



經濟部工業局 110 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

中華民國 110 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.....	9
2.3 面臨問題及未來發展方向.....	14
三、廢塑膠高值化及資源循環技術案例.....	21
3.1 溶劑純化法回收技術案例.....	25
3.2 化學解聚法回收技術案例.....	31
3.3 熱能解聚法回收技術案例.....	48
3.4 其他技術案例.....	52
3.5 廢塑膠高值化及資源循環技術評析彙整.....	57
四、廢鋰電池回收及資源循環技術案例.....	62
4.1 機械處理技術案例.....	66
4.2 火法冶金技術及濕法冶金技術組合技術案例.....	71
4.3 濕法冶金技術案例.....	75
4.4 高效率回收技術案例.....	81
4.5 廢鋰電池回收及資源循環技術案例評析彙整.....	85
五、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術案例.....	90
5.1 含鈹廢料/廢液資源化技術案例.....	93
5.2 含鎢廢料資源化技術案例.....	96
5.3 含鎳廢料資源化技術案例.....	101
5.4 關鍵物料(鈹鎢鎳)純化及資源循環技術評析彙整.....	105
六、結語.....	109
七、參考文獻.....	112

# 圖 目 錄

圖 1.1-1 經濟循環企業轉型路徑圖 .....	2
圖 2.1-1 平面顯示器產業鏈結構圖 .....	9
圖 2.2-1 遠東新世紀公司廢塑膠回收路徑圖 .....	12
圖 2.2-2 翰金科技 Equalys System 吸附設備運作流程.....	14
圖 2.3-1 109 年公告再利用之各類工業廢棄物再利用情形 .....	15
圖 2.3-2 109 年許可再利用之各類工業廢棄物再利用情形 .....	16
圖 2.3-3 109 年公民營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形.....	17
圖 3-1 塑膠類包裝容器回收標誌 .....	21
圖 3-2 我國塑膠消耗現況與循環流向 .....	22
圖 3-3 化學法回收技術 .....	23
圖 3.1-1 Ioniqa 技術流程圖 .....	27
圖 3.1-2 Loop Industries 廢塑膠回收示意圖 .....	28
圖 3.1-3 CreaSolv®製程流程圖 .....	29
圖 3.1-4 廢 PS 處理生命週期評估比較.....	30
圖 3.2-1 IBM VolCat 新型塑膠回收技術.....	32
圖 3.2-2 碳再生技術(CRT)製程流程圖 .....	33
圖 3.2-3 Eastman CRT 技術碳足跡差異比較.....	34
圖 3.2-4 Eastman PRT 技術碳足跡差異比較 .....	34
圖 3.2-5 BRING Technology™製程圖 .....	37
圖 3.2-6 JEPLAN 與一般 PET 製造碳足跡比較.....	38
圖 3.2-7 ReNEW™專利技術製程流程圖.....	39
圖 3.2-8 ReNEW™專利技術回收與傳統技術製造之 DTY 環境足跡比較 .....	40
圖 3.2-9 gr3n 製程流程圖 .....	41
圖 3.2-10 聚酯回收方法 .....	42
圖 3.2-11 Aquafil 公司 ECONYL®再生尼龍紗之回收再製技術 .....	43
圖 3.2-12 ECONYL® YARN 於 2011~2018 年碳足跡統計 .....	44
圖 3.2-13 MIPAN regen®產品生產程序.....	45
圖 3.2-14 杜邦公司建置廢地毯再生流程 .....	46
圖 3.2-15 RENU®技術流程圖 .....	47
圖 3.3-1 Pyrowave 之製程設備 .....	49

圖 3.3-2 polynSPIRE 計畫架構 .....	50
圖 3.3-3 微波輔助的化學回收流程 .....	51
圖 3.3-4 智能磁性材料輔助化學回收流程 .....	52
圖 3.4-1 SORPLAS™技術回收製造流程 .....	53
圖 3.4-2 阻燃劑和 SORPLAS™技術產生之塑膠粒 .....	53
圖 3.4-3 Agilyx 技術製程流程圖 .....	55
圖 3.4-4 聚合物經酵素降解流程圖 .....	56
圖 4-1 三元系鋰電池內部構造 .....	63
圖 4-2 鋰電池再利用模式 .....	65
圖 4.1-1 Volkswagen 之廢棄車用鋰電池回收設備及流程說明 .....	67
圖 4.1-2 美國 Toxco Inc.公司之廢鋰電池回收處理流程 .....	69
圖 4.1-3 日本太平洋水泥公司焙燒與分選回收處理裝置 .....	70
圖 4.1-4 德國 Duesenfeld 公司之鋰電池回收流程 .....	71
圖 4.2-1 Umicore 濕法及火法組合流程示意圖 .....	73
圖 4.2-2 Umicore 合金精煉流程示意圖 .....	73
圖 4.2-3 Umicore 電池回收製程設備 .....	74
圖 4.2-4 美國 Redwood Materials 公司電池回收處理設備圖 .....	75
圖 4.3-1 JX 日礦公司廢鋰電池回收程序示意圖 .....	76
圖 4.3-2 JX 日礦公司正極材料回收流程示意簡圖 .....	77
圖 4.3-3 JX 日礦公司回收設備及成品 .....	78
圖 4.3-4 芬蘭清潔能源(Fortum)公司低碳濕法冶金技術回收流程 .....	79
圖 4.3-5 Li-Cycle 公司輻射式系統(Spoke & Hub )技術流程圖 .....	80
圖 4.3-6 美國 Retrie Technologies 公司正極材料再生技術 .....	81
圖 4.4-1 Battery Resourcers 公司廢鋰電池回收流程圖 .....	83
圖 4.4-2 Battery Resourcers 廢鋰電池回收設備 .....	84
圖 4.4-3 特斯拉公司內華達州超級電池工廠 .....	85
圖 5.1-1 銻物料流布概況 .....	93
圖 5.1-2 Aquatech 公司回收低濃度含銻廢液流程 .....	94
圖 5.1-3 Alchem 公司濕法冶金技術回收銻流程 .....	95
圖 5.1-4 波蘭有色金屬研究所溶劑萃取回收銻流程 .....	96
圖 5.2-1 鎢物料流布概況 .....	97

圖 5.2-2 溶劑萃取技術從廢薄膜太陽能電池回收銦銻流程示意圖 .....	99
圖 5.2-3 Umicore 銻封閉循環回收系統 .....	100
圖 5.2-4 Umicore 與 AZUR SPACE 合作設置廢光纖回收試驗工廠 .....	101
圖 5.3-1 Nilar AB 的雙極鎳氫電池圖片 .....	102
圖 5.3-2 生物濕法冶金技術回收商用催化劑示意圖 .....	103
圖 5.3-3 濕法冶金技術回收鎳作為正極材料流程示意圖 .....	105

# 表 目 錄

表 2.1-1 廢棄物來源之產業發展現況 .....	6
表 2.3-1 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(廢塑膠).....	18
表 2.3-2 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(廢鋰電池).....	18
表 2.3-3 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(關鍵物料(鈹鎢鎳)).....	18
表 3-1 化學法回收技術關鍵面向 .....	23
表 3-2 化學回收技術優缺點彙整 .....	24
表 3.2-1 CRT 與 PRT 可處理廢塑膠類別彙整表.....	35
表 3.5-1 廢塑膠高值化及資源循環技術評析 .....	58
表 4-1 鋰鐵電池正/負極材料全含量分析結果 .....	63
表 4-2 三元鋰電池之組成重量分析結果 .....	64
表 4.1-1 Volkswagen 電池回收試驗工廠基本資料.....	68
表 4.3-1 移除雜質後之浸出率及濃度 .....	77
表 4.5-1 廢鋰電池回收及資源循環技術彙整 .....	86
表 5-1 優先管理之 10 項關鍵物料篩選 .....	90
表 5-2 關鍵物料(鈹、鎢、鎳)的應用領域與資源循環技術.....	91
表 5-2 關鍵物料(鈹、鎢、鎳)的應用領域與資源循環技術(續).....	92
表 5.4-1 關鍵物料(鈹、鎢、鎳)資源循環技術彙整.....	106

## 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。

本評估報告針對廢塑膠高值化及資源循環技術、廢鋰電池回收及資源循環技術、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術進行技術及案例蒐集評估。期協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值，並藉由國外關鍵循環經濟技術及設備之資料蒐集及國外先進技術引進，推動國內潛力廠商技術整合升級。

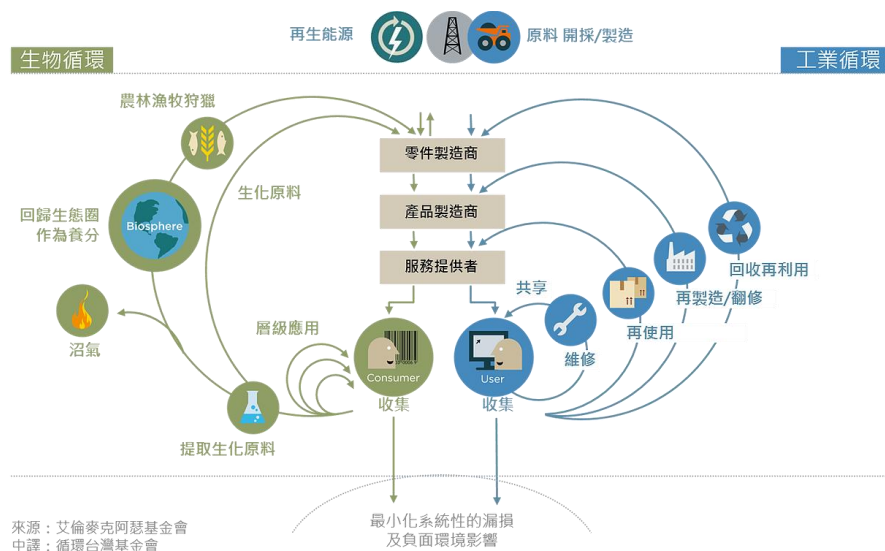
### 1.1 循環經濟的定義

「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。

圖 1.1-1 循環經濟系統圖



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。

目前國內對於廢塑膠高值化及資源循環技術、廢鋰電池回收及資源循環技術、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術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，或為良性或為惡性，端賴個案而定。

因此本評估報告旨在協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值，期藉由國外關鍵循環經濟技術或設備之資料蒐集或國外先進技術引進，未來透過技術媒合方式，協助國內潛力廠商技術整合升級。本評估報告依據 110 年 4 月 14 日辦理專家諮詢會議，篩選出廢塑膠高值化及資源循環技術、廢鋰電池回收及資源循環技術、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術等三項，作為本評估報告分析的依據。

### 2.1 產業簡介及製程特性

有關廢塑膠高值化及資源循環技術、廢鋰電池回收及資源循環技術、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術三項技術中的廢棄物，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，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 廢棄物來源之產業發展現況

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
廢塑膠		各行業	<ul style="list-style-type: none"> <li>事業在製程產生之廢塑膠</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢塑膠種類繁多，難以依個類別進行細分。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>物理處理法、化學回收法、溶劑純化法。</li> </ul>
廢鋰電池		<ul style="list-style-type: none"> <li>行動裝置電池產業</li> <li>電動汽車產業</li> <li>儲能產業</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>行動裝置產品</li> <li>電動車</li> <li>儲能電源系統</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>火法冶金技術所需成本高，亦耗費較多能資源；濕法冶金技術設備設置成本較低，設備規模較具彈性，國內較適合使用濕法冶金回收技術。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械處理技術</li> <li>火法冶金技術及濕法冶金技術組合</li> <li>濕法冶金技術</li> <li>濕法冶金技術及直接循環技術</li> <li>高效率鋰電池回收</li> </ul>
關鍵物料 鈦	<ul style="list-style-type: none"> <li>ITO 廢料</li> <li>LCD 蝕刻廢液</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>液晶顯示器 (ITO 靶材)</li> <li>電子半導體 (磷化鈦、砷化鈦鎢與碲化鈦)</li> </ul>	薄膜電晶體液晶顯示器	<ul style="list-style-type: none"> <li>較適合使用濕法冶金技術回收技術，試劑消耗量大，規模較小。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>火法冶金或濕式冶金法</li> <li>吸附法</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢 LCD</li> </ul>		半導體材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>國內較适合使用濕法冶金回收技術，試劑消耗量大，規模較小。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>濕式冶金法</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>含鈦清洗廢液</li> </ul>		銅鈦鎢碲太陽能電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>國內尚無回收再利用工廠，皆運送至國外處理。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>氧化還原、置換還原或電解法</li> </ul>
關鍵物料 鍺	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢光纖電纜</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>纖維光纖</li> <li>紅外光纖</li> <li>聚合催化劑</li> </ul>	光導纖維	<ul style="list-style-type: none"> <li>國內尚無回收再利用工廠，皆運送至國外處理。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>濕式冶金法，溶劑萃取，富集與鍛燒後回收鍺氧化物晶體</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢薄膜太陽能電池</li> </ul>		半導體材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>國內尚無回收再利用工廠，皆運送至國外處理。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>濕式冶金法，破碎、酸溶、置換、電解回收鍺金屬</li> </ul>
關鍵物料 鎳	<ul style="list-style-type: none"> <li>含鎳廢液</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>合金</li> <li>電鍍</li> </ul>	金屬合金	<ul style="list-style-type: none"> <li>國內較适合使用濕法冶金技術回收技術，試劑消耗量大，規模較小。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>以鈉鹽充當還原劑進行還原沉澱過濾乾燥燒結成塊。</li> <li>將吸附處理後的重金屬廢棄物，個別分離、純化，製成循環使用重金屬原料。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢鎳鎘電池</li> <li>廢鎳氫電池</li> </ul>	電池	正極材料 (電池)	<ul style="list-style-type: none"> <li>國內尚無回收再利用工廠，皆運送至國外處理。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分段加溫、醋酸溶解、碳酸化、電析</li> <li>機械清洗，把電極上可重複利用的材料與腐蝕物質分離，可以回收 95% 的材料</li> </ul>

資料來源：本計畫彙整。

## 1.各行業

塑膠屬於石化製品，原本於自然界中並不存在，也無法經自然分解後回歸自然界循環使用，因而造成了所謂的「萬年垃圾」；加上石油的開採、運輸和煉製等過程，都會消耗相當多的資源、能源及製造一定程度的污染。因此，基於愛惜資源及疼惜環境，回收並重複使用廢塑膠物品及容器有其必要。一般進行回收工作時，通常將所有的塑膠容器歸為一個大類，回收商回收後需要進一步將之細分類為 PET、PVC、PE、PP、PS 等，才能為後端再生工廠所利用。

環保署於公告「應回收廢棄物回收處理業管理辦法」及「廢物品及容器回收清除處理辦法」，針對塑膠容器，包含聚乙烯對苯二甲酸酯(PET)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、其他塑膠及生質塑膠進行回收。將廢塑膠容器蒐集後，再由處理廠進行處理，國內廢塑膠袋處理技術主要包括：乾式及濕式塑膠再生料回收 2 種，處理過程以人工分選挑出雜質，破碎後以水清洗(乾式則無需這道手續)，經分選及乾燥後，熱熔製成塑膠再生料，作為黑色大塑膠袋、工具箱、花盆等非盛裝食物的製品摻配原料。

## 2.行動裝置、電動車及儲能產業:

鋰電池在行動裝置、電動車、儲電系統扮演關鍵角色，隨著新能源、物聯網(IoT)、綠能交通領域的演進，從行動裝置、機動設備乃至交通工具，對電池元件能量密度、電池續航力及管理技術的優化需求一再提升。觀察目前全球科技產業發展趨勢，電池新應用多圍繞在可攜式、移動式消費性穿戴裝置產品、電動汽機車及新能源材料等領域。在新能源、綠能減碳成主流的時代，電池技術及安全的進化，將成為競爭市場勝出的重要關鍵。

隨著電子產品的迅速更新換代，每年都會產生大量的廢舊鋰電池，並且受新能源汽車發展的影響，未來將會有更多的廢舊鋰電池產生。由於未經處理的廢舊電池會對環境產生污染，並且用於生產鋰離子電池的鋰、鈷等金屬資源短缺，因此回收處理廢舊鋰離子電池具有一定的環境安全保護和經濟價值。在回收處理廢舊鋰離子電池的技術包含機械處理技術、火法冶金技術及濕法冶金技術組合、濕法冶金技術及直接循環技術、高效率鋰電池回收技術。

濕法冶金技術是目前使用最多的技術，而火法冶金技術所需成本高，亦耗費較多能源；濕法冶金技術設備設置成本較低，設備規模較具彈性，國內較適合使用濕法冶金回收技術。回收技術各具優缺點，尋求一種合適的回收技術，能夠發揮各種技術的優勢，儘可能回收可再生資源，以提高回收的經濟效益。

### 3.平面顯示器產業：

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。其液晶顯示器產業結構如圖 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 平面顯示器產業鏈結構圖

TFT-LCD 製造主要包括薄膜電晶體、液晶灌注面板及模組化 3 個製程。薄膜電晶體為 TFT-LCD 之主要核心技術，其原理係在玻璃基板利用導電體塗佈、微影照相及曝光顯像等技術，製成電極基板，作為傳遞訊號、電壓控制之元件。液晶灌注面板製程為玻璃基板上貼附彩色濾光片成為 CF 基板後，對電極基板及 CF 基板進行配向處理。配向處理完成後，再進行基板組立作業並將液晶注入兩基板間，其後再進行面板封裝製程。而模組化是對封裝完成後之 LCD 面板進行處理，其面板經異方性導電膜貼附、TAB-IC 壓著、跳接線焊接及背光模組組立工程後，進行模組檢查及品檢測試後，即為成品。其製程所產生之廢棄物包含廢丙酮、廢異丙醇、廢剝離液、廢鋁蝕刻液、廢混合溶劑、機性污泥、無機性污泥、污泥混合物、廢玻璃等。

## 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；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源，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，不僅可以再生且可以永續再利用，可見其對資源化再利用之重要性。目前國內對於廢塑膠高值化及資源循環技術、廢鋰電池回收及資源循環技術、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術，列舉回收廢塑膠廠商案例概述如下：

### 1.廢塑膠

塑膠製品回收再利用是當前全球環保政策努力的目標之一，但最根本的問題在於回收數量的不足，甚至大多數的廢棄物是以焚化或掩埋方式處理或是被丟棄於環境當中；也有部分回收後的塑膠以降階使用，無法回到



原本規格產品鏈使用。環保署推動廢棄物燃料化政策，可解決高熱值廢棄物處理、減少化石原料及燃料開採，於 2020 年 4 月訂定「固體再生燃料製造技術指引與品質規範」，提供業者製造固體再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)依循。另外目前業界常見廢塑膠回收處理技術主要可分為物理處理、化學處理及溶劑純化三類別，有關國內廢塑膠再利用狀況，彙整如表 2.2-1 所示。以下再介紹國內循環經濟廠商-遠東新世紀股份有限公司：

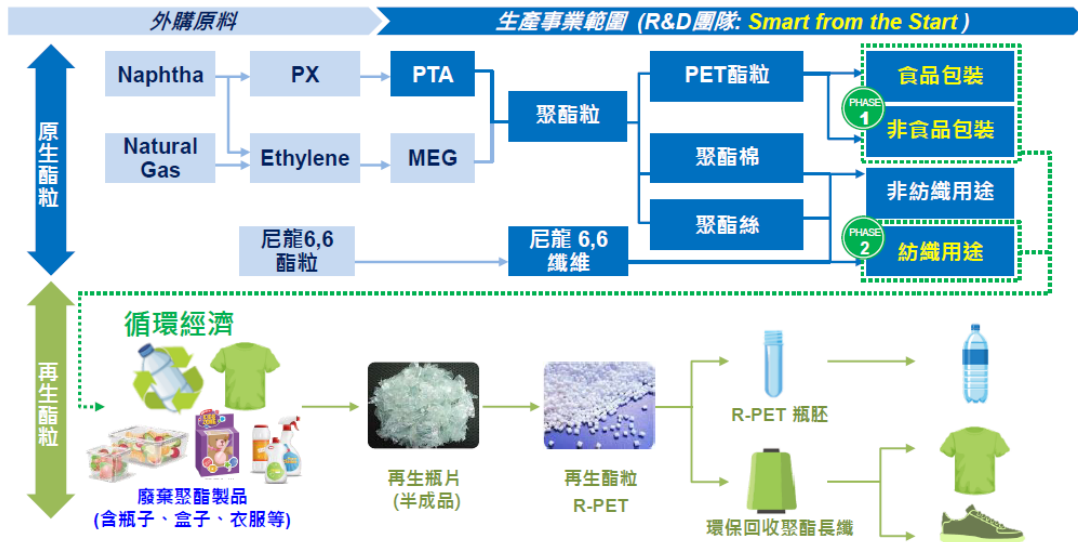
表 2.2-1 國內廢塑膠再利用現況

類別	廢棄物來源	廢棄物代碼	處理方式	廠商
聚對苯二甲酸乙二醇酯(PET)	各行業產出之廢塑膠	廢塑膠混合物(D-0299) 廢塑膠(R-0201)	物理處理	力麗、亞東創新、富勝紡織、中興紡織、三五紡織、崎貿實業、宏盛環保等
			化學處理	南亞、遠東新、台化
聚丙烯(PP)			物理處理	宏聚塑膠、大豐環保、域誠、宏盛環保
聚乙烯(PE)			物理處理	宏聚塑膠、域誠
聚苯乙烯(PS)			溶劑純化	齊輝
廢尼龍(PA)			溶劑純化	明炫
廢塑膠			微波裂解	安能聚綠能
			熱裂解	海神
			物理處理	隆順、瑋傑

資料來源：本計畫彙整

遠東新公司將廢棄 PET 瓶和其他廢棄聚酯產品如聚酯纖維、聚酯膠片、聚酯收縮膜等)，透過化學法轉化為聚酯主要原料之一再生 rPTA，再使用 rPTA 製造化學回收的再生酯粒，酯粒品質如同石化原料所生產的原生酯粒，其廢塑膠循環模式如圖 2.2-1，符合永續循環經濟趨勢，提供國際大廠可量身訂做，按特定原生及回收比例摻配的 PET 酯粒產品，遠東新公司減廢貢獻 81 億支 PET 瓶/年，足夠繞地球 46.5 圈。同時持續擴大回收聚酯應用領域，由纖維級進階至食品級，結合機械摩擦力、溫度熱力

及化學性洗淨力等多重製程，大幅拉高清潔度，達到食品級標準，為台灣少數可達到生產食品級回收聚酯之廠商。



資料來源：遠東新世紀股份有限公司投資人說明會簡報(2021 年 4 月)

圖 2.2-1 遠東新世紀公司廢塑膠回收路徑圖

## 2.廢鋰電池回收

傳統之廢棄鋰電池回收技術包含火法冶金及濕法冶金技術，其收入來源主要關鍵為鈷的回收；然而因為鈷的缺乏，使電池設計廠商對於鈷在鋰電池正極(陰極)配方中的使用正在迅速減少，無形中降低回收的經濟性。故近期許多機構紛紛投入開發新技術，如正極直接循環技術(Direct-cathode Recycling)，直接回收保留正極的晶體結構再生成正極活性顆粒以恢復其電化學性能，而不是將其分解為組成元素，故面對鈷含量較低或不含鈷成分之廢棄鋰電池回收，此方式將可提升其經濟可行性。依據環保署 2020 年「各事業廢棄物代碼申報流向統計年報」統計，廢乾電池處理方式皆為境外處理，國內尚無廠商進行處理，彙整如表 2.2-2。

