

廢棄太陽能板資源化策略評析

張御萱、陳家榮

壹、前言

隨著科技演進發展至今，人類大量使用化石燃料導致氣候變遷，近年來因應全球綠色環保意識抬頭，各國能源部門轉向低碳能源，使得再生能源在氣候變遷議題中扮演關鍵性的角色，而太陽光電成為最具前景的再生能源。在國際間推行太陽光電已行之有年，根據 REN21(2018)報告書指出，全球太陽能累積裝置容量大幅提升，如圖 1 所示，至 2017 年已達到約 402 GW，比 2016 年增長 29%，主要是因為發展中國家的電力需求增加；而近年來我國政府對於太陽光電安裝、興建也不遺餘力，在再生能源政策上以「躉購費率制度(Feed-in-Tariff)」計價方式補貼民間投資及建設，我國政府 2016 年所提出之「新能源政策」，2025 年太陽光電目標裝置容量要達 20GW，可望帶動整個台灣的太陽光電產業蓬勃發展。2017 年 1 月，政府通過「電業法修正草案」，推動「綠電先行」以鼓勵再生能源發展，使得未來太陽能市場需求量勢必劇增，然而在大規模安裝太陽能板的同時，未來也將產生大量的太陽能板廢棄物，這些廢棄的太陽能板將面臨新的環境挑戰，但同時也造就了前所未有的價值和創造新經濟的機會。因此，本文考量到環境影響和資源效率應用，探討太陽能板廢棄物新的經濟管理方式，從廢棄太陽能板成分組成、太陽能板廢棄物處理途徑以及各國太陽能板回收經驗進行說明，最後再針對台灣太陽光電永續發展給予建議。

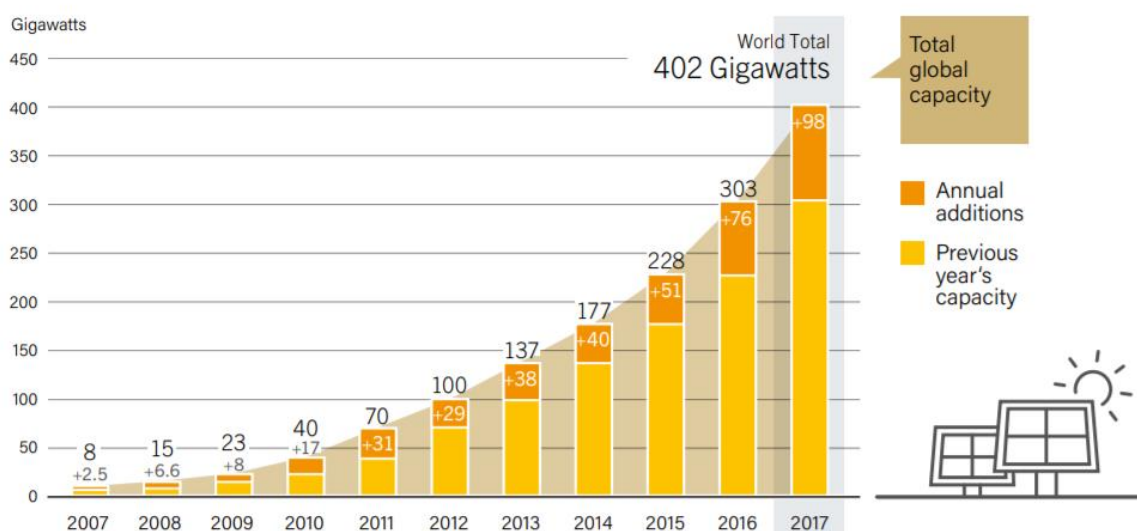


圖 1. 全球太陽光電累積裝置容量 (2007~2017 年)

資料來源：REN21 (2018), Renewables 2018 Global Status Report.

