

太陽能發電系統生命週期淨能源分析與成本效益評估

Net Energy Analysis and Benefit Cost Evaluation of Solar Power Generating System in Its Life Cycle

許志義*
Hsu, Jyh-Yih

蔡志欣**
Tsai, Chih-Hsin

摘要

本研究旨在透過生命週期研究太陽能發電系統的整體投入與產出，是否符合經濟效益。在研究方法上，首先以淨能源分析，探討能源投資是否有淨能源產出；再者，針對太陽能發電系統進行經濟分析。

透過淨能源分析法，得到結論顯示在太陽能發電系統能源投資報酬率方面，單晶矽的能源投資報酬(EROI)為 3.56、能源回收期為 5.12 年；多晶矽的能源投資報酬為 4.09、能源回收期為 4.59 年，當能源投資報酬(EROI) > 1 時表示能源有效率，產出效益較高。因此，太陽能發電系統從生命週期的角度來檢視能源效率是具有效益的。

同時，透過敏感度分析，可以發現對淨現值與益本比的影響程度最大者，分別為躉購電價下降，其次是安裝成本下降，而利率上升對於淨現值與益本比的影響程度最小。

Abstract

The present study is designed to study the cost-effectiveness of the solar power generation system throughout its entire life cycle. The first step of the study is to identify whether or not there will be a net energy output from the investment in the energy input. After that, the next step goes to make economic analysis of the solar power system.

The results of study show that in the case of the crystal silicon solar system, the return of investment (ROI) is 3.56, energy payback period 5.12 years while in the case of polysilicon solar system, ROI is 4.09, the energy payback period 4.59 years, both cases representing the fact that there is a net benefit in use of a solar power generation system based on a life-cycle analysis.

The results also show that, both in terms of energy use and of CO₂ emissions, single-crystal silicon solar panels are significantly better than polysilicon solar panels. And through a sensitivity analysis, it can be found the most sensitive factor that can influence the project's Net Present Value and Benefit-Cost Ratio will be the change in the wholesale electricity purchase prices, followed by the installation costs, while the least sensitive factor will be interest rates.

關鍵詞(Key Words): 太陽能發電(Solar Power Generation)、生命週期評估(Life Cycle Assessment)、成本效益分析(Cost-Benefit Analysis)、淨現值(Net Present Value)、益本比(Benefit-Cost Ratio)、淨能源分析(Net Energy Analysis)。

*國立中興大學應用經濟學系、資訊管理學系暨產業發展研究中心

**國立中興大學應用經濟學系碩士生暨產業發展研究中心

壹、研究動機與目的

太陽能是地球上所有能源的根源，除了太陽能，地熱、核能，地球上大多數的能量皆來自太陽能，煤碳、石油、水力、風力等都是太陽能的儲存能，水力發電是運用水的位能轉換成渦輪的動能，再轉成電能的發電方式。高位能的水來自太陽熱力而蒸發，因此可以視為間接地使用太陽能，其餘的能源嚴格說都是太陽能的衍生性能源。由於技術成熟，是目前人類社會應用最廣泛的可再生能源。風力發電^[1]，是利用風來產生電力的發電廠，亦屬於可再生能源的一種，水利風力發電也都是太陽能所衍生產生的能源。太陽能在目前的科技下，除了不斷的提高轉換效率，更發展出追日型、聚光型太陽能發電系統 OFOF (Solar PV system)，可按地理環境的不同，大規模佈置，在未來的幾年可持續降低發電成本，更有市場發展的空間。

根據全球再生能源推廣組織(Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21)的統計數據結果顯示，2014 年全球再生能源總投資額為 2700 億美元，太陽能 1770 億美元，太陽能發電量增加了 40GW，2014 年全球再生能源發電量達 312GW，其中，排名前五大使用國為德國、中國、日本、義大利與美國，目前全球太陽能發電量規模約佔全球再生能源總發電量 3.9%，佔全球總發電量 0.9%。從投入金額來看，太陽能與風力發電為領先技術，在投入金額的比例與發電總量的部分都占前兩名。而同時系統的造價於 2015 第三季下降了 17%，持續下降的建置成本，將會刺激更多的需求，同時更低的建造成本，更可達到更低的發電成本，在未來太陽能發電價格可以與燃煤與天然氣發電價格更接近，而在 2030 年太陽能發電價格估計可低於燃煤價格(Schlegl fraunhofer Institute For Solar Energy Systems Ise, 2013)，因此全球各國無不競相投入太陽能廠的投資。

太陽能電板廠，在台灣或全世界，在環保議題上較能夠被環保人士所接受，且在科技進步的速度上，不斷提高太陽能轉換率，若與其他種類的再生能源交叉使用更可以提高效率，更高的轉換效能，與更低的運營成本，配合電力輔助服務與電池備援及市電系統，可於尖峰時間彌補發電量不足，在有剩餘時，可以回送至輸電系統，供用戶使用，可大幅減少燃煤及燃氣電廠，排放二氧化碳及 PM_{2.5}。

太陽能電板固然能夠產生能源，但是在製造過程中，仍需要投入能源，且有環境與資源投入，因此需要評估其淨能源投入是否為正，方可知是否有投資的效益，因此需要從生命週期來看，生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)^[2]為最具代表性的評估方法，可以用來探討太陽能廠從原料開採、製造、配送、建置、營運、維修、棄置或回收再利用等所有不同時間點上，各項投入、產出、資源使用、人類健康及生態等潛在之衝擊。

基於上述，本研究目的如下：

- 一、生命週期太陽能發電系統之淨能源分析與 CO₂ 排放，期望從生命週期角度進行評估，理解太陽能發電系統內不同時程能源的投入與產出、與能源回收時程；並比較單晶矽太陽能電板與多晶矽太陽能電板之 EPT、EROI、能源耗用與 CO₂ 排放。
- 二、從生命週期的太陽能發電系統成本效益分析
 - (一) 淨現值分析
 - (二) 益本比分析
 - (三) 內部報酬率
 - (四) 均化能源成本
- 三、透過不同情境的模擬，進行敏感度分析，探討單晶矽與多晶矽太陽能發電系統之淨現值與益本比。

綜合生命週期與經濟模型兩者之結果比較，將兩種不同研究的方法加以結合，找出何者為最佳投資策略，並透過敏感度分析探討躉購價格、安裝價格與利率因素，何者對效益的影響最

大。可提供投資太陽能發電系統之建議，同時做為未來政府制定政策(饋網電價 2F2F)之參考依據。

本研究範圍為太陽能發電系統之生命週期，將太陽能發電系統的生命週期界定為六個子系統，原料子系統、生產製程子系統、運輸子系統、建造子系統、運轉子系統、廢棄處理子系統，本研究之系統範圍主要界定為太陽能廠發電的整個過程，由最前端之矽原料開採、製造、配送，乃至後端的運輸、建置、發電，到太陽能電池之廢棄、回收^[3]。以便於進行盤查分析與研究。另外，由於本篇之研究主要探討發電所造成的環境衝擊，投入之能源，與產出之能源比較，後端之配電、輸電的部分則不在本研究的範圍內。

本研究案例為 499kW 太陽能發電系統的建置類型為屋頂型太陽能發電系統，安裝於建築物的屋頂或頂樓，並非追日型太陽能系統，沒有追蹤太陽的角度之功能。太陽能電板範圍種類，僅限定為矽晶類的太陽能電板，包含單晶矽 3F3F 太陽能電板與多晶矽 4F4F 太陽能電板，其他均不在此次的研究範圍。

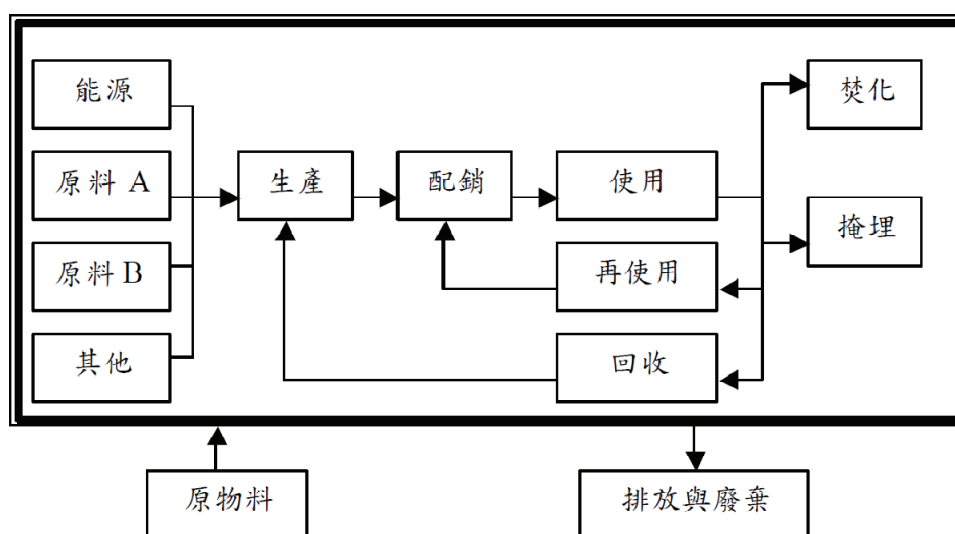
本章運用三種研究方法，研究太陽能發電系統。包括：一、界定太陽能發電系統之生命週期，二、利用淨能源分析，探討太陽能發電系統能源投入是否有淨能源產出，並估算其能源回收期^[4]與能源投資報酬；三、採用效益評估，探討太陽能發電系統是否具有經濟效益。

