

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽電池模組材料碳足跡評估
(Assessment of carbon footprint
for PV modules materials)

計畫編號：1032001INER020

受委託機關(構)：國立清華大學 材料科學與工程學系

計畫主持人：黃倉秀 教授

聯絡電話：03-5719561

E-mail address：tsh@mx.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：簡克任

報告日期：103 年 11 月 16 日

目 錄

目 錄.....	i
圖目錄.....	ii
表目錄.....	iii
中文摘要.....	iv
Abstract.....	v
壹、計畫緣起與目的.....	1
貳、研究方法與過程.....	3
參、主要發現與結論.....	14
肆、參考文獻.....	21

圖目錄

圖 1、生命週期示意圖	4
圖 2、B2C 製程地圖	5
圖 3、B2B 製程地圖	6
圖 4、Gabi 軟體介面	7
圖 5、以 Gabi 製作的接收器生命週期流程圖	8
圖 6、Gabi「表中有表」之資料庫型態示意圖[1]	8
圖 7、依流程圖繪製計算結果分析，使用者視需求選擇適當規範分析產品碳足跡	9
圖 8 不同矽基太陽能電池的碳足跡，各階段占總碳足跡的比例，以及未來移除框架、提高效率的碳足跡[3]	10
圖 9 不同薄膜太陽能電池之碳足跡之分析[4]	12
圖 10、PV 7700 生命週期裡各流程的碳排放比例，僅標示較大排放的流程。前三個分別是追蹤器、散熱基板、模組框架[6]	13
圖 11、各種不同聚光太陽能電池碳足跡比較[7]	13
圖 12 額定輸出功率 140W 發電量模組，接收器內 Submount 之碳足跡分布比例	16
圖 13、聚光型太陽電池接收器照片	17
圖 14、額輸出功率 140W 發電量模組，接收器各零組件之碳足跡分布比例	18
圖 15、接受器散熱結構示意圖	20

表目錄

表 1、Submount 製程使用原料碳排放量	15
表 2、接受器使用原料的碳排放量.....	18

中文摘要

目前國內僅有兩家矽基太陽電池模組廠及一家薄膜太陽電池廠通過碳足跡盤查，在聚光型太陽電池模組方面，尚無任何廠商投入低碳足跡開發行列。本研究主要針對聚光型太陽電池模組之接收器零組件與材料的碳足跡做評估，並針對碳排放熱點，導入低碳足跡製程與材料，以作為開發低碳足跡聚光型太陽電池模組之參考依據。

Abstract

So far in the domestic solar cell modules industries, only two silicon-based solar cell companies and one thin film solar cell company have passed approval certificate of carbon footprint. In the concentrated photovoltaic modules, still no company or organization has started low carbon footprint development. In this study, we have assessed the carbon footprint of components and processes for concentrated photovoltaic modules. According to the hot points of carbon emission found in this assessment, we propose appropriate low carbon footprint processes and materials. We expect that this information can lead into the development of concentrated photovoltaic modules of low carbon footprint.

壹、計畫緣起與目的

有鑑於全球使用石油作為火力發電，排放出大量二氧化碳，產生許多溫室氣體，造成全球暖化，各國紛紛開始找尋發電過程不會有二氧化碳氣體排放的替代能源，例如核能、風力發電、太陽能發電等。其中太陽能發電雖然不會像火力發電在發電過程中直接產生溫室氣體的排放，但是在原料礦物的開採和提煉、運輸、製造、發電廠建築物建造、廢棄物處理等過程，不可避免地仍會產生溫室氣體。

碳足跡(Carbon Footprint)係指產品、服務或某事件在生命週期中，因人為活動(activity)而在全球釋放或累積的所有溫室氣體排放量。計算產品系統之碳足跡可藉由生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)技術進行，生命週期評估主要係評估產品在整個生命週期中對環境造成的影響及衝擊，包含製程前端的原料開採、處理、運輸，和後端的產品使用、再生利用、維護、回收，以及最終丟棄等過程。

所謂「產品系統」，不僅包括實體產品，亦包括服務系統。而需考量之環境衝擊通常包括資源使用、人體健康及生態影響等。生命週期評估的概念應用於環境管理上，可追溯至 1969 年，當時美國

可口可樂公司欲瞭解其飲料容器材質之能源損耗量，委託中西部研究所(Midwest Research Institute, MRI)進行評估。1973年起，由於美國省能及回收利用等環保意識的高漲，MRI、富蘭克林公司(Franklin Associates Ltd.)及美國環保署接續進行飲料容器與日常用品評估，進行資源及環境的剖面分析(profile analysis)。80年代起，美國能源部則開始分析各產業製程的能源流與物質流(Energy and Material Flows)，此即生命週期評估之前身。

自2008年以來，歐盟與美國倡議碳貿易限制，陸續表達將可能對進口商品課徵碳關稅或要求進口商購買碳產品排放權，以降低對本國商品因實施碳排放交易，造成之影響。根據美國 Brookhaven 國家實驗室以 Amonix 公司產品型號 7700PV 系統的探討為例，研究結果顯示，每千瓦建置容量將產生 2.227 噸之二氧化碳溫室氣體，每瓦約須課以 0.054 美元之碳稅，若以前述 2020 年之 1.20 USD/W 建置成本，碳稅約占 4%，此舉將影響各國綠能產業之發展布局。

本研究藉由生命週期評估技術，計算聚光型太陽電池接收器的碳足跡，了解產品在製程階段對環境的衝擊。尋找碳排放熱點，導入低碳足跡製程與材料，以作為開發低碳足跡聚光型太陽電池模組之參考依據。並藉由計畫執行過程，培育相關人才。

