

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽能電池模組之生命週期盤查研究
Life Cycle Inventory of Photovoltaic Modules

計畫編號：1042001INER012

受委託機關(構)：國立臺北科技大學

計畫主持人：胡憲倫教授

聯絡電話：022776-4702#4183

E-mail address：allenhu@ntut.edu.tw

核研所聯絡人員：簡克任

報告日期：104 年 11 月 27 日

目 錄

中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	4
貳、研究方法與過程.....	6
一、 文獻回顧.....	6
(一) 高聚光太陽能發電系統.....	6
(二) 生命週期評估應用於太陽能能源系統.....	7
二、 研究方法.....	8
(一) 研究流程.....	8
(二) 研究範疇與邊界.....	8
(三) 研究限制與假設.....	9
(四) 計算方法.....	10
參、主要發現與結論.....	13
一、 研究結果.....	13
(一) 高聚光太陽能發電系統之碳足跡.....	13
(二) 高聚光太陽能發電系統之能源回收期.....	18
二、 研究結論.....	26
(一) 結論.....	26
(二) 建議.....	27
肆、參考文獻.....	29

中文摘要

高聚光型太陽能發電系統除了使用多接面的三五族電池並配合追日系統，因此比其他太陽能發電系統擁有較高效率的發電機制，而在發展太陽能發電系統同時，如果也考慮到系統之整個生命週期循環時為環境帶來的影響，藉由評估提供資訊對於在科技改善使能源系統更永續，本研究針對我國核能研究所研發的 7.5kW 高效率聚光型太陽電池(HCPV)發電系統，藉由生命週期評軟體 SimaPro 8.1.3，以生命週期來評估其碳足跡的環境衝擊及計算其能源回收期，並透過文獻回顧整理出可能會影響碳排放及能源回收期之改變因素並作探討，本研究中之初始的碳足跡為 58.19 g CO₂-eq/kW 而能源回收期為 1.89 年，探討四個因子分別為(1)廢棄階段有無回收數據之設定；(2)延長此系統之生命時間；(3)討論在台灣不同地區下直射日照強度(Direct Normal Insolation, DNI)之碳足跡結果；(4)試圖設定相同 DNI 值之條件下不同產品之碳足跡比較，其中探討的結果發現生命週期階段之廢棄階段在技術可行下進行回收，在系統之技術可行下，延長生命使用時間，間接降低高聚光型太陽能發電系統之碳排放，同時了解 DNI 值與碳足跡的相關性。

Abstract

Depleting fossil fuel sources and worsening global warming are two of the current serious world problems. Moreover, the demand for renewable energy is predicted to increase rapidly in the near future. To overcome these challenges, many renewable energy technologies are continuously being developed. Among these technologies, high-concentration photovoltaic (HCPV) is promising because it can reduce the use of expensive photovoltaic materials to achieve highly efficient energy conversion. This reduction process is achieved by adopting concentrating and tracking technologies. Based on literature, the operation processes of fossil fuel power plants exhibit the highest environmental impact among various related processes. However, the environmental impact of renewable energy technologies is frequently related to the extent of energy consumption and the amount of materials used during the manufacture and fabrication of devices. Therefore, this study intends to assess and understand the environmental impact of HCPV modules during their entire life cycles. An HCPV module and a tracker from Institute of Nuclear Energy Research are applied, and SimaPro 8.1.3 is used for the assessment. The functional unit used in this study is defined as 1 kWh produced by HCPV. Life cycle inventory

data include raw materials acquisition, manufacture of components, assembly, operation and maintenance, and disposal. Both carbon footprint and energy payback time are highlighted in this analysis. Results and findings of this study can provide several insights into the development of the Taiwanese solar industry.

壹、計畫緣起與目的

1973 年中東戰爭而帶來的石油危機，使世界各國正式能源有限的危機意識。台灣能源需求從以前到目前為止主要來源是以原油及石油產品與煤，然而我國的能源需求並沒有因為現在對於石油危機意識的世界趨勢而遞減，台灣經濟部統計結果自民國 83 年開始至民國 103 年供給與需求兩者明顯大幅成長，能源總供給自民國 83 年 7,121 萬公秉油當量增至 103 年 14,745 萬公秉油當量，年平均成長率為 3.71% (經濟部能源統計手冊，2014)。

能源危機及全球暖化造成目前世界上許多國家致力發展再生能源發電，不僅致力發展發電效率高之能源科技同時努力使再生能源科技更能是乾淨能源。國際可再生能源促進協會(REN21，2013)提到 2004 年到 2013 年為止全球再生能源發電累積容量自 2004 年設置電力由 800GW 到 2013 年是 1560GW (Bakhiyi et al., 2014)。

在經濟發展過程中，伴隨著以化石能源為主體的能資源需求結構之能源消費，會造成對地球環境的破壞，為解決這問題，須依靠乾淨能源技術的研發，因此可以了解研發再生能源系統不僅只顧慮其系統之發電效率等，其永續性是值得去探討並作數據上的評估進而改善，使再生能源系統是名符其實的綠色能源系統(光電太陽能電池設計與應用，2009)。

基於太陽能發電科技不斷發展，其所使用的是地球上用之不竭的太陽熱能，如果能夠不斷改善其太陽能發電系使用太陽熱能的發電效率及一些科技，同時不斷的製程改善及重新設計其會帶來環境衝擊的原物料使用及製造元件過程等，使這樣發電設計不

僅更能有效率的使用太陽熱能並為製造工業帶來許多工作機會，同時在整個生命週期所帶來的環境潛在衝擊的最小化，讓永續的概念帶進再生能源系統。

本研究旨在進行選定案例-評估 7.5kW 高聚光太陽電池發電 (HCPV)之環境衝擊及能源回收期之研究，透過收集國內外之相關高聚光型太陽電池發電系統文獻、環境衝擊及能源回收期文獻，了解目前進行評估過高聚型太陽電池文獻的使用方法及研究限制等，同時了解目前生命週期評估及能源回收期評估目前研究所提出的建議及方法，而本研究研究目的可歸納為：