一、生命週期評估架構

美國環境毒理及化學協會(SETAC, 1991)：「生命週期評估是一個衡量產品生產或人類活動所伴隨而來之環境負荷的工具，不僅要知道整個生產過程的能量、原料需求量及環境排放量，還要將這些能量、原料及排放量所造成的影響予以評估，提出改善的機會和方法。評估包括整個生命週期中產品，生產過程或活動，粹取和原料的取得、製造、運輸、配送；使用、再使用、維護、再生和最終棄置。」

生命週期評估^[5]是一種分析與評估產品生命週期中所有投入之原物料、產品或產出服務對環境衝擊之方法。根據美國環境毒物及化學協會(SETAC)所建立之生命週期評估方法架構，如圖 1 生命週期流程評估方法架構。

貳、研究方法



資料來源：本研究整理

圖 1 生命週期流程

(一)目標與範疇界定(Goal and Scope Definition)：

「目的與範疇界定」主要需界定作業目的與作業範疇，俾使評估流程易於掌握、評估結果能有效應用。

(二)生命週期盤查分析(Inventory Analysis)：生命週期盤查分析包括數據收集與清單計算兩大類，其過程主要為量化系統的相關投入與產出(Input/Output)。

(三)生命週期闡釋(Interpretation)：生命週期闡釋主要為合併盤查分析與衝擊評估結果，或僅將盤查分析結果，與界定的目的與範疇整合一致的階段，以達成結論與建議的型式提供給決策者，以作為選用污染性較低之物料、生產流程改善、或提昇產品設計等生產決策之參考。

所有的產品，從原料開採至原料配送，生產製造，配送、安裝、使用或廢棄回收，都屬於生命週期的一部分，其中投入與產出，可分為

1. 原物料與能源之投入。
2. 產品、半成品、再製品、能源或由其他流程能源的產出而得的投入(經濟性投入)。

產出之部分則可分為：

1. 排放產出(環境輸出)
2. 產品、半成品能源或由其他流程能源的投入而得的產出(經濟性產出)。

綜合以上的生命週期流程，將太陽能發電系統的生命週期，定義為六個子系統，以便於進行盤查與分析^[6]。

1. 原料開採與精煉階段

此階段主要是針對太陽能電板生產所需要的矽、玻璃、鋁框、EVA、銅、塑膠等初級材料，進行基礎盤查與統計所需的各項材料，並從原料初始狀態的開採、提煉、精煉過程，估算其中所需之各種能源投入、水使用與可能發生的各種污染排放。

2. 太陽能電板的製造過程

此階段著重於從矽晶圓拉晶、蝕刻、黃

光、切片，至太陽能電板加工，生產，至模組出貨的情形，估算其中所需投入的各種能源、各種化學材料與可能發生的各種污染排放。但組裝太陽能電板，所需之保護玻璃，線材，鋁框等，亦屬於此製程中進行外購、檢驗、組裝，終檢、包裝，才進入下一個運輸階段。

3. 運輸階段

此階段著重於將太陽能發電系統所需要的各種材料從原產地運送至案場所在地，包含太陽能電板從模組廠運送至案場，逆變器、電線、安裝框架，過程中包含各種運輸工具可能產生的污染排放與相關能源投入，因台灣是太陽能電板的生產國，本研究中之大部分產品均可由台灣本地供應，因此僅計算內陸運輸部分，不進行海運方式的試算。

4. 太陽能光電系統建造階段

此階段主要是探討太陽能光電系統施工過程中，大型機械機具或吊車與工地運營所產生的污染排放或包裝材料的棄置處理與其相關能源投入。

5. 太陽能光電系統營運階段

此階段用來評估太陽能光電系統開始運轉至生命週期到達拆除前，運轉過程中所需要的能源投入、用水需求與可能的污染排放。

6. 太陽能光電系統拆除與循環利用階段

此階段主要針對太陽能光電系統治經濟年限或壽命年限後，進行拆除，在拆解過程中與後續進行處理回收所產生的污染排放與相關的能源投入或可能進行的循環利用。

二、淨能源分析

所謂的淨能源(Net energy)是衡量能源產出以及生產過程中包含資源開採、處理、運送等總能源消耗的差值，意即粗能源產出減去能源生產過程中所需之所有能源投入之淨值即為淨能源產出。Pimentel(2003)^[7]指出淨能源表示能源產出

是否大於能源投入的方法之一，即是淨能源產出。淨能源產出指的是生產再生能源時所產出的能源減去生產再生能源時所投入的能源；生產時所必須投入的勞動、資本、人力以及環境都是生產過程中的投入，這些投入的運作也間接的需要能源，故也算是生產過程中的間接能源。

(一) 能源回收期(Energy payback time, EPT)

用來衡量能源技術需要運行多少時間，才能產生足以彌補其製造及興建過程中所耗用之能源；意指要回收系統之總能源投入所需花費的時間。

$$\begin{aligned} \text{EPT} &= \frac{\text{Life Cycle Energy Input}}{\text{Net Energy Output}} \\ &= \frac{E_{in}}{E_{out} - E_{use}} \end{aligned} \quad (1)$$

EPT: 表示能源回收期

E_{in} 表示太陽能發電系統生命週期之能源投入

E_{out} 表示太陽能發電系統生命週期中產出之能源

E_{use} 表示太陽能發電系統於生命週期中產生熱量所需耗用之能源。

概念如圖 2 能源回收期(有效率)。

圖 2 能源回收期(有效率)，其中建造期(藍色部分)面積等於能源回收期(橘色部分)之面積，同時小於系統運轉期(橘色部分加上綠色部分)之能源產出，則表示該建置系統之能源投入小於系統運轉期之能源產出，為能源投資有效率。

圖 3 能源回收期(無效率)，其中建造期(藍色

部分)面積大於系統運轉期(橘色部分加上綠色部分)之面積，則表示該建置系統之能源投入大於系統運轉期間之能源產出，為能源投資無效率。

能源投入能量與太陽能發電系統生命週期中之能源產出必定都為正數，因此 EPT 值必定大於零，當 EPT 值越大，代表能源回收時間越長，表示需要越長的時間才能回收建造期之能源投入；反之，當 EPT 值越小，代表能源回收時間越短。

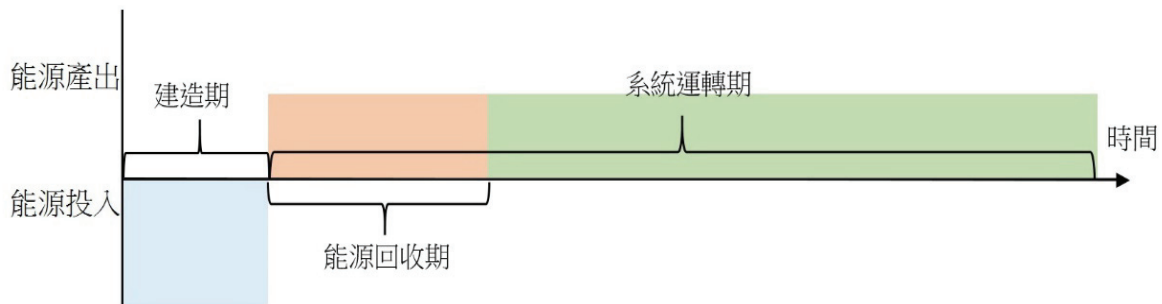
(二) 能源投資報酬 (Energy Return on Investment, EROI)：即為能源生產過程中，能源產出和能源消耗的比值。

$$\begin{aligned} \text{EROI} &= \frac{\text{Quantity of Energy Supplied}}{\text{Quantity of Energy Used on Supply Process}} \\ &= \frac{E_{out}}{E_{in}} \end{aligned} \quad (2)$$

E_{out} = 能源總產出能量

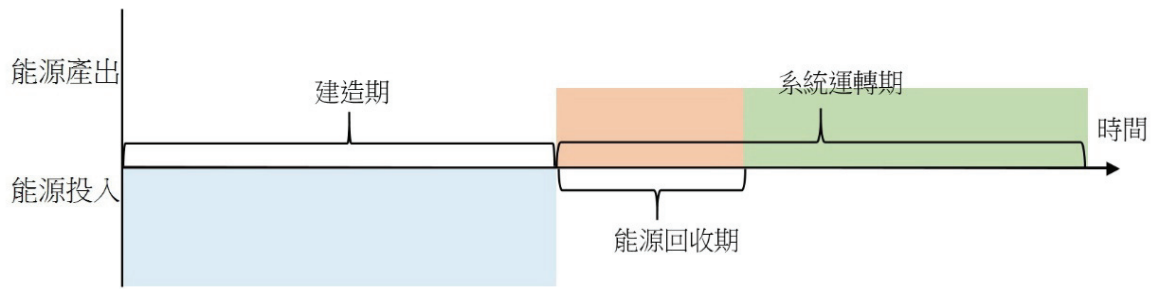
E_{in} = 能源投入能量

能源總產出能量與能源投入能量必定都為正數，因此 EROI 值必定大於零，當 $\text{EROI} > 1$ ，代表能源總產出量大於能源投入能量，表示能源有效率，EROI 值越高，代表能源產出效益越高；反之，當 $\text{EROI} < 1$ ，表示能源無效率，EROI 值越低，代表能源產出效益越低。



