

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

聚光型太陽模組減碳技術之研究

**Study on the Carbon Reduction Techniques of High Concentrated  
Photovoltaic Systems**

計畫編號：1052001INER007

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：105 年 12 月 21 日

## 目 錄

中文摘要.....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>壹、 計畫緣起與目的</b> .....	6
<b>貳、 研究方法與過程</b> .....	7
一、 文獻回顧 .....	7
(一) 高聚光型太陽能發電系統.....	7
(二) 生命週期評估.....	8
(三) 水足跡評估.....	10
二、 研究方法 .....	12
(一) 研究流程.....	12
(二) 研究範疇與邊界.....	14
(三) 研究限制與假設.....	14
(四) 計算方法.....	15
<b>參、 主要發現與結論</b> .....	16
一、 研究結果 .....	16
(一) 各階段盤查結果.....	16
(二) 水足跡評估之結果.....	18
二、 研究結論 .....	24
(一) 結論.....	24
(二) 建議.....	25
<b>肆、 參考文獻</b> .....	26

## 中文摘要

近年來碳之議題成為全球所關注的共同議題，各國也陸續訂定相關的減碳措施及國家發展目標，但大多國家的減碳政策重點仍在家電用品及電力設備上，對於水資源的議題顯少關注。台灣地區平均每年有二千多毫米的雨量但因為地狹人稠、山坡陡峭及河川短促導致每人所能分配到的水量只有全世界平均的五分之一。因此更應注重水資源這方面的議題。

本研究利用高聚光型太陽能做為評估水資源之研究案例，分析此系統在生命週期所造成的水資源影響進而瞭解水資源的重要性。全球暖化為全球關注的環境議題，為了克服氣候變化，許多再生能源技術不斷發展當中，在這些技術中，太陽能系統是目前眾多再生能源中發展最為迅速的再生能源科技。聚光型太陽能系統為一種結合聚光和追日科技來達到高效率之能源轉換的太陽能發電技術之一。雖然太陽能系統於運作過程中屬於相當潔淨之能源，但生產太陽能模組過程中排放的廢水造成的污染問題以及水資源使用的需求是目前太陽能發電技術的重大環境衝擊之一。因此，有其必要性探討聚光型太陽能模組於各生命週期階段中對於水資源使用與水污染造成之衝擊。結果顯示，高聚光型太陽能系統每發一度電會消耗 0.86 公升的水資源，且造成淡水優養化、淡水生態毒性、水體酸化值分別為  $2.59 \times 10^{-5}$  (kg P eq)、 $1.3 \times 10^{-3}$  (kg 1,4-DB eq)、 $2.94 \times 10^{-4}$  (kg SO<sub>2</sub> eq)。本研究將透過生命週期盤查之方法，進行聚光型太陽能電池模組之水足跡評估，以瞭解其不同生命週期階段對於水資源耗用與水資源品質之影響。

## **ABSTRACT**

The issue of carbon has become a common topic in the world recently, countries have also set relevant carbon reduction policy and development goals. In general, most of the carbon reduction policy are focused on electrical and electronic equipment, water issues are less of a concern. Although the annual rainfall in Taiwan is up to 2000mm, the high population density, steep slopes and short rivers results the amount of water that can be distributed to people is only one-fifth of the world's average. Therefore, more attention should be paid to water resources in this regard.

In this study, we used the life cycle assessment of high concentrating solar energy system as a case study of water resources, the result of this study leads to a further understanding about the importance of water resources. Global warming are serious environmental problems in the world. To overcome the challenge of climate change, many renewable energy technologies are continually under development. Among these technologies, the solar power is one of the most potential renewable technology in near future. The high concentrated photovoltaics (HCPV) is one type of solar power system, which employ concentrating and tracking technologies to achieve higher efficient energy conversion than other solar power system. Although the solar system generates clean energy in operation phase without any serious environmental impacts, the PV modules production are facing water pollution and water consumption issues. Therefore, it is necessary to evaluate the water footprint of HCPV systems during their entire life cycles. The result shows that the high concentrating solar system consumes 0.86 liters of water per kilowatt hour.

Furthermore, it also impacts freshwater eutrophication ( $2.59 \times 10^{-5}$  kg P eq), freshwater ecotoxicity ( $1.3 \times 10^{-3}$  kg 1,4-DB eq) and water acidification ( $2.94 \times 10^{-4}$  kg SO<sub>2</sub> eq). This study aims to demonstrate the applicability of life cycle inventory in assessing the water footprint of HCPV.

## 壹、計畫緣起與目的

臺灣地區平均降雨量有兩千多毫米，但因為臺灣地區地狹人稠、山坡陡峭、雨勢集中以及河川短促，使得大部份雨水迅速流入海洋，停留在陸地的時間很短，水資源利用與管理的難度很高。因此，雖然臺灣的年降雨量為世界平均值的 2.6 倍，但每個人的分配卻不到世界平均值的五分之一，使得臺灣成為世界排名第十九名缺水的國家(經濟部水利署，2013)，因此，更應加強水資源的管理。

本研究利用高聚光型太陽能做為評估水資源之研究案例，分析此系統在生命週期所造成的水資源影響以供其他行業做為參考，進而瞭解水資源的重要性。高聚光型太陽能發電系統除了使用多介面的三五族電池並配合著追日系統，因此比其他太陽能發電系統擁有較高效率的發電機制。

根據過去研究發現，聚光型太陽能系統之主要碳排放階段為發電相關元件於製造及組裝階段所投入之能資源所造成(羅心慈，2015)；除了碳排放的因素外，生產太陽能模組過程中使用之水資源及排放的污水造成的污染問題亦是太陽能發電技術的重大環境衝擊。因此，有其必要性探討聚光型太陽能模組於各生命週期階段中對於水資源造成之衝擊。若發展太陽能系統時也能同時進行系統整個生命週期之環境衝擊評估，評估結果將可被應用在科技上來使能源系統更永續。

