

廢太陽光電板回收處理方式探討

本篇文章由台灣經濟研究院研究所 呂凱尼助理研究員提供

目前太陽能產業生產技術以矽晶體(c-Si) 為主，該技術覆蓋了 90% 以上的市場。現今有兩種主要應用的競爭技術：碲化鎘 (CdTe) 和硒化銅銦鎵 (CIGS)，其不同矽晶體設備，CdTe 和 CIGS 皆使用薄膜技術，優點在於輕薄、製造成本低，易於實現大規模生產、設置等目標。電池材料通常直接設置於結構基板上，且大多數為玻璃材質。除了一般電池材料外，太陽能模組還包含許多其他物質，其中包含一些難以回收的成份。

大部分太陽能板使用保護性玻璃蓋板，或於多數薄膜模組的情況下，直接置於在玻璃之上，並使用鋁製框架將模組固定在一起，以利維持其結構的完整性。其中，玻璃及鋁框材料皆較容易回收，將其從太陽能板模組中分離出來，並在適當的情況下處理，就可回流至現有的回收系統內。另外，模組通常使用的其他材料亦包含用於收集電力的金屬線、互連焊料等，以及用於將模組固定在一起，並提供天氣防護的耐磨(聚合物)背板和透明(聚合物)密封劑。

因太陽能板於生產製造時，為強化其產品耐用性，皆以材料等將其完整封裝，故一般普遍的太陽能板回收處理方式以物理破碎為主，將模組的鋁製外框、接線盒、電線等拔除後，讓面板未經分層處理而直接進行粉碎，並送至掩埋場掩埋或焚化爐處置。然而，近年發現環境中的微量塑膠物質已造成影響，透過廢棄掩埋的方式可能導致環境受到破壞，另一方面，將其送至焚化爐燃燒的作法則會產生溫室氣體，顯示以物理破碎處置廢太陽能板，並非友善環境的最佳回收處理方法。

因此各國為妥善回收處理廢太陽能板中的有毒物質，後續已發展化學處理或熱處理等方式，欲將太陽能模組進行分層回收處理，溶(熱)解 EVA 封裝材料等無法回收再利用之材質。上述兩種處理方式皆欲完整分離玻璃等可再利用物質，詳細方法依照各處理機構而有所差異，且部分技術的經濟效益有待評估，主要目的欲精進廢棄物資源化的應用、避免有害物質汙染環境、處理大量廢棄物等。

為提供更高價值和更可回收利用的技術相當複雜，通常用於特定類型和結構的太陽能板，並且需要使用危險的化學物質進行處理，如氫氟酸。儘管矽回收的價格較高，但額外的成本、安全性、複雜性可解釋為何這些技術尚未獲得妥善的工業應用。大多數技術無法完整從太陽能板中萃取的矽與冶金級材料，因此未來新太陽能板的製造需要仍進一步精進，以利處理回收與友善環境。

附表、各類型太陽能模組的回收處理摘要

過程	模組類型	處理場規模	回收材料
現行玻璃處理方式： 物理破碎	所有類型	全面運作、工業規模	鋁、銅、玻璃(含雜質)
Veolia: 破碎和機械分離	晶矽型	全面運作、工業規模	玻璃、鋁、銅、銀、 矽(冶金級)
FRELP: 熱機械分離、粉碎、熱解、化學	晶矽型	試驗	玻璃、鋁、銅、銀、 矽(冶金級)
涉及聚合物熱解或化學溶解的處理、模塊分離、矽片的化學加工	晶矽型	實驗規模且可達工業規模(停止)	玻璃、鋁、銅、銀、 矽(冶金級、太陽能級)
First Solar: 粉碎、化學溶解、篩選、材料的化學回收	CdTe	全面運作、工業規模	玻璃、銅、鎘、碲、 鋅/錫/其他半導體元件
Drinkard Metalox: 粉碎、化學溶解、玻璃過濾、電解冶金等	CdTe	試驗(停止)	玻璃、銅、鎘、碲
ANTEC Solar: 粉碎、熱解、高溫氣反應、蒸發、金屬氯化物的回收	CdTe	試驗(停止)	玻璃、銅、鎘、碲
Umicore: 非特定的濕法冶金技術	CIGS	全面運作、工業規模	銅、銮、鎳、硒
Drinkard Metalox: 破碎、化學溶解、玻璃過濾、滲濾液的電解沉積和蒸發、二氧化硒的蒸餾	CIGS	實驗規模	玻璃、銅、銮、鎳、 硒、鎘
透過密封劑的熱軟化使模組分層、機械刮除吸收材料、化學去	CIGS	實驗規模	玻璃、銅、銮、鎳、 硒、鎘、鉬

過程	模組類型	處理場規模	回收材料
除鉬			
模組分層、次序電解精煉	CIGS	實驗規模	玻璃、銅、銦、鎵、 硒、鎘
硒的熱分離、金屬氯化物的氯化 and 蒸發	CIGS	實驗規模	玻璃、銅、銦、鎵、 硒、鎘
模組破碎、聚合物的熱解、使用濕式機械或真空噴砂技術、浮選和篩分以分離顆粒	CIGS、CdTe	實驗規模	玻璃、銅、銦、鎵、 硒、鎘、碲、其他金屬
Photolife：粉碎、透過篩分將顆粒分離成三個部分、聚合物的熱燃燒或化學去除、篩分分離材料，以及用於回收金屬的鹼性或氧化酸性化學技術	所有類型	實驗規模	玻璃、銅、銦、鎵、 硒、鎘、碲、 銀、其他金屬、矽(冶金級)

參考文獻

- Isherwood, P. J. (2022). Reshaping the Module: The Path to Comprehensive Photovoltaic Panel Recycling. Sustainability, 14(3), 1676. Renewable Energy Capacity Statistics 2022