表 2.2-2 國內鋰電池處理方式現況

廢棄物來源	廢棄物代碼	處理方式	廠商
使用後廢棄之廢乾電池	廢乾電池(R-2404)	研發環保鋰電池回收藥劑	優勝奈米
		物理處理與火法處理	名仁資源

資料來源：本計畫彙整

## 3.關鍵物料(銦銳鎳)

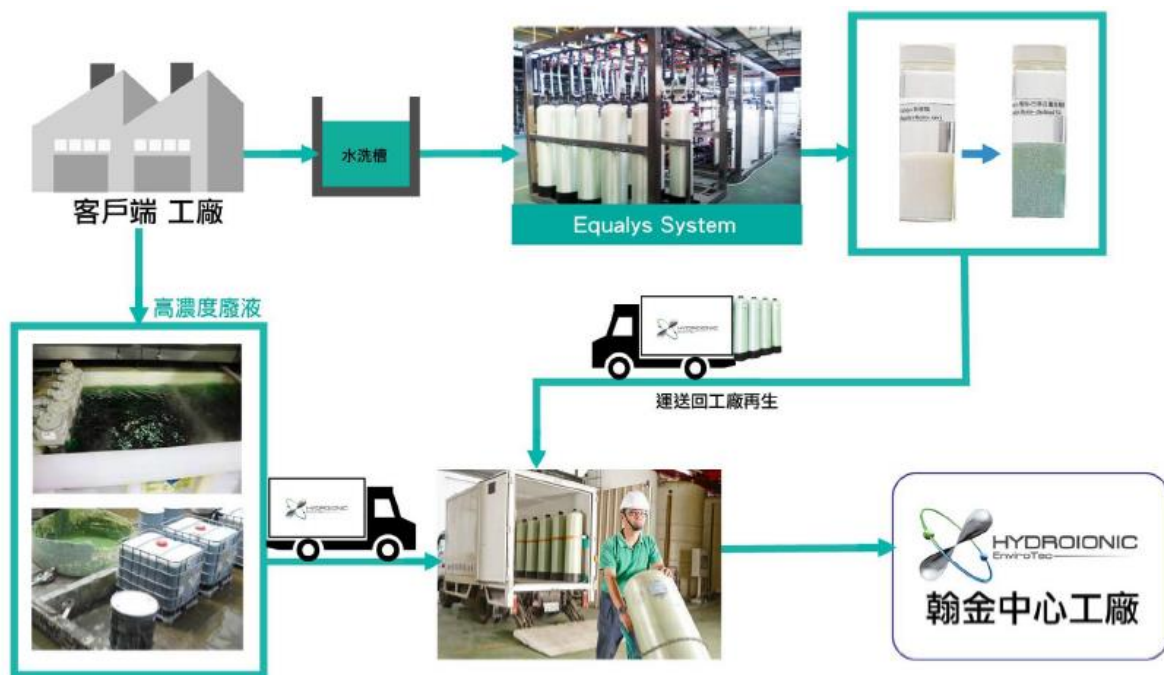
依據關鍵物料的應用領域、廢棄物產出形式與回收及資源循環技術，為蒐集國外技術資料之方向。銦具有較好的光滲透性與導電性，被廣泛用於生產液晶顯示器(ITO 靶材)與電子半導體(磷化銦、砷化銦鎵與碲化銦)；銳與銦皆具有半導體性質，是重要的半導體材料，多應用於纖維光纖、紅外光纖與聚合催化劑；鎳可塑性高具磁性與耐腐蝕，多被用於合金、電鍍與電池，關鍵物料(銦、銳、鎳)的應用領域與資源循環技術。國內關鍵物料處理方式現況如表 2.2-3 所示。以下再介紹國內循環經濟廠商-翰金科技股份有限公司：

表 2.2-3 國內關鍵物料(銦銳鎳)處理方式現況

廢棄物來源	廢棄物代碼	處理方式	廠商
金屬製品製造業產生之廢水	1.廢液 pH 值小(等)於 2.0 (含銦銳之廢酸液)(C-0202) 2.其他單一非有害廢金屬或金屬廢料混合物(D-1399)	酸鹼溶出處理	原廣科技、寬度科技、優勝奈米
廢光纖電纜	廢光纖電纜(D-2603)	境外處理	無
其他電子零組件製造業、基本金屬製造業及金屬製品製造業產生之廢水	1.廢離子交換樹脂(吸附飽合之含鎳樹脂)(D-0201) 2.廢液 pH 小(等)於 2.0(含鎳廢)(C-0202)	以分離、純化、濃縮、結晶等創新的製程	翰金科技、廣禾科技、淨寶化工

資料來源：本計畫彙整

翰金科技經過多年的研發、測試，自主開發「金屬濕式提鍊技術」(Hydro-metallurgical process)，一方面將此獨特的 EQUALYS 技術，以全新的商業模式提供給排放重金屬廢水的產業一個完整、簡單、效率高又成本低的「廢水處理服務」，另一方面將吸附處理後收集的重金屬廢棄物，個別分離、純化目標重金屬後，再進行資源化生產，製成可循環使用的重金屬化工原料，使重金屬原料得以循環再用。Equalys System 吸附設備運作流程如圖 2-2.2 所示。

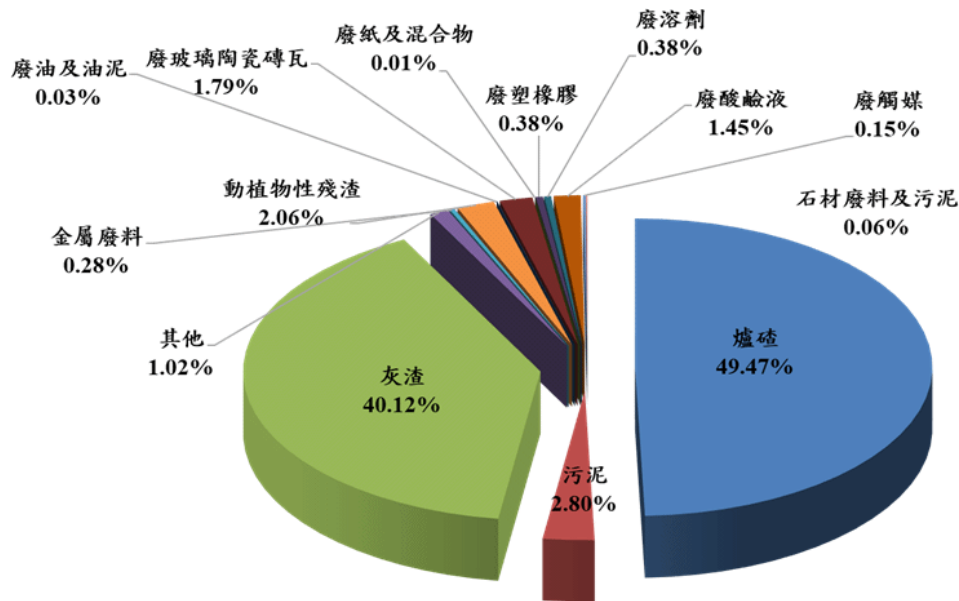


資料來源：重金屬廢液及水資源循環利用實務經驗分享簡報(2021 年 9 月)。

圖 2.2-2 翰金科技 Equalys System 吸附設備運作流程

## 2.3 面臨問題及未來發展方向

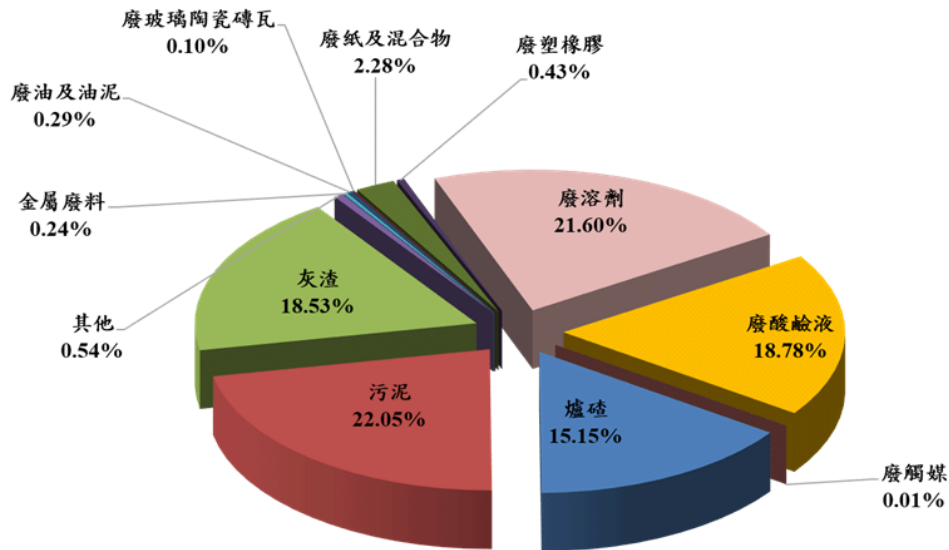
由經濟部工業局「工業廢棄物清理與資源化資訊網」，經分析自 IWR&MS 下載之資料及統計公告再利用廠共計 1,469 家，並依其 109 年 1~8 月之實際再利用申報資料，推估 109 年各類工業廢棄物屬許可再利用之再利用情形(如圖 2.3-1 所示)。



資料來源:經濟部工業局資源再生產業推動及審查管理計畫，2020。

圖 2.3-1 109 年公告再利用之各類工業廢棄物再利用情形

由經濟部工業局「工業廢棄物清理與資源化資訊網」，經分析自 IWR&MS 下載之資料及統計許可再利用廠共計 130 家，並依其 109 年 1~8 月之實際再利用申報資料，推估 109 年各類工業廢棄物屬許可再利用之再利用情形(如圖 2.3-2 所示)，主要許可再利用之廢棄物種類為「污泥」、「廢溶劑」、「廢酸鹼液」及「灰渣」。其中「污泥」類以「無機性污泥」之再利用量最大，主要再利用作為製磚原料及人工粒料;「廢溶劑」類則以「非有害性混合廢液」之再利用量最大，主要為半導體製造業產出之硫酸銨廢液，再利用用途係作為工業用硫酸銨;「廢酸鹼液」類則以「廢液 pH 值小(等)於 2.0」之再利用量最大，包括廢硫酸及廢氫氟酸等，再利用用途主要以化學反應製備化工原料(如硫酸、氟化鈣、氟矽酸鈉、磷酸鈉等);「灰渣」類則以「電爐製鋼過程污染控制之集塵灰或污泥」之再利用量最大，主要再利用方式為熱處理產製氧化鋅。

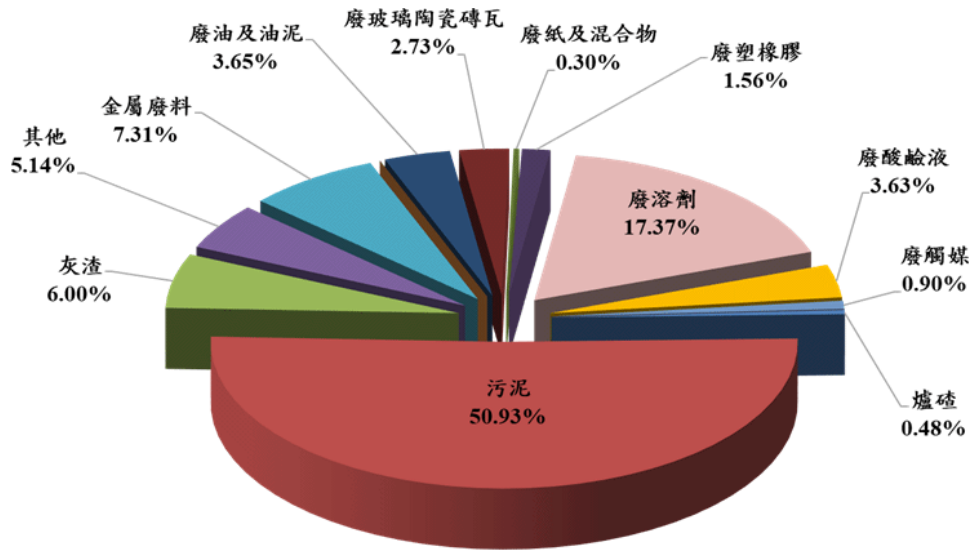


資料來源:經濟部工業局資源再生產業推動及審查管理計畫，2020。

圖 2.3-2 109 年許可再利用之各類工業廢棄物再利用情形

另外，由經濟部工業局「工業廢棄物清理與資源化資訊網」，經分析自 IWR&MS 下載之資料、統計公民營處(清)理機構中採資源化方式處理廢棄物者共計 163 家，並依其 109 年 1~8 月之實際申報資料，推估 109 年公民營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形(如圖 2.3-3 所示)，主要再利用之廢棄物種類為「污泥」及「廢溶劑」。其中「污泥」類以「無機性污泥」之再利用量最大，主要為工業區污水處理廠及自來水淨水廠廢水處理設備所產生之無機污泥，其主要以熱處理或物理處理方式產製人工粒料或栽培介質；「廢溶劑」類則以「廢液閃火點小於 60°C（不包含乙醇體積濃度小於 24%之酒類廢棄物）」之再利用量最大，主要以蒸餾方式將廢溶劑提純回收再利用。





資料來源：經濟部工業局資源再生產業推動及審查管理計畫，2020。

圖 2.3-3 109 年公民營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形

目前國內廢塑膠高值化及資源循環技術、廢鋰電池回收及資源循環技術、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術等其廢棄物再利用量及產生量，如環保署事業廢棄物管制中心統計資料，如表 2.3-1~2.3-3 所示。且由於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，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。

表 2.3-1 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(廢塑膠)

單位：公噸

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用率	自行處理	委託或共同處理	境外處理	貯存異動量	產生量
D-0299	廢塑膠混合物	107	15,017	9,333	166,108	-	-921	189,537
		108	17,327	9,730	160,022	-	3,504	190,581
		109	29,056	9,229	160,242	-	3,224	201,751
E-0213	電鍍金屬廢塑膠(含光碟片)	107	326	-	679	-	-29	976
		108	240	-	620	-	22	882
		109	490	-	543	-	-11	1,022
R-0201	廢塑膠	107	24,262	-	-	-	50	24,312
		108	29,920	-	-	-	1,514	31,434
		109	39,516	-	-	-	2,091	41,607

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

註：貯存異動量為前一年貯存量扣除當年貯存量而得。

表 2.3-2 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(廢鋰電池)

單位：公噸

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用率	自行處理	委託或共同處理	境外處理	貯存異動量	產生量
R-2404	廢乾電池	107	-	-	-	807	-2	805
		108	-	-	-	871	-0	871
		109	-	-	-	677	0	677

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

註 1：貯存異動量為前一年貯存量扣除當年貯存量而得。

註 2：目前廢鋰電池申報項目僅有廢乾電池，環保署尚未針對此項建立新類別。

表 2.3-3 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(關鍵物料(鈹鎢鎳))

單位：公噸

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用率	自行處理	委託或共同處理	境外處理	貯存異動量	產生量
D-2603	廢光纖電纜	107	-	-	990	-	-43	947
		108	-	-	1,047	-	296	1,343
		109	-	-	1,718	13	59	1,790



D-0201	廢離子交換樹脂	107	354	3	2,954	-	-8	3,303
		108	960	1	3,067	-	40	4,068
		109	693	22	3,051	-	35	3,801
C-0202	廢液 pH 值小(等)於 2.0	107	195,370	2,998	30,246	-	-213	228,401
		108	203,326	9,553	22,716	-	-43	235,552
		109	241,050	10,727	22,657	-	-254	274,180
D-1399	其他單一非有害廢金屬或金屬廢料混合物	107	27,892	15	9,085	339	2,118	39,449
		108	25,974	14	8,176	2,204	300	36,668
		109	25,849	10	8,591	2,087	211	36,748
R-0401	廢玻璃	107	134,484	-	-	-	-666	133,818
		108	136,051	-	-	-	-284	135,767
		109	124,714	-	-	-	29	124,743
E-0218	廢光電零組件、下腳品及不良品	107	4	-	686	-	-2	688
		108	5	-	514	-	22	541
		109	5	-	549	4	16	574

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

註：貯存異動量為前一年貯存量扣除當年貯存量而得。

台灣的經濟主要是出口導向，藉著技術優勢在全球分工體系中，在生產製造領域具有一席之地，進而帶動出口及經濟成長。尤其以半導體為世界重要基地，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，生產工廠的製造節點越趨複雜與精細，造成化學清洗、蝕刻顯影等製程步驟也會增加，廢棄物也隨著產生。所以如何在循環經濟的世界趨勢下透過工業循環進行再利用(Re-Cycling)、可再生(Re-Generating)、再製造(Re-Manufacturing)運作從原料、水電、設備到製程與廢棄物循環鏈達到 100% 的回收再利用是台灣製造業轉型提升的必經課題。

因此我國循環經濟產業面臨的問題包括：

#### 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。

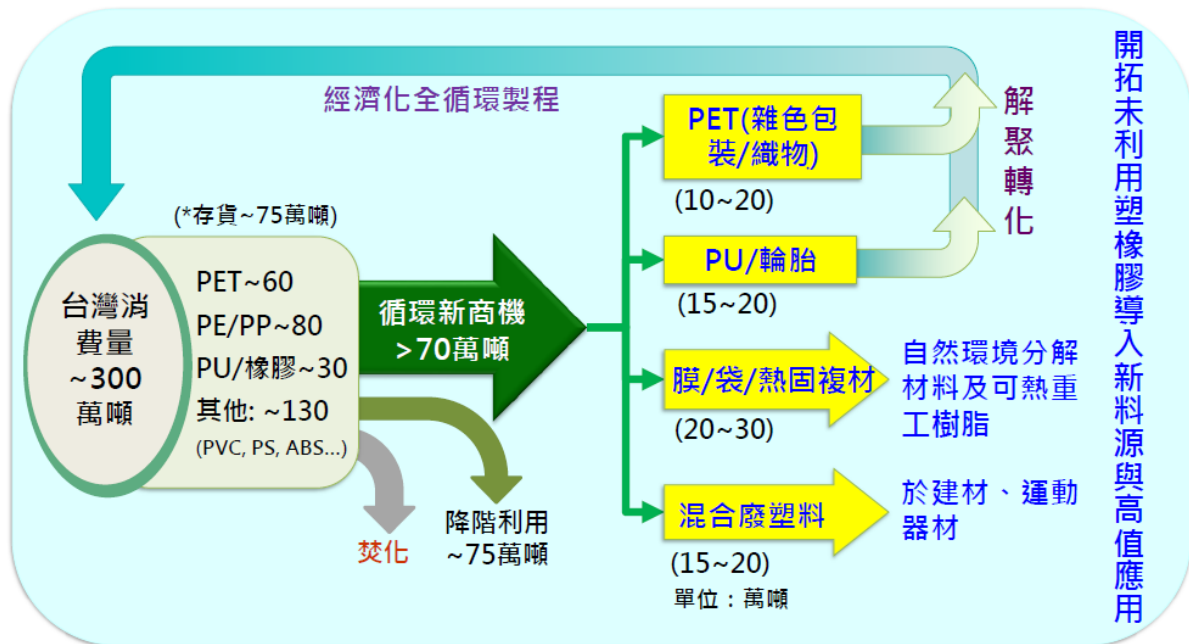
### 三、廢塑膠高值化及資源循環技術案例

我國「塑膠材質回收辨識碼」係引用美國塑膠工業協會（Society of the Plastics Industry）於 1988 年所發展出來的塑膠辨識碼（Resin identification code），為全球通用的辨識碼。塑膠辨識符號包含三個順時針方向的箭頭，形成一個循環狀的三角形，並將編碼包圍於其中(如圖 3-1)，分別編上 1 到 7 號，代表七類不同的塑膠材質。我國年產 1,200 萬公噸塑膠，國內年消耗量約 300 萬公噸，其中降階回收再利用約 75 萬公噸，另將開發 PET、PU 等新材料或高質應用，其餘廢塑膠則進行焚化處理，廢塑膠流向如圖 3-2 所示，仍有再提升回收量之潛力，以下將蒐集之國外回收技術依塑膠類別進行分類說明。



資料來源：環保署網站。

圖 3-1 塑膠類包裝容器回收標誌



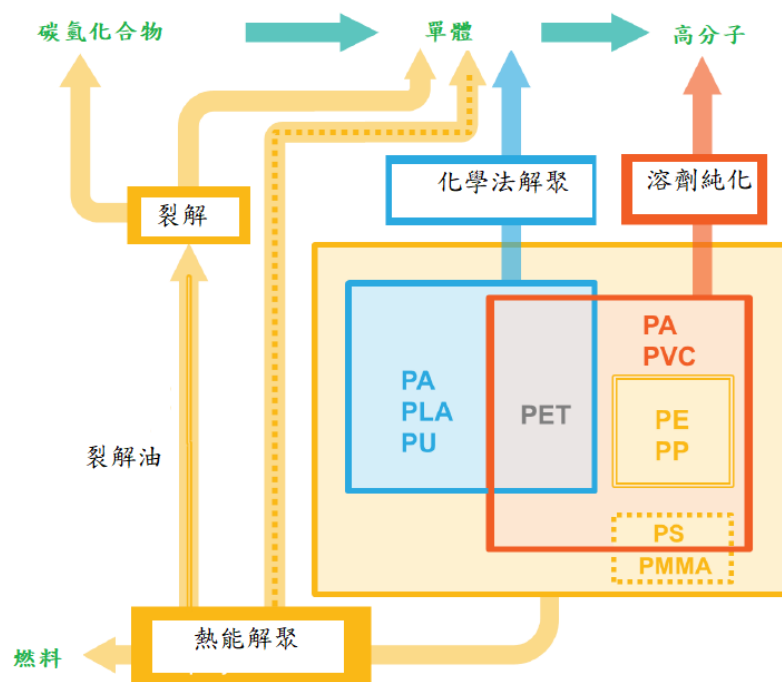
資料來源：陳建明，工研院材化所，廢塑膠回收再製技術趨勢發展與應用，2021.06.29

圖 3-2 我國塑膠消耗現況與循環流向

化學法回收製程可分為三大技術類別：溶劑純化法、化學解聚法及熱能解聚法。圖 3-3 顯示各種主要塑膠處理途徑之主要方式或潛在方式，使其產出能持續延續塑膠之價值鏈。各類塑膠主要處理方式如下：

- 溶劑純化法：聚醯胺(PA)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)
- 化學解聚法：聚對苯二甲酸乙二酯(PET)、聚醯胺(PA)、聚乳酸(PLA)、聚氨酯(PU)
- 熱能解聚法：聚醯胺(PA)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚對苯二甲酸乙二酯(PET)、聚乳酸(PLA)、聚氨酯(PU)、聚苯乙烯(PS)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)

彙整溶劑純化法、化學解聚法及熱能解聚法技術關鍵面向，如表 3-1 所示。



資料來源：Chemical Recycling : State of Play , 2020.12

圖 3-3 化學法回收技術

表 3-1 化學法回收技術關鍵面向

關鍵面向	溶劑純化法	化學解聚法	熱能解聚法
整合下游產品的複雜性	直接；生產聚合物。	間接；需要整合現有原始價值鏈才能生產出單體。	間接；由聚烯烴生產碳氫化合物時，純化前需要整合現有原始價值鏈。聚苯乙烯(PS)可直接解聚成單體。
等量回收的可行性	否；與機械回收一樣。	是；回收損失因技術而有差異。	是；但在每個回收循環鏈中，可能會有部分損失。
可生產食品級聚合物	不可能。	是；聚合物與原始聚合物無差異。	是；聚合物與原始聚合物無差異。
去除污染物或添加劑	有限或特定的。	是；需要相對乾淨的輸入物料	是；是固定的循環流程。
需要預分選或預處理	是；需要相對清潔、均勻的廢塑膠，才有高產率和非燃料的產出。		

關鍵面向	溶劑純化法	化學解聚法	熱能解聚法
環保成效	多數技術缺乏經過驗證的環境成效數據。		
化學品使用和副產品的驗證	對大規模處理時，對溶劑類型和相關危險性資訊較不明確性。	缺乏投入物/副產品的透明度。	過程中副產品回收並不明確。