近年來仍少有研究係針對這些新技術進行環境衝擊評估，本研究將延續過去 HCPV 碳足跡評估之觀點，探討 HCPV 系統之水資源使用量及水污染衝擊。

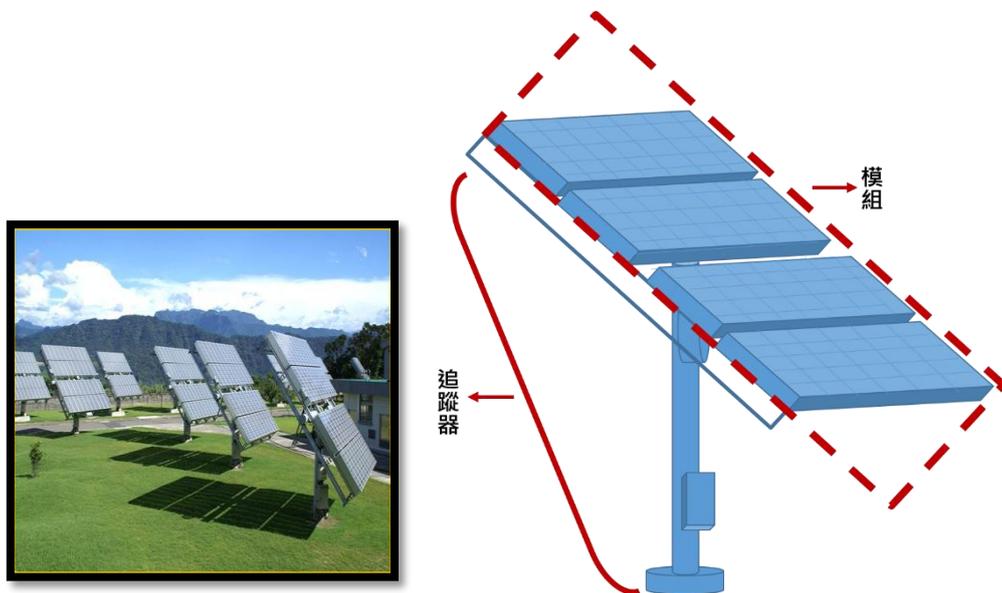
## 貳、 研究方法與過程

本計畫主要目標為太陽能電池模組之生命週期盤查研究，並以水資源使用量及環境衝擊作為主要評估項目。因此，本研究將透過逐步進行太陽能電池模組之生命週期評估方法，並搭配軟體 Simapro 進行水足跡之評估與計算。

### 一、 文獻回顧

#### (一)高聚光型太陽能發電系統

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 2.1)，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 族多接面的電池 (GaInP/GaAs/Ge)並且使用雙軸太陽追蹤系統，此高聚光型太陽能發電系統由聚光型太陽能電池模組及太陽追蹤系統兩大結構組成如圖 2.1 所示，其中模組受光面積約 34.56 平方公尺。



資料來源：核能所

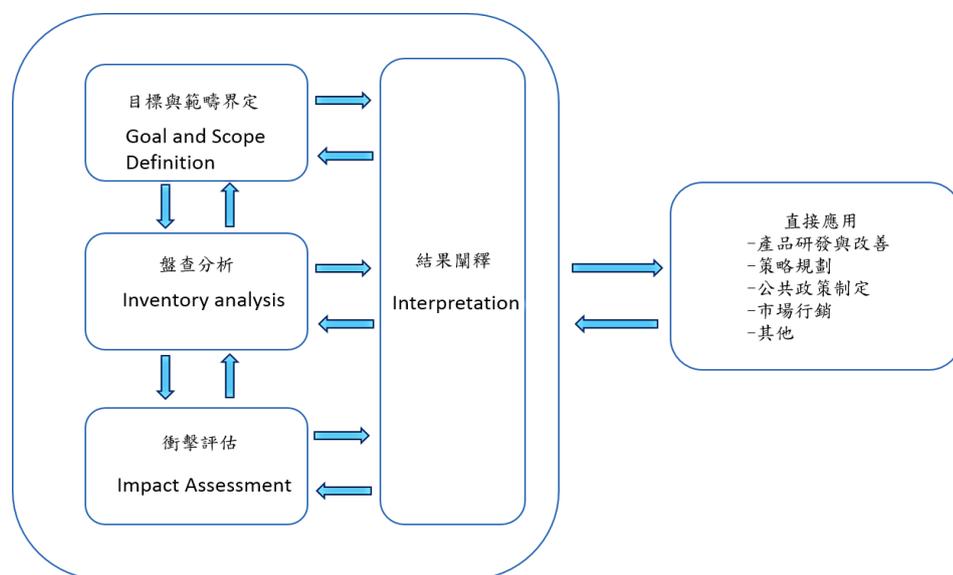
圖 2.1 7.5kW HCPV 實照圖與簡易圖

其中模組之結構包括了菲涅爾透鏡、電池、散熱元件，而追蹤器

為雙軸式包括轉軸、支撐材、馬達、感應器等。發電程序利用菲涅爾透鏡將光聚焦至電池，而電池底下之散熱底座可以必發電過程中產生免熱斑現象，模組中其他散熱元件則可以將不被轉換成電之熱量散發出去，除了模組的發電機制外還配合追蹤系統之雙軸追日技術來完成整個此系統之發電程序。

## (二)生命週期評估

1992年國際標準組織(International organization for standardization, ISO)制定ISO 14000系列的管理標準;1997年規範LCA的基本原則與框架,訂定了ISO 14040;2006年ISO修訂ISO14040與ISO14044,制定了LCA準評估架構與步驟。而根據ISO 14040系列的規範,其評估架構流程如圖 2.2 可分為：目標與範疇界定、生命週期盤查分析、生命週期衝擊評估以及命週期闡釋等四大步驟。



資料來源：ISO 14040, 2006

圖 2.2 生命週期架構圖

## 1. 目標與範疇

目標與範疇的定義在於決定研究評估的產品並決定此研究的目的，在此步驟必須清楚地被定義及與符合預期的應用目標，因此在進行此階段工作時，通常需考量以下幾點並清楚界定：標的產品的功能、功能單位、系統邊界、衝擊評估及估算的方法學、對原始數據品質的要求、分配程序、情境及數據的假設等，功能單位是非常重要的基本單位，有助於不同產品或服務來做比較分析。

## 2. 盤查分析

目的是所有關於產品其一個功能單位下的活動數據都會被考慮分析，通常會先依據所定義的系統邊界來建構產品系統其生命週期製成地圖，再收集關於其活動的所有數據包括原料萃取、中間產品、使用階段、廢棄物移動等，最後依據功能單位計算並列出盤查表單顯示每一功能單位所有投入產出的數據。