貳、太陽能板廢棄物處理途徑

根據張御萱(2018)研究結果得知，台灣 2020 年太陽能板廢棄量將累積達 2,658 公噸；2030 年太陽能板廢棄量將累積達 24,389 萬公噸；2050 年太陽能板廢棄量將累積達 865,190 公噸。未來長期廢棄量將趨近於恆定約為 5 萬公噸左右，因此如何妥善處理廢棄太陽能板已是未來極為迫切問題。太陽能板可分為結晶矽太陽能板以及薄膜太陽能板，根據 ISE(2018)統計 2017 年市占率分別為 95%及 5%，這些太陽能板中包含數十種價值元素，如表 1 所示，其中最大宗的太陽能板為「結晶矽太陽能板」，標準化的結晶矽太陽能板主要成分約 74%的玻璃、11%的聚合物(EVA)、10%的鋁框、3%的矽、2%的其他金屬。薄膜太陽能板又可分為「碲化鎘太陽能板」、「CIGS 太陽能板」、「非晶矽太陽能板」，碲化鎘太陽能板主要成分為玻璃約 95%、EVA 約 3.5%、其餘成分約 1.5%；CIGS 太陽能板主要成分由 84%的玻璃組成、12%的鋁、4%的其他材料。針對不同類型的太陽能板，其製造加工程序之差別，應考慮到太陽能板的組成及不同程度的有害物質。

為此，本文整理出完整的太陽能板資源再生步驟如圖 2，首先將太陽能板中的接線盒和鋁框以物理性的機械式拆解，若為未破裂太陽能板則先進行熱處理，將 EVA 進行燃燒分離出玻璃，其矽晶種類透過連續電解萃取法(Sequential Electrowinning)與濕式蝕刻(Wet Etching)進行回收；其薄膜種類透過噴砂處理(Sandblasting)分離半導體。若為已破裂太陽能板則以破碎、錘碎處理，接著進行濕式機械攪拌處理(Wet-mechanical Treatment)，透過浮選機(Floating Machine)將不同材料比重差異的性質分離出玻璃，最後透過電解法或是浸漬處理回收其他金屬。經計算 2020 年累積資源化產值約為 5 千萬元、2030 年累積資源化產值約為 5 億元、2050 年累積資源化產值約為 180 億元，因此，考量到資源再生經濟效益面，若能採用目前國際上太陽能板回收相關技術，能夠妥善地運用這些既有資源，不僅能創造龐大的廢棄太陽能板資源化產值，也能大大降低對環境的衝擊，對於靜脈產業也能帶來相當的就業機會。

表 1. 太陽能板中價值材料分類

種類		關鍵元素	有害物質	其他材料
矽晶	結晶矽	銀	鉛	玻璃、鋁、EVA、銅、錫、鋅、矽
	碲化鎘	碲、鎘	鎘	玻璃、鋁、EVA、銅、鋅
薄膜	CIGS	鎳、銻、硒	硒、鎘、鉛	玻璃、鋁、EVA、銅、鋅
	非晶矽	鎳、銻	-	玻璃、鋁、EVA、銅、錫、矽

