



經濟部工業局 109 年度
產業循環經濟整合推動計畫

國外資源循環經濟關鍵技術
評估報告
(定稿版)

中華民國 109 年 11 月

目 錄

	頁次
一、前言	1
1.1 循環經濟的定義	1
1.2 循環經濟對廢棄物處理及資源化之重要性	3
二、產業特性與發展趨勢	5
2.1 產業簡介及主要製程特性	5
2.2 目前國內主要的應用案例	13
2.3 面臨問題及未來發展方向	15
三、廢電子化學品—廢酸回收及資源循環技術案例	20
3.1 廢硫酸回收技術案例	20
3.2 廢磷酸回收技術案例	32
3.3 廢氟酸回收技術案例	36
3.4 強酸化學物質危害預防	43
3.5 廢電子化學品-廢酸資源循環技術評析彙整	45
四、廢太陽光電模組回收及資源循環技術案例	48
4.1 機械法回收技術案例	51
4.2 化學處理法回收技術案例	59
4.3 熱裂解法回收技術案例	62
4.4 廢太陽光電模組回收及資源循環技術案例評析彙整	67
五、稀土金屬回收及資源循環技術案例	70
5.1 發光材料資源化技術案例	74
5.2 拋光研磨材料資源化技術案例	83
5.3 永磁材料資源化技術案例	59
5.4 稀土金屬回收及資源循環技術評析彙整	96
六、結語	100
七、參考文獻	103

圖 目 錄

圖 1.1-1 經濟循環企業轉型路徑圖	2
圖 2.1-1 半導體產業鏈結構圖.....	7
圖 2.1-2 平面顯示器產業鏈結構圖	8
圖 2.1-3 觸控面板產業鏈結構圖	9
圖 2.1-4 LED 照明產業鏈結構圖.....	10
圖 2.1-5 太陽能產業鏈結構圖.....	11
圖 2.1-6 電腦及週邊設備產業結構圖	11
圖 2.1-7 電動車產業結構圖.....	13
圖 3.1-1 乾法再生製程流程圖.....	21
圖 3.1-2 濕法再生製程流程圖.....	21
圖 3.1-3 杜邦公司 MECS SAR 烷基化廢酸再生製程流程.....	22
圖 3.1-4 托普索 WSA 烷基化廢硫酸再生製程流程	24
圖 3.1-5 托普索公司 VK-W 系列轉化觸媒.....	25
圖 3.1-6 P&P SAR 製程流程圖	27
圖 3.1-7 P&P SAR 濕法硫酸再生工廠	27
圖 3.1-8 杜邦 SULFOXTM 濕法製酸技術流程圖	29
圖 3.1-9 ERSATM 高效廢酸再生技術流程圖	31
圖 3.2-1 三和油化工業公司混酸廢液化學處理技術程序	33
圖 3.2-2 再生磷酸製成磷酸鹽肥料	34
圖 3.2-3 廢磷酸製成磷酸鈉製造流程	34
圖 3.3-1 ORGANO 公司流體化床結晶處理技術	37
圖 3.3-2 ORGANO 公司含氟廢水之處理反應器	38
圖 3.3-3 ORGANO 公司商業模式示意圖	39
圖 3.3-4 三菱化工公司氫氟酸回收系統流程圖	40
圖 3.3-5 佐倉公司氫氟酸回收系統流程圖	41
圖 3.3-6 Beta 混酸回收流程圖	42
圖 4-1 矽晶型太陽能光電模組結構	49
圖 4-2 太陽能光電模組資源循環流程與物質	50

圖 4.1-1 機械法回收流程圖.....	52
圖 4.1-2 日本三菱材料公司太陽光電模組回收與資源循環流程	53
圖 4.1-3 RTJ 破碎風選技術處理裝置	54
圖 4.1-4 日本 RTJ 公司太陽光電模組回收與資源循環流程.....	54
圖 4.1-5 Harita Metal 公司濕式比重分選回收處理裝置	55
圖 4.1-6 NPC 熱刀分離技術回收處理裝置.....	56
圖 4.1-7 NPC 熱刀分離法回收技術.....	57
圖 4.1-8 Veolia 公司破碎渦流法回收技術	58
圖 4.1-9 Reling 公司渦流與光學分選技術處理後產品.....	59
圖 4.2-1 東邦化成化學處理法流程圖	60
圖 4.2-2 化學處理溶劑溶解 EVA 機制圖.....	61
圖 4.2-3 First Solar 公司化學處理法流程與產品照片.....	62
圖 4.3-1 日本新菱公司熱裂解處理法流程圖	63
圖 4.3-2 Accurec 公司真空感應爐熱裂解處理法流程圖	64
圖 4.3-3 Accurec 公司裂解處理法產品照片	65
圖 4.3-4 Geltz 公司裂解處理技術流程圖.....	66
圖 4.3-5 Geltz 公司裂解處理設備模擬圖.....	66
圖 5-1 稀土元素周期表配置.....	82
圖 5-2 稀土元素分類.....	72
圖 5-3 臺灣稀土元素相關運作製程及涉及產業	73
圖 5-4 稀土元素物料流布概況.....	73
圖 5.1-1 以熱處理法浸濾和分離稀土元素流程示意圖	75
圖 5.1-2 螢光粉分離稀土元素流程示意圖	76
圖 5.1-3 Solvay 集團回收螢光粉的流程圖	78
圖 5.1-4 Solvay 集團回收螢光粉之設備	79
圖 5.1-5 Solvay 集團回收螢光粉之商業模式	80
圖 5.1-6 Osram 公司回收螢光粉的流程圖.....	82
圖 5.2-1 用於處理拋光污泥的流程示意圖	84
圖 5.2-2 拋光設備流程圖.....	85
圖 5.2-3 廢漿液凍融分離回收程序流程圖	86

圖 5.2-4 廢漿液自然沉降及凍融程序之情形	86
圖 5.2-5 檢查員依標準檢視玻璃表面精度之情形	87
圖 5.2-6 以再生材料與全新材料進行研磨拋光之比較情形	88
圖 5.3-1 日本三和油化工業公司稀土金屬回收資源循環流程圖	90
圖 5.3-2 回收而成之氧化釹、鎢結晶成品	90
圖 5.3-3 氫爆(HD)技術示意圖	92
圖 5.3-4 以氫氣萃取 Nd-Fe-B 方式示意圖	92
圖 5.3-5 以磁性廢料氫處理技術製造 Nd-Fe-B 流程示意圖	93
圖 5.3-6 GEOMEGA 公司以 ISR 技術回收磁體實驗設備示意圖	95

表 目 錄

表 2.1-1 廢棄物來源及產業現況	6
表 2.2-1 國內廢酸再利用現況.....	13
表 2.2-2 國內太陽能光電板處理方式現況	14
表 2.3-1 廢酸再利用量及產生量統計	16
表 2.3-2 廢太陽光電模組再利用量及產生量統計	17
表 2.3-3 含稀土金屬廢棄物產生量統計	17
表 3.1-1 生產 1 萬公噸/年之乾法硫酸技術與濕法硫酸技術的比較	28
表 3.5-1 廢電子化學品-廢酸純化及資源循環技術評析	46
表 4-1 太陽能光電模組成分.....	49
表 4-2 矽晶型太陽能光電模組回收應用途徑	51
表 4.4-1 廢太陽光電模組回收及資源循環技術評析	68
表 5.3-1 以 ISR 技術每日生產 1.5 公噸產品的經濟效益評估	95
表 5.4-1 稀土金屬回收及資源循環技術案例彙整	97

一、前言

工業革命以來，人們一直採用線性的生產消費模式：從自然環境開採原物料後，加工製造成商品，商品被購買使用後就直接丟棄。工業製程和人們的生活方式不斷的消耗著有限的資源，製造商品後，再經掩埋或焚燒處理廢棄物。但面臨人口增長、高度都市化、供應鏈全球化、氣候變遷、自然生態惡化、大量廢棄物等各種問題的嚴重性急遽升高，且隨著原物料需求持續增加、開採成本持續成長，價格將會持續攀升，產業採購原物料的成本與風險將提高，降低傳統製造業的競爭力。不論是經濟、環境或社會等面向，各界都必須及早因應此挑戰。循環經濟與線性經濟造成的資源衰竭截然不同，循環經濟是建立在物質的不斷循環利用上的經濟發展模式，形成「資源、產品、再生資源」的循環，使整個系統產生極少的廢棄物，甚至達成零廢棄的終極目標。在循環經濟中，我們學習大自然的法則「只有放錯地方的資源，沒有真正的廢棄物」，進而從根本上解決經濟發展與環境衝擊的矛盾。

本評估報告針對廢電子化學品-廢酸回收及資源循環技術、太陽光電模組回收及資源循環技術、稀土金屬回收及資源循環技術進行技術及案例評估。期協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值，藉由國外關鍵循環經濟技術之資料蒐集及國外先進技術引進，推動國內潛力廠商技術升級。

1.1 循環經濟的定義

「循環經濟(circular economy)」的概念是皮爾斯和圖奈(Pearce & Turner)在「自然資源與環境經濟學」書中首次提出，其目的是建立永續發展的資源管理架構，使經濟系統成為生態系統的組成部分，即建立「經濟與環境

和諧的條件」。傳統經濟是一種由「資源—產品—污染排放」單向流動的線性經濟，而循環經濟是要求把經濟活動組織成一個「資源—產品—再生資源」的回饋式流程，因此「循環經濟」可視為人類經濟活動中的靜脈產業，在有限的資源中，形成不可或缺的經濟活動。

又「循環經濟」是一個資源可恢復且可再生的經濟和產業系統，相較於線性經濟中產品「壽終正寢」的概念，「循環經濟」使用再生能源、拒絕使用無法再利用的有毒化學物質，藉由重新設計材料、產品、製程及商業模式，消除廢棄物。重視資源使用效率(resource efficiency)，設法以更少的資源來創造更多的價值，確保地球有限的資源能以循環再生、永續方式被使用。

像大自然一樣生生不息的經濟體系可以分為兩種循環(如圖 1.1-1)。所有資源皆可分別被納進生物與工業兩種循環，並在其中生生不息地被使用，消除廢棄物的概念。



資料來源：循環台灣基金會網站，<https://www.circular-taiwan.org/ceintro>。

圖 1.1-1 經濟循環企業轉型路徑圖

生物循環係指產品由生物可分解的原料製成，產品可優先進行層級應用(Cascades)，儘可能發揮最高價值。無法應用之「生質原料」經過生化原料萃取(生物精煉)、沼氣、堆肥等程序後，可安全的回歸生態圈作為養分。以循環經濟概念的使用農業性資源，是發展農、林、漁、牧相關產業相當重要的依據。

工業循環係指化合物、合金等生物不可分解之人造物質，可透過依序按照維修/產品共享/延長產品壽命、再使用/再分銷(二手)、再製造/翻修、回收再利用等程序，讓產品儘可能以最高價值的方式保留在人造系統中，不隨意散落到大自然中，且更有效率地利用能、資源。循環經濟的成功，更需要仰賴每個環節的配合。如果沒有系統性的配合，也沒有一個產品可以自己獨立「循環」。而這之中，每一個環節都是商機，都是一個創新的機會。

1.2 循環經濟對廢棄物處理及資源化之重要性

我國循環經濟產業之形成已具一定規模，由早期廢棄物管制逐步進展到產源管理，並採用使用者付費制度，推動垃圾減量、資源回收及生產者延伸責任，創造廢棄物再利用比率超過 80% 以上之成功經驗；但近年來在市場自由競爭及國內產業外移之情勢下，面臨物料來源供應不足之問題，造成部分業者產能萎縮之情形。

而目前國內資源循環產業多為中小企業，對於組成複雜、需高層次技術的有價資源，常因技術研發能力不足或資金缺乏，常僅止於中低品位的純化回收，無法進行更高的精煉以創造更高的價值，反將含高價之再生資源送至國外廠商精煉或純化，也導致資源循環產業發展受到限制。

此外，資源循環產業囿於國內市場規模，反觀鄰近亞太地區新興國家

隨著經濟的成長及人口的增加，廢棄物等環境污染問題有日益惡化，循環經濟之發展仍在萌芽階段，對於我國資源循環業者具有開發之契機，可協助業者組成策略聯盟，例如成立廢電子物品資源循環產業策略聯盟、結合民生消費端之廢電子資訊物品的回收商及拆解處理業、事業生產端之含稀貴金屬電子廢料的清除業與再生處理業、環境保護端之再生衍生廢棄物的焚化/中間處理業與最終處置業等多方業者，彼此互補結盟，建立廢電子物品回收、清除、拆解、再生、處理一條龍的資源循環產業鏈結，整合聯盟廠商集體的能​​量，除拓展海外市場商機，並善盡地球村一員之責任。因此循環經濟對於廢棄物處理及資源化再利用是不可或缺的一環，因為若廢棄物經由資源循環關鍵技術處理之後，不僅可以永續再利用，亦可見其對資源化再利用之重要性。

目前國內對於廢電子化學品-廢酸、廢太陽光電模組及含稀土金屬廢棄物等資源循環技術較為欠缺，對於組成複雜、需要高技術層次的有價資源常僅止於中低層級的純化回收，無法進行更高的精鍊以創造價值。因此目前台灣資源循環業者在設備或技術方面，與歐美日等國比較，尚有需向先進國家學習之處。鑑於上述背景，乃針對國外資源循環關鍵技術或設備進行蒐集評估，期望藉由本評估報告提供資源循環廠商引進或選用合適之國外先進技術或設備，協助國內潛力廠商技術整合升級，使得廢棄物資源回收與再生利用得以永續，並協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值。

二、產業特性與發展趨勢

資源回收首要考量為經濟性，而經濟性考量可從資源廢棄物本身所含的有價物質與量，與資源化產品的市場價格兩方面來評估。就廢棄物所含的有價物質與量而言，隨著產業製程技術的進步或更新，所產生的廢棄物中所含有價物質相對地減少或替換，使得可資源回收廢棄物價值與經濟性亦隨之變動。如以往印刷電路板上所使用的貴金屬材料已有逐漸下降的趨勢；另外，如光電業衍生新興廢棄物中稀有金屬或特殊化學品，可資源回收價值也受到良性影響。一般而言，資源廢棄物回收後大部分成為替代原料，而替代原料的價格往往較易受到市場影響，端賴資源循環方式而定。

本評估報告旨在協助資源循環產業提升競爭力及創造新價值，期藉由國外關鍵技術之資料蒐集或國外先進技術引進，未來透過技術媒合方式，協助國內潛力廠商進行技術升級。本評估報告依據 109 年 3 月 11 日召開專家諮詢審查會議結論，以廢電子化學品-廢酸回收及資源循環技術、太陽光電模組回收及資源循環技術及稀土金屬回收及資源循環技術，進行技術資料蒐集及評析。

2.1 產業簡介及製程特性

有關廢酸回收及資源循環技術、太陽光電模組回收及資源循環技術、稀土金屬回收及資源循環技術中的廢棄物，除廢酸由我國政府過去在各產業相關製程與產品末端廢棄物處理已有初步成果外，廢太陽光電模組及稀土金屬廢棄物之回收及處理尚在起步階段，但要落實循環經濟仍有很大的進步空間。茲針對我國上述三種廢棄物來源之產業發展循環經濟現況說明如表 2.1-1 所示，其產業現況及主要製程特性概述如后：

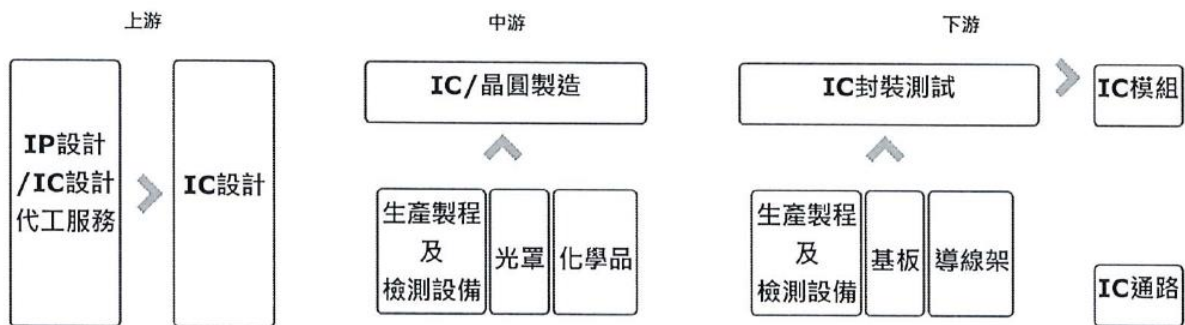
表 2.1-1 廢棄物來源及產業現況

廢棄物來源類別	產業別	產業範圍	循環經濟困境	既有循環經濟方案
廢酸	光電半導體業	<ul style="list-style-type: none"> 事業在蝕刻製程產生之酸性蝕刻液。 	<ul style="list-style-type: none"> 透過資源化後，將其轉成一定比例的工業級硫酸或更高階的電子級硫酸，目前以工業級硫酸居多。 	<ul style="list-style-type: none"> 工業用途或作為廢水水質處理藥劑使用。
	積體電路半導體業、液晶顯示面板業與太陽能產業	<ul style="list-style-type: none"> 在製程中利用高純度氫氟酸或氫氟酸混酸進行 IC、TFT-LCD 面板與太陽能矽晶片濕式蝕刻或進行表面清洗，透過清洗水或洗滌塔洗下排入廢酸收集系統，產生含氟廢水。 	<ul style="list-style-type: none"> 氫氟酸廢液導入廠內廢水處理設施，大幅增加污泥產量。 含氟污泥應用於水泥添加時，對於既有水泥窯傳統設計有負荷不足的隱憂。 氟化鈣污泥去化受阻，廢氫氟酸委託處理量增加。 	<ul style="list-style-type: none"> 氟化鈣污泥再製水泥副原料、人造螢石。 添加鋁化鈉的方式製作成六氟鋁酸鈉。
含稀土金屬廢棄物	電燈泡、燈管、光學玻璃、液晶顯示面板、永磁馬達及電子零組件製造業	<ul style="list-style-type: none"> 各行業產出之顯示器、光學玻璃拋光粉、電漿電視、日光燈與 LED 燈具。 各行業產出之永磁馬達及磁碟機之強力磁鐵 	<ul style="list-style-type: none"> 回收螢光粉及拋光粉後，未有更好的技術進行回收稀土元素。 永磁馬達及磁碟機之強力磁鐵尚未有回收機制。 	<ul style="list-style-type: none"> 處理廠經破碎及分離程序，回收玻璃類、金屬類（如銅、鐵、鋁）、螢光粉、水銀等具有再生利用價值的物質。
廢太陽光電模組	電子零組件製造業	<ul style="list-style-type: none"> 太陽能液晶面板製程、太陽能模組製程或太陽能電池製程產生之廢太陽光電模組。 	<ul style="list-style-type: none"> 來自製程之廢太陽能液晶面板或廢太陽光電模組，目前僅作堆置或拆解，無法有效再利用。 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽能液晶面板廢玻璃回收。
	各行業	<ul style="list-style-type: none"> 各行業損壞之太陽能光電板。 	<ul style="list-style-type: none"> 目前環保署輔導國內廢業者署機械法處理，尚缺高端技術廠商，短期內僅能考慮採境外處理（如德國、日本）。 	<ul style="list-style-type: none"> 已有廠商進行回收，如東鉦國際、金益鼎、樺智等。

資料來源：本計畫彙整。

1. 半導體業：

半導體產業鏈上游為 IP 設計及 IC 設計業，中游為 IC 製造、晶圓製造、相關生產製程檢測設備、光罩、化學品等業，下游為 IC 封裝測試、相關生產製程檢測設備、零組件（如基板、導線架）、IC 模組、IC 通路等業。台灣擁有完整的半導體產業聚落及專業分工，IC 設計公司在產品設計完成後，委由專業晶圓代工廠或垂直整合模廠(Integrated Design and Manufacture, IDM)（整合型半導體廠，含 IC 設計、製造、封裝、測試及最終銷售）製作成晶圓半成品，經由前段測試，再轉給專業封裝廠進行切割及封裝，最後由專業測試廠進行後段測試，測試後之成品則經由銷售管道售予系統廠商裝配生產成為系統產品。其半導體產業鏈結構如圖 2.1-1 所示。



資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

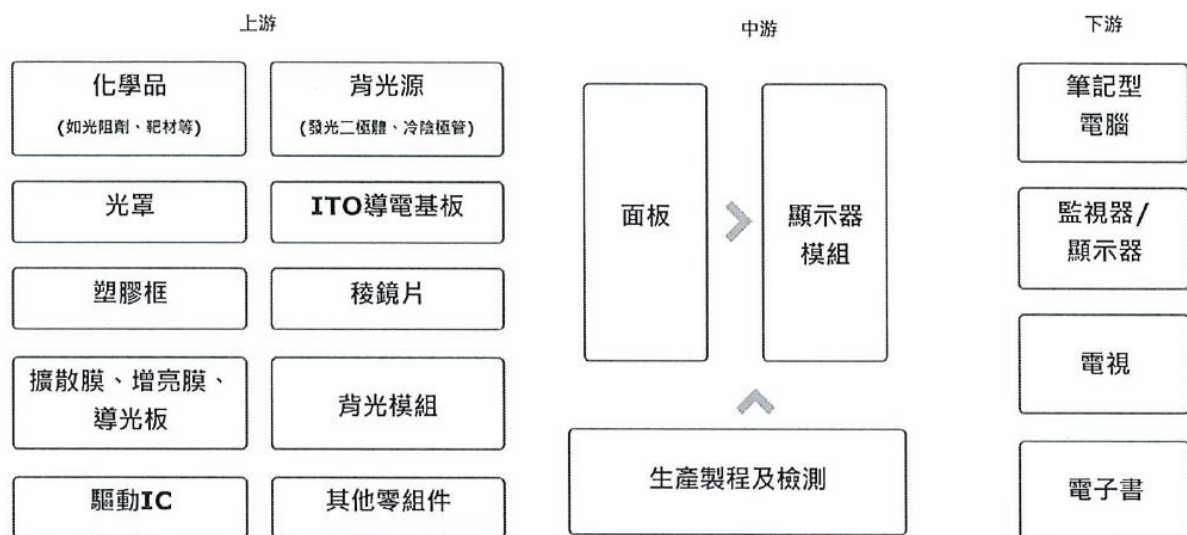
圖 2.1-1 半導體產業鏈結構圖

半導體製程是由原料晶圓片經由不斷的重覆光學顯影（黃光製程）、蝕刻、薄膜沉積等步驟，最後經由封裝製造而成。原料晶圓片是將二氧化矽，經由電弧爐冶煉、多晶矽融解、單晶矽晶棒拉出、研磨、拋光、切片而製成。而 IC 製程主要為薄膜、微影與蝕刻三大部份。每一層電路都含此三部份，週而復始，一層層的建構上去。主要廢棄物有廢酸(硝酸、硫酸、氫氟酸等)、廢溶劑(異丙醇(Isopropanol, IPA)、丙酮、二氯甲烷、三氯甲烷、三

氯乙烷、去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑等)、蝕刻液、廢靶材、電子廢料、電鍍廢液(含鎳、錫鉛、錫、銀、金等)、錫鉛渣、廢離子交換樹脂等。

2.平面顯示器產業

我國平面顯示器產業之發展主流顯示技術為薄膜電晶體液晶顯示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display, TFT-LCD)。液晶顯示器產業鏈之上游包括化學品材料、背光源、光罩、ITO 導電基板、塑膠框、稜鏡片、擴散膜、增亮膜、導光板、背光模組、及驅動 IC 等零組件之供應商；中游則為液晶面板、顯示器模組組裝及相關生產製程與檢測設備之供應商；下游為平面顯示器各類應用產品如筆記型電腦、液晶監視器與液晶電視、智慧型手機等供應商。其平面顯示器產業鏈結構如圖 2.1-2 所示。主要廢棄物有廢酸(硝酸、磷酸、硫酸、氫氟酸等)、廢溶劑(IPA、丙酮、去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑等)、蝕刻液、廢靶材(含鈹廢料)、電子廢料、廢玻璃、拋光研磨粉及無機污泥等。

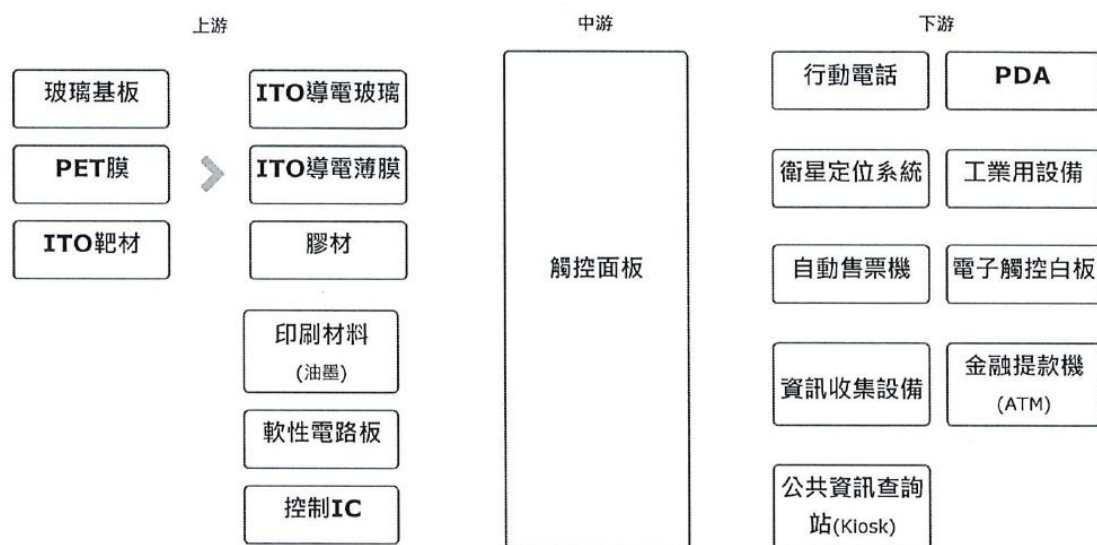


資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-2 平面顯示器產業鏈結構圖

3.觸控面板產業

觸控面板技術相當多元，依感應方式不同，可區分為電阻式、投射式電容、表面式電容、表面聲波式、紅外線式及光學式等，隨著 Apple 行動終端採用電容式觸控後，投射式電容觸控技術已廣泛被應用在智慧型手機及平板電腦，本文所述之觸控面板產業鏈以投射式電容觸控技術為主。其觸控面板產業鏈結構如圖 2.1-3 所示。主要廢棄物有廢酸(硝酸、磷酸、硫酸、氫氟酸等)、廢溶劑(IPA、丙酮、去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑等)、蝕刻液、廢靶材(含鈹廢料)、電子廢料、廢玻璃、拋光研磨粉及無機污泥等。



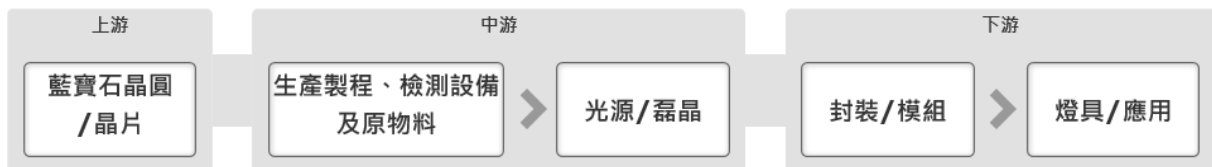
資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-3 觸控面板產業鏈結構圖

4. LED 照明產業

發光二極體（Light-Emitting Diode, LED）為一種半導體電子元件，可在電流驅動下將電能轉換成光的形態輸出，成為現代照明的光源之一，普遍用於照明燈具、螢幕背光或是顯示用途。LED 照明產業鏈上游為藍寶石晶圓及藍寶石基板供應商，中游為生產製程及檢測設備廠商，包括磊晶生成設備、LED 晶圓測試、挑檢設備、磊晶片與晶粒之供應商，下游為 LED 封裝、模組及 LED 燈具之供應商。其產業鏈結構如圖 2.1-4 所示。主要廢

棄物有廢酸液、廢溶劑(IPA、三乙二醇、丙酮等)、電子廢料、拋光研磨粉、螢光粉、切削液及含矽污泥等。



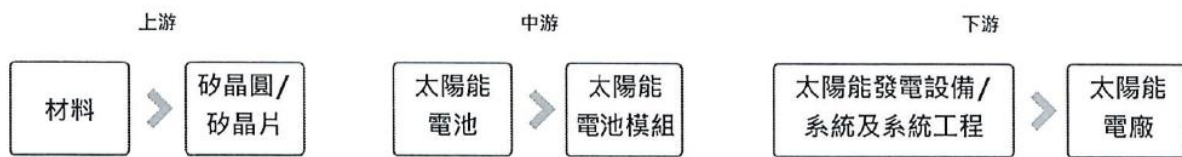
資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-4 LED 照明產業鏈結構圖

5. 太陽能產業

太陽能發電產業依技術可區分為矽晶、薄膜等兩大類，目前市場主流為矽晶太陽能電池，包含單晶與多晶兩種型態，共占約近九成市場；薄膜類包含：非晶矽薄膜、碲化鎘(CdTe)、銅銦鎳硒(CIGS)、染料敏化、有機薄膜以及新興的鈣鈦礦等型太陽能電池，因轉換效率仍較低，但具有美觀、可撓且弱光環境可發電、未來成本可快速下降之潛力等特性，約占一成以下之利基市場。

從產業鏈的角度來看，主流矽晶太陽能電池產業可劃分為上游之多晶矽材、晶錠／矽晶圓、中游之太陽能電池片、模組，以及下游之系統建置；此外，尚有周邊材料（包括玻璃、軟性基材、氣體、靶材、漿料、染料及電極材料等）及設備等相關產業；薄膜型太陽能電池製程較為簡化，僅有中游模組與下游系統產業。其太陽能產業鏈結構如圖 2.1-5 所示。主要廢棄物有廢矽晶頭尾料、廢石英坩堝、廢矽晶坩堝底料、矽晶圓破損片、泵浦潤滑油、電子廢料、廢溶劑(IPA、三乙二醇、丙酮等)、拋光研磨粉、螢光粉、切削液及含矽污泥等。



資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-5 太陽能產業鏈結構圖

6. 電腦及週邊設備產業

電腦及週邊設備產業鏈上游為零組件供應商，下游則主要由電腦終端應用產品及其他電腦週邊設備供應商組成。電腦及週邊設備產業上游產品項目複雜，主要零組件包括中央處理器、晶片組、面板、顯示器模組、記憶體、主機板、機殼、電源供應器、電池、散熱片、散熱模組、網路卡、顯示卡、輸出入模組、磁碟陣列儲存系統、鏡頭、光碟片、連接線、隨身碟、記憶卡讀卡機、多功能視訊卡等。其電腦及週邊設備產業鏈結構如圖 2.1-6 所示，其主要廢溶劑(IPA、丙酮等)、電子廢料、強力磁鐵、廢塑膠等。