- 一、 計算高聚光型太陽電池之環境衝擊與其他相關評估
- 二、 計算高聚光型太陽電池之能源回收期
- 三、 上述評估結果與其他文獻之結果比較分析

貳、研究方法與過程

本計劃執行過程主要採取文獻回顧了解目前應用生命週期評估方法計算太陽能系統之主要趨勢、評估範疇邊界以及能源回收期的計算方法；並透過生命週期評估計算高聚光型太陽電池發電系統之碳足跡以及能源回收期。

一、文獻回顧

(一) 高聚光型太陽電池發電系統

本研究之標的產品為位在桃園縣龍潭鄉核能研究所之 7.5kW 高聚光型太陽能發電系統(圖 1)，系統轉換效率保守估計為 30% 而生命時間大約預估有 30 年，使用的電池是 III-V 族三接面的電池(GaInP/GaAs/Ge)並且使用雙軸太陽追蹤系統，此高聚光型太陽電池發電系統由聚光型太陽電池模組及太陽追蹤系統兩大結構組成如圖 1 所示，模組受光面積約 34.56 平方公尺。

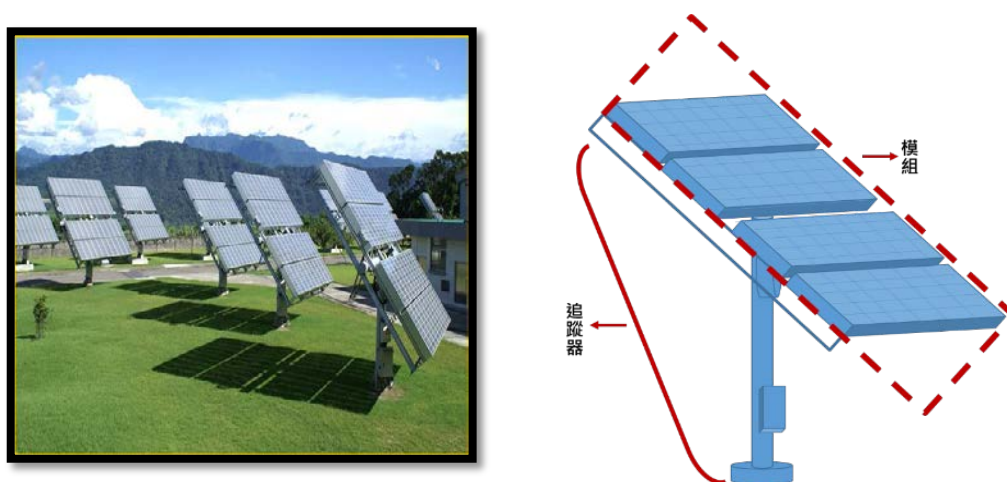


圖 1 7.5kW HCPV 實照圖與簡易圖(核能所)

其中模組之結構包括了菲涅爾透鏡、電池、散熱元件。發電程序利用菲涅爾透鏡將光聚焦至電池，電池底下之散熱底座可以必免熱斑現象，模組中其他散熱元件則可以將多餘熱量散發

出去，配合追蹤系統之追日技術來完成整個此系統之發電程序。

(二) 生命週期評估應用於太陽能能源系統

化石燃料不斷的減少與全球暖化是全世界嚴重的環境問題，由於能源需求的增加驅使發電系統之效率與環境潛在影響越來越重視，以致現今不斷研發再生能源發電系統而不再只是傳統的化石能源發電系統(Desideri et al., 2012)。儘管有許多文獻關於評估再生能源環境衝擊，結果也顯示其衝擊在碳排放方面的確比傳統的發電系統低很多，根據過去一些文獻評估結果:多晶矽光伏系統之碳排放平均介於 18.0 至 72.4g CO₂ eq/kWh；碲化鎘光伏系統碳排放介於 15.6 至 66.0 g CO₂ eq/kWh；銅銦錫光伏系統之碳排放介於 20.5 至 95.0 g CO₂ eq/kWh，相對於石化燃料發電之燃煤電系統之碳排放介於 519 至 1200 g CO₂ eq/kWh；以石油為燃料之發電系統之碳排放介於 800 至 1,280 g CO₂ eq/kWh，光伏發電系統在溫室氣體排放之影響相對於傳統能源系統來的小非常多(Dones et al., 2013; Bouchra et al., 2014)。

由於太陽能發電系統科技不斷的發展，也有許多關於不同指標的環境衝擊評估及能源回收期評估的文獻，都試圖評估其研究標的之太陽能系統之環境衝擊及能源回收期並提出改善方針，為的使太陽能系統可以以環境永續的方向產生能源。而根據不同關於比較不同光伏太陽能發電系統的文獻可以得知以下因素，都是會影響碳排放及能源回收期之因子為(1)製造時之所在地區不同的電力轉換係數會導致碳排放之結果會不同；(2)系統擁有高的轉換效率會使碳排放較少；(3)不同地區之幅照度；(4)不同

的光伏模組設計；(5)不同設置方法(屋頂型、地面型等等)；(6)不同系統之生命時間；(7)系統平衡(Balance of System, BOS)的效率。

二、研究方法

(一)研究流程

本研究針對高聚光型太陽電池系統為主軸，透過碳足跡評估與能源回收期的計算，搭配生命週期軟體 SimaPro 8.0.2，計算高聚光型太陽電池系統之碳足跡及能源回收期，並藉由過去相關的文獻與本研究之結果做比較分析。本研究步驟如下：

1. 訂定系統邊界與評估標的產品之功能單位，並繪製製程地圖以利後續應用軟體計算其碳足跡與能源回收期。
2. 進行數據盤查，不足部分由資料庫 EcoInvent3.0 數據庫以及相關文獻替代。
3. 計算碳足跡與能源回收期。
4. 進行影響分析與相關文獻之比較。

(二)研究範疇與邊界

本研究針對高聚光型太陽電池系統為主軸，透過碳足跡評估與能源回收期的計算，搭配生命週期軟體 SimaPro 8.0.2，計算高聚光型太陽能系統之碳足跡及能源回收期，以高聚光型太陽電池發電系統之運作時所發的一度電為功能單位(Functional Unit)，並將各生命週期階段之原物料投入、能資源投入及汙染排放計算後的碳排放量之結果轉換為每功能單位之負荷，得知使用此系統之每發一度電所產生的碳排放。