## 3. 衝擊評估

目的是去量化盤查分析的數據，來描述及表示環境負荷，此階段評估可以提出產品可能造成的環境衝擊，個別探討有助於產品製程改善之方針。

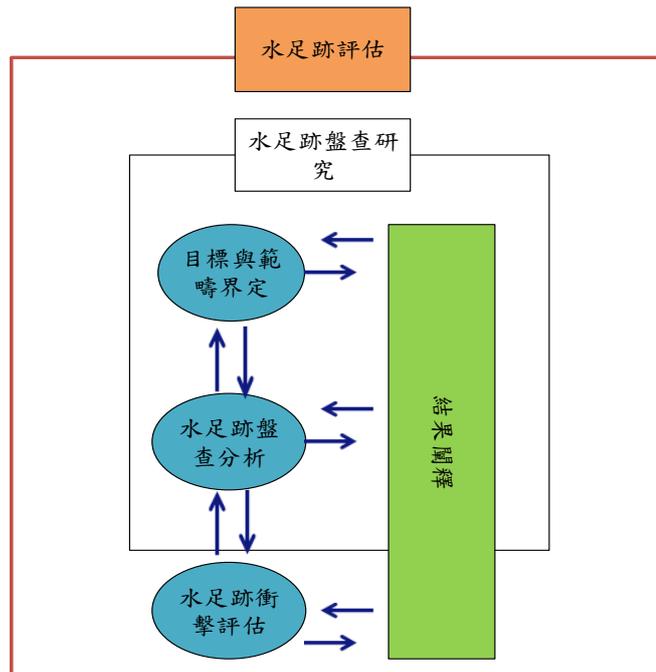
## 4. 結果闡釋

是針對整個生命週期來做的評估，包括產品研發及改善、公共政策制定、市場行銷等，批判性的審查、解釋及討論以提供相關環境議題的參考資訊給決策者，作為生產流程的改善、物料選擇改變等的方針，另外提供日後研究方法改善之建議。

### (三)水足跡評估

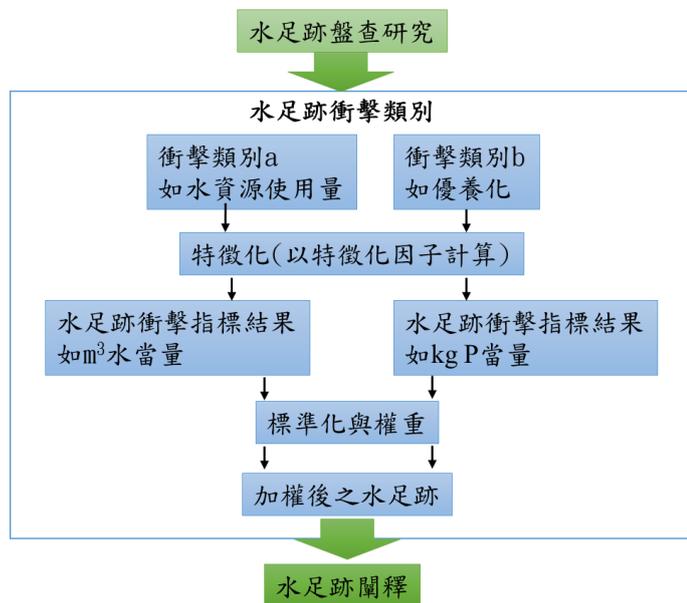
「水足跡(water footprint)」為推廣水資源管理的一項管理工具(United Nations, 2009)，藉由分析與量化水資源之使用，進一步瞭解各種活動或生產過程中所運用之水資源，而後做為個人或企業營運、風險管理之參考依據。而多數製造產業，亦進一步藉由水足跡之概念導入其生產之產品，以「產品(product)」為水足跡量化之標的，藉由掌握自有產品之水資源運用情況，以提供廠內自我管理及產品生產技術提升，或是作為對外教育及宣導環境保護之用。

水足跡概念緣起與碳足跡類似，皆是從生態足跡發展而出。水足跡旨在評估人類用水需求對環境造成的負荷(周嫦娥，2011)。西元2014年7月，「國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)」完成制訂並發行「ISO 14046-環境管理-水足跡-原則、要求與指引(ISO 14046-Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines)」(以下簡稱「ISO 14046」)，基於此標準之制定是由各國國家標準代表參與制訂，故其國際性質及國際接受度亦可視為目前水足跡執行依據之最高準則。ISO14046強調水足跡的評估或盤查是由生命週期分析的觀點評估水資源相關的環境衝擊，藉由量化完整水資源相關潛在之環境衝擊來瞭解人類活動對於水資源造成的影響。圖 2.3 為水足跡評估架構流程圖，透過目標與範疇界定訂定出功能單位、系統邊界等等，針對標的物進行盤查分析，將盤查數據進行量化分析進行衝擊評估，最後進行結果闡釋針對產品的整個生命週期進行評估。圖 2.4 為水足跡衝擊評估之架構。



資料來源：ISO 14046, 2014

圖 2.3 足跡評估架構流程圖



資料來源：ISO 14046, 2014

圖 2.4 水足跡衝擊評估之架構

## 二、 研究方法

### (一)研究流程

本研究針對案例高聚光型太陽電池系統為主軸，透過水足跡評估，搭配生命週期軟體 SimaPro 8.0.2 計算高聚光型太陽能系統之水資源使用及水質惡化兩個部分。本研究步驟如下：

1. 針對選定案例-高聚光型太陽能系統定義功能單位及系統邊界之訂定。
2. 進行生命週期各階段之盤查，盤查系統所用的材料與元件、投入與產出，並將無法盤查之數據以 EcoInvent 3.0 數據庫及文獻之相近的資料替代。
3. 將盤查的資料與選用的數據建置 SimaPro 8.0.2 軟體中，進行 HCPV 水足跡評估，包含：水資源使用及水質惡化兩個部分。
4. 搭配太陽能發電算式，計算高聚光型太陽能系統之預期總發電量及耗電量，並藉此數據得到每發一度電之水足跡之結果。