資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

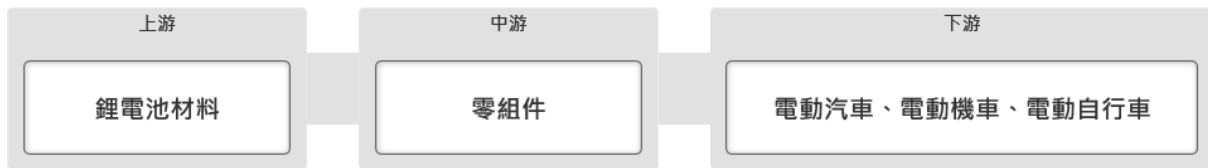
圖 2.1-6 電腦及週邊設備產業結構圖

7. 電動車產業

以電池為儲能及動力來源並由馬達驅動之車輛稱為電動車。電動車電力供給方式及所占的比例不同，可分為純電動車（Battery Electric Vehicle, BEV）、混合動力車（Hybrid electric vehicle, HEV）、插電式混合動力車（Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV）與增程式電動車（Range Extender Electric Vehicle, REEV）等類型，此外尚有可由車體自行產生能量的車輛類型如燃料電池車或太陽能電池車等。電動車輛產業鏈上游為電池材料之供應商，中游為電動車輛零組件之供應商（如大功率電池芯/模組、電池管理系統、動力馬達、電源供應器等），下游為電動汽機車、電動自行車之供應商。

電動車輛產業上游產品包含電池材料、馬達材料（如矽鋼片）、車體材料等，其中最關鍵的電池材料包括正極材料（如鈷酸鋰(LCO)、三元材料(NCM)、錳酸鋰(LMO)和磷酸鐵鋰(LFP)等材料）、負極材料（如人造石墨等碳系材料、銅箔等金屬化合物）、隔離膜與電解液等四大材料。電動車輛產業中游產品為電池芯/模組、電力元件/模組、電池/充電系統、動力馬達/模組、車電元件/模組、智慧車電系統等零組件、電池系統、電源供應器相關及其他週邊元件等。電動車輛產業下游產品包括電動大客車、電動汽車、電動機車及電動自行車、高爾夫球車等終端應用產品。

其電動車產業鏈結構如圖 2.1-7 所示，其主要廢棄物有廢溶劑(IPA、丙酮等)、廢電池相關正負極廢料(含鋰、鈷金屬片)、電子廢料、強力磁鐵、廢鋁等。



資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-7 電動車產業結構圖

2.2 國內主要應用案例

我國循環經濟產業之形成已具一定規模，由早期廢棄物管制逐步進展到產源管理，並採用使用者付費制度，推動垃圾減量、資源回收及生產者延伸責任，創造廢棄物再利用比率超過 80% 以上之成功經驗。

目前國內對於廢電子化學品-廢酸回收及資源循環技術、太陽光電模組回收及資源循環技術、稀土金屬回收及資源循環技術等，國內主要的應用案例概述如下：

1. 廢酸資源化

依據環保署「資源再利用管理資訊系統」統計廢硫酸、廢磷酸及廢氟酸之再利用狀況，彙整如表 2.2-1 所示。

表 2.2-1 國內廢酸再利用現況

類別	再生產品	廢棄物來源	用途	廠商
廢硫酸	再生硫酸	積體電路製造程序之硫酸廢水(C-0202 廢硫酸)	工業級硫酸	立光、普森環保、鴻成、達穎應材、浚鎰、盈昌
			電子級硫酸	強方
廢磷酸	再生磷酸	積體電路製造程序之磷酸廢水(C-0202 磷酸廢液)	工業級磷酸	立光、惠豐、台肥
廢氟酸	人造螢石	電子零組件製造、太陽能電池等行業之氟化鈣污泥(D-0902 氟化鈣污	煉鋼製程中的助熔劑	皓勝、台螢、立盈環保

		泥)		
	氟化鈣	半導體製造業或光電材料及元件製造業在廢水處理過程產生之氟化鈣污泥(R-0910 氟化鈣污泥)	水泥原料	台灣水泥、信大水泥、幸福水泥
	氟矽酸鈉、氟化鈉、氟鋁酸鈉	太陽能電池製造程序、積體電路製造程序及發光二極體製造程序之氫氟酸廢液(C-0202 氫氟酸廢液)	電解鋁工業之助熔劑、玻璃陶瓷製造之助熔劑	廣銘、達穎應材、惠豐、綠升國際

資料來源：本計畫彙整

另外，國內廠商環創源科技公司，將氨氮廢水與廢硫酸一併進行處理，再將產生之硫酸銨轉化成液氨應用的實績，產出的液氨已可達到電子級規格，使用液鹼法所產出之副產品硫酸鈉也達工業級可販售的標準，相關氨氮廢水處理及回收的方案皆可評估規劃，透過氨氮廢水資源化應用實績，達到循環經濟的目的。

2.太陽光電模組回收

現行廢太陽光電板傳統處置方式，係將鋁框拆除後全數進行破碎處理，部分進入焚化廠或掩埋場，部分採境外輸出處理。依據環保署「清除處理機構服務管理資訊系統」，就目前國內已設置 D-2528 廢棄太陽能光電板處理許可廠商共 3 家，彙整如表 2.2-2。環保署自 108 年度委託社團法人台灣太陽光電產業協會執行「廢太陽能光電板回收清除處理示範計畫專案工作計畫」，針對回收清除處理體系運作方式，目前進行規劃中。

表 2.2-2 國內太陽能光電板處理方式現況

廢棄物來源	處理方式	廠商
裝置使用後廢棄之太陽能光電板(D-2528)	拆解/破碎	東鉉國際、金益鼎、樺智

資料來源：本計畫彙整

3. 稀土金屬資源化

目前國內稀土元素之回收與再利用多併同稀土應用後之物品進行回收，如日光燈管之螢光粉，其含有部分之稀土元素如釷、鈾、鐳等，國內日光燈管之回收處理機構中台資源，於回收日光燈管時有一併回收螢光粉，作為後續生產日光燈時使用，但並未將螢光粉中之稀土元素予以分離純化。目前國內優勝奈米公司已著手研發稀土的回收解決方案，企圖解決稀土的供應壓力，目前已研發 UW-170 稀土金屬剝除藥劑，該方案具備環保無毒的特性，能夠快速的將稀土金屬從廢料中剝離出來，並已應用於中國大陸。

2.3 面臨問題及未來發展方向

目前國內廢廢電子化學品-廢酸資源循環技術、太陽光電模組回收及資源循環技術、稀土金屬回收及資源循環技術其廢棄物再利用量及產生量，依據環保署事業廢棄物管制中心統計資料，顯示廢酸及廢太陽能光電模組仍有資源再利用之空間(彙整如如表 2.3-1~2.3-3 所示)，但稀土金屬的回收再利用資料較為缺乏，有利於思考未來回收再利用之可行性。由於國內資源循環廠商多為中小企業，對於組成複雜、需要高技術層次的有價資源常僅止於中低等級的純化回收，無法進行更高的精煉以創造價值。因此目前台灣資源循環業者在設備或技術方面，與歐美日等國比較，尚有需向先進國家學習之處。鑑於上述背景，乃針對國外資源循環關鍵技術或設備進行蒐集評估，期望藉由本評估報告提供資源循環廠商引進或選用合適之國外先進技術或設備，協助國內潛力廠商技術升級，使得廢棄物資源回收與再生利用得以永續，並協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值。

表 2.3-1 廢酸再利用量及產生量統計

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用量 (公噸)	產生量 (公噸)	再利用率 (%)
A-7201	鋼鐵工業鋼材加工或浸置之廢酸液	106	7,014	17,461	40.2
		107	6,752	46,162	14.6
		108	9,653	54,094	17.8
A-9001	電鍍廢棄之氰化物電鍍液	106	105	1,440	7.3
		107	80	1,419	5.6
		108	105	1,265	8.3
A-9201	使用氰化物之電鍍程序清洗及汽提廢液	106	2,609	2,624	99.4
		107	2,434	2,418	100.7
		108	2,472	2,473	100.0
D-0902	無機性污泥	106	540,666	1,022,237	52.9
		107	561,710	1,140,016	49.3
		108	658,186	1,097,181	60.0
C-0202	廢液 pH 值小(等)於 2.0	106	218,942	253,649	86.3
		107	195,370	228,401	85.5
		108	203,326	235,552	86.3
R-0910	氟化鈣污泥	106	32,607	32,710	99.7
		107	30,052	29,996	100.2
		108	28,123	28,140	99.9
R-2501	廢酸性蝕刻液	106	101,699	101,723	100.0
		107	97,998	98,052	99.9
		108	88,599	88,638	100.0
R-2502	廢酸洗液	106	148,889	148,850	100.0
		107	161,074	161,408	99.8
		108	136,892	136,936	100.0

註：產生量=再利用量+貯存異動量，因此造成部分年度產率超過 100%。

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

表 2.3-2 廢太陽光電模組再利用量及產生量統計

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用量 (公噸)	產生量 (公噸)	再利用率 (%)
D-2528	裝置使用後廢棄之太陽能光電板	108	-	-	-
R-2411	廢矽晶	106	1,571	1,558	100
		107	756	796	95.0
		108	107	112	95.5

註：環保署自 108 年 5 月 9 日起新增廢太陽能光電板之廢棄物代碼，目前尚無統計資料。

註：產生量=再利用量+貯存異動量。

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

表 2.3-3 含稀土金屬廢棄物產生量統計

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	產生量(公噸)
A-8501	廢料回收產生之廢螢光粉	106	20
		107	15
		108	7
C-0172	含汞之廢照明光源（燈管、燈泡）（非屬公告應回收廢棄物者），且乾基每公斤汞濃度低於二百六十毫克者	106	181
		107	17
		108	14
C-0173	含汞之廢照明光源（燈管、燈泡）（非屬公告應回收廢棄物者），且乾基每公斤汞濃度達二百六十毫克以上者	106	215
		107	14
		108	106
D-0406	廢液晶(含)玻璃	106	7,498
		107	7,603
		108	6,761
D-0407	廢液晶面板	106	330
		107	428
		108	597
D-2402	不含汞之廢照明光源（燈管、燈泡）（非屬公告應回收廢棄物者）	106	1
		107	0
		108	0
D-2518	廢電動機	106	5
		107	6

		108	17
D-2627	其他以化學處理法（不含熱處理法）處理之混合五金廢料	106	4
		107	10
		108	13
D-2704	其他以熱處理法處理之混合五金廢料	106	16
		107	3
		108	1
R-1908	其他資訊產品廢棄物(主機板、硬式磁碟機、電源器、機殼、鍵盤等)	106	1
		107	0
		108	11
R-2404	廢乾電池	106	532
		107	805
		108	871

資料來源：1.環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報；2.含稀土金屬廢棄物再利用資訊較為缺乏。

台灣的經濟主要是出口導向，尤其以半導體為全球重要基地，但在大量製造的同時，也產生出大量的廢棄物。由於電機、電子等電器及終端 3C 產品不斷提升性能以刺激消費者購買，生產工廠的製程越趨複雜與精細，相關耗材、化學品等種類及成分亦不斷成長及複雜，必需在循環經濟的潮流下推動廢棄物再利用 (Re-Cycling)、再生 (Re-Generating)、再製造 (Re-Manufacturing) 等創新技術及商業模式，從原料、耗材、設備到製程與廢棄物循環鏈達到全循環及零廢棄，是台灣製造業轉型提升的必經課題。

歸納我國循環經濟之靜脈產業面臨的問題主要包括：1.經濟規模小，資金不足；2.技術未能創新突破；3.風險與管理無法與時俱進；4.遵守法令意識不足；5.仰賴補助心態未能調整；6.對市場變動應變能力不足。

有鑑於此，循環經濟的推動，則是解決此一問題的方法。國內產業目前於循環經濟的推動，在法規、經濟、市場等各方面尚面臨許多考驗與挑戰，需與跨部會合作及產官學研資源整合共同努力予以突破。建議政府應審視台灣在循環經濟上欲達到的目標與願景，規劃優先產業發展方向；另

需加強法規規範，以及研議獎勵配套，吸引資金進駐等。學研單位也須強化循環經濟原物料的開發、設計、生產再製，並導入新興商業模式，以帶動業界投入，衍生多元商業模式。企業也應善盡社會責任，集眾人之力面對挑戰與機會，創造出新興產業，讓循環經濟成為下一個新藍海。未來政府也應整合產業循環經濟專家、知識、技術等資訊，積極促進循環經濟產業技術合作、拓展商機，使資源有效利用創造資源最大價值。

三、廢電子化學品—廢酸回收及資源循環技術案例

半導體製造業是集合物理、電子、電機、光學、化學、機械、材料及管理科學的高科技工業，為電子工業的上游技術產業，電子業產品之競爭力強弱，受半導體技術的發展影響頗大。隨著電子資訊工業的蓬勃發展，使得該產業成長更加快速，對我國經濟發展有很大的貢獻，並且受到政府工業主管單位相當的重視。

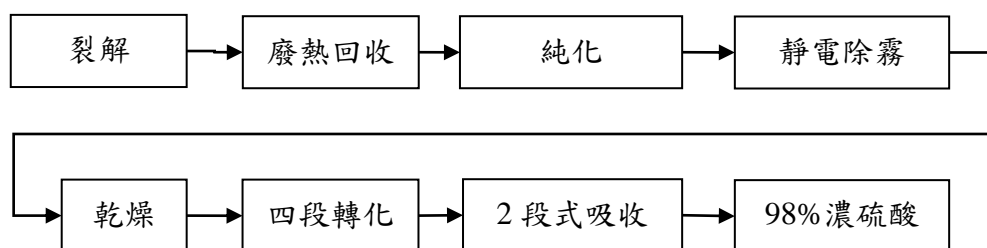
隨著技術之革新，半導體製造時所使用之酸鹼溶液、有機溶劑、特殊耗材之種類及數量均在增加之中，如何減少各廢類水排放成為主管機關與各工廠需要面臨之主要問題，目前強方科技公司進行電子級硫酸循環利用工廠建置，期望將國內半導體產業的廢硫酸回收後再製，減少廢酸排放，因此本報告進行國外廢酸回收與資源化技術蒐集與彙整，期望能提供國內產業參考。

3.1 廢硫酸回收技術案例

目前國際上主要採用廢硫酸再生製程包括：乾法再生(如：杜邦 MECS SAR 技術、中國石油集團公司(簡稱中石油)再生技術)，以及濕法再生(如：托普索公司 WSA 技術、奧地利 P&P 公司再生技術)。二項技術原理簡述如下：

乾法再生係指酸氣經乾燥後，在無水狀態下進入轉化器內轉化。將廢硫酸燃燒爐製程氣，經廢熱鍋爐回收餘熱後，進行 2 段式水洗純化，再經靜電除霧後進行乾燥，乾燥後的 SO_2 氣體在轉化器內經過 4 段或 5 段催化劑填充床層轉化為 SO_3 ，然後在吸收塔內先用水與 SO_3 反應成硫酸，再利用濃硫酸循環進行 2 段式吸收，產生 98% 的濃硫酸。由於在純化中需要水洗，

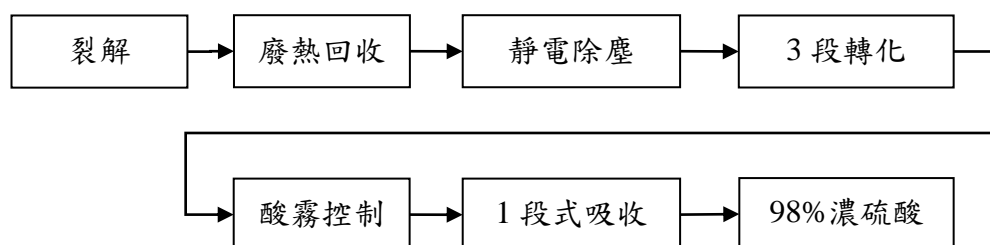
故會產生少量含 SO_2 的廢水。乾法再生製程流程如圖 3.1-1 所示。



資料來源：申鳳玉，烷基化廢硫酸再生工藝技術對比，當代化工，2016 年 11 月。

圖 3.1-1 乾法再生製程流程圖

濕法再生係指酸氣不經過乾燥，在有水狀態下進入轉化器內轉化。因此濕法再生製程係將燃燒爐製程氣，先經廢熱鍋爐回收餘熱後，進行靜電除塵，靜電除塵後的 SO_2 氣體在轉化器內經過 3 段催化劑填充床層轉化為 SO_3 。然後再進入酸霧控制系統，在酸冷凝器內進行冷凝吸收 SO_3 ，進而生成 98% 濃硫酸。濕法再生製程流程圖如圖 3.1-2 所示。



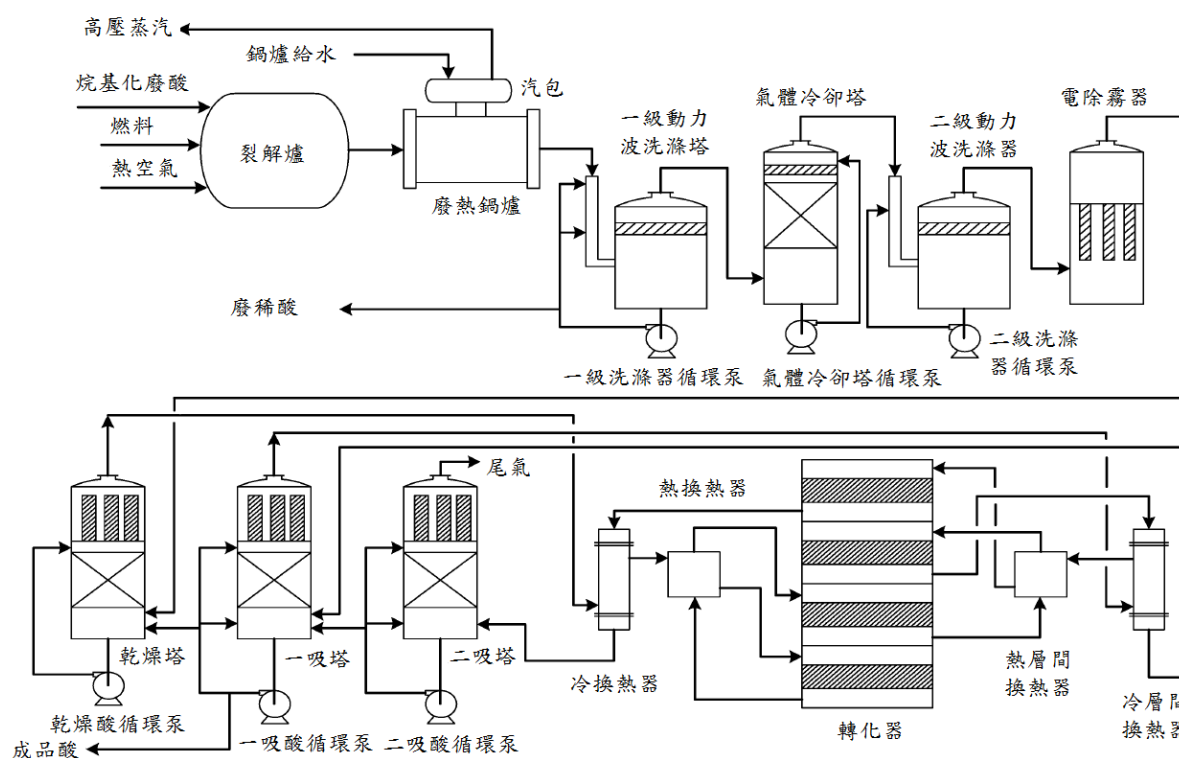
資料來源：申鳳玉，烷基化廢硫酸再生工藝技術對比，當代化工，2016 年 11 月。

圖 3.1-2 濕法再生製程流程圖

1. 美國杜邦公司 MECS SAR 乾法技術

杜邦公司 MECS SAR (Sulphuric Acid Regeneration, SAR) 乾法技術，係將含硫化合物的液體及氣體轉變為工業濃硫酸，採用兩段式水洗純化，去除廢酸中及裂解製程產生的各種雜質。此技術適用於各類廢硫酸的再生，

包括烷基化廢硫酸、乙炔製程產生之廢硫酸、70%以上其它廢硫酸。生產之濃硫酸濃度可達99.2%，亦可依業主要求生產93.5~98.5%的濃硫酸。中國中石油技術與杜邦公司技術雷同，可副產蒸汽，但能耗較大。杜邦公司MECS SAR製程流程，如圖3.1-3所示。



資料來源：鄧明，烷基化廢酸再生工藝簡述，硫酸工業，2016年12月。

圖 3.1-3 杜邦公司 MECS SAR 烷基化廢酸再生製程流程

SAR裝置流程包括4個製程單元：熱裂解、煙氣淨化、轉化和吸收。在熱裂解、轉化應過程中產生的熱能通常以高壓飽和蒸汽的方式回收，而飽和蒸汽的壓力可依據現場的需求以及經濟性進行優化；其他熱能可依現況以熱水或者其他流體之間的熱交換器進行回收。

熱裂解部分由一個裝配有燃料燃燒機和廢酸霧化器的裂解爐所組成，廢硫酸在接近1,000℃的高溫下被蒸發並分解成SO₂、H₂O和O₂，為有效提高SO₂產率，需針對燃料和空氣加以控制。常使用以天然氣、煉油廠

尾氣、輕燃料油或重燃料油作為燃料，但需增加空氣污染防治設施。

煙氣淨化部分具有兩個功能：去除氣體中的所有灰分或固體雜質，且降低水氣含量以達到所需要的酸濃度。通常煙氣淨化部分由4或5個不同的單元依次結合組成。第一個功能單元是隔熱洗滌塔，使用弱酸來飽和煙氣並將氣體溫度從約300℃降至80℃左右，同時脫除部分固體雜質。常使用孟莫克(MECS)動力波洗滌器(DynaWave®)，其優點是投資成本低、能源消耗低、固體脫除效率高以及維護成本低的最佳選擇。

第二功能單元為煙氣冷卻單元，在此單元中，過量的水蒸氣被冷凝下來，冷卻介質為迴流冷卻水，可採用直接或者間接接觸的方式。過去曾使用石墨管或鉛管熱交換器作為間接接觸熱交換器，但其缺點為成本高，維護頻繁。目前大多數工廠利用填料氣體冷卻塔進行直接接觸冷卻，迴流稀酸在板式熱交換器中被冷卻。

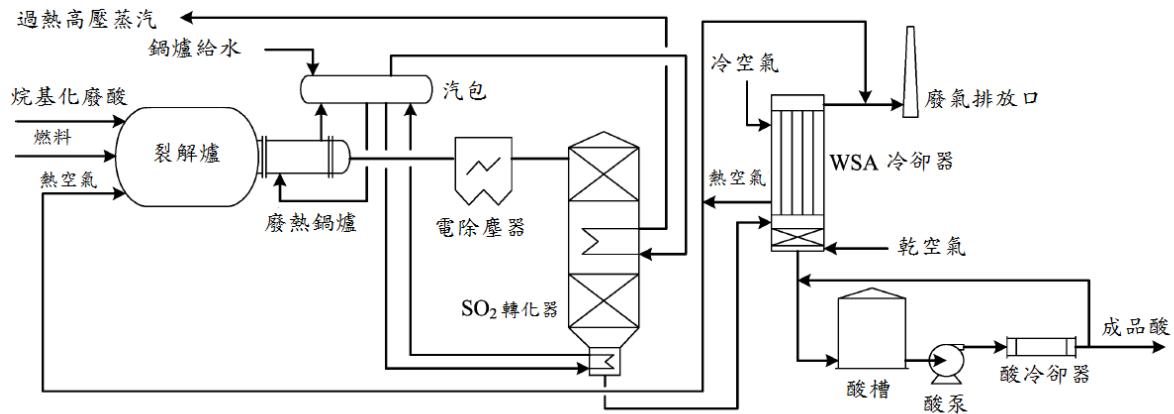
第三功能單元，通常被稱為精密洗滌塔或最終洗滌塔，需要進一步捕獲上游氣體淨化設備中的粉塵/顆粒物以及其他污染物，如氯化物或氟化物。因此二級孟莫克動力波洗滌器，無需額外冷卻。

最終的氣體淨化單元旨在捕獲基本上所有的殘留灰塵/灰顆粒及因少量未分解的三氧化硫水合所形成的酸霧。如果灰塵和顆粒物溶於稀硫酸(如鐵鹽)，首選是碳纖除塵器，如MECS® Brink®系列，因為其低成本及低維護的特點。對大多來自煉油廠的廢酸和硝化製程產生的廢酸而言，雜質均可溶解在稀硫酸中。如果灰塵和顆粒不溶於弱酸，則需採用靜電除塵器。

2. 丹麥托普索公司 WSA 濕法再生技術

托普索公司(Haldor Topsoe Company) WSA(Wet gas Sulphuric Acid, WSA)製程是一種可回收各種廢氣中的硫，並將其轉換成工業級濃硫酸的製程技術，硫回收率可達95.0%~99.7%，可生產97.5%~98%之濃硫酸產

品。該製程流程簡單，沒有化學藥品消耗和廢水排放、熱效率高，成品為高品質硫酸。托普索WSA廢酸再生製程流程如圖3.1-4所示。



資料來源：鄧明，烷基化廢酸再生工藝簡述，硫酸工業，2016 年 12 月。

圖 3.1-4 托普索 WSA 烷基化廢硫酸再生製程流程

首先，廢酸在燃料燃燒產生的高溫下焚燒分解生成 SO_2 氣體，並降溫至適宜 SO_2 轉化的溫度，廢熱可回收副產蒸汽。由高效率除塵器除去氣體中的灰塵，然後 SO_2 在觸媒作用下轉化為 SO_3 。

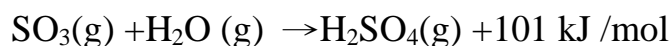
轉化觸媒採用托普索公司的VK-WSA系列轉化觸媒(如圖3.1-5所示)，觸媒床層的數量取決於初始 SO_2 濃度和期望達到的轉化率。採用多個觸媒床層時，可以採用多種形式的床間冷卻方式，以滿足裝置的熱平衡和不同的熱量回收需求，轉化反應放熱可以高壓蒸汽的形式回收。



資料來源：Livia Sierra Llorens, WSA Technology a competitive solution for sulfur management, 2018.

