T System	Thermal efficiency
pc-PV/WATER	$\eta_{th} = 0.55-11.99 (\Delta T/G)$
a-PV/WATER	$\eta_{th} = 0.60-12.02 (\Delta T/G)$
pc-PV/AIR	$\eta_{th} = 0.38-9.33 (\Delta T/G)$
a-PV/AIR	$\eta_{th} = 0.46-10.69 (\Delta T/G)$
PV/WATER	$\eta_{th} = 0.55-11.99 (\Delta T/G)$
PV/WATER + GL	$\eta_{th} = 0.71-9.04 (\Delta T/G)$
PV/WATER + REF	$\eta_{th} = 0.66-11.89 (\Delta T/G)$
PV/WATER + GL + REF	$\eta_{th} = 0.80-9.03 (\Delta T/G)$
PV/AIR	$\eta_{th} = 0.38-9.33 (\Delta T/G)$
PV/AIR + GL	$\eta_{th} = 0.59-7.88 (\Delta T/G)$
PV/AIR + REF	$\eta_{th} = 0.60-12.68 (\Delta T/G)$
PV/AIR + GL + REF	$\eta_{th} = 0.75-8.89 (\Delta T/G)$

【註】表中 pc-PV 表示多晶矽太陽電池、a-PV 表示非晶矽太陽電池、GL 表示有加玻璃上蓋版以增加保溫效果、REF 表示有反射結構以增加照光量。

另外學生在資料檢索如表 4-10 所示，發現馬來西亞已針對 PV/T 提出 2010~2020 年之 Roadmap，並將其當作該國在太陽能領域重點開發研究項目之一，其中在 2015 年液態型 PV/T 效率將以 60% 為指標，到 2020 年液態型 PV/T 效率將以 65% 為目標。

表 4-10、2010~2020 年馬來西亞 PV/T 研究 Roadmap

Year	2010	2015	2020
Market	Photovoltaic thermal estimation at 0 GWth	Photovoltaic thermal estimation at 0.2 GWth	Photovoltaic thermal estimation at 4 GWth
Product	PVT liquid collector 55% PVT air collector 40%	PVT liquid collector 60% PVT air collector 45%	PVT liquid collector 65% PVT air collector 50%
Technology	<ul style="list-style-type: none"> Solar collector made of metal absorber e.g. copper, aluminum and stainless steel. CSP – glazing material e.g. glass Insulator material – thermoplastic 	<ul style="list-style-type: none"> New coating material for absorber collector - Titanium Nitrite Oxide (TiNOX) Improved long wave absorption. 	<ul style="list-style-type: none"> Combi system – PV + solar collector (metal absorber + evacuated tube) CPVT – new concentrating material – Fresnel lens + extreme concentrated photovoltaic (XCPV)
R&D	<ul style="list-style-type: none"> Optimization on thermal module (fins)efficiency Effect of system design on the efficiency. Research on sensitivity to the heat resistance between the PV and solar collector . Optimization on gap between PV and solar collector. 	<ul style="list-style-type: none"> Optical optimization on PV Unglazed PVT collectors + heat pump Optimization of the reflector design. Laser, plasma and ultrasonic welding for collector. Nano coated surfaces for reduce friction losses of fluid flow. 	<ul style="list-style-type: none"> Industrial collector molding.
Resources	<p>Investment Supply chain Staff/Skills</p>		

第五章 實驗結果與分析

5.1 PV/T 系統性能測試分析

經過第三章針對 Type-1 PV/T 模組做系統模型建立後，本小節將比照 TRNSYS 模擬模型之系統架構，建置 PV/T 系統性能實測平台，並針對所開發之 Type-1 做系統性能實際量測，後續也將探討實測性能數據與模擬性能數據之相互比較誤差性。