資料來源：本研究整理

圖 2 能源回收期(有效率)



資料來源：本研究整理

圖 3 能源回收期(無效率)

三、經濟效益評估方法

(一) 經濟效益評估指標

本計畫之經濟效益評估工作，主要係針對本研究中太陽能廠建置之不同方案進行經濟效益評估，分別計算其建設所需之工程成本、運轉後之維修成本與可能產生之經濟效益，其比較基礎係以不同方案之情況下進行比較，以可量化(貨幣化)之經濟效益與成本項目進行分析，評估其各項成本與效益的差異。

評估方法應用成本效益分析方法，將建設計畫引發之成本與效益項目予以貨幣化，並進行比較分析^[8]。而本計畫主要藉由淨現值、益本比、內在報酬率等評估指標，藉以瞭解本計畫之經濟可行性。茲分述如下：

1. 經濟淨現值(Net Present Value, NPV)

用來表達各計畫方案的整體淨效益。其計算方法是將各期淨效(即總成本和總效益差值)折現後並進行加總，即可求得。計算公式如下：

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

NPV：經濟淨現值

C_t ：第 t 年現金流量

C_0 ：初始投資額

i ：折現率

t ：建設及營運年期

n ：評估期間

2. 經濟益本比(Benefit-cost Ratio, B/C ratio)

若經濟益本比大於 1，則表示計畫的整體效益大於整體成本，值得投資。但是對於兩個以上互斥的方案評估時，則對於益本比 >1 的方案，可再利用增量分析 (Incremental Analysis) 來決定方案的優劣。增量分析方法所應用的是檢視成本的增加 ΔC 與所帶來效益增加 ΔB 比值來判斷，如果 $\Delta B/\Delta C > 1$ ，則這種增量是值得的。經濟益本比計算公式如下：

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (4)$$

B：產出效益總額

C：投入成本總額

R_t ：第 t 年之產出效益

C_t ：第 t 年之投入成本

i ：折現率

t ：建設及營運年期

n ：評估期間

3. 經濟內部報酬率(Internal Rate of Return, IRR)

表達計畫方案的效率，其計算方法是計算使得總體淨效益等於零之折現率，即為內部報酬率，內部報酬率愈大，愈值得投資。經濟內部報酬率計算公式如下：

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r^n)^t} \quad (5)$$

B_t ：第 t 年之產出效益

C_t ：第 t 年之投入成本

r ：經濟內部報酬率

t ：建設及營運年期

n ：評估期間

4. 均化能源成本(Levelized Cost of Energy):

每單位發電成本

LCOE =

$$\frac{\text{sum of cost over life time}}{\text{sum of electrical energy produced over lifetime}} =$$

$$\frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (6)$$

I_t :第 t 年的投資

M_t :第 t 年的運轉與維護成本

F_t :第 t 年的燃料成本

E_t :第 t 年的總發電量

r :折扣率

n :系統的經濟年限

本研究分為兩個部分，第一部分針對成本進行分析，收集太陽能發電系統完整之成本結構，並針對運輸、安裝、營運之成本加以統計，運輸部份則是按原料在運輸過程中所耗費油料，並估算建製花費所需成本，主要採用市場價格估計。以作為成本效益評估之依據。第二部分則針對效益部分進行分析，從經濟面、環境面、投入能源部分加以統計，綜合成本與效益，可得到太陽能發電系統是否符合經濟之投資效益。

四、實證研究之盤查資料與參數設定

(一) 基本假設與盤查資料

由於資料庫與實際資料取得的問題，將造成本生命週期研究的若干限制，所以因此根據個子系統，做出基本的邊界範圍與相關假設：

1. 原料子系統

完整的太陽能電板包含許多元件，上下保護之玻璃，鋁框架、矽晶圓、EVA、焊接材料、塑膠條、電線、等等週邊材料，其他材料用量比例不大所以不納入盤查資料之中；另外主原料中有一些金屬像鉛(Pb)、銀(Ag)以及錫(Sn)銅(Cu)，因用量極為稀少，以鉛當量合併計算之。

2. 生產製程子系統

產品的生產過程中，必須計算投入之用電量(能源)與用水量，並將所排出的廢水與其他製成過程中產出的廢氣、廢棄物或邊角料列入盤查範圍；其他如機械設備之維護、暖機、試機保養所需投入之能源及用水需求與廢氣排放不予盤查，如此可以避免個別廠商因生產設備之差異，造成計算上較大的誤差(表 1)。

表 1 生產子系統投入

盤查項目		使用量	每功能單位使用量/kw
投入	水	1,149,688 ton	0.000532 ton
	電	39,126 度(kWh)	78.4 度(kWh)

資料來源：某上市公司年度報表(2014)

(1) 用電(能源)：生產所需投入的電能大部份使用在矽晶圓製造、蝕刻、磊晶及清洗上，但其他如維持生產環境中的附屬機械的運轉(例：無塵室潔淨度維護，空調溫度控制，水管、氣體管線控制)，辦公室和人員公用設備的用電亦須加入，以整個生產過程中的用電除以總功能產出單位量作為用電盤查之代表數據；選用台灣本地之綜合電力的基礎資料來源。

(2) 用水：主要的用水是晶圓清洗，電解液與空調冷卻水塔所使用為主，依總用水量除以總功能產出單位量作為用水盤查依據。

(3) 固體廢棄物：由於本研究調查主體為模組廠，以組裝及後段測試為主，固體的廢棄物比例不高，因此本研究中予以忽略不計。

3. 運輸子系統

運輸方面的盤查，主要重點在原物料及太陽能電板成品的運輸為盤查項目，生產過程中配件所需之運送，因數量、範圍及品項過於繁雜，因此不在本研究範圍裡面討論。

(1) 矽晶圓：大部份的矽晶圓供應為國內生產的半導體等級矽晶圓，運送過程由新竹以 40 噸貨櫃車運到台南安南工業區，實際距離為 234 公里。

(2) 成品：本研究之太陽能廠所在地為雲林縣口湖鄉，所以我們計算從台南安南工業區至案場，內陸運輸(假設為 80.7 公里)的距離，以 40 呎貨櫃車為基準，太陽能電板每一片的尺寸為 1640x992x40(mm)，每一貨櫃載滿可裝載 574 個太陽能電板。

4. 建置子系統

在建置過程中，需使用到吊車，進行屋頂的吊掛作業，且屋頂上須加釘鋁模組架台，以便於太陽能電板的固定，過程中吊掛作業需要 3 個車次的吊車，但因比例很小，因此予以忽略不計。在本研究中，以選用運輸部分的 40 呎貨櫃車，作為依據。

5. 運轉子系統

太陽能電板主要為吸收太陽光能，並轉換為電能，在系統運作及維護上電力的消耗量極少，本研究以 0.5% 計，本研究之電能轉換率以廠商之規格書中載明以 16.3% 為平均值。

6. 廢棄處理子系統

太陽能電板系統，在我國因導入較國外較為慢，目前還未有到期廢棄處理的情況。

歐美先進國家均有回收系統，生產廠或進口商須繳回收稅金給回收系統，以便進行回收或廢棄物處理。國內已有登記有案的模組回收廠，而回收的矽 70% 可提供較低階半導體製程使用，而鋁模組架台可在太陽能電板拆除後，可重新進行煉解並壓鑄使用，使用率應可達 85%，模組上下之保護玻璃，亦可重新再製使用。

(二) 參數設定

太陽能電板轉換效率(林江財，2013)關乎模組設計規格、成本與回收年限，模組的轉換效率、模組成本、每瓦的成本、每度電的成本、安裝的實際條件等等，都需要考慮進去。

太陽能電板生命年限:理論上年限可達 35 年，廠商在出廠的規格書保證到 25 年，本研究是以 20 年為經濟年限，在台灣太陽能發電系統，目前仍未有超過 20 年，且一般合約年限多以 20 年為常態，對台電的售電合約，與屋頂業主的租賃合約，亦為 20 年。