計算高聚光型太陽電池系統之碳足跡與能源回收期之系統

邊界，包含從組成原料萃取到最終廢棄階段，以及在每一階段之投入與產出也在計算範圍內。以下為此計算之系統邊界圖 2 所示：

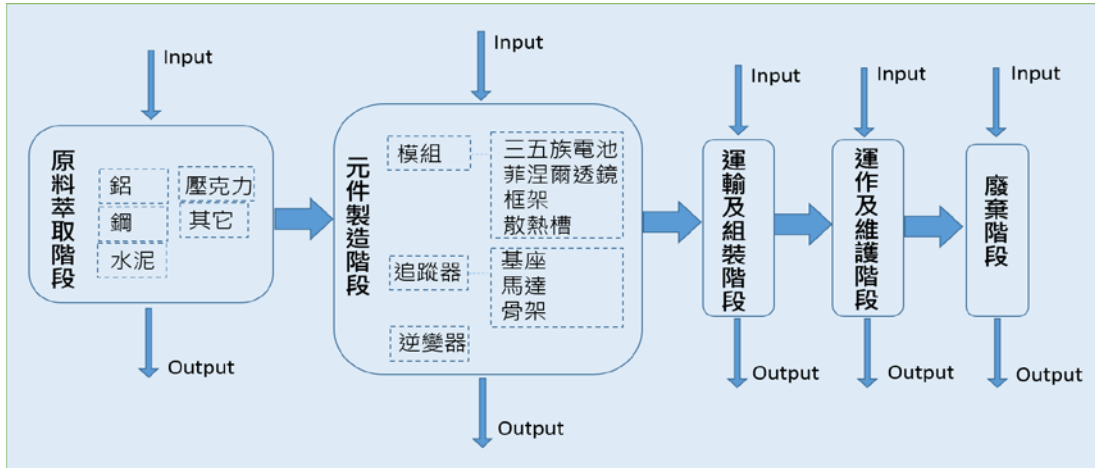


圖 2 系統邊界圖

(三) 研究限制與假設

本研究各階段之限制與假設如下：

1. 製造階段之單一模組之清單，其中的旁路二極體與陶瓷電路板其重量分別為 0.0024 kg 與 0.0012 kg，而單一模組之總重量為 18.9251 kg，因此予以截斷(Cut-off)，不予計算。
2. 運輸階段之假設全部組件設定自台南縣麻豆區運送至桃園縣龍潭鄉核能所，然而電池之製造商是由美國 Spectrolab 公司製造，但由於電池過量過輕而目前運輸部分之碳排放評估是以延噸公里(tkm)來做計算，因此電池所分配到碳排放過小因此予以忽略。
3. 組裝階段，此系統之追蹤器在組裝階段之耗電量數據以及耗材之耗用無法盤查得知，因此只有模組之組裝階段的數據與以本研究來計算碳足跡與能源回收期。
4. 廢棄階段，在本研究之初步結果之設定是在此階段將所有

系統廢棄之組件全部焚化，而後再將予以討論如果在此階段之設定為把可以回收之組件來做計算之結果討論。

5. 盤查數據都屬核能所提供之二級數據，因此在原料萃取端製造組件端之數據都採納軟體中之數據庫之相同或相近之數據來做計算，其中電池部分之數據採用。

(四)計算方法

本研究所使用之功能單位為高聚光型太陽電池系統之每發一度電為功能單位，因此在碳足跡部分以此功能單位來做評估此系統對環境的負荷。

1. 碳足跡計算方法

根據 PAS2050 : 2011 中產品碳足跡計算可分為搖籃到大門(Business to Business,B2B)以及搖籃到墳墓(Business to Consumer ,B2C)，搖籃到大門(B2B)此概念並不包括使用階段與廢棄階段，而搖籃到墳墓(B2C)概念則包括所有生命週期階段包括原料萃取、製造階段、運輸階段、使用階段與最終處置。本研究所評估之高聚光型太陽電池系統之碳足跡評估，是以搖籃到墳墓(B2C)概念來設定系統邊界並做計算。

本研究的計算方式為參考 ISO14067-1，將產品其生命週期中所有每一階段之一級活動數據或是二級活動數據乘上其相對應之碳排放係數，並累積加總級為碳足跡其計算方式，如下為計算公式：

$$\text{碳足跡} = \sum (\text{活動數據} \times \text{碳排放係數})$$

全球暖化潛勢值(Global Warming Potential, GWP)，指相對於二氧化碳而言，個別溫室氣體在所特定時間 20 年 100 年或

500 年內累積的輻射作用力，表示個別溫室氣體其個別在不同時間內的暖化能力，也就是不同的溫室氣體其不同停留時間之暖化影響，而其中碳排放係數為 100 年週期之溫室氣體特定因數。

本研究生命週期評估碳足跡以 IPCC 所公告之 2007 100a 做為評估基準，並選用我國 101 年電力使用之二氧化碳排放係數及臺灣大客車與小客車之碳排放數據，如表 1 所示：

表 1 本研究採用之電力與運輸排放係數

類別	年份	單位 CO2 排放量	備註
電力	2012	0.69 kg CO ₂ -eq/kWh	-
營業小貨車	2012	0.65 kg CO ₂ -eq/tkm	柴油
營業大貨車	2012	0.24 kg CO ₂ -eq/tkm	柴油

2. 能源回收期計算方法

能源回收期的定義是指系統在整個在生命週期中製造出的能源與投入之需求能源相同所需的時間(Peharz et al., 2004)，也就是是一種表示能源科技功效的指標，以時間表示建造及廢棄此系統時之耗用的能源，在開始運作多久後可以完全回收，是能源系統之能源永續性及二氧化碳減排潛力之指標，因此能源回收期之定義為能源系統之運作期間需要多久的時間方可在原料萃取階段、製造階段及廢棄階段之耗能可以回收回來。因此本研究所運用的計算公式為：

$$\text{能源回收期(year)} = \frac{\text{CED}_{\text{製造}} + \text{CED}_{\text{組裝}} + \text{CED}_{\text{廢棄}}}{(E_{\text{產生}} - E_{\text{耗用}}) \times R}$$