5.1.1 PV/T 系統測試平台介紹

本 PV/T 系統測試系統架構如圖 5-1 所示，為正南向設置傾斜角度 0 度，其主要包括測試平台支撐結構、儲水槽(120L)、水泵浦、全天空日照計、溫度感測器(PT-100)、壓力計、大氣環境遮蔭溫度計、風速計、流量計、釋氣閥、手動閥件、監控電腦、PLC 溫差控制系統、資料收集器等、電力調節器、集合式電表等設備所組成。關於本系統儲熱運轉方式主要是靠 T1(PV 模組背溫)與 T2(儲水槽中心桶溫)兩個溫度差控制水泵浦運轉，其運作機制為，當 $T1-T2 \geq 4$ 則水泵浦開始循環運轉，若 $T1-T2 \leq 2$ 則水泵浦停止循環運轉。另外在發電性能測試與運作方式，主要是將 PV/T 模組 Solar Cable 串接到直流接線箱後，再串接集合式電表以監測直流發電量與效率，最後在串聯電力調節器之後，輸出併聯致台電饋線上。圖 5-2 為本實驗 Type-1 PV/T 系統測試平台現場實際照片。

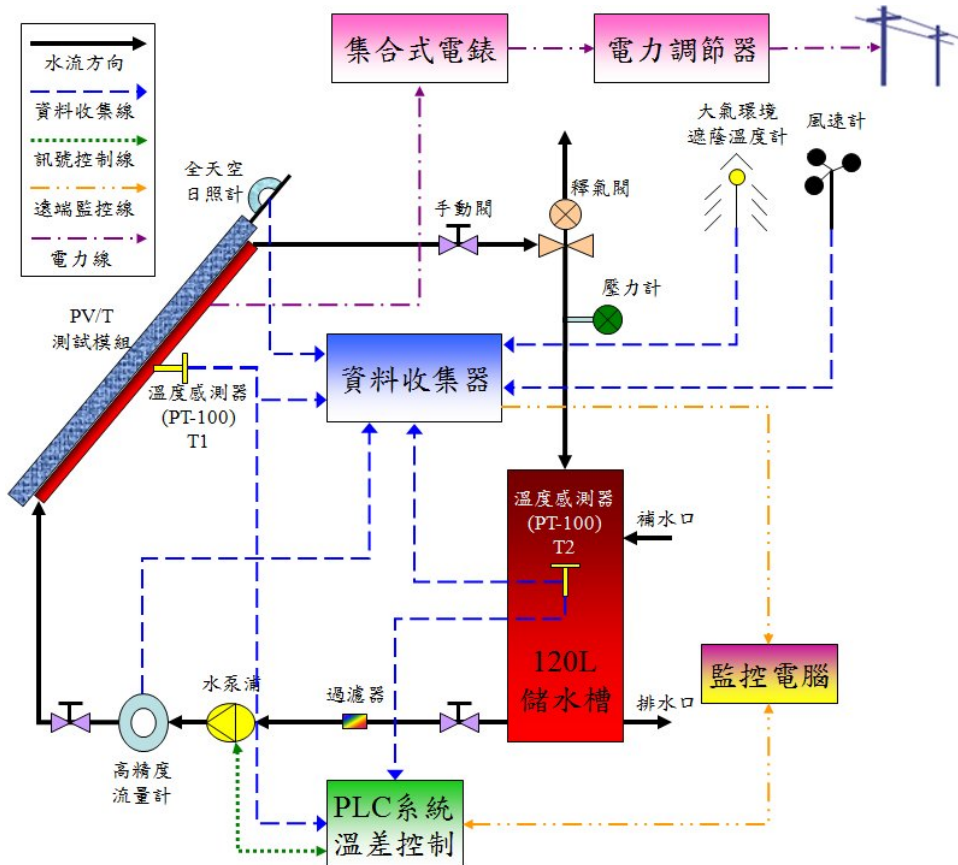


圖 5-1、Type-1 PV/T 系統架構圖



圖 5-2、Type-1 PV/T 系統現場測試平台

5.1.2 PV/T 系統性能實測分析

本實驗利用學生於新竹縣-竹東鎮地區所架設之 PV/T 系統測試平台作為實驗場所，其中除了 2011/11/21 測試期間為上午 11:00 至下午 15:00 其餘測試期間均為上午 9:00 至下午 15:00。在數據收集為每 5 秒一筆。最後測試結果如表 5-1 所示，在 2011/11/16 當日，本 PV/T 系統熱效率最高可達 42.49%(水溫約可提升 10)，發電效率為 13.04%，能源綜合效率 55.54%，故達成本實驗當初設定之 PV/T 系統能源綜合效率(電能+熱能)大於 50%之指標。另當日對照組(SER NO.7201 一般型 PV 模組)發電效率 12.89%，由發電效率數據可知，本實驗組與對照組相對誤差為+1.14%(本 Type-1 PV/T 模組與對照組 PV 模組 STC 下發電效率誤差為-0.799%)，故驗證本 Type-1 PV/T 模組若在一定的集熱溫度下將提升或不太降低發電效率。

表 5-1、Type-1 PV/T 系統性能實測結果

日期	Type-1 PV/T 系統(實驗組)									對照組	實驗與對照 η_e 相對誤差