貳、研究方法與過程

一、研究方法

由於聚光型太陽電池模組涵蓋之零組件甚多，且製程複雜。因此本計畫將分為兩大部分進行，第一部分是依照生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)的方法，建立太陽電池接收器之製程地圖，並計算出各零組件與製程之碳足跡排放量，尋找排放量較大之衝擊熱點。第二部分是針對此衝擊熱點，在不影響原來效能之情形下，開發低碳排放量之新製程，並以其他低碳足跡之材料取代高碳足跡之材料。

碳足跡(Carbon Footprint)係指產品、服務或某事件在生命週期中，因人為活動(activity)而在全球釋放或累積的所有溫室氣體(Greenhouse Gas, GHG)排放量，亦稱為碳排放。產品碳足跡(Carbon Footprint of a Product, CFP)研究的目的，是在計算產品對全球暖化二氧化碳排放當量的潛在貢獻。碳足跡之計算則藉由生命週期評估技術進行。

生命週期評估為針對一產品系統的生命週期，即產品系統從自然資源取得到廢棄回收整個流程，評估其原物料投入、廢棄物產出

的過程中，對環境、社會等全面性的影響，圖 1 為生命週期的示意圖。根據 ISO 14040 指出，生命週期評估必須確定評估的目的以及邊界範圍確定生命週期，並進而針對生命週期進行盤查，接著評估分析各種不同的衝擊如環境、社會、經濟等，並闡釋其結果。

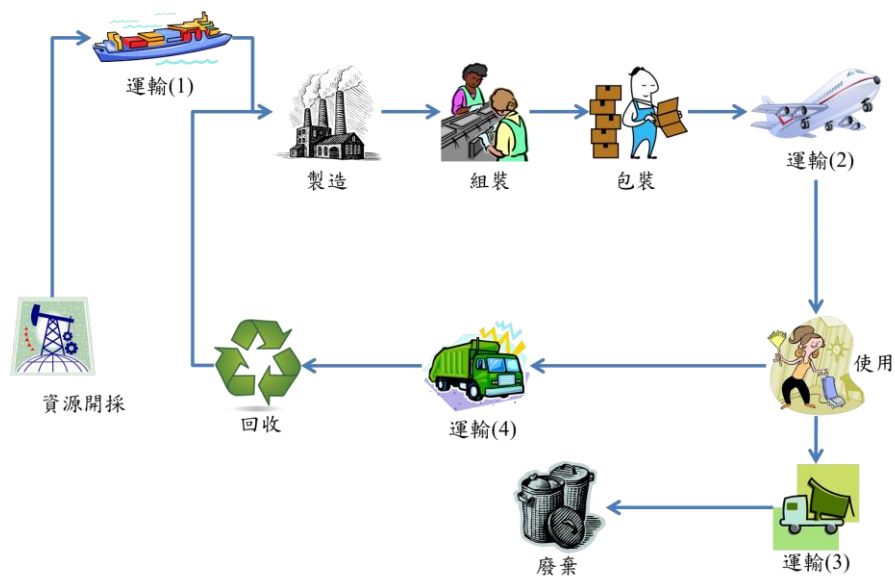


圖 1、生命週期示意圖

因此，盤查太陽能電池接收器，需要先確定接收器的製作流程，界定生命週期評估的系統邊界，才能針對接收器進行生命週期的盤查分析及衝擊分析。而在進行生命週期評估時，必須蒐集產品全面性能資源消耗等細節資料，事實上資料量與結構相當龐雜，有使用資料庫及生命週期評估軟體的必要。

根據《PAS 2050:2008 產品與服務生命週期階段之溫室氣體評

估標準》為依據，對產品的生命週期評估系統邊界的定義分為：

- B2C(Business-to-Consumer)

即 ISO/TS 14067 邊界定義的搖籃到墳墓(Cradle to Grave)，如圖 2 所示，評估內容從材料開採，經過製造、配銷及零售、到消費者使用，以及最終處置或是回收再利用的完整生命週期評估的溫室氣體排放和評估^[1]。

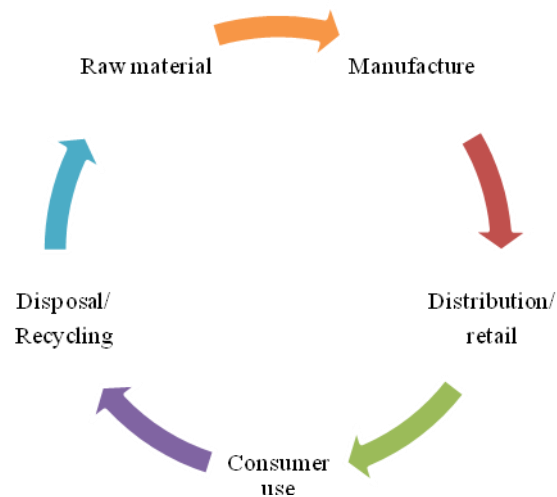


圖 2、B2C 製程地圖

- B2B(Business-to-Business)

即 ISO/TS 14067 邊界定義的搖籃到大門(Cradle to Gate)，如圖 3 所示。評估內容包括原料取得，經過生產直到產品到達一個新的組織，包括配銷和運輸到客戶所在地，但不包括額外的

生產步驟，最終的產品配銷、零售、消費者使用以及處理或是再生利用的生命週期評估^[1]。



圖 3、B2B 製程地圖

本研究針對太陽電池接收器的 LCA 分析的系統邊界為搖籃到大門(Cradle to Gate)的階段，從材料的開採、製程到接收器製作完成。依據生命週期評估的結果，瞭解太陽電池接收器之諸多使用材料，主要碳排放來源及未來可減少碳足跡的熱點，以達到減碳的目標。