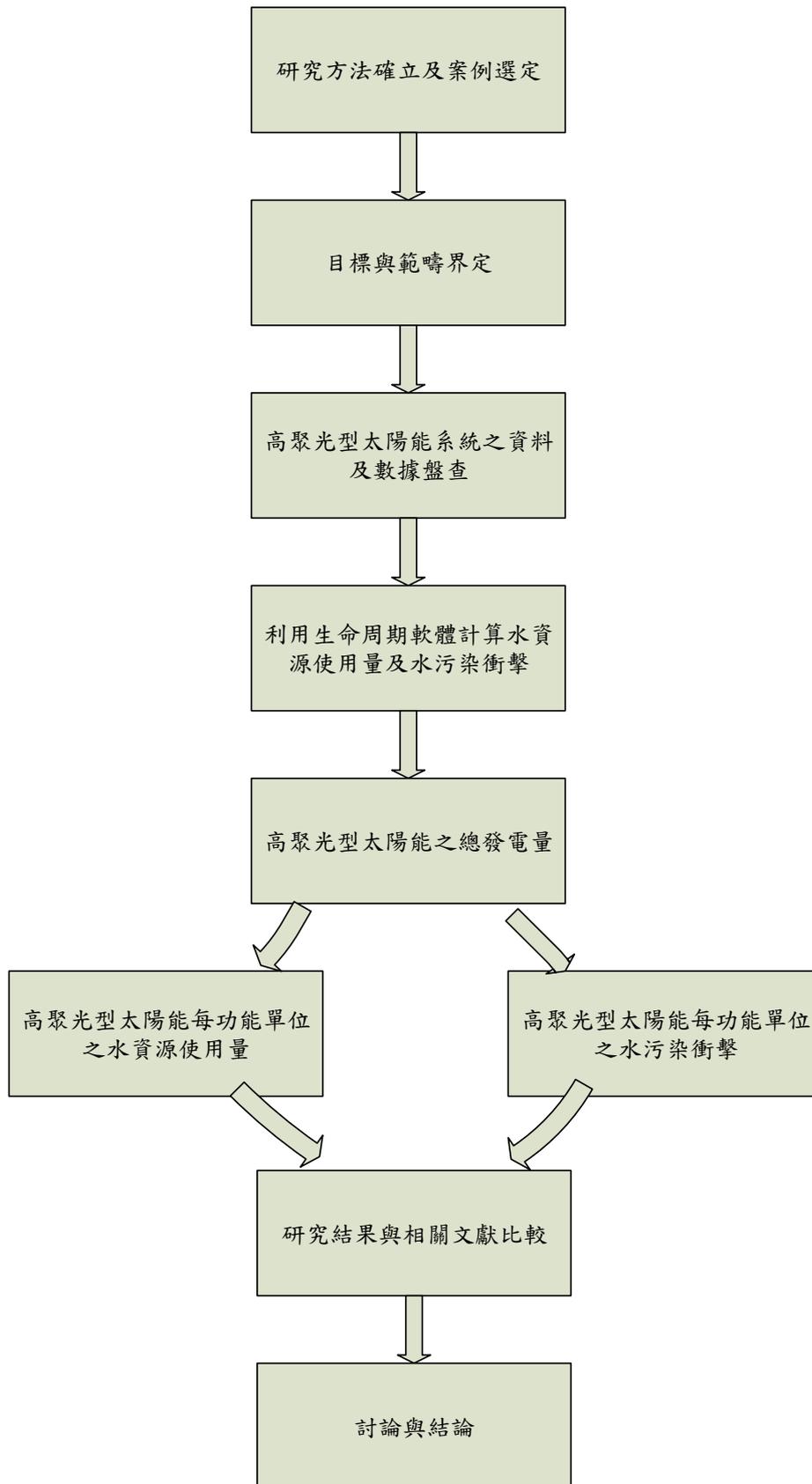


圖 2.5 研究架構圖

## (二)研究範疇與邊界

本研究目的以生命週期的概念，依循案例高聚光型太陽能發電系統，盤查各個組件並找尋數據庫及文獻可用數據，計算案例自原料萃取階段、製造階段、運輸階段、組裝階段、運作階段及最終階段之此研究之範疇內之生命週期各階段之水足跡。本研究訂定為高聚光型太陽能發電系統之運作時所發的一度電為功能單位(Functional Unit)。並利用 SimaPro 8.0.2 軟體得知各階段所造成的環境衝擊。以下為此計算之系統邊界圖 2.6。

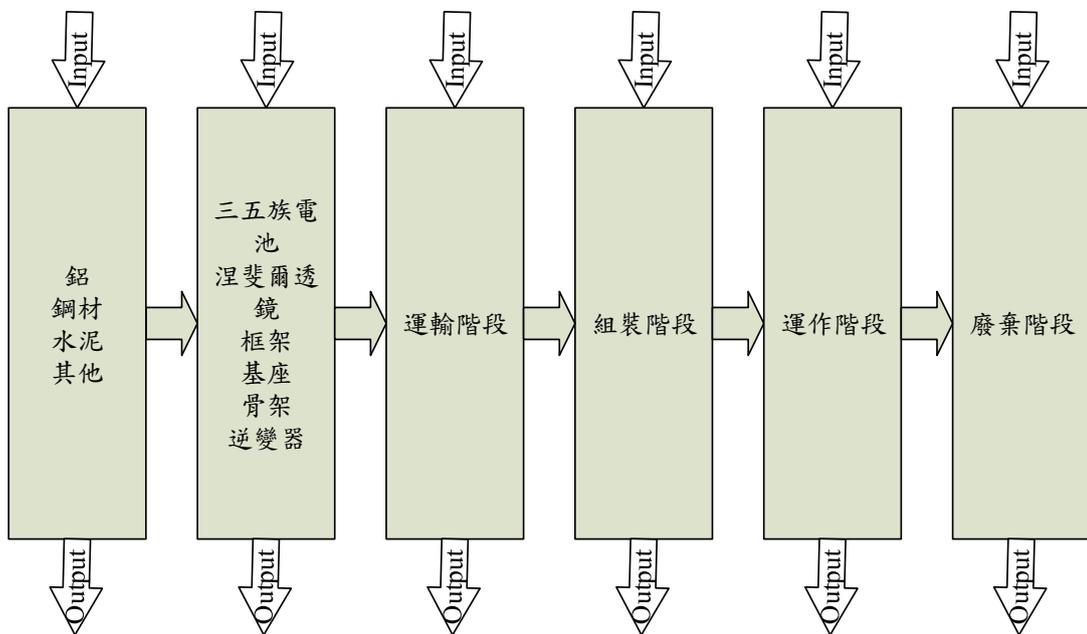


圖 2.6 系統邊界

## (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清單，其中的 III-V 電池製造過程中並沒有相關資料，而使用文獻之多晶矽電池做為計算之代替。
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。

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進行計算。
4. 運作階段假設每根追蹤器 1.5 個月清洗一次，一隻追蹤器約用掉一噸的自來水。
5. 廢棄階段假設金屬部分及涅菲爾透鏡進行回收，其餘以焚化處理。
6. 本研究之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文獻之數據。

#### (四)計算方法

本研究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，在計算時以此功能單位來評估系統對環境的負荷。水資源使用量方面，使用 EcoInvent3.0 作為係數選擇依據。EcoInvent 資料庫中將水區分為湖泊水、地下水、河川水、海水、鹹水及未確認之自然來源，而未確認之自然來源主要為水力發電用水(Turbine use)，水力發電用水僅利用水的位能差做為發電用途，雖然取用量極大，但取用後立即全數釋放至原有水域，對水量與水質之衝擊有限。因此，在計算各原物料水足跡係數時，將各係數之水力發電用水(Turbine use)予以排除。水污染衝擊方面，本研究使用 ReCiPe 及 Impact 2002<sup>+</sup> 為主要計算之方法學；水質惡化以 ReCiPe 方法學之 Freshwater eutrophication、Freshwater ecotoxicity 及 Impact 2002<sup>+</sup> 方法學之 Aquatic acidification 表示。如表 2.1 所示。