	累積日照量 (MJ/m ²)	累積發電量 (kWh)	累積集熱量 (MJ)	初始水溫 (°C)	最終水溫 (°C)	平均環境溫度 (°C)	η_t (%)	η_e (%)	總效率 η_o (%)	η_e (%)	
2011/11/16	8.175009175	0.44	5.15886822	24.2066	34.491425	28.01716593	42.49518574	13.04789565	55.54308139	12.89962411	1.14%
2011/11/18	2.741895653	0.147	0.50879796	25.144125	26.158475	24.84972018	12.49591276	12.99698025	25.49289301	13.35063957	-2.72%
2011/11/21	6.889410571	0.397	4.05722922	23.6638	31.752375	24.37421661	39.65710652	13.9696166	53.62672312	14.14555635	-1.26%
2011/11/22	8.810777975	0.466	5.0119872	23.23565	33.22765	25.89290199	38.30621501	12.82176186	51.12797687	12.82176186	0.00%
2011/11/30	7.902260521	0.413	4.03641282	23.85645	31.903525	25.62654146	34.3967793	12.66994575	47.06672505	12.70062359	-0.24%

由下圖可知，太陽日照強度與桶溫溫升的關係極大，若太陽日照強度低於 500W/m² 或變化太大(雲太多、遮蔭)，其集熱效率就越差，且 PV/T 模組不像傳統太陽熱水器，因傳統太陽熱水器集熱面為受光面，故在熱傳導、熱輻射方面能夠較瞬時傳遞熱效率高，而 PV/T 模組因集熱面在背面，故須靠長時間熱傳導才能利用流體介質熱對流交換，因此太陽日照強度若瞬時變化太大，隨然累計日射量增加，但卻無法得到相對熱能，且會導致整體熱效率降低。

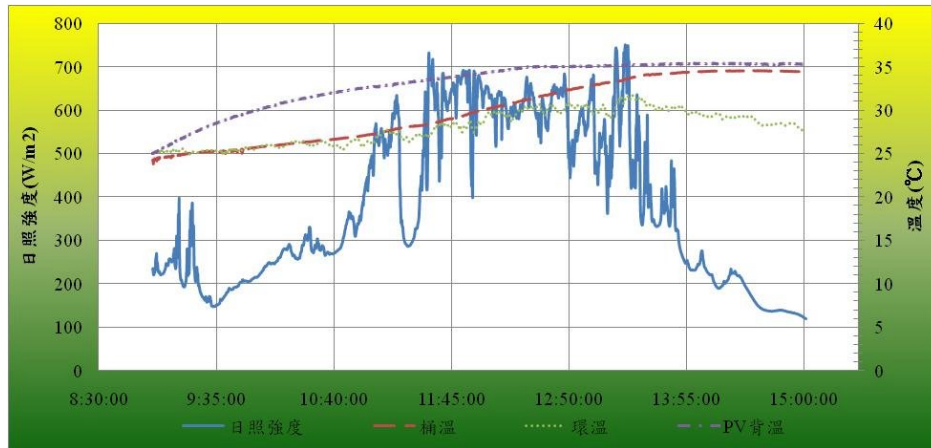


圖 5-3、2011/11/16 Type-1 PV/T 系統溫升變化

由圖 5-4 可知，2011/11/18 本日太陽日照強度均低於 300W/m^2 ，且當日環境溫度常態低於桶槽水溫，導致本日發電效率較不佳，此為 PV/T 模組在低日照之隱憂。