此公式之總能源需求(Cumulative Energy Demand, CED)之計算，本研究使用軟體中 CED 1.08 方法計算於本研究範疇內之製造階段、組階段與廢棄階段之總能源需求，單位為熱值單位(J、kJ、MJ、GJ)，而 R 為轉換係數，是轉換電力和主要能源之因子，此因子是每個國家藉由發電廠發電所消耗的像是燃煤、石油、核能等轉換成相同於原油的能源單位，而在臺灣地區的轉換因子，依據我國能源統計之電力消費係依等價熱值法(Equivalent Caloricity)進行統計，換算生產每度電所需初級能源投入(約 2,100 千卡/度)(經濟部能源局, 2014)，而 E 發電與 E 耗電分別為系統每一年產出的電力及每一年發電期間所消耗的電力。

參、主要發現與結論

一、研究結果

(一)高聚光型太陽電池發電系統之碳足跡

1. 各階段盤查結果

針對 7.5kW 高聚光型太陽能系統其生命週期各階段進行盤查與數據假設，此系統的組成包含了六十個模組與一追蹤器系統，而一個模組有四十顆三五族電池，根據核能所所提供的資料可以得知，此系統之發電效率保守估計有約 30%，受光面積有 34.56 平方公尺，當地直接正常輻射(Direct Normal Irradiation ,DNI)約為 909 kW/m²/year，而此數據是由 NREL(國家再生能源實驗室)所測得數據。

(1) 製造階段

此階段之清單由核能所提供，數據使用主要以 EcoInvent 3.0 數據庫當作輸入軟體之用，表 2 中為單一模組之結構組成清單，其模組主要材料為鋁，而數據由核能所提供其總重約 18.9215 公斤，其中一模組有 40 顆電池，所使用之電池為三接面三五族電池(GaInP/GaInAs/Ge)製造商為美國 Spectrolab 公司，而電池之相關數據取自 Vasilis et al., 2011 這篇文獻，文獻中的研究標的之系統為 Amonix7700 系統，其中約有 7560 顆電池，其評估結果之電池部分約排放 615 kg CO₂-eq，因此採用單一之電池之碳排放約 0.08135 kg CO₂-eq，作為本研究評估使用。

表 2 單一模組之結構組成清單

	元件	重量(kg)	數據來源
模組	骨架(鋁材)	7.4918	核能所提供
	內部結構(鋁材)	2.1027	
	螺栓(鑄鐵)	0.412	
	菲涅爾透鏡(PMMA)	3.35	
	散熱鋁板(鋁材)	5.565	
	總重	18.9215	

表 3 及表 4 為高聚行太陽能系統之追蹤器與逆變器之清單，此系統之追蹤器為雙軸追蹤器，其構造沒有液壓系統裝置其總重約 7524.72 公斤，整個追蹤系統可以擺放 60 個太陽能模組，另外，此系統之逆變器必須要 7.5KW，而本研究設定 EcoInvent3.0 數據庫之 2.5kW 逆變器，選用三個 2.5kW 逆變器並聯而得以計算評估碳足跡。

表 3 追蹤器之清單

	元件	重量(kg)	數據來源
追蹤器	鋁支撐材	324.21	核能所提供
	鋼支撐材	1994.22	
	馬達	6.3	
	基座	5200	
一追蹤器可以放60個模組			

表 4 逆變器之清單

	元件	kW	數據來源
其他	逆變器(2.5kWx3)	7.5	核能所提供

(2) 運輸與組裝階段

在運輸階段之設定，由表 5 可以得知所有元件統一假設自台南縣麻豆區運送至桃園縣龍潭鄉核能所，而運輸之數據使用，使運用臺灣碳排放系數之營業大貨車及營業小貨車之碳排放分別為 0.24 g CO₂-eq./ tkm 與 0.65 g CO₂-eq./ tkm 之數據，此外三五族電池自美國 Spectrolab 公司運輸來臺灣之碳排放計算與以忽略，原因是由於三五族電池其重量過小，而目前運輸之碳足跡計算是以延噸公里自予以分配碳排放，因此本研究所使用的電池自美國運輸至臺灣其被分配之碳排放亦非常小因此予以忽略。

表 5 運輸階段個元件之運輸假設表

	元件	重量(kg)	運送途徑	工具	距離	tkm
模組	電池	0.5616	高雄港 → 台南麻豆區	卡車	75.3(km)	42.28848
			洛杉磯港 → 高雄港	貨船	11229.37(km)	忽略
	骨架及內部結構	10.0065	台南麻豆 → 桃園龍潭	卡車	241(km)	1255.612
	菲涅爾透鏡	3.35				
散熱鋁板	5.565					
鋁支撐材	324.21					
追蹤器	鋼支撐材	1994.22				
	馬達	6.3				
	水泥	5200				
其他	逆變器	150				

本研究無法盤得追蹤器在組裝階段時關於其耗電量及耗材部分之數據，而表 5 是關於模組組裝階段之耗電及耗材數據。

表 6 組裝階段投入清單

組裝階段			
模組	電力	2.71(kW)	核能所提供
	錫膏	0.20035(kg)	
	矽膠	0.1003(kg)	

(3) 運作與維護階段

本計劃根據核能所預估此系統之生命時間約為 30 年，此系統之受光面積約有 34.56 平方公尺而轉換效率約為 30%，因此利用下面公式來計算系統運做 30 年之發電量，詳細數據如表，系統期運作 30 年間之發電量約為 282735.4 kWh，而運作期間之耗電量之數據由核能所提供再予以換算為 30 年之預估數據。本計劃之發電量計算公式：

$$\text{發電量} = \text{DNI} \times \text{受光面積} \times \text{發電效率} \times \text{時間}。$$