1. 太陽能電板光衰百分比：多晶矽太陽能電板設定 1-20 年為 0.7%，20 年後系統趨於穩定，單晶矽太陽能電板光衰幅度會略高於多晶矽太陽能電板，但因本研究案例實證以多晶矽為主，並無已達 20 年經濟年限之實際數據，因此以 1% 進行推算，(廠商於產品規格書中，保證光衰率為 0.7%，25 年光衰為 80.2%，10 年光衰為 90.7%)。光衰減(Light Induced Degradation, LID):是硼-氧對(Boron-oxygen Pair)所產生的缺陷。P-type 晶體在生長時摻雜 B 原子，此時 B 提供電洞扮演一個接收的角色。B 在晶體中占據矽原子位置為 Substitutional(Bs)，當矽晶片或太陽能電板照射到光時，Bs 會與兩個氧原子(Oi)結合變成高度的載子再結合中心 Bs-O_{2i}，這就是造成矽晶太陽能電板光衰的主要原因，光衰不但會造成晶片少數載子壽命的降低，更直接影響後續製作出的太陽能電板之能量轉換效率，簡而言之，從電池製作前的晶片到製作完成後，只要曝露在一定強度的光照下，光衰隨時都會發生。

2. 各縣市太陽能光電發電系統發電量，本研究之案廠位於雲林縣，實證之每日平均發電量為 3.6kWh。

3. 太陽能系統可靠度：因各生產廠商之太陽能電板規格不同，種類各異，且搭配使用的逆變器亦不同，但本研究僅做經濟效益上的探討不討論系統差異，因此設定都為 1。

4. 日照率(Insolation)：各地區不同會有不同的日照率，但本研究僅作效益上的探討不討論地點差異，因此設定都為 1。

5. 等效日照時數 PSH(Peak Sun-hours, 單位：小時(h))：指太陽光電系統能達到全功率運轉的日照強度於一天之中的總時數，本研究之實證結果測定，全年的發電量平均每日 3.6h。

組列年發電量= 組列額定輸出功率×年平均每日日照時數×365 天，本研究案廠之額定輸出功率為 499kW，每年發電量約為 1320kWh，進行實證。

參、實證結果與討論

本章首先針對太陽能發電系統的範疇作界定，說明整個系統的研究可能涉及的內容及範圍；一、針對太陽能發電系統生命週期，估算其能源回收期與能源投資報酬；二、針對太陽能發電系統估算其生命週期間的淨現值、益本比、內在報酬率、均化能源成本，同時與國外之均化能

源成本進行比較；三、進行敏感度分析，比較躉購電價、建置成本、利率變動，對太陽能發電系統之淨現值與益本比之影響。

一、淨能源分析

按生命週期界定的子系統進行淨能源分析^[9]與 CO₂ 排放量之盤查統計，盤查的資料項目如下(表 2、表 3)：

(一) 基本資料：矽晶類太陽能電板種類、數量

(二) 太陽能電板之基本組成原料、數量

(三) 能源使用部分：投入能源數量

(四) CO₂ 排放數量：按各個項目進行統計

1. 原料子系統

在本系統中，發現矽生產階段，單晶矽與多晶矽之 CO₂ 排放皆是最高，能源耗用則以鋁製程部分最高；若要降低對環境的負擔，應在矽原料生產階段進行製程的改進，以減少 CO₂ 排放，並在鋁生產的部分提高能源使用效率。

表 2 多晶矽太陽能電板

品名	比率	總用量(kg)	能源耗用(GJ/kg)	CO ₂ 排放量(kg)
矽	4.00%	1420.8	17.3	621779.4
玻璃	62.70%	22271.0	167.6	15929.5
鋁	22.00%	7814.4	1595.9	72433.2
EVA	7.50%	2664.0	40.1	5330.2
銅	2.80%	994.5	60.8	4107.2
塑膠	1.00%	355.2	15.3	1088.4
總計		35520kg	1897.2GJ/kg	720668.1kg
		35.5 公噸		720.6 公噸

資料來源：本研究整理(國內)

表 3 單晶矽太陽能電板 CO₂ 排放量

品名	比率	總用量(kg)	能源耗用(GJ/kg)	CO ₂ 排放量(kg)
矽	4.00%	1252.0	15.3	547943.1
玻璃	62.70%	19626.3	147.7	14037.9
鋁	22.00%	6886.4	1406.3	63831.8
EVA	7.50%	2347.6	35.3	4697.2
銅	2.80%	876.4	53.6	3619.4
塑膠	1.00%	313.0	13.5	959.2
總計		31302.0kg	1671.9GJ/kg	635088.8kg
		31.3 公噸		635.0 公噸

資料來源：本研究整理(國內)

2. 生產製程子系統(表 4、表 5)

在本系統中，可以發現矽晶圓生產階段，CO₂ 排放最多，其次是太陽能電板製程。

多晶矽太陽能電板，因此參照以上資料，每 m² 耗用之能源為 2737MJ，每片太陽能電板的面積為 1.65m²，本研究案例總太陽能電板片數為 1920 片，因此能源總投入為：

$$2,737 * 1.65 * 1,920 = 8,670,816 \text{ MJ} = 8670.8 \text{ GJ}$$

由以上盤查資料可知，在整個製造過程中，晶圓的製造過程占了 46.4625% 的比率，而在工廠內總的 CO₂ 排放約為：

$$499 * 282.83 = 141,132 \text{ kg} = 141.13 \text{ 公噸}$$

單晶矽太陽能電板，因此參照以上資料，每 m² 耗用之能源為 3,986MJ，每片太陽能電板的面積為 1.65m²，本研究案例總太陽能電板片數為 1,692 片

能源投入：

$$3,986 * 1.65 * 1,692 = 11,128,114 \text{ MJ} = 11128.1 \text{ GJ}$$

由以上盤查資料可知，在整個製造過程中，晶圓的製造過程占了 46.4% 的比率，而在工廠內總的 CO₂ 排放約為：

$$499 * 1.65 * 193.5 = 159,318.2 \text{ kg} = 159.3 \text{ 公噸}$$

3. 運輸子系統

(1) 多晶矽太陽能電板

本研究的 499kw 太陽能電板廠，每片

18.5kg，共 1,920 片，材料總重約為 35,520kg，以一部 40 噸車，空車可載運 20 噸車，約需 18 個車次，從模組廠出貨至案場所在地雲林約台南科技工業區運送至雲林的施工現場，總距離約為 80.7km。而一部 40 噸貨櫃車，滿載情況下 1 公升的柴油可行駛 2.5~3.5km，本研究中以平均數進行試算，因此運輸過程中 CO₂ 排放情形如下：

$$\text{柴油總需求量: } 80/3 * 36 = 960.0 \text{ (L)}$$

(2) 單晶矽太陽能電板

本研究的 499kW 太陽能電板廠，每片 18.5kg，共 1,692 片，模組總重為 31,302kg，以一部 40 噸貨櫃車，空車可載運 20 噸，約需 16 個車次，從模組廠出貨至案場所在地雲林約台南科技工業區運送至雲林的施工現場，總距離約為 80.7km。而一部 40 噸貨櫃車，滿載情況下 1 公升的柴油可行駛 2.5~3.5 km，本研究中以平均數進行試算。因此運輸過程中 CO₂ 排放情形如下：

$$\text{柴油總需求量: } 80/3 * 32 = 853.3 \text{ (L)}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 排放: } & 2.61 * (80/3) * 32 \\ & = 2227.2 \text{ kg CO}_2 (2.2272 \text{ 公噸 CO}_2) \end{aligned}$$

能源投入：

$$853.33333 * 0.0036 = 3.0 \text{ (GJ)}$$

表 4 矽晶類太陽能模組生產過程 CO₂ 排放

Parts	Total Emission(kgCO ₂ eq)	比例 %
導電膠(Conductive Adhesive)	1.15	0.4066%
氣體(Gas)	4.34	1.5345%
化學品(含 HNO ₃ 等)	1.23	0.4349%
晶圓(Wafer)	131.41	46.4625%
鋁框(Aluminum Frame)	47.3	16.7238%
直流接線箱(Junction Box)	0.19	0.0672%
無鉛錫帶(Ribbon)	0.1	0.0354%
乙烯-醋酸乙烯共聚體(EVA)	4.14	1.4638%
玻璃(Glass)	14.45	5.1091%
其他(Other)	1.09	0.3854%
太陽能電板製程(Solar cell Process)	51.76	18.3007%
模組製程(Module Process)	25.67	9.0761%
Total	282.83	100.000%

資料來源：中技社(2014)

表 5 矽晶類太陽能電板生命週期能源需求

	模組效率	能源耗用	CO ₂ 排放
太陽能模組			
單晶矽	14.3%	3,986MJ/m ²	193.5kgCO ₂ /m ²
多晶矽	13.9%	2,737MJ/m ²	135.2kgCO ₂ /m ²
10kw 逆變器		0.57GJ/kW	43kgCO ₂ /kW
線材		1,068GJ/600kW	62.0tCO ₂ /600kW
模組架台		22.5 GJ/t	1.91tCO ₂ /t

資料來源：Ito, M. Kudo, M. Nagura, M. and Kurokawa, K. (May 2011).