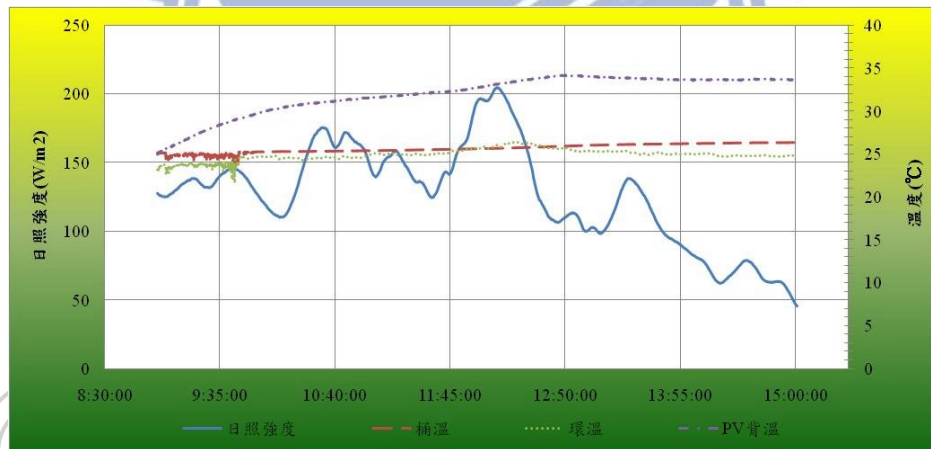


圖 5-4、2011/11/18 Type-1 PV/T 系統溫升變化

由圖 5-5 可發現，2011/11/21 本日太陽日照強度變化量較平緩(晴天)且變動振幅不多，隨然累計日射量 $6.88\text{ (MJ/m}^2\text{)}$ 比 2011/11/22(圖 5-6，日照強度變化量大)累計日射量 $8.81\text{ (MJ/m}^2\text{)}$ 少，但因為日照變動振幅不大故熱效率較高，且僅需半天即有不錯之集熱效率表現。2011/11/30(圖 5-7)因日照變動