資料來源：Chemical Recycling : State of Play , 2020.12

表 3-2 化學回收技術優缺點彙整

技術類別	優點	缺點
溶劑純化法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 已被證明可以分離聚棉紡織混合物。</li> <li>● 環境友好型溶劑已在實驗室規模成功測試</li> <li>● 通常允許回收溶劑重複使用。</li> <li>● 證明可以回收非目標副產品。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 目前只能處理性質相同的投入材料。</li> <li>● 純化前，通常需要嚴格的分選及前處理。</li> <li>● 通常需要高能量需求，尤其是純化後的乾燥階段。</li> <li>● 通常不能完全去除污染物。</li> <li>● 尚不能可提供食品級產品。</li> <li>● 目前對環境績效缺乏明確性。</li> <li>● 尚缺商業規模實廠。</li> </ul>
化學解聚法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 單體輸出可用於生產與原始產品質量相同的塑膠產品。</li> <li>● 允許使用回收和再利用化學試劑（如催化劑和溶劑）。</li> <li>● 多項技術均表現出高產量。</li> <li>● 以容器和纖維作為原料，證明商業可行性。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 技術通常需要均質的廢塑膠作為投入，通常需要大量的前處理/分選。</li> <li>● 缺乏有關化學試劑和其他補充材料數量的資訊，例如催化劑。</li> <li>● 與技術相關的整體能源投入缺乏明確性，過程通常需要高能源投入。</li> <li>● 缺乏對可以處理的雜質的了解，也不了解單體純化後如何處理污染物。</li> <li>● 很少考慮有害物質投入與副產品。</li> <li>● 大多數技術缺乏經過驗證的環境績效數據。</li> </ul>
熱能解聚法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可以接受更多不同類型廢塑膠混合物作為輸入，但以犧牲輸出質量和效率（作為燃料回收）為代價。</li> <li>● 可應用於目前不可回收的</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 解聚過程的隨機性導致產品的複雜混合物，需要昂貴的純化系統來分離可用產品。</li> <li>● 目前的熱解聚輸出偏向於燃料的低成本生產。</li> </ul>

技術類別	優點	缺點
	<p>廢棄物。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 純化後，產出物可用於製造塑膠和其他高價值化學品，其品質與化石原料相同。</li> <li>● 利用高溫有效純化廢棄物。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 對作為過程一部分的副產品和試劑的回收不明確。</li> <li>● 裂解油產製蒸汽，用來產生單體後，可回收能量再利用。</li> <li>● 需要現有原生聚合物價值鏈來生產單體。</li> <li>● 目前大多數技術供應商沒有環境績效數據可用。</li> </ul>

資料來源：Chemical Recycling : State of Play, 2020.12

塑膠製品回收再利用是當前全球環保政策努力的目標之一，但最根本的問題在於回收數量的不足，甚至大多數的廢棄物是以焚化或掩埋方式處理或是被丟棄於環境當中；也有部分回收後的塑膠以降階使用，無法回到原本規格產品鏈使用。蒐集國外較新創之廢塑膠回收及高值化技術，摘要說明如下：

### 3.1 溶劑純化法回收技術案例

溶劑純化法一般利用各物質沸點不同原理，選擇性地分離塑膠聚合物或含有雜質之廢塑膠，可能之雜質通常包括：

- 阻燃劑、穩定劑、著色劑和顏料等添加劑
- 非標的聚合物
- 非故意添加物質(Non-Intentionally Added Substances, NIAS)，生產過程中，製造商無意添加進食品接觸用塑膠材料中，然而卻真實存在的物質，可能包括製造過程中的副產品及塑膠經降解的物質。

以下就溶劑純化回收技術案例說明如下：

## 1. 磁性催化劑智慧材料回收技術(荷蘭 Ioniqa Technologies 公司)

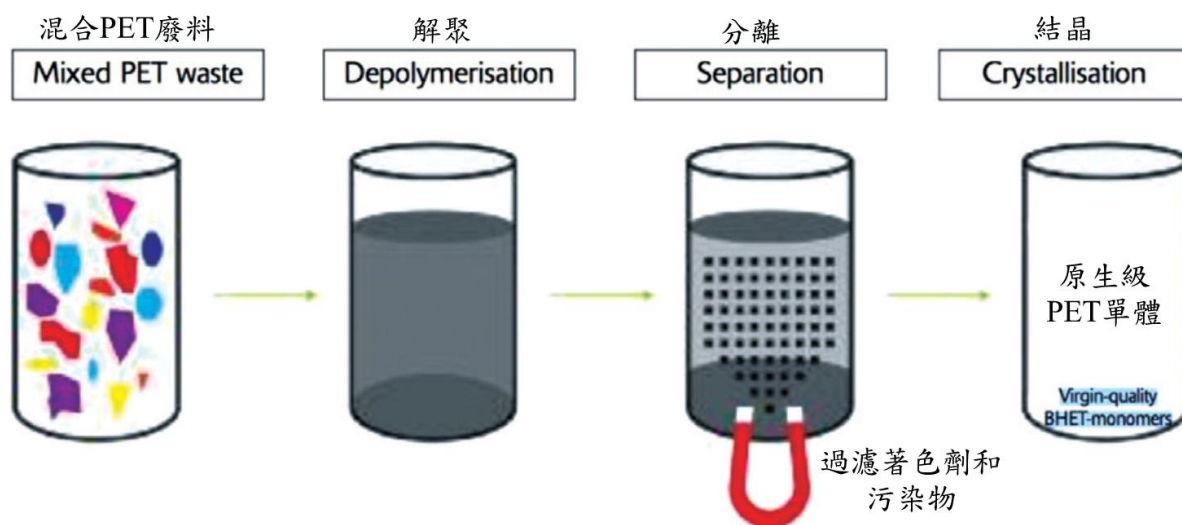
Ioniqa 公司在其申請的美國專利中，係採用磁性顆粒流體的催化劑，以及採用催化劑在溶劑中將聚合物降解成低聚物(oligomers)和/或單體的方法，以提高選擇性和轉化率大幅提高。該專利發明採用的催化劑錯合物(catalyst complex)包含三個部分：奈米顆粒、催化劑實體以及用以連接奈米顆粒與催化劑實體之間橋接部分(通常以化學共價鍵型式鍵結)。此技術不僅轉化率可約提高接近 100%，選擇性可高達 90%(現有技術約 59.2%)，且催化劑使用量非常低且可重複利用超過 50 次。

Ioniqa 技術先將混合 PET 廢料切碎成薄片，再溶解於離子液體(ionic liquid)中(如圖 3.1-1 所示)。此時要加入含有氧化鐵奈米顆粒的催化磁性材料。將混合物加熱到約 200°C，以促成 PET 解聚。第一階段結束後，磁力會分離著色劑和污染物，以獲得近「原生級」PET 單體。此磁力分離過程需要三個小時，所得之單體在結晶後就能製成新的聚酯顆粒，製程結束後可回收液態催化劑(須除去著色劑和污染物)。該公司已於 2019 年在荷蘭建立首座 10,000 公噸級示範工廠，進行 PET 塑膠回收。

Ioniqa Technologies 公司透過具有成本效益的解聚技術，開發磁性奈米顆粒智能催化劑材料的 PET 化學回收技術，將各種類型和顏色的 PET 廢料轉化成無色純單體(pure colourless monomers)，經過升級和改造轉變為新型「原生級」PET 粒料，並可作為生產食品安全級的新型透明 PET 容器。除適用於 PET 寶特瓶外，Ioniqa Technologies 的磁性催化劑智能材料回收技術，也可應用於聚酯纖維的回收再生。Ioniqa 的製程是個平台技術，且公司亦進行其他廢料回收實驗，如其他類型的塑膠廢棄物，此回收技術具有革命性的應用潛力。此外，近年可口可樂公司更宣佈與 Ioniqa Technologies 簽署協議，將回收的 PET 塑膠廢棄物轉變為優質食品級 PET



寶特瓶，有助於廢塑膠的循環經濟。



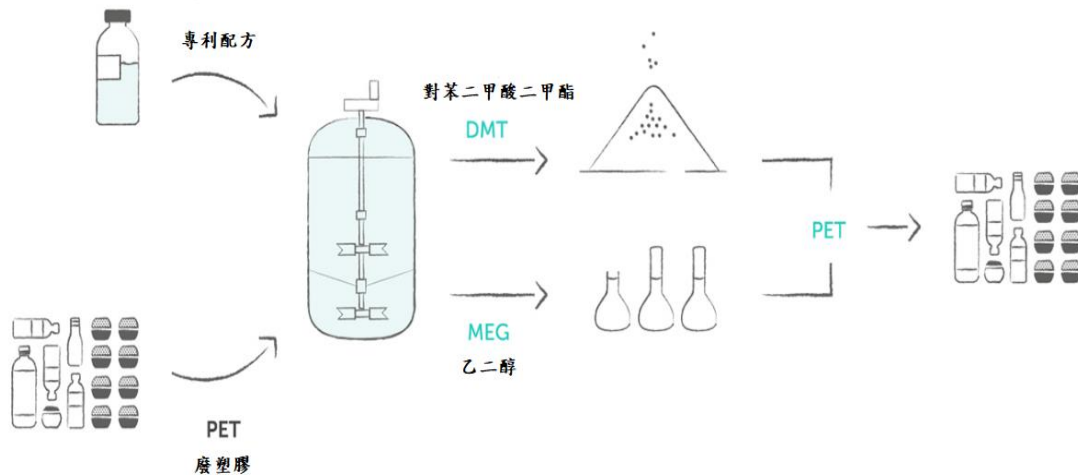
資料來源：回收聚酯纖維的技術與市場趨勢&智能紡織材料的發展，產業情報站，107年1月。

圖 3.1-1 Ioniqa 技術流程圖

## 2. 無負擔反應條件及溶劑輔助專利技術(加拿大 Loop Industries 公司)

Loop Industries 專利技術特色在於解聚製程時與 PET 之混合物的組成及其反應條件的獨特性，可在一般環境條件下將 PET 與非極性溶劑、氫氧化物及醇混合。對於包含酯官能基聚合物(例如 PET)的膨脹之非極性溶劑而言，傳統之解聚製程使用的溶劑是需要能夠增強用於斷開酯官能基離子(諸如氫氧根)之親核性的溶劑。其解聚之最佳速率係藉由具有高介電常數之溶劑系統(諸如醇及水之混合物)來達成，此等溶劑之使用需要較高溫度，以有效地解聚該聚合物。傳統 PET 回收利用技術往往需要使用高溫(例如 80~150°C)進行解聚製程。依據 Loop Industries 專利所述，於一般環境溫度條件下解聚 PET 的快速方法(例如 25±5°C 的環境溫度)，不須額外使用外部熱源來提高反應混合物之溫度。因此，以該專利技術所提供之非極性溶劑及一般環境溫度(或接近環境之溫度)下解聚的方法，更

具能源效率且節省成本，使得 PET 聚合物之再循環過程經濟上更具競爭性。製程示意圖如 3.1-2。



資料來源：<https://www.environmentalleader.com/2018/10/178523/>

圖 3.1-2 Loop Industries 廢塑膠回收示意圖

Loop Industries 公司開發低耗能且無壓力之解聚技術，將廢 PET 塑膠和聚酯纖維解聚成塑膠單體，如將對苯二甲酸二甲酯(DMT)和單乙二醇(MEG)，純化單體後，去除所有著色劑、添加劑和有機或無機雜質，再經過過濾、純化和聚合後可製成 Loop™ 品牌 PET 塑膠和聚酯纖維，提供客戶實現其永續發展目標之機會。經 Loop 低能耗技術回收製成的 PET 與使用化石燃料生產的原始 PET 相比，以一座 84,000 公噸的 Infinite Loop™ 設施，每年可節省 180,600 公噸 CO<sub>2</sub> 排放。

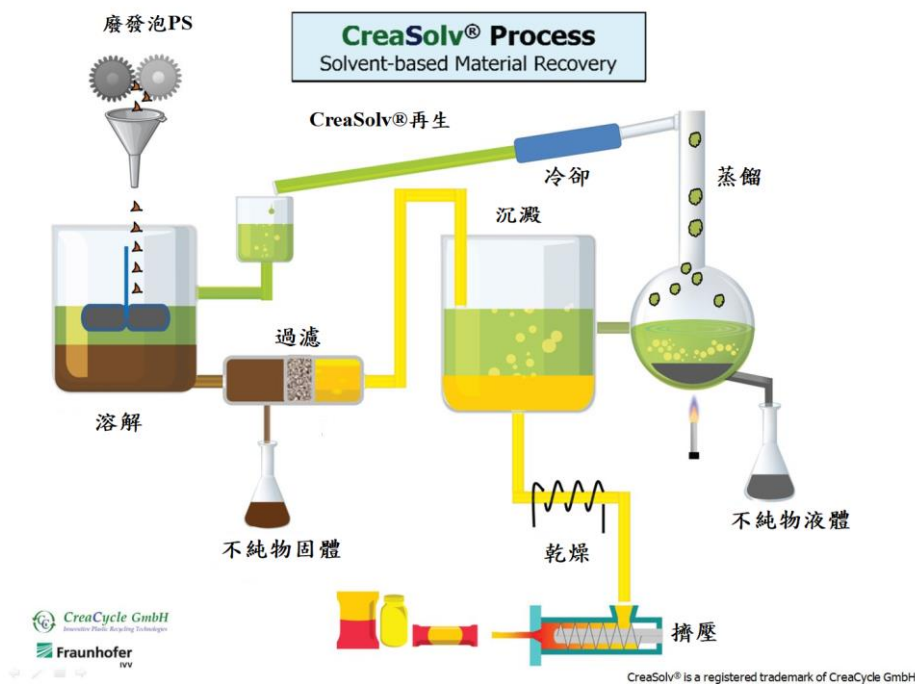
### 3. PolyStyreneLoop 專案(德國 Fraunhofer IVV 與 CreaCycle GmbH 開發 CreaSolv®技術)

PolyStyreneLoop 專案計畫，係由歐盟出資且自 2017 年起開始進行，為選擇使用 CreaSolv®配方溶劑(配方由德國 Fraunhofer IVV 與 CreaCycle GmbH 合作開發)進行純化的技術來處理含溴阻燃劑的聚苯乙烯，再從六

溴環十二烷(hexabromocyclododecane, HBCD)中分離出聚苯乙烯，以及透過以色列化工集團(Israel Chemicals Ltd, ICL)的溴回收設備中進一步處理HBCD。

CreaSolv®技術中，首先將廢發泡PS以CreaSolv®溶劑溶解後，將固體不純物(如無機物、水泥等)經過濾分離後，剩餘液體添加添加劑，將PS轉化為凝膠，添加劑與HBCD則存留於剩餘液體內。然後將PS凝膠與液體分離。經清洗後凝膠被轉移到粒狀高分子中，而液體與添加劑經蒸餾後重新使用。而HBCD留在溴回收單元(Bromine Recovery Unit, BRU)的污泥中，殘留在污泥中的HBCD，由以色列化工集團的溴回收設備(BRU)在高溫中將廢物焚燒，再回收溴元素，可重新用於生產新的聚合阻燃劑，由Loop-PS製成的絕緣產品。CreaSolv®製程流程如3.1-3所示。

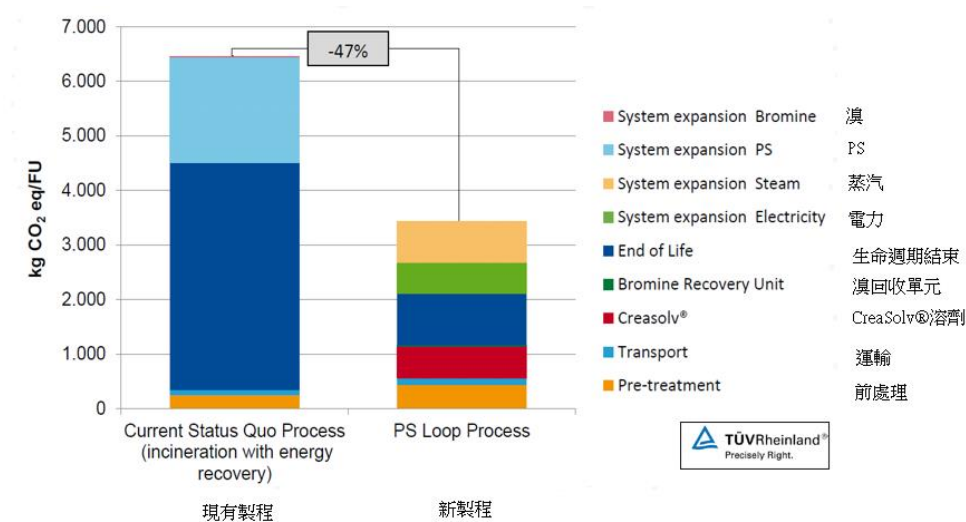
PolyStyreneLoop 試驗工廠位於荷蘭的Terneuzen市，2020年投入運營，每年約可處理2,000至3,000公噸，含溴阻燃劑的聚苯乙烯。



資料來源：CreaCycle GmbH 公司網站，<https://www.creacycle.de/en/the-process.html>

圖 3.1-3 CreaSolv®製程流程圖

經由 TÜV Rheinland 進行生命週期評估 (LCA)，以評估 PolyStyreneLoop 與焚化技術的比較，PolyStyreneLoop 技術其碳足跡幾乎為焚化處理的一半。經 PolyStyreneLoop 技術處理的發泡 PS，每公噸可節省相當於 3 公噸 CO<sub>2</sub>e。(詳如圖 3.1-4 所示)



資料來源：<https://polystyreneloop.eu/circular-economy/>

圖 3.1-4 廢 PS 處理生命週期評估比較

## 3.2 化學解聚法回收技術案例

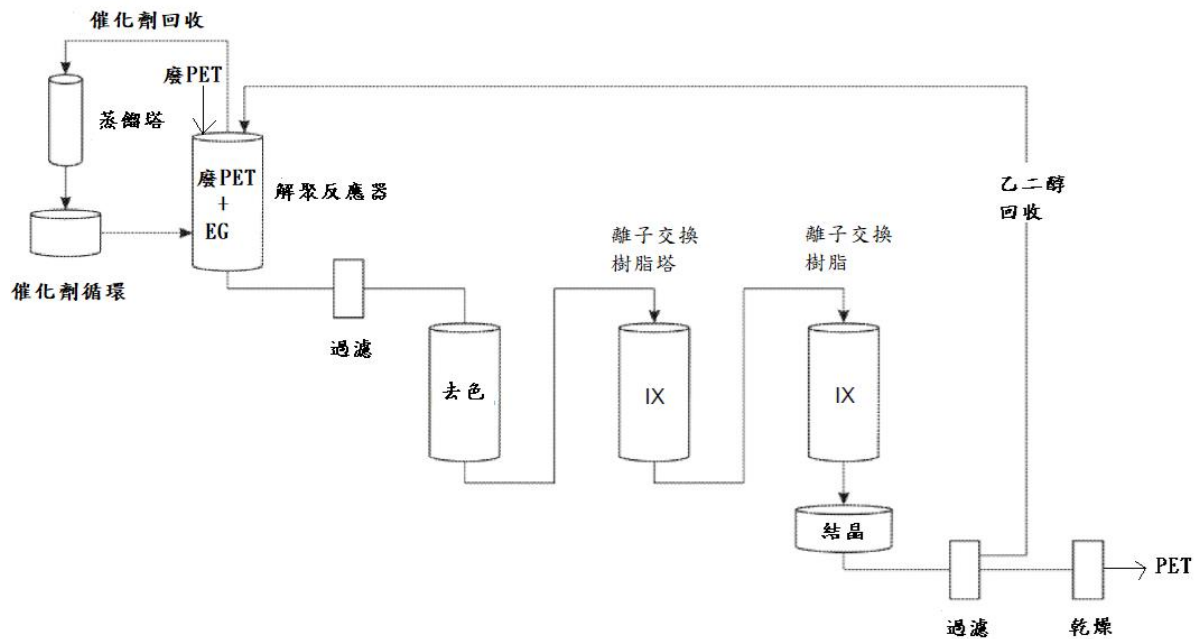
化學回收法主要可分為水解法(Hydrolysis)、醇解法(Glycolysis)及胺解法(Aminolysis)三大類別，依其使用之液體作為媒介而有所不同，以下就蒐集之化學解聚回收技術案例說明如下。

### 1. 廢 PET 回收技術

#### (1) VolCat 新型塑膠回收技術(美國 IBM 公司 Almaden Research Center)

VolCat 是 IBM 阿爾瑪登研究中心利用含醇和胺有機催化劑研發一種可將聚酯解聚，以產生高純度產物的專利方法。IBM 在 2019 年預測在未來五年內，VolCat 塑膠回收技術將在全球獲廣泛採用，以解決全球塑膠廢料之問題。推動創新型 VolCat 塑膠回收技術，可以選擇性地將最常見的家用塑膠-聚對苯二甲酸乙二酯(PET)分解為單體成分，純化後的單體可以很容易地重新聚合成為 PET。

VolCat 是設計一款壓力反應器，進行催化之化學反應解聚製程，圖 3.2-1 顯示其閉環解聚及重新聚合方法的各個步驟流程。VolCat 技術係先加熱具有催化劑的解聚反應器(反應溫度 $>200^{\circ}\text{C}$ )，加入廢 PET 和乙二醇(醇解劑)，使其進行醇解解聚反應，反應完成後再通過蒸餾塔來回收反應器中的催化劑。解聚反應後之產物再進行過濾、去色、結晶、過濾、乾燥，回收固體單體產物(對苯二甲酸二酯(BHET))，醇解劑(乙二醇)與催化劑再重新引入解聚反應器。該技術生產的單體可以用於製造新的 PET，使用後可以再次回收利用。VolCat 可視為一種分子級篩選器，可大幅減少廢料篩選、清洗的過程，從而使 VolCat 技術具有快速、高選擇率、低溫處理以及催化劑易回收之特色。



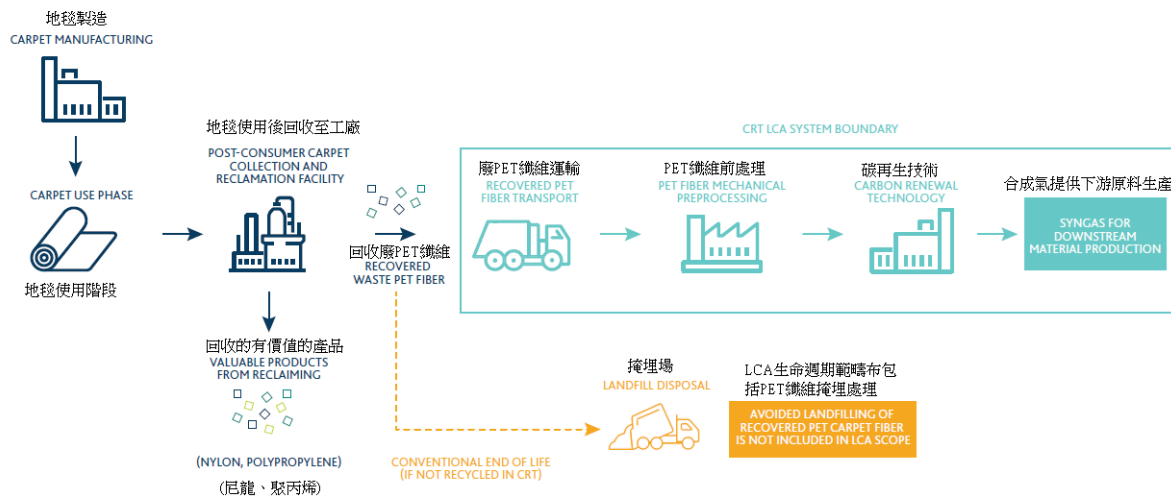
資料來源：PET 塑料化學回收再循環技術，科儀新知，109 年 12 月。

圖 3.2-1 IBM VolCat 新型塑膠回收技術

## (2) 碳再生技術及聚酯再生技術(美國伊士曼 Eastman 公司)

Eastman 公司是甲醇分解技術先驅之一，在此回收程技術領域擁有 30 年的專業經驗，2019 年推出 2 項新技術，碳再生技術(Carbon Renewal Technology, CRT)及聚酯再生技術(Polyester Renewal Technology, PRT)，透過甲醇分解技術將廢塑膠及聚酯產品分解為聚合單體，該單體可以重新引入到新的聚合產品中，形成閉環迴路再利用，其製程流程如圖 3.2-2 所示。此技術將促使原本會被丟棄到垃圾填埋場的低品質廢塑膠或聚酯廢料，再次循環再利用，生產高品質的再生產品。



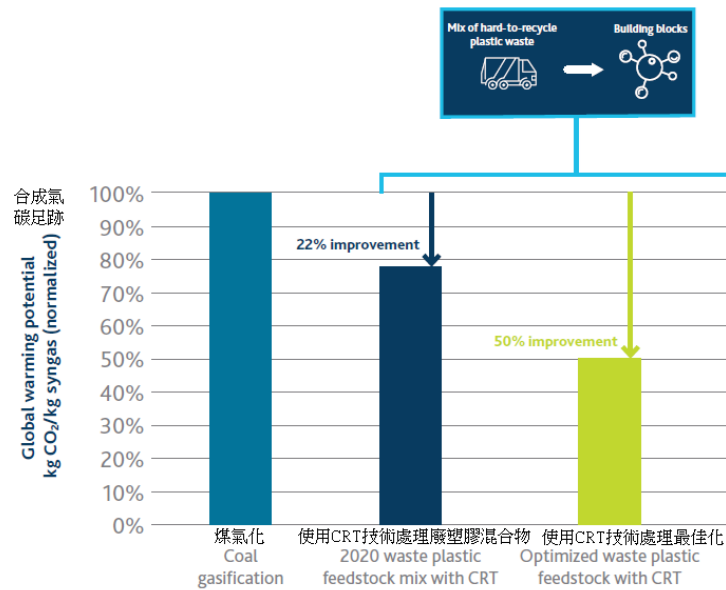


資料來源：LCA carbon footprint summary report for Eastman carbon renewal technology，2020.01

圖 3.2-2 碳再生技術(CRT)製程流程圖

伊士曼公司於 2021 年初宣布投資 2.5 億美元，在美國田納西州 Kingsport 市建造一個全球最大的廢塑膠回收工廠，將採用甲醇分解技術，將聚酯廢料轉化回收製成產品，預估處理聚酯廢料量為 10 萬公噸/年，預計於 2022 年底興建完成。伊士曼承諾到 2025 年，每年回收超過 12 萬公噸廢塑膠，預期到 2030 年可達到每年回收超過 24 萬公噸廢塑膠。

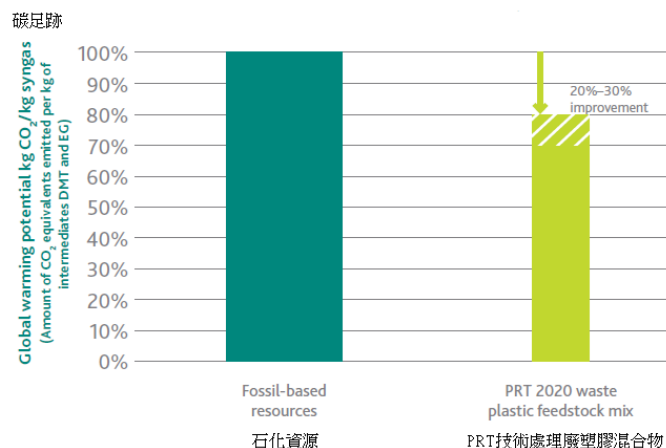
伊士曼公司採引用 ISO 14040 和 ISO 14044 標準，進行 CRT 技術生命週期評估(LCA)，顯示通過使用廢塑膠作為原材料替代傳統的化石原料，CRT 技術可將合成氣產生的溫室氣體排放量降低 20%~50%，CRT 技術碳足跡評估結果如圖 3.2-3 所示。另外也評估與廢塑膠的運輸方式和運輸距離相關，評估最佳化距離為 500 英里內。



資料來源：LCA carbon footprint summary report for Eastman carbon renewal technology, 2020.01

圖 3.2-3 Eastman CRT 技術碳足跡差異比較

針對為 PRT 技術進行生命週期評估(LCA)，比較使用回收材質廢塑膠與傳統化石材料製成的產品碳足跡，PRT 可以生產中間體(intermediates，亦指半成品)DMT 和 EG，其平均溫室氣體排放量減少 20~30%。評估分析如圖 3.2-4 所示。



資料來源：Polyester renewal: a big step toward a smaller footprint.








