



太陽能模組廢棄潮來襲— 回收挑戰與可拆解模組的綠色解方

循旭科技股份有限公司創辦人兼董事長 / 彭裕民
工業技術研究院副組長 / 蘇俊瑋
工業技術研究院研究員 / 潘恩郁

關鍵字：太陽能模組、循環經濟、可拆解、廢棄回收

摘要

隨著全球太陽能產業快速發展，廢棄太陽能模組預計在未來數十年將大幅增加，造成環境的挑戰。各國政府已開始建立模組回收規範並推動回收技術發展。傳統太陽能模組因封裝結構難以拆解，導致回收成本高、效益低。為解決此問題，工研院攜手國內廠商，共同開發可拆解太陽能模組技術，從源頭設計導入熱塑性與熱固性材料雙層封裝設計，不僅提升模組回收效率，實現再生矽材料的回收與再利用，有效降低碳排放達50%。此創新技術成功技轉產業界，建立台灣自主太陽能模組供應鏈，為全球循環經濟與綠色能源發展提供具體解方，開創低碳、永續的未來。

一、全球太陽能模組回收趨勢

隨著再生能源快速發展，全球太陽光電裝置量迅速成長，廢棄太陽能模組的問題也逐漸浮現。根據國際可再生能源機構（International Renewable Energy Agency, IRENA）與國際能源總署太陽能發電系統計劃（International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, IEA PVPS）於2016年所發出的警訊，預估至2050年，全球累積的太陽能廢棄物將達7,800萬噸（圖1）[1][2]。然而，目前全球的回收市場尚未準備好應對這波即將來襲的廢棄潮，模組回收面臨許多挑戰，包括回收設施不足、技術門檻高、經濟誘因不足等。若未妥善處理，這些廢棄物將對環境造成重大負擔，也會削弱太

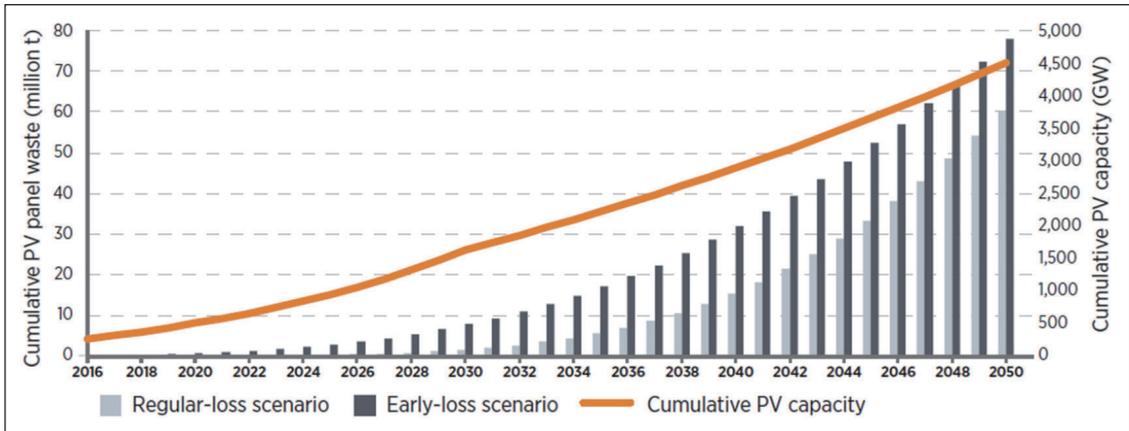


圖 1 全球累積的太陽能廢棄物統計 [1]

陽能作為綠色能源的永續價值。如何有效回收廢棄模組，已成為各國政府與太陽能產業無法忽視的關鍵課題。

儘管如此，太陽能回收市場也逐漸展現其潛力與契機。隨著再生能源需求持續攀升，回收市場也邁向可持續發展的方向。越來越多企業投入模組材料分離與再利用技術的研發。美國國家可再生能源實驗室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 預測，到 2032 年，太陽能模組回收將成為一項具盈利潛力的產業；到 2040 年，回收材料可望滿足美國本土 30% 至 50% 的太陽能模組製造需求 [3]。此外，根據能源顧問公司 Rystad Energy 預估，2030 年全球太陽能模組中可回收材料的總價值將超過 27 億美元，並在未來幾十年加速成長，至 2050 年時其價值將逼近 800 億美元 (圖 2) [4]。因此，若能加速建立完善的回收體系與政策引導，太陽能廢棄物不僅不再是負擔，更可轉化為資源循環與產業創新的新動能。以下分別就全球主要國家對於太陽能模組回收現況整理：

歐洲

歐洲作為全球綠能發展的先驅，也較早面臨太陽能模組退役與回收的挑戰。歐盟早在 2003 年即頒布《廢棄電器電子設備指令》(Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, WEEE)，並引入「生產者責任延伸」(Extended Producer Responsibility, EPR) 的概念，要求產品生產者負責其產品生命週期終了後的回收與處理責任。於 2012 年公布新版本的 WEEE Directive 2012/19/EU，將廢棄太陽能模組納入回收管制，並設下明確回收目標：太陽能模組的總回收率需達 85%，其中可再利用與材料回收率須達 80% [5]。這項規定不僅為廢棄模組的處理提供制度基礎，也促使產業朝永續循環的方向邁進。為了配合指令的實施，歐洲太陽能產業界於 2007 年成立了專責機構「PV Cycle」，協助處理太陽能模組回收與再利用計畫，並整合歐盟各成員國的模組回收與處理機構，成員包含模組製造商、廢棄物管理業者等，建構完善的回收處理網絡 [2]。