本計劃計算之結果顯示，系統運作三十年期間其電力將可產生約 282735.4 kWh，為維持系統運作需耗用約 547.5 至 1671 kWh 之能源投入。

(4) 廢棄階段

此階段之廢棄物處理階假設在此以焚化處理為主，並假設運送至焚化廠距離為 24.4 公里，排放係數則選用臺灣大客車之碳排放係數來做計算。

2. 碳足跡計算結果

生命週期各階段之碳排放量，各階段之碳排放量分別為製造階段:15,200 kg CO₂-eq ;運輸階段:328.6 kg CO₂-eq ;組裝與運作階段:388 kg CO₂-eq ;廢棄階段:209 kg CO₂-eq，結果由表 7 所示，而由圖 3 可以明顯得知各階段在全生命週期中之碳排

放量百分比，各階段之碳排放量百分比分別為製造階段占 92.3% ;運輸階段占 2.4% ;組裝與運作階段占 4.0% ;廢棄階段占 1.3%，因此可以得知製造階段之碳排放所占的比例是最大的，其次是運作及組裝階段。

表 7 高聚光太陽能系統之生命週期各階段碳排放量
GHG 各階段排放量

Stage	GHG(kg CO ₂ -eq.)
製造階段	15,200
組裝與運輸階段	388
運作/維護階段	656
廢棄階段	209
Total	16,453

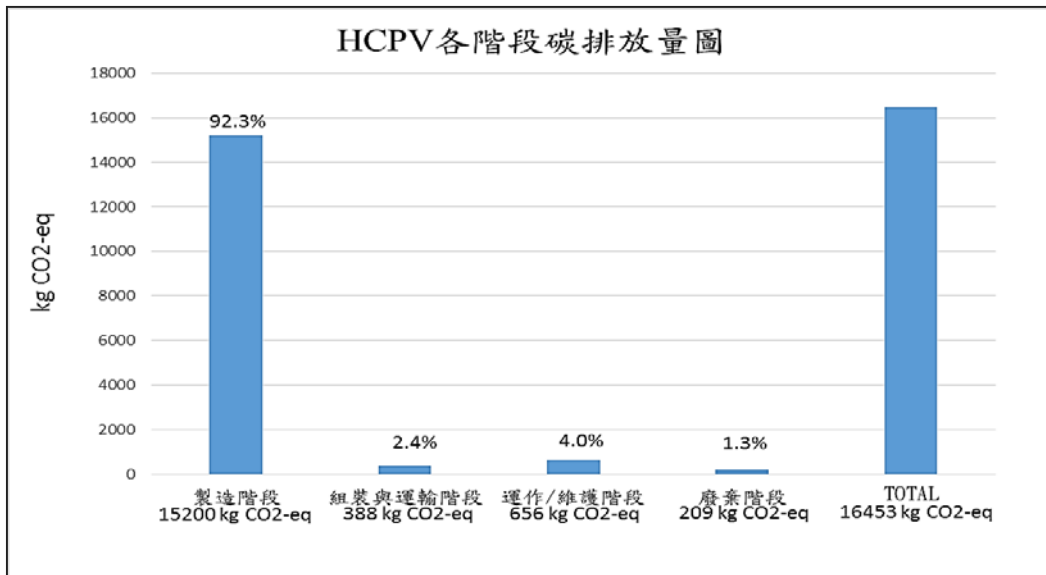


圖 3 生命週期各階段碳排放百分比

本研究之高聚光型太陽能系統位在桃園縣龍潭鄉，當地

之直接正常輻射(DNI)取自 NREL 的測量數據，因而取得龍潭當地之 DNI 值為 2.49 kWh/m²/day，而可得知每年之 DNI 值為 909 kWh/m²/year。表列出每年此系統大約可產生的電力，此系統之生命時間約為 30 年，因此計算出的碳足跡約為 58.19 g CO₂-eq./kW，也就是此系統每發一度電所產生的碳排放為 58.19 g CO₂-eq.。

(二)高聚光太陽能發電系統之能源回收期

1. 目標與系統邊界

本研究為了計算此系統之能源永續性因此評估高聚光型太陽能發電系統之能源回收期，依循碳足跡計算之系統範疇，利用計算工具 SimaPro8.0.2 軟體中之 CED 1.80 方法來計算系統於製造階段、組裝階段及廢棄階段的總能源需求(CED)，而此數據即為本研究案例之除運作時產生能源外之其他階段的總耗用能源，其中電池之總能源需求乃是取自文獻中的數據。

2. 能源回收期計算結果

表 8 是關於系統於製造階段、組裝階段及廢棄階段的總能源需求的計算數據結果，另外此系統每年所產生電量及耗電量分別為約 94245.12 度及 41.975 度，而轉換係數方使用本國之係數為 2100 千卡/度約為 8786.4 千焦耳/度的數據。藉由上述所得到之數據帶入至能源回收期公式中，而得到此系統能源回收期結果為約 1.89 年的回收時間。

表 8 高聚光太陽能系統各階段 CED 計算結果

Stage	CED(GJ)
系統製造階段之 CED(不包括電池)	145
系統之組裝階段	0.79
電池製造階段之 CED(自文獻)	4.62
系統廢棄階段之 CED	5.47
CEDsystem(GJ)	155.88
台灣初級能源換算生產每度(KJ/kW h)：8786.4	

(三)影響因素分析

在本研究之第二章節文獻回顧提到一些因素會影響太陽能系統之碳足跡評估結果，包括設置地點之直接太陽輻射、生命使用時間、不同科技設計等等，而前一節之研究結果闡釋是在此系統之生命時間之設定為 30 年並且當地 DNI 值為 909 kW/m²/year 而廢棄階段設定為全部都由焚化處理，本節分析影響碳足跡結果之四個不同因素包括：(1)廢棄階段有無回之因素；(2)延長系統使用壽命；(3)討論在臺灣不同地區下 DNI 值之碳足跡結果；(4)設定相同 DNI 值之條件下不同產品之碳足跡比較。

1. 廢棄階段有無回收之因素

由於模組使用的骨架、內部結構、散熱鋁材與追蹤器所使用的支撐材都為鋁材，而設定鋁的回收率為約 72%、廢棄螺栓為廢鐵的回收，其回收率設定為約 70%，鋼材回收率設定為約 90%、壓克力材料回收率設定與廢棄水泥之回收率設定分別約為 99%及 95%，表 9 列出了詳細的數據設定，並且其餘沒回收之材料亦予以設定以焚化方式處理。