二、使用之軟體

本研究使用的生命週期評估軟體為 GaBi 6.0，其特色在於整合產品上下游所有原物料、電力、運輸、或廢棄物處理之基礎流資訊，進而彙總而計算環境衝擊，並且自身約一千筆的製程數據，符合歐洲生命週期資料庫 (European Reference Life Cycle Database, ELCD) 的要求，數據具有較高的信賴度。圖 4 為 Gabi 的軟體介面。

除此之外，Gabi 在方法流程上，採用物質流進行生命週期評估，並就由圖像化的操作介面，可清楚的表示生命週期中原物料投入、中間產物轉移等過程，可便利地分析各製程溫室周期的排放，如圖 5 所示。此外 Gabi 與一般資料庫結構不同，其資料儲存利用巢狀式「表中有表」的三維資料庫結構，有別於二維資料如 Excel 試算表及 Access 表單，Gabi 更容易建立產品製程間的關聯性。

以圖 6 所示來說明此一巢狀結構，圖中關係: Table A 為 Table B 之原料，Table B 為 Table C 之原料，這種關聯性使三者形成 LCA 「表中有表」巢狀式資料庫結構^[1]。

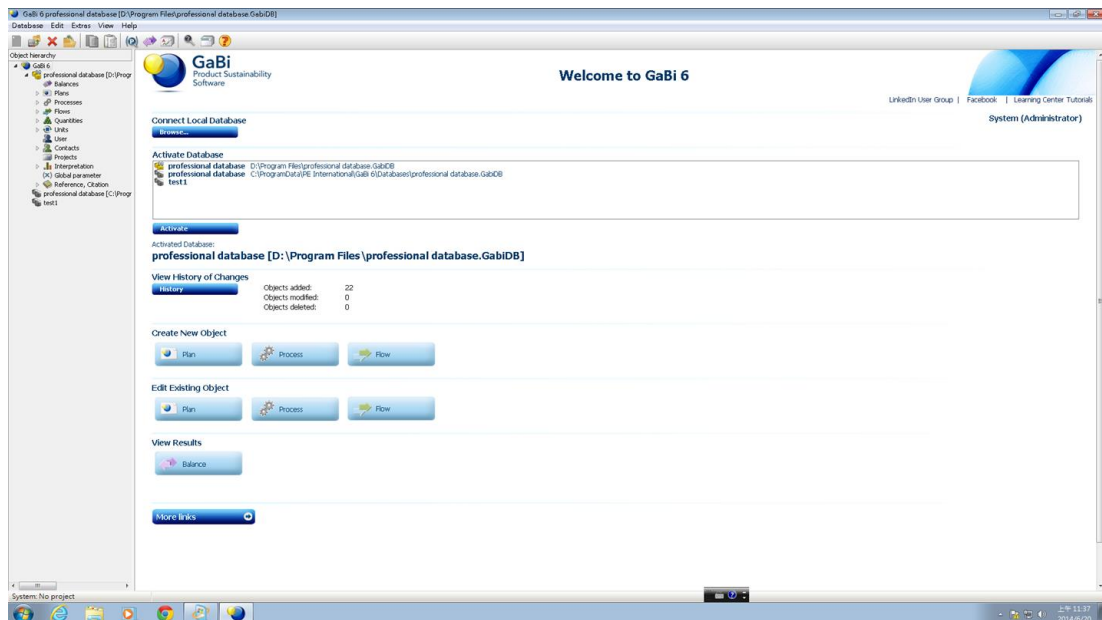


圖 4、Gabi 軟體介面

Receiver Process

GaBi process plan: Mass [kg]
The names of the basic processes are shown.

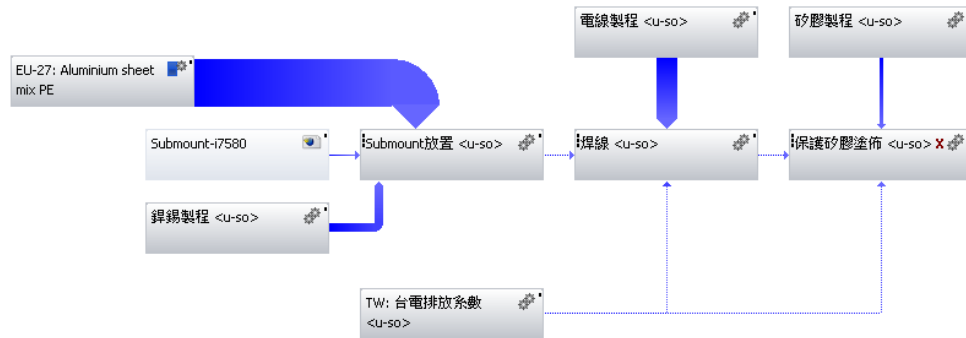


圖 5、以 Gabi 製作的接收器生命週期流程圖

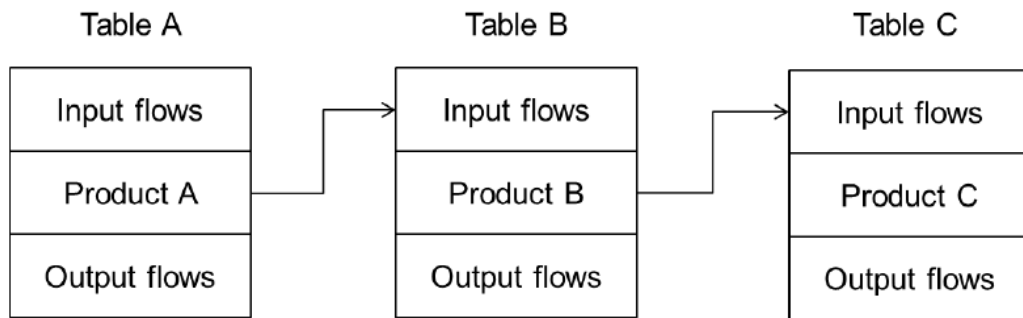


圖 6、Gabi 「表中有表」之資料庫型態示意圖^[1]

