



日本太陽光電模組回收技術解析

Introduction of Photovoltaic Module Recycling Technology in Japan

吳曜杉 Y. S. Wu¹、王雨筠 Y. Y. Wang²、鄭隆藤 L. T. Cheng³、
姜暉先 H. H. Chiang⁴、林福銘 F. M. Lin⁵

工研院綠能所(GEL/ITRI) ¹研究員、²副研究員、³資深研究員、⁴副組長、⁵正研究員/組長

綠色再生能源一直是世界各國尋求的替代能源，而太陽能是重要目標之一。台灣政府也順應此潮流，大力推動太陽能產業發展。然而太陽能模組的使用年限約20~25年，目前尚未有大量的太陽能模組達到使用年限，但隨著後續裝置量的急劇提升，未來將衍生嚴重的廢棄太陽光電模組處理問題。本文旨在探討日本如何處理太陽光電模組廢棄物，達到資源循環再利用之目的。

Green renewable energy has always been an alternative energy source around the world, and solar energy is the most important one. Taiwan government has also followed the trend and gives every effort to promote the development of the solar energy industry. However, the photovoltaic modules have a service life of about 20~25 years. At present, not too many modules of early installations have reached the end of life, but the subsequent increase in the amount of equipment will lead to the most serious issue of waste disposal. This article will focus on how Japanese government handles the waste photovoltaic module.

關鍵詞/Key Words

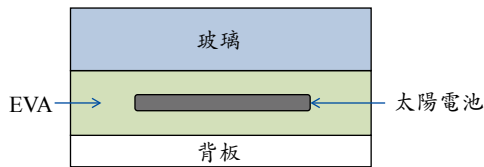
太陽光電模組(Photovoltaic Modules)、廢棄物(Waste)、回收(Recycle)

前言

截至2018年3月，日本仍無專門針對太陽光電系統回收的相關法律。而根據已經修改的FIT法(Feed-in Tariffs, 躉購制度)，關於太陽光電的業務指導方針明定，太陽能發電系統因天然災害、事故或是壽命結束等原因拆除和收集時，應遵守現有的回收相關法律來妥善處置，如建築回收法和廢棄物處理法。

從2013年開始，日本環境省和太陽能

發電協會討論有關太陽能發電系統的回收準則，並在2014年發表「太陽能發電設備等的再使用、回收和妥善處理報告書」，同年，太陽能發電協會制定「汰役太陽電池模組妥善處置和回收Q&A」；2016年4月，日本環境省編制並公布「太陽能發電設備回收等促進指南(第一版)」；2017年9月，日本總務省發布了一項建議，指出由於近期太陽能發電系統的損壞和事故導致回收系統立法成為當務之急，以及未來新能源產業技術綜合開發機構(New Energy and Indus-



▲圖一 太陽光電模組示意圖

trial Technology Development Organization; NEDO)、地方自治體和民間企業應加速回收技術開發、回收系統建設和示範。

根據日本總務省對於太陽能發電裝置廢棄處理等相關實況調查，在2015年約有2,400噸汰役太陽能光電板；2040年後，廢棄量將大幅增加到80萬噸。而存放大量的廢棄太陽能光電板有感電和有害物質（如鉛）洩漏的危險性，因此如何妥善處理廢棄太陽能光電板是迫切需要解決的問題。

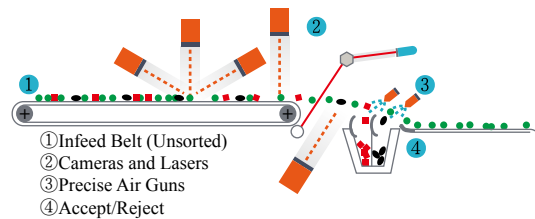
NEDO自2014年開始領導日本國內廠商實施「太陽能系統回收技術開發計畫」，並於2015年執行「低成本分解處理技術實證」；而2016年則投入「汰役太陽電池模組的低成本再使用技術開發」，其中「三菱材料」、「東邦化成」、「市川環境工程株式會社本莊和鹿島公司」、「NPC、日本スぺリア(SUPERIA)社和產業技術總合研究所(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology; AIST)」、「Solar Frontier」和「新菱公司」等皆各自開發模組回收處理技術，最終目標為每年處理200 MW的廢棄量，且將其處理費控制在5日圓/W以下。