表 9 高聚光太陽能系統各階段回收率假設值

	元件	重量(kg)	回收率
一個模組	骨架	7.4918	72%
	內部結構	2.1027	72%
	螺栓	0.412	70%
	菲涅爾透鏡(PMMA)	3.35	99%
	散熱鋁板	5.565	72%
	電池(40 顆)	0.5616	0
追日器	鋁支撐材	324.21	72%
	鋼支撐材	1994.22	90%
	馬達	6.3	0
	水泥	5200	95%
其他	逆變器(2.5kW*3)	150	0

因此得到負值的碳排量數據(-7610 kg CO₂-eq)，而總碳排放量變為 8634 kg CO₂-eq，而圖 4 可以明顯看出，在此回收的設定所占的百分比為 -88.1%，可以大幅減小整個生命週期階段之碳排放，而碳足跡結果約為 30.54 g CO₂-eq/kWh。

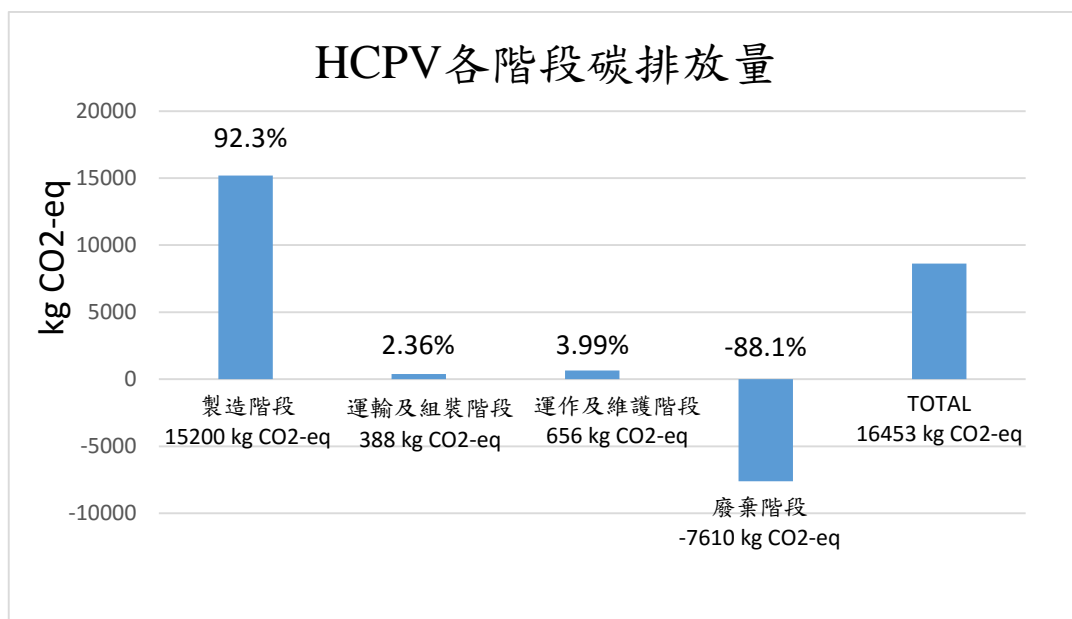


圖 4. 高聚光太陽能系統各階段碳排放量

能源回收期的結果如表 10 所示，如於廢棄階段有回收其期能源回收期也會自原本的 1.89 年縮短至約 0.9 年。

表 10 考量廢棄階段有無回收之能源回收期比較表

公式	能源回收期	
$\frac{CED_{製造} + CED_{組裝} + CED_{廢棄}}{(E_{產生} - E_{耗用}) \times R}$	廢棄階段(有回收設定)	廢棄階段(無回收設定)
	0.925	1.891

2. 不同生命週期之因素

本研究之系統原本設定之生命時間為 30 年，在此假設延長此系統之生命時間至 50 年，並且假設沒有汰換任何零件，假設換算結果是在廢棄階段無設定回收數據之條件下之結果，從表 11 可以得知延長生命時間至 50 年之碳足跡為 34.92 g CO2-eq/kWh，減少了約碳足跡約 24 g CO2-eq/kWh。而如果

是在廢棄階段有設定回收數據之條件下，如表 4.13 所示其碳足跡由 30 年之生命週期之碳足跡 30.54 g CO₂-eq/kWh 降至生命時間 50 年之碳足跡為 18.32 g CO₂-eq/kWh。

表 11 考量不同生命週期之高聚光太陽能系統之碳足跡排放表

高聚光太陽能系統 生命週期	30 年	50 年
發電量(kWh)	282735.4	471225.6
碳足跡(有回收)(gCO ₂ eq/kWh)	58.19	34.92
碳足跡(無回收)(gCO ₂ eq/kWh)	30.54	18.32

3. 不同區域之 DNI 值因素(以台灣為例)

以臺灣為例，利用 NREL 所測之臺灣各區塊之 DNI 值數據，分別有 42 個 DNI 數據(如表 12 所示)，計算 42 個數據以及其不同 DNI 值下之發電量和碳足跡，並對照圖 5 可以得出在臺灣哪一區塊設置此系統其碳足跡其碳足跡會較小，由計算結果得知於圖 5 之區塊 31、區塊 27 及區塊 13 之碳足跡分別為 23.12 g CO₂-eq/kWh、 23.22 g CO₂-eq/kWh 及 25.04 g CO₂-eq/kWh，此三區塊為碳足跡結果較小的地方。