本研究需要看的是產品碳足跡，所以選擇 GWP 的規範做分析計算，因為全球暖化潛勢(Global Warming Potential)^[2]將不同溫室氣體影響程度轉換成相同當量，需要有標準轉換係數，GWP 分析是將六種溫室氣體中影響最大的二氧化碳氣體作為一個當量，其他的溫室氣體和二氧化碳氣體之間以係數來轉換，故呈現產品中每一個材料的二氧化碳氣體排放的長條圖，縱軸單位表示是以 kg-CO₂e (CO₂e, carbon dioxide equivalent)，如圖 7。

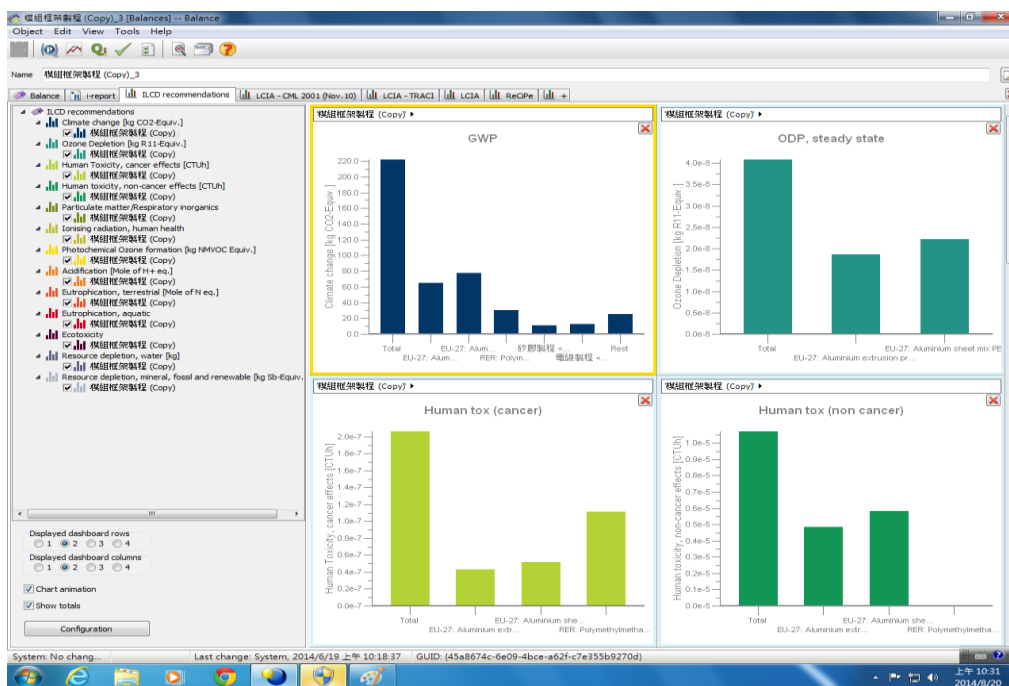


圖 7、依流程圖繪製計算結果分析，使用者視需求選擇適當規範分析產品碳足跡

三、文獻探討

矽晶太陽能電池為最廣泛使用的太陽能電池，其生命週期評估與碳足跡已被廣為探討，Alesma 在 2006 年針對不同的矽晶太陽能電池，進行生命週期評估，發現矽晶太陽能電池中的矽晶冶煉的碳足跡佔絕大部分的生命週期排放，而不同種類的矽晶太陽能電池中，單晶矽雖然擁有較高的能源轉換效率，但冶煉過程中的碳排放遠大於多晶矽的碳排放。若以每度電碳足跡評估，在日照強度每年每平方米 1700 度，使用年限三十年的條件下，多晶矽的碳足跡約為每度電 32g 等量二氧化碳排放，低於單晶矽的每度電 35g 等量二氧化碳排放。[3]

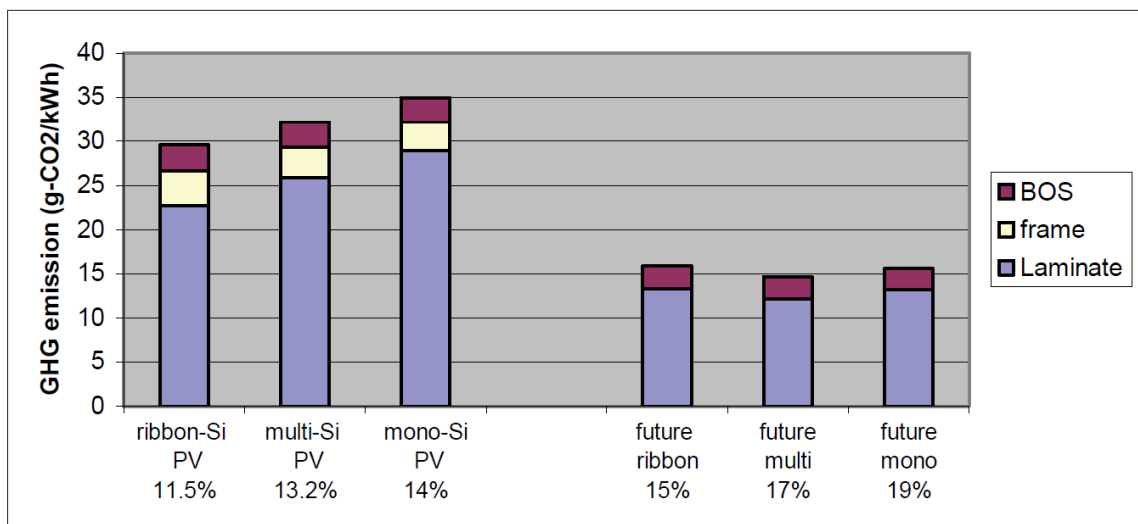


圖 8 不同矽基太陽能電池的碳足跡，各階段占總碳足跡的比例，以及未來移除框架、提高效率的碳足跡[3]