資料來源：Weckend et al. (2016)；本研究整理。

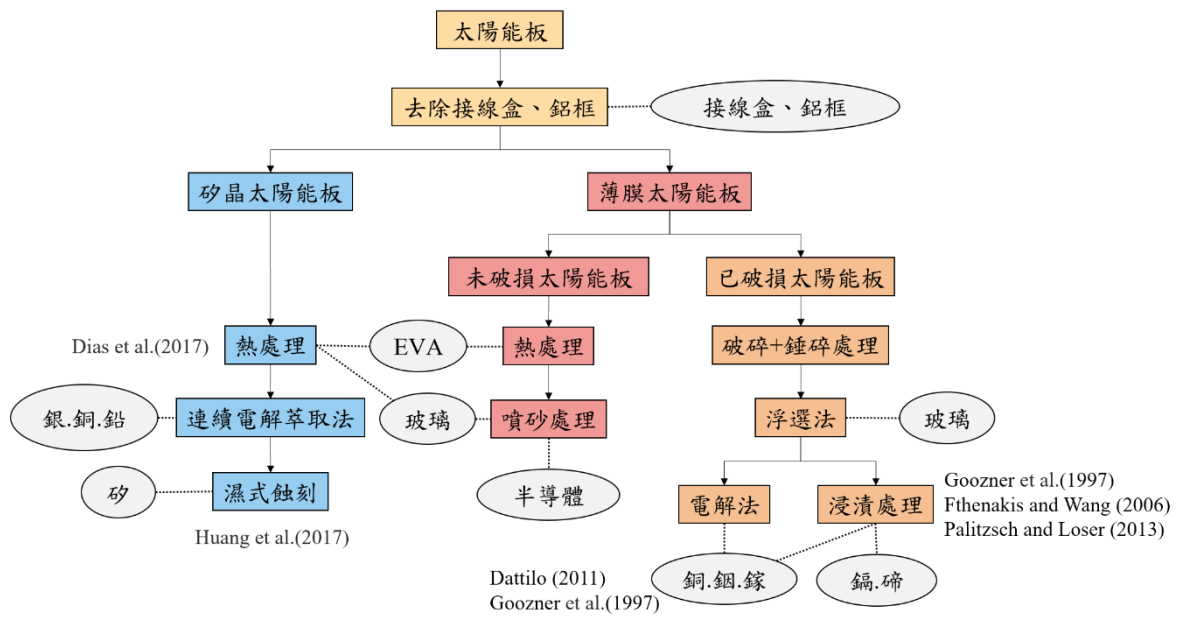


圖 2. 各種類太陽能板的回收步驟及回收產物

資料來源：Dias et al.(2017)；Huang et al.(2017)；Dattilo (2011)；Goozner et al.(1997)；Fthenakis and Wang (2006)；Palitzsch and Loser (2013)；本研究整理。

參、各國太陽能板回收經驗與挑戰

目前對於廢棄太陽能板進行法律約束的國家僅有「德國」，於 2012 年歐盟修訂 WEEE 指令(2012/19/EU)將「太陽能板」列入管制範圍，其中德國政府於 2015 年將歐盟 WEEE 指令轉換修訂為國內法規「德國電子電器設備法令」，強制要求太陽能板製造商需透過「EAR 基金會」(Stiftung Elektro-Altgerate Register)進行管制，以確保廢棄太陽能板之處理流向。同樣針對太陽能板具有相當約束力為歐盟提出的兩項指令，「RoHS 指令」及「ErP 指令」明確訂下管制方式與實施目標，為符合 RoHS 指令規範之要求，太陽光電在前端設計開發上，須考慮到各項零組件的選擇是否符合不含有害物質的限制，要求使用安全替代材料代替重金屬物質，其中太陽能板中的半導體若為硫化鎘，必須向歐洲化學品管理署(European Chemicals Agency, ECHA)進行申報處理。在 ErP 指令中要求太陽能板在設計階段必須採用易回收再利用的材料，以達到環境友善之原則；在末端處理方面，為促進廢棄太陽能板的再利用及回收，生產者需滿足 ErP 指令限制之最小回收目標且必須承擔回收處理費，以降低環境衝擊並改善整個生命週期的環境績效。綜觀前述國家法規與指令，主要是希望台灣能針對國情與現有的法規而有相對應的太陽能板廢棄物管理方式，廢棄物管理從最初的「管末處理」，逐漸走向「源頭控管」，演變至今兩者結合成為「循環經濟」，製造商在生產太陽能板的階段，若能將廢棄物處理方式納入產品設計，可學習歐盟「ErP 指令」，在製造過程

中導入環保理念，間接達到儲備稀有資源的可能性，並根據歐盟「RoHS 指令」管理限制太陽能板中的危害性物質，若不當處理有害物質將造成嚴重的環境汙染，未來將產生更大的環境成本。

因應各國為數可觀的太陽能板廢棄物，PV Cycle 是歐盟專門處理廢棄太陽能板回收的機構，其宗旨是「擴大生產者責任」(Extended Producer Responsibility, EPR)，不僅會要求生產者在設計階段應落實環保責任的設計，也要求生產者必須負起回收處理責任。PV Cycle 制定兩種回收管理途徑，對於每次處理量超過 40 片的太陽能板，屬大型的廢棄太陽能板回收之管道，將數量大的太陽能板統一送至回收處理廠進行分類，透過規模經濟的優越性使得回收成本下降；對於每次處理量少於 40 片的太陽能板，屬小型的廢棄太陽能板回收之管道，如從住宅屋頂拆除、太陽能電池中個別損壞的太陽能板，將送至各地區設置的廢棄太陽能板指定回收箱，當一定數量時再運送至回收處理廠進行分類。目前僅德國及日本與 PV Cycle 進行合作，德國進行廢棄太陽能板回收已長達十年，日本則是去年在九州地區完成示範工程，然而，隨著台灣太陽能內需市場規模擴大，我國不僅未針對太陽能板末端處理進行法令管制，靜脈產業對於廢棄太陽能板處置也未具備相關成熟的回收技術，因此，我國是否能跟隨各國腳步改變以往對於廢棄物的管理思維，應著眼於太陽光電產業永續發展因應對策及相關配套措施，以降低太陽能板廢棄物對環境的衝擊，值得我們進一步深思。