表 12 台灣各區域不同之 DNI 下高聚光太陽能系統之碳足跡比較表

台灣各地區不同DNI值之碳足跡結果										
NO.	DNI(kW/m ² /day)	DNI(kW/m ² /year)	發電量(30年)	碳足跡	NO.	DNI(kW/m ² /day)	DNI(kW/m ² /year)	發電量(30年)	碳足跡	
1	1.809	660.285	205375.0464	80.11197216	22	2.559	934.035	290522.2464	29.71889453	
2	1.528	557.72	173473.2288	49.77136853	23	2.791	1018.715	316861.1136	27.24853139	
3	1.627	593.855	184712.6592	46.74287099	24	2.159	788.035	245110.4064	35.22494262	
4	1.756	640.94	199357.9776	43.30902683	25	2.108	769.42	239320.3968	36.07715897	
5	2.49	908.85	282688.704	30.54243016	26	2.76	1007.4	313341.696	27.55458373	
6	1.852	675.98	210256.8192	41.06406647	27	3.274	1195.01	371695.9104	23.22866558	
7	1.705	622.325	193567.968	44.60448745	28	2.022	738.03	229556.8512	37.61159798	
8	1.844	673.06	209348.5824	41.24221861	29	2.112	770.88	239774.5152	36.00883102	
9	2.559	934.035	290522.2464	29.71889453	30	2.592	946.08	294268.7232	29.34052898	
10	2.631	960.315	298696.3776	28.90560665	31	3.288	1200.12	373285.3248	23.12976007	
11	1.464	534.36	166207.3344	51.94716606	32	2.748	1003.02	311979.3408	27.67490943	
12	2.363	862.495	268270.4448	32.18394038	33	1.878	685.47	213208.5888	40.49555437	
13	3.037	1108.505	344789.3952	25.04137343	34	1.95	711.75	221382.72	39.0003339	
14	2.129	777.085	241704.5184	35.7213016	35	2.442	891.33	277239.2832	31.14277277	
15	1.429	521.585	162233.7984	53.21948993	36	2.75	1003.75	312206.4	27.65478222	
16	2.891	1055.215	328214.0736	26.30600177	37	2.777	1013.605	315271.6992	27.38590245	
17	2.782	1015.43	315839.3472	27.33668264	38	2.307	842.055	261912.7872	32.9651717	
18	3.039	1109.235	345016.4544	25.02489342	39	2.77	1011.05	314476.992	27.4551087	
19	1.607	586.555	182442.0672	47.32461177	40	2.976	1086.24	337864.0896	25.55465427	
20	2.724	994.26	309254.6304	27.91874123	41	2.611	953.015	296425.7856	29.12702072	
21	2.79	1018.35	316747.584	27.25829789	42	2.708	988.42	307438.1568	28.08369686	

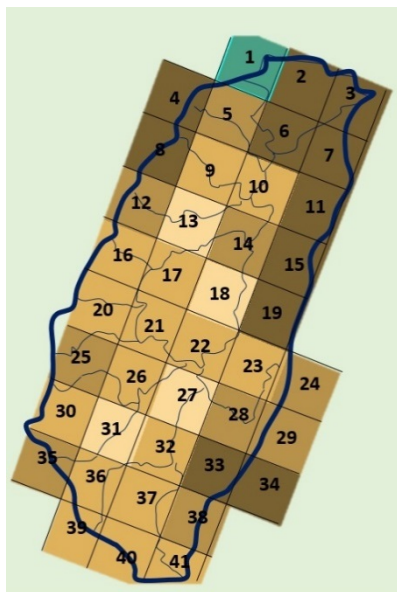


圖 5 台灣 42 個區域之 DNI 值

由圖 4.5 可以得知不同地區之 DNI 值的大小與碳足跡的相關性，而得知 DNI 值越大則碳足跡結果越小，DNI 值越小則碳足跡結果越大，其原因是 DNI 值會影響高聚光太陽能發電系統的發電量，因此發電量越多則代表系統之對環境之效益較高。

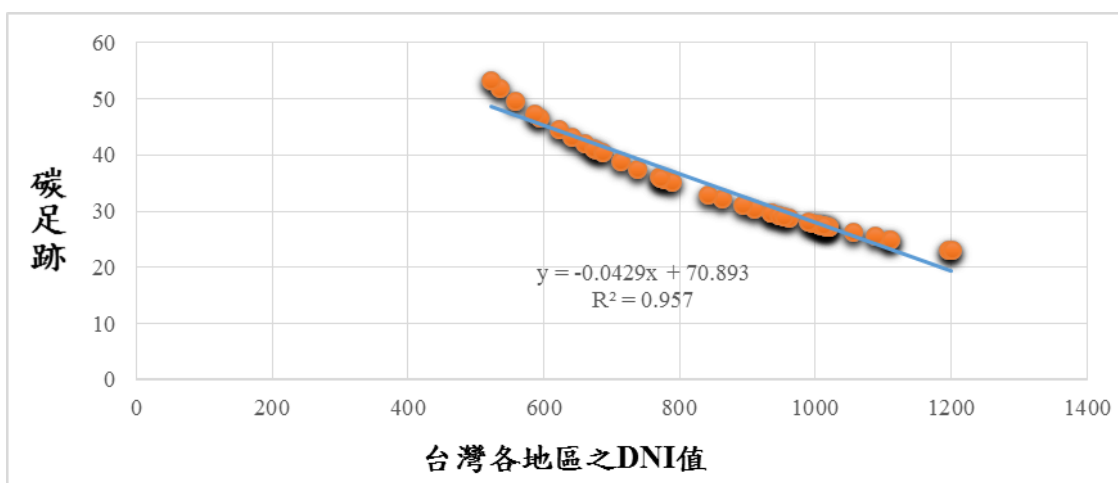


圖 6 DNI 值與碳足跡關聯圖

4. 相同 DNI 值下不同產品之比較因素

在此設定相同 DNI 值條件下為 1200 kW/m²/year，選擇此 Fthenakis et al.(2012)文獻中之 Amonix7700 之高聚光型太陽系統來做討論，在文獻中此系統之在整個生命週期中之總碳排放為 110575 kg CO₂-eq，而生命時間設定為 30 年，此系統之發電量計算使用公式為： $Y(\text{kWh}/\text{year}) = A \times \text{DNI 值}$ ，其中 A 為 55.361 平方公尺(此數值由文獻提供)，下表 13 為計算結果，雖然原始結果顯示之碳足跡結果為 58.19 g CO₂-eq/kWh，與 Amonix7700 此系統在文獻中之碳足跡結果約 26 g CO₂-eq/kWh 比起來其本研究之系統之碳足跡是較大的，但設定在相同 DNI 值之條件下，Amonix7700 系統之碳足跡將增加至約 55.48 g CO₂-eq/kWh，而本研究之系統之碳足跡結果將降為約 41.69 g CO₂-eq/kWh，故於比較不同文獻之不同系統其碳足跡大小比較時，必須了解其不同條件下所計算得出之結果。