模組回收相關處理技術解析

太陽光電模組(Photovoltaic Modules)的組成示意如圖一，其中各矽晶片間以鍍錫銅帶(Ribbon，此處無標示出)串接形成太



▲圖二 三菱材料的模組回收流程



資料來源：TOMRA Genius™

▲圖三 色彩選別機

陽電池層後，夾入上下兩層EVA (Ethylene Vinyl Acetate，乙烯/醋酸乙烯酯共聚物)中；並以玻璃和背板做封裝，其中玻璃通常使用強化玻璃，而背板則為含氟的高分子材料(通常為Polyvinylfluoride; PVF)，以抵抗各種氣候環境的侵蝕；最後則會使用鋁框固定整個太陽能光電板，並裝上接線盒。

由於太陽光電模組設計的初衷即是希望它能持續運作20~30年，故材料的選用和結構的設計都必須具有極優異的阻水、阻氧和耐候特性。因此當太陽光電模組到達使用壽命終點時，欲將其分解並回收是有相當難度的，尤其是該如何去除膠合整個模組的EVA，讓各個組件可以完全分離，達到回收再利用的目的。以下將介紹日本各公司的太陽光電模組回收技術。

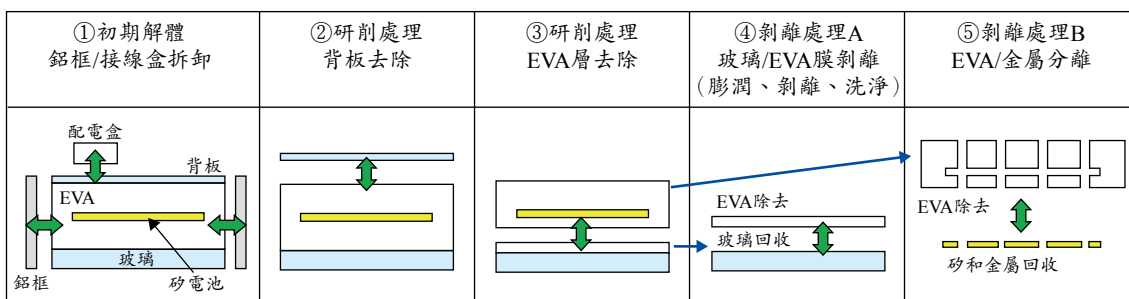
1. 三菱材料

太陽光電模組回收的第一步是先拆除和回收接線盒及鋁框，因此以下就不再贅述。三菱材料的回收流程如圖二所示，流程大致為將模組送進滾輪粉碎後，再以振



▼表一 色彩選別前後，玻璃上的金屬和有機物含量變化

試料名稱	Ag (ppm)		Cu (ppm)		Sn (ppm)		Pb (ppm)		Al (ppm)		Fe (ppm)		有機物(ppm)	
	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後
玻璃 2 mm以上	30	20以下	590	10以下	70	20以下	50	50以下	40	20以下	10	10以下	2,700	260
玻璃 0.6~2 mm	60	20以下	1,100	10以下	130	20以下	80	50以下	100	20	350	10以下	2,100	490



資料來源：東邦化成；工研院綠能所整理

▲圖四 東邦化成的模組回收流程

動篩分選顆粒大小，最後以色彩選別機分類。為了達到最佳的粒徑分布，滾輪粉碎機的轉速、送料速度、滾輪間距和滾輪上使用的刀片都必須相互配合才行。而為了使碎玻璃能分離，發現在滾輪處理時加熱軟化EVA，可有效提高可剝性。振動篩將顆粒分為2 mm以上、0.6~2 mm和0.6 mm以下，發現在「0.6 mm以下」的顆粒太小無法使用色彩選別，因此為了提高後續的選別效率，應盡量避免「0.6 mm以下」的顆粒產生。