薄膜太陽能電池依照不同材料可分為非晶矽、CdTe 薄膜太陽能電池、CIGS 薄膜太陽能電池，其中 CIGS 的能源轉換效率遠較其餘兩者為高，但 CdTe 是目前量產最多的薄膜太陽能電池。根據 Fthenakis 於 2009 年的評估，在日照強度每年每平方米 1700 度，使用年限 30 年的條件下，CdTe 的每度電碳足跡可達 18g 的等量二氧化碳。[4]

另一方面，CIGS 薄膜太陽能電池理論能源轉換效率雖然高於 CdTe，但根據 de Wild-Scholten 等人的評估，CIGS 太陽能電池在太陽光照射強度 1700 kWh/yr/m^2 下，使用年限 30 年，碳排放為每度電 21 克的等量二氧化碳排放。[5]

2008 年 Kim 等針對不同的薄膜太陽能電池進行生命週期評估，非晶矽太陽能電池的能源轉換效率遠較其他種薄膜太陽能電池為低，每度電碳足跡最高可達 250 克等量二氧化碳排放，雖然依照不同製作條件下，非晶矽太陽能電池擁有最低的碳排放，但 CdTe 的整體碳足跡排放較非晶矽的為低。[4]

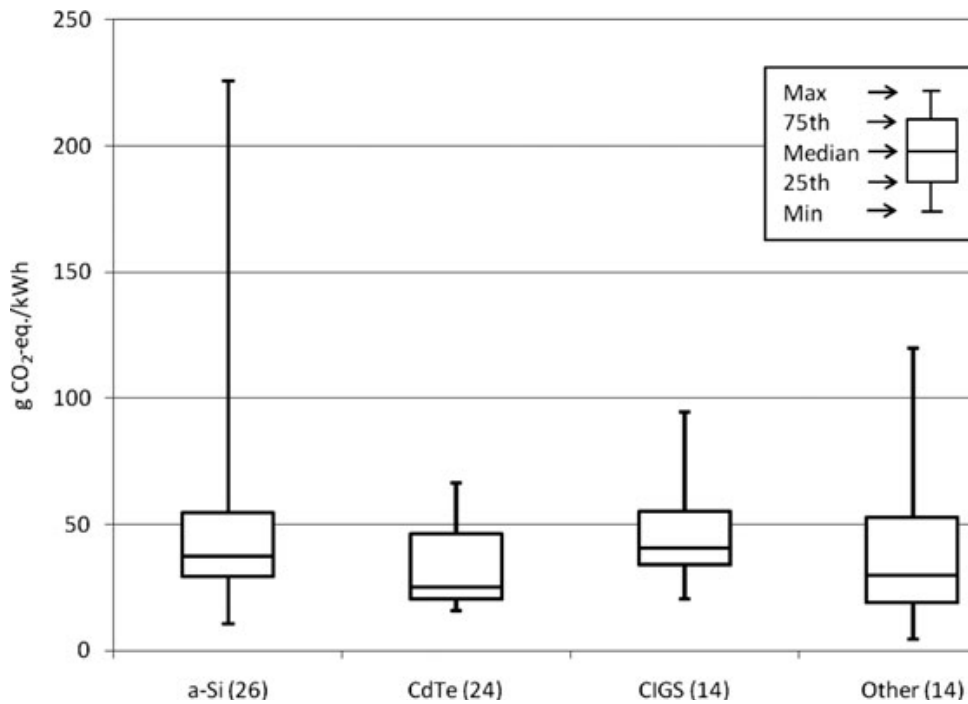


圖 9 不同薄膜太陽能電池之碳足跡之分析[4]

在高聚光太陽能電池的部分，Kim 等人[6]在 2011 年針對 Amonix 的高聚光太陽能電池系統進行完整的生命週期評估，從元件的製備、模組的製作、系統的建置、維護、廢棄等階段進行完整的評估。其條件設定在美國山區時間，太陽光照強度為每年每平方米 2600 度，使用壽命達 30 年，每度電碳足跡達到 26 克。佔碳足跡最大的部份的，是追蹤器的建置，其次是散熱基板，再其次是框架，這兩項製程使用大量的金屬，其中追蹤器與框架使用的鍍鋅鋼作為骨架，而散熱基板使用的是鋁。相對於矽晶太陽能電池，聚光型太陽能電池元件的碳排放佔整體的溫室氣體排放非常的低，與矽

晶太陽能電池有極大的不同。而歐洲的 Apollon Project 針對一系列高聚光太陽能電池在相同條件下進行比較，其中 Concentrix 的 Flatcon 技術的碳足跡低於每度電 20 克的等量二氧化碳排放，而 Amonix 約略為 32 克的等量二氧化碳排放。[7]

