

廢棄太陽能模組的貴金屬銀回收方案

周韋伶 / 優勝奈米科技研究員
葉加伶 / 明志科技大學化工系
何享穎 / 優勝奈米科技技術長
許景翔 / 優勝奈米科技董事長

面對太陽能模組廢棄數量增長的趨勢，以及減少採礦對環境的破壞，本文整合出一套太陽能模組的前處理、剝銀、還原與純化的濕式銀提取製程，可進一步將太陽能矽粉銀含量富集，配合 AgST-350 無氰化學剝銀劑提高銀提取能力，以降低傳統氰化物法產生的污染及危害性，並產生經濟效益及提升企業資源永續利用。

一、前言

(一) 太陽能模組的市場規模與成長

為呼應全球淨零排放趨勢，我國於 2022 年 3 月公布「2050 淨零排放政策路徑藍圖」，當中的「淨零轉型之十二項關鍵戰略」提到太陽光電的設置容量須於 2026 至 2030 年期間每年增加 2 GW，預估 2030 年太陽光電容量可達 30 GW，2050 年設置裝置量則達 40

至 80 GW。為加速綠能的普及，2025 年起經濟部推動「家戶屋頂設置太陽光電加速計畫」，鼓勵地方民眾於自家屋頂設置太陽能發電系統，並補助相關經費提升民眾參與意願，使屋頂型太陽能發電系統持續發展^[1,2]。

(二) 白銀資源價格、產量與市場變化

全球前十大白銀產量國家當中，秘魯具有世界上最大銀礦儲量，且占全球白銀供應量 12.7%，而最大產量國家墨西哥則占 24.2%。儘管礦源分布於中南美洲等地區，但大部分的礦商選擇將粗礦送往中國進行加工冶煉。自 2026 年起中國對於白銀的出口實施出口許可證管制，使得白銀被中國市場掌控，控制全球的白銀精煉能力，引發相關產業的生產成本增加。根據世界白銀協會 (Silver Institute) 指出，全球太陽能模組需求雖持續增長，但在材料減量化

或改用替代材料後，反而太陽能產業對白銀的需求不增反減。於 2026 年 1 月資料顯示，銀價首度突破每盎司約 120 美元的價位，顯示白銀在多種條件下使其在全球的經濟地位提升^[3-5]。

(三) 環境挑戰與回收問題

我國太陽能模組自 2000 年起開始建置，而太陽能模組的生命週期最多至 20 年，若遇地震或颱風等天然災害亦會導致損壞。如 2025 年丹娜絲風災重創 33 個光電案場，影響超過 12 萬片太陽能板，另預估 2039 年則會產生 10 萬公噸的廢棄太陽能模組量。Research Nester 於 2026 年 1 月報告統計，全球太陽能板回收市場規模預計至 2035 年可達到 6.916 億美元，其中歐洲因《歐盟廢電子及電器設備指令 (WEEE)》與成熟的回收措施，於 2035 年的回收市場規模將占 38.5%。美國預計至 2050 年需回收的太陽能板廢棄數量達 8,000

萬噸，以目前技術雖能將 95% 的太陽能板材料回收，但回收成本仍會高於垃圾掩埋費用^[6-8]。

面對全球廢棄太陽能模組持續增長的挑戰，提升太陽能模組的回收方式與資源再利用勢在必行。然而現今許多回收業者因新穎技術不成熟或為了降低成本，仍選擇有劇毒性的氰化物作為回收方式。

(四) 傳統氰化物與無氰環保剝銀技術的差異

氰化物 (Cyanide) 是一種劇毒性化學物質，具有高親水性、低還原電位等特性，使其可用於採礦業、電鍍業及半導體等產業。而氰化物在銀的提取會需要較高的氰化物濃度，對操作環境及人員安全構成潛在危害，廢液處理亦需進行嚴格管理，避免環境污染^[9,10]。

優勝奈米科技研發的無氰環保剝銀技術具有多項顯著優點，如表 1 所示，採用 AgST-350 無氰化學剝銀添加劑，相較於傳統氰化物法更加環保和安全。AgST-350 不含氰化物及其他有毒物質，避免氰化物處理所需的嚴格環境安全措施；

AgST-350 具有高選擇性提取銀的功能，相較氰化物法可包容更高的銀含量；AgST-350 亦提供簡易的廢水處理流程，減少環境污染的同時也提升操作安全性和成本效益。

綜合以上資訊，隨著廢棄太陽能模組的數量增長，環保意識的興起與銀回收價值提升等因素，使得全球回收業者尋求合適的處理方案。優勝奈米科技提供一套合適的太陽能模組環保回收方案，即為本次文章所探討的主題。

二、實驗方法

(一) 太陽能模組前處理

用途為將太陽能板進行拆解，首先為鋁框架，具有保護太陽能模組的功能。去除鋁框後，依序則是保護內部的玻璃板，作為塑膠封裝材料的 EVA，中間則是主要發電的矽晶太陽能電池，最下層為可防水及抗紫外線的背板。