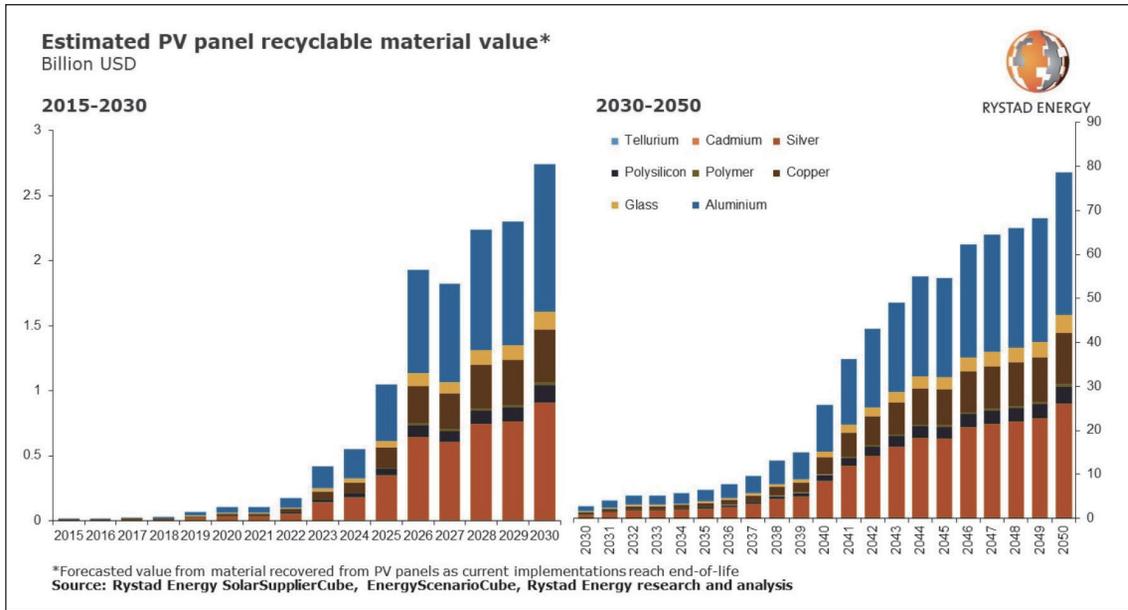


圖 2 全球太陽能模組可回收材料的總價值分析 [4]

德國

德國根據歐盟 WEEE 指令，於 2018 年『德國電器和電子設備法案』(German Electrical and Electronic Equipment Act – ElektroG3) 正式將 PV 納入管轄。在德國銷售的 PV 模組都必須登記，並依據模組尺寸進行分類 (ElektroG, 2022)。模組廢棄物可分為兩種處理途徑：企業對消費者 (Business to consumer, B2C)，大多為住宅用途約占 15%，製造商銷售模組並確保報廢管理的義務，消費者不須承擔額外的費用。企業對企業 (Business to business, B2B)，約占德國 PV 市場的 85%，為主要交易模式，商業客戶則需要支付相關的回收費用。德國採取生產者責任的原則，製造商必須確保達到 85% 的模組回收率，以及在回收模組中至少有 80% 的材料需要被有效的再利用 [6][7]。

Reiling 集團為德國主要負責回收的處理廠，主要有 3 座回收廠處理 PV 模組，目前處理量能約 10,000 噸/年。2023 年打造了一座回收廠專職回收矽晶模組，可連續處理廢棄模組，預估處理量能可以到 50,000 噸/年。其處理方法為粉碎法分離玻璃，其他以機械方式處理剩餘物質。而德國 Suez GmbH 與 Geltz-Umwelttechnologie 合作以熱裂解法使高分子材料裂解而將分離玻璃，然而高溫下易造成玻璃破碎，再以化學電解法從餘料中將矽、銅、銀分離出來。2022 年德國 Flaxres 設計以脈衝光設備 (light pulses) 分離模組，為非物理破壞性方式可取得完整的玻璃板，可再用於高品質的玻璃製品，矽晶片再以真空吸取分離。根據計算 7.5 噸的 PV 模組可回收超過 200 公斤的矽料、4 公斤的銀以及 4.9 噸的玻璃板。該設備設計為可移動式，以方便增加拆解利用率。該技術與歐



盟的 Veolia、ROSI Solar、Evonik 等合作測試，2024 年已有 5 個處理站開始營運，規劃到 2030 年將在全球成立 400 座處理站。

而針對回收物料的回用研究，德國研究機構 Center for Silicon Photovoltaics、Fraunhofer ISE 與德國太陽能回收公司 Reiling GmbH & Co. KG 合作，2022 年研發 PV 模組適用的回收再造技術，讓廢棄模組重生 [8]。團隊透過分類將 0.1 至 1um 的電池碎片從玻璃、塑膠中提取出來，再以濕化學蝕刻技術（Etching technology）逐步去除電池上的鍍層，最終將回收模組製成 PERC 電池，轉換效率高達 19.7%，雖比 PERC 太陽能電池 22.2% 的轉換效率較低，但其發電量一定比廢棄太陽能電池還要高。

法國

在法國，模組回收以生產者付費的模式運行，太陽能模組製造商及進口商，須向 PV CYCLE 協會註冊登記，並由光電產業公司合作共同協調處理廢太陽能模組。法國政府協助成立 Soren 專職管理太陽能板廢棄物的機構，並建立完整的收集、回收、運送、分類、拆解光電組件的回收體系，而 Soren 的前身為 PV CYCLE France [7]。2018 年法國環保公司 Veolia 打造歐洲第一座太陽能專門回收廠，主要的處理方式為粉碎法。2022 年 Soren 和專注電氣電子廢棄物回收處理的 Envie 2E 聯盟合資的太陽能板回收廠啟用，為全歐第一條標榜再利用之回收處理線，首先鑑定每片太陽能模組的狀況，玻璃是否破裂等，判斷其可再用性，並以獨特熱刀剝離技術，可更有效回收。