表 2.1 水資源污染衝擊類別指標

Water degradation	指標	方法學
	Freshwater eutrophication (kg P eq)	ReCiPe
	Freshwater ecotoxicity (kg 1,4-DB eq)	ReCiPe
	Aquatic acidification (kg SO <sub>2</sub> eq)	Impact2002 <sup>+</sup>

## 參、 主要發現與結論

### 一、 研究結果

#### (一)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 III-V 族電池，根據核能所提供的資料可得知，此系統之發電效率保守估計約 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 909kWh/m<sup>2</sup>/year，而此數據是由 NREL(國家再生能源實驗室)所測得數據。

#### 1. 原料及元件製造階段

此階段之清單由核能所提供，數據使用主要做為 EcoInvent 3.0 數據庫輸入軟體之用，表 3.1 為單一模組組成清單，數據由核能所提供，單一模組主要材料為鋁材，總重約為 18 公斤，其中一模組有 40 顆電池。

表 3.1 單一模組組成清單

	原料	用量	數據來源
單一模組	骨架鋁材	7.492(kg)	核能所提供
	內部結構鋁材	1.6167(kg)	
	螺栓	0.412(kg)	
	涅菲爾透鏡	3.35(kg)	

	散熱鋁板	5.565(kg)	
	太陽能電池	40(個)	
	陶瓷電路板	0.024(kg)	
	旁路二極體	0.012(kg)	
	接收器電線	0.08(kg)	
	總重	18.5517(kg)	

表 3.2 為高聚光型太陽能之追蹤器與逆變器之清單，其組成材料為鋁材及鋼材，總重約為 7524 公斤，整個追蹤器可以裝 60 個太陽能模組，此外，此系統之逆變器為 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 逆變器做為計算。

表 3.2 追蹤器及逆變器盤查清單

	原料	用量	數據來源
追蹤器	鋁支撐材	324.21(kg)	核能所提供
	鋼支撐材	1994.22(kg)	
	馬達	6.3(kg)	
	基座	5200(kg)	
其他	逆變器 (2.5kWx3)	7.5(kW)	

## 2. 運輸階段

在運輸階段方面，所有元件皆由台南縣麻豆區運送至桃園縣龍潭鄉核能所，全程約 241 公里，運輸工具選用 3.5-7.5 噸貨車及 7.5-16 噸貨車。

## 3. 組裝階段

組裝階段方面，本研究無法盤得追蹤器在組裝階段時相關之耗電量及耗材部分之數據，表 3.3 為關於模組再組裝階段之耗電量及耗材數據。

表 3.3 模組組裝之相關數據

階段	材料	用量
組裝階段	電力	10 度
	矽膠	0.512(kg)
	錫膏	1.014(kg)
	密封矽膠	0.225(kg)

#### 4. 運作階段

本研究根據核能所預估此系統生命時間約為 30 年，系統於運作維護階段平均每 1.5 個月清洗一次，每次使用 1 立方公尺的水資源。而在發電效率方面可藉由核能所提供之資料及發電量計算公式得出 30 年此系統的總發電量為 282735.4kWh，表 3.4 為計算發電量之相關數據

發電量計算公式：發電量(kWh) = DNI(kWh/m<sup>2</sup>/year) x 受光面積(m<sup>2</sup>) x 發電效率(%) x 時間(y)

表 3.4 計算發電量之相關數據

直接正常輻射(DNI)	909kWh/m <sup>2</sup> /day
受光面積	34.56m <sup>2</sup>
發電效率	30%
系統運作階段耗用	547.5~1971kWh
生命週期 30 年產生電力	282735.4kWh

#### 5. 廢棄階段

在廢棄階段金屬組件部分會回收再使用，其餘非金屬部分則不回收以焚化處理，並且假設運送至焚化廠距離為 24.4 公里。

### (二)水足跡評估之結果

#### 1. 水資源使用量評估結果

生命週期各階段之水資源使用量，分別為原料及元件製造階段 3.79 m<sup>3</sup>；運輸階段 1.91 x10<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>；組裝階段 0.14 m<sup>3</sup>；運作階

段  $240 \text{ m}^3$ ；廢棄階段  $6.57 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ，結果由表 3.5 所示。從圖 3.1 可以明顯看出在各生命週期階段，運作階段為水資源使用量最大之階段。利用發電量計算公式高聚光型太陽能生命週期 30 年產生電力為  $282,735.4 \text{ kWh}$ ，可以計算出水資源使用量為  $0.86 \text{ L/kWh}$ ，也就是每發一度電所使用之水資源為  $0.86 \text{ L}$ 。

表 3.5 高聚光型太陽能水資源使用量

Stage	水資源使用量( $\text{m}^3$ )
原料及元件製造階段	3.79
運輸階段	$1.91 \times 10^{-1}$
組裝階段	0.14
運作階段	240
廢棄階段	$6.57 \times 10^{-2}$
Total	244.19

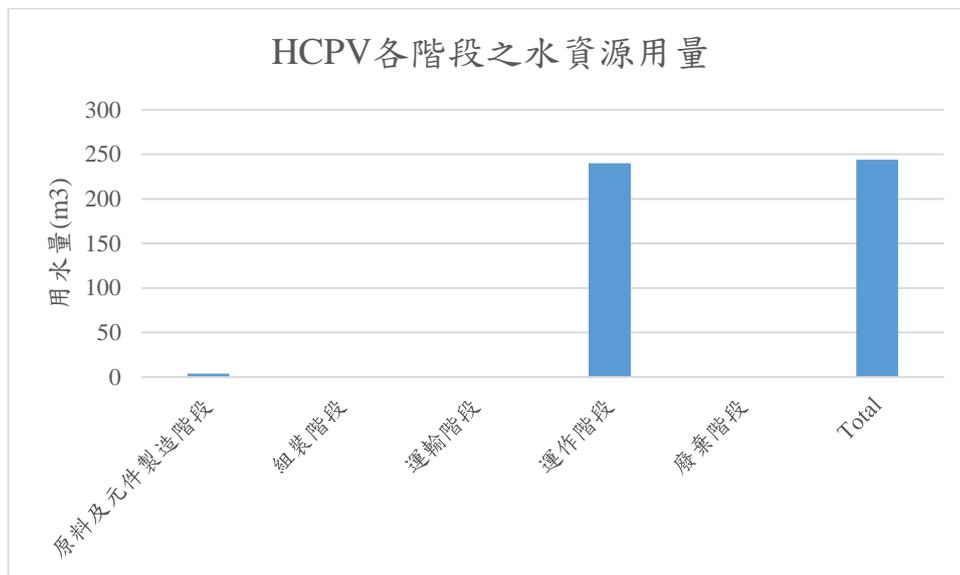


圖 3.1 高聚光型太陽能各階段之水資源使用量

再進一步分析原料及元件製造階段對於水資源使用量的情形，表 3.6 為原料及元件製造階段水資源使用量。從圖 3.2 中可以看出大部分的水資源使用量皆來自鋁材其次為太陽能電池原