表 13 相同 DNI 值下本研究標的產品與文獻之比較表

	7.5kW HCPV	Amonix7700
在 DNI 值= 1200		
kWh/m ² /year 條件下之發電量(kWh)	394,632	1992,996
生命時間 30 年中之總碳排放量(kg CO ₂ -eq/kWh)	16,453	110,575
碳足跡(kg CO ₂ -eq/kWh)	0.0417	0.0555

二、 研究結論

(一)結論

本研究在高聚光型太陽電池發電系統之生命週期中之廢棄階段設定全部以焚化處理之碳足跡結果為 58.19 g CO₂-eq./kW，能源回收其結果為 1.89 年的回收時間。而在本研究之文獻回顧提到許多文獻指出在比較不同太陽能發電系統之環境負荷，必須考慮不同的因素再來進行比較，而此結果是在系統設置於直接正常幅照度為 909 的區域，相對於其他關於高聚光型太陽能發電系統之生命週期評估的文獻的設置條件是有很大的不同的。

根據本文獻之回顧了解幾個不同因子可以改變碳足跡的大小，其中將生命週期中之廢棄階段將可回收之材料設定回收處理，則評估結果其碳足跡結果為 30.54 g CO₂-eq/kWh 而能源回收期為 0.9 年，自此結果得之回收處理將有助於本研究之能源系統之碳足跡負荷更為減小，能源回收更可以在較短的時間內回收，Nishimura et al.(2009)也提到考慮回收階段其環境衝擊會大幅的減小。

而另一個因子為延長本研究之系統的使用時間期結果的討論，本研究中，假設生命時間延長至 50 年而過程沒有零件汰換，則於廢棄階段無回收設定之碳足跡結果為 34.92 g CO₂-eq/kWh，而廢棄階段有回收設定之碳足跡結果為 18.32 g CO₂-eq/kWh，因而得知延長使用的時間將有助於碳排放可減小。

本研究之高聚光型太陽電池發電系統之設置地區其直接正常幅照度較小，因此以臺灣為例計算不同直接正常幅照度與碳

足跡之相關性，結果得知直接正常幅照度越大其碳足跡也越小，因為直接正常幅照度影響系統的發電量進而影響碳足跡大小。

本研究與 Fthenakis et al.(2012)之碳足跡與能源回收其結果相比，以本研究之生命週期中之廢棄階段有無回收設定之結果相比，本研究的結果比其文獻的評估結果大，但由於兩系統之設置地點之直接正常幅照度不同，因此將次兩系統假定設置在同一區域而直接正常幅照度設為 1200，結果顯示本研究之系統為 41.69 g CO₂-eq/kWh，而 Fthenakis et al.,(2012)文獻之 Amonix7700 系統之結果為 55.48 g CO₂-eq/kWh，顯示雖然不同系統之設計不同，設置區域的條件會影響太陽能發電系統之碳排放。

(二)建議

1. 本研究廢棄階段之有無回收設定與延長設定的生命時間之結果顯示，雖然太陽能發電系統於製造時造成的環境負荷較大，但如果可以在此系統廢棄不用時予以一些材料在技術可行之下做回收處理，可以減小碳排放，並且於技術可行下設計此系統可使用的時間延長，也可減小碳排放的負荷。
2. 本研究結果對於不同直接正常幅照度對於碳足跡的評估結果，顯示本研究之案例-高聚光型太陽電池發電系統雖然目前仍在研發階段，但未來於實際發電於生活上或是工業上，為了實際使此系統不管對於其供電的效益或是對環境的效益提高，設置地區必須選擇使高聚光型太陽電池發電系統之效益較佳的環境。
3. 由於本研究於盤查時遇到一些限制，因此建議未來應對於本

研究之案例-高聚光型太陽電池發電系統，評估其對於其他不同環境所造成的衝擊類別，像是佔地面積、水的耗用及對人體的毒性等等，如此可以提供相關數據，予以此系統之科技設計的改善方針。

肆、參考文獻

1. Bakhiyi, Bouchra, France Labrèche, and Joseph Zayed. "The photovoltaic industry on the path to a sustainable future—Environmental and occupational health issues." *Environment international* 73 ,2014,pp.224-234.
2. Dones, R., Heck, T., & Hirschberg, S.. Greenhouse gas emissions from energy systems: Comparison and overview. *Energy*, 2003, pp.89-110.
3. Desideri, U., & Yan, J. Clean energy technologies and systems for a sustainable world. *Applied Energy*, 97, 2012, pp.1-4.
4. Desideri, U., & Yan, J. Clean energy technologies and systems for a sustainable world. *Applied Energy*, 97, 2012,pp.1-4.
5. Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. Life cycle assessment of high-concentration photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(3), 2013, pp.379-388.
6. Nishimura, A., Hayashi, Y., Tanaka, K., Hirota, M., Kato, S., Ito, & Hu, E. J. Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system. *Applied Energy*,87(9), 2010 ,pp.2797-2807.
7. PAS 2050:2011 ; Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services
8. BSI, PAS 2050, “The Guide to PAS 2050-2011, How to carbon your product footprint, identify hotspots and reduce your emission in the supply chain,” London: British Standards Institute, 2011
9. 能源統計手冊,2014
10. 經濟部能源局能源產業溫室氣體減量資訊網
http://web3.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/content/SubMenu.aspx?menu_id=114
11. 濱川圭弘，光電太陽能電池設計與應用，五南出版社，2009。

12. 翁敏航，太陽能電池，東華出版社，2011。
13. 行政院環保署，產品與服務碳足跡計算指引，2010。
14. 行政院環保署，我國碳足跡計算指引架構圖，2014。

<http://cfp.epa.gov.tw/carbon/ezCFM/Function/PlatformInfo/FLFootProduct/ProductGuide.aspx>