圖 3.2-4 Eastman PRT 技術碳足跡差異比較

兩個種技術主要區別在於使用進料類型或使用投入原料，以及產品



產出不同而有所差異。聚酯再生技術(PRT)適用聚酯塑膠，其中包括各種材料，如飲料瓶、地毯，甚至聚酯基服裝紡織品；而碳再生技術(CRT)則適合各種類型廢塑膠作為投入進料，CRT 與 PRT 技術可處理廢塑膠類別彙整如表 3.2-1。

表 3.2-1 CRT 與 PRT 可處理廢塑膠類別彙整表

廢塑膠類別	一般來源	CRT	PRT
PET		是	是
HDPE		是	否
PVC		否	否
LDPE		是	否
PP		是	否
PS		是	否
其他		是	否

資料來源：本計畫彙整

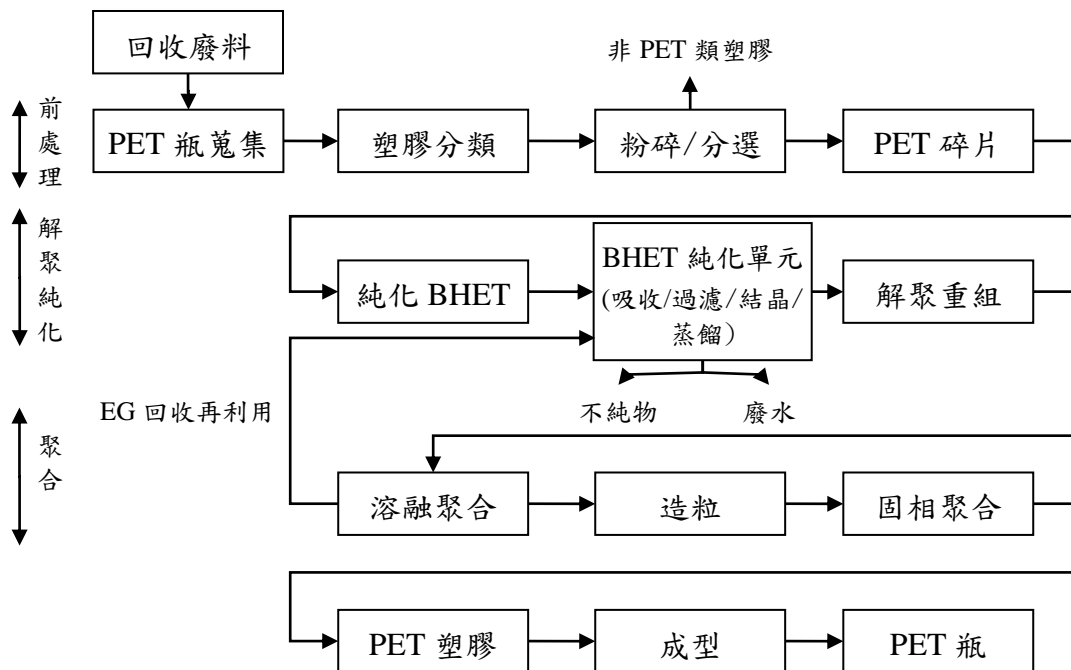
### (3)BRING Technology™(日本 JEPLAN 公司)

JEPLAN 公司開發醇解法回收技術-BRING Technology™，此技術將廢 PET 瓶再生成新的 PET 瓶原料，使其成為一種資源和永續的包裝材料。BRING Technology™減少廢棄 PET 瓶的數量，將為 PET 瓶引起的環境問題提供解決方案，向實現永續社會邁出一大步。

BRING Technology™的優越之處在於它可以去除雜質，允許 PET 瓶到 PET 瓶製造的重複循環。PET 瓶不再是垃圾，而是用於製造新 PET 瓶的資源。BRING Technology™證明 PET 瓶可以是一種永續循環的資源。JEPLAN 公司於 2008 年在日本神奈川縣建立第一座 PET 回收工廠，

其製程流程如圖 3.2-5 所示。BRING Technology™之優勢如下：

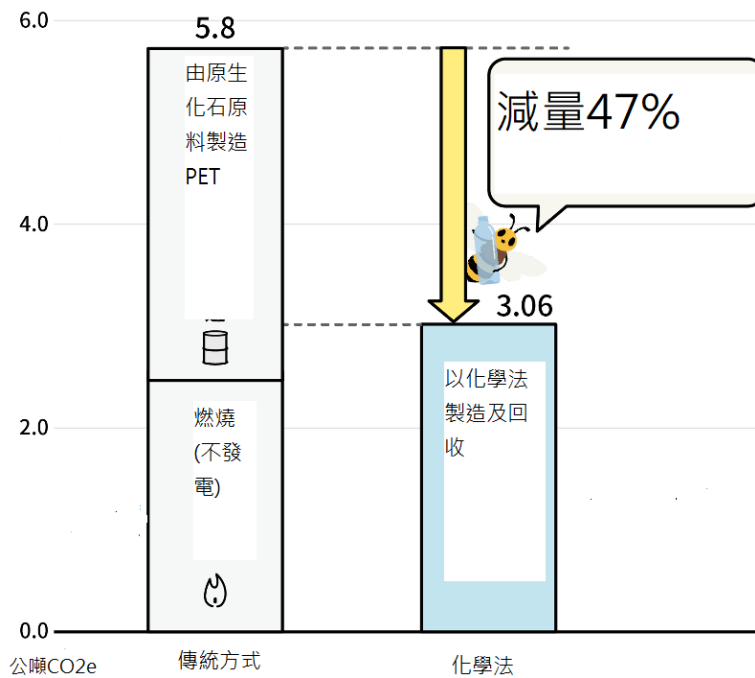
- 可同時生產與新產品同等質量的再生塑膠：廢 PET 瓶和廢聚酯纖維中的雜質很難去除，因此經常以焚化或掩埋處理。BRING Technology™可以去除這些雜質，從而可以製造出與由化石原料製成的新 PET 塑膠同質的再生塑膠。因此，除可作為資源再利用，且有助於減少化石原料的使用，減少溫室氣體排放。
- BHET 單體的提取：通過結晶和蒸餾純化過程，可提取單體(對苯二甲酸雙(2-羥乙基)酯；BHET)，同時去除回收材料中的雜質，可用於製造適用於食品級產品。這些產品也可以反複回收製成新產品。
- 與現有設備的相容性：在純化過程中提取的 BHET 單體可以作為現有 PET 聚合設備的原料。可將 BRING Technology™回收設備引入傳統聚合工廠，使其作為塑膠回收工廠運作的製程之一。
- 純化技術的優化：根據回收材料的現況和回收目標來改變純化技術的組合和順序，可以提高雜質去除率，並根據實際需要優化成本和操作，以創新且進一步提高此類純化過程的效率。



資料來源：本計畫彙整

圖 3.2-5 BRING Technology™製程圖

JEPLAN 公司於 2019 年針對使用化學法回收製造之塑膠瓶與傳統製造方式，比較生命週期碳足跡，如圖 3.2-6 所示。顯示採用化學法回收生產 PET 塑膠瓶的碳排放量可減少約 47%。



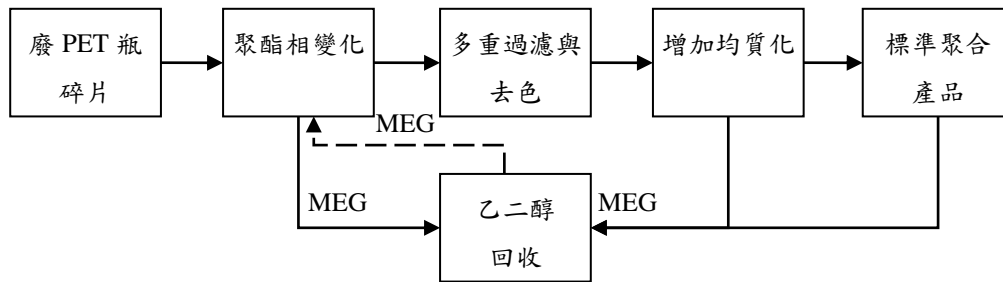
資料來源：JEPLAN 公司網站，<https://www.jeplan.co.jp/sustainability/>

圖 3.2-6 JEPLAN 與一般 PET 製造碳足跡比較

#### (4) ReNEW™專利技術(英國 PerPETual 公司)

PerPETual Global 公司將廢 PET 瓶改造成高品質且永續的聚酯(單體)，直接取代由 PTA 和 MEG 製成的傳統聚酯(單體)。其 Nashik 工廠每天有超過 200 萬個 PET 瓶被轉換為高品質永續的長絲紗線。這些紗線被一些世界領先品牌用於生產各種服裝和紡織品，預期 2022 年每天的處理量可達 1 億個 PET 瓶之目標。

PerPETual Global 公司的創新回收技術(ReNEW™)是將廢 PET 塑膠瓶解聚為聚酯(單體)，再製為容器、聚酯紡織、薄膜、包裝等 PET 產品，其製程流程如圖 3.2-7。



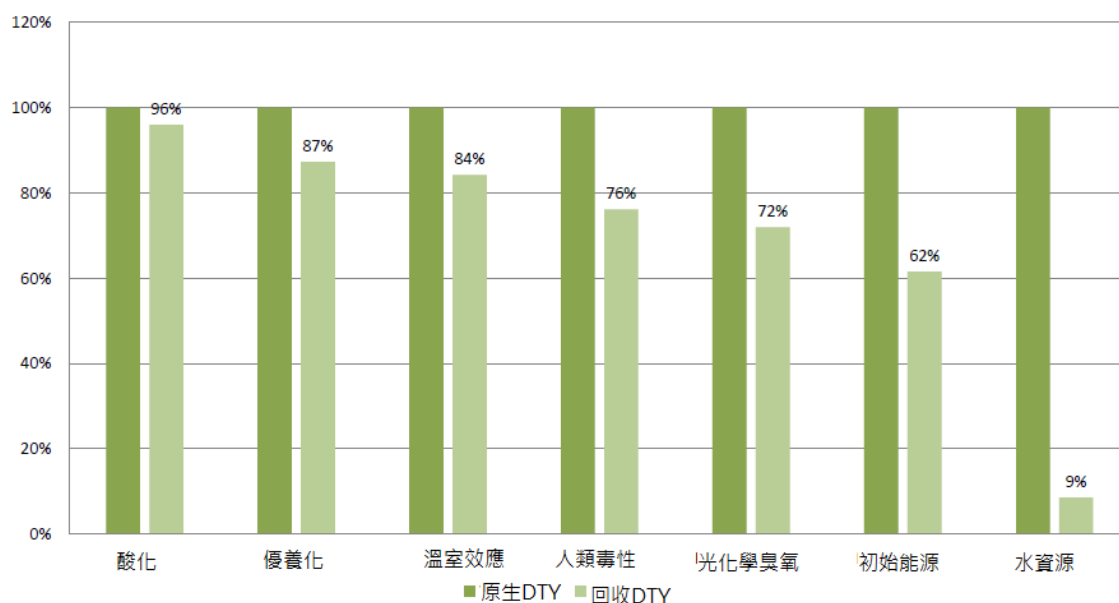
資料來源：Introduction to perPETual Global Technologies and Polygenta，2017，本計畫彙整。

圖 3.2-7 ReNEW™專利技術製程流程圖

這項創新解聚製程的優點是使用單乙二醇(MEG)，且不添加任何外來的化學物質或雜質(如催化劑)，從而確保生產出聚酯(單體)之純度。與批次機械回收方法不同，ReNEW™專利技術使用的是連續的化學回收方法。使用 PET 工業生產設備即可將 ReNEW™專利技術產生之永續的聚酯(單體)轉化為任何 PET 產品。目前以此方法生產的純酯(單體)已商業化且對環境友善，合作夥伴已獲得 OEKO-Tex、GRS、IMS 等多項認證，證明 ReNEW™專利技術和最終產品的品質和標準。

目前 PerPETual 公司位於印度納西克(Nashik)的聚酯製造工廠，每天可將超過 300 萬個廢塑膠瓶，加工成用於紡織行業的高品質的長絲。未來計畫在 2022 年進一步提高製造設施的產能。

ReNEW™專利技術與傳統技術在製造拉伸變形絲(Draw Texturing Yarn, DTY)方面，比較其環境足跡差異性如圖 3.2-8 所示。顯示回收 DTY 相關環境足跡皆較原生 DTY 低，尤其在水資源方面，更為明顯。



資料來源：Introduction to perPETual Global Technologies and Polygenta，2017。

圖 3.2-8 ReNEW™專利技術回收與傳統技術製造之 DTY 環境足跡比較

#### (5) DEMETO 技術(瑞士 gr3n 公司)

gr3N 公司於 2017 年提出德米托計畫(DEMETO)，強化廢 PET 塑膠化學回收反應(解聚)，提出一種高度創新的方法。採用微波輻射作為高能量催化劑，減少反應時間和 PTA 純化步驟的複雜性，同時通過連續製程以提高生產率。

gr3N 公司在 2021 年 8 月，於義大利中部基耶蒂(Chieti)建立示範工廠，該廠處理量為 30,000 公噸/年，正進行各項參數測試。

使用進料包括容器(有色、無色、透明、不透明)和紡織品(100% 聚酯，但也有多達 30% 的其他材料，如 PU、棉等)。在進行研磨時，可減少反應時間及能源消耗，搭配微波進行解聚反應後，將單體與混合物進行純化，以得到高純度之單體聚合物。同時將反應後處理中產生的 NaCl，經電解反應處理後，可再重複應用於下一個解聚反應。製程流程如圖 3.2-9 所示。

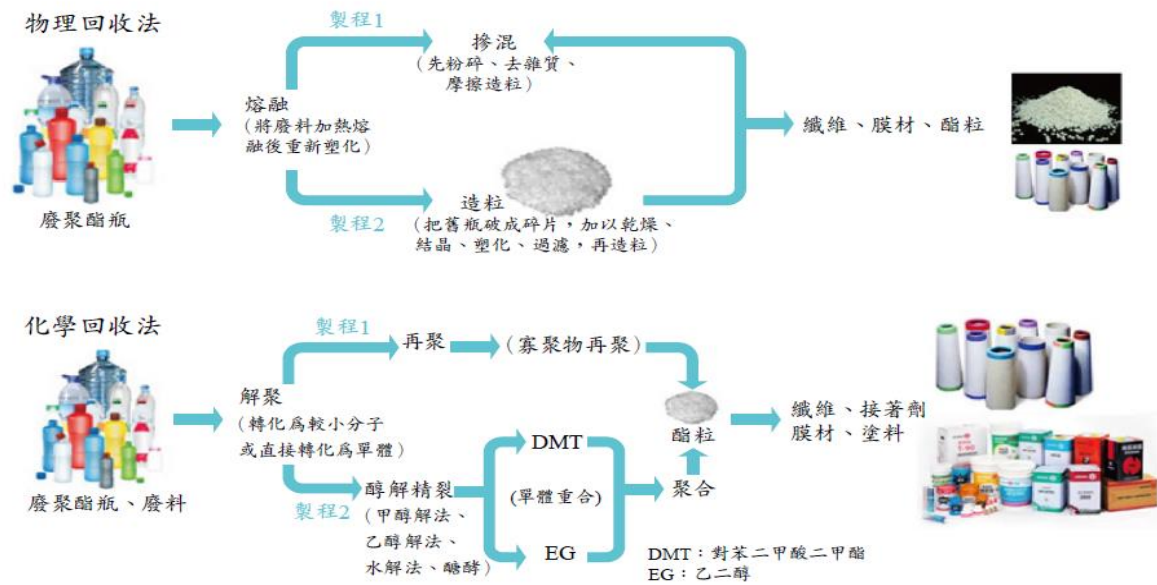


資料來源：gr3n 公司網站，<https://gr3n-recycling.com/technology.html>

圖 3.2-9 gr3n 製程流程圖

## 2. 廢尼龍高值化及資源循環技術

一般聚酯回收可分為物理回收法及化學回收法兩類(如圖 3.2-10 所示)，其中物理回收法係將聚酯廢料經由加熱熔融、摻混、造粒，再製成環保聚酯產品；而化學回收法則是將聚酯廢料加入醇類，降解形成寡聚物或小分子，再透過重新聚合、造粒，製成聚酯產品。物理回收法消耗較低的費用和能源，市面上較多屬於此類環保回收聚酯產品；而化學回收法需要較多的費用、能源及時間，較少應用在環保回收聚酯產品，但能針對回收聚酯產品進一步進行改質和調整。



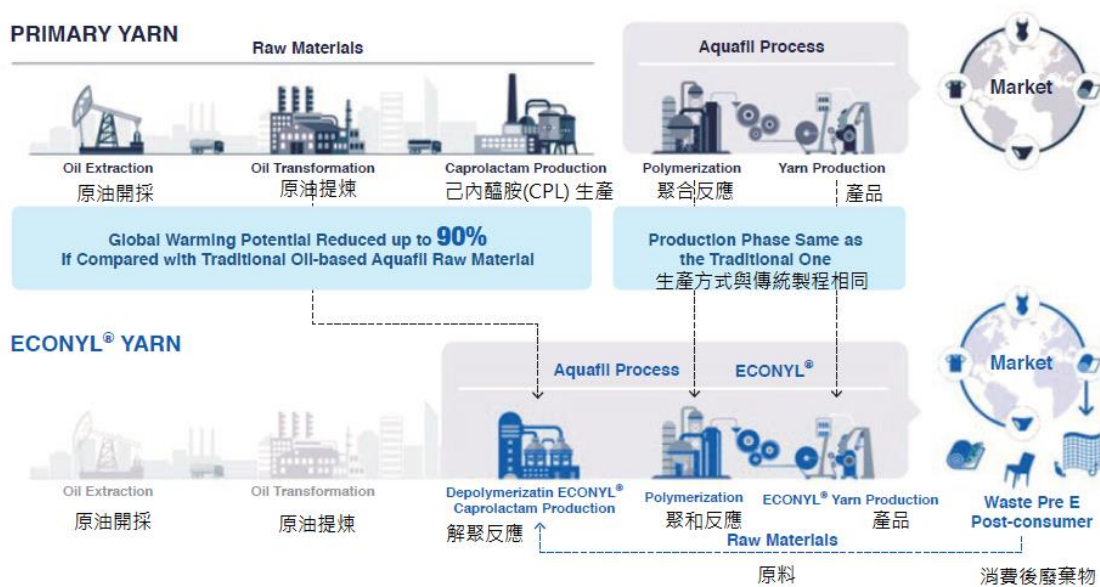
資料來源：創新綠色鞋材與循環經濟，南寶樹脂化學工廠（股）公司，2019.01。

圖 3.2-10 聚酯回收方法

#### (1) ECONYL® Regeneration System 技術(義大利 Aquafil 公司)

義大利尼龍紗線生產商 Aquafil 公司耗時 4 年，投資超過 2,000 萬歐元於 2011 年成功研發出 ECONYL® Regeneration System 技術，可將回收廢棄漁網再製成 100% 再生尼龍紗線。目前，ECONYL® 是全球完全使用回收塑膠製作而成的環保纖維之一，Aquafil 公司也成為在此領域的領導業者。廢漁網回收的技術之難度在於如尼龍這類的高分子聚合物在「使用」與「回收」後，都會產生分子鏈斷裂進而大幅影響機械性能，故僅能被降級使用。但 ECONYL® 的技術特點則賦予再生纖維能夠被無限循環利用，主要係透過將漁網清洗分類並將其粗破碎成小塊，同時在大型反應桶槽內進行化學回收製程，最終將再生粒子重新進行紡絲形成全新的尼龍纖維(如圖 3.2-11 所示)。而 ECONYL® 技術因結合單體提純與再聚合技術，故所得之尼龍分子量、強度與新材料無異，相較於原生尼龍纖維則可大幅減少二氧化碳排放量，並降低對化石原料之依賴。