圖 3.1-5 托普索公司 VK-W 系列轉化觸媒

在轉化器出口，製程氣被冷卻至適當溫度，使得 SO_3 與水蒸氣反應生成氣態硫酸：



含有氣態硫酸的製程氣會在WSA冷凝器中被冷凝成液態硫酸產品。WSA冷凝器是1座立式降膜管殼式冷凝器/濃縮器，其熱交換管排列採用耐酸耐熱衝擊的硼玻璃管。製程氣自下而上走管內，被管外的空氣所冷卻，冷凝出來的硫酸順著管壁下流，與上升的製程氣逆流接觸，硫酸逐漸被濃縮至預期的濃度。

冷凝出硫酸後的製程氣自冷凝器頂部排出，硫酸在的冷凝器底部被收集起來，冷卻後輸送至產品儲槽。WSA冷凝器排出的熱空氣則可作為空氣預熱使用，可提高裝置的熱利用率。

托普索WSA技術特點，包含製程氣體無需乾燥、沒有稀硫酸生成、能耗低、流程較短、占地較小及無廢水排放等。

缺點包含排放尾氣中酸霧易超過排放標準；因靜電除塵效果有限，需

經常將轉化器中的催化劑取出清洗；轉化器較大，催化劑用量多；轉化器內置的熱交換器不易取出，不利於檢修；廢熱鍋爐易堵塞等缺點。

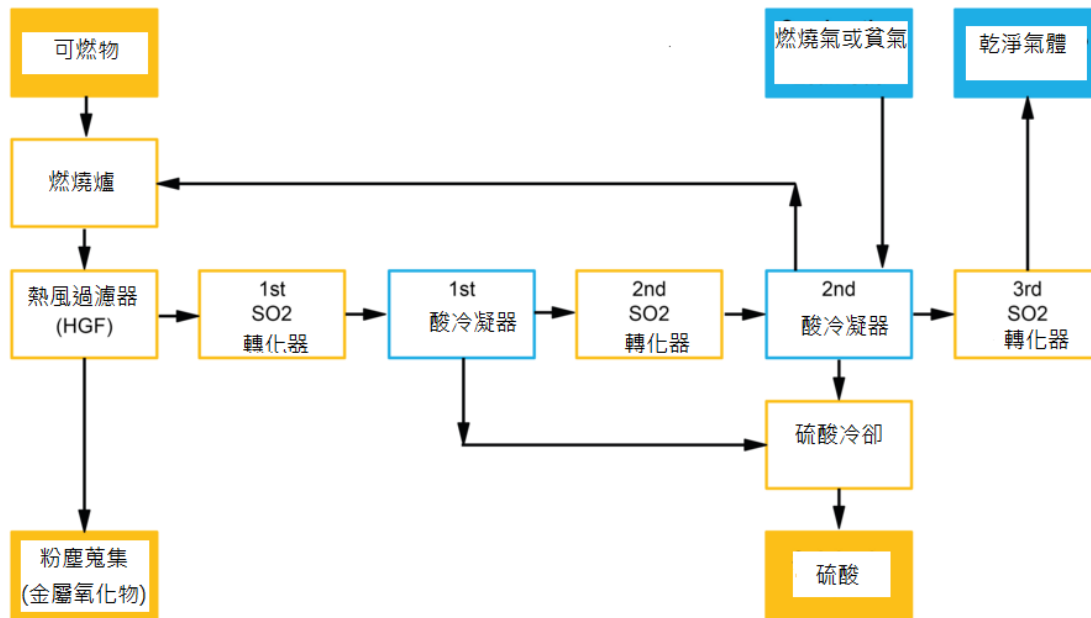
3. 奧地利 P&P 公司技術

奧地利P&P公司(P&P Industries AG)技術與丹麥托普索公司WSA技術類似，製程原理一樣，但奧地利P&P公司技術採用兩次轉化和兩次冷凝，轉化和冷凝效果比托普索公司WSA技術較優。奧地利P&P公司技術的顯著特點是採用熔融鹽換熱技術，轉化器內置的熱交換器等設備均使用熔融鹽來吸收熱量。製程流程如圖3.1-6及圖3.1-7所示。

熔融鹽具有液體溫度範圍寬、黏度低、流動性好、蒸汽壓小、對管路承壓能力要求低、相對密度大、比熱高、蓄熱能力強、成本較低等優點。熔融鹽的缺點是所有管道均需加熱，使鹽始終處在熔融狀態中，故對儀錶控制要求較高。

製程中的環境空氣或貧氣(Lean Gas)經過濾(例如濾袋除塵器、洗滌塔、汞吸收器)，並通過氣密P&P玻璃管熱交換器進行預熱。為節省能源，通過傳熱鹽系統(Heat Transfer Salt System, HTS)將溫度提高到400°C以上。通過在燃燒室中較長停留時間，可以確保所有含硫成分被完全氧化為SO₂。具有無機雜質的製程氣體通過熱氣過濾器(Hot Gas Filters, HGF)進行過濾，可以回收沉積的金屬。在第一個轉化器中，P&P摻雜鉑的蜂窩狀觸媒在低壓降的作用下將70%以上的SO₂轉化為SO₃。使用與HTS結合的熱交換器，通過冷卻製程氣體並將SO₃在氣相中水合成為H₂SO₄，可以回收大量熱能。高濃度的硫酸在第一個冷凝器中的P&P玻璃管熱交換器進行冷凝。酸霧在濕式靜電除塵器中被分離，並由於重力關係酸冷凝水向下流入冷凝器。在第一個冷凝器中，製程氣體由玻璃管熱交換器預熱，在第二階段，由燃燒爐中的HTS預熱。在第二轉化器和第二冷凝器中，已經將

99.9%的 SO_2 轉化為 H_2SO_4 。剩餘的 SO_2 在隨後的低溫活性碳觸媒(Low Temperature Carbon Catalyst, LTCC)階段被氧化，然後被送入煙囪。 SO_2 轉化為 H_2SO_4 的總轉化率超過99.999%。



資料來源：P & P Industries AG 公司網站，

<https://www.pp-industries.at/en/productdetail/sulphur-oxidation-process-sop-spent-acid-regeneration-sar>

圖 3.1-6 P & P SAR 製程流程圖



資料來源：P & P Industries AG 公司網站，

<https://www.pp-industries.at/en/productdetail/sulphur-oxidation-process-sop-spent-acid-regeneration-sar>

圖 3.1-7 P & P SAR 濕法硫酸再生工廠

乾法再生製程技術和濕法再生製程技術比較如表3.1-1所示。

表 3.1-1 生產 1 萬公噸/年之乾法硫酸技術與濕法硫酸技術的比較

項目	托普索 WSA (濕法)	杜邦 MECS SAR (乾法)	中石油 (乾法)
尾氣排放 SO ₂	≤100 mg/m ³	≤100 mg/m ³	≤100 mg/m ³
尾氣排放 NO _x	≤150 mg/m ³	≤150 mg/m ³	≤150 mg/m ³
尾氣排放酸霧	大於 5 mg/m ³	≤5 mg/m ³	≤5 mg/m ³
製程複雜程度	簡單	較複雜	較複雜
蒸汽	產	不產	產
耗電量(kWh)	中	少	大
裂解爐中補充 H ₂ S 氣體一起燃燒	可以	可以	可以
能耗	低	稍高	稍高
操作成本	低	較高	較高
廢水產生量	不產生廢水	產生少量稀酸	產生少量稀酸
回收率(%)	99.6	>96	>96
操作方式	簡單	較複雜	較複雜
適用原料	烷基化廢硫酸	烷基化廢硫酸	烷基化廢硫酸、乙炔清淨廢硫酸、70%以上其它廢硫酸
鍋爐/裂解爐 堵塞情況	廢熱鍋爐頻繁堵塞	裂解爐約 10 個月堵塞一次	水管廢熱鍋爐可連續運轉 1.5 年以上
工程投資 (新台幣：萬元)	47,843	58,175	24,358

資料來源：申鳳玉，烷基化廢硫酸再生工藝技術對比，當代化工，2016 年 11 月

4. 杜邦 SULFOX™ 濕法製酸技術

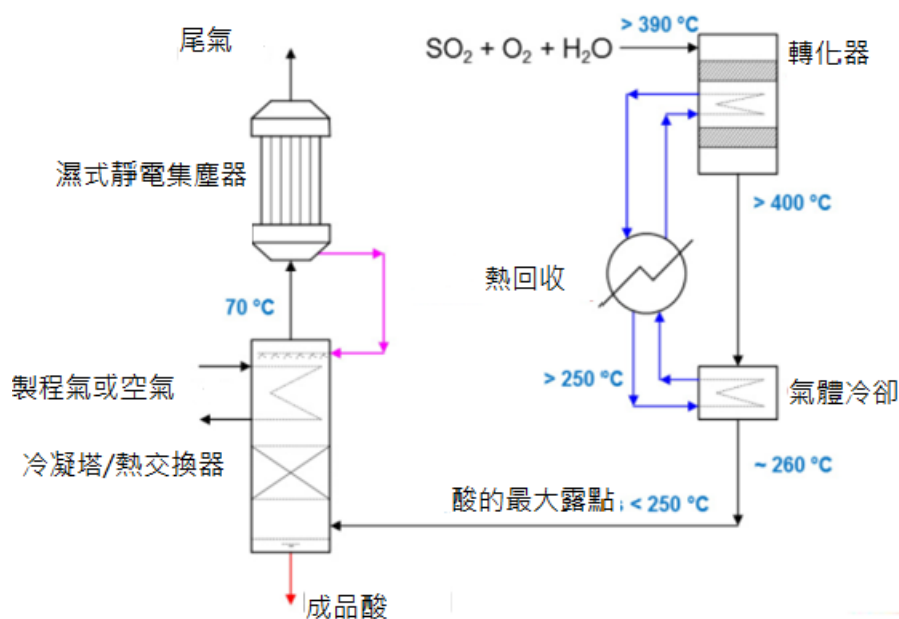
SULFOX™ 技術是杜邦公司開發之另一項高效節能的尾氣處理技術，用於處理含硫化合物的廢氣和廢液生成濃硫酸，特別是應用於冶煉行業低濃度的 SO₂ 尾氣處理和其他行業各種濃度的 H₂S 尾氣處理。

當 SO₂ 濃度介於 0.2v% 至 6v% 時，會因使用燃料導致操作成本增加，因此排除傳統的乾法製酸技術；因低濃度對於產酸能力低的裝置，如果使用脫硫劑也會增加操作成本，所以也排除尾氣洗滌技術。故相比之下，

SULFOXTM濕法製酸技術流程短、熱量回收效率高，是最適用於此類尾氣處理技術。

硫化合物有各種形式，如 SO_2 、 H_2S 、 CS_2 氣體或 H_2SO_4 和其他硫酸鹽液體。SULFOXTM技術會根據供料的形式和條件的不同，設計不同的處理步驟，包括洗滌淨化、燃燒及熱回收，目的是給SULFOXTM裝置提供乾淨的 SO_2 氣體，製程流程如圖3.1-8。主要有以下幾種情況：

(1)當供料煙氣中含有大量雜質或有大量水蒸汽時，需要在 SULFOXTM 技術中應用動力波洗滌系統去除雜質和多餘的水汽後，乾淨氣體才進入 SULFOXTM 製程。



資料來源：王勇等，因地制宜地實現尾氣處理最低排放---孟莫克含“硫”尾氣處理系統解決方案，第三屆全國煙氣脫硫脫硝及除塵技術年會，2015 年

圖 3.1-8 杜邦 SULFOXTM 濕法製酸技術流程圖

(2)如果是 H_2S 氣體，選擇 SULFOXTM 技術類型是取決於硫化氫和碳氫化合物的濃度。當 H_2S 濃度較低且烴含量較少時，採用稍加修改的 SULFOXTM NK 技術，其流程與低濃度 SO_2 的流程圖相類似。將硫化氫氣體預熱到催化劑的操作溫度後，氣體通過鉑觸媒層， H_2S 被催化氧化生成 SO_2 和 SO_3 ，此過程不需要燃燒爐。在此技術流程中，供料煙氣在單獨且帶有預熱風的分解爐中高溫燃燒。冷卻 SO_2 氣體使之達到觸媒操作溫度，冷卻所換得的多餘熱量作為高壓蒸汽回收。轉化器的多餘熱量則提供給蒸汽系統，而冷凝器的熱量用於預熱燃燒空氣。

當乾淨的 SO_2 氣體送入 SULFOXTM 裝置主要有以下三個步驟：

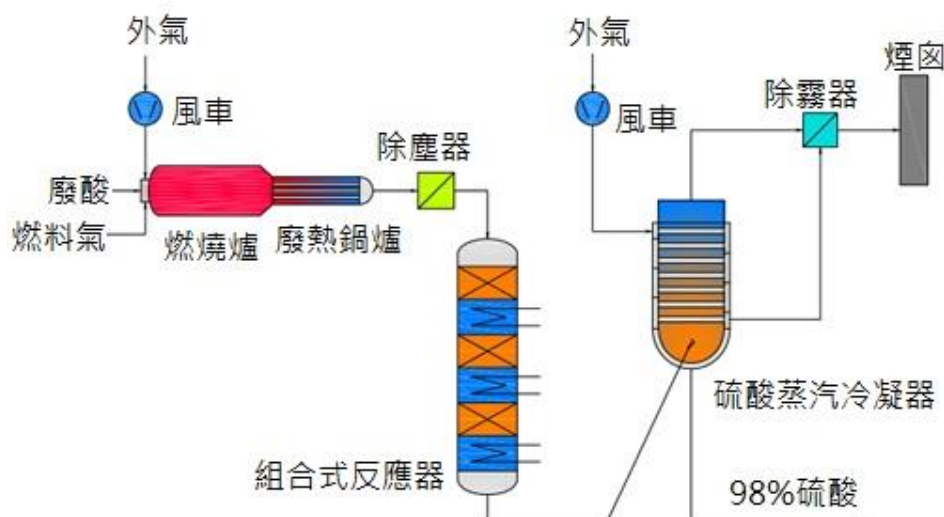
- (1) SO_2 在裝有觸媒的轉化器內轉化成 SO_3 ，與傳統的乾法製酸技術的反應步驟相同。主要不同點是氣相中存在水蒸汽，利用轉化器內的熱交換器和特殊設計的防範措施，始終保持製程氣高於酸的露點。熱回收方案取決於進料的特性：熱量作為高壓蒸汽回收，或用於預熱進入的乾淨 SO_2 製程氣。
- (2) SO_3 與水蒸氣反應生成氣相 $\text{H}_2\text{SO}_{4(g)}$ ，作為製程氣在氣體冷卻器和冷凝器內冷卻。氣體在冷凝器內進一步冷卻濃縮成硫酸和水蒸氣排出。控制進、出口的製程氣溫度以達到 98% 以上之酸濃度。在冷凝器內導入外氣除熱或用來預熱進入的製程氣。
- (3) 在冷凝階段，由於使用水平管，酸在管子外側濃縮會產生大量的酸霧，酸霧在後續的濕式靜電除霧器中被除去，並返回到冷凝器作為成品酸回收。對特定的 SO_2 或 H_2S 尾氣的處理技術進行選擇時，以費用的最小化為原則。如果以生產硫酸為目的企業，需要投入市場並進行大規模銷售時，通常選擇傳統的乾法製酸技術。然而，當尾氣被視為污染物處理時，SULFOXTM 濕法製酸則以操作成本低，並副產濃硫酸和蒸

汽，具有明顯優勢的技術。通過對每種製程技術的成本效益進行分析，以篩選出最適合的技術解決方案。

5. 中國 ERSA™ 高效廢酸再生技術

ERSA™ 是中國科洋環境工程有限公司開發的專有技術，基於濕法製酸流程(ECOSA®)處理工業廢酸，例如烷基化反應產生的含烴廢酸，此廢酸處理難度大，且產量越來越大。ERSA™ 可有效處理該類型廢酸，再生為98%wt硫酸，符合中國GB 534-2014硫酸品質標準，既解決廢酸處理難的問題，又能提供工廠生產所需的硫酸，實現工業循環經濟。

此外，ERSA™ 技術處理單位廢酸的燃料氣消耗低，且熱回收率高，流程如圖3.1-9所示。利用ERSA™ 廢酸再生處理技術可使烷基化裝置的液化氣產品轉化成高品質和高附加值的汽油調和組分，達成廢棄物有效利用，提升品質和保護生態環境的多重目的。ERSA™ 廢酸再生處理技術技術先進、空水廢排放少、占地面積小，滿足日益嚴格的環保要求和裝置操作靈活性。同時ERSA™ 具裝置投資小及高性價比之特性。



資料來源：科洋環境工程（上海）有限公司公司網站，
<https://wangjiamin0309.github.io/haiyang/huanjinggongcheng/technology/technology2.html>

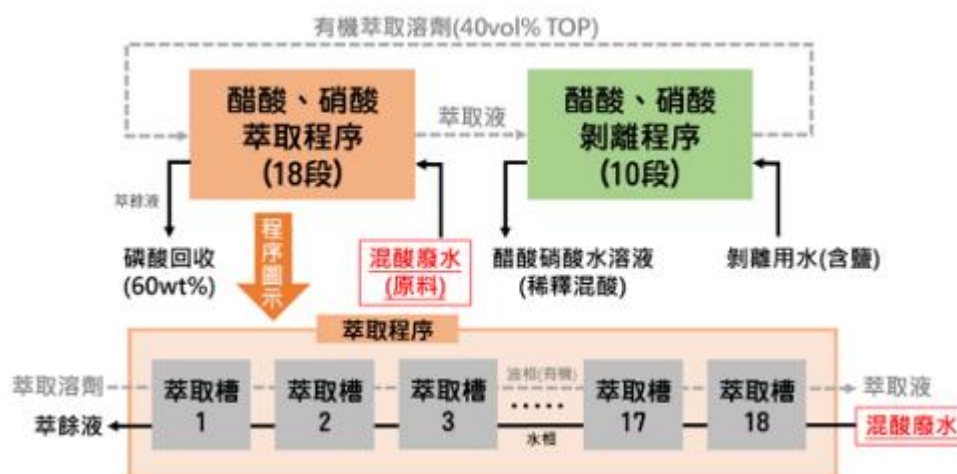
圖 3.1-9 ERSA™ 高效廢酸再生技術流程圖

3.2 廢磷酸回收技術案例

光電業中之 TFT-LCD 面板製程鋁蝕刻程序中採用磷酸及少量硝酸與醋酸水溶液，用以蝕刻清除面板線路上的鋁物質，於蝕刻完成後產生鋁蝕刻廢液，其主要成分為磷酸(50~60%)、少量硝酸與醋酸。目前含磷酸廢液的資源化利用方法主要有溶劑萃取法、中和法、蒸餾濃縮法，以下介紹日本三和油化工業公司之多級逆向萃取回收技術。

1. 日本三和油化工業公司多級逆向萃取回收技術

三和油化工業公司與學術合作開發混酸分離回收技術，利用溶劑萃取法及多級回收裝置回收高濃度酸液。當混合廢酸(大多含醋酸、硝酸及磷酸)進入萃取程序，係利用多組串聯的萃取槽，將廢液及有機萃取溶劑依不同入口導入，可將所需處理的廢液及溶劑進行逆向接觸，如此可使溶劑及廢液充分交叉混合，增加液相接觸頻率。因磷酸對萃取溶劑溶解度較低，無法溶於有機萃取液，會隨著水相成為萃餘液，因此不斷透過多段串聯的萃取槽進行多級逆向萃取，即可得到濃度約 60%之磷酸。而醋酸及硝酸於萃取程序中對萃取液溶解度較高，可溶於有機萃取溶劑中，並隨著萃取液進入剝離程序。再藉由含鹽之水相將醋酸及硝酸萃取出，有機萃取液可重複使用。技術流程如圖 3.3-1 所示。



資料來源：經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018 年 11 月。

圖 3.2-1 三和油化工業公司混酸廢液化學處理技術程序

此項多級逆向萃取回收技術及方法可有效萃取回收磷酸，並同時高選擇性回收醋酸及硝酸，萃取分離步驟少、產率高，萃取溶劑更可以充分循環使用，可維持穩定運轉狀態，回收成本相對較低。三和油化工業公司推估 1 公斤混酸溶劑處理費約 30 元日幣，該公司於 2018 年再生磷酸銷售量約為 6,200 公噸。

回收的磷酸可再透過濃縮回收製成純度 85% 再生磷酸外，因日本不產磷酸原物料，大多進口自中國、越南等國，因此三和油化工業配合國家循環經濟政策申請「愛知縣循環型社會形成推進事業費補助金」，利用補助金購買磷酸鹽製造設備，以加值磷酸後續之附加價值製成磷肥產品，如圖 3.2-2。

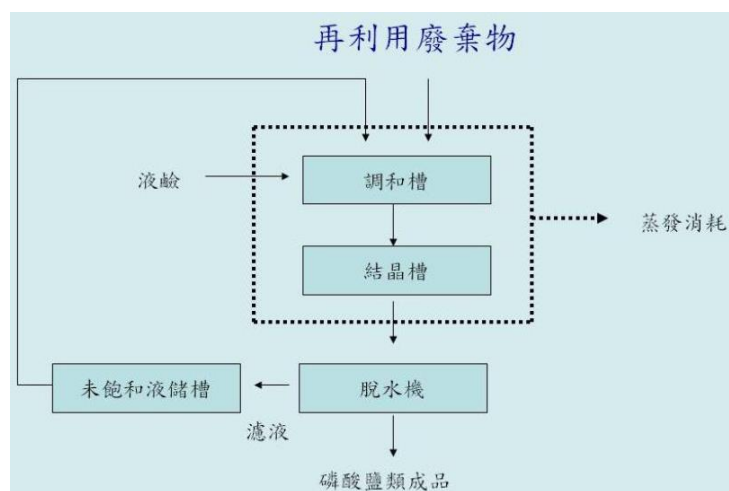
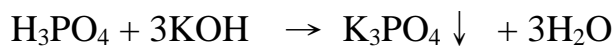
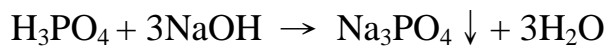


資料來源：經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018 年 11 月。

圖 3.2-2 再生磷酸製成磷酸鹽肥料

2. 中和法

利用回收廢磷酸（ H_3PO_4 ）與氫氧化鈉（ NaOH ）或氫氧化鉀（ KOH ）反應經過調和與結晶製程反應，生產工業級磷酸鹽類製品，主要用途為廢水處理營養劑、鍋爐清潔劑、重金屬螯合劑、染料助劑…等，如圖 3.2-3 所示。



資料來源：歐陽昇弘，磷酸回收系統效益分析-以某半導體晶圓廠為例，2014 年 7 月。

圖 3.2-3 廢磷酸製成磷酸鈉製造流程

中和法是最常見最簡單的處理方法，其原理是將廢液中的磷酸轉換成磷酸鹽。各類型磷酸鹽回收方式說明如下：

(1)磷酸銨鹽法

磷酸銨鹽法是利用氨氣中和廢磷酸，使其形成磷酸一銨或磷酸二銨溶液，再結晶析出的方法。

採用濕法磷酸純化過程中的萃餘酸產生磷酸二銨，先將萃餘酸和原料磷酸按一定比例混合，添加表面活性劑，降低萃餘酸陽離子濃度，使混酸達到磷酸二銨生產要求，再由水泵送入磷酸二銨生產線。此製程不僅減少原料磷酸的使用，也免去了萃餘酸的再處理，大幅降低生產成本。

(2)磷酸鈉鹽法

除用氨氣中和外，碳酸鈉和氫氧化鈉也是常見的中和藥劑，根據不同的中和之 pH，可生成磷酸二氫鈉、磷酸氫二鈉及磷酸三鈉。

將磷化處理單元中的磷化廢液和酸洗廢液進行混合，生成磷酸亞鐵沉澱，磷酸亞鐵與燒鹼反應生成磷酸三鈉和氫氧化亞鐵，加熱通入空氣後，即為氧化鐵紅，可作為化工原料。

(4)磷酸鈣鹽法

磷酸鈣鹽法是利用碳酸鈣和氫氧化鈣中和廢液，使其形成磷酸鈣鹽沉澱從而回收磷酸資源的一種方法。採用兩段中和控制結晶的製程處理 TFT-LCD 磷酸蝕刻廢液，製備成飼料級磷酸氫鈣產品，符合飼料級磷酸氫鈣標準要求，且能夠使其含水率低於 30 %。

(5)磷酸銨鎂法

磷酸銨鎂法又稱 MAP 沉澱法，原理是將含磷酸廢液中和至鹼性，通過引入銨根和鎂離子，使其與磷酸根結合生成難溶性的磷酸銨鎂沉

澱，從而達到回收磷酸資源的目的。

中和法最大的優點是技術簡單。但磷酸鈉鹽和銨鹽的溶解度普遍較大，在其他陰離子(尤其是 Cl^- 、 NO_3^-)含量較高時，得到的產品純度往往達不到要求；磷酸鈣鹽法中，由於碳酸鈣與氫氧化鈣廉價易得，且磷酸的鈣鹽溶解度積都較小，因此具有成本低、製程簡單的優點，但金屬離子會隨著 pH 的升高形成金屬的鹼性化合物或者磷酸金屬鹽而沉澱，降低產品的品質；MAP 沉澱法反應速度快，技術簡單，處理效果好，且利用含磷酸廢液代替價格昂貴的工業磷酸或磷酸鹽，大幅降低處理成本，但此法一般係用來處理含磷酸和銨根的廢水，否則需同時添加銨鹽和鎂鹽，成本增高，因此若單一採用此中和法會存在一定的侷限性。

3.蒸餾濃縮法

目前國內已有再利用機構將廢磷酸(H_3PO_4)以蒸餾濃縮方式(沸點為 158°C)進行純化回收，利用水、磷酸、硝酸及醋酸之沸點不同，經蒸發濃縮去除水分，再經第一段水洗除去硝酸，經第二段鹼洗除去醋酸，產生濃度約 85%工業級磷酸，提供予工業應用。主要工業用途為軟水劑、水垢清洗劑；在電鍍工業中用作拋光劑；印刷工業中用作去汙劑；染料工業中用作乾燥劑；紡織印染業中用作印染媒染劑，絲綢的光澤劑；日用品化工業中用作洗滌劑助劑，用於安全火柴的製造…等。

3.3 廢氟酸回收技術案例

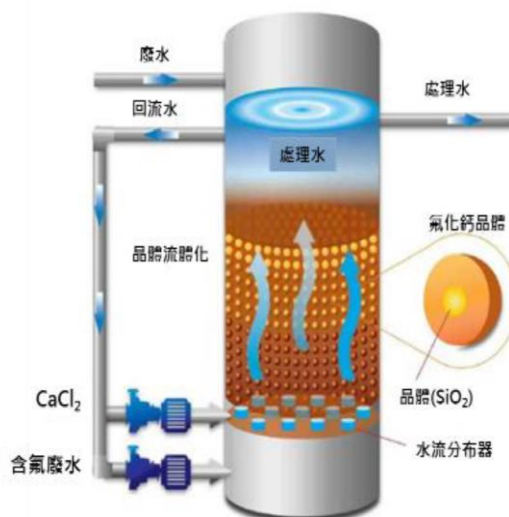
積體電路製造業於晶圓蝕刻程序中，可透過乾式蝕刻(Dry Etch)或濕式蝕刻(Wet Etch)等2種方式達到移除晶圓表面材料的目的。乾式蝕刻是透過電漿的解離，形成離子與物質表面進行化學反應；而濕式蝕刻利用化學溶液的液體與物質進行化學反應，具有高選擇性、高蝕刻速率及低設備成本

等優點，因此被廣泛利用。

濕式蝕刻主要使用氫氟酸(HF)水溶液，其反應式為 $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$ ，過程可用水或緩衝溶劑稀釋以降低蝕刻速率，因此製程所產廢水含有大量氫氟酸，目前含氟廢水主要處理方式為添加氯化鈣(CaCl_2)形成氟化鈣之沉澱物，以降低廢水中之氟離子濃度。以下針對廢氫氟酸資源化流程進行介紹：

1. 日本 ORGANO 公司流體化床結晶處理技術

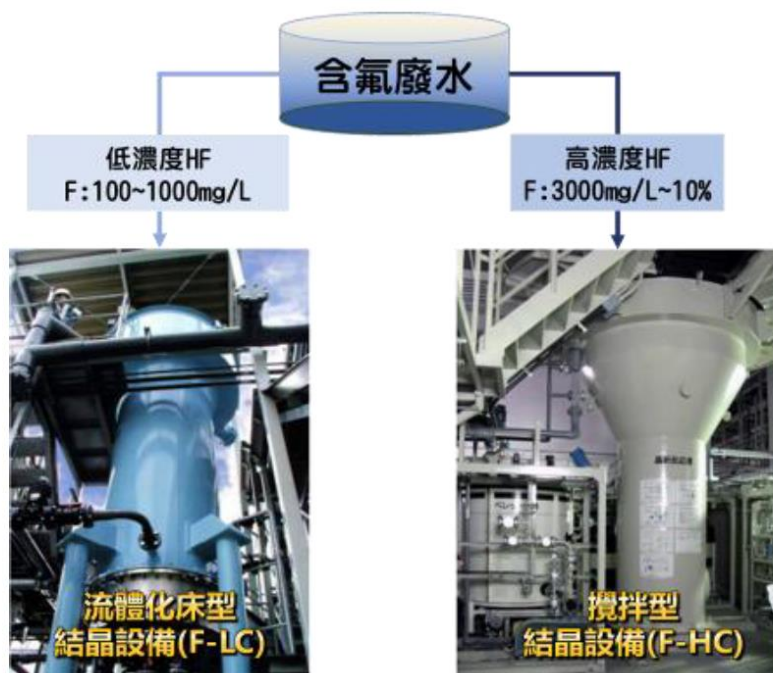
ORGANO 公司之流體化床結晶處理技術(如圖 3.3-1 所示)是利用 0.2~0.5mm 矽砂(SiO_2)載體作為結晶的核種，將廢氫氟酸加入反應器內，添加氯化鈣(CaCl_2)以增加水中鈣離子(Ca^{2+})濃度，以靜置方式乾燥不須脫水設備，含水率即可降至 10%以下，濾乾後的氟化鈣結晶可作為鋼鐵業之助溶劑原料。



資料來源：ORGANO 公司網站。

圖 3.3-1 ORGANO 公司流體化床結晶處理技術

進廠之含氟廢水依氟離子濃度(低濃度：100~1,000 mg/L、高濃度：3,000 mg/L~10%)採用不同處理方式(如圖 3.3-2 所示)。



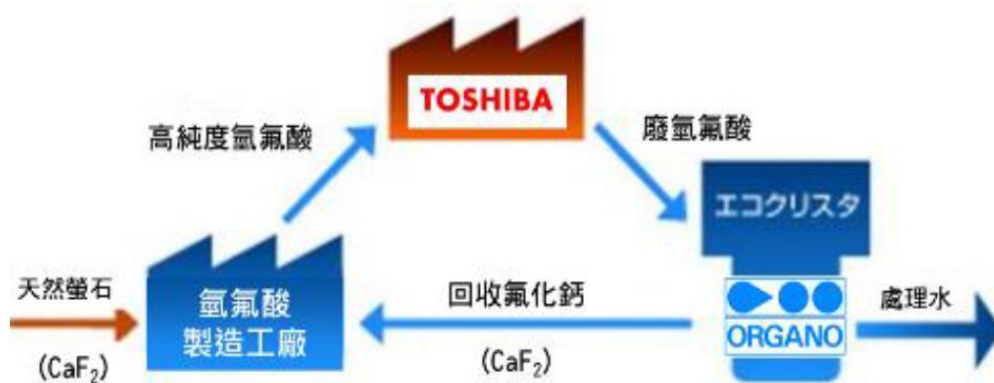
資料來源：ORGANO 公司網站，

https://www.organo.co.jp/wp/wp-content/uploads/2018/04/00246_ecocrysta_SIYOU.pdf。

圖 3.3-2 ORGANO 公司含氟廢水之處理反應器

另外，ORGANO 公司之攪拌型結晶設備處理技術，若以天然螢石 (CaF_2) 作為晶種，利用養晶方式可回收高純度人工螢石，純度可達 96.5%。

目前 ORGANO 公司新的商業模式(如圖 3.3-3 所示)係於 TOSHIBA 四日市工廠內設置 3 套 Ecocryta 設備，處理每年產出約 3,000~4,000 公噸之含氟廢水，每年可生產高純度人工螢石約 1,000~2,000 公噸，再將人工螢石提供氫氟酸製造工廠(旭硝子公司)產製為各式氟系化學品(含電子級氫氟酸)，形成完整的循環回收規劃提升氟系化學品的競爭力。



資料來源：經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018 年 11 月

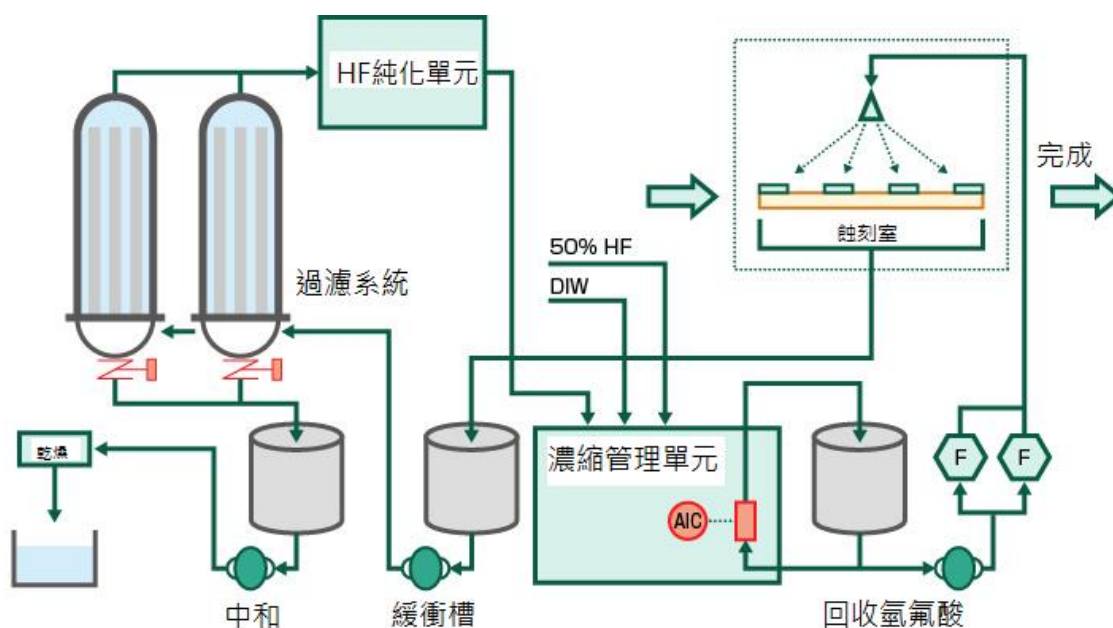
圖 3.3-3 ORGANO 公司商業模式示意圖

2. 氫氟酸回收系統

(1) 三菱化工公司

三菱化工公司(Mitsubishi Chemical Engineering Corporation)開發氫氟酸回收系統(HF Recycling System, HFRS)，係針對液晶面板相關生產設備廢氫氟酸進行線上回收，HF回收率可達到80%，雜質去除率可達到90%。直接回收LCD面板產生的蝕刻液，使用特殊的過濾器單元，可有效分離流體中的研磨污泥，去除廢液中不純物質，與高濃度調整系統搭配使用，可確保蝕刻速率穩定性，其製程流程如圖3.3-4所示。此設備之特色包含：