在取得太陽能矽粉，其前處理技術為將外部的接線盒、鋁框架拆除後，如圖 1 將下層的 EVA 及背板切除回收，剩餘部分再進行破碎，

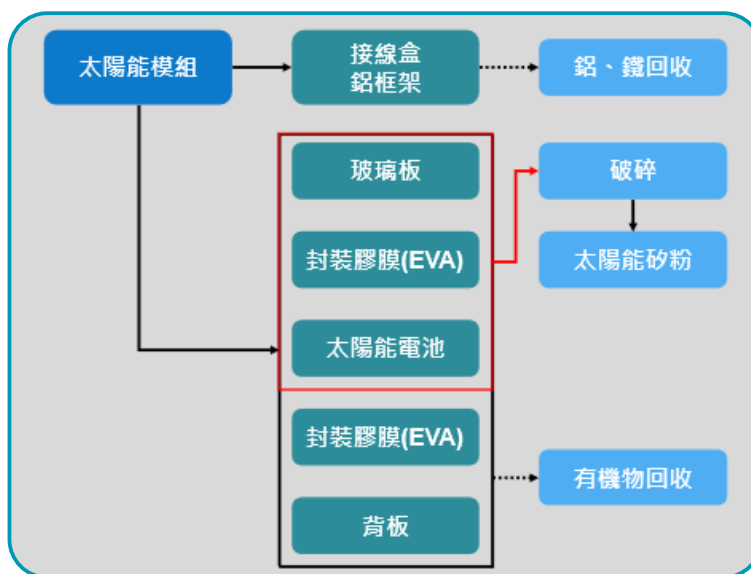


圖 1 太陽能模組前處理技術

表 1 白銀回收方式比較^[9,10]

項目	氰化物	AgST-350
製程類型	化學剝除	化學剝除
使用影響性	劇毒、污染問題嚴重、損失率高	不傷鎳及鋁鍍層
安全性	劇毒、有害氣體	微量酸味
廢液處理	廢液需加大量鹼進行酸鹼中和處理	廢液加鹼中和處理

即取得太陽能矽粉。

(二) 太陽能矽粉剝銀

實務上將 100 公斤的太陽能矽粉置於預先調配的 AgST-350 藥水中，維持反應溫度 50℃，持續 2 小時，經過濾收集剝銀液，上層液藉由 ICP-OES 定量檢測其銀離子含量以做後續還原純化處理。

(三) 還原與純化

先將含銀溶液與還原劑反應，以獲得含銀的沉澱物。接著將沉澱物用溶劑浸泡去除雜質，過濾後再將沉澱物烘乾，得到高純度 >99.9% 的再生銀粉。最後將銀粉放入坩鍋中，以 1,000℃ 的高溫下燒結，即可轉化為純再生銀。

(四) 數據分析

為驗證 AgST-350 用於太陽能矽粉的剝銀效率 (E)，則以王水微波消化法後的太陽能矽粉含銀量數據作為對照組。

$$E(\%) = \frac{(A - B)}{B} \times 100\% \cdots (1)$$

(1) 式中，A 為太陽能矽粉經 AgST-350 提取後的含銀量 (kg/ton)；B 為太陽能矽粉經王水微波

消化法後的含銀量 (kg/ton)。

進一步將含銀液體還原後，藉由實際含銀量 (C) 與理論含銀量 (T)，獲得經由環保剝銀技術的還原率 (R)。

$$R(\%) = \frac{C}{T} \times 100\% \cdots (2)$$

(2) 式中，C 為還原出的白銀重量 (公克)；T 為經過 ICP-OES 定量分析所得的含銀量 (公克)，為銀濃度 (g/L) 與液體體積 (L) 的積。

三、結果與討論

(一) 太陽能矽粉剝銀結果

太陽能矽粉經 AgST-350 無氰化學剝銀劑提取處理後，含銀溶液經過還原純化，獲得白銀重量為 672.7 公克，如圖 2。根據 (2) 式，得出白銀還原率 (R) 達 99.7%。

四、結論

從太陽能模組中回收貴金屬的技術，自太陽能模組進行接線盒及鋁框架的拆解，再經由機械技術沿 EVA 切割取得含太陽能電池的部

位，進行破碎取得含銀的太陽能矽粉。由於 AgST-350 無氰的特性，可避免傳統氰化物法所造成的環境風險，同時降低廢水處理成本，整體回收過程更具環保性和安全性，符合 SDGs 目標 12 的責任消費與生產。高提取銀的特性提升貴金屬回收效率，增加其經濟價值，促進資源循環利用。這一創新回收技術為光電產業提供一種更高效、經濟和可持續的回收解決方案。

五、參考資料

- [1] 行政院國家永續發展委員會 (2022)。臺灣 2050 淨零排放路徑。
- [2] 經濟部能源署 (2025)。經濟部補助直轄市及縣(市)政府辦理家戶屋頂設置太陽光電加速計畫審查作業要點。
- [3] 遠見雜誌 (2026)。新白銀霸權！中國如何用 13% 產量封鎖全球？
- [4] Silver Institute (2026)。Global Silver Investment to Remain Strong in 2026 Against the Backdrop of a Sixth Consecutive Annual Market Deficit.
- [5] 台灣貴金屬平台 (2026)。貴金屬現貨報價。
- [6] 環境部資源循環署 (2026)。廢太陽光電板回收處理說明。
- [7] 環境部 (2025)。災後光電板清運處理。
- [8] Research Nester (2026)。Solar Panel Recycling Market Size & Share, by Process(Mechanical, Thermal, Chemical, Laser); Material; Product Type; Technique; Shelf Life; Application; End use – Global Supply & Demand Analysis, Growth Forecasts, Statistics Report 2026-2035.
- [9] Wang P., et al. (2026) "A review of cyanide-containing wastewater: Sources, hazard and treatment methods", Journal of Environmental Chemical Engineering, 14(2), 121344.
- [10] Yazici E. Y., et al. (2017) "Recovery of silver from cyanide leach solutions by precipitation using Trimercaptos-triazine (TMT)", Hydrometallurgy, 174, 175-183.



圖 2 剝銀液還原純化後型態