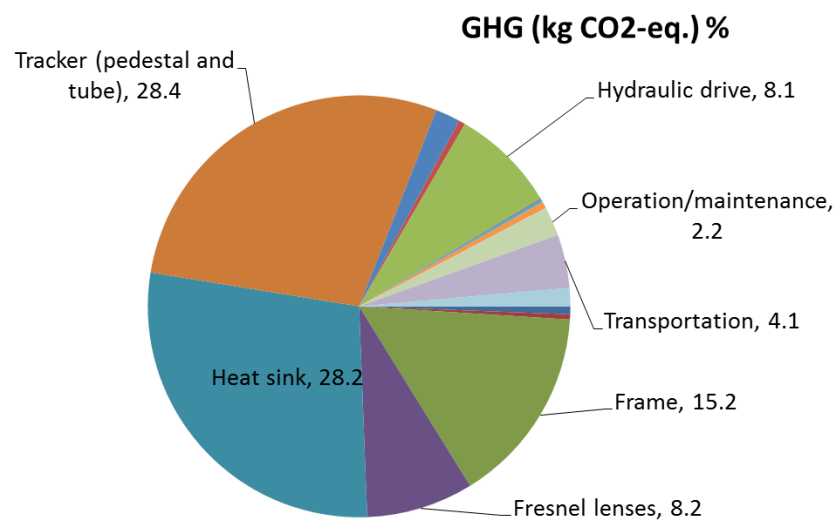


圖 10、PV 7700 生命週期裡各流程的碳排放比例，僅標示較大排放的流程。前三個分別是追蹤器、散熱基板、模組框架[6]

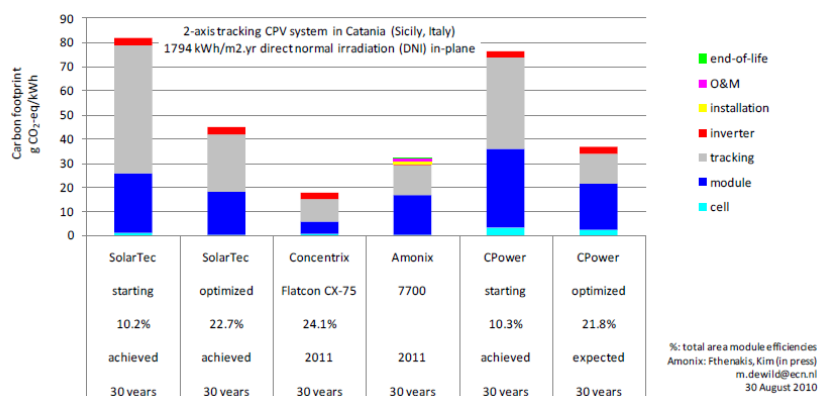


圖 11、各種不同聚光太陽能電池碳足跡比較[7]

參、主要發現與結論

一、評估結果

在生命週期評估中我們需要量化出產品的碳足跡，而計算產品碳足跡可依循的方式有下列三種：

(1) 排放係數法： $\text{CO}_2\text{e} = \text{溫室氣體活動數據} \times \text{排放係數} \times \text{GWP}$

(2) 建立模式法

(3) 質量平衡法

為了簡化計算，降低資料蒐集的困難度，本文計算排放量的方法是依據排放係數法。以表 1 的碳足跡作為範例來說明，

範例(1): 在活動數據上去實際量計打線機的使用功率為 0.6 kW，使用了一小時，而排放數據則引用台灣的排放係數 0.536 kg-CO₂/kWh，打線機的碳足跡為 0.6 kWh × 0.536 kg-CO₂/kWh = 4.02×10⁻²kg-CO₂e。

範例(2): 在焊錫的活動數據 0.35 克，焊錫排放係數 7.8496 kg-CO₂，焊錫碳足跡 0.35×10⁻³ kg × 7.85 kg-CO₂ = 2.75×10⁻³ kg-CO₂。

表 1 及圖 12 為 Submount 原料與製作的碳足跡分析結果。

表 1、Submount 的製作步驟的使用原料碳排放量

	重量(g)	排放係數 ^[8] (kgCO ₂)	GHG(kgCO ₂)
陶瓷基板	0.6	0.468	2.808×10^{-4}
錫	0.35	7.8496	2.74736×10^{-3}
矽膠	0.3	22.3	6.69×10^{-3}
旁路二極體	0.3	0.026	7.8×10^{-6}
太陽電池晶片	1 片	0.0177 [9]	1.77×10^{-2}
	使用功率 (kW)	排放係數 ^[10] (kgCO ₂ /度)	使用一度電
打線機	0.6	0.536	4.02×10^{-2}
焊接台	0.11	0.536	7.37×10^{-3}
1 個 submount			7.499596×10^{-2}