- A. 直接處理濃稠液體，無需稀釋
- B. 由於系統的高回收率，大大減少了廢液
- C. 有效去除雜質
- D. 使用先進的濃度調節系統保持穩定的蝕刻速率
- E. 可與普通或強酸一起使用



資料來源：三菱化工公司網站，

<https://www.mec-value.com/english/solution/slb/hydrofluoric.html>

圖 3.3-4 三菱化工公司氫氟酸回收系統流程圖

(2) 佐倉工程有限公司

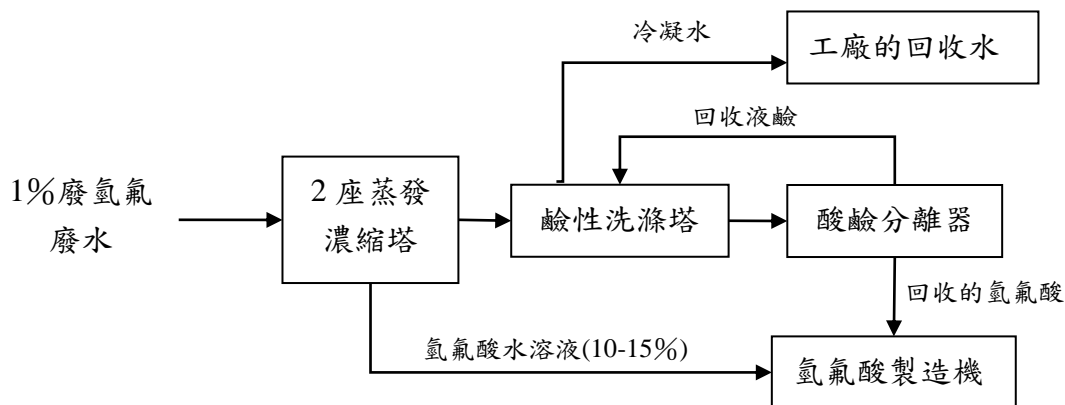
佐倉工程有限公司(SASAKURA Engineering)利用凝結沉澱法處理高濃度氫氟酸廢液時，會產生大量含氟污泥廢棄物。且通過凝結沉澱法處理的廢水仍然含有30~40 ppm的氟，佐倉公司的技術即係回收此低濃度之氫氟酸廢液。佐倉公司的系統從稀釋的氫氟酸廢液中回收濃度超過10%的氫氟酸，回收率約為98%。以下針對氫氟酸回收系統流程(如圖3.3-5所示)進行說明：

A.2 座蒸發濃縮塔

氫氟酸與水蒸氣一樣，具有蒸發的特性，因此如果簡單地蒸發掉，它就會蒸發並消失。蒸發濃縮器係由用於蒸發的2座蒸發濃縮塔和鹼性水洗塔組成。濃縮於蒸發濃縮塔底部的酸即是氫氟酸，來自蒸發濃縮塔的蒸氣被鹼性水洗塔捕獲，使氫氟酸的回收率最大化。

B.酸鹼分離器

通過2座蒸發濃縮塔的蒸氣被引入鹼性洗滌塔，並與殘留的酸發生化學反應。所產生的氟化鹼性液體通過雙極型電解器分解成酸和鹼，並再次回收酸，回收之液鹼再回用於鹼洗滌塔循環使用。



資料來源：SASAKURA 公司網站，<http://www.sasakura.co.jp/e/products/water/ex/06.html>

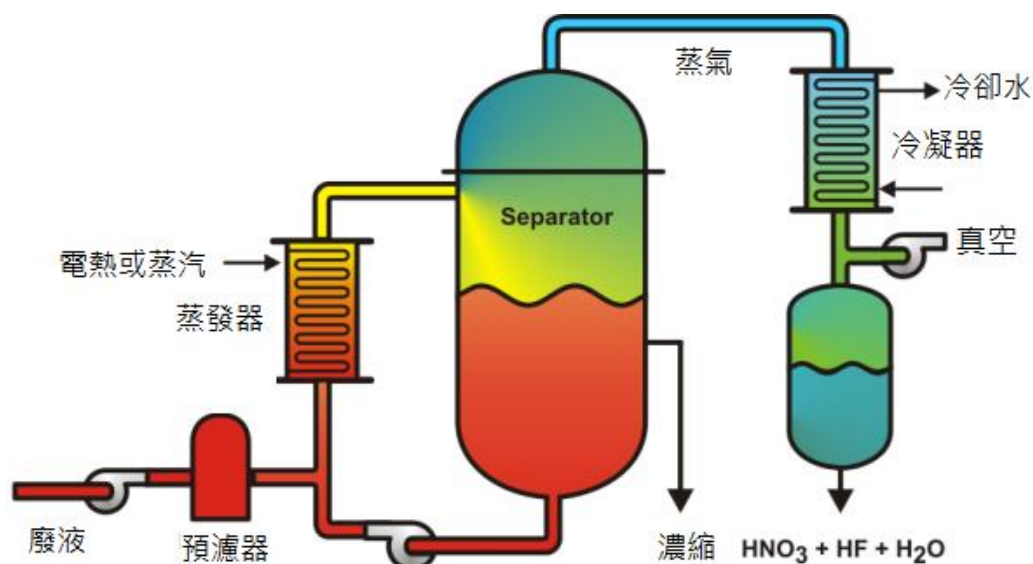
圖 3.3-5 佐倉公司氫氟酸回收系統流程圖

3.美國 Beta 公司混合酸回收技術

Beta Control Systems, Inc.成立於 1980 年，是一家致力於為金屬加工行業提供最新技術的環保公司。Beta 使用真空蒸發來過濾污染物並濃縮混合酸以供重複使用。回收系統可連續工作，以使酸保持最佳濃度和純度。

透過水泵將廢酸通過預濾器並進入蒸發器迴路，該迴路由蒸發器交換器和分離塔組成。廢酸溶液被加熱到酸和水的沸點以上。一旦溶液釋放到真空環境中，混合的酸和水都會在獨特的“共閃”反應器中蒸發。混合的酸和水蒸氣向上穿過液/氣分離器，進入整流器。剩餘的金屬鹽溶液（金

屬 + H_2O) 繼續循環通過加壓沸騰迴路，直到達到特定濃度並排放到儲罐中。在整流器中，酸的濃度得到控制，以將品質良好且重新濃縮的酸返回到處理罐。除去酸液的剩餘水蒸氣繼續進入冷凝器，在冷凝器中回收冷凝水繼續再利用。該系統沒有裸露的金屬零件，並且設計成可以承受真空。工業 PLC 自動化使用專門為此應用開發的成熟軟體來控制製程。該系統需要鍋爐或外部熱源、冷卻水和電。在真空下操作的顯著優勢包括：低操作溫度(大氣壓下的沸點為 100°C 。80% 真空系統中的沸點為 55°C)，低操作成本(所需的天然氣更少)，低材料成本(需要更小的熱交換器)和更安全的操作環境(任何洩漏都將洩漏到系統中而不是洩漏到大氣中)。製程流程圖如圖 3.3-6。



資料來源：Beta Control Systems 公司網站，
<http://www.betacontrol.com/content/mixed-acid-hf-hcl-hf-hno3>

圖 3.3-6 Beta 混酸回收流程圖

3.4 強酸化學物質危害預防

因應廢酸回收再利用過程，操作人員有可能會接觸到酸性液體，對人體有危害，需要特別注意。強酸化學品最主要的毒性致病係由局部的腐蝕作用產生化學燒傷。酸會產生凝固性壞死，使皮膚的脂肪皂化，摸起來有沾滿肥皂和滑滑的感覺。因此針對廢酸處理需特別小心，以下說明廢酸處置、危害特徵、危害預防措施及緊急處置方式。

1. 廢酸處置要項：

- (1) 大量液體類化學品廢棄物須以不同管路分類，以管路輸送方式暫存於桶槽內。其抽取過程同化學品運送流程。
- (2) 抽取地點或容器、設施應與所存放之廢棄物具有相容性，不具有相容性之廢棄物應分別儲放。
- (3) 貯存及抽取設施應有防止地面水、地下水、滲透水流入之設施。
- (4) 貯存及抽取設施應配合消防設施，以防止火災發生，若發生火災，依緊急應變程式處理。

2. 急性健康危害特徵

強酸具有急性健康危害特性包含急毒性物質腐蝕、刺激皮膚物質嚴重損傷及刺激眼睛等，其危害人體途徑可經由皮膚、呼吸道、消化道、眼部等接觸，產生嚴重的灼傷與中毒。

- (1) 皮膚：腐蝕化學物質與皮膚接觸時，會使皮膚組織有看的見的破壞或造成永久性的改變，或者皮膚因受到化學反應而受傷。若這些腐蝕性物質被吸收至深層組織中，則會導致系統性中毒。
- (2) 呼吸道：若不慎吸入，會造成呼吸道嚴重且不可逆的傷害，也可能造成肺炎、肺水腫、呼吸道黏膜的破壞及系統性中毒。

(3)眼睛：可能短時間即導致角膜混濁及壞死、結膜水腫、缺血。長期併發症包含反覆性角膜糜爛、角膜結膜硬化等。

(4)消化道：造成食道灼傷、胃腸潰爛、出血、穿孔。

3.危害預防措施

為防止作業操作人員未確實知悉化學品的危害資訊致引起職業災害，再利用廠商應採取下列危害通識措施：

(1)裝有化學品的容器要有危害標示與提供員工安全資料表(Safety Data Sheet, SDS)。

(2)對員工實施至少3小時與化學品危害預防有關的安全衛生教育訓練，並確認勞工清楚明瞭化學品危害特性及預防措施。

4.緊急處置

若不小心接觸到強酸時，於送醫前處置，應先進行初步除污，步驟說明如下：

(1)人體直接接觸到化學品，應確認化學品之性質(酸鹼性)

(2)沖：立即沖洗並參閱安全資料表之說明作適當的急救步驟，並送醫急救。

A.作業現場若有去污劑(如六氟靈、敵腐靈等沖洗液)時，優先使用去污劑，再用大量清水沖洗。

B.如無去污劑，則用大量清水沖洗患部 15 分鐘以上。

(3)脫：移除身上衣物(可邊脫邊沖衣物)

(4)泡：將患肢浸泡於生理食鹽水或清淨清水。

(5)蓋：使用乾淨衣物或毛巾將患肢覆蓋，避免體溫過低。

(6)送：儘速送醫

氫氟酸是最常用的化學溶液之一。其所釋出的氟離子腐蝕力很強，會直接穿透組織，與鈣結合造成脫鈣並侵蝕肌肉與骨骼，所以稱之「蝕骨水」。易被忽視的是，皮膚一開始接觸氫氟酸可能不會感到疼痛，但幾個小時後，疼痛才會顯現，組織早已呈現黑色壞死，劑量高時甚至可能致命。如不小心碰觸到時，可先使用氫氟酸解毒劑，包含浸泡葡萄糖酸鈣、局部使用葡萄糖酸鈣軟膏或靜脈注射鈣離子等方式進行解毒。

3.5 廢電子化學品-廢酸資源循環技術評析彙整

本章節所蒐集彙整之國外資源循環關鍵技術為廢酸資源循環技術，其相關技術評析彙整如表 3.8-1 所示，廠商可依據相關技術及適用對象參考應用。

表 3.5-1 廢電子化學品-廢酸純化及資源循環技術評析

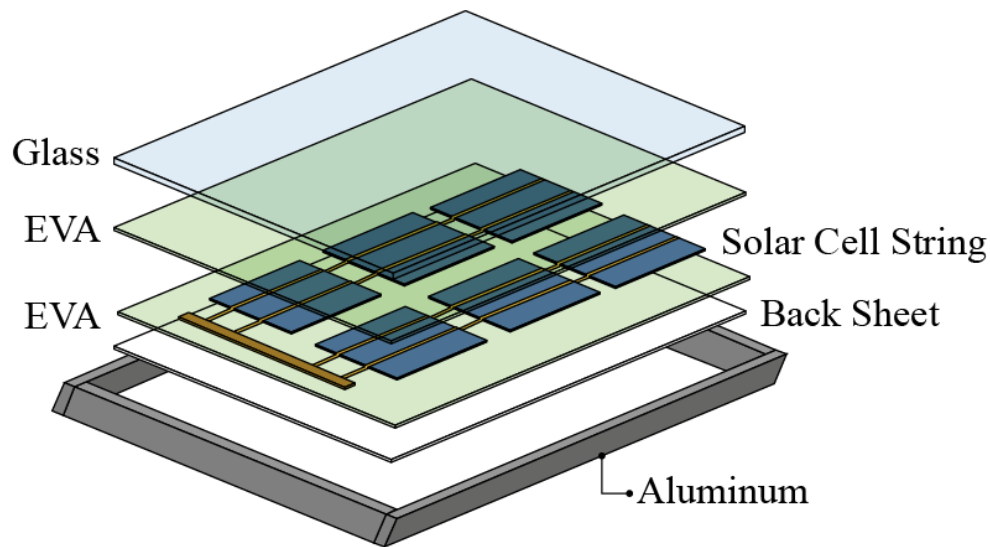
廢酸種類	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術來源
廢硫酸	MECS SAR 乾法再生技術	流程包括 4 個製程單元：熱裂解、煙氣淨化、轉化和吸收。	原料範圍廣、催化劑裝填後不用再拿出來清理、低電耗等。	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	美國杜邦公司 (已商業化)
	WSA 濕法再生技術	回收各種廢氣中的硫，並將其轉換成工業級濃硫酸的製程技術，硫回收率可達 95.0%~99.7%。	沒有化學藥品消耗和廢水排放，熱效率高，成品為高品質硫酸。	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	丹麥托普索公司 (Haldor Topsoe) (已商業化)
	WSA 濕法再生技術	採用兩次轉化和兩次冷凝，轉化和冷凝	採用熔融鹽換熱技術，轉化器內置的熱交換器等設備均使用熔融鹽來吸收熱量。	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	奧地利 P&P 公司 (P&P Industries AG) (已商業化)
	SULFOXT TM 濕法製酸技術	用於處理含硫化合物的廢氣和廢液生成濃硫酸，	操作成本低，並副產濃硫酸和大量蒸汽。	冶煉行業和其他行業 H ₂ S 尾氣處理。	美國杜邦公司 (已商業化)
	ERSA TM 高效廢酸再生技術	ECOSA 濕法製酸技術取消燃燒步驟，透過高效纖維除霧器物理捕集的方法達成對酸霧的高效處理。	燃料氣消耗低，且熱回收率高	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	中國大陸科洋公司 (已商業化)
廢磷酸	多級逆向萃取回收技術	利用溶劑萃取法及多級回收裝置回收高濃度酸液。	可高效率萃取回收磷酸，並同時高選擇性回收醋酸及硝酸，萃取分離步驟少、產率高，萃取溶劑更可以充分循環使用	光電半導體及 TFT-LCD 業，可適用於混酸廢液	日本三和油化工業 (已商業化)

廢酸種類	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術來源
				分離	
廢氫氟酸	流體化床結晶處理技術	利用 0.2~0.5mm 矽砂載體做為結晶的核種，將廢氫氟酸加入反應器內，添加氯化鈣以增加水中鈣離子濃度，以靜置方式乾燥不須脫水設備。	濾乾後的氟化鈣結晶可作為鋼鐵業之助溶劑原料，可結合廢水產出源及氫氟酸製造商進行循環回收體系。	積體電路製造業	日本 ORGANO 公司 (已商業化)
	蒸發濃縮技術	利用氫氟酸與其他液體廢點不同進行蒸發處理分離。	製程流程簡單，可結合製程進行回收。	積體電路製造業	日本三菱化工公司 (已商業化) 日本佐倉工程有限公司 (已商業化)
混酸	真空蒸發過濾法	使用真空蒸發來過濾污染物並濃縮混合酸以供重複使用。	低操作溫度、低操作成本、低材料成本	電子業、鋼鐵業	美國 Beta Control Systems (已商業化)

四、廢太陽光電模組回收及資源循環技術案例

綠能是本世紀最熱門的話題，太陽能光電模組可以透過日照來產生電力，是綠色能源中最被看重的技術。隨著全世界及我國 2025 年太陽光電要達到 20GW 的目標，進而不斷製造太陽光電模組，未來將會產生大量的廢棄物，如何以資源化技術，妥善處理這些光電廢棄物中的有毒物質並將有價及稀有的材料分離回收，提純後再次投回產品生產使用，或另作高值化應用，是近年來資源化技術的一大挑戰。《廢棄電氣電子設備指令》WEEE 要求從 2014 年 2 月起，每個歐盟國家/地區都對太陽能光電模組的收集，運輸和處理(回收)進行監管，意即任何國家的廠商將這些產品投放到歐盟市場(包括國際電商平台)都必須負責其產品的回收、處理、融資和申報。

太陽能光電模組有矽晶型、薄膜型與聚光型等類型，我國大多數使用矽晶型太陽能光電模組，矽晶型太陽能光電模組結構(如圖 4-1 所示)中各矽晶片間以鍍錫銅帶串接形成太陽電池層後，夾入上下兩層乙烯/醋酸乙烯酯共聚物(Ethylene Vinyl Acetate, EVA)中，並與玻璃和背板做封裝，其中玻璃通常使用鋼化玻璃，而背板則為含氟的高分子材料聚氟乙烯(Polyvinyl Fluoride, PVF)，最後以鋁框固定整個太陽能光電模組。太陽能光電模組成分如表 4-1 所示。



資料來源：王挺玉、林欣蓉，太陽光電暨電池模組資源化技術，工業材料雜誌 371 期，2017 年 11 月。

圖 4-1 矽晶型太陽能光電模組結構

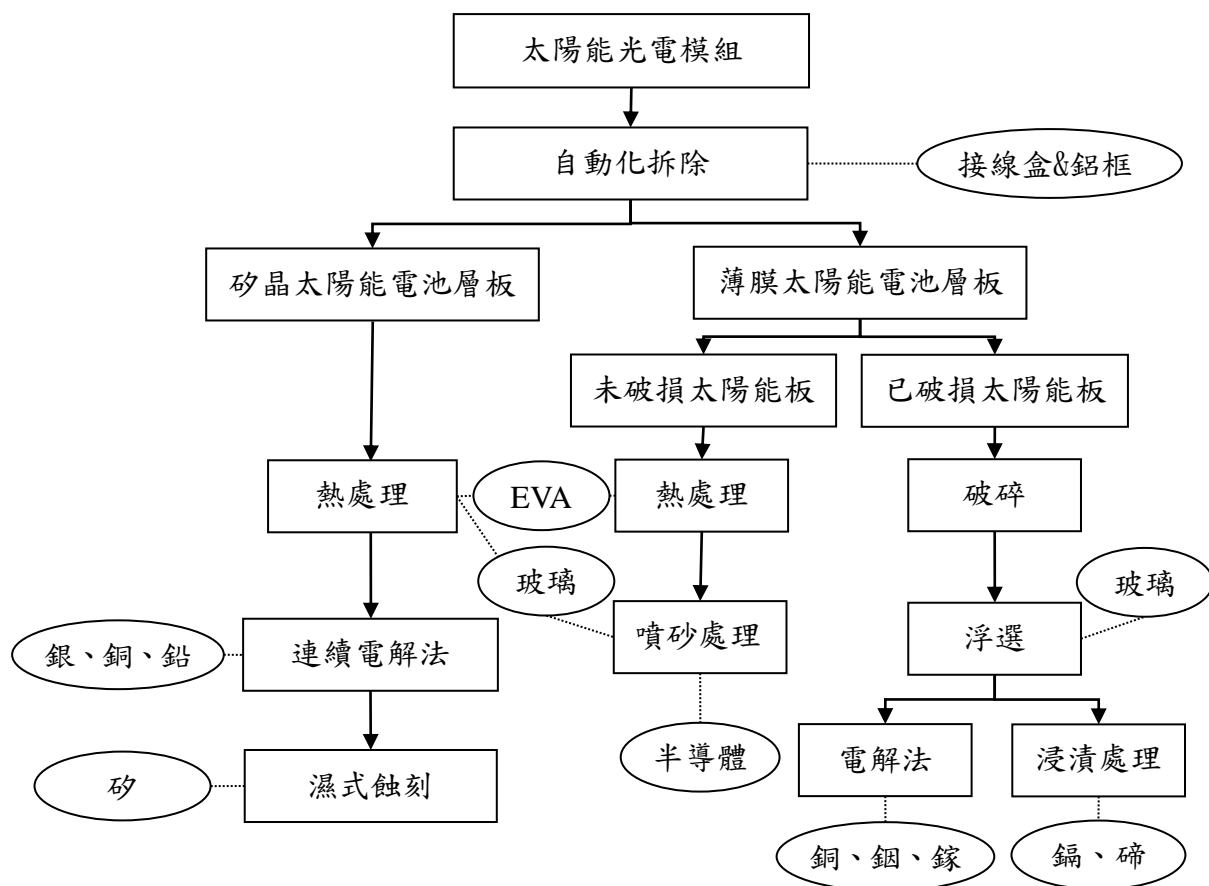
表 4-1 太陽能光電模組成分

成分名稱	矽晶型(%)	薄膜型(%)
玻璃	74.16	95.00
鋁	10.30	0.35
EVA	11.31	3.50
銅	0.57	1.00
銀	0.01	—
錫	0.12	—
鋅	0.12	0.01
矽	3.35	—
鉛	0.06	—
鎘	—	0.07
碲	—	0.07

資料來源：陳偉聖、陳彥融，光電廢棄物資源循環技術發展現況及趨勢，工業材料雜誌 383 期，2018 年 11 月。

廢太陽能光電模組回收處理之完整步驟如圖 4-2 所示，先將接線盒(含電纜)和鋁框架從太陽能光電模組中物理性機械化拆解，再將鋼化玻璃與

EVA 以有機溶劑為界面活性劑分離，回收鋼化玻璃；接著以熱處理方式將聚合物(EVA 及 PVF)裂解燃燒；熱處理完畢後留下矽電池晶片，以濃硝酸溶出矽電池晶片中之金屬，再使用連續雙電極系統，分別以白金(Platinum, Pt)作為輔助電極(counter electrode, CE)；鈦(Titanium, Ti)作為工作電極(working electrode, WE)；銀/氯化銀(Ag/AgCl)作為參考電極(reference electrode, RE)，以電極電位差使電活性物質進行氧化還原反應，逐一回收銀、銅、鉛金屬；最後以濕式蝕刻方式，將矽電池晶片以 10% 氫氟酸(Hydrogen Fluoride, HF)浸漬去除氧化矽與氮化矽(SiN_x)，最後將晶片浸漬 10%NaOH 並加熱到 50℃，去除正面電極，蝕刻出矽晶表面。矽晶型廢太陽能光電模組回收應用途徑如表 4-2 所示。



資料來源：陳偉聖、陳彥融，光電廢棄物資源循環技術發展現況及趨勢，工業材料雜誌 383 期，2018 年 11 月。

圖 4-2 太陽能光電模組資源循環流程與物質

表 4-2 矽晶型太陽能光電模組回收應用途徑

組成	應用途徑
玻璃	<ul style="list-style-type: none"> ● 平板玻璃行業/太陽能行業 ● 玻璃棉 ● 施工
EVA	<ul style="list-style-type: none"> ● 在化學工業中重複使用 ● 焚化以回收能量
半導體 (Si)	<ul style="list-style-type: none"> ● 用於太陽能電池生產的有限效率的晶圓 ● 在太陽能行業中作為半導體重複使用 ● 用作冶金鐵爐的骨料
半導體 (薄膜)	<ul style="list-style-type: none"> ● 以原始純度重新使用 ● 製造新的太陽能電池
戰略金屬	<ul style="list-style-type: none"> ● 以原始純度重複使用
鋁	<ul style="list-style-type: none"> ● 以原始純度重複使用

資料來源：Yannaël BILLARD, Flore BAZIN, Olivier LACROIX, RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC END-OF-LIFE PANELS - INTERNATIONAL OVERVIEW, July 2012, RECORD / ENEA Consulting。

碲化鎘(CdTe)薄膜太陽能光電模組，因模組含有鎘元素，如無適當處理管道，易發生重金屬污染情事，故該生產商採全球回收服務，在模組的使用週期結束後，回收並提取出碲化鎘再次進行利用，處理技術詳述於 4.2 節。

太陽能光電模組拆除接線盒與鋁框後，後續資源循環技術可分為三種方式，分別為機械法(含熱刀法及雷射法)、化學處理法及熱處理法(或稱熱裂解法)，並輔以再利用技術取得玻璃與金屬等物質，依欲資源化之材料與廢棄物後續處置方式搭配選用三類技術。相關技術及案例說明如后：

4.1 機械法回收技術案例

機械法是將太陽能電池層板採破碎或刮除或熱刀等物理方式進行預處理，後續搭配振動篩選、雷射辨色、渦流分選或化學處理等技術獲得玻璃、

金屬、EVA 與塑膠等資源。機械法回收流程整理如圖 4.1-1 所示。

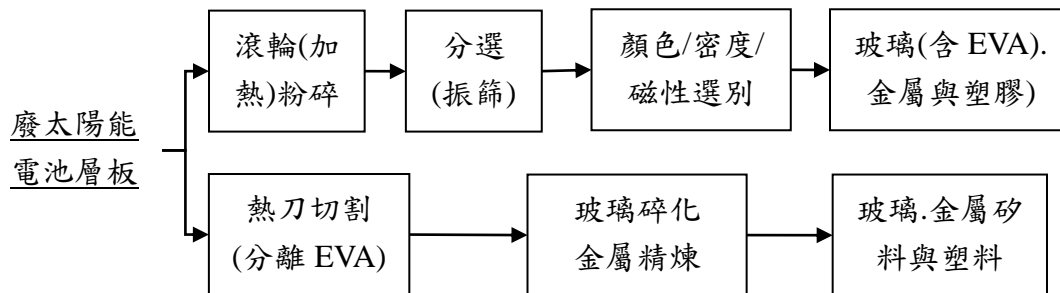
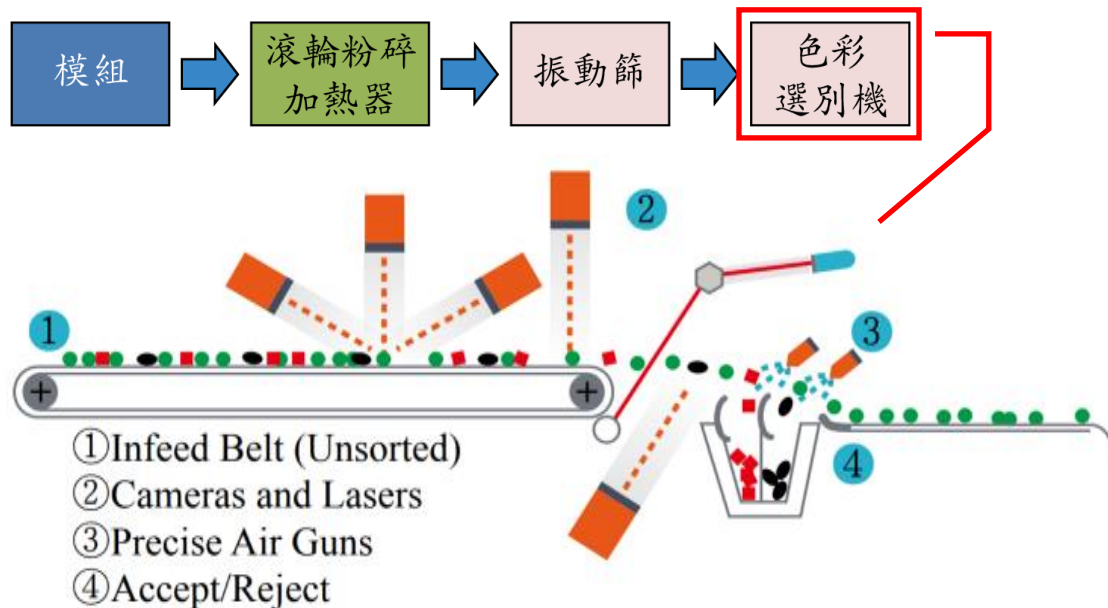


圖 4.1-1 機械法回收流程圖

1. 日本三菱材料公司色彩選別技術

三菱材料公司(Mitsubishi Materials Corporation)以機械法回收太陽能光電模組，進入回收流程前先以 X 射線螢光分析儀識別玻璃是否含砷物質(含砷玻璃無法進入回玻璃製程)，模組回收流程係先拆除接線盒與鋁框，再將太陽能電池層板送進滾輪粉碎，滾輪粉碎過程需加熱軟化乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(Ethylene-Vinyl Acetate copolymer, EVA)，可有效提高分選效率，粉碎後先以振動篩分選顆粒，大於 0.6mm 以上的顆粒採用色彩選別技術。含金屬的粉碎料後續可以金屬回收技術處理，含 EVA 的玻璃粉碎料可製成建材或隔熱材。色彩選別技術(如圖 4.1-2 所示)是利用照相機和雷射分辨有色(如金屬、矽晶片)與無色(玻璃)物質，再以氣槍分類收集。



資料來源：吳曜杉、王雨筠、鄭隆藤、姜暉先、林福銘，日本太陽光電模組回收技術解析，工業材料雜誌 381 期，2018 年 9 月。

圖 4.1-2 日本三菱材料公司太陽光電模組回收與資源循環流程








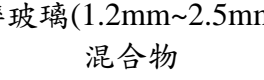
2. 日本 RTJ 公司破碎風選技術

日本RTJ公司(Recycle Tech Japan)以機械法回收太陽能光電模組，先拆除接線盒與鋁框，並設計破碎風選處理裝置(如圖4.1-3所示)將太陽能電池層板送進壓縮設備被壓碎，每月可處理100公噸廢太陽能光電模組。在此過程中移除90%的玻璃，再通過振動篩分和風選將玻璃分為1.2 mm和1.2~2.5 mm。玻璃以碎玻璃出售，背板和混合物出售給冶煉業者(如圖4.1-4所示)。