振幅大，故也有效率不如 11/21 之現象。

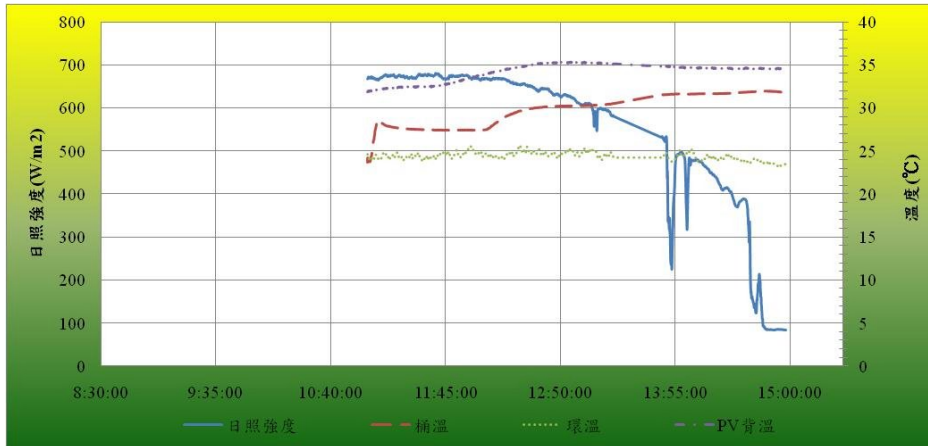


圖 5-5、2011/11/21 Type-1 PV/T 系統溫升變化

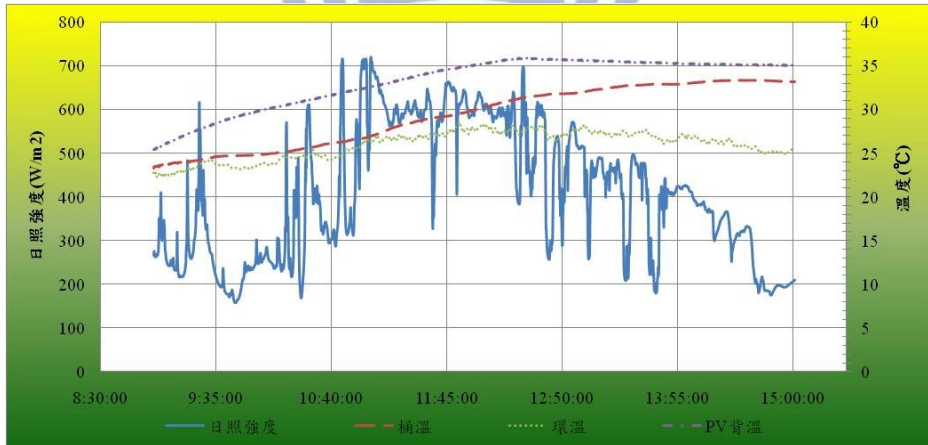


圖 5-6、2011/11/22 Type-1 PV/T 系統溫升變化

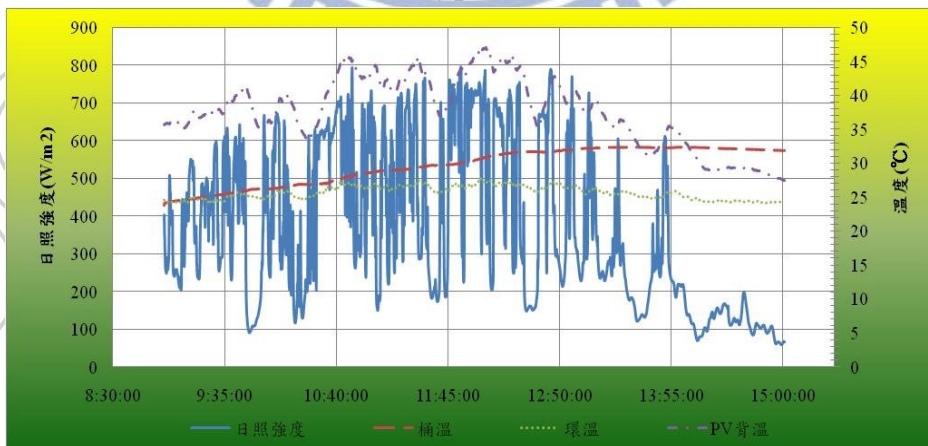


圖 5-7、2011/11/30 Type-1 PV/T 系統溫升變化

後續也針對 Type-1 PV/T 模組與一般型 PV 模組在相同時間與環境條件

下運轉，其受光表面之熱影像分布變化如圖 5-8 右圖所示，Type-1 PV/T 模組平均溫度約為 52.8 ，另外一般型 PV 模組平均溫度約為 59.6 ，兩者表面溫度差約為 6.8 ，且由圖中顏色分佈可明顯發現 Type-1 PV/T 模組表面溫度較一般型 PV 模組低。