圖三為色彩選別機的原理，主要是使用照相機和雷射分辨有色（矽晶片、金屬等）和無色（玻璃）物質，並以氣槍分類收集。而分選前後的玻璃碎片上之金屬和有機物含量變化如表一所示，可發現在色彩選別後，玻璃上無論是金屬還是有機物的含量都降低了，顯示色彩選別是有效的分

類方式。

三菱材料在處理太陽光電模組時還發現，有些製作商會使用含砷的玻璃來封裝太陽光電模組，而含砷的玻璃無法作為玻璃原料回收，因此有必要在回收前先檢測玻璃是否含砷，在此三菱材料使用「便攜型X射線螢光分析儀」來識別。

2. 東邦化成

東邦化成的模組回收流程如圖四所示，首先也是將鋁框和接線盒拆除，接著以研削機將背板去除以及將玻璃和太陽電池分開，最後以濕式法（化學溶劑）將玻璃和太陽電池上的EVA去除。

一般太陽電池封裝用的EVA為兩片，各0.5 mm厚，因此在切削時為了保護玻璃和太陽電池，會保留約0.1 mm厚的EVA在玻

▼表二 溶劑B和C的剝離和分離效果

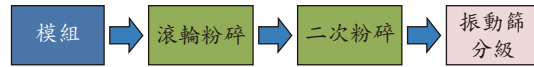
使用液 (剝離液→分離液)	分離層	重量分布(%)		
		有機部分	無機部分	合計
當初過程 B→B	上層	47	14	100
	下層	28	11	
變更過程-1 B→C	上層	61	16	100
	下層	1	22	
變更過程-2 C→C	上層	54	15	100
	下層	3	28	

璃上，而為了達成此目標，每片模組需耗費90分鐘時間。去除玻璃上的EVA使用剝離液A、超音波振盪器和刷子；而去除太陽電池上（分別為矽和金屬上）的EVA最初是選用剝離液B，但發現另一較便宜的溶劑C的剝離效果與剝離液B相似，但分離效果較好（見表二），可使溶液中的有機部分(EVA)和無機部分（矽和金屬）較有效地分離。

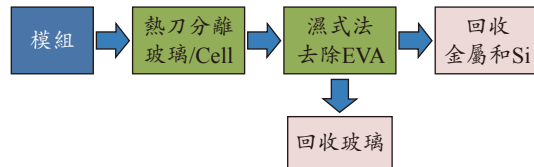
3. 市川環境工程株式會社本莊和鹿島公司

圖五為市川環境工程和鹿島公司的模組回收流程。首先以滾輪粉碎，由調整滾輪間距、進料速度和滾輪形狀（三角型和凹凸型）來提高剝離的效率；之後的二次粉碎比較了錘式破碎剝離機和離心式風力破碎機的效果。錘式破碎剝離機內部有一個高速旋轉的錘子，太陽光電模組與此碰撞，能將玻璃和太陽電池碎片分離；離心式風力破碎機是一種將處理後的物料放置在垂直方向旋轉的滾筒中，通過衝擊破碎將收集到的物料分離，輕質物料將往上方、而重物往下方移動的裝置。經過比較後，錘式破碎剝離機有較好的分離效果。