法國 ROSI Solar 研發出獨步全球技術，可成功分離矽、銀、銅，並能大規模回收再利用。該公司使用的技術分別為熱能、機械和化學處理，目標是希望能回收 99% 的材料。廢太陽能模組首先會由 Soren 以熱刀法卸除玻璃、鋁框後，送至 ROSI 進行熱裂解去除封裝膜等高分子材料。接著透過機械方式，將含有銀線和銅線的矽組件取出。第三步則是將金屬按順序放進 5 個化學藥劑池中，以化學方式分離銀和銅。2023 年的回收處理量為 3,000 噸／年，約 15 萬片太陽能模組，即回收 3 噸銀和 90 噸高純度的矽。ROSI 計畫處理量擴充到 10,000 噸／年，持續於德國、西班牙等地建廠中 [9]。

義大利

義大利在 2014 年第 49 號立法法案（Legislative Decree No. 49/2014）根據電廠規模可分為小於 10kWp 的家用 WEEE，大於 10kWp 的專業 WEEE，回收規範。義大利能源服務管理公司（Gestore dei Servizi Energetici SpA, GSE）負責主導模組回收，並為家用及商業用途的模組設立不同的處理途徑，家用模組可以將廢棄模組送至各地的收集中心，或是將模組送回至購買的經銷商或安裝商處理。而商業用途由於規模較大，需授權機構進行廢棄物處理或運送至處理廠進行其中處理。

義大利礦業公司 Minerali Industriali 子公司與義大利玻璃製造商合作成立的新創公司 Tialpi Srl，年處理量達 3,000 噸，可回收高達 97% 的材料。採用自動化設計，首先用機械手臂將太陽能板從裝有 25 片廢棄模組的



倉庫中移出，去除後方的電纜跟接線盒後，用四台自動操作切割鋁框，接著以紅外線加熱模組以刀具切割玻璃。經過篩選留下 2 ~ 10 mm 的玻璃後，再用光學技術分離出不透明的顆粒玻璃，留下高品質玻璃再以利用。最後則是提取純度高達 99% 的銅以及回收塑膠。Tialpi Srl 表示，整體回收過程相當環保，能耗低每片模組僅需 1kW，回收的鋁材可用於汽車、建築等各產業，優質玻璃可用於容器玻璃和平板等用途。

美國

美國太陽光電產業協會（Solar Energy Industries Association, SEIA）成立了回收專案小組，推動太陽能產業的環境與社會責任協議。華盛頓州是美國第一個制定 PV 系統回收的州，規定要求製造商負責回收，而不對系統持有者增加額外成本。然而在實施上面卻遇到困難，歷經兩度延宕，目前擬定延後至 2025 年 7 月實施 [10]。加州則是首個制定廢棄太陽光電模組回收法規的州，將 PV 模組歸類於普遍廢棄物，並進一步推動回收 PV 產業發展。其他州也陸續制定了相關法規，明確責任歸屬和回收處理費用標準，然而在聯邦方面仍缺乏針對 PV 模組回收的法規。

根據 2022 年美國能源部的行動計劃中指出，回收單一模組的成本估計在 15 美元至 45 美元間，遠高於將其送往垃圾掩埋場的成本，掩埋的成本僅為 1 美元至 5 美元 [11]，成本差異阻礙了回收工作。此外，由於 PV 模組體積大，收集及運輸成本很高，也導致市場推動困難。目標在 2030 年前將 PV 模組

回收成本降至每模組 3 美元（每噸 150 美元）；美國能源部太陽能技術辦公室（Solar Energy Technologies Office, SETO）亦廣邀研究單位開發新世代的模組及新的回收方法，以解決目前模組回收的難題。

美國太陽能電池和模組製造商 Qcells 和美國 PV 回收商 Solarcycle 聯手回收美國退役的模組，推動再生能源供應鏈，以減少對進口原料的依賴。Solarcycle 的技術可從 PV 模組中提取率達 95% 以上的材料回用，並幫助 Qcells 回收電池上的材料，包括鋁、銀、銅、矽和鐵等，在供應鏈中重複使用，降低成本和碳排放，而且能夠成為更永續的再生能源產業之一 [12]。

日本

日本在 2012 年開始實施電力固定價格收購制度（Feed in tariff, FIT）後，大量太陽能模組建置，這些模組預料在 2030 年後陸續報廢，預計會產生約 50 ~ 80 萬噸的廢棄 PV 模組，使工業廢棄物處理設施承受龐大壓力。2024 年 9 月日本經濟產業省（Ministry of Economy, Trade and Industry, METI）與環境省（Ministry of the Environment, MOE）開始研擬最新回收制度，規定由太陽能模組製造商與進口商繳交回收費用，而太陽能設施業主負責支付拆除費用，這些上繳的基金由第三方機構管理，但家用 PV 模組尚未涵蓋在這項費用分擔計畫。政府計劃於 2024 年內敲定制度框架，並將在 2025 年例行國會中提交相關法案 [13][14]。回收費將於產品銷售時收取，拆除費則於啟動發電前繳納，這項方案用意，是避免製造商、進口商或業主在 PV