肆、我國太陽能板永續發展策略

廢棄太陽能板管理計畫應適用每個國家或地區的獨特性，透過前述各國的經驗顯示，台灣應訂定長期的政策方向，為避免政府大力推廣太陽光電產業的同時，卻造成未來產品廢棄後的環境負擔，以預防性的角度，政府應儘速處理廢棄太陽能板的問題，本文針對廢棄的太陽能板研擬一套退場機制，將依序探討廢棄太陽能板的相關回收法令配套、釐清廢棄太陽能板相關回收責任歸屬及相關回收處理費，為此緩解未來可預期的龐大太陽能板廢棄物。

由於目前台灣法規並無明文規定太陽能板製造商必須負責回收，長期下來將造成大規模廢棄太陽能板無專責處理機構，因此，若能夠針對台灣現有的廢棄物管理法規，將「太陽光電類廢棄物」納入管理範疇，往後便可遵循現有的相關法令進行管理，建議廢棄物清理法公告太陽能板之「應回收廢棄物之代碼」，增設有關太陽能板資源回收清理制度，且將太陽能板分為「太陽光電之不良品」及「廢棄役太陽能板」兩種類型進行回收處理，前者可透過再利用的方式，將這些廢棄物料回到太陽光電生產源頭重新製造；後者透過「環境保護署回收基管會」管理運作，以逆物流的方式回收至業者身上，並由製造商或進口商預繳回收處理費，以利後續回收與清除處理，這將確保太陽能板廢棄物最後的處理流向，不僅有效提升資源利用效率，也可透過循環的方式將錯置的資源創造最高的價值。

考量到台灣未來大量的太陽能板廢棄物處理方式，本文認為政府應實施相關配套，運作模式可分為家庭住宅用戶以及大型發電站系統商，若為私人住宅用戶統一交由環保署的縣市政府清潔隊進行回收處理；而系統商則直接交由工業局進行回收，其中可建立「綠色電子標籤」或是「模組序號」來確認製造商之責任歸屬，使得這些廢棄太陽能板能遵循此處理體系。往後若不立即運作回收機制，太陽能板廢棄量將會非常驚人，應借鑒日本興建基礎回收示範廠，待累積廢棄量達一定規模經濟後，再廣設有能力處理廢棄太陽能板的處理機構。

經由前述了解到太陽能板回收之急迫性，然而進行回收處理是否有利可圖，需考量到廢棄太陽能板回收再利用的成本效益分析，透過相關文獻得知目前市占率最高的矽晶太陽能板回收利潤仍無法超越回收成本。因此若要進行回收處理，應建立「徵收回收處理費」的機制方能迫使自主回收處理，且考慮針對不同種類的太陽能板其組成成份不同，其回收處理方式也不同，相對應之成本效益也不盡相同，應擬訂不同的回收處理費，它最主要的作用是透過回收處理費誘導整個太陽能市場朝向容易回收的方向發展，有助於未來回收處理技術提升。然而，隨著往後太陽能板回收技術提升，使得回收成本開始下降，應給予適當的調整處理費用，主要是希望透過市場的機制使得廢棄太陽能板回收再利用是可行的。