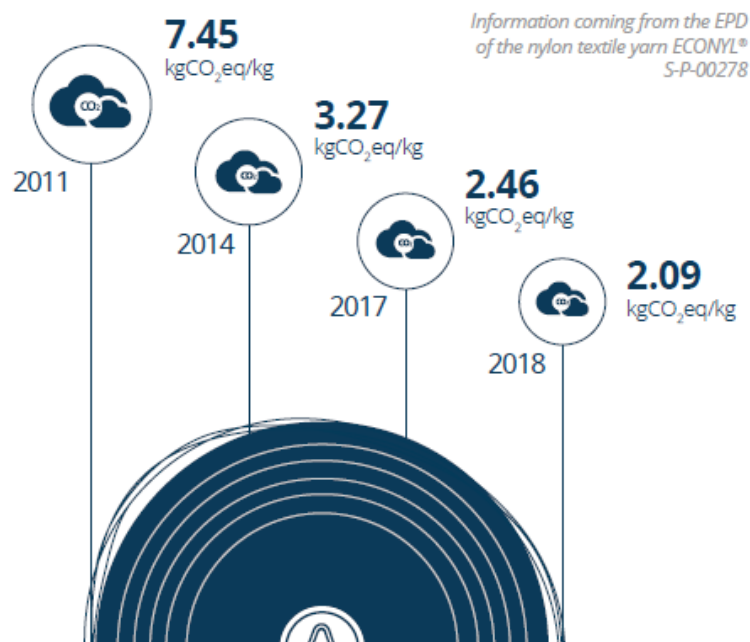


資料來源：回收漁網之混煉改質與加工技術，工業材料雜誌 415 期，2021.07

圖 3.2-11 Aquafil 公司 ECONYL®再生尼龍紗之回收再製技術

Aquafil 公司的成功吸引國際各大服飾品牌使用 ECONYL®纖維進行產品設計、生產、推廣與銷售。其中包括 Gucci、Stella McCartney、Adidas、內衣品牌 LaPerla、H&M 等多家品牌，都使用了再生尼龍纖維製作商品。而義大利時裝品牌 Prada 也推出開創性的 Re-Nylon 系列產品並推出 6 款男女袋包，並宣布到 2021 年將使用 ECONYL®再生纖維取代全部原生尼龍紗線。

Aquafil 公司致力於不斷提高產品性能和質量，同時減少其生產過程對環境的影響，自 2011 年起進行 ECONYL® LCA 分析產品和製程對整個生命週期中的影響，以確定需要改進的熱點和機會，產品碳足跡由 2011 年 7.45 kgCO<sub>2</sub>e/kg 下降至 2018 年 2.09 kgCO<sub>2</sub>e/kg，(詳如圖 3.2-12 所示)。



資料來源：AQUAFIL AND SUSTAINABILITY，2018。

圖 3.2-12 ECONYL® YARN 於 2011~2018 年碳足跡統計

(2)regen®技術(韓國曉星天禧 Hyosung 公司)

曉星天禧 Hyosung 公司是世界級的尼龍原絲廠商，基於 50 餘年所積累的經驗和生產技術，不斷供應優質多功能尼龍原絲，受全世界顧客們的喜愛。以高級內衣和運動裝，工業材料用紗線 TOPLON 作為主要產品，開發出世界首個環保型資源循環再生尼龍"MIPAN regen"。並透過研發環保材料，在韓國推出回收再利用 PET 瓶所製成的滌綸原絲(regen®)，獲得專業環保認證機構管制聯盟(Control union)的 GRS 認證，其生產流程如圖 3.2-13。



資料來源：carryin 網站，<https://www.carryin.store/blog/posts/brand-mei>

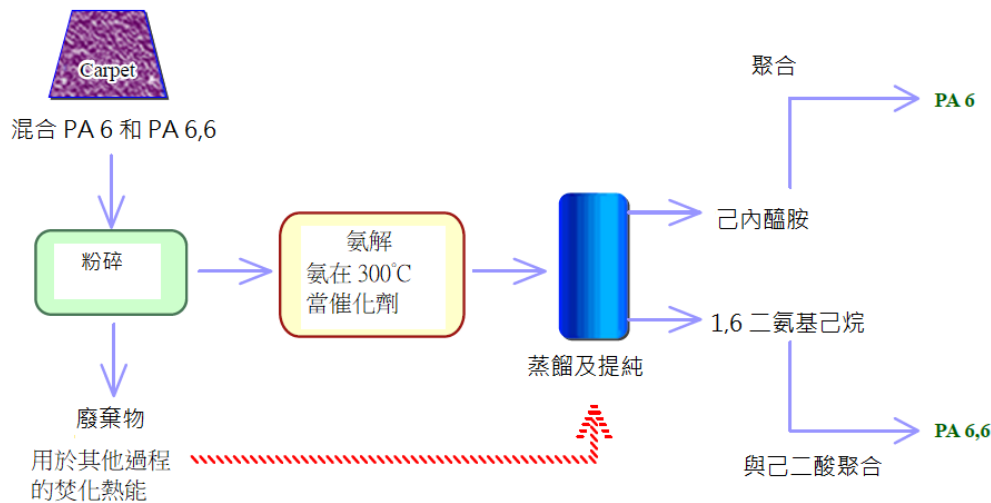
圖 3.2-13 MIPAN regen®產品生產程序

### (3) 氨解法-Sorona®技術(美國杜邦公司)

杜邦公司在 1944 年開始建置廢棄地毯回收機制，在美國國內設置超過 80 處廢地毯回收站，每個月將近回收 700 公噸廢棄地毯；其中每 10 公噸廢地毯中，約可回收 2 公噸的聚醯胺。其回收流程如圖 3.2-14 所示。將含有聚醯胺的廢棄地毯切碎並通過研磨機，過篩成 1.5 mm 聚醯胺顆粒；此時，加入水而形成泥漿後，再搭配 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_3$ 觸媒，並控制溫度在  $300^\circ\text{C}$  進行氨解，以得到 98.5% 高純度己內醯胺單體。

杜邦公司開發由再生來源纖維材質產品，有助於降低對化石原料之依賴，減少溫室氣體的排放。Sorona®技術的原料中，37% 來自每年可循環再生的植物。與尼龍 6 的生產過程相比，Sorona®技術的能耗降低

30%，溫室氣體排放量減少 63%。與尼龍 6,6 的生產過程相比，Sorona® 技術的能耗降低 40%，溫室氣體排放量減少 56%。Sorona® 技術生物基聚合物廣泛適用於家用和商用地毯、服裝以及汽車腳墊和地毯等領域。



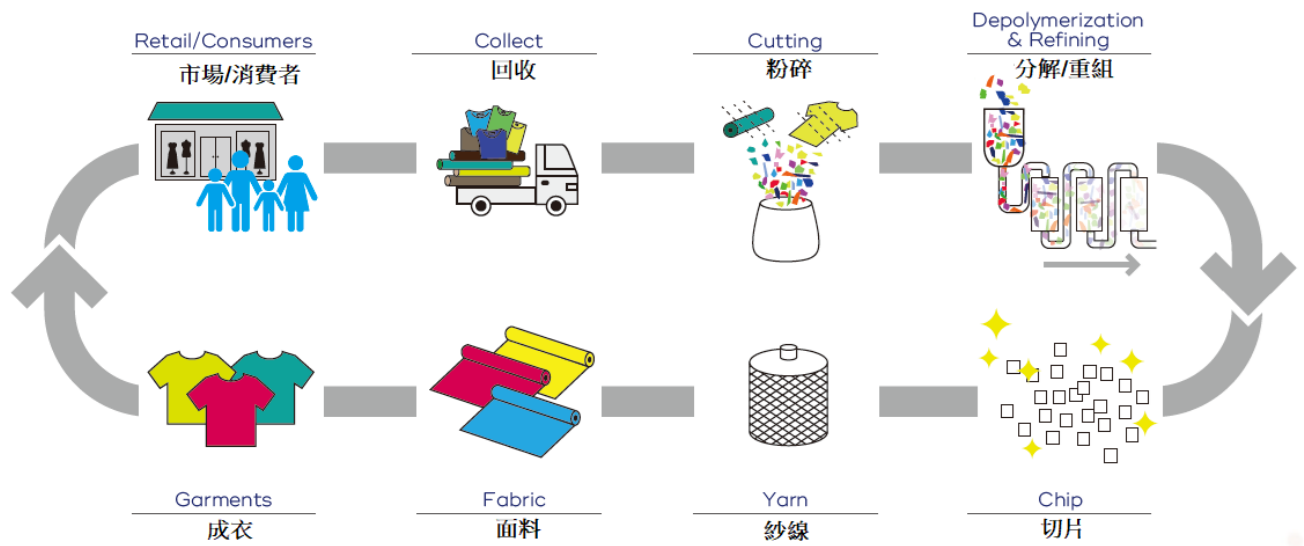
資料來源：化學回收產業趨勢與應用(下)，工業材料雜誌 397 期，2020 年 1 月。

圖 3.2-14 杜邦公司建置廢地毯再生流程

#### (4) RENU® 技術(日本伊藤忠商事株式會社 ITOCHU Corporation)

RENU® 技術是利用廢棄的剩餘布料或舊衣再生聚酯材料。伊藤忠公司的目標旨在解決服裝業中的大量廢料問題，努力實現循環型經濟社會，且向生產者到消費者的各個群體廣泛推廣和培育相關專案，為發展循環型經濟做出自己的貢獻。

RENU® 技術努力通過有效利用廢棄服裝和生產過程中產生的剩餘面料/裁片邊料來實現循環經濟，將廢棄纖維作為原料，利用分解、再聚合等化學程序進行再生，提供可與常規品品質相同的商品。RENU® 技術可有效利用傳統的“Ta 開採資源”、“生產”、“廢棄”的直線性經濟中未使用的廢棄纖維，實現閉環循環經濟，通過生產者、品牌商和消費者的參與，描繪出一個循環經濟新商業模式，如圖 3.2-15 所示。



資料來源：RENU 網站，<https://renu-project.com/zh/renu-material>

圖 3.2-15 RENU®技術流程圖

### 3.3 熱能解聚法回收技術案例

#### 1. Ineos Styrolution 公司開發解聚技術回收聚苯乙烯

由德國聯邦教育與研究部資助的 ResolVe 計畫，是多個單位共同合作的項目，此計畫執行時間為三年(自 2017/08/01~2020/07/31 止)共投入 935,271 歐元(約 3,195 萬台幣)，計畫成員包括 Ineos Styrolution、Neue Materialien GmbH Bayreuth、亞琛工業大學加工與回收研究所、以及塑膠工業研究所；最終報告顯示，消費後的聚苯乙烯廢棄物確實可成為有價值的原料，再進入食品級應用市場。

Ineos Styrolution 公司向來致力從事丙烯腈丁二烯苯乙烯共聚物 (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS)、聚苯乙烯(Polystyrene, PS)以及發泡聚苯乙烯(Expandable Polystyrene, EPS)等材料的回收再利用。該公司與義大利的食品包裝生產商 Sirap 共同研發，從食品包裝中回收 PS 材料進行解聚，經由熱裂解製程將 PS 回收料分解成苯乙烯油，再通過蒸餾製程得到高純度苯乙烯，再經聚合後加工成為片材或成型。此種製程雖然昂貴但因它將回收的 PS 料還原成苯乙烯單體，這種作法將控制做出的回收料品質可達到新料的等級，特別是可應用於食品級包裝。

Ineos Styrolution 計畫在法國溫格爾建立其完整的商業規模回收設施，且也在比利時 Tessenderlo 有建立工廠的計畫，該工廠預計於 2023 年投入營運，每個工廠的目標是將 1,5000 公噸/年廢 PS 轉化為再生苯乙烯。

#### 2. 微波熱處理技術(加拿大 Pyrowave 公司)

Pyrowave 公司的專利微波催化解聚技術係提供全球最先進的高功率微波技術，其 600 系列 CMD 反應器專為聚苯乙烯原料設計，可加工全系列的發泡聚苯乙烯(Expandable Polystyrene, EPS)和高抗衝擊聚苯乙



烯(High Impact Polystyrene, HIPS)。其製程設備照片如圖 3.3-1 所示。

此技術相較從化石原料製造苯乙烯單體的製程降低約 15 倍，亦可應用於聚丙烯和聚乙烯之回收處理。目前其單體產率可達 95%，產能約 100~200 公斤/小時，未來預估將可達 500~1,000 公噸/年。其回收處理流程如下說明：

- (1)首先在製備罐中混合塑膠，去除標籤、薄膜等雜質，以利後續注入反應器。
- (2)聚苯乙烯被引入反應器後，與碳化矽顆粒混合，進行高能微波場之相互作用。
- (3)使用電力和微波，反應過程將聚合物分子鏈分解成單體(解聚)。
- (4)使用後的聚苯乙烯被轉化為液態單體，再經純化以符合與工業中使用的規格。
- (5)純化和回收之物料，經由再加工後恢復為原來的樹脂單體，以製造各種產品，如聚苯乙烯、合成橡膠、乳膠和電子產品塑膠。



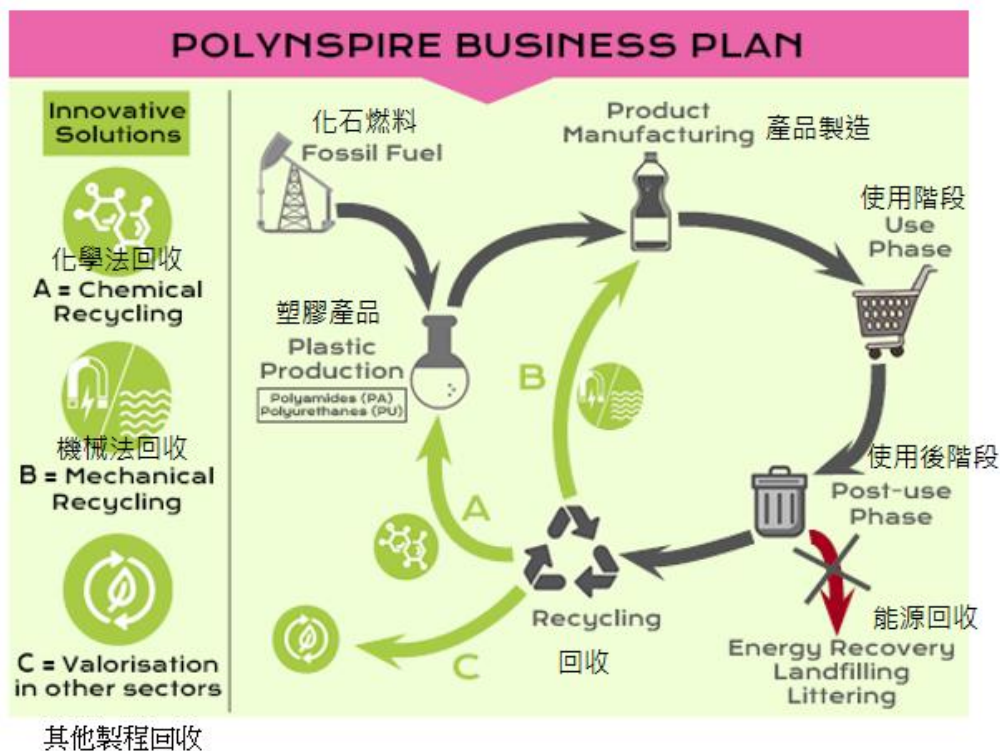
資料來源：Pyrowave 公司網站，

<https://www.pyrowave.com/en/blog/news/pyrowave-closes-series-b-led-by-michelin-and-sofi-nova-partners>

圖 3.3-1 Pyrowave 之製程設備

### 3. polynSPIRE 計畫(歐盟)

polynSPIRE 計畫自 2018 年起由主要歐盟出資 790 萬歐元進行為期 5 年研究，主要目標是展示一套創新、具有成本效益和永續的解決方案，旨在提高消費後和工業後塑膠回收過程的能源和資源效率，合作單位包括研究/學術機構、政府組織、行業和中小企業。目標設定技術整備度 (Technology Readiness Level, TRL) 達到 TRL7，並提出 3 個創新研究方案：1. 由微波和智能磁性催化劑輔助的化學回收，作為回收塑膠單體和有價值的材料(碳或玻璃纖維)的途徑；2. 以添加劑和高輻射熱增強回收塑膠的品質；3. 將塑膠廢棄物作為鋼鐵行業的碳源進行評估。創新方案 A 和 B 可使生產聚醯胺 (Polyamide, PA) 的化石燃料減少 34%，生產聚氨酯 (Polyurethanes, PU) 的化石燃料減少 32%。方法 C 可以減少電弧爐中約 80% 的化石碳。polynSPIRE 整體計畫架構如圖 3.3-2 所示。



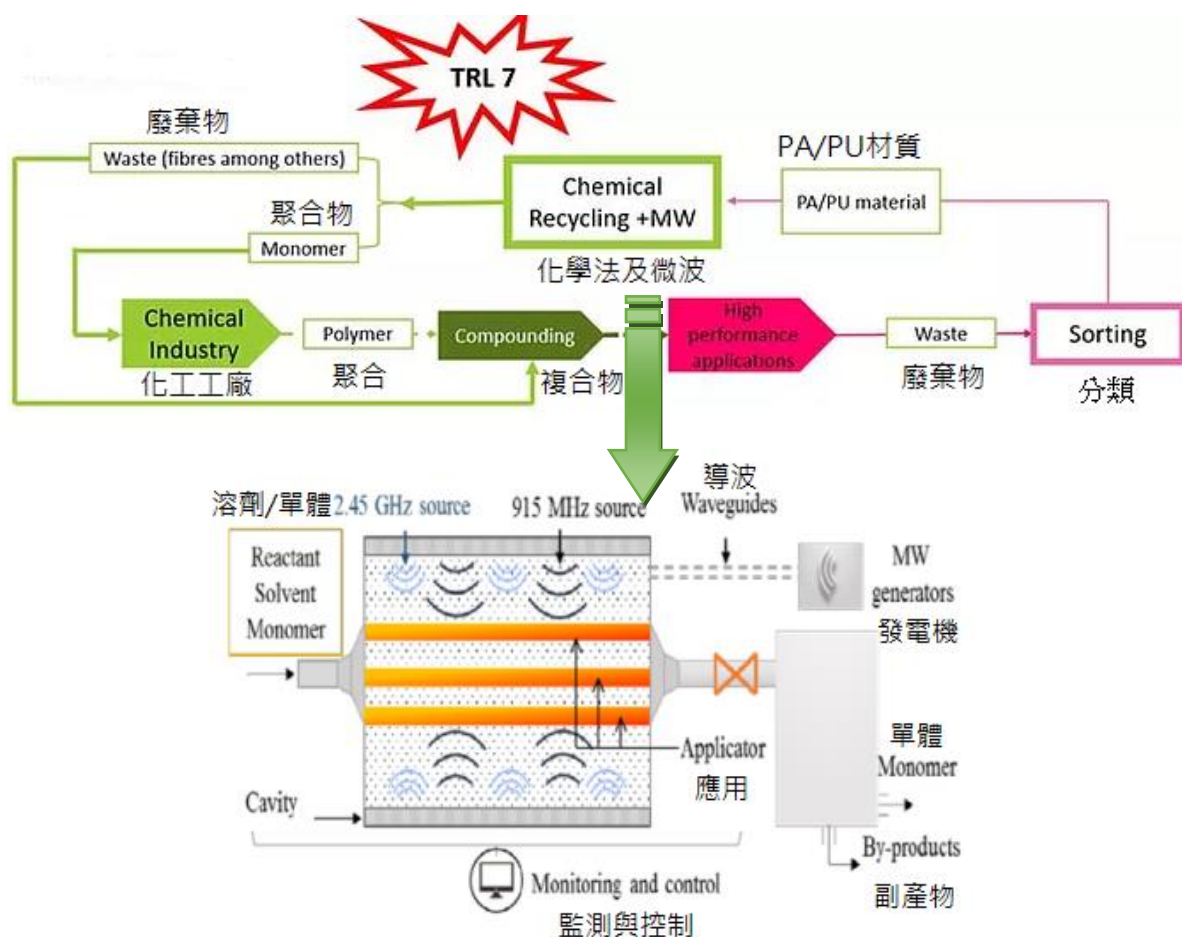
資料來源：polynSPIRE 計畫網站，<https://www.polynspire.eu/solution>

圖 3.3-2 polynSPIRE 計畫架構



### (1)微波輔助的化學回收

polynSPIRE 計畫將含 PA/PU 廢塑膠經由化學法回收及微波技術 (Microwave Technology, MW)，使聚合物分解成單體與副產物，用以作為提高化學品回收系統效率的創新途徑。其製程流程如圖 3.3-3。

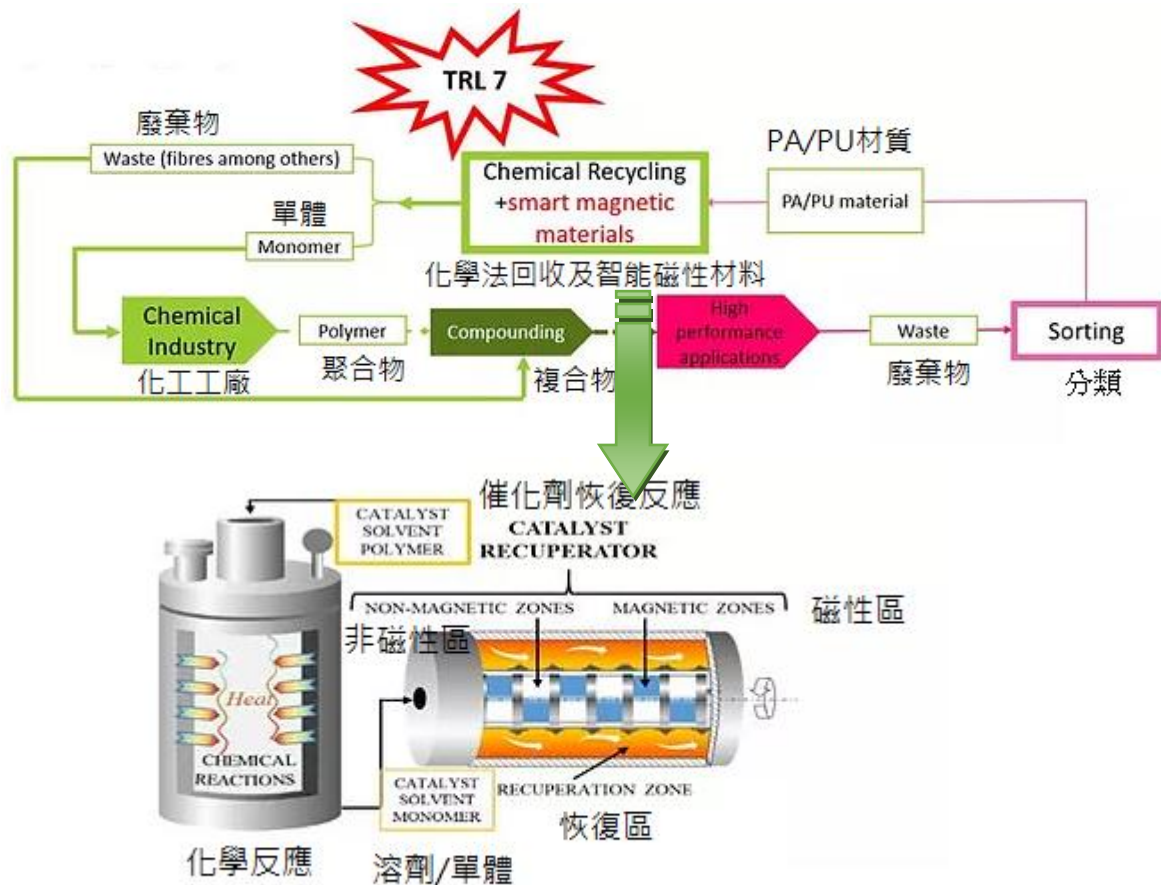


資料來源：Demonstration of Innovative Technologies towards a more Efficient and Sustainable Plastic Recycling.