最後以振動篩來分級，使用網孔為



▲圖五 市川環境工程和鹿島公司的模組回收流程



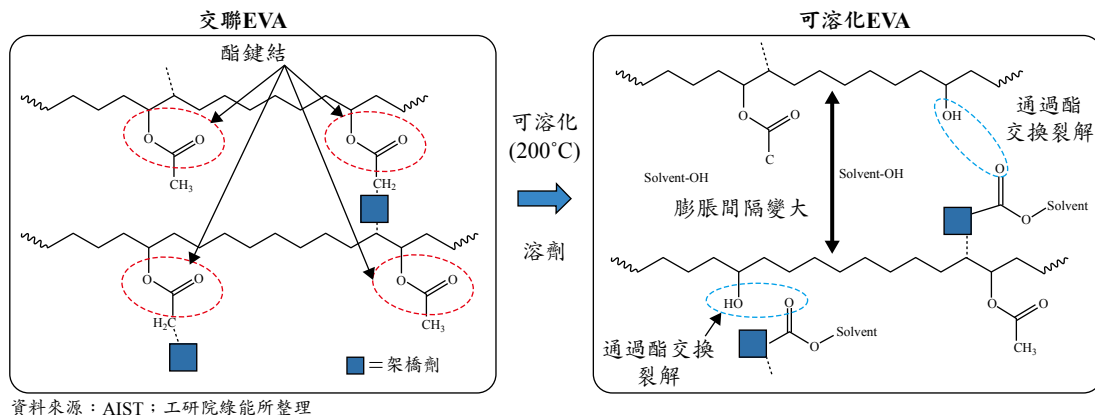
▲圖六 NPC、日本SUPERIA社和AIST的模組回收流程

1 cm的金屬篩，可有效地收集太陽電池碎片，而2 cm網孔的金屬篩則可以收集玻璃和金屬線材，其餘的部分以細粉的方式收集。就平均來說，假設不包含鋁框和接線盒的太陽光電模組的總重量為100%，則經過滾輪粉碎後，可以回收35%的玻璃碎片；接著在使用錘式破碎剝離機和振動篩分級機後，有14%的玻璃粉末、33%的電池廢料和6%的細粉回收，其餘部分則被吸入切割機和集塵器中。

4. NPC、日本スペリア(SUPERIA)社和產業技術綜合研究所(AIST)

圖六為NPC、日本SUPERIA社和AIST共同研究的太陽光電模組回收流程。NPC主要是負責研究以熱刀法切開EVA以分離玻璃和太陽電池，接著AIST以濕式法（有機溶劑+鹼）來移除太陽電池周圍的EVA，最後日本SUPERIA社研究以錫槽回收金屬的方法，而AIST研究用熔融鹽電解法純化矽。

首先以熱刀法切開EVA需要注意的是模組的運送速度、刀片溫度和均勻性、刀片的角度，另外考慮到刀片耐用性，還需



▲圖七 交聯EVA變為可溶化EVA的反應機制

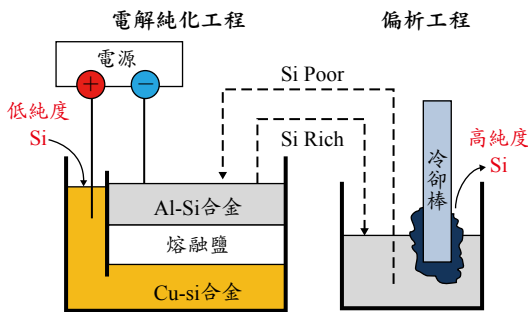
要特別留意刀片的材質等。NPC預設每片模組的處理時間為50秒，且在150~200°C的刀片溫度下使用熱刀法，並不會造成材料的氧化和變色。

將玻璃和太陽電池分開後，為了進一步回收太陽電池上的金屬和矽，必須先想辦法去除太陽電池上的EVA。AIST使用的方法為濕式法，以醇類溶劑進行酯交換反應（如圖七）來切斷架橋（交聯）EVA，使EVA的分子量變小、易於溶解。AIST的研究發現，溶劑中的添加劑種類（酸或鹼）、反應溫度，EVA的交聯程度、粉碎後的顆粒大小等都會影響溶解速率，最後結果為處理時間約30~60分鐘，溶解率可達99~100%。另外，使用濕式法處理太陽光電模組的疑慮就是廢溶劑該如何處理，AIST嘗試用離心分離法、過濾法和減壓蒸餾法來回收處理後的廢溶劑。離心分離法因為沉澱部分仍殘留有大量溶劑，故回收率僅約62%；過濾法的回收率雖然有91.5~92.5%，但因為濾紙很快就被殘留物堵塞，所以無法實際應用在大量製程上；最後，溶劑回收使用的方法是減壓蒸餾法，減壓蒸餾法的回收率為97.3~100%，而且在