4. 建置子系統

本研究案場為屋頂型太陽能發電系統，其模組架台(Support Structure)以鋁擠型材為主，因此無須建立安裝基座，因此並無混凝土、型鋼及鋼筋的使用需求，鋁材之 CO₂ 排放係數，能源投入部分則參照黃健源(2000)，陽光電城太陽能利用之生命週期評估^[10]，得到能源投入係數為 0.217(表 6)。

表 6 建造過程中 CO₂ 排放量與能源投入

	鋁材 總用量 (kg)	CO ₂ 排 放係數	CO ₂ 排放量 (kg)	能源 係數	能源投入 (GJ/kg)
多晶矽	7122.2	2.48	17663.1	0.217	1545.5
單晶矽	6275.1	2.48	15562.3	0.217	1361.7

資料來源：本研究整理

(1) 逆變器

CO₂ 排放：499/10*43=2145.7 kg (2.1457 公噸)

能源投入：499/10*0.57=28.4(GJ)能源投入

(2) 電線，線材

CO₂ 排放：62.0*1000/600*499
=51563.3 kg(51.563 公噸)

能源投入：1068/600*499=888.2(GJ)能源投入

5. 運轉子系統

(1) CO₂ 排放量

在運轉中的太陽能發電系統，本身並不會產生任何 CO₂ 排放，但在清洗過程中，會耗用水，因此參照台灣地區自來水每度用水排放 CO₂ 約當量，過程中的 CO₂ 排放

係數為 0.195kg/L8F8F。

(2) 能源投入

因太陽能電板在使用過程中，僅需投入比例非常小的電力，供應本身系統監控及運作，在本研究中約佔每年發電量之 0.5%，但系統使用的電力為自行發電生產，因此不造成 CO₂ 排放，但每 3 個月需要清洗太陽能電板，以免因為表面有髒汙，造成熱斑、發電效率低落^[11]。本研究中，每次清洗太陽能電板所需水量為 5L/片水量，平均約 3 個月清洗一次，因此在生命週期中約清洗 80 次。因此

A. 多晶矽太陽能電板

清洗用水：1,920*5*0.155*80=119,040 kgCO₂(119.04 公噸 CO₂)

逆變器：

CO₂ 排放：499/10*43=2145.7 kgCO₂ (2.1457 公噸 CO₂)

能源投入：499/10*0.57=28.4(GJ)能源投入

B. 單晶矽太陽能電板

清洗用水：1692*5*0.155*80=104,904 kgCO₂(104.904 公噸 CO₂)

逆變器

CO₂ 排放：499/10*43=2145.7 kgCO₂ (2.1457 公噸 CO₂)

能源投入：499/10*0.57=28.4(GJ)能源投入

本研究中，仍有保險費用、巡邏保全之活動，但因比例過小，因此且取得其數據不易，且因各場址所在環境不同，差異甚大，

因此不在此進行討論

而逆變器按業界的常規，約 10 年需要進行更換，本研究中產生的電力，全數賣回給台電，因此沒有儲能電池的設計，在此逆變器於 20 年的生命週期中，於建造的時期需要計算一次 CO₂ 排放量，運轉過程中還需計算一次

6. 廢棄處理子系統

太陽能發電系統在 20 年使用年限到期後，拆除仍會造成 CO₂ 排放，且仍需要投入能源，才能進行拆除作業，因此根據 Fthenakis and Kim(2010)之研究指出，太陽能發電系統在拆除/掩埋後相關處置的能源投入約是原料開採/精練過程的 1.7%。因此本研究中以此比例進行試算，其能源投入約為 32.2GJ。

同樣依據 Fthenakis and Kim(2010)之研究指出，太陽能發電系統拆除/掩埋後相關處置產生的 CO₂ 排放量約是原料開採/精練過程的 1.9%。因此本研究中以此比例進行試算，系統於過程中產生的 CO₂ 排放量約為 13.6 公噸。

(1) 多晶矽太陽能電板

CO₂ 排放：720*1.9%=13.6 公噸

能源投入：1897*1.7=32.2(GJ)

(2) 單晶矽太陽能電板

CO₂ 排放：635.9*1.9%=12.0 公噸

能源投入：1671*1.7=28.4(GJ)

根據目前台灣的情況而言，目前台灣正在運轉的太陽能發電系統，皆未達 20 年的生命週期年限，且實際上按國外的太陽能發電系統運轉情況顯示，光衰部分已經趨於穩定，仍有平穩的發電效應，可繼續生產電力，因此在 20 年後是否進行拆除，仍是一大問號。

太陽能發電系統生命週期中，可以發現其在原料子系統及生產製程子系統中能源耗用及 CO₂ 排放最大，對環境的影響也最大，能源部份排放，多晶矽佔其生命週期達 76%，單晶矽佔其生命週期達 82%；CO₂ 排放部份，多晶矽佔其生命週期達 37%，單晶矽佔其生命週期達 42%。兩相比較，單晶矽太陽能電板不管在能源使用或及 CO₂ 排放又明顯高於多晶矽太陽能電板。

在太陽能生產過程中，已知每一個子系統所消耗之能量與 CO₂，生命週期中太陽能發電系統可生產之電力。依照計算結果我們可得知單晶矽與多晶矽太陽能發電系統所投入的原料以及能源平均生產耗能分別為為 26.9MJ 與 21.8 MJ。如表 14 單晶矽與多晶矽太陽能發電系統生命週期 CO₂ 排放量與能源耗用所示(表 7)。

表 7 單晶矽與多晶矽太陽能發電系統生命週期 CO₂ 排放量與能源耗用

系統項目	多晶矽太陽能電板		單晶矽太陽能電板	
	CO ₂ 排放量 (公噸)	能源耗用 (GJ/kg)	CO ₂ 排放量 (公噸)	能源耗用 (GJ/kg)
原料子系統	141.1	8354.6	159.3	11128.1
生產製程子系統				
運輸子系統	2.5	3.4	2.2	3.0
建造子系統	71.3	2462.1	69.2	2278.3
運轉子系統	121.1	28.4	107.0	28.4
廢棄處理子系統	13.6	32.2	12.0	28.4
Total	380.5	10881	377.0	13466.4
平均(kW)	0.7	21.8	0.7	26.9

資料來源：本研究整理

(一) EPT(Energy Payback Time)：能源償付期 (Year)

1. 多晶矽太陽能電板

$$EPT = \frac{21.806 \times 277}{3.6 \times 365} = 4.59 \text{ 年}$$

本研究之每一單位能源總投入為 21.8GJ，經由單位換算後能源總投入為 6,040 度，之後再與每 kW 年發電量約 1,320 度相除後，即可推得本研究標的之能源償付期約為 4.59 年。

2. 單晶矽太陽能電板

$$EPT = \frac{26.987 \times 277}{3.6 \times 365 \times 1.11} = 5.12 \text{ 年}$$

本研究之每一單位能源總投入為 26.9GJ，經由單位換算後能源總投入為 7,475 度，單晶矽的效率約高於多晶矽 11%，因此之後再與每 kW 年發電量約 1,465 度相除後，即可推得本研究標的之能源償付期約為 5.12 年。

(二) 能源投資報酬(EROI)

1. 多晶矽太陽能電板

$$EROI = \frac{12333279}{10881 \times 277} = 4.09$$

多晶矽之 EROI 約為 4.09，EROI > 1 表示則表示能源有效率，產出效益較高。

2. 單晶矽太陽能電板

$$EROI = \frac{13313457}{13466 \times 277} = 3.56$$

單晶矽之 EROI 約為 3.56，EROI > 1 表示則表示能源有效率，產出效益較高。

將單晶矽與多晶矽兩者進行比較，可以發現多晶矽之 EROI 值大於單晶矽之 EROI 值，表示多晶矽之產出能源品質較單晶矽高，原因乃是因為單晶矽在生產過程中，總能源耗用較高所致。

二、經濟分析

(一) 本研究案例之參數

本研究之年限以經濟年限(20 年)與壽命年限(35 年)進行研究比較，太陽能電板目前的商業模式，是以 15 年進行本利攤還，折舊部分是以 20 年進行直線折舊，目前各銀行對於太陽能光電貸款之利率為 1.7~5.0%，電力效率 (第 2 年起應計入衰減率，年減 0.7%)。

1. 平均每 kW 的每日發電效率為 3.62 度，每 kW 每年發電 1,320 度，目前能源局競標電價 4.8 元/度(民國 105 年)，台電按此價格進行收購。
2. 多晶矽太陽能發電系統之建置成本為 50,000 元/kW，單晶矽太陽能發電系統之建置成本為 53,000 元/kW。
3. 貸款年限為 15 年。
4. 保險費用為總預算成本之 0.35%。
5. 營運費用為總預算成本之 0.5%。
6. 貸款之利率 3.1%
7. 租金成本:需視各案場所在地不同，有所變動，本案例為每年 68 元/坪。
8. 營業所得稅率為 17%。

(二) 經濟分析指標

1. NPV(淨現值)

在多晶矽太陽能電板的情況下，淨現值以折現率為 2.0%以下，期末處分資產(殘值為總投資 20%)，以年限為 20 年之情形下，有正的淨現值。但若為單晶矽太陽能電板的情況下，淨現值以折現率為 1%以下，期末處分資產(殘值為總投資 20%)，以年限為 20 年之情形下，有正的淨現值。

若將年限拉長為 35 年之情形下，折現率為 4%的情況之下以下，多晶矽太陽能電板即有正的淨現值投資效益。若將年限拉長為 35 年之情形下，折現率為 4%的情況之下以下，單晶矽太陽能電板同樣具有正的淨現值投資效益。