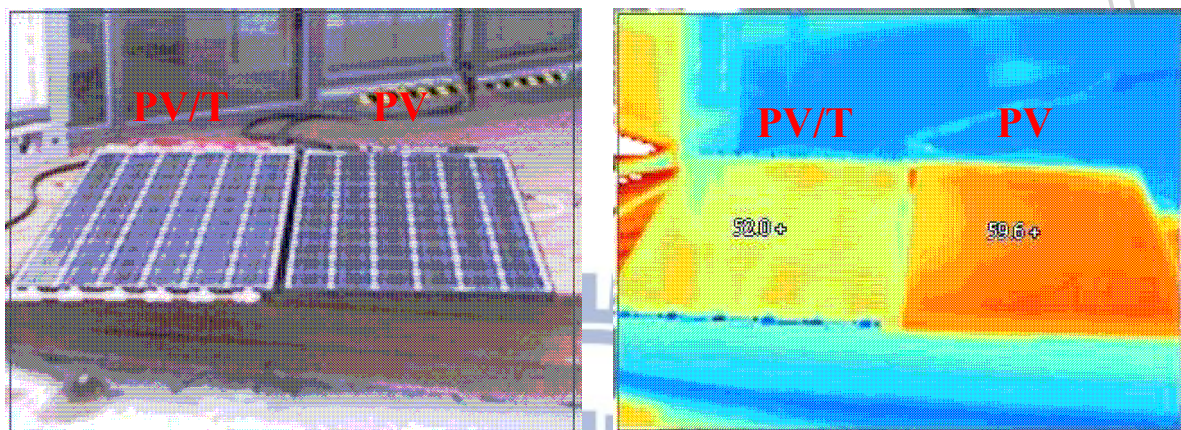


圖 5-8、Type-1 PV/T 模組與一般型 PV 模組熱影像分佈變化

5.2 PV/T 系統性能模擬分析

本 PV/T 系統性能模擬分析將依據第三章 TRNSYS 所建立之 Type-1 PV/T 系統模型做模擬分析研究，其中代入 2011 年 11/16、11/18、11/22、11/30 等氣象資料，並將模擬測試期間設定為早上 9:00 至下午 15:00(除了 2011/11/21 設定為早上 11:00 至下午 15:00)。模擬結果如表 5-2 所示，可發現在熱效率與電效率模擬數據，其與實測數據之相對誤差均在 10%以內。

表 5-2、TRNSYS 模擬 Type-1 PV/T 系統效率

Type-1 PV/T系統									
日期	累積日照量 (MJ/m ²)	TRNSYS模擬			實測數據			熱效率 相對誤差	電效率 相對誤差
		η_t (%)	η_e (%)	總效率 η_o (%)	η_t (%)	η_e (%)	總效率 η_o (%)		
2011/11/16	8.18	43.71	12.94	56.65	42.50	13.05	55.54	-2.86%	0.83%
2011/11/18	2.74	13.55	12.31	25.86	12.50	13.00	25.49	-8.44%	5.29%
2011/11/21	6.89	41.59	12.91	54.50	39.66	13.97	53.63	-4.87%	7.59%
2011/11/22	8.81	39.69	11.74	51.43	38.31	12.82	51.13	-3.61%	8.44%
2011/11/30	7.90	35.91	12.01	47.92	34.40	12.67	47.07	-4.40%	5.21%

第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本研究提出之太陽光電與集熱雙效設計應用概念是為了使太陽光電產業再加值提升，使其在單位面積下具備產生電能、熱能等兩種能量效益，以提升太陽能的綜合附加利用性，故本太陽熱電複合型系統為更具潛力之再生能源設備。以下將針對本論文提出幾點結論：

1. 開發 PV/T 模組的關鍵在於確保 PV 模組與集熱器之間是否有良好的結合、集熱器管道設計(管數、管徑、流道配置、材質)、封裝黏著材料其須具備高熱傳導性與極佳的電絕緣能力，另外在保溫能力方面也是決定集熱效率重點的要因。
2. 在國內至今尚無 PV/T 模組之標準性能測試方法，學生參考太陽能熱水器標準測試性能方法並依據 ISO 9806-1 及 CNS 15165 之強制循環式太陽能集熱器標準性能測試方法作為建立 PV/T 模組熱性能測試規範之基礎。另外，關於 PV/T 模組電性能特性依舊參照 IEC61215 標準測試規範辦理。其中，Type-1 PV/T 模組在電壓開路狀態，入口溫度與環境溫度設定相同時，其集熱效率(η_t)最高可達 60.55%，也是此三款 PV/T 模組之中集熱效率最高者，故學生後續也對其短路狀態下作測試，其中當入口溫度與環境溫度設定相同時，集熱效率(η_t)最高可達 56.24%。另外在拼接上具有 MPPT 功能之電子負載狀態下，當入口溫度與環境溫度設定相同時，集熱效率(η_t)最高可達 47.45%，發電效率為 13.25%，其綜合效率為 60.70%。
3. 實驗當中發現，PV/T 初始入口水溫對整體性能效率有極大的影響，