伍、結論與建議

綜觀台灣現有的廢棄物處理制度，政府應要求製造商「延伸生產者責任」，考量製造生產耐久性或可回收性之太陽能板，在太陽能板設計開發時，應走向簡單化或標準化設計，採用同一規格的零件或安裝方式，不僅在製程上能快速增加產能，對於靜脈產業回收處理可使用簡易快速的方式辨認分類，以增加回收利用之效果；應以易維修之出發點設計，對於服務商可減少多餘的人力成本以及維修的難度；應考量到環境化設計，當太陽能板壽命結束時，可透過其他資源再生形式回收再利用，進而減少這些廢棄物最終棄置；應考慮到耐用性的問題，除了避免廢棄物產生，將有助於落實資源使用效能，經由太陽能板翻新、檢修等方式，可將太陽能板銷售至二手市場獲得利益。對於汙染控制政府應設立相關法規，規範製造商使用無毒材料取代有害物質，或是逐年規範禁止使用有害物質，對於廢棄太陽能板應訂定最小回收率之目標，並建立綠色電子標籤使靜脈產業得以確認製造商的責任歸屬。

然而，台灣目前回收基金制度的盲點在於製造商繳納回收基金後，認為延伸生產者的責任已盡，因此無法更加積極的投入生態化設計的角色，應借鑒於日本太陽能板回收相關經驗，除了政府與產業間有良好的配合，政府發揮了很大的作用，不僅興建地區性的基礎回收示範場，對於靜脈產業提供輔導回收技術以及設施補助，對於動脈產業要求無毒化生產，設計易維修、易拆解及標準化的太陽能板，以提高資源循環再利用的機會，並透過電子標籤追蹤太陽能板流向，將整個動脈與靜脈產業串連，建立

整個太陽能板循環回收體系。因此，針對台灣太陽能板廢棄物回收處理，政府除了應針對不同類型的太陽能板，向製造商徵收不同的回收處理費，且提供階段性的補貼以降低對產業的傷害，政府更應該扭轉過去末端管理的思考模式，建構業者搖籃到搖籃(C2C)的綠色思維，將動脈與靜脈產業做密切結合，透過廢棄物資源化將廢棄太陽能板以最大限度創造其價值，方可帶動台灣太陽能產業與靜脈產業新經濟的成長動能。

參考文獻

1. PV Cycle 網站 www.pvcycle.org/
2. ISE. (2018), PHOTOVOLTAICS REPORT
3. BIO (2011), Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive.Final Report, ENV.
4. Dattilo, M. (2011), CI (G) S PV modules: recycling technology status. Paper presented at the 2nd International Conference on PV Module Recycling.
5. Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., & Veit, H. (2017), Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management*, 60, 716-722.
6. Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., Veit, H., & Bernardes, A. M. (2016), Recycling WEEE: extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste management*, 57, 220-225.
7. Fthenakis, V. M., & Wang, W. (2006), Extraction and separation of Cd and Te from cadmium telluride photovoltaic manufacturing scrap. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*,14(4), 363-371.
8. Goozner, R. E., Drinkard, W., Long, M., & Byrd, C. (1997), A process to recycle thin film PV materials. Paper presented at the Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE.
9. Huang, W. H., Shin, W. J., Wang, L., Sun, W. C., & Tao, M. (2017), Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. *Solar Energy*, 144, 22-31.
10. Palitzsch, W., & Loser, U. (2013), Systematic photovoltaic waste recycling. *Green*, 3(1), 79-82.
11. REN21 (2018), Renewables 2018 Global Status Report.

12. Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. (2016), End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels , 1-100.
13. 財團法人中技社(2012), 永續資源管理政策白皮書, 專題報告:2012-06。
14. 財團法人中技社(2015), 太陽光電技術發展趨勢探討, 專題報告:2015-02。
15. 財團法人中技社(2015), 太陽光電技術發展趨勢探討, 專題報告:2015-02。
16. 財團法人中技社(2015), 循環經濟的發展趨勢與關鍵議題, 專題報告:2015-06。
17. 財團法人中技社(2015), 循環經濟的發展趨勢與關鍵議題, 專題報告:2015-06。
18. 張御萱(2018), 台灣太陽能板廢棄量與回收機制探討, 國立成功大學資源工程學系碩士論文。
19. 經濟部能源局(2016), 2016 年能源產業技術白皮書。
20. 經濟部能源局(2016), 2016 年統計年報。
21. 經濟部能源局(2017), 電業法條文修正草案。