表 8 多晶矽與單晶矽太陽能發電系統淨現值比較

	多晶矽太陽能發電系統	單晶矽太陽能發電系統	多晶矽太陽能發電系統	單晶矽太陽能發電系統
折現率	20 年期		35 年期	
4%	-3,359,505	-5,510,387	2,051,217	248,740
3%	-1,434,854	-3,411,111	7,120,656	5,848,616
2%	807,521	-961,944	13,535,292	12,942,112
1%	3,429,405	1,905,532	21,717,831	21,999,403

資料來源：本研究整理

可參照表 8 多晶矽與單晶矽太陽能發電系統淨現值比較，其中可發現，在前 20 年間，單晶矽太陽能電板會因為初始的固定投資較高，而在淨現值部分表現不如多晶矽太陽能電板；但時間若拉長至 35 年，不管是單晶矽太陽能電板或多晶矽太陽能電板，均為正的淨現值，表示使用年限越拉長，對於投資越有效益。

2. IRR(內部報酬率)(表 9)

因此可以知道單晶太陽能電板，雖然期初的投入成本較高，但可以提高 0.52% 的內部報酬率，長期而言，單晶矽太陽能電板會比多晶矽太陽能電板更具有優勢。

表 9 單晶矽與多晶矽太陽能電板內部報酬率比較

電池種類	20 年 IRR(%)
單晶太陽能電板	13.83
多晶太陽能電板	13.31

資料來源：本研究整理

3. 益本比(表 10、圖 4)

台電公司(103 年資料)生產每度電約排放 0.521 公斤的 CO₂，若按國際的碳排放價格進行計算約合新台幣 0.089 元。因此依據目前能源局議定 4.8 元/度收購價和 CO₂ 的收

益 0.089 元/度，與減少用水的耗損 2.0 公升，收益為 0.147 元/度，可得：

1. 20 年總發電效益：

(1) 單晶矽太陽能電板：

$$13,313,457 \times (4.8 + 0.089 + 0.147) = 67,046,572 \text{ 元}$$

該系統 20 年總成本 31,383,326 元

單晶矽太陽能電板：益本比=年效益(售電)/
年成本= $67,046,572 / 31,383,326 = 2.136 > 1$
表示有投資經濟效益。

(2) 多晶矽太陽能電板：

$$11,994,106 \times (4.8 + 0.089 + 0.147) = 60,402,317 \text{ 元}$$

該系統 20 年總成本 29,590,700 元

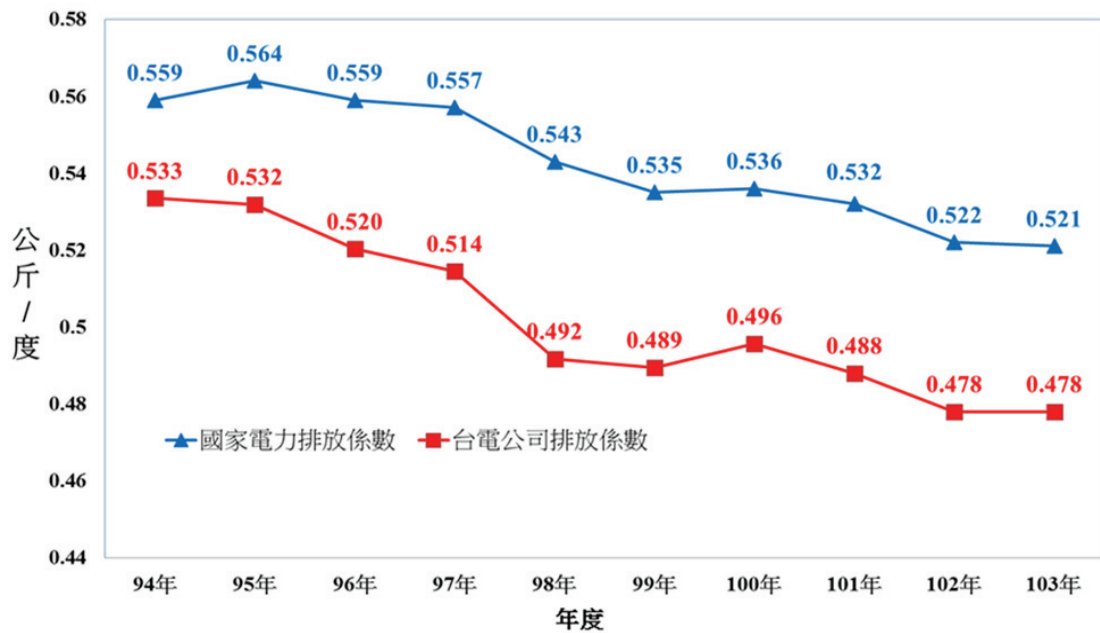
多晶矽太陽能電板：益本比=年效益(售電)/
年成本= $60,402,317 / 29,590,700 = 2.041 > 1$
表示有投資經濟效益。

按照目前的趨勢，太陽能電板價格仍在持續下降，預計益本比仍有可能因建置成本降低，而繼續上升。而在目前的時間點，不管是單晶矽太陽能電板或多晶矽太陽能電板，均具有益本比大於 1，具有經濟上的投資效益，經以上分析可得知，單晶矽太陽能發電系統在成本效益與各項數據，均較多晶矽更為優異，與目前產業的發展趨勢相符。

表 10 單晶矽與多晶矽太陽能電板 20 年益本比比較

種類	單晶矽太陽能電板	多晶矽太陽能電板
總發電量(度)	13,313,457	11,994,106
總收益(元)	67,046,572	60,402,317
總成本(元)	31,383,326	29,590,700
益本比	2.136	2.041

資料來源：本研究整理



資料來源：台灣電力公司官網(2016)

圖 4 台灣電力公司碳排放係數

表 11 多晶矽/單晶矽太陽能電板均化能源成本

折現率	LCOE(歐元/度)		LCOE(新台幣/度)		LCOE(美元/度)	
	多晶矽	單晶矽	多晶矽	單晶矽	多晶矽	單晶矽
1%	0.075	0.071	2.7	2.5	0.083	0.079
2%	0.081	0.077	2.9	2.8	0.090	0.086
3%	0.088	0.083	3.1	3.0	0.09	0.093
4%	0.095	0.090	3.4	3.2	0.10	0.101

資料來源：本研究整理

4. 均化能源成本(LCOE)

均化能源成本(LCOE)指標(表 11)，會因為各國匯率相對的變動，而有所改變，因此此一指標只能作為兩國之間的發電成本相對的參考，並非絕對值。

因為台灣建置成本較低，本研究案場位於台灣，每年營運及維護成本均較國外低廉，因此與國外之均化能源成本比較後可得知，台灣在均化能源成本，已經趕上了歐美等先進國家，每度的生產成本較國外更具有相對優勢，而得到的之數據與歐洲比較亦達到相當理想的水準。

獨立方案的評價，只需進行絕對效果檢驗，也就是用經濟評價標準($NPV \geq 0$ $IRR \geq i_0$ 益本比

≥ 1 ，檢驗方案本身的經濟性，通過絕對效果檢驗的方案是可行性方案，反之則為不可行方案。根據本研所得到的數據，NPV、IRR、益本比皆達到方案本身的經濟性，多晶矽太陽能發電系統及單晶矽太陽能發電系統之商業模式均為可行性方案。

5. 由於參與競標與掛表售電時間不同，亦會造成回收收益不同，因此將實際參與競標時間與掛表售電時間分為 3 種情境，進行比較如下(表 12)：

- (1) 情境一為 2015 年參與競標，該年多晶矽太陽能發電系統每 kw 建置成本為 55,000，並於 2015 年完成掛錶售電。

表 12 不同年度競標與售電方案之比較

方案別	躉購價格	躉購價格 比率	每 kW 建置成本	20 年 回收總金額	20 年回收 總金額比率
2015 競標， 2015 年掛錶售電	5.32	100.00%	55,000	31,193,676	100.0%
2015 競標， 2016 年掛錶售電	4.8	90.23%	55,000	25,604,481	82.1%
2016 競標， 2016 年掛錶售電	4.8	90.23%	50,000	27,831,488	89.2%

資料來源：本研究整理

(2) 情境二為 2015 年參與競標，該年多晶矽太陽能發電系統每 kW 建置成本為 55,000，並於 2016 年完成掛錶售電。

(3) 情境三為 2016 年參與競標，該年多晶矽太陽能發電系統每 kW 建置成本為 55,000，並於 2016 年完成掛錶售電。

在本研究中可以發現，若情況為 2015 年競標，但 2016 年才掛錶售電之方案，則售電價格降幅為 9.77%，20 年總回收金額損失約 17.9%，有 5,589,185 之金額損失；若 2016 年當年參與競標並於當年完成掛錶售電，與 2015 競標並於 2015 年掛錶售電相比，售電價格降幅都為 9.77%，但 20 年總回收金額損失為 10.8%，20 年回收總金額有 3,362,188 之金額損失。明顯可以看出當年度之建置成本，影響投資回收總金額極大。

三、敏感度分析(參見表 13、表 14)