資料來源：RTJ 公司網站，http://www.r-t-j.co.jp/business/solar_panel.html。

圖 4.1-3 RTJ 破碎風選技術處理裝置

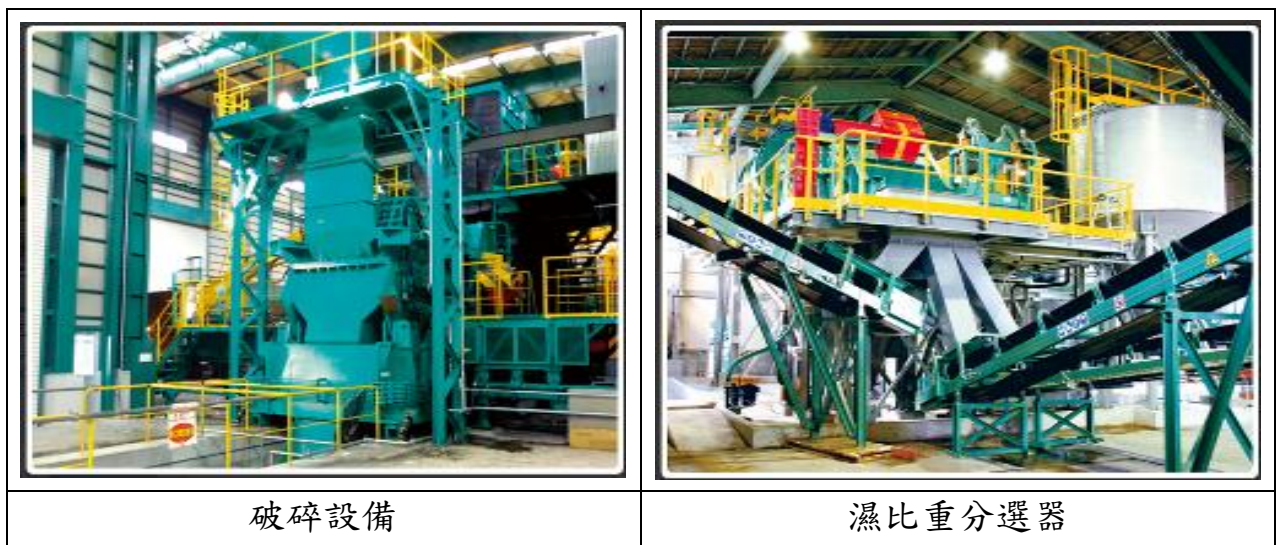
處理設備			
流程	壓縮破碎	振動篩分	風選
產出	 背板	 碎玻璃(小於1.2mm)	 ガラス(1.2mm~2.5mm)  混合物(ガラス+プラ)  碎玻璃(1.2mm~2.5mm) 混合物

資料來源：RTJ 公司網站，http://www.r-t-j.co.jp/business/solar_panel.html。

圖 4.1-4 日本 RTJ 公司太陽光電模組回收與資源循環流程

3. 日本 Harita Metal 公司濕式比重分選技術

Harita Metal公司先以破碎設備將太陽能電池層板壓碎，破碎能力為20公噸/小時的速度，再通過篩分除去8 mm以上和0.5 mm以下的物料，有色金屬(或稱非鐵金屬)通過濕式比重分選器(採兩種重力液體自動比重分離)，將其分為上層和下層，分選能力為5~10公噸/小時，上層主要為塑膠，下層主要為玻璃與電極絲。處理裝置如圖4.1-5所示。



資料來源：Harita Metal 公司網站，<http://www.harita.co.jp/technology/technology01/>。

圖 4.1-5 Harita Metal 公司濕式比重分選回收處理裝置

4. 日本 NPC 公司熱刀分離技術

日本NPC公司(NPC Incorporated)熱刀分離技術在開發的過程中，同時參與「新能源及產業技術綜合開發機構」(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)的「太陽光電回收技術開發計畫」，在政府的支持，與其他廠商的一起努力下，最終完成J-BOX分離裝置這項商品，並成為政府「太陽光電回收處理指導綱要」裡的示範案例。

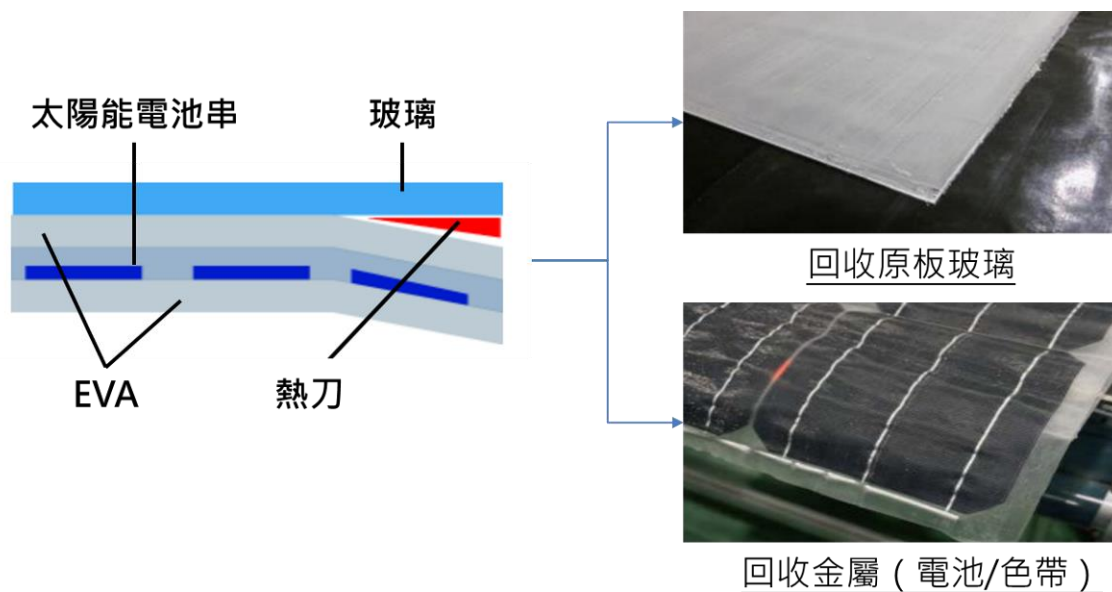
NPC公司所開發J-BOX分離裝置將廢太陽能光電模組分離出接線盒

與鋁框，且不破壞玻璃，完整的太陽能電池層板以輸送帶送進玻璃分離裝置如圖4.1-6所示，在分離裝置中使用加熱達 200°C 的切刀，將EVA膜熔融，在不破壞到玻璃的情況下和其他部位分離。需注意的是輸送速度、刀片溫度與刀片角度，NPC預設每片模組的處理時間為50秒，且以 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的刀片溫度分離玻璃與其他部位，並不會造成材料的氧化與變色。NPC熱刀分離回收技術，如圖4.1-7所示。



資料來源：NPC 公司網站，
<https://www.npcgroup.net/solarpower/reuse-recycle/recycle-service>。

圖 4.1-6 NPC 熱刀分離技術回收處理裝置



資料來源：通過熱刀分離法開發玻璃和金屬的完整回收技術簡報，NPC，2018 年 8 月。

圖 4.1-7 NPC 熱刀分離法回收技術

5. 法國 Veolia 公司破碎渦流分離技術

PV CYCLE¹與Syndicat des Énergies Renouvelables(可再生能源聯盟)在法國Veolia公司的Rousset工廠開設歐洲第一條回收廢太陽能光電模組的生產線，年處理量為4,000公噸，整體回收處理率94.7%。處理一塊太陽能光電模組時間約60~90秒。處理步驟為機械拆除鋁框架、接線盒與電纜，將太陽能電池層板輸送進入切碎機切成塊狀，壓碎後振動篩分並使用渦流分離器提取金屬零件，渦流分離是利用物質電導度之不同分離非鐵金屬與非金屬。共有7個收集管道包含兩種粒徑玻璃、金屬、背板雜物(聚合物)，處理步驟與產品如圖4.1-8所示。後續依產出物質的特性提供給不同工廠重新使用或再製。

¹ PV CYCLE 是一家非營利組織，為世界各地的公司和廢棄物持有者提供集體和量身定制的廢物管理和法律合規服務，以模組製造商/進口商繳交規費為組織運作基金。在太陽能模組回收處理服務主要為建構模組報廢到回收之管道。

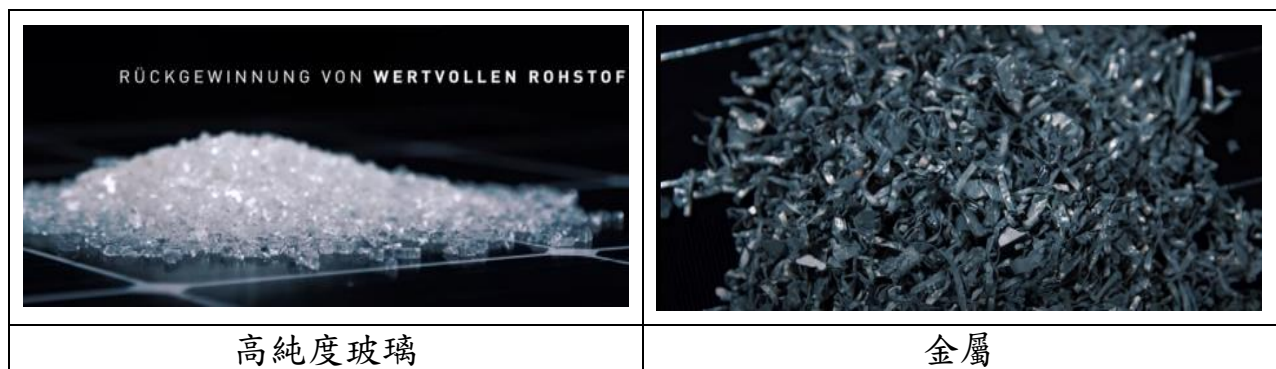
流程	產出	後續處理
物理拆除		 鋁框送至鋁精煉廠
物理拆除	 World premiere in recycling photovoltaic panels Veolia	 接線盒與電纜送至電纜回收廠
切割壓碎		
振動篩分	 are solar panels recyclable? Discover recycling at the Rousset pl... 前後觀看 GLASS IS RECOVERED	 碎玻璃送至玻璃廠  聚合物轉化為固體燃料
渦流分選	 鍍錫銅帶 (Ribbon) 送至金屬冶煉廠	 鍍錫銅帶 (Ribbon) 送至金屬冶煉廠

資料來源：<https://pvcycle.fr/recyclage/silicium-cristallin/>，PV CYCLE 網站與
<https://www.veolia.com/en/newsroom/news/recycling-photovoltaic-panels-circular-economy-france>，Veolia 公司網站。

圖 4.1-8 Veolia 公司破碎渦流法回收技術

6. 德國 Reiling 公司(Reiling GmbH & Co. KG)渦流與光學分選技術

Reiling公司認為玻璃是太陽能光電模組的主要成分，因此是主要回收的原料。處理步驟為機械拆除鋁框架、接線盒與電纜，將太陽能電池層板經兩道破碎至3 mm粒徑，接著由磁選及渦電流分選系統分離鐵及非鐵金屬，由排氣系統分離EVA及PVB，最後再以光學分選系統去除不透光的物質(如塑膠)。處理後產品如圖4.1-9所示。



資料來源：Recycling von ausgedienten Photovoltaik-Modulen，Reiling Unternehmensgruppe。

圖 4.1-9 Reiling 公司渦流與光學分選技術處理後產品

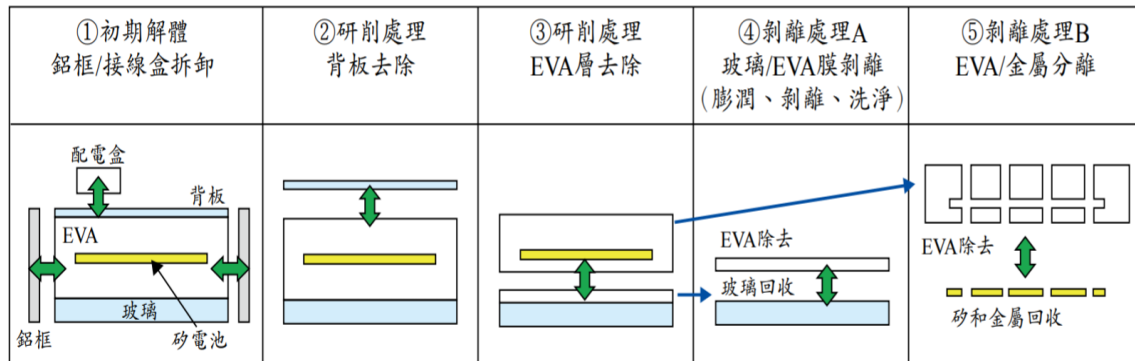
4.2 化學處理法回收技術案例

利用化學溶劑(如醇類)方式進行處理，切斷 EVA 架橋(交聯)，使 EVA 分子量變小，易於溶解加以去除；而化學溶劑(如酸或鹼類)的影響因子包括添加劑(酸或鹼)、反應溫度、粉碎後顆粒大小；溶劑可以經過濾、離心或蒸餾等回收再使用。

1. 日本東邦化成溶劑(醇類)溶解技術

日本東邦化成(TOHO KASEI CO.,LTD.)以化學處理法回收太陽能光電模組，模組回收流程分為初期解體、研削處理與剝離處理，初期解體與研削處理是以物理方式拆除鋁框、接線盒與背板以及部分EVA，剝離處理

分兩種製程，其一是除去玻璃上的EVA，其二是分離金屬與EVA，上述剝離方法均是以濕式法(化學溶劑)將玻璃和太陽能電池上的EVA去除，以及有機部分(EVA)與無機部分(矽和金屬)分離，處理流程如圖4.2-1所示。

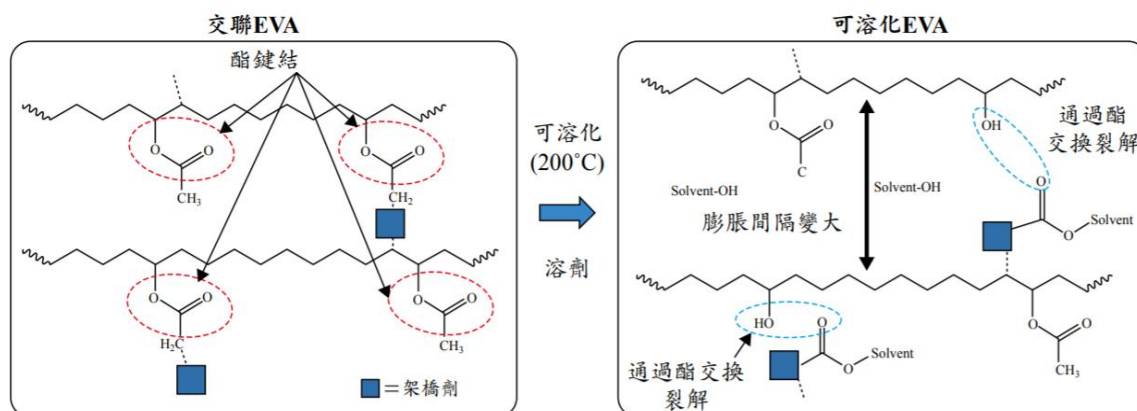


資料來源：吳曜杉、王雨筠、鄭隆藤、姜暉先、林福銘，日本太陽光電模組回收技術解析，工業材料雜誌 381 期，2018 年 9 月。

圖 4.2-1 東邦化成化學處理法流程圖

2. 日本產業技術總合研究所(AIST)溶劑(醇類)溶解技術

產業技術總合研究所(Advanced Industrial Science and Technology, AIST)之剝離處理方法為濕式法，需採用化學溶劑(如醇類)進行酯交換反應，切斷EVA架橋(交聯)，使EVA分子量變小，易於溶解加以去除，其溶解機制如圖4.2-2所示。AIST的研究發現溶劑中添加劑種類(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為30~60分鐘，溶解率可達90~100%。另外，使用濕式法處理太陽能光電模組的疑慮就是廢溶劑該如何處理，AIST採用的溶劑回收使用方法為減壓蒸餾法，回收率為97.3~99%。



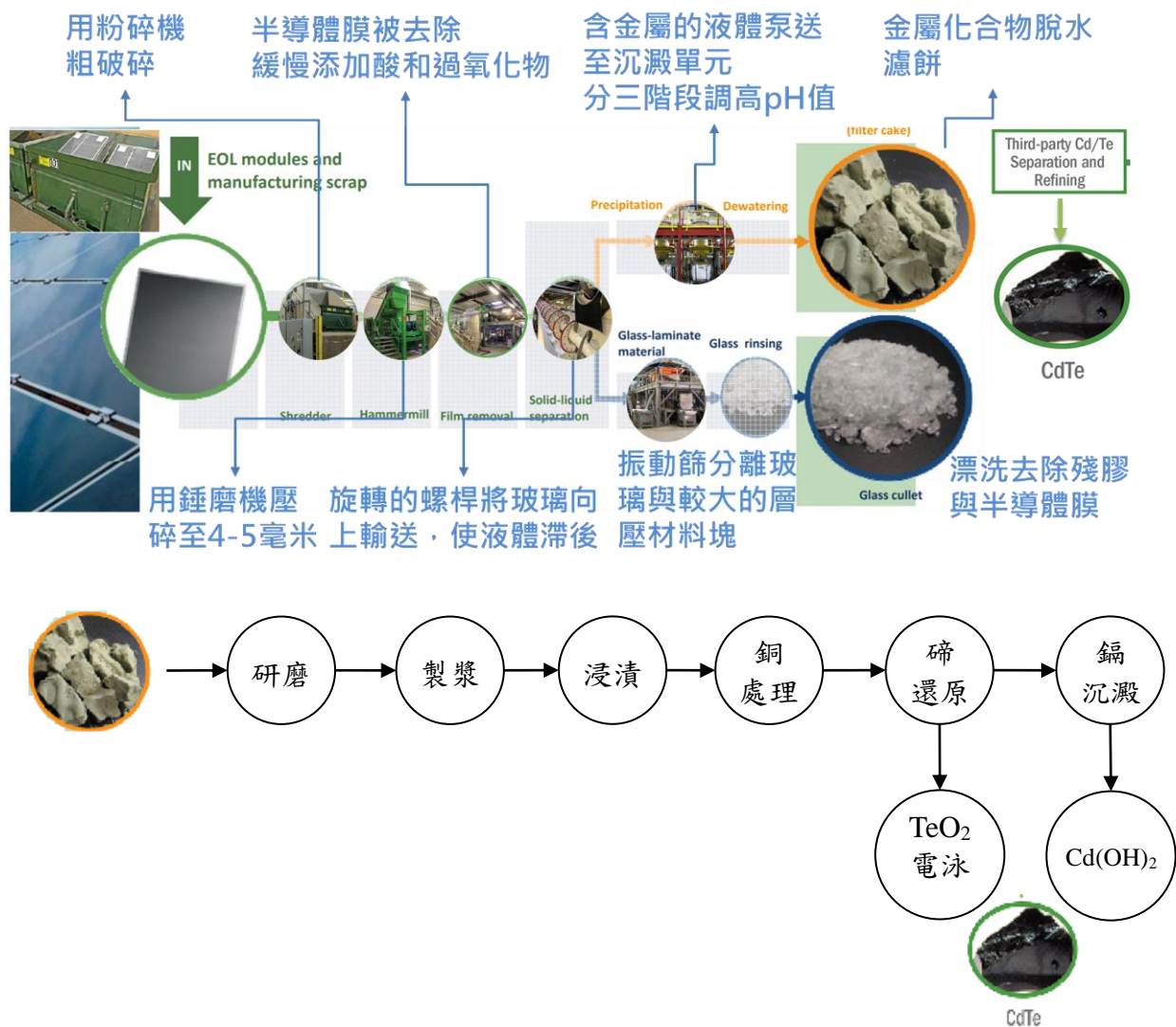
資料來源：日本產業技術總合研究所 AIST，工研院綠能所整理。

圖 4.2-2 化學處理溶劑溶解 EVA 機制圖

3.美國 First Solar 溶劑(酸液)分離技術

目前資源化技術在薄膜型太陽能光電模組(含碲化鎘(Cadmium Telluride, CdTe))最為成功。由於薄膜型(CdTe)太陽能光電模組中使用到有毒的鎘，在發展初期就被質疑該產品的環境毒害性，因此開發太陽能光電模組的美國First Solar公司在產品開發初期，就已經一併開發出完善的回收處理機制。從廢棄的薄膜型太陽能光電模組中分別回收碲、鎘與玻璃，並將這些物質進行純化後再次回到生產鏈上重新製作成新的薄膜型太陽光電模組，該技術回收率高達95%，是太陽能光電模組資源化技術成功之案例。

美國First Solar以化學處理法回收太陽能光電模組，模組需先拆解接線盒、鋁框與背板，再以粉碎機、錘磨機壓碎太陽能電池、EVA膠膜與玻璃；接著進行化學處理，添加酸與過氧化物分離玻璃、EVA膠與金屬，含金屬的液體調整pH值可產出金屬化合物濾餅(Unrefined Semiconductor Material, USM)，而USM再經研磨、製漿、浸漬、銅處理、碲還原及電泳、鎘沉澱等過程分離出碲及鎘。另外，分離後的玻璃經漂洗去除殘膠，可回製新玻璃，處理流程與產品照片如圖4.2-3所示。整體回收效率達95%。



資料來源：End-of-Life CdTe PV Recycling with Semiconductor Refining, Parikhith Sinha, Maxime Cossette, and Jean-François Ménard, 美國 First Solar 公司, 本計畫整理。

圖 4.2-3 First Solar 公司化學處理法流程與產品照片

4.3 熱裂解法回收技術案例

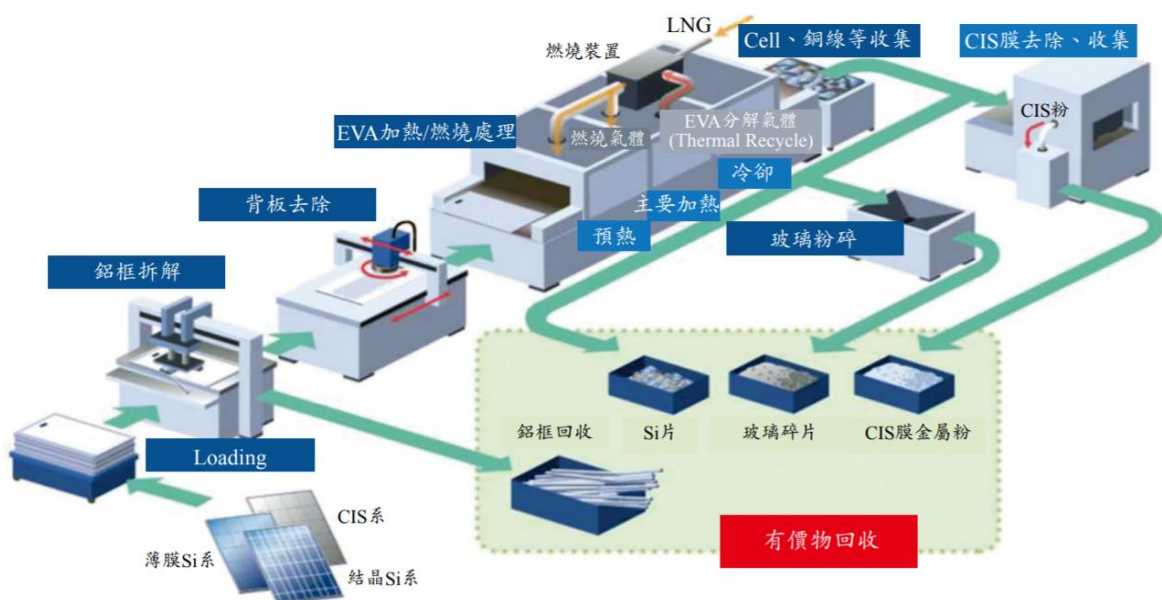
目前分解矽晶型太陽能光電模組較簡單的方式是使用熱分解技術，將廢棄太陽能光電模組拆除完鋁框與接線盒後，放置於高溫爐中加熱，將 EVA 與 PVF 背板熱裂解，溫度控制於低於玻璃的熔點，以分離太陽能電池層和玻璃，分別收集玻璃、導電帶(Ribbon)和電池片，再個別進行回收處理。EVA

與 PVF 背板被熱裂解後可能會產生大量二氧化碳、有機物廢氣、氫酸氣或戴奧辛等需要妥善處理，且太陽能電池層板中的金屬成份可能也會因高溫被排出，因此後續的尾氣處理相當重要。

1. 日本新菱子公司 Recycle Tech EVA 加熱燃燒處理技術

日本新菱公司子公司 Recycle Tech Co., Ltd 以熱裂解法處理太陽能光電模組，模組在拆除接線盒、鋁框拆解以及背板去除後，可直接送進熱裂解處理裝置去除 EVA，熱裂解後產出矽片、玻璃與金屬粉，處理流程如圖 4.3-1 所示。

熱裂解處理裝置功能為預熱、加熱和冷卻，EVA 在加熱(熱裂解)後產生分解氣體，氣體送入燃燒裝置，並通入液化天然氣(Liquefied Natural Gas, LNG)，使分解氣體進一步燃燒氧化，燃燒爐內平均溫度達 $1,000^{\circ}\text{C}$ ，故需於爐內採用耐火磚、燃燒裝置加強廢熱回收等措施，以維持設備處理效率並符合法規要求。此資源循環技術可回收鋁框、矽片、玻璃碎片與金屬粉等有價物質，回收效率可達95%。

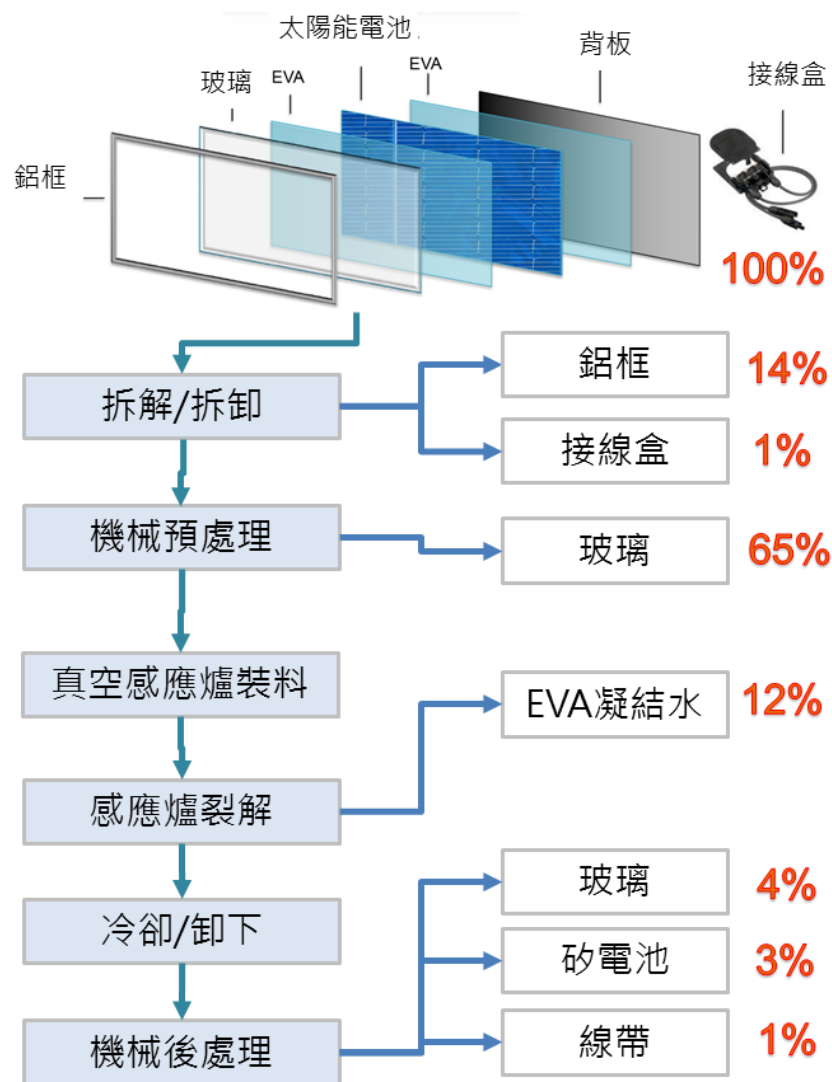


資料來源：新菱株式會社，工研院綠能所整理。

圖 4.3-1 日本新菱公司熱裂解處理法流程圖





2. 德國 Accurec recycling GmbH 真空感應爐熱處理技術

德國 Accurec recycling 以真空熱處理回收太陽能光電模組，模組先拆解接線盒與鋁框，再以物理方式取下大部分玻璃，太陽能電池與 EVA 膠膜裝進真空感應爐，進行熱處理，處理流程如圖 4.3-2 所示。熱裂解後再進行機械後處理分選產出玻璃、矽與金屬，裂解處理法產品照片如圖 4.3-3 所示，拆解回收效率可達 75%。