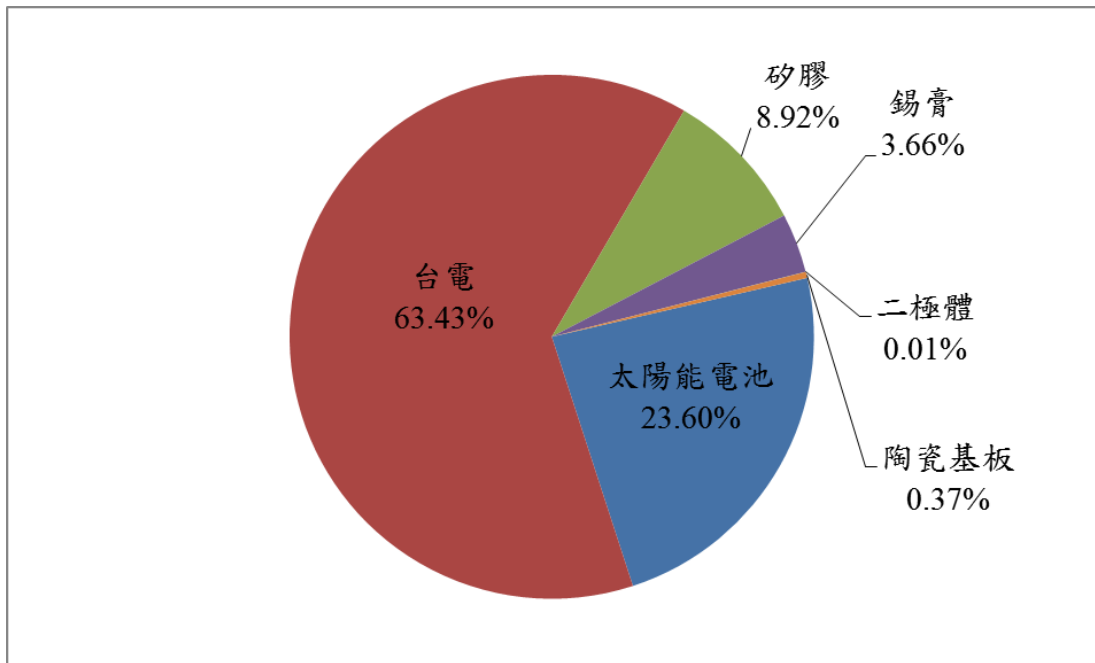


圖 12 額定輸出功率 140W 發電量模組，接收器內 Submount 之碳足跡分布比例

圖 13 為額定輸出功率 140W 發電量聚光型太陽電池模組，其太陽電池接收器之照片。圖 14 是太陽電池接收器各零組件與製程之碳排放量分布比例圖，由圖 14 可以觀察到太陽電池接收器碳排放熱點是散熱鋁板與鋁質遮板，其次是導線，再其次是錫膏與製作太陽電池接收器過程中所使用之電力。

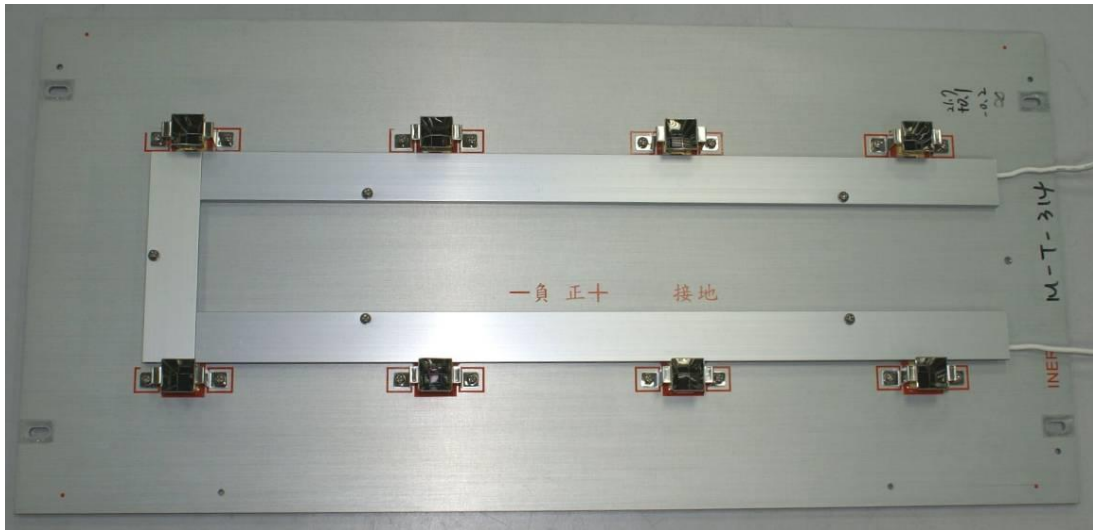


圖 13、聚光型太陽電池接收器照片

表 2 為一個接收器所需材料的碳排放的數據，電力使用所排放的二氧化碳量根據台電統計的資料，接收器的散熱板以鋁擠型的方式製作，所以在這部分的碳足跡以鋁材料占最大比重。一個接受器的碳排放量 19.2 公斤。在接受器的製程中，因為散熱的需要使用鋁擠型鋁板，在製作鋁板的製程中產生了許多二氧化碳的排放，從圖 14 在整個接受器的碳足跡中鋁材料就占 57% (碳排放量 11.2 公斤)，其次的是和太陽電池元件連接成電路的導線，占了 13% (碳排放量 2.6 公斤)。

將接受器與 Submount 結合在一起，每單位 Submount 的碳排放為 0.075 公斤等量二氧化碳排放，每單片接受器需要 8 個 Submount，總碳排放量為 0.6 公斤，而每單片接受器的碳排放為