經過前述二節的討論，單晶矽太陽能發電系統與多晶矽太陽能發電系統均具有經濟效益，可以吸引有意願者投入。本節將透過改變各種不同的前提假設，進一步計算淨現值、益本比，藉以找出對各個模擬情境檢定結果之影響。

本研究提出三種情境內容的改變並加以比較，當原模擬情境的參數改變後，對於系統之淨現值、益本比分別會有何種影響。三種情境如下：

(一) 若未來台電躉購電價下降 5%、10%、15% 時，結果會有之變化。

(二) 若研究之太陽能電板每 kW 安裝成本下降

5%、10%、15% 時，則其檢定結果所會出現的變動，於此進行探討。

(三) 考量資金利率變動為 4%、5%、6%，淨現值、益本比所產生之變化。

前述變更對檢定結果是否會造成影響，說明如下

1. 躉購電價下降之敏感度分析結果

單晶矽之淨現值減少大於多晶矽，因其總電量較大，將造成發電總收益減少部分將大於多晶矽；因此電價的變動將對評估結果有直接影響，當電價下降時，淨現值與益本比隨之下降；反之則增加。根據敏感度分析，倘若躉購電費率下降 5%，則可發現單晶矽之淨現值將由正轉負，從 1,152,998 轉為 -991,636 元，益本比從 2.13 降為 1.93，多晶矽之淨現值將由 -518,5025 轉為 -2,450,605 元，益本比從 2.04 降為 1.84。

2. 安裝成本下降之敏感度分析結果

單晶矽之淨現值增加大於多晶矽，因其總生產電量較大，將造成發電總收益增加部

分將大於多晶矽；因此安裝成本的變動將對評估結果有直接影響，當安裝成本下降時，淨現值與益本比將會上升；反之則下降。根據敏感度分析，倘若安裝成本下降 5%，則可發現單晶矽之淨現值將由 1,152,998 增加至 3,184,526 元，益本比從 2.13 上升至為 2.24，多晶矽之淨現值將由 -518,5025 增加至 1,384,070 元，益本比從 2.04 上升至 2.14。

3. 利率變動之敏感度分析結果

若市場利率增加，單晶矽之淨現值增減少大於多晶矽，因其總成本較高，將造成利息部分支出高於多晶矽；因此利率變動將對評估結果有直接影響，當利率上升時，淨現值與益本比將會下降；反之則上升。根據敏

感度分析，倘若利率升至 5%，則可發現單晶矽之淨現值將由正轉負，從 133,012 減少至 -1,000,307 元，益本比從 2.04 下降至為 1.94，多晶矽之淨現值將由 -1,476,742 減少至 -2,535,121 元，益本比從 1.95 降為 1.86。

表 13 益本比之敏感度分析

調整內容			單晶矽	多晶矽
初始方案			1,152,998	-518,502
敏感度分析方案	躉購電價下降	5%	-991,636	-2,450,605
		10%	-3,136,271	-4,382,708
		15%	-5,280,905	-6,314,812
	安裝成本下降	5%	3,184,526	1,384,070
		10%	5,216,055	3,286,642
		15%	7,247,583	5,189,214
	利率變動	4%	133,012	-1,473,742
		5%	-1,000,307	-2,535,121
		6%	-2,133,625	-3,596,499
				單位：新台幣元

資料來源：本研究整理

表 14 淨現值之敏感度分析

調整內容			單晶矽	多晶矽
初始方案			2.13	2.04
敏感度分析方案	躉購電價下降	5%	1.93	1.84
		10%	1.83	1.75
		15%	1.73	1.65
	安裝成本下降	5%	2.24	2.14
		10%	2.37	2.26
		15%	2.51	2.40
	利率變動	4%	2.04	1.95
		5%	1.94	1.86
		6%	1.86	1.78

資料來源：本研究整理

肆、結論與建議

一、結論

根據內在報酬率與淨現值計算，可以發現不管是單晶矽太陽能電板或多晶矽太陽能電板，都具有經濟上的投資效益，但若能以單晶矽太陽能電板進行投資，其內在報酬率與淨現值，均可大幅度的提升。以單晶矽的太陽能電板進行設置，雖然每 kw 的建置成本多增加 6.7%，但太陽能電

板的發電效率可多增加 11.0%，以本案例 499kW，在台電躉購價格不變的情形下，20 年多晶矽總可收回現金流為新台幣 2,647 萬元，單晶矽可回收為新台幣 3,073 萬元。

可見得太陽能電板轉換效率的提升，可以提高經濟效益，且太陽能發電廠，沒有購置燃料、原料變動的成本問題，產出的電力成本較能保持穩定。再者，面對全球暖化速度不斷提升，太陽能發電系統未來的年發電總量有逐步上升的趨勢，運轉期間所需投入的營運與管理費用比例，

相對於其他種類發電，極為低廉。因為其成本結構中，營運的投入費用，佔電力總產出的比例非常低，在目前的技術下，可透過雲端資料庫進行監控，發電系統有問題發生時，可以經由雲端自行提出警示，再行安排人員進行檢修，更可以降低維修之成本。

在建置成本的部分，因台灣為太陽能電板生產大國，國內大廠出貨量大，且品質極佳，太陽能電板的報價，均以美元為準，因此台幣對美元的匯率變動亦會影響到建置成本；但因國內購置，僅須負擔內陸運費，並沒有海運費，及出口報關、保險、進口國關稅等費用，且歐美先進國家之內陸運費部分及人工安裝的費用極高，因此在台灣每一單位的平均建置成本會比歐美先進國家要低，可以得到更佳之 LCOE。

但每年能源局公告之躉購價格對回收成本之影響最大，特別是太陽能發電採取競標方式，且規定折扣率，若越多人參與競標，則得標價格下降幅度越大。2013 年至 2016 年太陽能光電系統躉購價格下降達 37%，對有意願投資大型太陽能光電發電廠業者增加不確定性風險。國內的資金成本也是影響回收年限的重要因子，利率範圍從 1.7% 到 5.0%，倘若因國內經濟、政治因素，產生貨幣緊縮，利率大幅提升，對投資業者將有極大損失，大大延長回收年限。從評估投資太陽能發電的可行性分析，本研究分析結果顯示，投資太陽能發電應在躉購價格 4.3 元/度以上，同時資金成本在 5.0% 以下，才具有投資可行性。

在本研究案例中可以看到，在台灣地區設置屋頂型太陽能發電系統，已經具有極高的效益產生，未來可以建議，公共建築或者是政府附屬單位使用建築，或是特定用途的工廠、廠房，均需要增設一定比例的再生能源設施，或者是公共區域用電，必須購買一定比例的綠電。

(一) 資金成本

1. 利率

對於太陽能發電系統的財務模型，利率因素有非常大的決定因素，目前國際上的趨

勢是利率不斷降低，本研究案例中，銀行對於太陽能發電系統投資之放款利率仍在 3.1%，足足高於房貸利率近 1.2%，與大型企業的企業融資貸款約 1.00%，高了近 2.1%，而實際上銀行貸放利率範圍為 1.7%~5.0%。本研究發現，太陽能發電系統廠商已有良好的營運模式，對於銀行來說，風險早已由保險部分承接，而對於利率部分，雖屬商業活動的經營決策，但若政府能針太陽能發電系統投資的利率補貼，或者可以轉作信保基金承接，放出較低利率的放款，對於投資者及一般大眾，必然可以提高誘因。

2. 併網程序

目前行政流程單位須對能源局提出申請，競標後，投標前 60% 才可取得契約容量，爾後還需要台電進行審核，饋線檢測，現場勘驗，整個的行政流程過於冗長，且業者投資後，並非投標得標時躉購價格，而是依接電錶當時的躉售價格進行售電，通常從競標至接線完成，快者 6 個月，而超過 1 年的期間也是常態；若該地區無電力饋線，則台電牽設饋線時程，所需時間更難以確定何時可以完工。則實際接錶售電，就會有投標時計算成本的投標售電價格與真正開始售電時的價格落差，利息部分就約增加 3% 的成本；且行政流程中所牽涉的政府單位眾多，包含經濟部能源局，地方縣市政府、農委會、台電公司...，此種現象，造成太陽能系統業者在資金運用上的時間成本增加、對於案場開發，造成極大的困擾，後續如何簡化成單一窗口，不僅可以加強佈建的速度，對於廠商資金的運用也可提高效率。

(二) 土地租金成本

土地租金亦是影響經濟效益之重要因素，在苗栗以北地區，因土地成本較中南部成本要高，因此若能控制土地成本，則可以提高經濟效率，但土地成本為市場機制所決定，無法操作。因此台電在苗栗

以北地區，以競標價格多 12.5%價格進行保證收購，此舉可以提高收益，減少因土地租金成本上升，而導致之投資回收率降低情形。

(三) 設置太陽能廠之土地取得

在台灣因為地小人稠，加上土地分區使用規定，使得太陽能發電系統對於土地取得有極大的困難，有饋線適合建置的區域找不到土地，因此造成政府方面空有目標及建置計畫，但實際達成的總量總是落後目標，或者是許多地層下陷的土地，仍然無法釋出，或者是釋出後，因為業者需要進行地層整治後，才能進行地上太陽能發電系統的建置，均會提高業者的經營成本。