當初始入口水溫低於環境溫度時，其 PV/T 模組或系統之熱效率將比相同邊界條件下之初始入口水溫大於或等於環境溫度時高。故在測試 PV/T 模組性能時，為求公平性國際上評價 PV/T 模組性能均以(初始入口水溫)-(環境溫度)趨近於零時，當作 PV/T 模組最大熱效率比較基準點。

4. 再生能源熱利用獎勵補助辦法中，明訂太陽能熱水系統性能標準須大於等於 50%，故本研究以開發製作 PV/T 系統能源綜合效率(電能+熱能)大於 50%為指標。其中，本研究針對所開發之最佳性能 Type-1 PV/T 模組作系統性能測試，測試 2011/11/16 (上午 9:00 至下午 15:00) 結果得到熱效率最高可達 42.49%(水溫約可提升 10)，發電效率為 13.04%，能源綜合效率 55.54%，故達成本實驗設計指標。另同一日對照組(SER NO.7201 一般型 PV 模組)發電效率 12.89%，由發電效率數據可知本實驗組與對照組相對誤差為+1.14%(本 Type-1 PV/T 模組與對照組 PV 模組 STC 下發電效率誤差為-0.799%)，故驗證本 Type-1 PV/T 模組若在一定的集熱溫度下將提升或不太降低發電效率。
5. 本研究利用 TRNSYS 軟體架構本 Type-1 PV/T 系統模擬模型，其中測試熱效率與電效率在實測數據與模擬數據相互比較下，TRNSYS 模擬性能結果相對誤差小於 10%以內。
6. 本實驗所開發之 PV/T 模組，學生在算其發電效率與熱效率均以整塊 PV/T 模組尺寸(1500 x 999mm)計算，但在相關文獻上熱效率大多以集熱面積(面積大多比 PV/T 模組小)計算，故換算出來的熱效率比較高，但就產業或使用者角度方向思考，學生認為 PV/T 模組熱效率因以整片 PV/T 模組尺寸計算，因為在鋪設 PV/T 模組時，所佔之面積

為整片 PV/T 模組面積，並不會因集熱器面積較小而減少鋪設面積。

7. 太陽日照強度與桶溫溫升的關係極大，若太陽日照強度低於 500W/m^2 或變化太大(雲太多、遮蔭)，其集熱效率就越差，且 PV/T 模組不像傳統太陽熱水器，因傳統太陽熱水器集熱面為受光面，故在熱傳導、熱輻射方面能夠較瞬時傳遞熱效率高，而 PV/T 模組因集熱面在背面，故須靠長時間熱傳導才能利用流體介質熱對流交換，因此太陽日照強度若瞬時變化太大，隨然累計日射量增加，但卻無法及時得到相對熱能，且恐造成整體熱效率降低。

6.2 未來展望

1. 在國內尚無 PV/T 系統應用案例，故本研究後續將在中部地區建立一套 2.16kWp 之 PV/T 熱水系統供給家庭與工業製程預熱使用，並利用相同規格之一般型 PV 模組建置系統條件、設置容量(2.16kWp)相同之對照組，並長期監控比較其相關性能效率等特性。
2. 綜合以上研究，學生認為 PV/T 具有極大的市場潛力，但至今國內尚無任何 PV/T 模組問世，故後續將針對 PV/T 之專利性、量產性與推廣性做深入研究，並利用現有技術能量與業界合作推展出 PV/T 產品。
3. 最後也希望能自行架設標準室內型 PV/T 模組性能量測實驗室，因學生深知 PV/T 模組在室外量測變動性大或在現性不佳，不容易測得最大性能效率，為求精確性能量測，推動室內量測實驗室是必要的。