19.2 公斤，即 Submount 的碳排放僅佔整個接受器的 3%左右，因此太陽能電池的碳足跡排放相對於整個接受器的重要性非常的小。而鋁所佔的碳足跡比例最大。

表 2、接受器使用原料的碳排放量

材料	碳排放量(kg)
鋁	11.2
矽膠	2.23
電線	2.6
電力	1.6
錫膏	1.57
總計	19.2

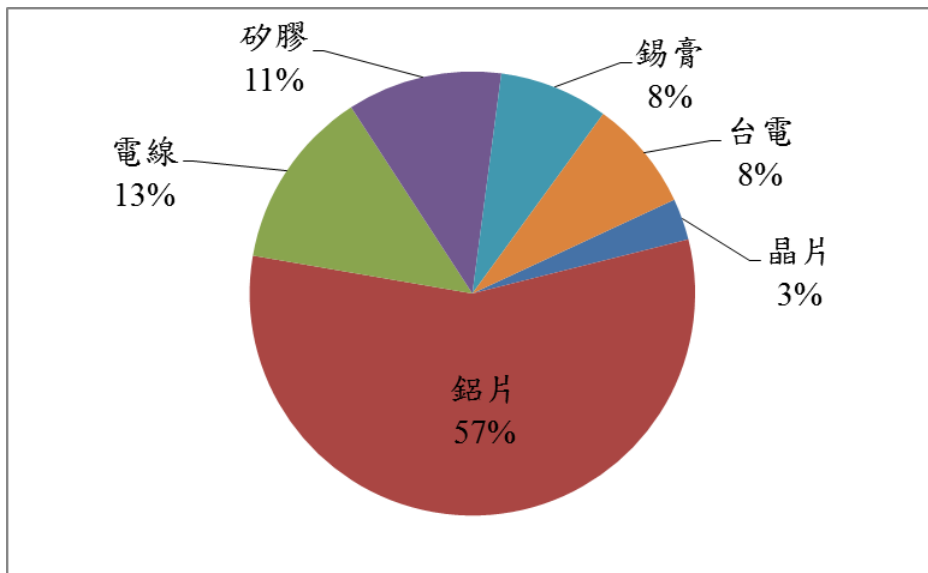


圖 14、額輸出功率 140W 發電量模組，接收器各零組件之碳足跡分布比例

二、結論

由於鋁板在整個接收器的碳足跡排放高達 58%，而其主要是作為散熱基板使用，有必要找到取代鋁的材料，但鋁具有優異的機械強度、良好的熱傳導特性，容易加工等特性。若採用鍍鋅鋼板或者不鏽鋼板取代，降低了碳足跡，但增加了重量。而依 G. Peharz [11] 與 M. de Wild-Scholten [7] 的兩篇文獻內容，Fraunhofer 的 Flatcon 模組技術低碳足跡的特性，其原因為以玻璃作為接受器的基板，而玻璃的每公斤碳足跡遠較鋁為少，因此建議以玻璃取代鋁質材料以降低太陽電池之碳足跡，如圖 15 所示。唯玻璃與金屬散熱片密合過程，由於兩者熱膨脹係數不同，將導致接合界面產生裂縫，進而降低接合效果。欲提昇接合效果，需於金屬表面形成一層氧化層，以補償不同材料間熱膨脹係數之差異，同時可以提升兩種材料表面濕潤性。因此，如何形成一均勻致密，厚度適當的界面層，將是玻璃與金屬接合技術之關鍵步驟，可做為未來之研究方向。

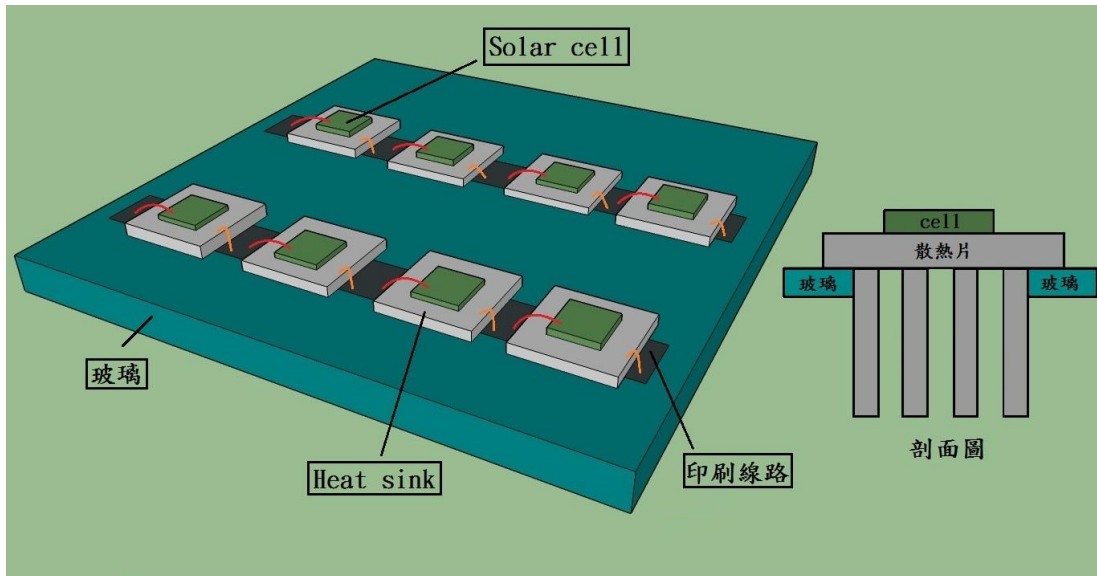


圖 15、接受器散熱結構示意圖

肆、參考文獻

- [1] GaBi 6.0 版生命週期評估軟體介紹。
- [2] 陳巾眉編譯,什麼是二氧化碳當量(CO₂e)與全球溫暖化潛勢(GWP),環境資訊中心,2011, <https://e-info.org.tw/node/67588>。
- [3] E. A. Alsema, “Environmental Impacts of Photovoltaic (PV) Electricity: A Critical Comparison of Energy Supply Options”, European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006
- [4] H. C. Kim, *et al.* “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Thin-film Photovoltaic Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization”, *Journal of Industrial Ecology*, 16, S110-S120 (2011)
- [5] M. de Wild-Scholten, “MJ. Energy payback times of PV modules and systems.” Workshop Photovoltaik-Modultechnik Köln, 26–27 November 2009.
- [6] V. M. Fthenakis, *et al.* “Life cycle assessment of high-concentration photovoltaic systems”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 21, 379–388 (2013)
- [7] M. de Wild-Scholten, *et al.* “Environmental Sustainability of

Concentrator PV Systems: Preliminary LCA Results of the Apollon Project”, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 6-10 September 2010,

[8] 經濟部工業局「製造業產品碳足跡輔導與推廣」專案計畫，2012。

[9] H. C. Kim, *et al.* “LIFE CYCLE ANALYSIS OF TWO NEW CONCENTRATOR PV SYSTEMS,” 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 1-5 September 2008, Valencia , Spain

[10] 2011 年台灣地區平均每度電的二氧化碳排放量。

[11] G. Peharz, *et al.* “Energy Payback Time of the High-concentration PV System FLATCON”, *Prog. Photovolt. : Res. Appl.* 13, 627–634 (2005)