圖 3.3-3 微波輔助的化學回收流程

## (2) 智能磁性材料輔助化學回收

在開發智能磁性材料(Smart Magnetic Materials, SMM)作為製程使用的催化劑，是一種新創的化學法回收方式，可提高製程效率。圖 3.3-4 為採用智能磁性材料輔助化學回收新技術的系統流程圖。



資料來源：Demonstration of Innovative Technologies towards a more Efficient and Sustainable Plastic Recycling

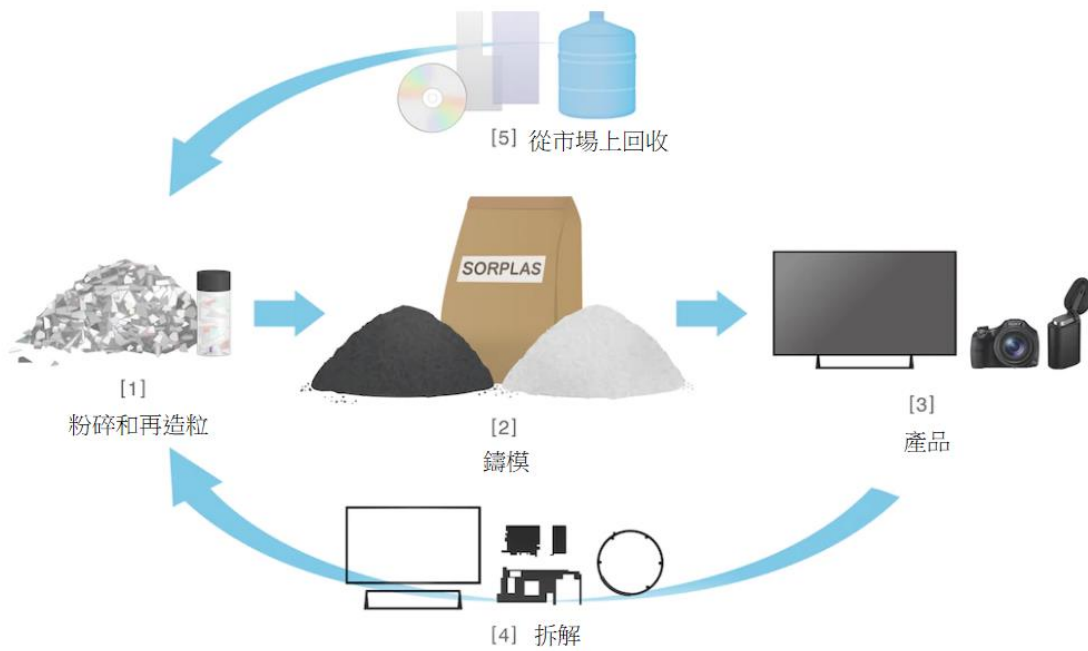
圖 3.3-4 智能磁性材料輔助化學回收流程

### 3.4 其他技術案例

#### 1. SORPLAS™ 技術(日本 Sony 公司)

Sony 公司開發一種兼具永續性與高性能的回收塑膠 SORPLAS™，以減少非再生資源的使用量。可用於電子產品中的再生塑膠，通常約含 30% 的回收材料。Sony 公司自 2014 年開始，在含硫為主的阻燃劑中，回收塑膠含量高達 99%，阻燃劑與其他添加物約 1%。相較於原生樹脂，在 BRAVIA™ KDL-40EX52H LCD 電視中使用 SORPLAS™ 技術，可降低生產製程中 78% 的二氧化碳排放量，其回收流程圖如 3.4-1 所示，成品照片

如圖 3.4-2 所示。



資料來源：Sony 網站，<https://www.sony.com.tw/zh/electronics/sorplas-recycled-plastic>

圖 3.4-1 SORPLAS™技術回收製造流程



資料來源：Sony 網站，<https://www.sony.com.tw/zh/electronics/sorplas-recycled-plastic>

圖 3.4-2 阻燃劑和 SORPLAS™技術產生之塑膠粒

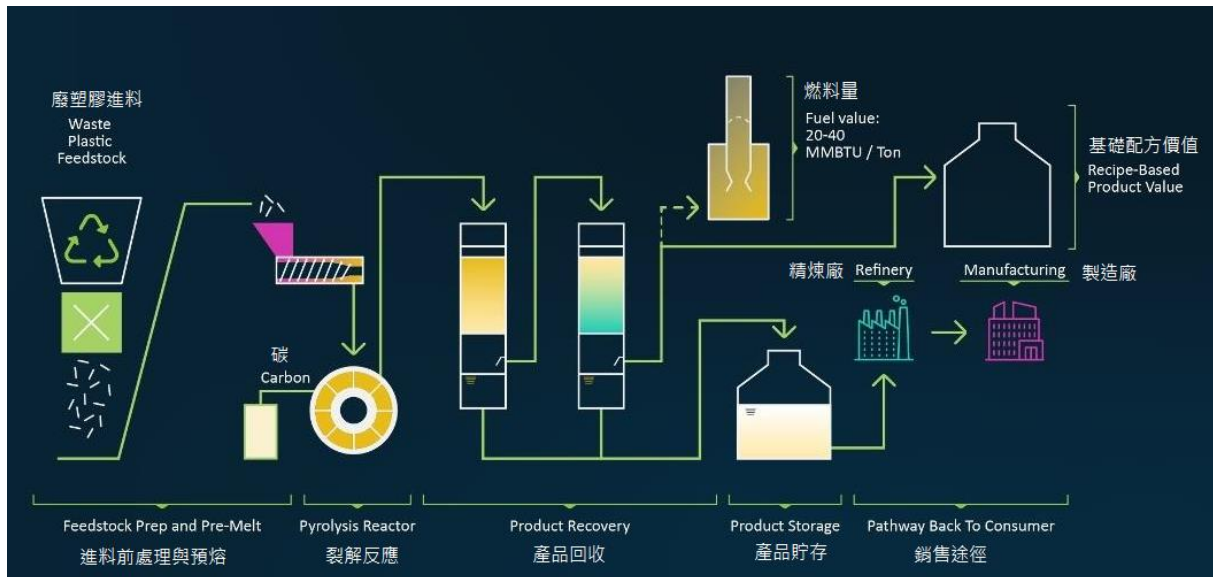
在 SORPLAST™技術中將阻燃劑的使用降到最低所帶來的優勢，不僅限於回收材料含量能達到突破性的層次。傳統的阻燃劑往往會使塑膠的原始特性減弱，因此減少傳統阻燃劑表示 SORPLAST™技術可以回收數次而只損失些許性能。此外，它是高品質的塑膠，並在所有阻燃的聚碳酸酯塑膠中，具有最高層次的耐用性。同時也能維持外觀的質感，不需額外的鍍膜來增加色彩或光澤。

## 2. Agilyx 技術(日本 Toyo Styrene 公司)

日本聚苯乙烯(PS)樹脂大廠 Toyo Styrene 公司規劃，利用食品容器等含 PS 之廢塑膠，以化學處理再度製成 PS 樹脂。Toyo Styrene 公司計畫導入美國 PS 樹脂化學回收設備商 Agilyx 的技術，並於千葉縣新設年產能 3,000 公噸的工廠，預估相關總投資額約十幾億日圓，2021 年底前完工啟用。

此技術係將食品容器等廢棄 PS 樹脂投入熱分解設備，以 400~600℃的高溫氣化，急速冷卻使其變成液體，再利用精製設備去除不純物質後，以回收苯乙烯(Styrene)單體。由於混合、附著食品或其他樹脂的情況下亦能直接投入分解設備中，因此 PS 樹脂能以高回收率回復到苯乙烯單體。製程流程如圖 3.4-3 所示。

另一方面，Toyo Styrene 公司計畫以製造食品容器工廠所產生廢塑膠為中心，搭配超市等零售通路著手進行塑膠回收。利用化學回收設備取得的苯乙烯單體，再與初始原料(Virgin Material)混合後再製成「Refresh PS Resin」，再製為食品容器等，此回收為日本國內化學企業的首例。



資料來源：Global Chemicals Conference, 2021.05

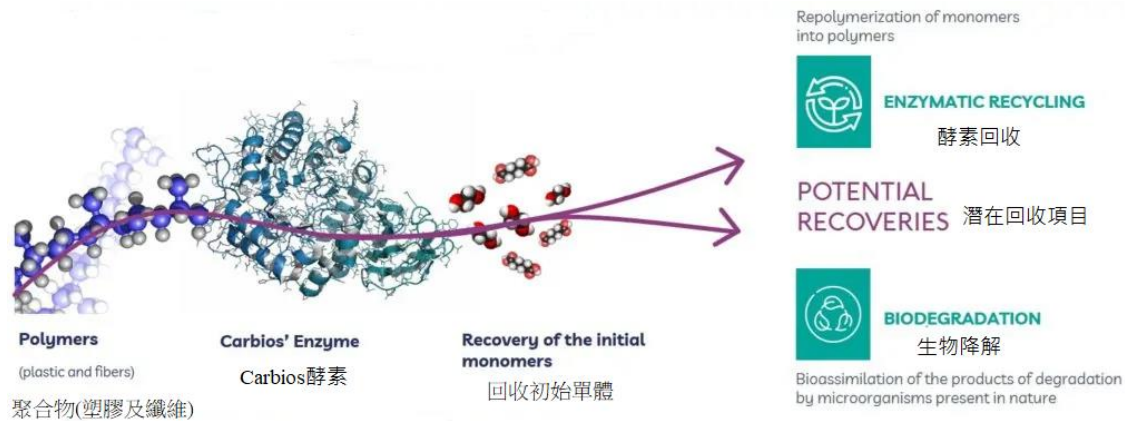
圖 3.4-3 Agilyx 技術製程流程圖

### 3. 酵素降解回收技術(法國 Carbios 公司)

Carbios 公司開發酵素回收技術，可將 PET 內含不同塑膠或紡織品進行解聚。目前因機械回收技術仍存在侷限性，只有透明塑膠才能在閉環中回收，每個循環都有質量損失，難以 100% 回收 PET。因此，複雜且髒污的塑膠較不易進入回收體系。

Carbios 公司開發的創新技術允許對所有類型的廢 PET 進行回收，並生產可 100% 回收和 PET 產品，而不會降低品質。目前仍於模廠階段，Carbios 公司的技術將廢 PET 塑膠和聚酯紡織廢料解聚獲得的單體，已生產第一批透明 PET 瓶。該示範工廠已於 2021 年 9 月啟動，預估年產量約 5~10 萬公噸，其製程流程如圖 3.4-4 所示。該示範工廠位於法國的 Clermont-Ferrand，用以驗證新開發的酵素回收 PET 技術，並評估環境、經濟效益及回收率等。目前除 PET 的解聚酵素開發外，尚有聚醯胺(PA6、PA6.6 等)、聚烯烴(PE、PP 等)、彈性體(天然橡膠等)及 PLA 等均納入試驗中。





資料來源：Carbios 網站，<https://www.carbios.com/en/enzymes/>

圖 3.4-4 聚合物經酵素降解流程圖

Carbios 公司業務發展模式係讓所有行業參與者（收集者、生產者、加工者、用戶和消費者），都能參與到真正的循環經濟商業模式的永續轉型。其商業模式如圖 3.4-5 所示：

- 提供專業技術和知識財產權的授權；
- 直接與 Carbios 公司創新相關行業製造商或通過 Carbios 公司可能關聯的合資企業，進行酵素銷售業務。



資料來源：Carbios 官方網站，<https://www.carbios.com/en/business-development-model/>圖

3.4-5 Carbios 公司針對廢 PET 的價值鏈整合循環經濟商業模式

### 3.5 廢塑膠高值化及資源循環技術評析彙整

本章節所蒐集彙整之國外廢塑膠資源循環技術，其相關技術評析彙整如表 3.5-1 所示。

表 3.5-1 廢塑膠高值化及資源循環技術彙整

技術類別	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	技術來源	技術整備度 (TRL)	網頁連結/資料來源
溶劑純化法	磁性催化劑智慧材料回收技術	採用磁性顆粒流體的催化劑及採用催化劑在溶劑中將聚合物降解成低聚物和單體的方法。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使選擇性和轉化率大幅提高。</li> <li>● 適用 PET</li> </ul>	荷蘭 Ioniqa Technologies	7	<a href="https://ioniqa.com/">https://ioniqa.com/</a>
	無負擔反應條件及溶劑輔助專利技術	可在一般環境條件下將 PET 與非極性溶劑、氫氧化物及醇混合。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供可於一般環境溫度上下解聚 PET</li> </ul>	加拿大 Loop Industries	6	<a href="https://www.loopindustries.com/en">https://www.loopindustries.com/en</a>
	PolyStyreneLoop 專案計畫	添加一種化學藥劑，將 PS 轉化為凝膠，而添加劑與 HBCD 則存留於剩餘液體內，再進行固液分離。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 碳足跡幾乎為焚化處理的一半</li> <li>● 可有效回收阻燃劑內聚苯乙烯</li> </ul>	德國 Fraunhofer IVV 與 CreaCycle GmbH	7	<a href="https://www.creacycle.de/en/the-process.html">https://www.creacycle.de/en/the-process.html</a>
化學解聚法	VolCat 新型塑膠回收技術	可以選擇性地將最常見的家用塑膠-聚對苯二甲酸乙二酯 (PET) 分解為單體成分，純化後的單體可以很容易地重新聚合成為 PET。	具有快速、高選擇率、低溫處理以及催化劑易回收	美國 IBM	6	<a href="https://research.ibm.com/">https://research.ibm.com/</a>
	碳再生技術及聚酯再生技術	透過甲醇分解技術將廢塑膠及聚酯產品分	<ul style="list-style-type: none"> <li>● CRT 技術可將合成氣溫室氣體排</li> </ul>	美國 Eastman	8	<a href="https://www.eastman.com/">https://www.eastman.com/</a>



技術類別	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	技術來源	技術整備度 (TRL)	網頁連結/資料來源
		解為聚合單體，再單體可以重新引入到新的聚合產品中，形成閉環迴路再利用	放量降低 20% 至 50% ● PRT 可將生產中間體 DMT 和 EG 的平均溫室氣體排放量減少 20%~30%。			
	BRING Technology™	醇解法回收技術，允許將廢 PET 瓶作為新的 PET 瓶進行回收。	● 可去除雜質，允許廢 PET 瓶到 PET 瓶製造的重複循環。 ● PET 塑膠瓶的碳排放量可減少約 47%。	日本 JEPLAN	9	<a href="https://www.jeplan.co.jp/sustainability/">https://www.jeplan.co.jp/sustainability/</a>
	ReNEW™專利技術	將廢 PET 塑膠瓶解聚為可持續的單體，再生產相關 PET 產品。	● 使用單乙二醇，且不添加任何外來的化學物質或雜質(如催化劑) ● 回收 DTY 相關環境足跡接較原生 DTY 低，尤其在水資源衝擊面向。	英國 PerPETual	9	<a href="https://www.perpetual-global.com/">https://www.perpetual-global.com/</a>
	DEMETO 計畫	將研磨後之廢料，搭配微波進行解聚反應後，將單體與混合物	● 採用微波輻射作為高能催化劑，夠減少反應時間和	瑞士 gr3n	6	<a href="https://gr3n-recycling.com/technology.html">https://gr3n-recycling.com/technology.html</a>

技術類別	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	技術來源	技術整備度 (TRL)	網頁連結/資料來源
		進行純化，以得到高純度知單體聚合物。	PTA 純化步驟的複雜性。			
	ECONYL® Regeneration System 技術	將漁網清洗分類並將其粗破碎成小塊，同時在大型反應桶槽內進行化學回收製程，最終將再生粒子重新進行紡絲形成全新的尼龍纖維。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 結合單體提純與再聚合技術，故所得之尼龍分子量與強度則與新材料無異。</li> <li>● 碳足跡下降 72%。</li> </ul>	義大利 Aquafil	9	<a href="https://www.aquafil.com/sustainability/econyl/">https://www.aquafil.com/sustainability/econyl/</a>
	regen®技術	將廢料經粉碎、融化、押出、冷卻後，再製成尼龍絲。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 世界首個環保型資源循環再生尼龍 "MIPAN regen"。</li> </ul>	韓國 Hyosung	9	<a href="http://www.hyosungtn.com/">http://www.hyosungtn.com/</a>
	Sorona®技術	將廢棄地毯切碎、研磨，加水及觸媒，控制溫度在 300°C 進行氨解而成。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可以得到 98.5% 高純度己內醯胺單體。</li> </ul>	美國杜邦	9	<a href="http://sorona.dupont.cn/">http://sorona.dupont.cn/</a>
	RENU®技術	將廢棄纖維作為原料，通過分解、再聚合等化學程序進行再生。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 閉環循環再利用</li> <li>● 鼓勵各方積極參與回收計畫，成為品牌價值的一部分。</li> </ul>	日本 ITOCHU	9	<a href="https://renu-project.com/zh/renu-material">https://renu-project.com/zh/renu-material</a>
熱能解聚法	ResolVe 計畫	由熱裂解製程將 PS 回收料分解成苯乙烯油，經蒸餾及聚合製	回收料品質可達到新料的等級，特別是可應用於食品包裝	德國 Ineos Styrolution	7	<a href="https://www.ineos.com">https://www.ineos.com</a>

技術類別	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	技術來源	技術整備度 (TRL)	網頁連結/資料來源
		程而得。	等級。			
	微波熱處理技術	去除雜質，進入反應氣後，經微波聚合產生單體。	能量相較前從化石原料製造苯乙烯單體的製程降低約 15 倍。	加拿大 Pyrowave	7	<a href="https://www.pyrowave.com/">https://www.pyrowave.com/</a>
	polynSPIRE 計畫	1.將廢塑膠進行排序後，將 PA/PU 經由化學法回收及微波技術，將聚合物分解成單體與副產物。 2.以智能磁性材料作為催化劑，以提高該製程效率。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 製造聚醯胺所使用化石燃料減少 34%</li> <li>● 製造聚氨酯所使用化石燃料減少 32%。</li> </ul>	歐盟	6	<a href="https://www.polynspire.eu/solution">https://www.polynspire.eu/solution</a>
其他技術	SORPLAST™ 技術	以混合再生塑膠和光碟等廢塑膠製成，並含有 Sony 公司開發的阻燃劑	以硫為主的阻燃劑，使塑膠可使用的回收材料含量高達 99%	日本 Sony	9	<a href="https://www.sony.com.tw/">https://www.sony.com.tw/</a>
	Agilyx 技術	廢 PS 樹脂投入熱分解設備，以 400~600 °C 高溫氣化，急速冷卻變成液體，經純化後回收苯乙烯單體。	回收苯乙烯單體則會與初始原料混合後再製成產品，主要供應作為食品容器。	美國 Agilyx 日本 Toyo Styrene(技術轉移)	9	<a href="https://www.agilyx.com/">https://www.agilyx.com/</a>
	酵素降解回收技術	酵素回收技術，能夠 PET 內含不同塑膠或紡織品進行解聚。	可 100% 回收和 PET 產品，而不會降低品質。	法國 Carbios	6	<a href="https://www.carbios.com/en">https://www.carbios.com/en</a>

## 四、廢鋰電池回收及資源循環技術案例

傳統之廢棄鋰離子電池(以下簡稱鋰電池)回收技術包含火法冶金技術及濕法冶金技術，其收入來源主要關鍵為鈷的回收；然而因為鈷的缺乏，使電池設計廠商對於鈷在鋰電池正極(陰極)配方中的使用正在迅速減少，無形中降低回收的經濟性。故近期許多機構紛紛投入開發新技術，如正極直接循環技術(Direct-cathode Recycling)，直接回收保留正極的晶體結構再生成正極活性顆粒以恢復其電化學性能，而不是將其分解為組成元素，故面對鈷含量較低或不含鈷成分之廢棄鋰電池回收，此方式將可提升其經濟可行性。

隨著電動車快速普及，未來勢必會衍生大量的廢電動車電池，故電動車電池的回收處理必將成為全球須面對的一大課題。目前電動車所使用的電池中，主要是以鋰電池為主，主流商用汽車鋰電池根據正極材料的不同，可分為以磷酸鐵鋰為主的鋰鐵電池與以鎳鈷錳酸鋰為主的三元鋰電池兩大類。

廢棄鋰鐵電池與三元鋰電池中之外觀形式、正/負極金屬含量、三成分(水分、灰分、可燃分)等各不相同，依文獻資料顯示，三元系鋰電池內部構造之情形、正極與負極之外觀，如圖 4-1 所示。以及鋰鐵電池與三元鋰電池中正/負極材料之鋰、鋁、鐵、銅、鈷、鎳、錳金屬全含量分析結果，如表 4-1 所示。另鋰鐵電池含正/負極內含物之三成份分析結果，以及三元鋰電池之組成重量分析結果，如表 4.1-2 所示。由上述之實測結果可知，鋰鐵電池與三元鋰電池中確實含有大量之有價金屬，極具回收再利用價值。



三元系鋰電池內部構造之情形



三元鋰電池之正極外觀



三元鋰電池之負極外觀

資料來源：李清華等，大葉大學環境工程學系，廢車用鋰電池之回收處理，2018 年 12 月，本計畫彙整。

圖 4-1 三元系鋰電池內部構造

表 4-1 鋰鐵電池正/負極材料全含量分析結果

項目	正/負極材料全含量分析結果						
鋰鐵電池	材料種類	金屬全含量					
		Li(mg/kg)	Al(mg/kg)	Fe(mg/kg)	Cu(mg/kg)		
	正極	22,175	98,666	191,000	—		
	負極	—	—	—	102,500		
三元鋰電池	材料種類	金屬全含量					
		Li (mg/kg)	Al (mg/kg)	Co (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
	正極	42,333	107,166	203,691	250,025	134,216	—
	負極	—	—	—	—	—	264,666

資料來源：李清華等，大葉大學環境工程學系，廢車用鋰電池之回收處理，2018 年 12 月，本計畫彙整。

表 4-2 三元鋰電池之組成重量分析結果

項目	組成重量分析結果			
鋰鐵電池	樣品種類	水分(%)	灰分(%)	可燃分(%)
	廢鋰鐵電池 內含物	11.90	64.68	23.42
三元鋰電池	組成種類	重量(g)		重量百分比(%)
	金屬外殼	4.712		11.5
	正極	9.780		23.9
	負極	7.445		18.2
	隔離膜	13.172		32.2

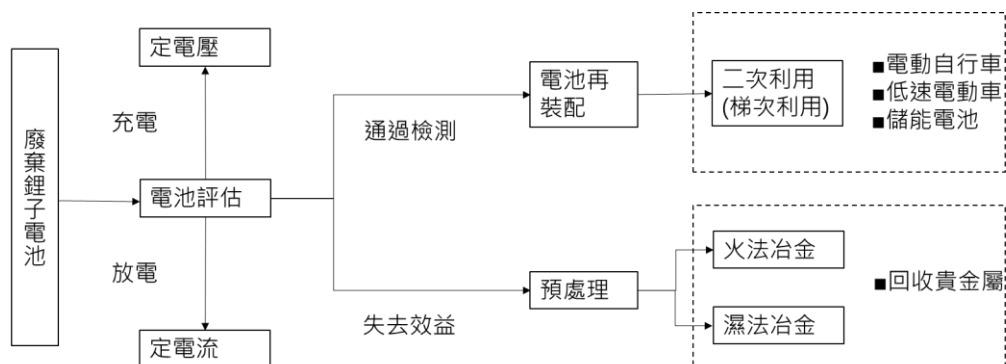
資料來源：李清華等，大葉大學環境工程學系，廢車用鋰電池之回收處理，2018 年 12 月，本計畫彙整。

鋰電池是由正負極片、粘結劑、電解液和隔膜等組成。電池產業主要使用鈷酸鋰、錳酸鋰、鎳鈷錳酸鋰三元材料和磷酸亞鐵鋰等作為鋰電池的正極材料，以天然石墨和人造石墨作為負極活性物質。聚偏二氟乙稀(PVDF)是一種廣泛使用的正極粘結劑，具有良好的化學穩定性和物理性能。工業生產的鋰電池主要採用電解質六氟磷酸鋰( $\text{LiPF}_6$ )和有機溶劑配置的溶液作為電解液，利用有機膜，如多孔狀的聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)等聚合物作為電池的隔膜。鋰電池被普遍認為是環保無污染的綠色電池，但回收處理不完善仍然會產生污染。鋰電池雖然不含汞、鎘、鉛等有毒重金屬，但電池的正負極材料、電解液等對環境和人體的影響較大。如果採用一般處理方法處理鋰電池(如掩埋、焚化等)，電池中的鈷、鎳、鋰、錳等金屬，以及各類有機、無機化合物將造成金屬污染、有機物污染、粉塵污染、酸鹼污染等環境影響。鋰電解質機轉化物，如  $\text{LiPF}_6$ 、六氟合砷酸鋰( $\text{LiAsF}_6$ )、三氟甲磺酸鋰( $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ )、氫氟酸(HF)等，溶劑和水解產物如乙二醇二甲醚(DME)、甲醇、甲酸等都是可能造成環境有害之物質。因此，廢鋰電池需要經過改善回收處理，減少對自然環境和人類身體健康的危害。