資料來源：第三屆光伏組件回收國際會議簡報，德國 Accurec recycling 公司，2013 年 2 月，本計畫整理。

圖 4.3-2 Accurec 公司真空感應爐熱裂解處理法流程圖

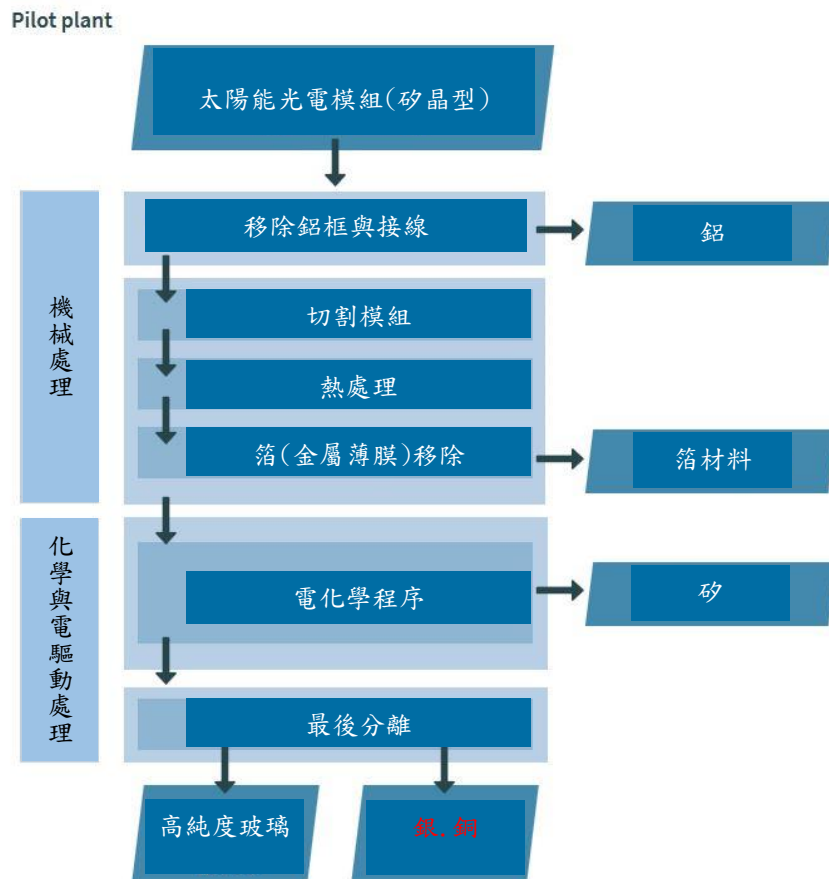
			
熱裂解後產出	玻璃-後處理	矽-後處理	金屬-後處理

資料來源：第三屆光伏組件回收國際會議簡報，德國 Accurec recycling 公司，2013 年 2 月，本計畫整理。

圖 4.3-3 Accurec 公司裂解處理法產品照片

3. 德國 Geltz Umwelt-Technologie 公司熱裂解處理技術

Geltz Umwelt-Technologie 以熱處理回收太陽能光電模組，模組先拆解接線盒與鋁框，其認為回收過程中的關鍵步驟是破壞聚合物層，在聚合物層後溶解後，玻璃很容易脫落。隨後，金屬和矽以化學方式被回收為純物質，處理流程如圖 4.3-4 所示。該技術尚屬研發階段，獲歐盟研究與創新計畫 Horizon 2020 資助，授權號為 701104。裂解處理設備模擬如圖 4.3-5 所示，預估年處理 5 萬個太陽能光電模組，整體回收效率可達 95%。



資料來源：Geltz 公司網站，<https://geltz.de/en/elsi-pv/>。

圖 4.3-4 Geltz 公司裂解處理技術流程圖



資料來源：Geltz 公司網站，
<https://geltz.de/wp-content/uploads/2018/12/Flyer-Solarmodule-englisch-HP.pdf>。

圖 4.3-5 Geltz 公司裂解處理設備模擬圖

4.4 廢太陽光電模組回收及資源循環技術案例評析彙整

本章節所蒐集彙整之國外資源循環關鍵技術為廢太陽光電模組回收及資源循環技術案例，其相關技術評析彙整如表 4.4-1 所示，廠商可依據相關技術及適用對象參考應用。

表 4.4-1 廢太陽光電模組回收及資源循環技術評析

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	技術來源
機械法	色彩選別技術	含金屬的粉碎料(有色)後續可以金屬回收技術處理，含 EVA 的玻璃粉碎料(無色)可製成建材或隔熱材。	1.機械法較其他處理技術無衍生廢棄物（如溶劑、分解氣體）產生。 2.熱刀技術可回收整板玻璃以及提升後續金屬回收效率。 3.處理速度快。	日本三菱材料公司 (已商業化)
	破碎風選	依不同顆粒大小分出玻璃、背板和混合物。		日本 RTJ 公司 (已商業化)
	濕式比重分選	依密度大小分出無機物(玻璃、金屬、矽等)和有機物(EVA、背板等)。		日本 Harita Metal 公司 (已商業化)
	熱刀分離技術	EVA 膜熔融，分離玻璃與其他部位。		日本 NPC 公司 (已商業化)
	破碎渦流分選	依顆粒大小與磁性分出玻璃、背板(聚合物)和金屬。		法國 Veolia 公司 (已商業化)
	渦流與光學分選	依顆粒大小、磁性與透光度分出玻璃、塑膠(聚合物)和金屬。		德國 Reiling 公司 (已商業化)
化學處理法	溶劑(醇類)溶解	溶解 EVA 膜，使玻璃、金屬與 EVA 剝離。	1.可完全去除 EVA，且矽與金屬不會氧化變色，有利於後續回收價值。	日本東邦化成公司 (已商業化)
	溶劑(醇類)溶解	採用化學溶劑(如醇類)進行酯交換反應，切斷 EVA 架橋(交聯)，使 EVA 分子量變小，易於溶解加以去除。		日本產業技術總合研究所 (AIST) (研究階段)
	溶劑(酸類)溶解	溶解 EVA 膜，調整 pH 值產出金屬化合物濾柄，並取得玻璃。		美國 First Solar 公司 (已商業化)
熱裂解法	熱裂解	EVA 熱裂解為分解氣體供燃燒熱能使用。	1.無衍生溶劑與化學藥劑廢棄物。	日本 Recycle Tech 公司 (已商業化)

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	技術來源
	真空熱裂解	EVA 可以凝結水形式用於其他物質。	2.可取得較高比例有價物質。	德國 Accurec recycling 公司 (已商業化)
	熱裂解	以熱處理回收太陽能光電模組，模組先拆解接線盒與鋁框，其認為回收過程中的關鍵步驟是破壞聚合物層，在聚合物層後溶解後，玻璃很容易脫落。		Geltz Umwelt-Technologie 公司 (研發階段)

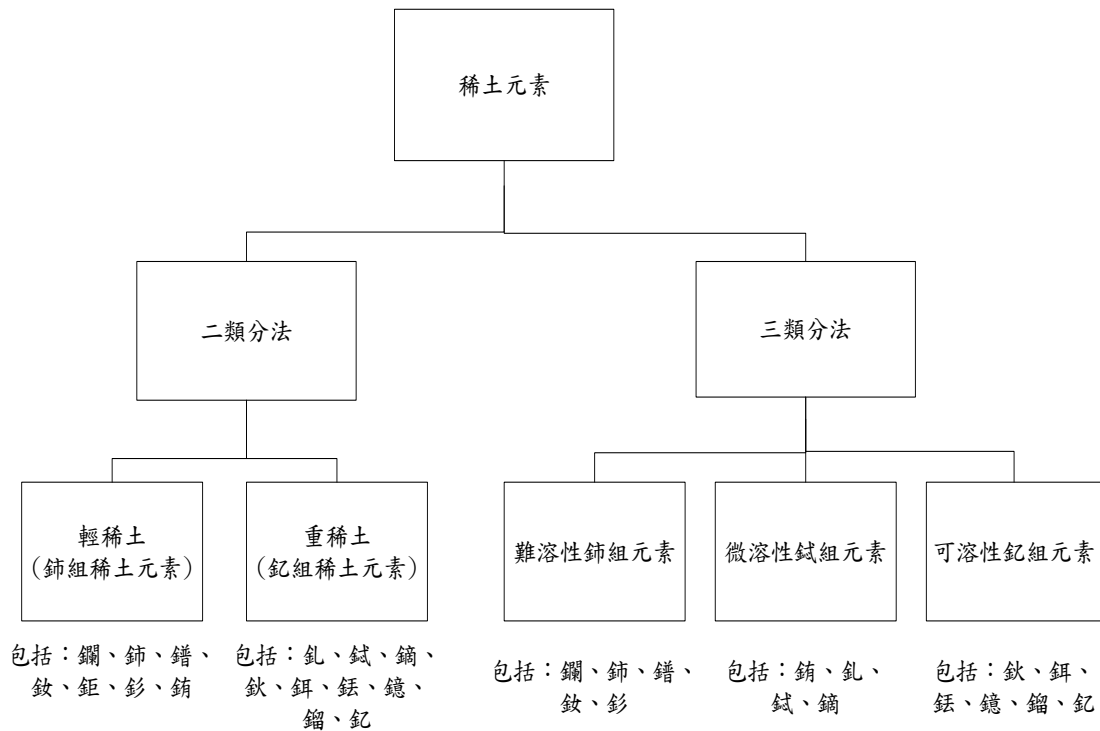
五、稀土金屬回收及資源循環技術案例

稀土元素或稱稀土金屬，是元素週期表鐳系元素及第III族副族元素銩、釔等共 17 種化學元素的合稱，其中銩和釔因為經常與鐳系元素在礦床中共生，且具有相似的化學性質，故被認定為屬稀土元素。稀土元素多數呈銀灰色，有光澤，晶體結構多為六方最密堆積(Hexagonal Closest Packed Structure, HCP)或面心立方堆積(Face Centered Cubic Packed Structure, FCC)。性質較軟，其在潮濕空氣中不易保存，易溶於稀酸。

與其名稱暗示的不同，稀土元素(鉕除外)在地殼中的豐度相當高，其中鈾在地殼元素豐度排名第 25，占 0.0068%(與銅接近)。稀土元素並不稀有，但其傾向於兩兩一起生成合金，且難以將稀土元素單獨分離。另外，稀土元素在地殼中的分布相當分散，很少有稀土元素集中到容許商業開採的礦床。

根據稀土元素之原子電子層結構和物理化學性質，以及在礦物中共生情況和不同的離子半徑可產生不同性質的特徵，通常將 17 種稀土元素分為輕稀土及重稀土二組，其中輕稀土包括：鐳(La)、鈾(Ce)、鐳(Pr)、釔(Nd)、鉕(Pm)、釷(Sm)、鎳(Eu)、釷(Gd)。重稀土包括：錒(Tb)、鐳(Dy)、釷(Ho)、鉕(Er)、鎳(Tm)、鐳(Yb)、鐳(Lu)、銩(Sc)、釔(Y)。於化學元素周期表之配置詳見圖 5-1，其分法則按其溶解度及其非水溶液化學特性分類，按硫酸鹽溶解度大小，可分為難溶性的鈾組元素(鐳、鈾、鐳、釔、釷)、微溶性的錒組元素(鎳、釷、錒、鐳)及可溶性的釔組元素(釔、釷、鉕、鎳、鐳、鐳)，其元素分類如圖 5-2 所示。

1 H 氫	<div><div>稀有輕金屬</div><div>稀有高熔點金屬</div><div>貴金屬</div><div>有色輕金屬</div><div>黑金屬</div><div>稀有分散金屬</div><div>稀土金屬</div><div>有色重金屬</div><div>半金屬</div></div>																2 He 氦						
3 Li 鋰	4 Be 鈹																	5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
11 Na 鈉	12 Mg 鎂																	13 Al 鋁	14 Si 矽	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氬
19 K 鉀	20 Ca 鈣	21 Sc 鈾	22 Ti 鈦	23 V 鈦	24 Cr 鉻	25 Mn 錳	26 Fe 鐵	27 Co 鈷	28 Ni 鎳	29 Cu 銅	30 Zn 鋅	31 Ga 鎵	32 Ge 矽	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪						
37 Rb 鉀	38 Sr 銣	39 Y 鈾	40 Zr 鋯	41 Nb 鈮	42 Mo 鉬	43 Tc 錳	44 Ru 鈷	45 Rh 銲	46 Pd 鉑	47 Ag 銀	48 Cd 鎘	49 In 銦	50 Sn 錫	51 Sb 銻	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙						
55 Cs 銫	56 Ba 鋇	57-71 鐳系元素	72 Hf 鈹	73 Ta 鉭	74 W 鎢	75 Re 銲	76 Os 銱	77 Ir 銱	78 Pt 鉑	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 鉍	82 Pb 鉛	83 Bi 鉍	84 Po 鉈	85 At 砒	86 Rn 氡						
87 Fr 銣	88 Ra 鐳	89-103 鐳系元素	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds 鐒	111 Rg 鰐	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo						
<div><div>輕稀土</div><div>重稀土</div></div>																							
<div><div>稀土 (Rare Earth, RE)</div><div>57 La 鐳</div><div>58 Ce 鈰</div><div>59 Pr 鐳</div><div>60 Nd 釹</div><div>61 Pm 鉕</div><div>62 Sm 釷</div><div>63 Eu 鈣</div><div>64 Gd 釷</div><div>65 Tb 鈣</div><div>66 Dy 鐳</div><div>67 Ho 鈣</div><div>68 Er 鈣</div><div>69 Tm 鐳</div><div>70 Yb 鐳</div><div>71 Lu 鐳</div></div>																							
<div>89 Ac 鐳</div> <div>90 Th 鈾</div> <div>91 Pa 鐳</div> <div>92 U 鈾</div> <div>93 Np 釷</div> <div>94 Pu 鈾</div> <div>95 Am 鐳</div> <div>96 Cm 鐳</div> <div>97 Bk 鈣</div> <div>98 Cf 鈣</div> <div>99 Es 鐳</div> <div>100 Fm 鐳</div> <div>101 Md 鐳</div> <div>102 No 鐳</div> <div>103 Lr 鐳</div>																							

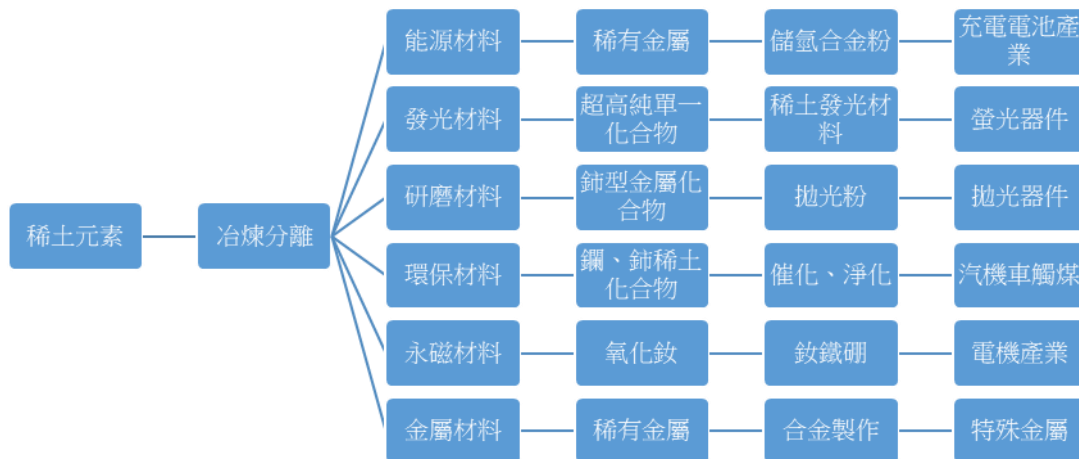


資料來源：徐光實、袁承業，稀土的溶劑萃取，科學出版社，2010 年。

圖 5-2 稀土元素分類

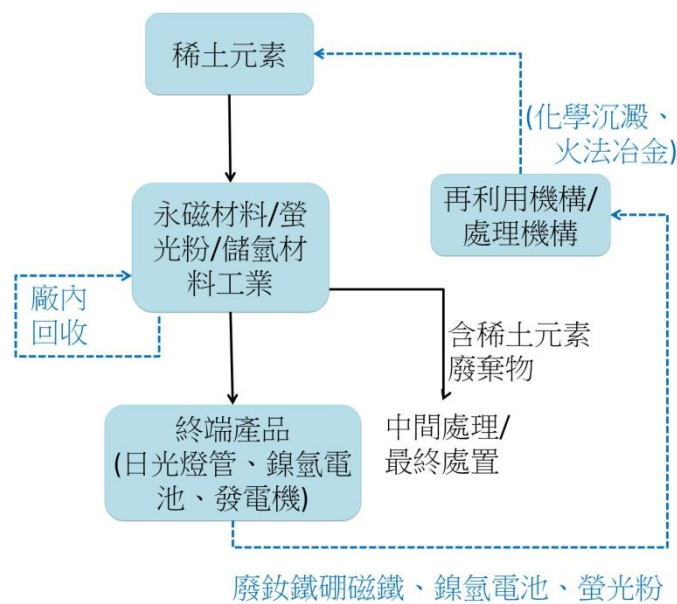
稀土已被廣泛應用於冶金、機械、石油、化工、玻璃、陶瓷、紡織、皮革及農牧養殖等各傳統方面領域及特殊領域用途，如航太零件、電子、雷射、核能工業、超導體等，被稱為是 21 世紀的科技金屬。其可作為改性添加元素，如在鋼鐵和有色金屬中加入極少量稀土就能明顯改善金屬材料性能，提高鋼材的強度、耐磨性和抗腐蝕性能力，故又被稱為工業維他命。

稀土化合物於許多新產品如電子業、光電業、電動車業等產品之生產過程中都會使用到。如電動車用永磁馬達、風力機用發電機、節能燈泡、汽車排氣之觸媒、充電電池等都對稀土元素有相當程度的仰賴。目前稀土原料經冶煉分離後相關涉及產業如圖 5-3 所示。按全球稀土金屬產業鏈分類，主要可分為礦源提煉及進口、稀土金屬精煉及加工、加工材料應用及回收再利用，相關流布概況如圖 5-4 所示。



資料來源：行政院環保署，稀土元素關鍵物料調查報告，2017 年 12 月。

圖 5-3 稀土元素涉及產業



資料來源：行政院環保署，稀土元素關鍵物料調查報告，2017 年 12 月。

圖 5-4 稀土元素物料流布概況

2013 年聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme, UNEP)公布全球僅有 1%的稀土元素被回收，稀土元素於廢棄物資源化領域中，以廢照明光源使用的輕稀土回收成效較為顯著，電子產品使用的重稀土回收較少；總觀稀土元素的回收再利用仍有相當大的應用空間，以下即

針對發光材料(如螢光粉)、研磨材料(如拋光粉)、永磁材料(如鈷鐵硼磁鐵)等進行稀土金屬回收及資源循環技術案例說明。

5.1 發光材料資源化技術案例

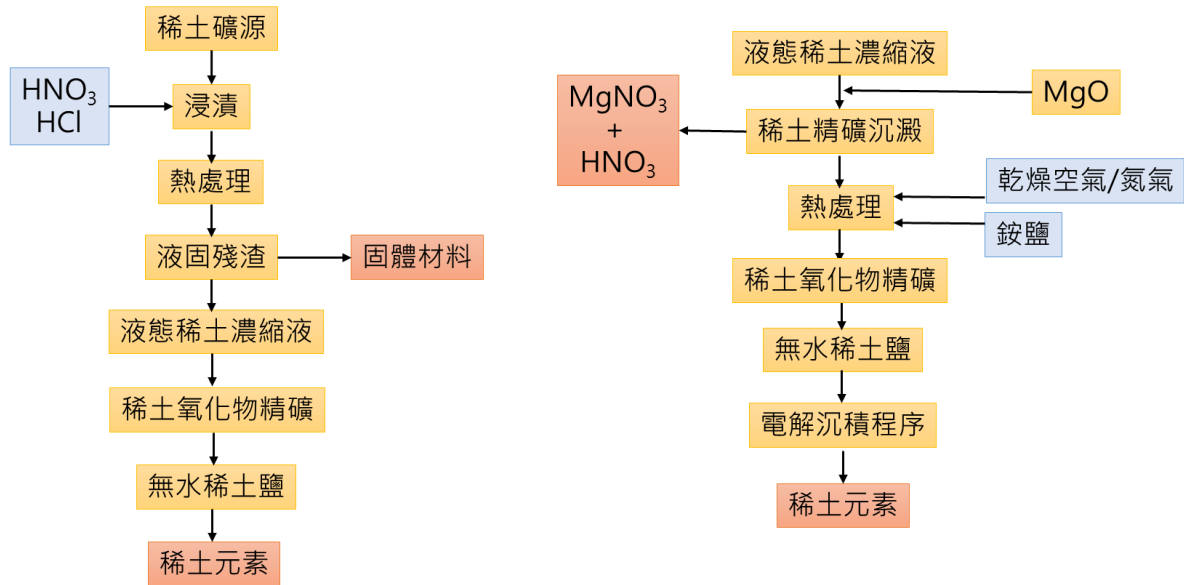
螢光粉中含有重稀土元素如鎔(Eu)、銩(Tb)及釔(Y)，自其回收稀土元素比從永磁材料回收稀土更簡易，惟需要先從回收之燈管中去除汞，且由螢光粉回收之稀土中含大量雜質，成為分離和純化稀土元素之挑戰。

1. 美國 Rare Earth Salts(RES)公司

美國 Rare Earth Salts(RES)公司開發用於分離和純化稀土元素的熱處理程序，與溶劑萃取方法相比，具有明顯的設置及操作成本優勢。該技術已在商業規模上得到驗證，並投資建置商業化設備中，可將稀土元素分離並提純至高純度，可應用於多種稀土濃縮，並可有效分離並提純 16 種稀土元素，包含鐳(La)、鈾(Ce)、鐳(P)、釹(Nd)、釷(Sm)、鎔(Eu)、釷(Gd)、銩(Tb)、鐳(Dy)、釹(Ho)、鉕(Er)、銩(Tm)、鐳(Yb)、鐳(Lu)、釷(Sc)及釔(Y)。該技術以更低的單位成本生產純淨的稀土，其流程對環境友好，且循環利用幾乎不產生廢棄物。

RES 公司申請之專利發明於 2019 年 12 月核准公開，為一種從礦石、尾礦或含稀土材料中，回收、浸漬和分離稀土元素的方法。其方法包括研磨含稀土的礦石或材料，並使用無機酸析出金屬離子形成金屬溶液濃縮物，以及從沉澱金屬溶液濃縮物中選擇性去除金屬離子。程序步驟包括：來自稀土礦源提煉稀土元素及從液態稀土濃縮液提煉稀土元素，其中從液態稀土濃縮液中加入 MgO 調整 pH 值，以獲得稀土元素的沉澱物，將該沉澱物進行焙燒熱處理(加熱至少 350°C 以上)，加入乾燥空氣/氮氣及銨鹽進行反應，產生稀土氧化物精礦，再經水洗並進行電解沉積程序產生稀土元

素，該技術之流程如圖 5.1-1 所示。



浸漬和分離稀土元素基本流程示意圖

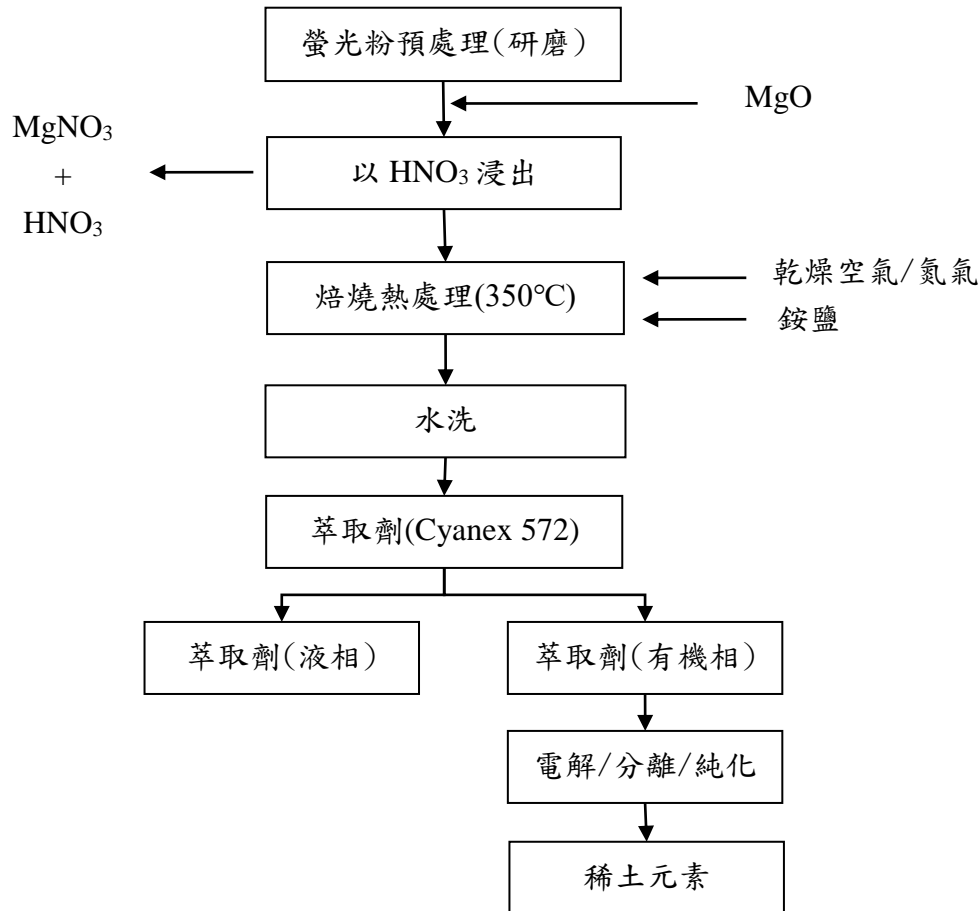
從含水稀土精礦中回收稀土元素流程示意圖

資料來源：Joseph Brewer et al., Method for extraction and separation of rare earth elements，專利發明 US10494694B2，2019 年 12 月。

圖 5.1-1 以熱處理法浸濾和分離稀土元素流程示意圖

RES 公司部分生產原料來自回收的螢光燈泡材料，該材料透過 Rare Earth Recovery Sciences(RERS)公司及美國燈泡回收商 Lighting Resources 公司合作，於廢螢光燈泡中回收稀土金屬釔(Y)、鎔(Eu)及鉍(Tb)，其製造流程如圖 5.1-2 所示。RES 公司啟用其在美國內布拉斯加州的分離設施，2018 年 9 月開始按月生產將回收的螢光粉製成分離的稀土產品。該工廠的產能約為 430 公噸/年稀土氧化物(Rare-Earth Oxide, REO)，其中包括初期生產 144 公噸/年的氧化釔、24 公噸/年的氧化鎔和氧化鉍，以及 12 公噸/年的氧化鉍和氧化鎔；未來 RERS 公司規劃將擴大業務範圍，以分階段的方式將稀土氧化物的產能提高到 3,500 公噸/年，包括從其他廢棄物(例如廢電子設備和電池等)中回收稀土。RERS 公司技術還可用於分離輕質和重質稀土，包括四種磁體取向的氧化物：釓(Nd)、鐠(Pr)、鉍(Td)和鐳(Dy)，為

美國首個重稀土氧化物生產廠商；根據其商業流程的測試結果，生產之稀土氧化物的標準純度可達 99.9%。該公司又計畫與 Minera BioLantanidos 和 Medallion Resources 合作，生產其他分離的稀土氧化物，重點生產釹、鐳和鐳的氧化物。Minera BioLantanidos 正在評估其在智利的離子粘土礦床，而 Medallion Resources 則專注於採購美國的獨居石原料。



資料來源：本計畫整理。

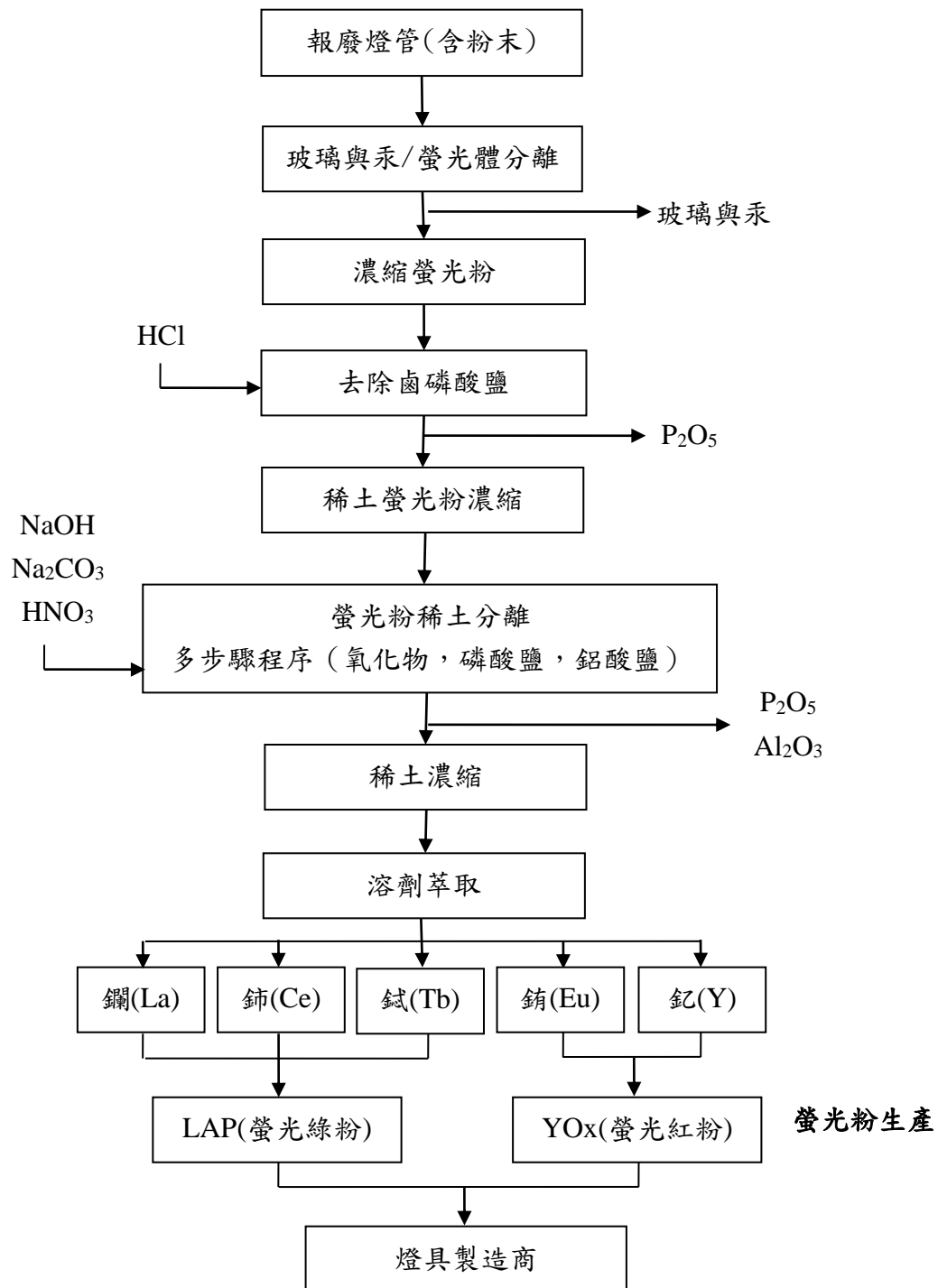
圖 5.1-2 螢光粉分離稀土元素流程示意圖

2. 比利時索維爾(Solvay)集團

自 2012 年以來，Solvay Rhodia(法國 Rhodia 公司於 2011 年由 Solvay 集團併購)開始在法國回收節能燈具之廢燈具螢光粉中的稀土元素，包含鐳(La)、鈾(Ce)、鈾(Tb)、鈾(Y)、鈾(Eu)及鈾(Gd)。報廢的燈泡和燈管由法

國專業的回收公司收集、分類和處理，這些公司會分類回收各種成分如玻璃、金屬、塑料、汞及螢光粉。其中螢光粉先送往 Solvay 位於法國聖豐(Saint Fons)的工廠，將粉末懸浮在水溶液中分離並乾燥後產出含稀土之濃縮物，再將含稀土之濃縮物送到位於拉羅謝爾(La Rochelle)的工廠進行純化。首先經過火法冶金熱處理，再進行懸浮、過濾和洗滌，之後再加入硝酸以溶解所有物質，並且透過溶劑萃取分離稀土元素；最後將分離的稀土元素經沉澱、過濾和煅燒過程產出各式稀土元素產品。回收的稀土元素鐳(La)、鈾(Ce)、鈹(Tb)可回收再生產成螢光綠粉(La、Ce、Tb)PO₄(稱為 LAP)，而鈾(Eu)及鈹(Gd)可回收再生產螢光紅粉 Y₂O₃:Eu³⁺(稱為 YOx)。回收螢光粉的流程如圖 5.1-3 所示，該公司回收設備如圖 5.1-4 所示。

若後續量能達到每年處理 1,000 公噸以上的廢棄物時，可回收 90% 以上的螢光粉末，並回收包含稀土氧化物、玻璃及磷酸鹽等項目。展望未來若回收系統全面工業化，將以每年處理 3,000 公噸以上的廢棄物作為目標，並優化能源效率及達到對於環境之最小影響。目前索維爾集團回收螢光粉的商業模式，如圖 5.1-5 所示。



資料來源：Solvay, Criteria, limits and advantages of Rare Earths recycling, Dec 2014.