料，其餘元件對於水資源使用量相對較低。

表 3.6 原料及元件製造階段水資源使用量

階段	原料	用水量
追蹤器	鋁材	6.78E-01
	鋼材	3.39E-01
	馬達	5.52E-02
	水泥	2.21E-02
模組	骨架鋁材	9.39E-01
	內部結構	2.03E-01
	螺栓	7.27E-03
	涅菲爾透鏡	5.19E-02
	散熱鋁板	4.27E-01
	太陽能電池	8.33E-01
	陶瓷電路板	2.20E-02
	旁路二極體	5.65E-02
	接收器電線	6.77E-04

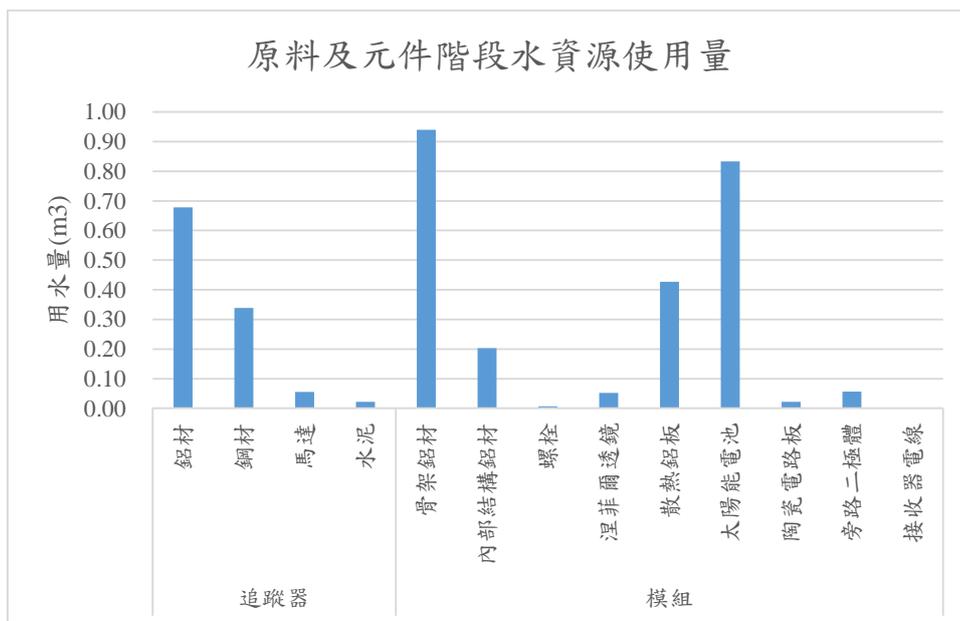


圖 3.2 原料及元件階段水資源使用量

## 2. 水質惡化評估結果

評估水質惡化主要有淡水優養化、淡水生態毒性以及水體酸化三種指標，分別以磷當量、對二氯苯當量、二氧化硫當量為單位。利用總發電量可以計算出每發一度電對於水質惡化所造成的影響，結果由表 3.7 所示。而從圖 3.3 可以明顯看出造成水質惡化主要的階段約有 9 成皆來自原料及元件製造階段。

表 3.7 高聚光型太陽能水質惡化評估

	淡水優養化 (kg P eq)	淡水生態毒性 (kg 1,4-DB eq)	水體酸化 (kg SO <sub>2</sub> eq)
原料及元件製造階段	7.2	340	78
運輸階段	0.0437	2.69	2.26
組裝階段	0.0124	0.263	0.397
運作階段	0	0	0
廢棄階段	0.0673	26.2	2.36
Total	7.3234	369.15	83.02
每發一度電造成的影響	$2.59 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.94 \times 10^{-4}$

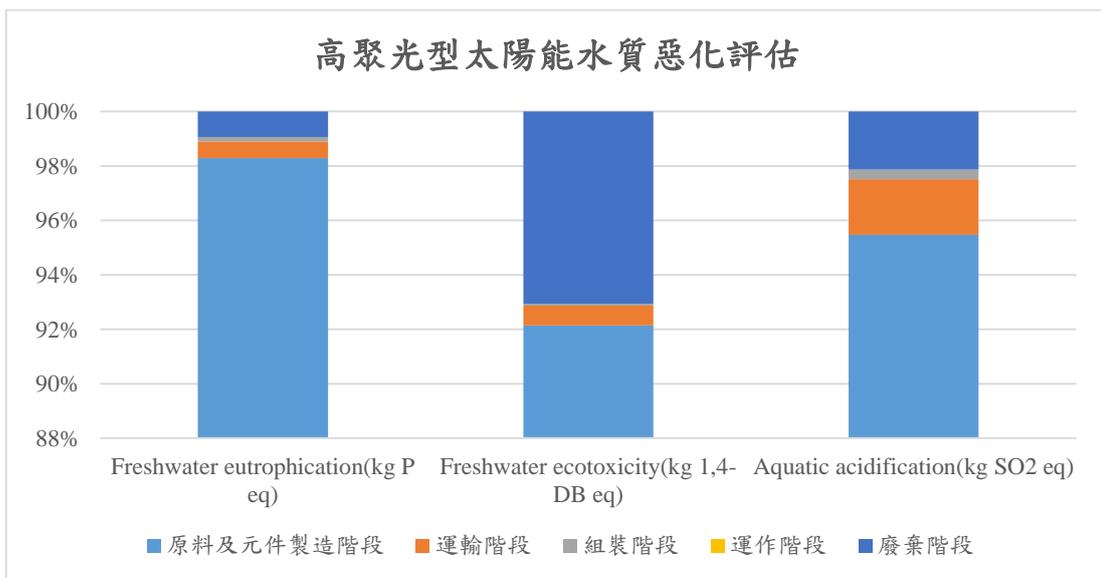


圖 3.3 高聚光型太陽能水質惡化評估

針對上述結果，進一步分析原料及元件製造階段對於水質惡化的影響。圖 3.4 為原料及元件階段對於淡水優養化的影響，從圖中可以看出造成淡水優養化最大的影響來自於鋼材，其次為鋁材、陶瓷電路板、太陽能電池。圖 3.5 是原料及元件階段對於淡水生態毒性影響，從圖中可以發現對於生態毒性影響主要影響為鋁材及鋼材。圖 3.6 為原料及元件階段對於水體酸化的影響，從圖中可以看出對水體酸化造成最大的影響元件為鋼材其次為鋁材。