大量處理上不會有問題。

日本SUPERIA社的工作是研究如何將金屬從太陽電池上取出，主要是利用焊接時引起的熔融現象。初期以2.5公斤的熔融錫，在300°C下，可回收小量的太陽電池碎片(11~12 g)上約89%的銀，但將量提高到500 g（約一片模組的量），則回收率會降低至51%。回收率變低的原因可能是太陽電池的比重較熔融錫低，因此會浮在熔融錫上，無法完全充分地接觸。計畫目標是期望能使一片模組的量（約500 g）的回收率達到90%以上。

另外，AIST則是期望能回收太陽電池上的矽，因為製作太陽光電模組的能量消耗中，約50%以上是用在製作高純度的矽晶，因此從減輕環境負擔的觀點來看，回收廢棄太陽光電模組中的矽是非常重要的；而且太陽電池中的矽除了刻意添加的雜質外，純度是非常高的，如果可以建立適當的回收方法，有機會成為優異的二次資源。AIST使用的是如鋁純化的三層電解法(Hooper's Method)，因為其陽極、電解質和陰極都是液態，且因密度差而形成三層結構。矽的熔融鹽電解純化是以Al-Si合



資料來源：AIST；工研院綠能所整理

▲圖八 矽的熔融鹽電解純化

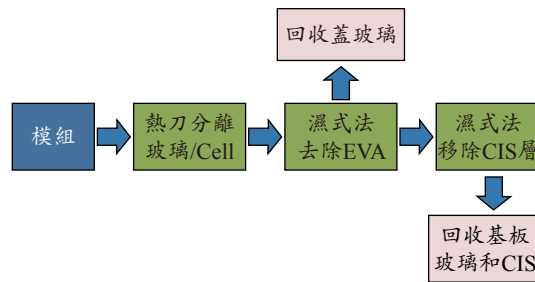
金作為陰極、Cu-Si合金作為陽極、BaF₂/CaF₂/NaF作為電解質，如圖八所示，將從太陽電池上回收的矽先與銅製成合金作為陽極，再以高純度矽和鋁製成的合金作為陰極，加熱至1,000°C以上變為液態，通電後，陽極中的矽經由熔融鹽移動到陰極，最後再利用偏析工程，將高純度矽結晶。

以上的金屬回收和矽回收技術仍是實驗室研發階段。

5. Solar Frontier

Solar Frontier主要是製作CIS（或CIGS）模組，因此其主要回收工作為CIS模組的回收。CIS模組的結構與一般矽基太陽電池模組稍有不同，由於CIS太陽電池屬於薄膜太陽電池，需沉積於一基板（一般為玻璃）上，因此模組結構（參考圖一）中的太陽電池部分為CIS/基板玻璃，而為了分辨，封裝用的玻璃就稱為蓋玻璃。Solar Frontier的模組回收流程如圖九所示。

如同NPC的作法，首先也是以熱刀法分離蓋玻璃和太陽電池，不同的是Solar Frontier先預熱模組，降低EVA的黏著性，可較輕易地分解模組，並且減輕刀片的負載。但以目前的技術，仍無法在分解模組時保持基



▲圖九 Solar Frontier的模組回收流程

板玻璃不破碎（蓋玻璃是完整的）。

利用熱刀法分解模組後，Solar Frontier也使用濕式法（有機溶劑）去除蓋玻璃上的EVA，選擇溶劑的考量主要有沸點、閃點和是否為毒化物，在嘗試使用甲苯、乙苯、芳香醚類、芳香醇類、乙二醇醚類和不飽和脂肪烴類後，選擇在45°C下、浸泡20分鐘即可去除EVA的甲苯，但因甲苯的閃點只有4°C，所以在設備規格中需納入相關的安全措施。Solar Frontier仍然在繼續尋找剝離性與甲苯相當、且更安全的化學品。