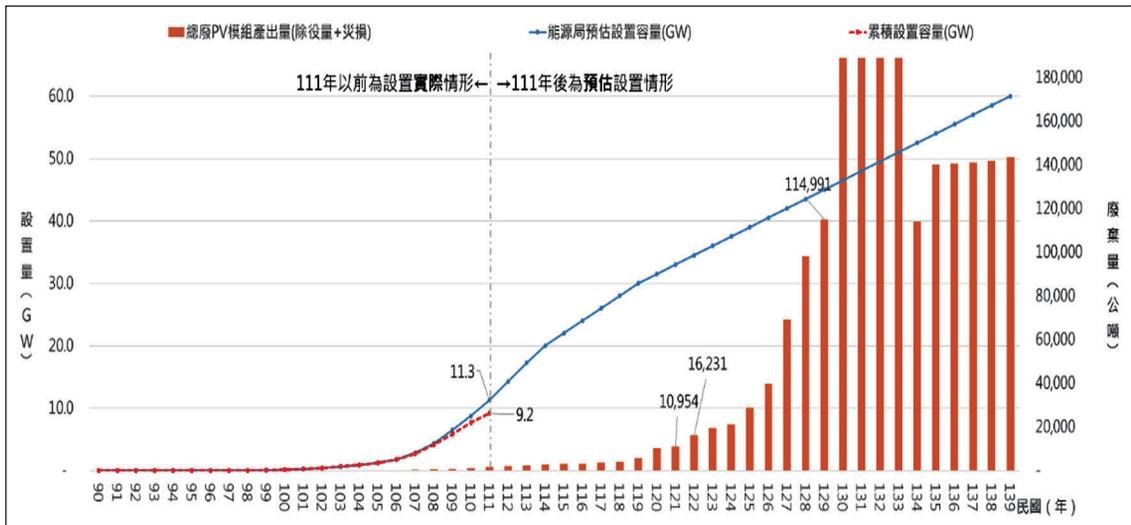


模組屆滿服役壽命前倒閉，所可能引發的資金短缺。在完成拆除和回收作業後，第三方機構將透過業主，向經政府認證的拆除承包商和回收業者支付款項。

根據日本光電能源協會 (Japan Photovoltaic Energy Association, JPEA) 已有 29 家公司可進行 PV 模組回收，但由於目前廢棄量相對較小，回收廠的運轉率仍然偏低。日本新能源產業技術綜合開發機構 (New Energy and Industry Technology Development Organization, NEDO) 的研究專案中已有顯著的進展，包含物理分離熱刀法、化學處理及熱裂解法。熱刀法為日本公司 NPC 的專利技術，利用加熱的刀具切開封裝膜，將玻璃與矽晶片分離，是一種可以回收完整玻璃的技術，而剩餘的部分，再以稱之為濕式法的化學處理法，去除殘餘的封裝膜。雖然熱刀法可以回收完整的玻璃，但刀具的使用壽

命、處理速度等是這個技術的關鍵。日本新菱開發的回收法為熱裂解法，EVA 熱裂解後送入燃燒裝置並通入液化天然氣 (Liquefied Natural Gas, LNG)，作為尾氣處理 [15]。

隨著太陽能產業的快速發展，各國政府對於廢棄太陽能模組的回收問題也日益重視，紛紛制定相關法規與政策來加以管理。不過，目前的回收市場尚未成熟，現行的回收方式多以「便利處理」為主，並未有效回收模組中真正具價值的材料。其背後的挑戰主要來自於模組本身拆解困難。拆解後的材料混雜，導致分類與處理需要耗費大量時間與成本，進而影響整體回收的效率與意願。若能從產品設計階段即考量回收需求，例如開發更易拆解的新型模組，或導入低碳、高效率的回收技術與流程，將有助於提升資源回收率，實現資源的永續利用，也為低碳未來奠定基礎。



資料來源：經濟部能源局、台灣電力公司；太陽光電協會團隊推估繪製

圖 3 國內太陽能廢棄模組預估 [16]



二、國內回收現況與技術開發

綠能科技之太陽光電產業為政府推動再生能源、綠色家園的重要政策之一。台灣 2025 年淨零轉型策略中的能源轉型，提升太陽光電累積裝置容量至 40GW 之重要政策目標。台灣在現有政策推動情境下，廢棄模組將於 2035 年將達 10 萬噸，詳細請見圖 3 [16]。

2020 年 3 月，台灣正式啟動「太陽光電回收處理體系」，由環境部、經濟部能源署及太陽光電產業協會共同推動，建立起一套完整的太陽能模組回收流程。根據環境部所訂定的標準程序，廢棄模組會被運送至合格廠商（代號 D-2528，指裝置使用後廢棄之太陽能光電板）進行回收與處理。早在 2019 年，經濟部能源署便依據《再生能源發電設備設置管理辦法》第 17 條，向太陽能設備設置者預收每千瓦 1,000 元的回收處理費。這筆費用納入再生能源發展基金，用以補助太陽能電廠未來退役模組的清除與回收處理，避免遭到隨意棄置。

環境部負責建立回收機制與稽核制度，透過線上登記模組序號的方式，作為日後廢棄物處理認證的依據。此舉可讓相關單位掌握退役模組的流向與數量。當模組退役需回收時，持有者可上網登記，依規定進行收集，並交由具認證資格的業者清運與處理。為加強管理，政府也規劃未來將立法規範，若任意棄置太陽能模組，最高可處新台幣 300 萬元罰鍰。太陽光電產業協會則負責核對每一片模組的序號是否與案場登記資料相符，並安排合格的清運與處理業者進行後續作業，確保整體回收流程的透明與有效性。