對於廢棄的鋰電池首先會先對其進行充放電試驗，利用一般針對鋰電池常用的定電流轉定電壓的方式來充電，再利用定電流的方式來放電以避

免大電流的充電而對電池造成損害。若電池的整體狀況良好，除了可對其重新組裝電池，來作為置換電池使用之外，也可以透過儲能系統使電網負荷低的時候儲能，並在高負荷的時候輸出能量來填補空缺，以減輕電網波動。

對於失去效益的電池則以預處理等物理、化學拆卸再經由火法冶金、濕法冶金等方式來回收鋰、鈷、鎳等金屬，使資源有效循環再利用，其鋰電池再利用模式如圖 4-2 所示。



資料來源：張添晉、洪毅翔，臺北科技大學環境工程與管理研究所，鋰離子電池高值化循環利用技術，2018 年。

圖 4-2 鋰電池再利用模式

廢鋰電池的回收處理過程主要包括預處理、二次處理和深度處理。由於廢電池中仍殘留部分電量，所以預處理過程包括深度放電過程、破碎、物理分選；二次處理將正負極活性材料與基底的完全分離，常用熱處理法、有機溶劑溶解法、鹼液溶解法以及電解法等進行分離；深度處理主要包括浸出和分離提純等過程，提取出有價值的金屬材料。按提取技術分類，可分為四種方式，分別為機械處理技術、火法冶金技術及濕法冶金技術組合、濕法冶金技術、高效率回收技術(包含濕法冶金技術及直接循環技術、高效率鋰離子電池回收技術、正極材料再生技術)，並輔以再利用技術取得塑膠與金屬等物質，依欲資源化之材料與廢棄物後續處置方式搭配選用技術。其相關資源循環技術及案例說明如后：

## 4.1 機械處理技術案例













目前國內外廢鋰電池處理方式都須先經前處理(Pretreatment)，包括分選、放電、破裂、剝殼等程序。機械處理技術是將廢鋰電池採破碎或熱刀等物理方式進行預處理，後續搭配磁性分離、真空乾燥分離、濕法冶金、火法冶金或化學處理等技術獲得金屬與塑膠等資源。

### 1. 德國福斯汽車公司機械處理技術

德國福斯汽車公司(Volkswagen)位於薩爾茨吉特(Salzgitter)的汽車動力電池回收試驗工廠於2021年1月正式啟用。該工廠設備由URT Umwelt公司設計及建造。此回收廠的目標是打造原材料回收閉環管理體系，對鋰、鎳、錳、鈷、鋁、銅及塑料等有價值的電池原材料進行回收，目標為回收電池中95%的原材料。工廠初期規劃是每年回收3,600個電池系統，相當於近1,500公噸。未來隨著回收管理流程的不斷優化，工廠將進一步擴大產能以處理大量的電池回收需求。

廢電池回收前先檢查電池系統是否仍然處於良好之狀態，評估是否有再使用之機會；廢電池先經深度放電後再進行拆解，其中鋁套管、銅纜、鋼材及塑料等材料由此回收並返回到生產循環中。而電池模塊在惰性條件(如:氮氣)中粉碎，以防止在切碎電池時可能發生的放熱反應，粉碎後包含顆粒及液體電解質等液體，送進真空乾燥器蒸發，然後電解質再次冷凝並以液體形式貯存，前述從粉碎到乾燥，均維持在惰性狀態。最後，透過篩分、磁選機及分離機將乾燥的黑色粉末活性材料(含有鋰、鎳、錳、鈷及石墨)、鋁、銅及塑料等原材料分離。黑色粉末再透過合作夥伴之濕法冶金技術，以化學法將不同原材料分離處理。該公司處理設備及流程說明如圖4.1-1所示。



		
鋰電池回收試驗廠	1.檢查：電池完全放電回收能量並消除風險。若狀況良好，則再使用。	
		
2.拆解：電池系統與所有附加部件斷開連接，並拆卸成各自的模塊。此步驟可回收鋁套管、銅纜、鋼材及塑料等。		3.粉碎：機械粉碎機將電池模塊加工成顆粒。
		
4.烘乾：乾燥顆粒。此步驟可回收電解質。	5.篩分：將有價值的電池材料-黑色粉末（鋰、鎳、錳、鈷及石墨）與其他原材料分離。此步驟可回收黑色粉末。	
		
6.磁選：磁選機收集磁性原料。此步驟可回收鐵。	7.分離：將殘留的非磁性金屬與塑料顆粒分離。回收鋁、銅及塑料。	成品示意： (1)黑色粉末 (2)鋁及銅 (3)塑料

資料來源：Volkswagen 公司官網，本計畫彙整

圖 4.1-1 Volkswagen 之廢棄車用鋰電池回收設備及流程說明

該公司表明，以回收舊電池的核心組件來生產新的正極材料，與原生新材料具有同等的效能；且依據該公司計算，若電池的正極材料由再生原料製成，且電池的生產製造過程中使用綠電，則每62 kWh電池組可減少

約1.3公噸的二氧化碳排放。福斯汽車電池回收試驗工廠基本資料說明如表4.1-1所示。

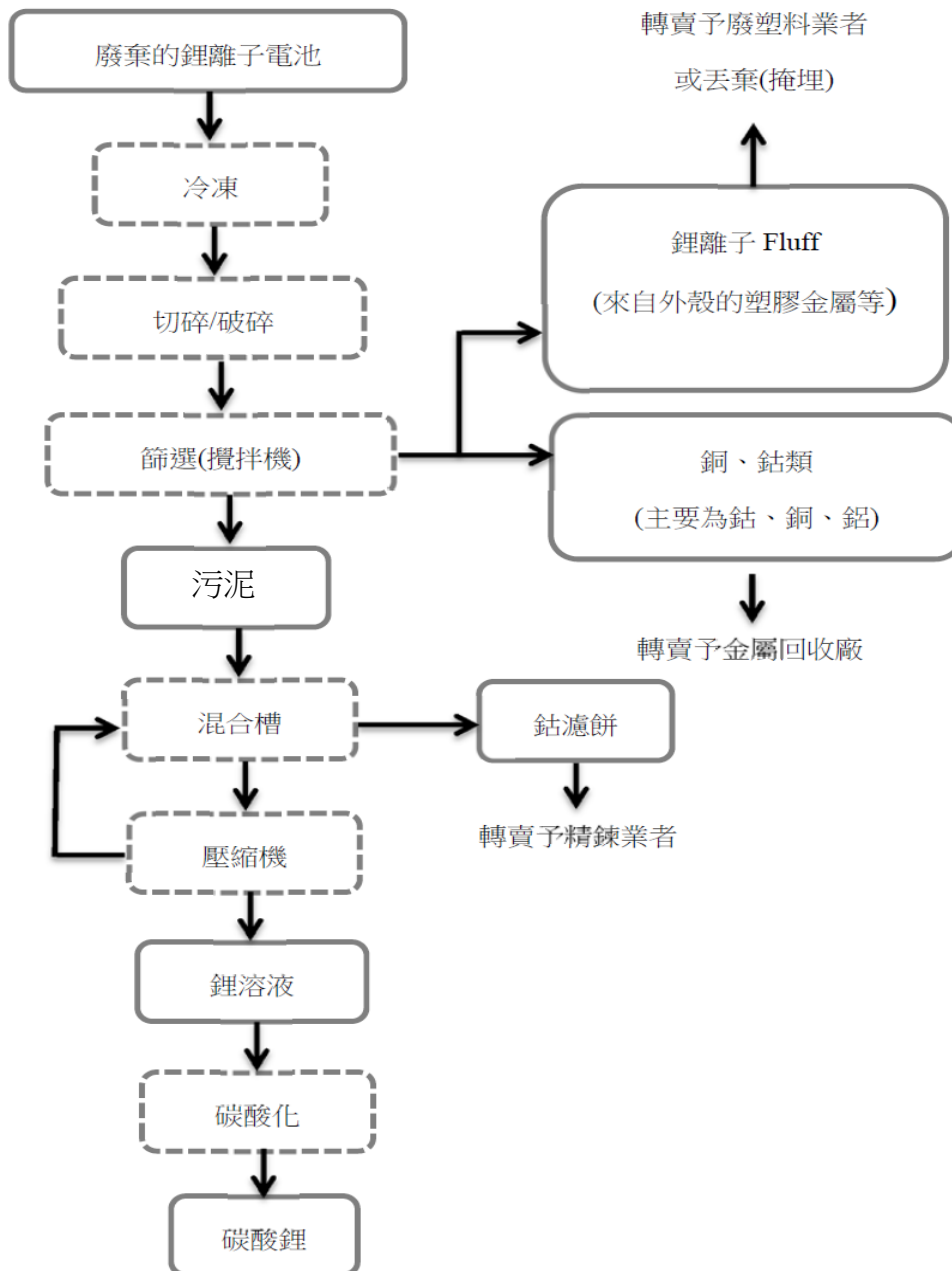
表 4.1-1 Volkswagen 電池回收試驗工廠基本資料

項目	內容
工廠規模	350m <sup>2</sup> 廠房及 300 m <sup>2</sup> 拆解區
年處理容量	3,600 個電池 × 400 公斤/電池(1,440 公噸)
日處理容量	每班 5 個電池系統
回收電池型態	基於模組化電動驅動工具(Modular Electric Toolkit, 德語縮寫 MEB)和高級電動車平台(Premium Platform Electric, PPE)之電驅動矩陣的車型及插電式混合動力車的鋰電池。
回收物成分	黑色粉末(含鋰、鎳、鈷、錳和石墨)、鋁、銅、塑料、鋼材等
設備製造商	URT GmbH

資料來源：Volkswagen 公司官網

## 2.美國托斯寇公司(Toxco Inc.公司)破碎篩選與濕法技術

美國Toxco Inc.公司之廢鋰電池回收處理的流程如圖4.1-2所示，其處理方式如下：將回收的廢鋰電池集中保管於水泥隔間地下儲藏室，對於大型、具高反應性的電池，需先去除其殘留的電量，必要時使用Toxco專利之極低溫程序，亦即將廢鋰電池冷凍於-325°F(約-198°C)的極低溫，可以有效降低其活性。隨後進行切斷、破碎後，一面噴霧灑水、一面攪拌，分離出塑膠與金屬混合物的外殼，與含銅、鈷、鋁等廢料，以及污泥。其中含金屬的外殼與銅、鈷、鋁等廢料可轉賣予金屬回收冶煉廠。而污泥則放入壓濾機中，經壓濾程序後，可獲得主成份為鈷與碳的濾餅，可轉售予金屬回收冶煉廠，另含鋰的濾液經碳酸化成為碳酸鋰再出售，而有害電解液需經中和，將其轉化為穩定的化合物。最後塑膠類或其他材料，則進行適當的回收或廢棄。



資料來源：李守仁、白立文，車用鋰離子電池的回收技術(下)，2018年9月8日，材料世界網。<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=23863>。

圖 4.1-2 美國 Toxco Inc.公司之廢鋰電池回收處理流程

### 3. 日本太平洋水泥公司與松田產業機械破碎與焙燒處理

日本太平洋水泥公司與松田產業共同開發廢棄鋰離子電池(LiB)回收處理，主要是先將廢電池予以解體，並分類成電子零組件、塑膠等，並利

用水泥廠的熱源，以300~500℃的溫度進行焙燒，讓電解液揮發之後再破碎及分類，回收稀有金屬。含有氟或硫黃等的焙燒排氣則可由水泥調合原料的鈣進行吸附，因此可以便宜的價格予以處理。目前焙燒工程可處理多種品牌的廢棄電池，一天最大處理量可達3.2公噸，可回收的有價金屬中，框體或集電體、電極箔等約占整體的30~50%。此外，除了銅、鋁的回收之外，也同時進行鎳或鋰、鈷等微量金屬的回收。處理裝置如圖4.1-3所示。



資料來源：材料世界網網站，<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=34252>。

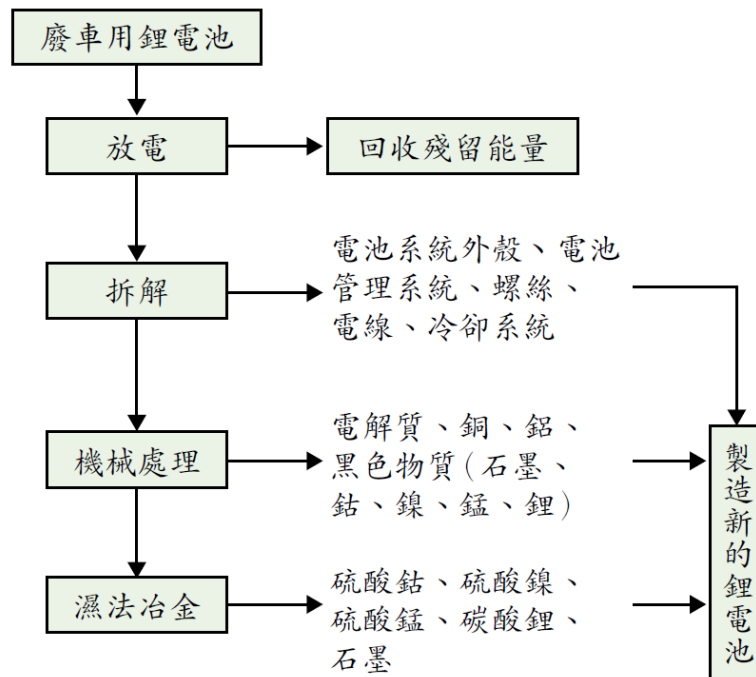
**圖 4.1-3 日本太平洋水泥公司焙燒與分選回收處理裝置**

#### 4.德國 Duesenfeld 公司機械破碎與濕法冶金技術

德國Duesenfeld公司之廢鋰電池回收流程如圖4.1-4所示，該回收流程首先會將廢鋰電池進行放電回收電池中之剩餘能量，之後再進行拆解，然後透過機械與濕法冶金技術，分別回收處理電池中之石墨、電解質與鋁、鐵、銅、鈷、鎳、錳等有價金屬。

德國Duesenfeld公司技術可以回收大量有價金屬，這些回收金屬可以作為二次材料循環再利用，且此回收方法的材料回收率是傳統方法的二倍，另在機械回收處理過程當中，該公司可達成72%的資源回收率，若再

經過濕法冶金的回收過程，回收率更可高達91%。



資料來源：德國 Duesenfeld 鋰電池回收公司官網，

[https://www.duesenfeld.com/index\\_de.html](https://www.duesenfeld.com/index_de.html)

圖 4.1-4 德國 Duesenfeld 公司之鋰電池回收流程

## 4.2 火法冶金技術及濕法冶金技術組合技術案例

火法冶金是在高溫下從冶金原料提取或精煉金屬的科學和技術，利用高溫將礦石或精礦經過一系列的物理化學變化過程，使其中的金屬與脈石或其他雜質分離，而得到金屬的冶金方法。簡言之，所有在高溫下進行的冶金過程都屬於火法冶金。包括焙燒（或燒結焙燒）、熔煉、吹煉、蒸餾與精餾、火法精煉、熔鹽電解等過程。對於不同的金屬，火法冶金由不同的幾個冶金過程組成。例如，鉛在火法冶金是將鉛精礦依次經過燒結焙燒、熔煉、火法精煉，取得金屬鉛；銅的火法冶金是將銅精礦依次經過燒結焙燒、熔煉（或者直接從精礦到熔煉）、吹煉、火法精煉，取得金屬銅。對某些金屬的冶煉，亦可採一般火法冶金和濕法冶金係聯合使用。



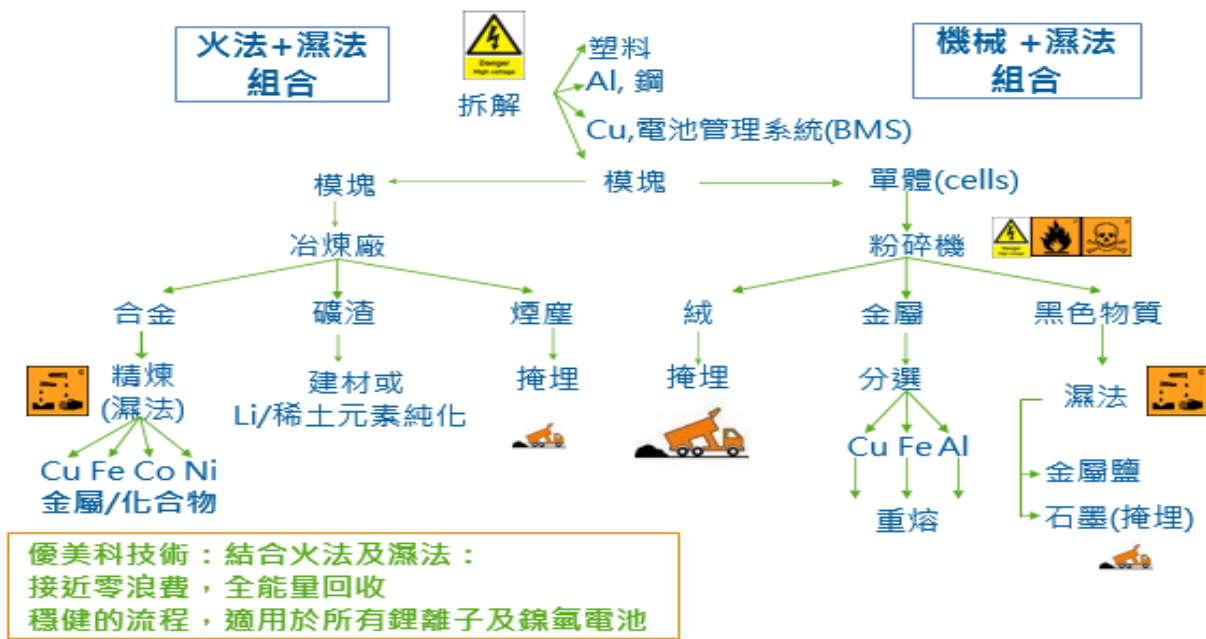
火法冶金技術及濕法冶金技術組合技術具有原料適應性強，金屬回收率高，作業效率佳。相關資源循環技術及案例說明如后：

#### 1. 比利時優美科(Umicore)公司火法冶金技術及濕法冶金技術組合

比利時優美科公司自 2006 年以來，提供含鋰離子(Li-ion)、鋰聚合物和鎳氫電池(NiMH)回收服務。據該公司宣稱可處理任何類型尺寸之鋰電池和鎳氫電池，並從這些電池中回收有價值的金屬，轉化為活性正極材料，再利用於生產新的電池。

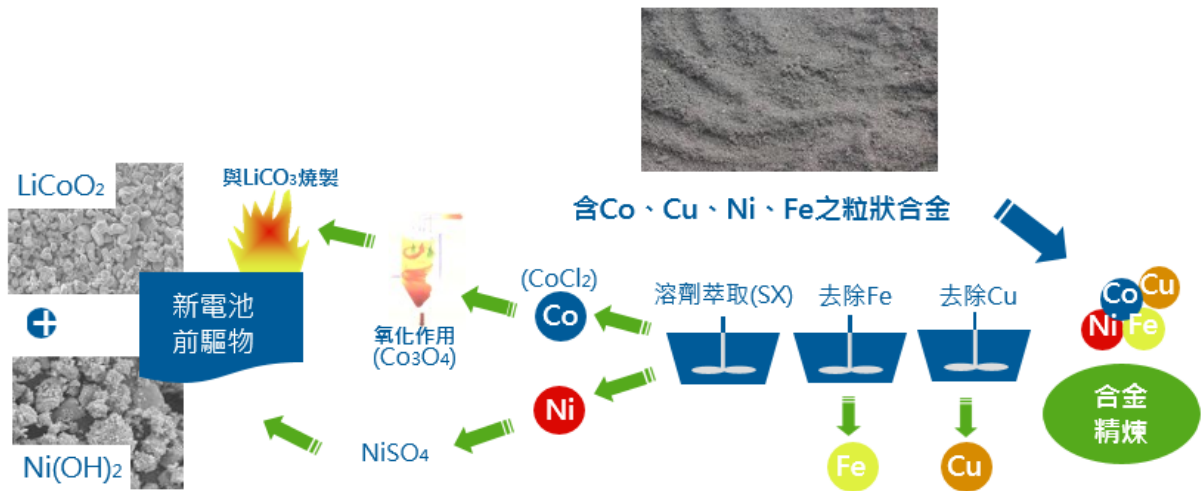
Umicore 最初開發 UHT 技術(Ultra High Temperature Technology)應用在銅或其他金屬精煉及廢鋰電池處理，經由火法冶金技術分別產出合金及礦渣。合金部分繼續提純至個別元素如鈷、鎳、銅，並再重製為正極材料，礦渣可用於建築材料或進一步透過與外部合作夥伴回收金屬鋰。另外經過 UHT 技術獨特的廢氣處理流程，從煙道中排氣符合標準。該公司目前產能為每年 7,000 公噸，並宣稱建置在比利時霍博肯(Hoboken)的 UHT 爐是全球最大的鋰電池和鎳氫電池回收設備。

為回收電動汽車大型電池組，Umicore 營運包含專門的拆解廠，將欲回收之電池組拆解到模塊或電池級，然後再由 UHT 爐進行處理。近期 Umicore 進一步結合濕法及火法之製程如圖 4.2-1 及圖 4.2-2 所示，回收產物為鋰、鈷、銅、鎳元素態或合金態，其中自礦渣提煉出鋰，另外粒狀合金則利用濕法進行元素分離，後段再透過火法製程產製出可應用於新電池材料之  $\text{LiCoO}_2$  及  $\text{Ni(OH)}_2$ 。Umicore 電池回收製程設備如圖 4.2-3 所示。2018 年 Umicore 與歐洲車廠奧迪合作開發電池閉環回收系統，在實驗室測試中，超過 95% 的電池材料可以被回收及再利用，特別是針對具有價值的金屬鈷、鎳、銅，將再生資源提升可用的純度並導入新的動力電池中。



資料來源：Umicore 公司官網

圖 4.2-1 Umicore 濕法及火法組合流程示意圖



資料來源：Umicore 公司官網

圖 4.2-2 Umicore 合金精煉流程示意圖



資料來源：Umicore, The recycling efficiency of li-ion ev-batteries, 2013.