圖 5.1-3 Solvay 集團回收螢光粉的流程圖



資料來源：Solvay 公司網站，
<https://www.solvay.com/en/innovation/open-innovation/elp/loop-life-project/la-rochelle-process>

圖 5.1-4 Solvay 集團回收螢光粉之萃取及煅燒設備



資料來源：Solvay, Criteria, limits and advantages of Rare Earths recycling, Dec 2014.

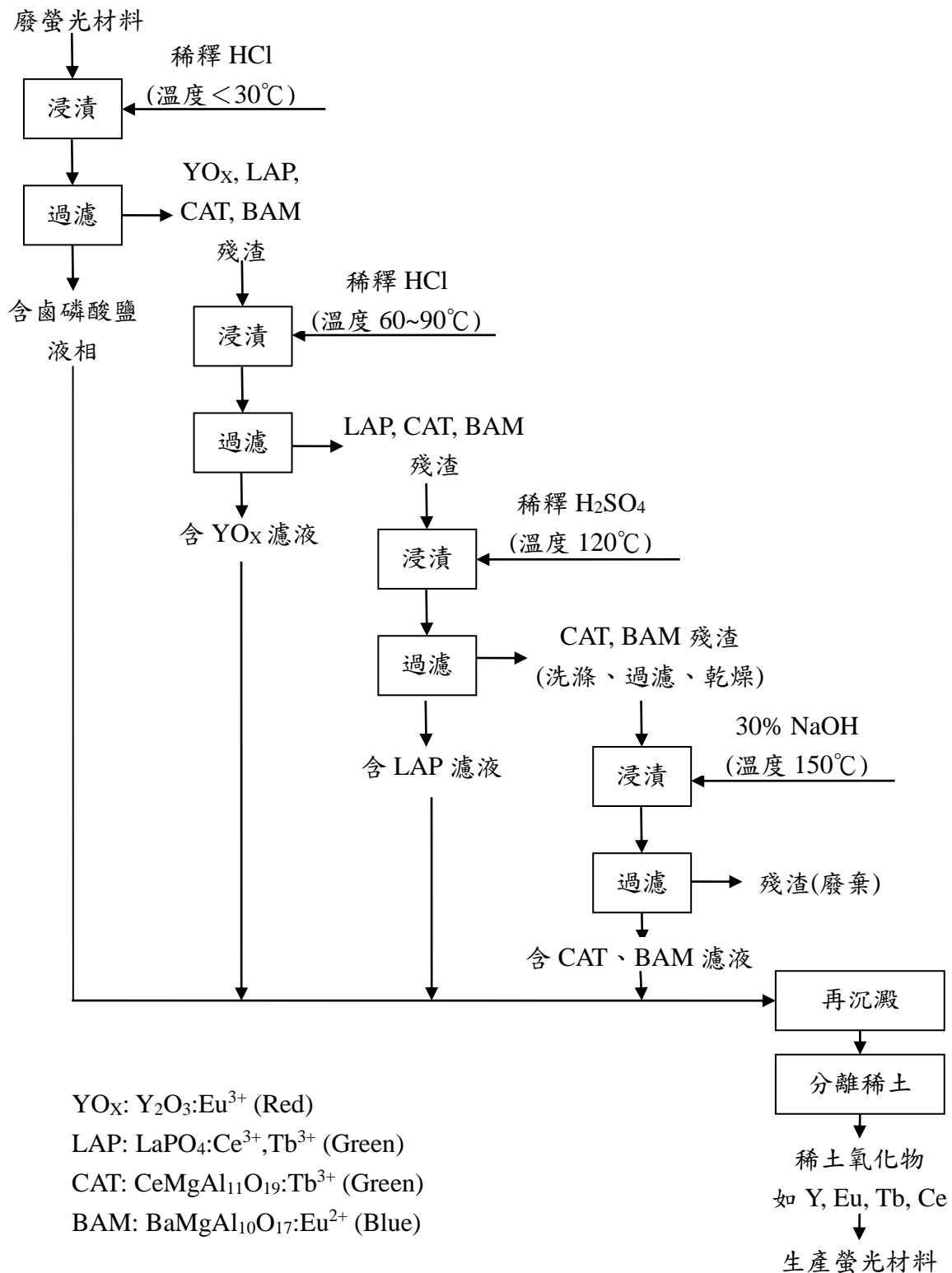
圖 5.1-5 Solvay 集團回收螢光粉之商業模式

3. 德國 Osram Licht AG 公司

Osram Licht AG 開發從廢棄螢光燈具中回收稀土元素的技術，商業化流程包括針對螢光粉中特定化合物的多步驟浸漬。Osram 於歐盟規定的燈管收集地點取走廢棄燈管，並回收其玻璃、金屬、汞和稀土元素。回收過程的第一步是機械分離螢光燈的金屬部分後，從燈管中吹出或清洗螢光粉，於密閉系統中加熱殘留的玻璃和粉末，再將汞汽化後回收稀土元素。

篩分螢光粉粉末之網目寬度在 20~25 mm，不同的螢光粉透過幾個選擇性浸漬步驟去除。在低於 30°C 的溫度下，將鹵磷酸鹽螢光體溶解在稀鹽酸溶液中。在此條件下， $Y_2O_3:Eu^{3+}$ 不會受到或僅受到輕微的溶蝕，而其他稀土螢光體則完全不受溶蝕。而 $Y_2O_3:Eu^{3+}$ 可以在 60~90°C 的溫度下溶於

稀鹽酸或硫酸中， $\text{LaPO}_4:\text{Ce}^{3+}$ 及 Tb^{3+} 可以在 $120\sim 230^\circ\text{C}$ 的溫度下溶於熱稀硫酸中。鋁酸鹽螢光粉 $(\text{Ce}, \text{Tb})\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$ 和 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 可以在 150°C 的高壓釜中或在熔融鹼中被35%氫氧化鈉溶液溶蝕。Osram的專利包含處理螢光體成分和雜質(例如高濃度鈣鹽)的不同替代方法。針對螢光粉中特定化合物的多步驟浸漬流程如圖 5.1-6 所示。而從分離的螢光體中提取稀土氧化物之純度可達99.99%，所有回收材料均可用於生產新的螢光燈，可達到節省資源並有助於保護環境。



資料來源：Manis Kumar Jha et al., Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals, Hydrometallurgy Volume 165, Oct 2016，本計畫整理。

圖 5.1-6 Osram 公司回收螢光粉的流程圖

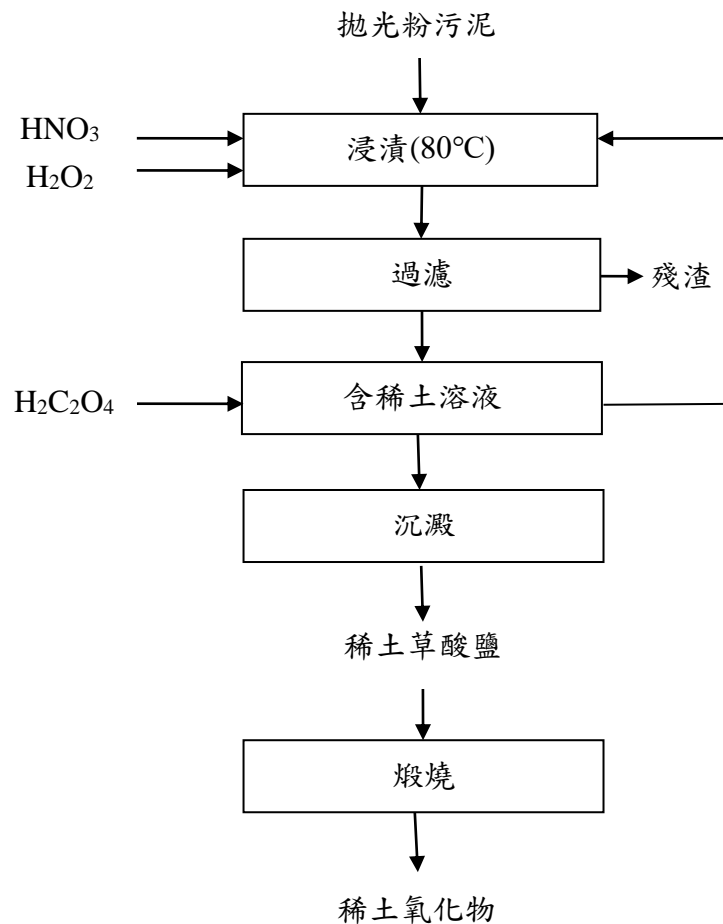
5.2 拋光研磨材料資源化技術案例

氧化鈰(CeO_2)漿液一直被認為是用於玻璃的最佳拋光劑，例如用於 LCD 螢幕、車窗玻璃、鏡子、光學鏡片的玻璃拋光，也用於多種類型的切割寶石。就其粒徑分佈而言，高品質的拋光粉要求非常嚴格，使得拋光粉難以再循環應用。玻璃拋光後產生的廢漿含有鈰以及其他稀土元素(主要為鐳、釹、鐳)，稀土元素在玻璃拋光廢棄物中的濃度取決於玻璃、添加劑、凝劑等化學成分。

1. 比利時 Hydrometal S.A. 公司

拋光粉中鐳和鈰的回收研究，可利用物理選礦(例如浮選)和/或鹼性浸漬法去除二氧化矽，或透過酸性浸漬法從浸出液中萃取鈰。鈰或鐳的回收率主要取決於拋光粉中化合物的性質，如果鐳以磷酸鹽或氟化物相存在，較難以溶解。由於 CeO_2 較難直接由酸性浸漬回收，常使用如碘化鉀或 H_2O_2 可降低所需的酸濃度和浸漬溫度。

比利時 Hydrometal S.A. 公司每年自玻璃拋光污泥和磁鐵污泥中回收 1,200 公噸之稀土氧化物，為目前較具商業化規模回收玻璃拋光污泥再製成稀土元素的公司；其中玻璃拋光污泥利用硝酸與 H_2O_2 浸漬玻璃拋光粉中 CeO_2 ，硝酸浸漬劑對二氧化矽和氧化鋁具有選擇性。該公司使用較高的溫度(約 80°C)使酸擴散到二氧化矽基質中，並增強過濾效果。一旦浸漬溶液中存在稀土元素，就可以採用多種方法回收鈰，例如草酸鹽沉澱、碳酸鹽沉澱、氫氧化物沉澱和重金屬沉澱、溶劑萃取等方式。Hydrometal S.A. 公司的流程圖，如圖 5.2-1 所示。

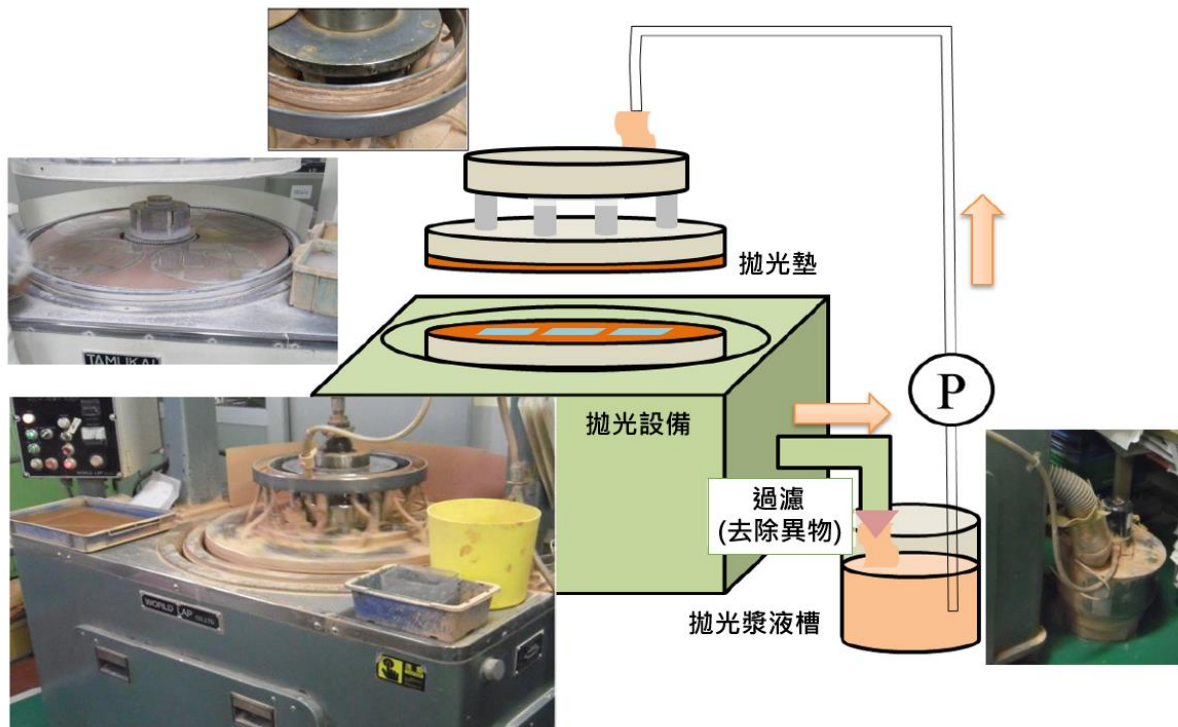


資料來源：Chenna Rao Borra et al., Recovery of Cerium from Glass Polishing Waste: A Critical Review, Metals - Open Access Metallurgy Journal 8(10), Sep 2018.

圖 5.2-1 用於處理拋光污泥的流程示意圖

2. 日本福島大學

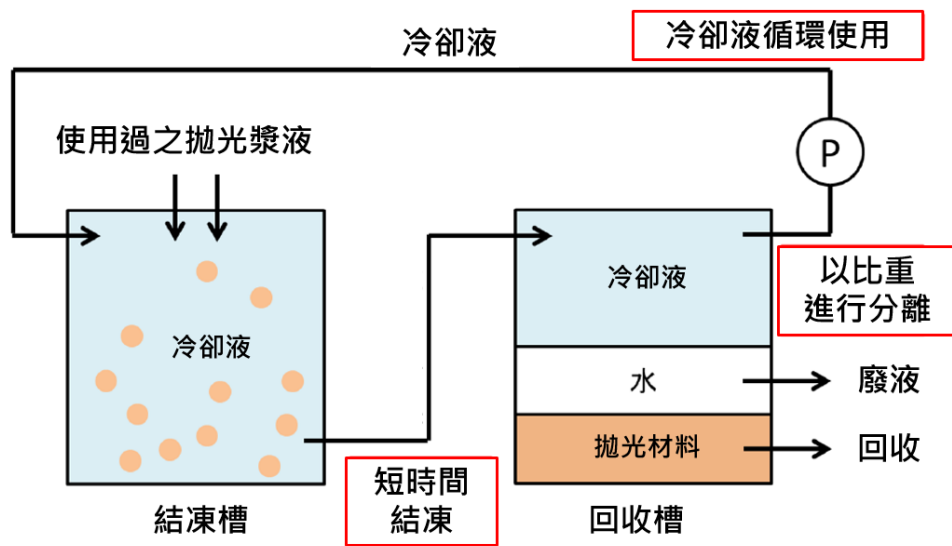
日本福島大學研發凍融分離程序，將廢拋光研磨混合液進行分離，並回收拋光研磨材，該程序目前為模廠試驗階段。製造玻璃光學零件之拋光設備如圖 5.2-2 所示，拋光漿液過濾去除異物後，收集至漿液槽再經泵浦送至拋光墊循環使用，若漿液之拋光能力降低則廢棄(稱為廢漿液)。



資料來源：佐藤理夫，酸化セリウム系ガラス研磨材の リユース・リサイクル技術。

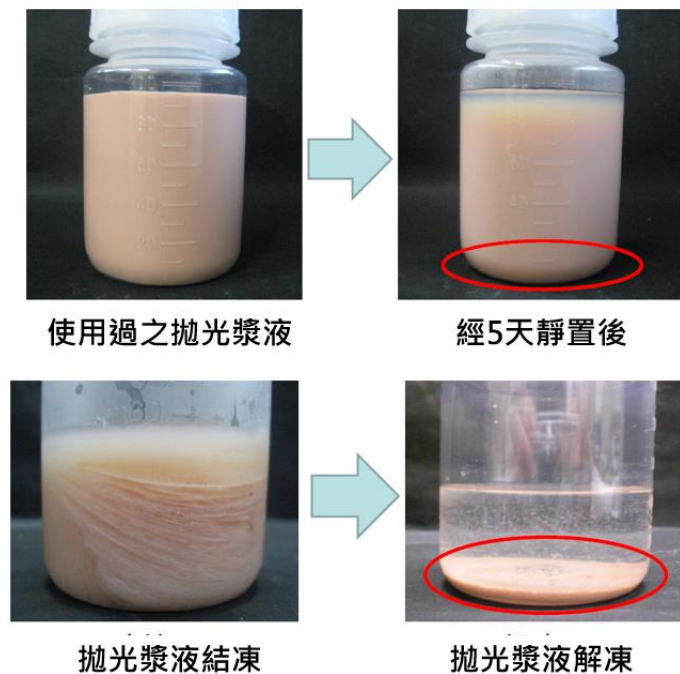
圖 5.2-2 拋光設備流程圖

廢漿液中磨料顆粒約為 $0.1\sim0.3\ \mu\text{m}$ ，如以自然沉降方式進行回收將非常耗時，因此透過冷凍和解凍程序，其漿液中的研磨細顆粒可以較容易地分離和回收；操作時冷凍槽的設定溫度為 -10°C ，後續解凍溫度設定為 25°C 。廢漿液凍融分離回收程序流程如圖 5.2-3 所示，廢漿液自然沉降及凍融程序之情形如圖 5.2-4 所示。



資料來源：佐藤理夫，酸化セリウム系ガラス研磨材の リユース・リサイクル技術。

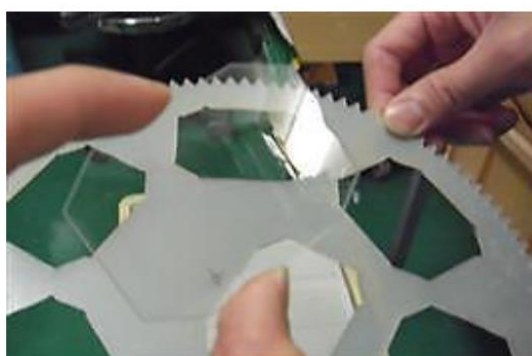
圖 5.2-3 廢漿液凍融分離回收程序流程圖



資料來源：佐藤理夫，酸化セリウム系ガラス研磨材の リユース・リサイクル技術。

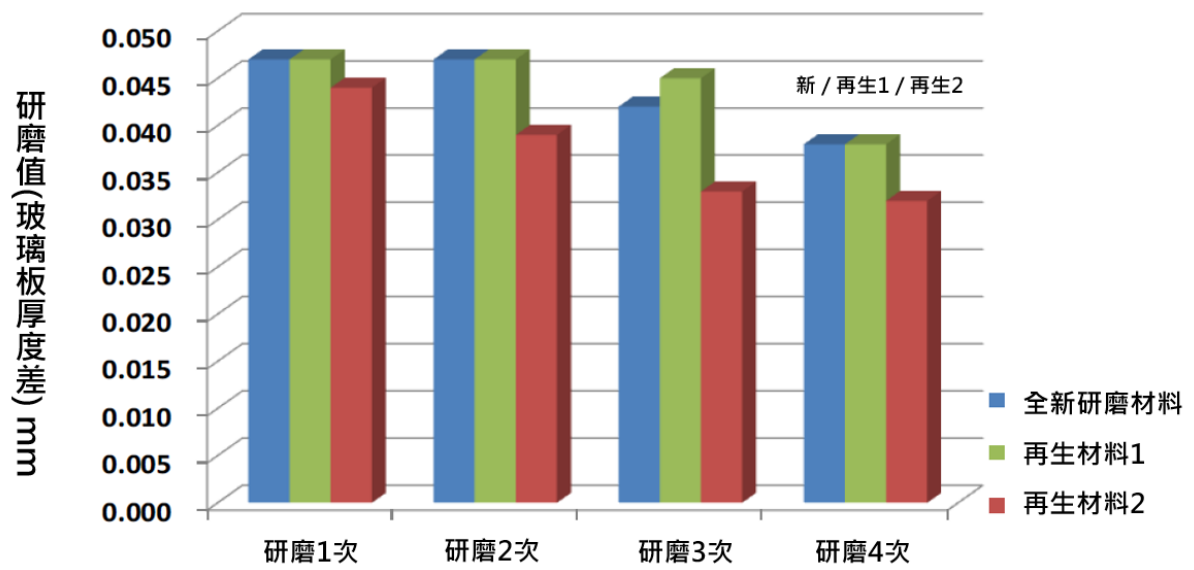
圖 5.2-4 廢漿液自然沉降及凍融程序之情形

而為確認分離回收的冷凍再生顆粒之拋光性能，以再生拋光材料與全新拋光材料進行光學玻璃製造之產品拋光比較，將同一片平板玻璃拋光研磨前後之厚度差作為研磨值，並檢視其刮痕情形，拋光程度檢驗情形及結果如圖 5.2-5 所示。其中再生拋光材料使用兩種類型，分別為玻璃成分占漿液中的固體物 29%之「再生材料 1」，與占比 44%之「再生材料 2」，試驗結果顯示以凍融分離程序回收之「再生材料 1」進行拋光之成品，其研磨值及表面精度與全新拋光材料無明顯差異，且使用再生材料不會增加產品次級品發生率(試驗結果如圖 5.2-6 所示)。透過合併使用自然沉降方式，可以減少再生材料中玻璃的占比，再以凍融分離程序進行回收，可達到拋光材料再利用之循環使用。



資料來源：佐藤理夫，酸化セリウム系ガラス研磨材の リユース・リサイクル技術。

圖 5.2-5 檢查員依標準檢視玻璃表面精度之情形



註：一次研墨共30片玻璃

資料來源：佐藤理夫，酸化セリウム系ガラス研磨材の リユース・リサイクル技術。

圖 5.2-6 以再生材料與全新材料進行研磨拋光之比較情形

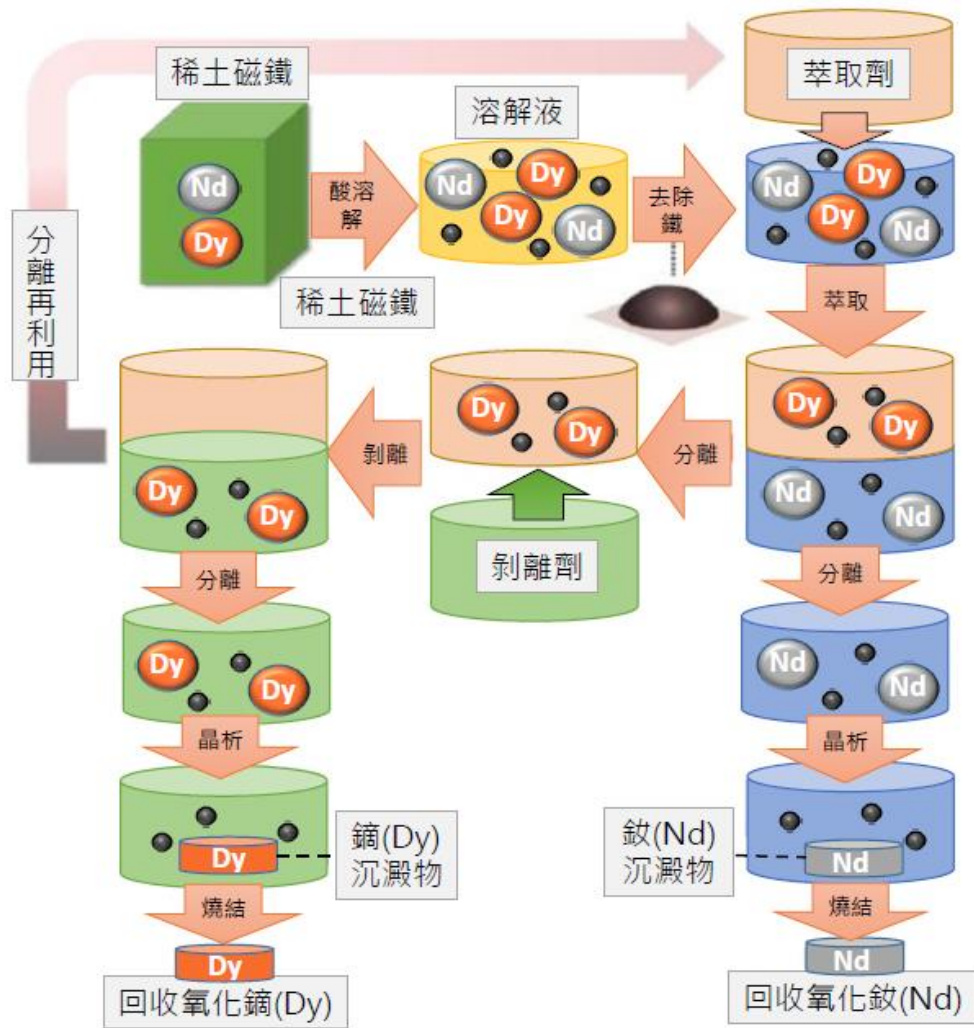
5.3 永磁材料資源化技術案例

釹鐵硼磁鐵廣泛應用於馬達、發電機、硬碟驅動器、手機等電機、機械、電子產品，然由於釹鐵硼磁鐵易脆，產品回收時釹鐵硼破碎之粉末會粘到含鐵的廢電子元件，很難有效分離。目前以化學沉澱法可將廢釹鐵硼磁鐵溶解沉澱後固液分離，並於高溫下煅燒成稀土氧化物。

1. 日本三和油化工業公司

三和油化工業公司近年來與日本豐田汽車(TOYOTA)合作研發回收油電混合車及家電中永磁馬達稀土磁鐵，程序並達商業化規模。1 台汽車約使用 1 公斤稀土磁鐵，其主要金屬元素除鐵占 70% 以外，亦含有其他稀土金屬，包括 25% 的釹(Nd)及 5% 的鐳(Dy)。三和油化工業公司研發將含稀土金屬磁鐵利用酸溶法提取標的物，包括溶解、萃取、剝離、晶析、燒結等步驟，其處理流程如圖 5.3-1 所示，各步驟說明如下：

- a. 溶解：將含有釹、鐳金屬磁鐵溶於高選擇性之酸性溶解液中，除去未溶之鐵金屬及大部分雜質；
- b. 萃取：將對於釹金屬溶解度低之萃取劑導入溶解液中，即可將釹、鐳金屬於此階段分離，萃取含鐳金屬之溶液；
- c. 剝離：含鐳金屬之溶液再添加酸性剝離液，鐳金屬從萃取劑轉溶於剝離液中，萃取劑即可循環再利用；
- d. 晶析：含釹、鐳金屬之溶液分別添加不同試劑使其結晶析出沉澱；
- e. 燒結：將釹、鐳結晶鹽類脫水燒結成塊，氧化釹、鐳結晶即為成品，如圖 5.3-2 所示。



資料來源：經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018年11月。

圖 5.3-1 日本三和油化工業公司稀土金屬回收資源循環流程圖



資料來源：經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018年11月。

圖 5.3-2 回收而成之氧化釹、鐳結晶成品

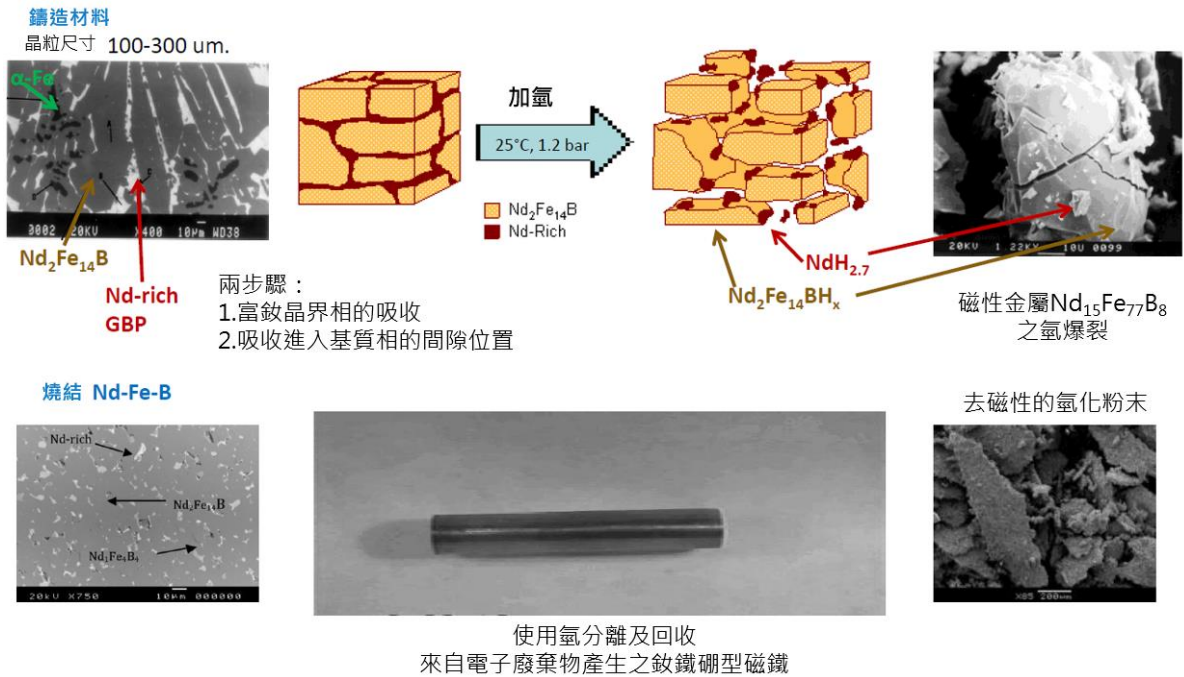
此技術處理程序優勢在於可在常溫常壓下進行，不需額外加熱可減少能耗及二氧化碳排放；其酸性萃取劑可回收再利用，故廢酸產出量少；最終結晶成品稀土氧化金屬純度可達 99.9%。