目前全台已有 5 家取得廢太陽能模組處理廠，處理量能 10 萬公噸／年 [17]。

三、可拆解太陽能模組：從設計源頭實現綠色循環

自工業革命 19 世紀以來，傳統的線性經濟模式一直主導著全球的發展。這種模式以「取用－製造－使用－丟棄」為主軸，人們從自然中大量開採資源，將其加工成產品供消費者購買使用，在失去使用價值後棄置。這種以追求快速、便利與獲利為導向的經濟系統，雖促進了工業與經濟的快速成長，卻也加劇了地球資源的消耗與環境壓力。然而，面對資源有限與氣候變遷的雙重挑戰，「循環經濟」成為替代線性經濟的關鍵解方。循環經濟強調資源的高效使用與延續其生命週期，目的在於提升整體價值並減少浪費。不同於用完即丟的傳統模式，循環經濟透過修復、再利用、回收與再製等方式，讓材料能夠持續在經濟體系中循環流動。不僅能有效降低資源消耗，更能減輕對環境的負擔，朝向更永續的未來邁進。為了實現 2050 年全球淨零碳排的目標，推動循環經濟已成為各國共同努力的重要方向 [18]。

傳統太陽能模組在設計上，主要考量其需長期暴露於戶外環境，因此結構上必須具備良好的耐候性與穩定性，以確保電池效能不因氣候與時間而劣化。既有太陽能模組基本結構（圖 4），由上而下分別是前板玻璃、第一層封裝膜（Ethylene-vinyl Acetate, EVA）、太陽能電池、第二層封裝膜（EVA），最底層為背板。其中，EVA 封裝膜的雙層設計扮演關鍵角色：上層封裝膜需與玻璃前板

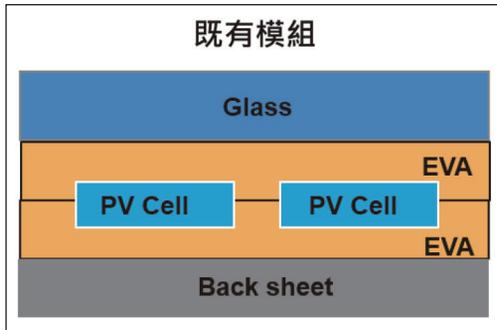


圖 4 既有模組結構

緊密貼合，並維持高透光率，以提升光電轉換效率；下層封裝膜則提供電池片下方的保護，避免製程中產生的應力造成損傷，並與背板緊密結合，強化模組的絕緣性、防水與耐溫耐濕等性能，進一步延長模組的使用壽命。然而，傳統熱固型 EVA 在封裝後的交聯結構，使模組難以拆解。這不僅增加廢棄模組的處理困難度，也可能在回收過程中產生環境污染物，對未來的循環經濟構成挑戰。若無法從材料與結構設計上進行創新，勢必將影響產品的永續性與市場競爭力。為解決上述問題，工研院從源頭著手，研發可兼容現有製程設備的創新材料與結構，無需更換生產流程，即可協助模組或材料製造商提升產品的可回收性與環境友善程度，同時增強其在市場中的競爭力與實用性。

工研院材化所的創新材料與結構設計，成功導入循環經濟的理念，研發出「可拆解太陽能模組」，為全循環太陽能模組提供了一個新解決方案。這款可拆解封裝膜採用特殊的熱固與熱塑複合材料（Thermoplastic Elastomer, TPE），如圖 5 所示。透過溫度調控，能夠有效分離模組各層材料，高價值材料如矽晶片、玻璃及高純度銀的完整回收。新模組不僅不會增加製程工序或成本，還能使太陽能模組更具綠色能源特性，並建立太陽能產業的全循環路徑。目前，可拆解太陽能模組已獲得德國萊因（TÜV Rheinland）頒發的臺灣首張國際電工委員會（International Electro Technical Commission, IEC）證書，第二代可拆解模組也已通過樹德（TÜV SÜD）認證（圖 6）。此外，此模組還通過國內標準局的自願性產品驗證（VPC），其驗證標準比 IEC 更為嚴苛（圖 7）[16]。

本技術與法國 CEA Liten 合作於法國 Cadarache 建置 6kW 高日曬嚴苛場域驗證。CEA Liten 為法國原子能和替代能源委員會 CEA Tech 所屬之三大研究機構之一，主要負責新型能源暨奈米材料研究，涵蓋太陽能系統價值鏈，從材料、電池到模組系統。