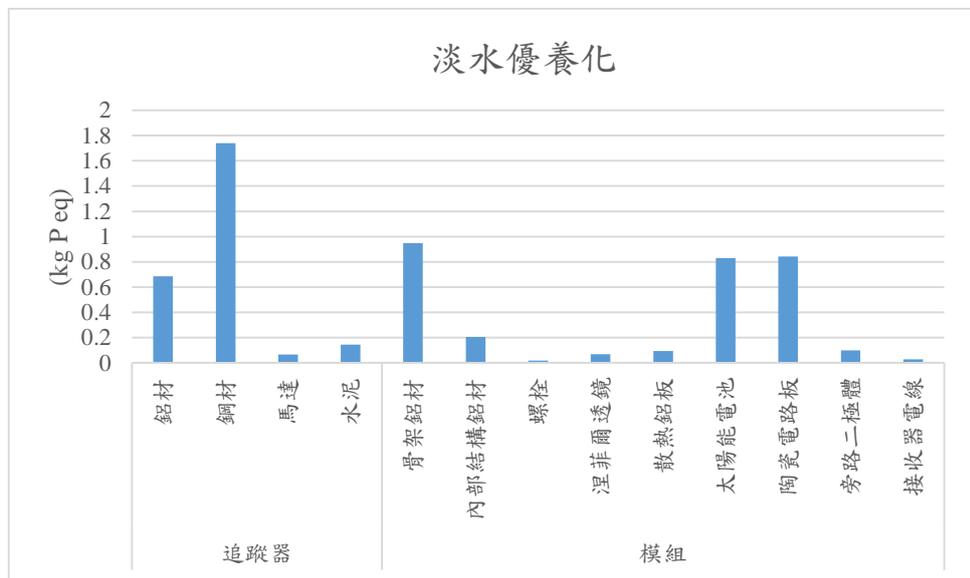


圖 3.4 原料及元件階段對於淡水優養化影響

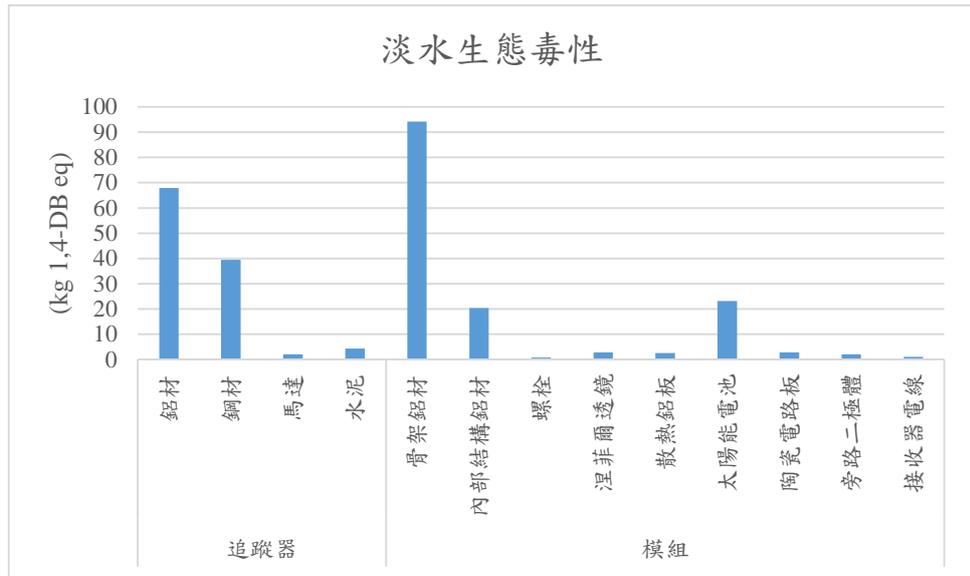


圖 3.5 原料及元件階段對於淡水生態毒性影響

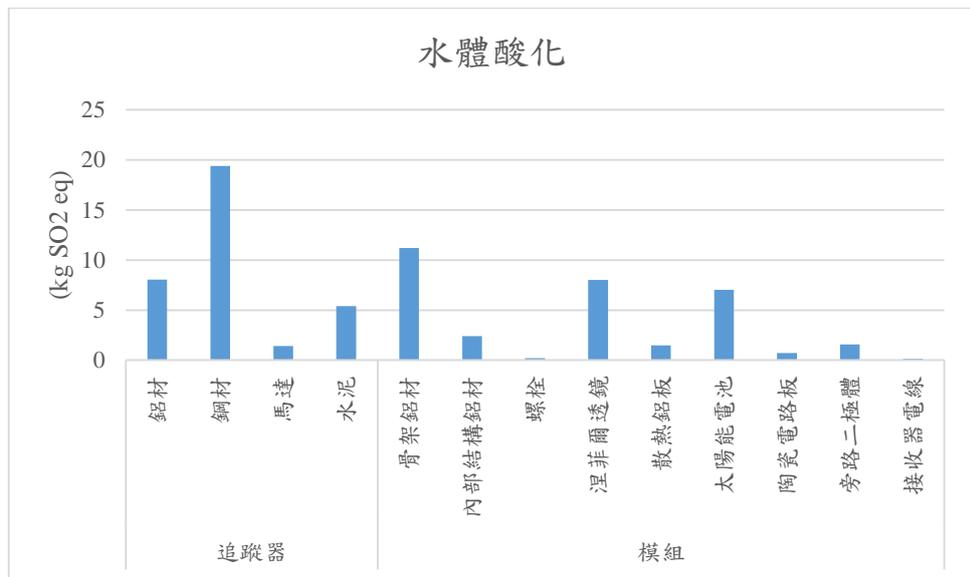


圖 3.6 原料及元件階段對於水體酸化影響

### 3. 本研究與相關太陽能電池之比較

本研究收集國外相關太陽能電池之文獻進行比較，並探討之間的差異。SINHA et al. (2013)進行 CdTe 太陽能電池之生命週期評估，該研究為評估 CdTe 模組產生一度電所產生的水足跡，安裝地點為美國加州。而 Amonix Corporation 公司生產的 24KW Amonix 7700 HCPV 系統，安裝地點為美國鳳凰城，Vasilis M.