但以同樣的條件卻無法去除基板玻璃上（有CIS層）的EVA，可見得EVA與玻璃和CIS的鍵結力不同，因此必須加入額外的物理剝離作用。在嘗試了刷子和PP樹脂刮刀後，發現使用刮刀可以輕易地將已被甲苯溶脹的EVA刮除，但因為基板玻璃在熱刀處理後是破碎的，刮刀無法大量處理碎玻璃，因此Solar Frontier使用盆式攪拌器，在其中放入破碎的基板玻璃和剝離液，以傾斜角約30~40°旋轉攪拌，利用玻璃與玻璃間互相碰撞和磨擦來去除玻璃上的EVA。此外，Solar Frontier還測試了浸泡過氧化氫、無機酸和鹼等浸漬方式，以及噴灑乾冰、浸入液態氮和不需任何溶劑的等離子灰化等方式，雖然可以將EVA從玻璃上剝離，但是就

成本考量，這些方式的適用性是不高的。

最後則是將已去除EVA的基板玻璃上的CIS膜移除，因為CIS膜中有價值高的元素鈮，經測試後，發現使用過氧化氫和鹽酸可以直接溶解CIS膜下層的Mo，讓CIS膜直接以固態回收，但因為過氧化氫在高溫和酸作用下會自我分解，因此以降低處理成本為考量，最佳條件是僅使用過氧化氫溶液。

6. 新菱

新菱的模組回收流程如圖十所示，在拆除接線盒、鋁框以及去除背板後，就直接送進熱裂解/燃燒爐內（如圖十一）去除EVA，最後只要將玻璃、金屬和矽分類回收

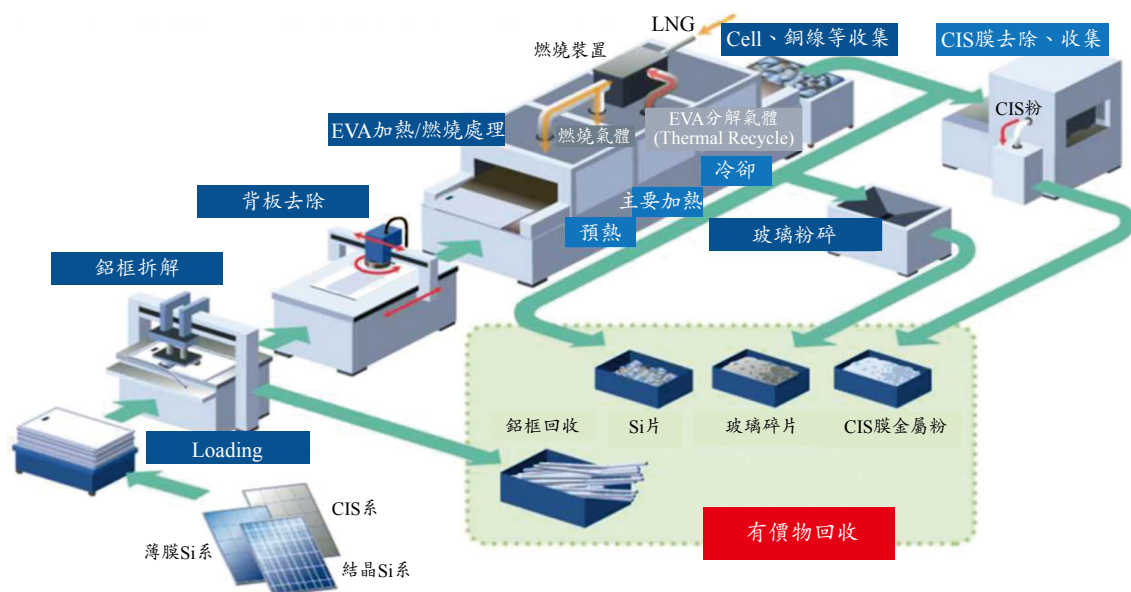


▲圖十 新菱的模組回收流程

即可。

新菱除了鋁框拆解和背板去除的機台外，最核心的設備就是EVA加熱/燃燒處理裝置，功能為預熱、主要加熱和冷卻。將EVA熱裂解之後的分解氣體送入燃燒裝置中，並通入LNG (Liquefied Natural Gas, 液化天然氣) 使分解氣體進一步燃燒氧化。