2. 英國伯明翰大學(University of Birmingham)

傳統提取稀土金屬元素的方法需要拆卸和去除磁性材料，而英國伯明翰大學研發之磁性廢料氫處理技術(Hydrogen Processing of Magnetic Scrap, HPMS)，是一種經濟有效的處理技術，可從廢料中提取回收由釹鐵硼製成的磁性材料，該技術為歐盟資助研發項目，仍待未來實廠商業化。

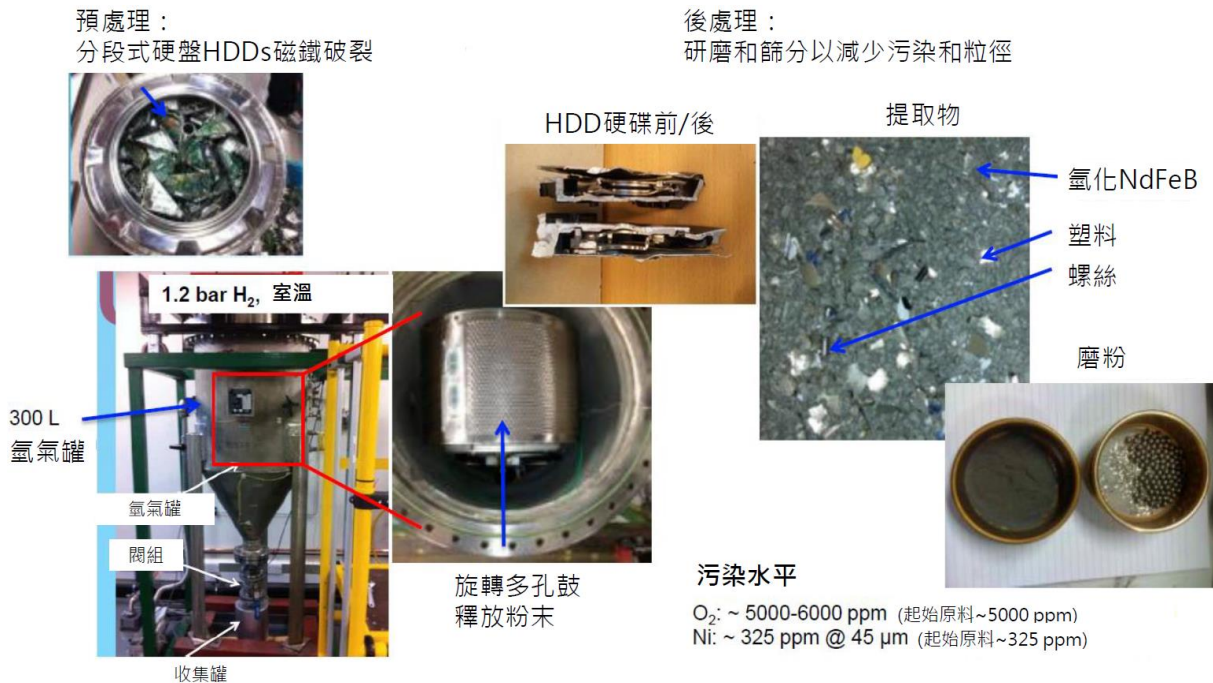
HPMS 技術利用氫氣將磁性金屬合金分解成粉末，其專利核心技術為氫爆(Hydrogen Decrepitation, HD)，處理方式將氫氣灌入稀土金屬中，使之體積膨脹至發生結構爆裂，細小顆粒從材料中脫離，形成均質的金屬粉末；最後再通過篩分除去非磁性成分，這些粉末透過回收再處理後重新回到再生磁性材料中。氫爆可以使回收過程更加省時、更具成本效益，並有助於減少大量化學物質和與這些元素的開採有關的放射性廢液。HD 技術及以 HPMS 技術分離及製造 Nd-Fe-B 磁鐵之流程，如圖 5.3-3~圖 5.3-5 所示。

伯明翰大學為歐盟階段性計畫 EREAN 聯盟的成員，聯盟由比利時魯汶大學(Katholieke Universiteit Leuven)主導，目標為於歐洲建立稀土磁性材料回收網。下階段伯明翰大學參與由歐盟資助之 SUSMAGPRO 項目，計畫進行完整之歐洲稀土磁性金屬材料回收供應鏈的開發，該供應鏈預期每年回收 20 公噸之磁性材料，自廢料中提煉並濃縮稀土磁性材料，由分類的廢料中提取金屬合金粉末，以生產磁性材料。



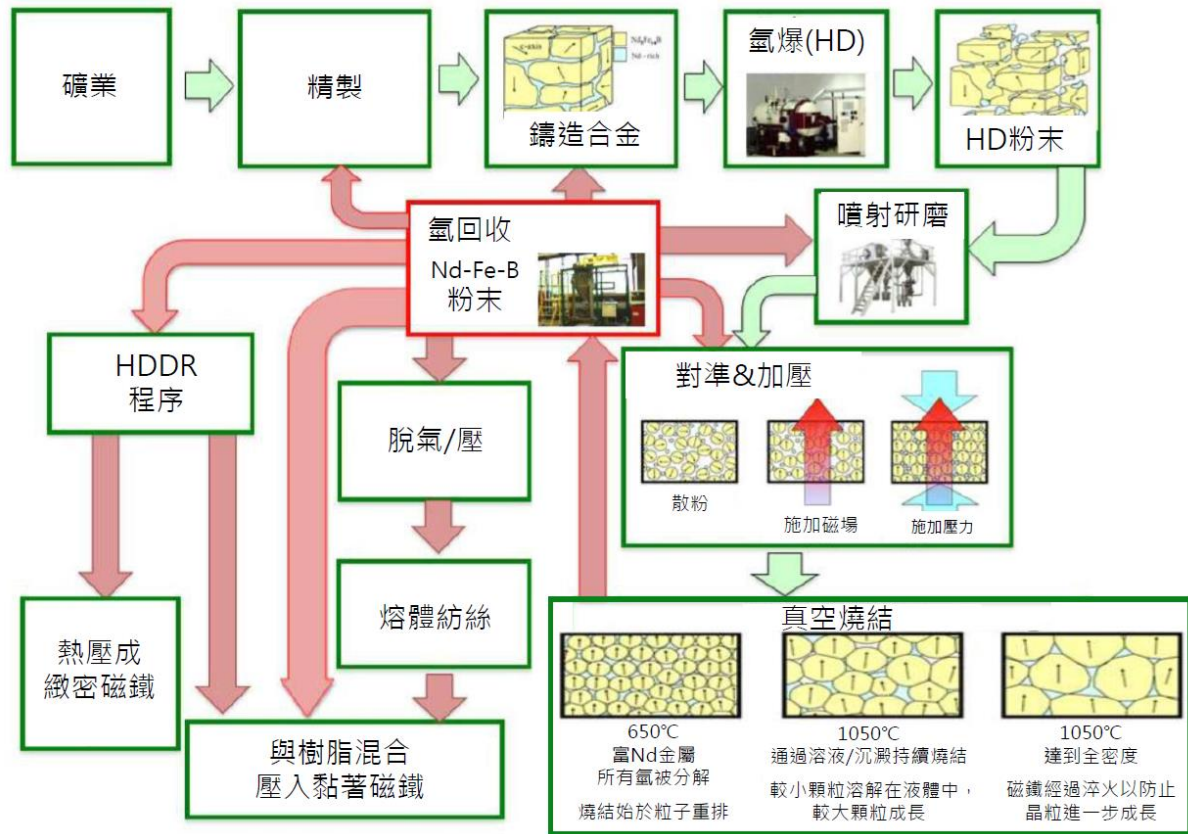
資料來源：ERES 2017, 2nd conference on European rare earth resources, May 2017.

圖 5.3-3 氫爆(HD)技術示意圖



資料來源：ERES 2017, 2nd conference on European rare earth resources, May 2017.

圖 5.3-4 以氫氣萃取 Nd-Fe-B 方式示意圖



資料來源：ERES 2017, 2nd conference on European rare earth resources, May 2017.

圖 5.3-5 以磁性廢料氫處理技術製造 Nd-Fe-B 流程示意圖

3. 加拿大 GEOMEGA 公司

加拿大 GEOMEGA 公司及其子公司 Innord Inc. 研發以不使用有機溶劑的分離技術(Innord Separation of Rare Earths, ISR)萃取及精煉稀土元素。ISR 技術可分離鐵、鈷、鎳、硼和其他次要金屬等其他雜質後，從磁性殘留物中分離出氧化釹(Nd_2O_3)和氧化鐳(Dy_2O_3)；且可處理包括釹鐵硼(NdFeB)和鈰鈷(SmCo)在內的各種磁體類型。該技術已完成試驗，尚待投資建置為商業化程序。

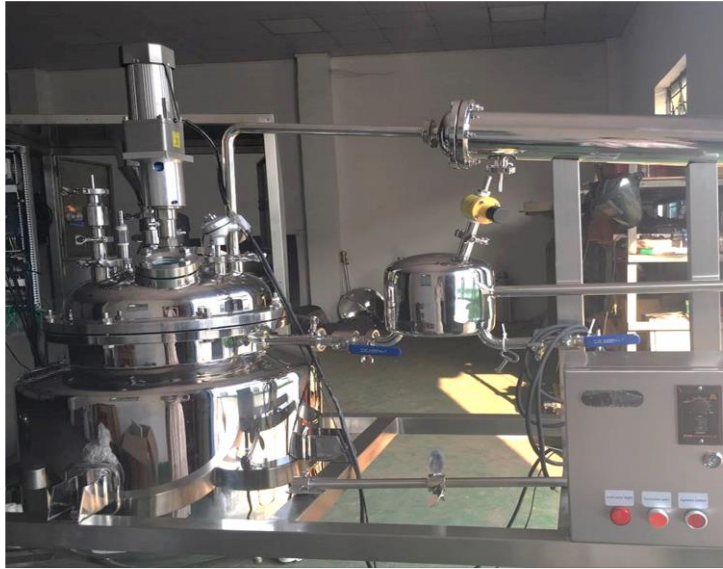
ISR 技術已成功應用於燒結磁體(將磁性粉末壓製成型後進行熱處理)和黏結磁體(將磁性粉末與黏合劑混合然後成型)。由於黏結磁鐵中含有塑料、樹脂、環氧樹脂等，不易以傳統方式分離，故 ISR 技術可有效分離及

再生黏結磁體的方法。ISR 技術包括以下特色：

- a. 主要藥劑回收率>95%，不會產生廢水；
- b. 占地面積小、低成本支出；
- c. 適用於磁體的金屬相和煅燒相；
- d. 適用於釹鐵硼和鈰鈷磁鐵；
- e. 可加工燒結磁鐵和黏結磁鐵；
- f. 無需去除鍍層、可以接受磁化和退磁的材料；
- g. 可以處理生鏽和破碎的廢料、分批處理。

2018 年以 ISR 技術之單次回收率在 60~85% 之間，並且隨著技術的精進而不斷提高，在第一次分離操作中未回收者仍可循環回到製程中。

GEOMEGA 公司已成功完成實驗室規模的裝置，能夠在 20 公升反應器上驗證 ISR 技術，回收每公斤稀土氧化物約須 3.00 美元。目前已開始規劃產能為 1.5 公噸/天的示範工廠，預訂於 2020 開始生產。ISR 技術回收磁體實驗設備如圖 5.3-6 所示，其經濟效益評估如表 5.3-1 所示。該公司也持續提升 ISR 技術，例如更高的純度、更少的反應時間(8 小時以下)及分離因子的顯著提高，期望以不繁複的步驟即可以環境永續、可擴展及經濟高效的方式進行純化。



資料來源：Geomega, Rare Earth Element (REE) Recycling for the Permanent Magnet Industry, Nov 2019.

圖 5.3-6 GEOMEGA 公司以 ISR 技術回收磁體實驗設備示意圖

表 5.3-1 以 ISR 技術每日生產 1.5 公噸產品的經濟效益評估

每天生產 1.5 公噸產品的經濟效益評估	
示範場的進料規模	1.5 公噸/8 小時-日
進料平均等級	含 30% 總稀土氧化物(TREO) 釹(Nd)、鐠(Pr)、鐿(Dy)、鉕(Tb)
投資金額(美元)	260 萬
直接營運成本(美元)	3 元/每公斤總稀土氧化物(TREO)
銷售目標(美元)	1,000 萬
利潤率目標	20%
擴展潛力	最高 4.5 公噸/24 小時運行

資料來源：Geomega, Rare Earth Element (REE) Recycling for the Permanent Magnet Industry, Nov 2019.

5.4 稀土金屬回收及資源循環技術評析彙整

本章節所蒐集彙整之國外資源循環關鍵技術為稀土金屬回收及資源循環技術案例，其相關技術評析彙整如表 5.4-1 所示，相關資源循環產業之廠商，可依據相關技術及適用對象去參考應用。

表 5.4-1 稀土金屬回收及資源循環技術案例彙整

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術來源
發光材料資源化技術	焙燒熱處理技術	以稀土元素的沉澱物進行焙燒熱處理(加熱至少 350℃ 以上)，並加入乾燥空氣/氮氣及銨鹽進行反應，產生稀土稀土氧化物精礦，再經水洗並進行電解沉積程序產生稀土元素。	可有效分離並提純 16 種稀土元素，包含鐳、鈾、鐳、釷、釷、釷、釷、釷、釷、釷、釷、釷、釷、釷、釷、釷。	已於廢螢光燈泡中回收稀土金屬釷及釷，並可有效分離並提純共 16 種稀土元素。	美國 Rare Earth Salts 公司 (已商業化)
	濕法及火法冶金技術	進行化學處理再分離並乾燥後產出稀土精礦後，先經過火法冶金熱處理，再進行懸浮、過濾和洗滌，之後透過溶劑萃取分離、沉澱、過濾和煅燒回收稀土元素。	可回收 90% 以上的螢光粉末，其中包含 10~20% 的稀土氧化物、10~50% 的玻璃、70~80% 的磷酸鹽。	已回收舊燈管螢光粉中包含鐳、鈾、釷、釷及釷的稀土元素。	比利時 Solvay 集團 (Solvay Rhodia) (已商業化)
	濕法冶金浸漬技術	針對 YO_x 、LAP、CAT、BAM 螢光粉中特定化合物的多步驟浸漬，步驟包含 30℃、溶於稀鹽酸溶液，60~90℃、溶於稀鹽酸，120~230℃、溶於熱稀硫酸，150℃ 的高壓釜中或在熔融鹼中、溶於 35% 氫氧化鈉。	分離的螢光體中提取稀土氧化物之純度可達 99.99%。	已由舊燈管 YO_x 、LAP、CAT、BAM 等螢光粉回收包含鈾、鈾、釷及釷等稀土元素。	德國 Osram Licht AG 公司 (已商業化)
拋光研磨材料資源化技術	加溫浸漬法技術	利用硝酸與 H_2O_2 還原浸漬玻璃拋光粉中 CeO_2 ，硝酸浸漬劑對二氧化矽和氧化鋁具有選擇性，以較高的溫度(約	商業化回收玻璃拋光材料的稀土元素鈾。	從廢玻璃拋光材料回收稀土元素鈾	比利時 Hydrometal S.A. 公司 (已商業化)

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術來源
永磁材料資源化技術		80℃)使酸擴散到二氧化矽基質中，並增強過濾效果。			
	凍融分離法技術	透過結凍(-10℃)和解凍(25℃)程序，使用過之漿液中的研磨細顆粒可以較容易地分離和回收。	使用過之漿液中的研磨細顆粒可以較容易地分離和回收，以再生材料進行拋光之成品，其研磨值及表面精度與全新拋光材料無明顯差異，且不會增加產品次級品發生率。	從使用過之拋光漿料，回收再生拋光研磨材。	日本福島大學(模廠試驗階段)
	酸溶法技術	將含稀土金屬磁鐵利用酸溶解、萃取、剝離、晶析、燒結等步驟提取稀土金屬。	可在常溫常壓下進行，不需額外加熱可減少能耗及二氧化碳排放；其酸性萃取劑可回收再利用，故廢酸產出量少；最終結晶成品稀土氧化金屬純度可達 99.9%。	從油電混合車及家電等含永磁馬達之廢棄設備中回收稀土氧化釹及氧化鐳。	日本三和油化工業公司(已商業化)
	磁性廢料氫處理技術(HPMS)	將氫氣灌入稀土金屬中，使之體積膨脹至發生結構爆裂，細小顆粒從材料中脫離，形成均質的金屬粉末，最後再通過篩分除去非磁性成分。	氫爆可以使回收過程更加省時、更具成本效益，並有助於減少大量化學物質和與這些元素的開採有關的放射性廢液。	可從廢料中提取回收由釹鐵硼製成的稀土磁性材料。	英國伯明翰大學(University of Birmingham)(尚處研發階段)
	ISR 分離技術	不使用有機溶劑的分離技術 ISR 萃取及精煉稀土元素，單次回收率在 60~85% 之間，且逐次分離操作中未回	不使用有機溶劑的分離技術，其主要藥劑回收率>95%，不會產生廢水，已成功應用於燒結	可從磁性殘留物中分離出氧化釹(Nd ₂ O ₃)和氧化鐳(Dy ₂ O ₃)，且可處理	加拿大 GEOMEGA 公司及其子公司 Innord Inc.(已完成模廠試

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術來源
		收的稀土不會損失，而是循環回到該回收程序中。	磁體和黏結磁體。單次分離即可獲得一定純度，使該技術更具成本效益。	包括釹鐵硼(NdFeB)和鈔鈷(SmCo)在內的各種磁體類型。	驗，待進行商業化設置)

六、結語

本評估報告針對廢電子化學品-廢酸回收及資源循環技術、太陽光電模組回收及資源循環技術、稀土金屬回收及資源循環技術進行評析，相關評析結果彙整如下：

1.廢電子化學品-廢酸回收及資源循環技術包括如下：

- (1)廢硫酸再生技術：A. MECS SAR 乾法再生技術：美國杜邦公司(已商業化)；B. WSA 濕法再生技術：丹麥托普索公司(已商業化)、奧地利 P&P 公司(已商業化)；C. SULFOXTM 濕法製酸技術：美國杜邦公司(已商業化)；D. ERSATM 高效廢酸再生技術：中國大陸科洋公司(已商業化)。其共通性的特點均強調回收率高、產生大量熱能並進行回收。
- (2)廢磷酸多級逆向萃取回收技術：由日本三和油化工業進行開發(已商業化)，可高效率萃取回收磷酸，並同時高選擇性回收醋酸及硝酸，萃取分離步驟少、產率高，萃取溶劑更可以充分循環使用。
- (3)廢氫氟酸流體化床結晶處理技術：日本 ORGANO 公司(已商業化)，結合廢水產出源及氫氟酸製造商進行循環回收體系的新商業模式。
- (4)廢氫氟酸蒸發濃縮技術：日本三菱化工公司(已商業化)、日本佐倉工程有限公司(已商業化)。其共通性的特點均強調製程流程簡單，可結合製程進行回收。
- (5)混酸回收技術：美國 Beta Control Systems 真空蒸發過濾法(已商業化)，使用真空蒸發來過濾污染物並濃縮混合酸，以供重複使用。期操作特點為低操作溫度、低操作成本及低材料成本。

2.廢太陽光電模組回收及資源循環技術

(1)機械法電解精煉技術：A.色彩選別技術：日本三菱材料公司(已商業化)；B.破碎風選：日本 RTJ 公司(已商業化)；C.濕式比重分選：日本 Harita Metal 公司(已商業化)；D.熱刀分離技術：日本 NPC 公司(已商業化)；E.破碎渦流磁選：法國 Veolia 公司(已商業化)；F.渦流與光學分選：德國 Reiling 公司(已商業化)。其技術共同優勢是處理速度快及回收率高，主要回收玻璃及金屬，其金屬則交由回收金屬業者處理。

(2)化學處理法：A.溶劑(醇類)溶解：日本東邦化成公司(已商業化)；B.溶劑(醇類)溶解：日本產業技術總合研究所(AIST)(研究階段)；C.溶劑(酸類)溶解：美國 First Solar 公司(已商業化)。其最大優勢是可完全去除 EVA，且矽與金屬不會氧化變色，有利於後續回收價值。

(3)熱裂解法：A.熱裂解：日本 Recycle Tech 公司(已商業化)；B.真空熱裂解：德國 Accurec recycling 公司(已商業化)，其最大優勢為無衍生溶劑與化學藥劑廢棄物，且可取得較高比例有價物質；C.熱裂解：Geltz Umwelt-Technologie 公司(研發階段)。

3.稀土金屬回收及資源循環技術

(1)發光材料資源化技術：A.焙燒熱處理技術：美國 Rare Earth Salts 公司(商業化中)，可有效分離並提純 16 種稀土元素；B.濕法及火法冶金技術：比利時 Solvay 集團(Solvay Rhodia)(已商業化)，可回收 90%以上的螢光粉末，其中包含 10~20%的稀土氧化物；C.濕法冶金浸漬技術：德國 Osram Licht AG 公司(已商業化)，分離的螢光體中提取稀土氧化物之純度可達 99.99%。其共通點為可回收之稀土種類多且回收率高。

(2)拋光研磨材料資源化技術：A.加溫浸漬法技術：比利時 Hydrometal S.A. 公司，已商業化回收玻璃拋光材料的稀土元素銻。B.凍融分離法技術：日本福島大學，其研磨值及表面精度與全新拋光材料無明顯差異，且

不會增加產品次級品發生率。其共通點為使用過之拋光漿料，回收再生拋光研磨材，回收率高，該程序目前為模廠試驗階段。

- (3)永磁材料資源化技術：A.酸溶法技術：日本三和油化工業公司，在常溫常壓下進行，不需額外加熱進行回收處理，程序並達商業化規模；B.磁性廢料氫處理技術(HPMS)：英國伯明翰大學(University of Birmingham)，使回收過程更加省時、更具成本效益(尚處研發階段)；C. 加拿大 GEOMEGA 公司及其子公司 Innord Inc.：ISR 分離技術，不使用有機溶劑的分離技術 ISR 萃取及精煉稀土元素。其共通點為操作成本低。該技術為歐盟資助研發項目，仍待未來實廠商業化。

本評估報告之目的係協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值，透過資源循環減少原物料採購及開採，並降低溫室氣體排放，以期藉由國外關鍵循環經濟技術之資料蒐集，提供業界參考應用，有利於推動國內潛力廠商技術整合升級。惟業界在選用時宜再針對技術面、管理面及經濟面審慎評估是否適合自己本身的經濟規模及廢棄物收受量等問題，並朝向產品高值化、環境友善化及節能減排方面去思考，也可考量國外先進廢棄物處理模式，以期發揮技術優化及營運創新之境界。

七、參考文獻

1. 循環台灣基金會網站，<https://www.circular-taiwan.org/ceintro>。

一、廢酸回收：

1. 申鳳玉，烷基化廢硫酸再生工藝技術對比，當代化工，2016 年 11 月。
2. 鄧明，烷基化廢酸再生工藝簡述，硫酸工業，2016 年 12 月。
3. Livia Sierra Llorens, WSA Technology a competitive solution for sulfur management,2018.
4. P&P Industries AG 公司網站，
<https://www.pp-industries.at/en/productdetail/sulphur-oxidation-process-sop-spent-acid-regeneration-sar>。
5. 王勇等，因地制宜地實現尾氣處理最低排放---孟莫克含“硫”尾氣處理系統解決方案，第三屆全國煙氣脫硫脫硝及除塵技術年會，2015 年。
6. 科洋環境工程(上海)有限公司網站，
<https://wangjiamin0309.github.io/haiyang/huanjinggongcheng/technology/technology2.html>
7. 經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018 年 11 月。
8. ORGANO 公司網站，
https://www.organo.co.jp/wp/wp-content/uploads/2018/04/00246_ecocrystal_SIYOU.pdf。
9. Beta Control Systems 公司網站，

<http://www.betacontrol.com/content/mixed-acid-hf-hcl-hf-hno3>

10. 勞動部職業安全衛生署，強酸鹼等特定化學物質災害預防宣導摺頁，2020 年。
11. TOSHMS 北區促進會，化學品安全管理實務案例手冊 Part II，2015 年 10 月。
12. BOB GRENDL，孟莫克廢酸再生(SAR)工藝，硫酸工業，2014 年 6 月。
13. 王勇等，因此制宜地實現尾氣處理最低排放---孟莫克含“硫”尾氣處理系統解決方案。
14. 三菱化工公司網站，
<https://www.mec-value.com/english/solution/slb/hydrofluoric.html>。
15. SASAKURA Engineering Co., Ltd. 網站，
<http://www.sasakura.co.jp/e/products/water/ex/06.html>。

二、廢太陽光電模組回收：

1. 王挺玉、林欣蓉，太陽光電暨電池模組資源化技術，工業材料雜誌 371 期，2017 年 11 月。
2. 陳偉聖、陳彥融，光電廢棄物資源循環技術發展現況及趨勢，工業材料雜誌 383 期，2018 年 11 月。
3. Yannaël BILLARD, Flore BAZIN, Olivier LACROIX, Recycling of Photovoltaic END-OF-LIFE Panels - International Overview, RECORD / ENEA Consulting, July 2012。
4. 吳曜杉、王雨筠、鄭隆藤、姜晔先、林福銘，日本太陽光電模組回收技術解析，工業材料雜誌 381 期，2018 年 9 月。

5. 日本 RTJ 公司網站，http://www.r-t-j.co.jp/business/solar_panel.html
6. 日本 Harita Metal 網站，<http://www.harita.co.jp/technology/technology01/>
7. 日本 NPC 網站，
<https://www.npcgroup.net/solarpower/reuse-recycle/recycle-service>
8. 通過熱刀分離法開發玻璃和金屬的完整回收技術簡報，NPC 公司，2018 年 8 月。
9. 歐盟 PV CYCLE 網站，<https://pvcycle.fr/recyclage/silicium-cristallin/>
10. 法國 Veolia 公司網站，
<https://www.veolia.com/en/newsroom/news/recycling-photovoltaic-panels-circular-economy-france>
11. 德國 Reling 公司發布影片，Recycling von ausgedienten Photovoltaik-Modulen.
12. First Solar 2017 SUSTAINABILITY REPORT, First Solar.
13. “End-of-Life CdTe PV Recycling with Semiconductor Refining”, Parikhit Sinha, Maxime Cossette, and Jean-François Ménard, First Solar, 27th EUPVSC, 2012, Frankfurt, Germany, pp.4653-4656.
14. 日本新菱子公司 Recycle Tech 網站，
<https://ce3r.shinryo-gr.com/recycle-tech#hd03>
15. 德國 Accurec recycling 公司，3rd International Conference on PV Module Recycling February 20th 2013 Rome 簡報。
16. 德國 Geltz 公司網站，<https://geltz.de/en/elsi-pv/>
17. 德國 Geltz 公司，
<https://geltz.de/wp-content/uploads/2018/12/Flyer-Solarmodule-englisch-HP.pdf>，Solar

Module Recycling 說明資料。

三、稀土金屬回收：

1. 行政院環境保護署，稀土元素-關鍵物料調查報告，2017 年 12 月。
2. 經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018 年 11 月。
3. Koen Binnemans et al., Recycling of rare earths: a critical review, Journal of Cleaner Production Volume 51, July 2013.
4. Manis Kumar Jha et al., Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals, Hydrometallurgy Volume 165, Oct 2016.
5. Chenna Rao Borra et al., Recovery of Cerium from Glass PolishingWaste:A Critical Review, Metals - Open Access Metallurgy Journal 8(10), Sep 2018.
6. Stéphane BOURG, Technological gaps inhibiting the exploitation of CRMs secondary resources, Screen (European Union's Horizon 2020 research and innovation programme), Nov 2019.
7. Pr. Lena SUNDQVIST OEQVIST et al., Production technologies of CRM from secondary resources, Jan 2018.
8. ERES 2017, 2nd conference on european rare earth resources, May 2017.
9. 高橋亮等，凍結解凍法による使用済み酸化セリウム系ガラス研磨材スラリーからの再生研磨材製造，2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，2013 年 3 月。
10. Joseph Brewer et al., Method for extraction and separation of rare earth elements，專利發明 US10494694B2，2019 年 12 月。

- 11.Solvay, Criteria, limits and advantages of Rare Earths recycling, Dec 2014.
- 12.Solvay, An innovative process of rare earth recycling from used fluorescent lamps, Solvay loop project, 2014.
- 13.佐藤理夫, 酸化セリウム系ガラス研磨材のリユース・リサイクル技術。
- 14.Geomega, Rare Earth Element (REE) Recycling for the Permanent Magnet Industry, Nov 2019.
- 15.Roskill, Rare Earth Salts begins ongoing monthly production in Nebraska, Sep 2018.
<https://translate.google.com/translate?hl=zh-TW&sl=en&u=https://roskill.com/news/rare-earths-rare-earths-salts-begins-ongoing-monthly-production-in-nebraska/&prev=search>
- 16.Tansy Dando, Rare earth metal recycling project launched at Birmingham University, Resource Media Limited, Aug 2019.
<https://resource.co/article/rare-earth-metal-recycling-project-launched-birmingham-university-0>
- 17.美國 Rare Earth Salts 公司網站, <https://rareearthsalts.com/>
- 18.比利時 Solvay 集團網站, <https://www.solvay.com/en/innovation/open-innovation/elp/loop-life-project/la-rochelle-process>
- 19.德國 Siemens 網站, <http://www.siemens.com.tw/release/pof.asp?p=23>
- 20.加拿大 Geomega 公司網站, <https://ressourcesgeomega.ca/>
- 21.歐盟 European Rare Earth Magnet Recycling Network 網站, <https://cordis.europa.eu/project/id/607411/reporting>