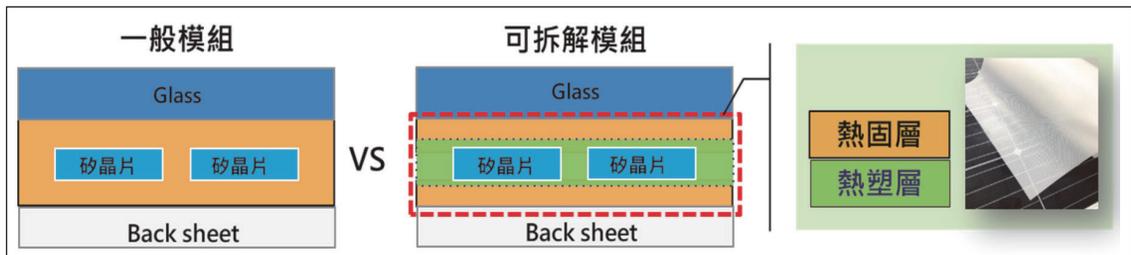


圖 5 可拆解太陽能模組的特殊結構設計

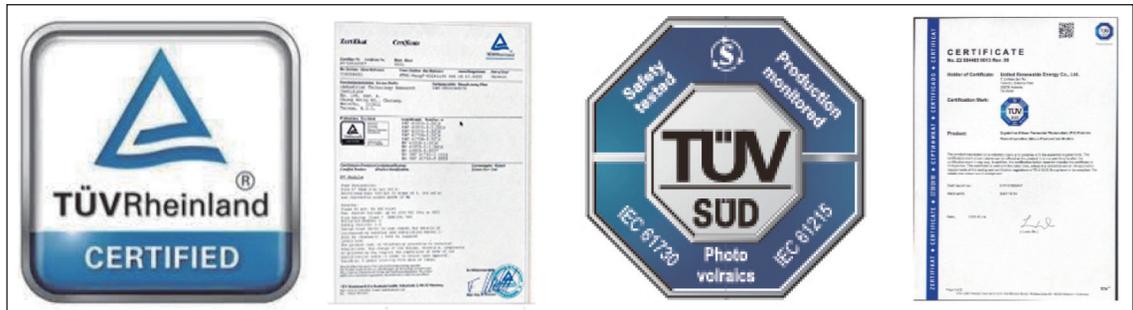


圖 6 TÜV Rheinland & TÜV SÜD 認證

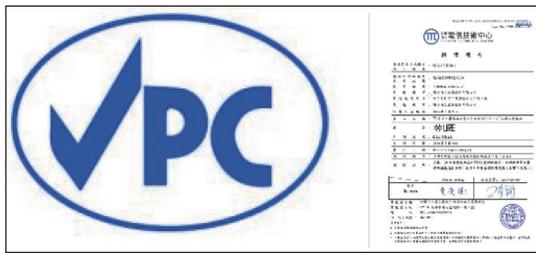


圖 7 國內標檢局 VPC 認證

Cadarache 屬地中海型氣候，日照強烈，夏季受熱浪影響溫度高達攝氏 39° 以上，冬季寒冷會有霜凍。全年日夜溫差大，對模組具有冷熱衝擊性及強烈日照曝曬影響，挑戰可拆解模組之熱塑型材料的耐候性，完成一年期的實場測試及分析，確立模組多樣化耐候適應性，提升國外系統商採用信心並提升品牌口碑，為國內廠商帶入歐洲國際市場(圖 8)。此外，亦針對可拆解模組進行生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA)，以確立其在減碳方面的效益，並藉此開拓循環減碳的新商機和利基市場。

可拆解模組的設計源自於熱固 + 熱塑雙層結構，其中 TPE 可在加熱時軟化，使電池串列與玻璃得以分開來，並且保持太陽能

電池片的完整性。傳統模組如果利用高溫法來進行回收處理時，EVA 在加熱時醋酸基分解變成醋酸氣體，此時由於電池串列被 EVA 牢牢的包覆固定著，氣泡無法排出，擠壓電池片造成破裂，甚至玻璃也可能造成破裂，使得材料混雜不易處理 (圖 9)。可拆解模組在熱裂解回收時，TPE 會優先軟化包覆住電池串列成為一個緩衝保護層，當 EVA 產生氣體形成氣泡時，軟化的 TPE 層可吸收壓力，避免壓力直接傳遞到太陽能電池片上，生成的氣泡累積聚集後會沿著玻璃板與 TPE 的介面朝向邊緣移動，最後由模組邊緣逸出。

當可拆解太陽能模組汰役後，可經由物理拆解分離鋁框、接線盒及背板，透過熱解回收與綠色濕法有價金屬提取技術，讓廢棄模組回收再生，不僅可將材料回用到太陽能產業使用，廢棄量也大幅降低至 1/100。可完整回收高清淨度的再生矽晶片或是高純度矽材 (~6N8)，與高純度銀化合物；同時玻璃面板也可完整保留，可回用生產太陽能模組或可加工玻璃板應用，整體模組材料的回收率 92% 以上，達到 PV to PV 永續循環利用 (圖 10)。