而為了提高熱處理設備的長期可靠性和穩定性，新菱做了不少努力，例如強化將分解氣體由分解爐送入燃燒爐的排出器之耐熱性。由於燃燒爐內的溫度高達900~1,100°C，會有排出器(SUS304)破裂和週邊絕熱材脫落的現象，因此直接以耐火磚取代，改善這個問題；另外還有防止外部空氣進入熱處理設備，以及加強廢熱回收的改善措施。而熱裂解法令人感到疑慮的排出氣體汙染問題，新菱檢測其排氣中的SO_x、微塵、NO_x和鉛等含量，皆符合日本法規規定。



資料來源：新菱株式會社；工研院綠能所整理

▲圖十一 新菱的通用回收系統流程圖



模組回收技術比較

綜合以上所述，模組回收技術主要是在處理封裝材EVA，大致可概分為濕式法和乾式法。濕式法顧名思義是使用溶劑或化學藥劑來處理EVA，一般常見的為有機溶劑或是酸、鹼等試劑，但製程後段將面臨廢液或藥劑的處理，因而可能增加額外的廢液處理成本或是引發汙染環境的疑慮；而乾式法則分為粉碎、熱刀處理和熱裂解法等，其中粉碎法和熱刀法無法完全去除EVA，需要再多加一道程序，而熱裂解法是直接高溫燒除EVA，其產生的廢氣可能造成空氣汙染問題，而且可能導致玻璃、金屬和矽的氧化和變色。

此外，對於分解處理後的有價物質收集，可分為鋁框、玻璃、矽材和金屬，由於鋁框和金屬的價值較高，一般的原料回收商較有意願收購；而玻璃的循環再利用，因為純度要求高，需要幾乎無雜質（有機和無機物）殘留，否則在高溫熔煉過程中可能造成爐體的損壞，因此仍須思考再利用的方向，目前多採低階應用方式，如少量添加製成瓷磚、地磚或混入柏油中鋪路；另外矽材也面臨相同的問題，有學者提出將無破損的矽晶片再製成太陽電池，但因使用於模組中的太陽電池愈來愈薄，因此要在處理過程中保持完整的難度也愈來愈高，目前大多是用作煉鋼的添加材料。

我國現況

我國太陽能產業發展較晚，大約從2000年左右才開始投入太陽能市場，但近幾年政府陸續推出「陽光屋頂百萬座」、「太陽光電2年推動計畫」等政策，使國內設置大量增加。截至2018年5月底止，太陽光

電累積設置容量達2,172 MW，並且預計在2025年太陽光電累積設置目標量為20 GW，若依此設置量預估，則最快於2023年時，將會有1萬公噸的太陽光電模組廢棄物產生，之後每年將以0.5~1萬公噸的速度持續成長，於2036年時將突破10萬公噸，2045年可能達到18萬公噸。惟若考慮模組20年後仍有80%發電量及再利用市場，則此估算量將會再遞延。

近期政府擬比照國際太陽光電模組回收作法，採生產者延伸責任之精神，未來廢棄太陽光電模組的回收傾向由生產者和進口商負責。目前已委由社團法人台灣太陽光電產業協會邀集業者成立「模組回收委員會」，該委員會將主責國內模組回收之運作與管理，並藉助工研院綠能所開發回收相關技術，協助業者評估投入或共同合資模組回收處理業的可行性，促使太陽光電循環經濟產業成型，落實真正乾淨的綠色再生能源。☞

誌謝

本研究工作承蒙經濟部能源局研究計畫(Contract No: 107-D0304)及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。

參考文獻

1. 「太陽光發電リサイクル技術開発プロジェクト」事業原簿【公開】，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー部
2. 「可溶化法を用いた使済み太陽電池からの資源回収技術の開発」，平成26年報告書，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
3. 「太陽エネルギー技術研究開発 / 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発 / 広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発」，平成22年度～平成26年度報告書，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構