Fthenakis et al. (2011)也有進行水資源使用量相關的評估。表 3.8 為本研究與其他相關文獻之水資源使用量比較。

表 3.8 本研究與其他相關文獻之水資源使用量比較

	SINHA et al. (2013)	Vasilis M. Fthenakis et al. (2011)	本研究
太陽能系統種類	CdTe	HCPV	HCPV
照射面積(m <sup>2</sup> )	1	267	34.56
使用年限(year)	30	30	30
轉換效率(%)	12.2	37	30
直接正常輻射量(DNI)	2,199	2,370	909
水足跡(L/kWh)	0.382~0.425	0.708	0.86

由表 3.8 可以發現本研究之水足跡高於另外兩個研究，探討本研究與文獻之差異。其中預期總發電量為影響原因之一，從總發電量計算公式可以看出轉換效率、照射面積及直接正常輻射量等等，皆會造成總發電量的大小，從表 3.8 可以看出，本研究安裝地點之直接正常輻射量遠小於另外兩篇文獻，且照射面積也有所不同，若預期總發電量越大則太陽能系統產生每度電所需要使用之水資源量越小。

此外，台灣目前並未建立本土用水係數，僅能使用資料庫及相關文獻的用水係數，這也是導致差異之原因。

## 二、 研究結論

### (一)結論

本研究在高聚光型太陽能發電系統之生命週期中，藉由評估高聚光型太陽能之水足跡來瞭解到水資源的重要性，以供相關行業做為參考。使用生命週期評估方法且利用 Ecoinvent 3.0 做為資料庫，在水資源使用量方面計算結果為 244.19m<sup>3</sup> 且每發一度電需要 0.86L 的用水量。水質惡化方面則是使用 ReCiPe 方法學中

的 Freshwater eutrophication 計算結果為 7.32 (kg P eq)、Freshwater ecotoxicity 計算結果為 369.15(kg 1,4-DB eq)及 Impact2002+方法學中的 Aquatic acidification 計算結果為 83.02(kg SO<sub>2</sub> eq)，且每度電造成之水質惡化淡水優養化為 2.59x10<sup>-5</sup>(kg P eq)、淡水生態毒性為 1.3x10<sup>-3</sup>(kg 1,4-DB eq)、水體酸化為 2.94x10<sup>-4</sup>(kg SO<sub>2</sub> eq)。結果顯示，在水資源使用量方面，最大影響階段為運作階段。造成水污染衝擊方面主要影響階段在原料及元件製造階段。在文獻比較部分，由於本研究之太陽能系統設置於桃園縣龍潭鄉，當地直接正常輻射量甚小，導致預期總發電量不高，使得本研究之太陽能系統水資源使用量較高。此外由於目前台灣並沒有本土的水資源使用係數，僅能使用資料庫之係數，未來應建立屬於台灣的用水係數，以減少誤差。

水足跡評估還正在發展當中，而目前國際上針對產品水足跡之研究，目前並沒有統一的方法可一致且準確地將盤查資料與特定潛在環境衝擊連結，且衝擊類別模型也持續發展中。目前鮮少有針對太陽能系統之水足跡研究，因此透過本研究之結果，瞭解太陽能電池生產每度電所形成之水足跡，進一步了解太陽能系統對於水資源影響之情形。

## (二)建議

1. 高聚光型太陽能生命週期中，若要有效降低水資源使用量除了在運作階段減少水資源使用上的浪費，也應在原料選擇上選擇用水係數較低之材質。
2. 總發電量為影響水足跡大小原因之一，而直接正常輻射量、使用年限、轉換效率會影響到總發電量，若太陽能系統能設

置於直接正常輻射量較大區域，能有效提高轉換效率延長使用年限，將有效降低水資源使用量及水污染衝擊。

3. 目前台灣尚未建立屬於本土的水足跡係數，原物料用水資料缺乏，需建立基礎原物料之水足跡資訊以供下游製造業作為參考使用。目前因僅能使用文獻及資料庫之用水係數而影響到數據品質，未來應建立本土水足跡係數以增加評估結果之可靠度。進而做為產品用水改善之參考指標。

#### 肆、 參考文獻

1. Bekkelund, K. "A Comparative Life Cycle Assessment of PV Solar Systems."2013
2. Boulay, A. M., Motoshita, M., Pfister, S., Bulle, C., Muñoz, I., Franceschini, H., & Margni, M. (2015). Analysis of water use impact assessment methods (part A): evaluation of modeling choices based on a quantitative comparison of scarcity and human health indicators. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1), 139-160.
3. Boulay, A. M., Bayart, J. B., Bulle, C., Franceschini, H., Motoshita, M., Muñoz, I., ... & Margni, M. (2015). Analysis of water use impact assessment methods (part B): applicability for water footprinting and decision making with a laundry case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(6), 865-879.
4. Bras, B., Tejada, F., Yen, J., Zullo, J., & Guldborg, T. (2012). Quantifying the life cycle water consumption of a passenger vehicle (No. 2012-01-0646). SAE Technical Paper.
5. Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2013). Life cycle assessment of high-concentration photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(3), 379-388.

6. Manzardo, A., Mazzi, A., Loss, A., Butler, M., Williamson, A., & Scipioni, A. (2016). Lessons learned from the application of different water footprint approaches to compare different food packaging alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4657-4666.
7. Pfister, S., Vionnet, S., Levova, T., & Humbert, S. (2015). Ecoinvent 3: assessing water use in LCA and facilitating water footprinting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-12.
8. Sinha, P., Meader, A., & de Wild-Scholten, M. (2013). Life cycle water usage in CdTe photovoltaics. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(1), 429-432.
9. ISO 14040-Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and Guidelines, International Organization for Standardization, ISO, 2006.
10. ISO 14040-Environmental management-Life cycle assessment-principles and framework, International Organization for Standardization, ISO, 2006.
11. ISO 14046-Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines, International Organization for Standardization, ISO, 2014.
12. Yao, Y., Chang, Y., & Masanet, E. (2014). A hybrid life-cycle inventory for multi-crystalline silicon PV module manufacturing in China. *Environmental Research Letters*, 9(11), 114001.
13. 周嫦娥，企業水足跡盤查機制建立及推動策略之研究，經濟部水利署委託計畫，2015。
14. 羅心慈 (2015)，高聚光型(HCPV)太陽能發電系統之碳足跡與能源回收期評估，國立台北科技大學碩士論文。