圖 8 法國 Cadarache 建置 6kW 高日曬嚴苛場域驗證

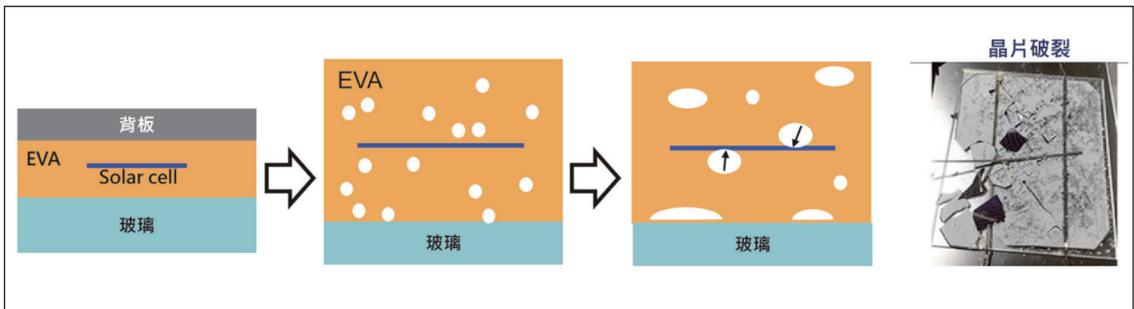


圖 9 傳統模組熱解法造成玻璃、電池片破裂

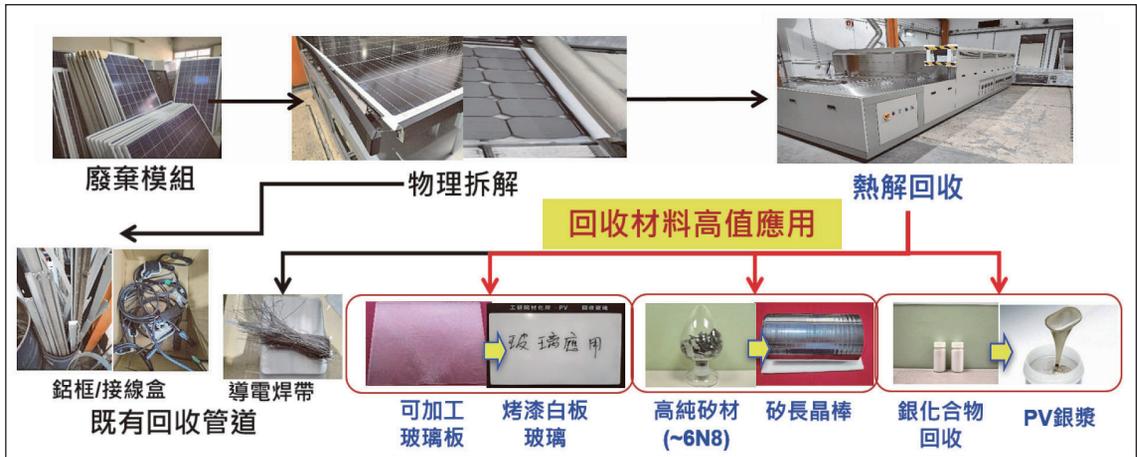
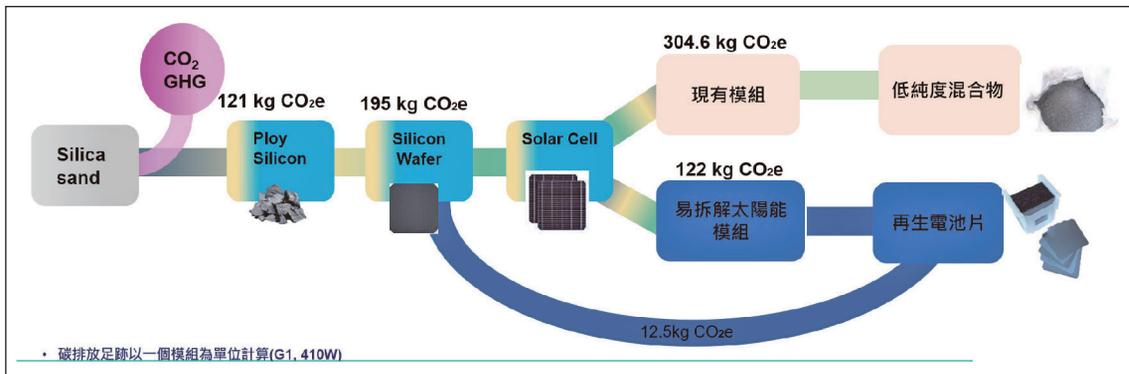


圖 10 可拆解太陽能模組拆解流程

四、再生矽材料：降低碳排、強化自主原料供應

太陽能產業在模組製造生產過程上，一直以來被視為高碳排放的產業，矽原料的生產與矽電池片的製造是主要的碳排放來源。矽電池片從來源採礦、熔煉、長晶等都屬於高碳排放量的製程，太陽能模組總碳排放的 64% 是來自於矽晶片的生產，可謂是減碳的關鍵。而可拆解太陽能模組的開發讓太陽能模組有別於傳統

廢模組處理方法，廢棄物可循環再製成為新的太陽能模組材料－再生矽晶片／再生矽材料，可再次回到模組製造端使用。新模組回收可減少 99% 光電模組廢棄量，若矽晶片回收後完整再生，碳排放僅原生矽晶片生產的 0.4%，若再生矽晶片直接導入太陽能電池生產線使用，如此太陽能模組可降低 64% 的製造碳排放；或者，再生矽晶片作為長晶 50% 原料添加，也可為太陽能模組降低 20% 的製造碳排放，同時降低太陽能模組製造時的碳排放（圖 11）。



• 碳排放足跡以一個模組為單位計算(G1, 410W)

圖 11 可拆解模組減碳效應



由於臺灣並沒有生產這些原物料，絕大多數需要進口，透過回收方式，可降低原物料開採需求，替代臺灣產業所需之進口原物料，相較傳統模組，大幅降低進口原料的依賴提供低碳解決方案。可拆解模組的減碳效應不只有綠能發電，其模組循環再製亦可省下 50% 以上的碳排放量，讓綠能更綠能，為產業界解決未來回收及資源短缺的難題。

五、建構國產綠能供應鏈，共築太陽能循環新生態

為推動可拆解模組技術在產業端的落實，工研院材化所攜手國內材料大廠三芳化學，協助其建立太陽能封裝膜的專業生產

線，涵蓋從製程開發、量產製造到品質控管，並確保產品能因應不同模組廠的需求。在工研院的技術輔導下，這項可拆解封裝膜已順利導入聯合再生、安集、元晶等國內主要模組製造商的產線，完成模組製作並通過量產測試（圖 12）。更進一步技轉給聯合再生與循旭科技，成功建立起台灣自主可控的可拆解太陽能模組產業供應鏈。

2024 年，工研院於中興院區 77 館、79 館以及六甲院區 PMC，建置全台首座可拆解模組示範場域，總裝置容量達 403kW。經過一年以上的實際運轉，累積發電量達 532MWh，年減碳效益高達 262 公噸，相當於每年種植 26,500 棵榕樹（圖 13）。可拆