參考文獻

- [1] 工業技術研究院，「太陽光電系統應用與實證研究計畫」(2/3)，經濟部能源局能源科技研究發展計畫 100 年執行報告，100 年 12 月。
- [2] 經濟部能源局，「九十九年年報」，100 年 06 月。
- [3] Dave Renne, NREL, International Photovoltaic Reliability Workshop(IPRW) ,July 30,2009.
- [4] BP,Statistical review of world energy,June 2011.
- [5] IEA,World Energy Outlook,2010.
- [6] ESTIF,"Solar Thermal Markets in Europe",Trends and Market Statistics 2004,2005
- [7] B.J. Huang, T.H. Lin, W.C. Hung, F.S. Sun, "Performance evaluation of solar photovoltaic/Thermal systems", Solar Energy, 70, pp. 443-448, 2001.
- [8] 王孟傑，「太陽光電產業發展趨勢」，IEK，新竹，2011。
- [9] 工研院太陽光電資訊網，「太陽光電發電原理」
<<http://solarpv.itri.org.tw/aboutus/sense/principle.asp>>
- [10] 陳志信，「太陽能電池」，電池應用科技專欄，電機月刊第十五卷第六期，台灣，2005。
- [11] 莊嘉琛，「太陽能工程-太陽電池篇」，全華出版社，台北，2000。
- [12] NREL
- [13] 包睿璋，「太陽光發電系統運轉性能評估」，碩士學位論文，私立中原大學電機工程學系，中壢、台灣，2003。
- [14] A. A. Amoudi, L. Zhang, "Application of radial basis function networks for solar-array modeling and maximum power-point prediction," IEE

Proceedings-Electirc Power Applications, vol. 147, no. 5, September 2000, pp. 310-316.

[15] 長尾岳彥，「太陽光發電系統設計與施工」，日本太陽光發電協會，日本，2006。

[16] 宋賢超等編著，「四種不同類型太陽光電模組應用於 BIPV 建築之發電性能實證研究」，第十屆台灣電力電子研討會暨展覽會，台灣，中壢市，2011。

[17] Photo International, september/2011.

[18] The Photovoltaic Industry in Germany, Germany Trade & Invest, 2011/2012.

[19]

<http://www.isuppli.com/Photovoltaics/News/Pages/US-Photovoltaic-Installations-Forecast-to-Soar-166-Percent-in-2011.aspx>, Michael Sheppard

[20] Solar PV price competitiveness and growth pathway, 2000-2050, International Energy Agency, 2010.

[21] 成大能源研究中心，「太陽能熱水器」 <
<http://solar.rsh.ncku.edu.tw/home.php>>

[22] 能源與資源研究所-太陽能熱能測試實驗室，「太陽能熱能測試作業程序」，工業技術研究院，新竹，2003。

[23] 經濟部能源局，「2010年能源產業技術白皮書」，99年04月。

[24] ESTIF, Solar Thermal Markets in Europe, 2007, June.

[25] Z. Xingxing, et al, “Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal(PV/T) technologies”, Renewable and Sustainable

Energy Reviews, 16, pp. 599-617, 2012.

[26] H.A. Zondag, et al, “The yield of different combined PV-thermal collector designs”, Solar Energy, 74, pp. 253-269, 2003.

[27] 林憲德、黃國倉，「台灣 TMY2 標準氣象年之研究與應用」，建築學報，第 53 期，79-94，2005。

[28] 張堡盛，「以最小化生命週期成本為基礎之大型太陽能熱水系統規劃模式」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2009。

[29] <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/tab1-1.html>

[30] Y. Tripanagnostopoulos, et al, “Hybrid photovoltaic/thermal solar system”, Solar Energy, 72, pp. 217-234, 2002.