(四) 太陽能電板轉換率

轉換效率越高，代表同樣發電容量，所需使用的太陽能面板數量越少，對於身為系統安裝廠商來說，少一片面板，就少了包裝成本、運輸成本、安裝人力，備品以及後續維護成本...等，同時可以減少土地的面積(減少土地租金或土地購買成本)，尤其是目前太陽能的安裝成本中，「太陽能電板成本」，在住宅約佔 60%，而太陽能發電系統的部分約為 45~50%，比起再壓低太陽能電板面板模組本身的價格，減少其他建置成本才更是目前台灣發展太陽能的優先目標，因此目前業界趨勢，已經從多晶矽太陽能，逐漸轉為單晶矽太陽能電板，單晶矽太陽能電板發電效率已經增加到 17.X%，使用更高發電效率的太陽能電板，雖然在初期的投入成本會較多晶矽太陽能電板高近 6.7%，但是後續的拆除及廢棄處理，可以減少廢棄物處理量及投入。而太陽能發電系統在建置成本不變的情形下，太陽能板轉換率每提高 1%，每年售電總收入可提高 6.135%，年平均總現金流量可增加約 11.4%。

(五) 殘值計算

殘值的計算，20 年後，若土地或廠房為租賃，則到期可拆回太陽能設備，該設備仍有殘值，且多數的太陽能電板，仍可正常使用，但拆回設備所需之費用包含人工，運輸、倉儲及雜項費用，若有損壞還需包含維修及廢棄物處理的費用，是否仍有殘值，值得討論，但若土地為自行擁有，則太陽能電板應可達 35 年的壽命年限，以年利率 2%的情況，具有正的淨現值，不需要在 20 年就進行拆除，只是太陽能電板的轉換效率日益提升，若未來的太陽能電板轉換效率更高，可能發生的情形是，為增加收益，而換裝更高效率的太陽能電板。

(六) 規模經濟

目前《電業法第 10 條》-電業除小型電業外，其等級如左：

1. 供電容量在十萬瓩以上者為一級。
 2. 供電容量在二萬瓩以上不及十萬瓩者為二級。
 3. 供電容量在五萬瓩以上不及二萬瓩者為三級。
 4. 供電容量在五百瓩以上不及五千瓩者為四級。
- 前項供電容量，包括發電與購電。

目前多數太陽能發電系統業者，容量均小於 500 kw，因電業法中規定 500kw 以上，需有電業執照，方可營業；但若能增加太陽能發電系統之營業規模，將因投資規模增加，而降低管理、運輸、物料採購、饋線設置及系統安裝費用，可進一步降低成本；同時增加投資報酬率。不僅可以增加民間投資的金額，更可引導民間資金進入，委由系統商進行建置，加速民間投資電業發展。

本研究也透過敏感度分析發現，發現對淨現值與益本比的影響程度最大者，分別為躉購電價下降，其次是安裝成本下降，利率上升對於淨現值與益本比的影響程度最小。因此若能政府若能透過價格機制，鼓勵民間投資，應可於日後大幅增加太陽能發電之比率。

根據本研究分析結果顯示，太陽能發電系統適宜於台灣地區推廣使用的，從環境面角度來

看，矽晶類太陽能發電系統能源投資回報率約 3.56~4.59 年。目前太陽能發電系統對環境最大的負擔來源是生產及製造階段，能源的使用及 CO₂ 排放，若未來能繼續提高再生能源發電比例，將能大大降低太陽能發電系統對環境的負面影響；就能源效益的角度來看^[12]，臺灣位處於亞熱帶地區，氣候終年溫暖潮濕，日照環境及日照天數都較高緯度國家良好，如何善用台灣優異的天然氣候環境，開發再生能源輔以風力發電、地熱等綠色能源，達到降低環境負擔，減少成本，同時提高經濟效益；可以在未來逐漸汰換落後發電方式，以更先進，綠色程度越高的能源替代，如此可以為地球的環境，盡一份心力，將是未來可以永續發展的方向。

二、建議

本研究針對台灣地區之單晶矽及多晶矽太陽能發電系統進行效益及生命週期評估研究，基於本研究之限制，及研究過程心得，對後續相關研究提出以下建議：

- (一) 本研究針對矽晶類太陽能電板進行研究，除了矽晶類之外，尚有非晶矽、銅銦鎵硒、碲化鎘薄膜，光熱轉換型太陽能發電系統，未來可以針對以上各種類與非矽晶類太陽電廠，做效益分析及生命週期評估，探討其他種類太陽能發電系統在台灣是否有發展的可行性。
- (二) 再生能源發電是未來的趨勢，本研究也發現太陽能發電系統，在生命週期的原料子系統與生產子系統，耗用的能源與排放的 CO₂ 比例最高，若未來在生產太陽能電板的各個子系統，都能導入使用再生能源，將可降低 CO₂ 排放，有效改善對環境負面的影響，因此如何增加國內再生能源的使用比率，研究如何增加誘因，引導業界及民間投入，是一個刻不容緩的議題。
- (三) 本研究使用生命週期來評估單晶矽與多晶矽太陽能發電系統之經濟效益，規模為

499kW，建議後續研究可接續使用生命週期評估與成本效益法，探討更大規模的太陽能發電系統，同時搭配於生命週期概念，在原料子系統及生產子系統，導入使用再生能源，研究其經濟效益與淨能源回收是否有更高的效益。

- (四) 因台灣地區颱風及地震頻率較高，建議後續研究可以結合台灣颱風及地震資料，按縣市地區，進行天災所造成之風險評估，研究不同保險費率，對太陽光電系統之影響，同時建議將其風險做為未來調整平均資金成本率及產險公司承做保險之參考。

結合生命週期評估與效益評估，可以衡量每一階段，經濟上是否具有實質效益，建議後續可以透過以下方式，進行研究，選擇更具有效益的其他項能源；是否可以選擇替代性的材料；改善原有的生產製程；導入新的生產製程；投資新式的機械設備；改進生命週期過程，達到降低環境負擔，減少成本，同時提高經濟效益。

伍、誌謝

本文作者感謝科技部「再生能源於物聯網與大數據架構下創新服務模式之研究」專題研究計畫(編號 105-ET-E-005-001-ET)與「開放資料、大數據及資料探勘之研究：再生能源數據倉儲之建置與應用」專題研究計畫(編號：105-2221-E-005-067)之經費支持，始得完成此研究，惟文中若有任何疏誤，應由作者自負文責。

陸、參考文獻

- [1] 曾詠恩，「台灣地區風力發電之潛力分析與生命週期評估」，碩士論文，台北：國立臺北大學自然資源與環境管理研究所，2005 年。
- [2] Martin, P., "Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy Technologies," *Renewable Energy*, vol.31, Issue 1, pp.55-71, 2006.
- [3] 鍾健文、王宗昶，「各式太陽能電池製程介紹與

- 最新技術發展」，遠東學報第三十卷第二期，第 117-132 頁，2013 年。
- [4] 羅心慈，「高聚光型(HCPV)太陽能發電系統之碳足跡與能源回收期評估」，碩士論文，台北：國立台北科技大學環境工程與管理研究所，2001 年。
- [5] 盧怡靜、呂穎彬，「ISO 14040 生命週期評估的下一步」，永續產業發展刊，第 66 期，第 29-35 頁，2014 年。
- [6] 謝東村，「太陽光電系統建置效益分析」，碩士論文，台南：崑山科技大學電機工程研究所，2014 年。
- [7] Pimentel, D. "EthanolFuels: Energy Balance, Economics, andEnvironmental Impacts are Negative," Natural Resources Research, vol. 12, no. 2, 2003.
- [8] 許志義、黃國璋，「台灣能源需求面管理成本效益分析之應用」，發表於中華民國能源經濟學會 2010 年學術研討會，台北：中華民國能源經濟學會主辦，2010 年 11 月 19 日。
- [9] 郭乃頊，「熱泵熱水系統生命週期評估與淨能源分析之整合研究」，碩士論文，台北：國立政治大學國家發展研究所，2012 年。
- [10] 黃健源，「陽光電城太陽能利用之生命週期評估」，碩士論文，台北：國立台北大學自然環境與環境管理研究所，2000 年。
- [11] 蕭德仁，「提升太陽能電池發電效率參數與機構之研究」，碩士論文，台南：正修科技大學機電工程研究所，2007 年。
- [12] 高裕雄，「太陽能產業能源效益之系統性研究」，碩士論文，高雄：國立高雄應用科技大學資訊管理系研究所，2015 年。

台電工程月刊徵稿啟事



* 為使本刊物之內容更臻完善，歡迎有關火（水）力發電、核能發電、再生能源、輸變電、配電、電力系統、能源與環境、化學與材料、資訊與電腦、工程技術及其他等相關論著、技術經驗及譯者踴躍投稿，以饗讀者。

* 投稿相關事宜，若有任何疑問，請聯絡我們，謝謝您！

☎ (02)2360-1095 ✉ u117212@taipower.com.tw