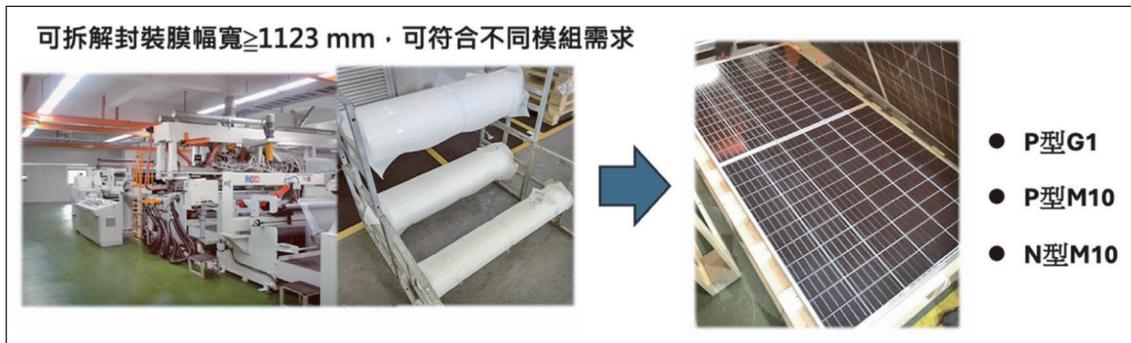


圖 12 可拆解封裝膜導入模組生產線



圖 13 全台首座可拆解太陽能模組示範場域



解模組不僅展現綠色創新的技術優勢，也獲得國內產業界的高度支持與認同，正積極攜手進軍國際市場。這項來自台灣的獨特創新技術，未來可望為台灣綠能產業注入全新價值，成為提升國家品牌的重要推手。

六、結論

當全球加速邁向淨零排放之際，如何妥善處理即將退役的大量太陽能模組，已成為刻不容緩的課題。傳統模組的回收困境不僅牽動環境永續，也牽動產業競爭力與資源自主性。工研院結合國內產業力量，成功開發可拆解模組技術，不僅解決模組難以拆解、回收效率低的問題，更為太陽能產業提供一條高效、低碳的永續發展之路。太陽能發電原本為潔淨能源，但唯有從模組設計、生產到廢棄處理，皆納入循環經濟與減碳考量，才能讓綠能真正落實永續。透過從材料設計開發到案場的建置，台灣正逐步建構起屬於自己的綠能循環體系。未來，隨著可拆解模組技術持續優化並拓展至國際市場，將有助於推動全球太陽能產業從「一次性使用」走向「資源再生」，不僅守護地球環境，也為台灣在國際綠能版圖中奠定關鍵地位。

參考文獻

- IRENA, "END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar Photovoltaic Panels", IRENA Publications, 2016.
- IEA, "Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task12 Countries", IEA Publications, 2022.
- Walzberg, J., Carpenter, A. & Heath, G.A, "Role of the social factors in success of solar photovoltaic reuse and recycle programmes", Nat Energy 6, 913–924, 2021.
- Rystad Energy, "Reduce, reuse: Solar PV recycling market to be worth \$2.7 billion by 2030", September, 2023. (<https://www.rystadenergy.com/news/reduce-reuse-solar-pv-recycling-market-to-be-worth-2-7-billion-by-2030>)
- European Union, "Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE)", 2012.
- IEA, "Status of PV Module Take-Back and Recycling in Germany", Report IEA-PVPS T12-27:2024, IEA Publications, 2024.
- Z. Ngagoum Ndalloka et al., "Solar photovoltaic recycling strategies Solar Energy", 270 (2024) 112379, DOI: 10.1016/j.solener.2024.112379
- Fraunhofer ISE, PRESSEINFORMATION 7, February 2022.
- ROSI SOLAR: (<https://www.rosi-solar.com/news/rosi-is-selected-by-soren-to-recycle-photovoltaic-modules-in-france>)
- Department of Ecology, State of Washington, "Solar Panels": (<https://ecology.wa.gov/waste-toxics/reducing-recycling-waste/our-recycling-programs/solar-panels>)
- US Department of Energy, Office of energy efficiency & renewable energy, "Solar Energy Technologies Office Photovoltaics End-of-Life Action Plan", DOE/EE-2571, March 2022.
- Solarcycle: (<https://www.solarcycle.us/>)
- 日本環境省“再生可能エネルギー 電設備の廃棄・リサイクルに係る現状及び課題について”，令和5年4月。
- The Japan Times, "Disposal of used solar panels emerging as challenge in Japan", (<https://www.japantimes.co.jp/news/2025/01/05/japan/japan-used-solar-panel-disposal/>)
- 日本太陽光電模組回收技術解析，工業材料雜誌 381期 2018/09
- 李宗銘、蘇俊璋，“新世代易拆解循環太陽能面板關鍵材料技術”，永續循環經濟 2024，社團法人永續循環經濟發展協進會，2024。
- 行政院環境部資源循環署，廢太陽光電板回收處理說明，2024，(<https://pvis.moenv.gov.tw/pvis/info/Plan>)
- 陳靜珊、宋敬、許祥瑞，“塑造永續商業模式：永續材質圖書館”，永續循環經濟 2024，社團法人永續循環經濟發展協進會，2024。
- Hsieh, H. H., Chen, S. H., Lai M. T., Huang C. P., Kuo C. W., Kuan T. M., Yu, C.Y., "Methodology for evaluating solar module encapsulant materials", 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 719-722, 2021.