**圖 4.2-3 Umicore 電池回收製程設備**

## 2. 美國 Redwood Materials 公司火法冶金技術及濕法冶金技術組合

Redwood Materials 公司於2019年創辦，致力於研發動力電池的回收再利用技術。火法冶金技術及濕法冶金技術組合方案，先利用電池殘餘電量驅動轉化器產生高溫，再用火法技術分離電池金屬，最後用濕法技術回收提純各類金屬原材料。回收可產出鎳、鈷、銅、鋁及80%以上的鋰，這些材料可作為原料製成碳酸鋰、硫酸鈷、硫酸鎳等產品後，又可以用來製造新的動力電池。美國 Redwood Materials 公司電池回收處理設備如圖4.2-4所示。

Redwood Materials 公司不只回收廢電池，也回收處理特斯拉汽車公司在內華達州超級電池工廠產線的不良品，每天接收處理60公噸左右的報廢動力電池，回收利用的碳酸鋰、硫酸鈷、硫酸鎳等材料，會包裝入桶，賣給松下等電池製造商。





資料來源：新聞百分百網站，本計畫整理。https://www.newsfb.com/hot/45090.html

圖 4.2-4 美國 Redwood Materials 公司電池回收處理設備圖

### 4.3 濕法冶金技術案例

濕法冶金資源化技術是將廢電池破碎後溶解，然後利用合適的化學試劑，使稀貴金屬廢棄物中之目標金屬氧化成離子，浸漬溶解於浸漬溶液中，再經電解、置換、沉澱、晶析等步驟，選擇性分離浸出溶液中的金屬元素，產出高品位的鈷金屬或碳酸鋰等，直接進行回收。濕法回收處理比較適合回收化學組成相對單一的廢舊鋰電池，其設備投資成本較低，適合中小規模廢鋰電池的回收，因此，該方法目前使用也比較廣泛。相關資源循環技術及案例說明如后：

#### 1. 日本礦業金屬公司 JX 濕法冶金技術

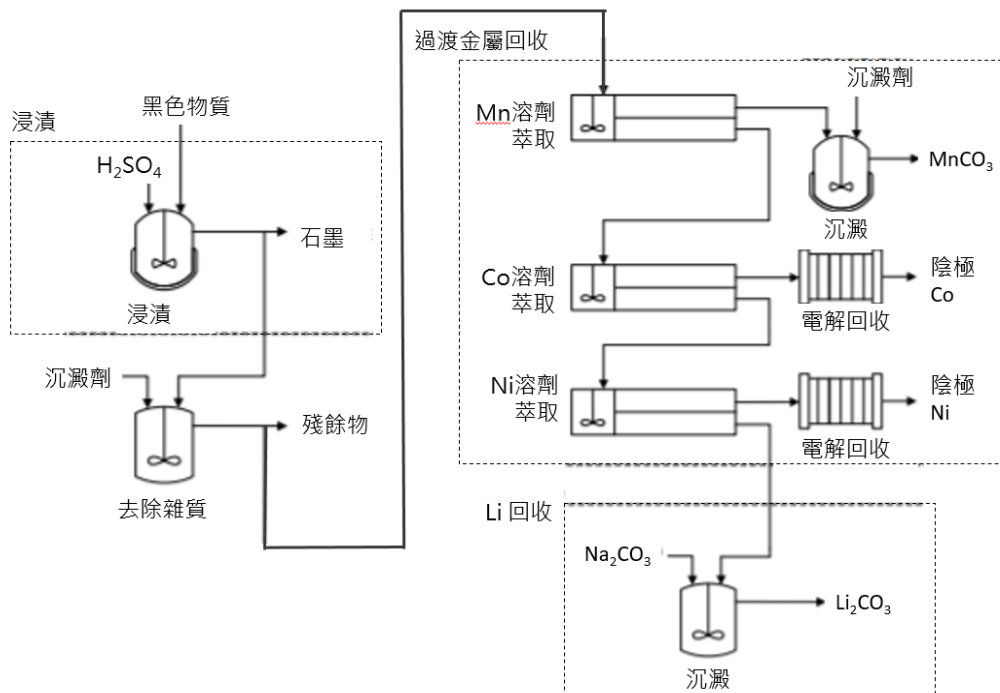
日本礦業金屬公司(JX)於 2012 年開發廢手機及廢汽車鋰電池中的鈷、鎳、錳、鋰進行提取分離技術。相較於傳統的濕法處理，JX 開發的溶劑萃取技術可提供更高純度(純度 99.95%)的金屬鈷和鎳外，還可回收錳(碳酸錳)和鋰(碳酸鋰)。

圖 4.3-1 為 JX 日礦公司的回收程序示意圖，電動車廢鋰電池、鋰電池製造過程廢材料或廢棄消費性電子產品電池送至 JX 日礦公司後，進行拆解、破碎及分離。正極的部分以濕法提取，流程如圖 4.3-2 所示，步驟包含浸漬、沉澱、溶劑萃取和電解回收，金屬在  $\text{H}_2\text{SO}_4$  中浸出，透過沉澱去除如鋁、銅及鐵等雜質；之後將純化的浸出液送入溶劑萃取迴路，分別回收各種金屬。首先，以二-(2-乙基己基)磷酸(DEHPA)萃取並沉澱碳酸錳( $\text{MnCO}_3$ )，之後使用二烷基次磷酸進行鈷萃取，使用羧酸進行鎳萃取，鈷和鎳透過電解作為純金屬回收，最後鋰以碳酸鋰( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )的形式析出。



資料來源：吳笙卉等，鋰電池循環經濟(上)，工業材料，2020 年 4 月

圖 4.3-1 JX 日礦公司廢鋰電池回收程序示意圖



資料來源：Lisa Brückner et al., Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes, metals, 2020.

圖 4.3-2 JX 日礦公司正極材料回收流程示意簡圖

上述流程之酸浸出及移除雜質步驟後的浸出率及濃度顯示如表 4.3-1。鈷和鋰的浸出率為 90% 以上，而刻意殘留鋁(濃度 400 mg/L)主要是為提升鈷浸出率，於後續溶劑萃取步驟再將殘餘鋁移除。

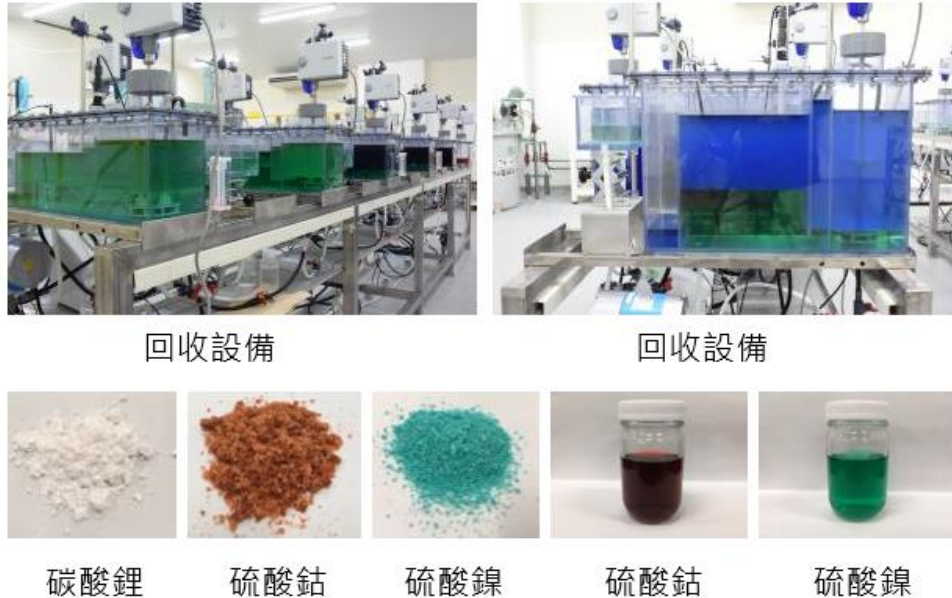
表 4.3-1 移除雜質後之浸出率及濃度

原料：來自鋰電池廢料 粉碎的正極材料	Co	Li	Cu	Al	Fe
浸出率(%)	>90	>90	<0.1	<10	<0.1
濃度(g/L)	25~30	3.5~4.0	<0.01	<0.4	<0.001

資料來源：吳笙卉等，鋰電池循環經濟(上)，工業材料，2020 年 4 月

隨著電動車普及化，對作為正極材料的鈷、鎳及鋰等金屬的需求將增加，JX 日礦公司於 2020 年 2 月於茨城縣工廠建置用於回收動力鋰電池的連續測試設備並開始營運(如圖 4.3-3)，回收的材料品質與狀態更可直接作為電池材料進行使用，將可望有助於削減回收、再利用時的能源使

用或是減少回收程序，以推動動力鋰電池封閉循環(Closed Loop)之回收再利用願景。



資料來源：JX 日礦公司官網

圖 4.3-3 JX 日礦公司回收設備及成品

## 2. 芬蘭清潔能源(Fortum)公司低碳濕法冶金技術

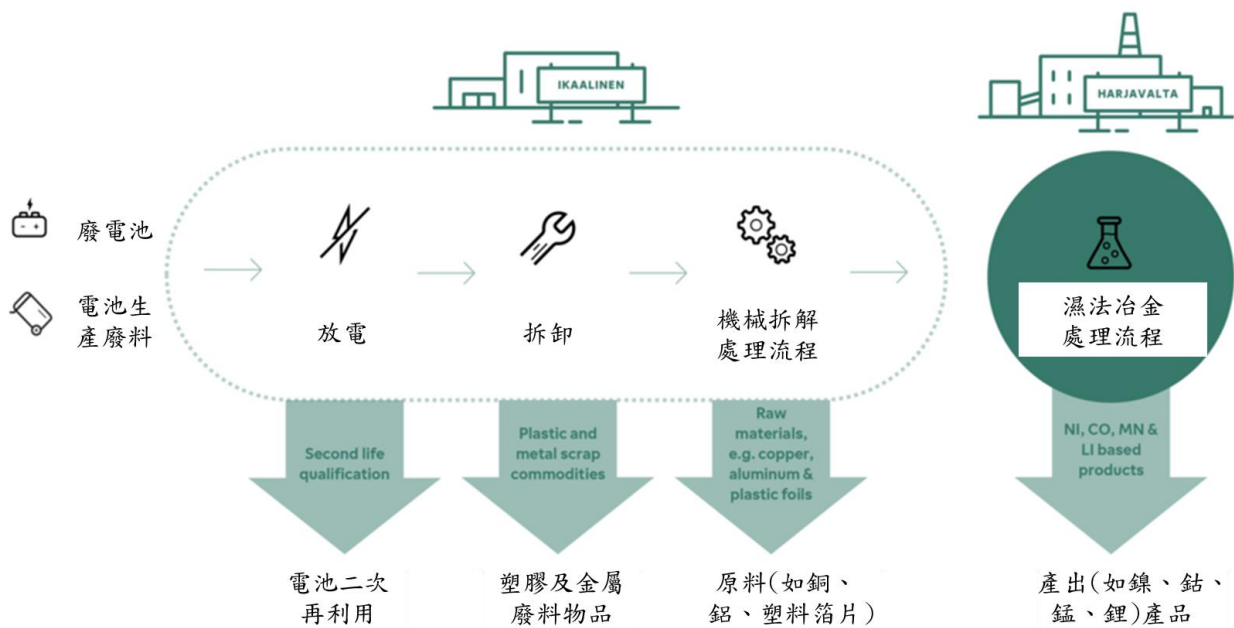
芬蘭清潔能源公司利用低碳濕法冶金技術(如圖4.3-4所示)，提升鋰電池回收率高達 80%，目前鋰電池採用傳統濕法冶金回收率僅 50%。可回收電動汽車(EV)電池，使稀有金屬重新回到流通領域，並通過減少開採鈷、鎳和其他稀有材料的需求來解決可持續性差距。Fortum公司通過低CO<sub>2</sub>濕法冶金技術，回收率高達 80%。處理程序將電池先經過安全處理，再進行機械處理，分離塑料、鋁和銅並進行回收。

濕法冶金回收過程從電池中產出鈷、鋰、錳和鎳，並將其交付給電池製造商，以作為新電池的再生原料。該技術由芬蘭成長型公司Crisolteq開發，Fortum公司在芬蘭Ikaalinen 的工廠進行機械拆卸處理，該機械加工回收塑料、鋁、銅和黑色粉末，而收集電池中含有關鍵金屬的黑色粉末，則在Harjavalta 的工廠進行濕法冶金回收處理，其他回收材料在單獨的過



程中回收，已商業化運行。低碳濕法冶金技術特點與優勢：

- (1)採用機械加工，將電池中的塑膠、銅與鋁分離，之後再透過低碳濕法冶金技術分離電池中的貴金屬。
- (2)將電池材料回收率從50%提高到80%，降低未來鋰、鈷等核心元素產量短缺風險，且避免廢棄電池污染環境等問題。



資料來源：

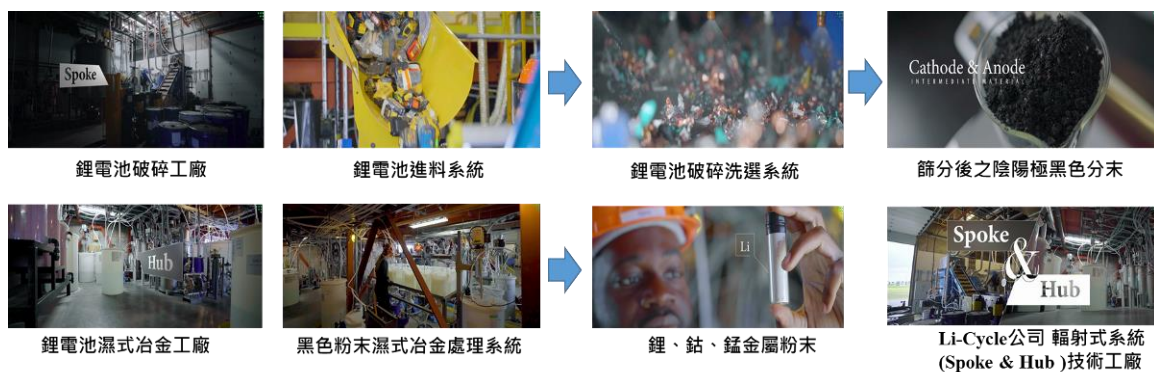
<https://www.fortum.com/products-and-services/fortum-battery-solutions/recycling/lithium-ion-battery-recycling-technology>。

圖 4.3-4 芬蘭清潔能源(Fortum)公司低碳濕法冶金技術回收流程

### 3.加拿大 Li-Cycle 公司輻射式系統(Spoke & Hub)技術

加拿大Li-Cycle公司輻射式系統(Spoke & Hub )技術，專為鋰電池回收而設計，結合提升機械安全和濕法冶金技術。所有類型的鋰電池都以安全高效的方式從充電狀態轉變為惰性產品。再進行濕法冶金技術產出鋰、鎳、鈷等，正極和負極材料被加工成電池級最終產品，以在鋰電池生產或更廣泛經濟中的其他應用中重複使用。

Li-Cycle公司輻射式系統(Spoke & Hub)技術流程，如圖4.3-5所示，目前年處理量為10,000公噸廢鋰電池，未來將擴展至約60,000公噸/年。該技術可安全處理所有鋰電池，而不會產生任何掩埋廢棄物和最少的溫室氣體，進而提供所有鋰電池永續的報廢途徑。在高效回收率的推動下，Li-Cycle的Spoke & Hub技術是一種經濟可行的鋰資源回收解決方案，可實現商業化並支持全球邁向電氣化目標。Li-Cycle公司產線包含廢鋰電池回收和資源回收技術產生的電池級終端產品。



資料來源：加拿大Li-Cycle 公司官網，<https://li-cycle.com/technology/>

圖 4.3-5 Li-Cycle 公司輻射式系統(Spoke & Hub )技術流程圖

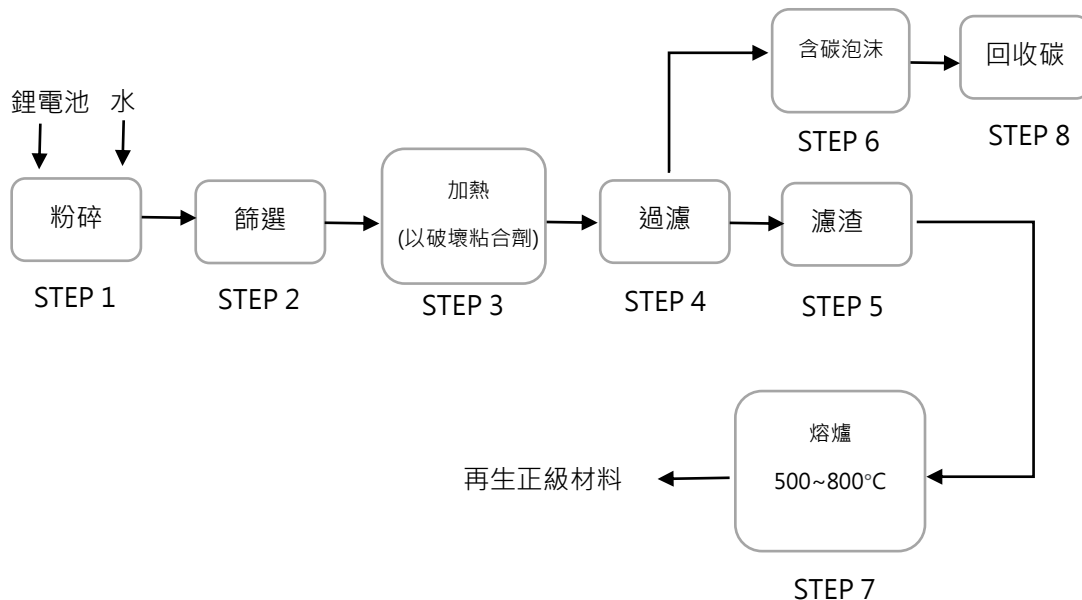
#### 4.美國 Retrie Technologies 公司濕法冶金技術

美國Retrie Technologies公司是全球電池管理和回收領域的領頭羊，致力於環境安全和負責任的回收技術，經營25年內處理超過約13,608公噸的鋰電池。Retrie Technologies公司的專利技術採用濕法冶金技術，可回收製造鋰離子電池所需的關鍵材料。該公司是由美國能源部資助，建設回收混合動力和電動汽車電池的專用回收設施。

Retrie Technologies公司與美國HOB International公司合作回收電動汽車電池， HOB International公司是IT資產管理和電子回收公司，於伊

利諾伊州、德克薩斯州和亞利桑那州設有工廠，作為一家通過R2、RIOS、ISO 14001和WBE認證的公司，HOBİ在電子回收行業的中處於領先地位，以最有效率方式回收再利用及價值，以及降低加工成本和處理過程中的風險。

美國Retriev Technologies公司過去主要以濕法冶金提取鋰電池有價金屬，目前也開發正極材料再生技術，於水中破壞鋰電池，以浮選法分離碳及正極粉體，再以高溫煅燒再添加鋰反應生成再生正極材料，如圖4.3-6所示。



資料來源：W. Novis Smith, Scott Swoffer, Retriev Tech Inc, Recovery of lithium ion batteries，本計畫彙整。

圖 4.3-6 美國 Retriev Technologies 公司正極材料再生技術

#### 4.4 高效率回收技術案例

高效率回收技術包含濕法冶金技術及直接循環技術、高效率鋰電池回收技術、正極材料再生技術。相關技術及案例說明如后：

##### 1.美國電池資源公司濕法冶金技術及直接循環技術

美國電池資源廠商 Battery Resourcers 宣稱設計出「世界上最高效的鋰電池回收流程」，利用回收電池製造正極材料，如鈷、鋁、銅、塑膠、石墨與甲醇等都可再利用。該公司可回收廢鋰電池中 97% 的金屬材料，並生產出鎳鈷錳(NCM)正極活性材料；與原生材料生產之產品相比，可降低成本 35%，溫室氣體排放與耗能分別降低 32% 與 13%。有別於一般電池回收商回收鎳鈷合金或從中提取碳酸鋰，以進行大宗商品金屬市場交易，該公司係將活性材料直接回收給電池製造商。此外，該公司也正在設計用於石墨回收和純化的技術，這將使正極、負極活性物質都可回收並製造新的電池。

回收試驗直接從浸出液中沉澱出 NCM(111)前驅物活性材料，流程如圖 4.4-1 所示。首先，透過磁選、加入 NaOH、沉澱及分選等步驟，從含有過渡金屬的浸出液中去除鐵、鋁及銅等物質。將 Co:Ni:Mn 莫耳比調整為 1:1:1 後， $\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}(\text{OH})_2$  使用 NaOH 和  $\text{NH}_4\text{OH}$  作為鹼/錯合劑，並控制在 pH 11 和溫度 60°C。報告顯示 4 個不同比例為期 7 天的測試結果，其中 4 個 30 公斤的混合廢 LIB 樣品與不同比例的 LIB 類型(LCO、NCM、LMO、LCO、LFP)在設備中進行處理，所得固體  $\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}(\text{OH})_2$  產物與 5% 過量  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  混合，在 450°C 和 900°C 下燒結後合成 NMC 的前驅物活性材料。回收之合成粉末測試結果，包括粒度、顆粒形態、密度、純度和結晶狀態，以及與參考商業正極材料的性能比較，結果顯示出回收之正極材料，在鈕扣電池和軟包電池(Soft pack battery)中與商業化正極材料的化學性能一樣。

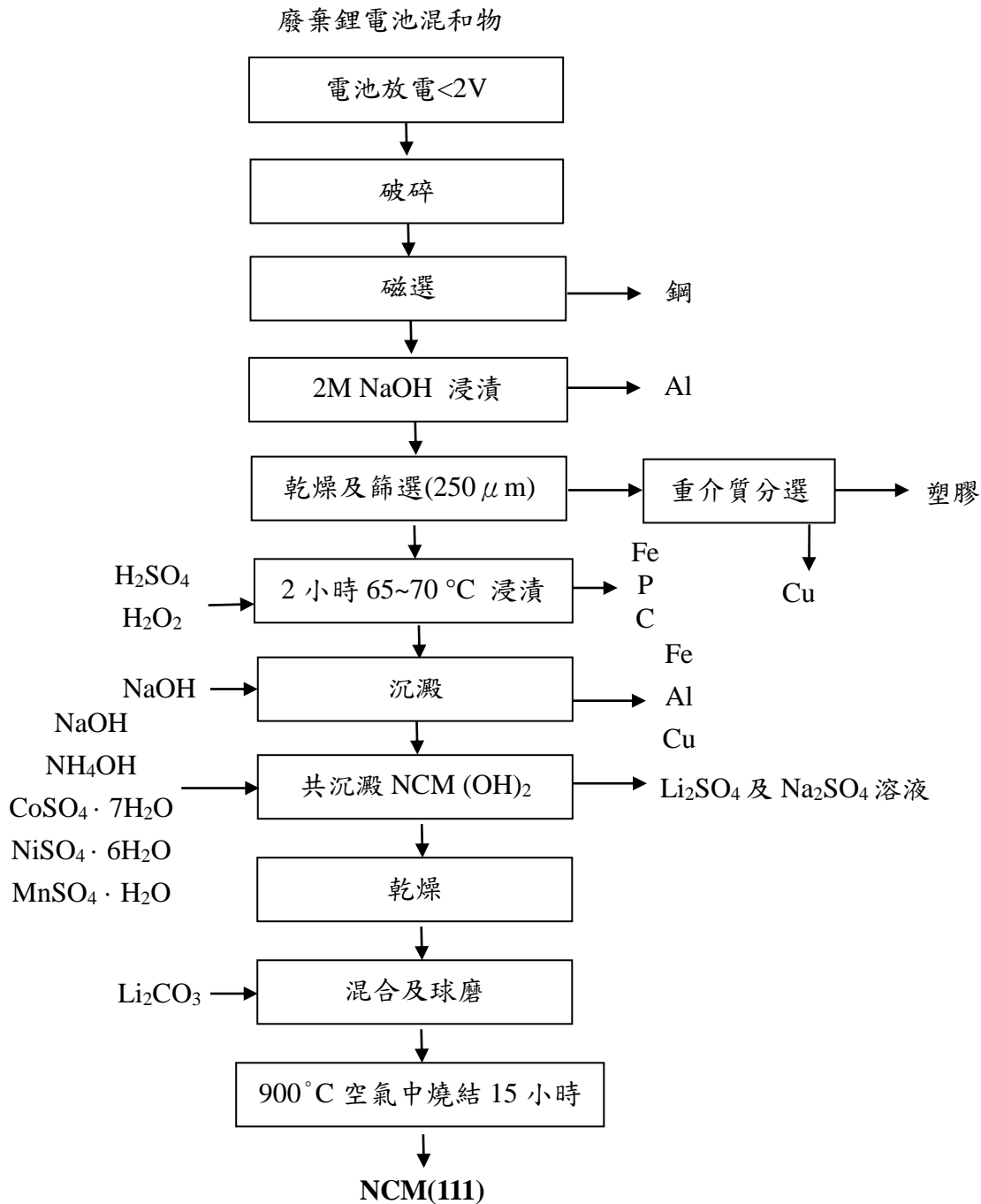
Battery Resourcers 回收流程主要特色及優勢如下：

- a. 可適應各種動力鋰電池化學進料來源，如通用、福特和菲亞特克萊斯勒(FCA)汽車公司的電動汽車電池。
- b. 回收的正極材料與商業化正極材料相比，具有同等或更好的電化學性



能。

- c.回收量能已擴大到每次實驗 30 kg 廢電池，並進一步將回收工作擴大到每天 0.5 公噸廢鋰電池。



資料來源：François Larouche et al., Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond, Materials, Feb 2020.

圖 4.4-1 Battery Resources 公司廢鋰電池回收流程圖

目前 Battery Resourcers 在美國麻薩諸塞州營運展示工廠，同時將工廠擴展到鄰近汽車工業大城底特律進行分析測試，回收設備如圖 4.4-2 所示。該公司並於 2021 年 4 月完成 2,000 萬美元的融資，將有助於開發商業規模設施，每年可加工 10,000 公噸電池，相當於每年約 20,000 輛電動汽車。期望未來達到穩定北美的正極材料供應鏈，並可進一步支持汽車商 Jaguar Land Rover 在 2039 年達成企業零碳排之目標。



資料來源：Battery Resourcers 公司官網

**圖 4.4-2 Battery Resourcers 廢鋰電池回收設備**

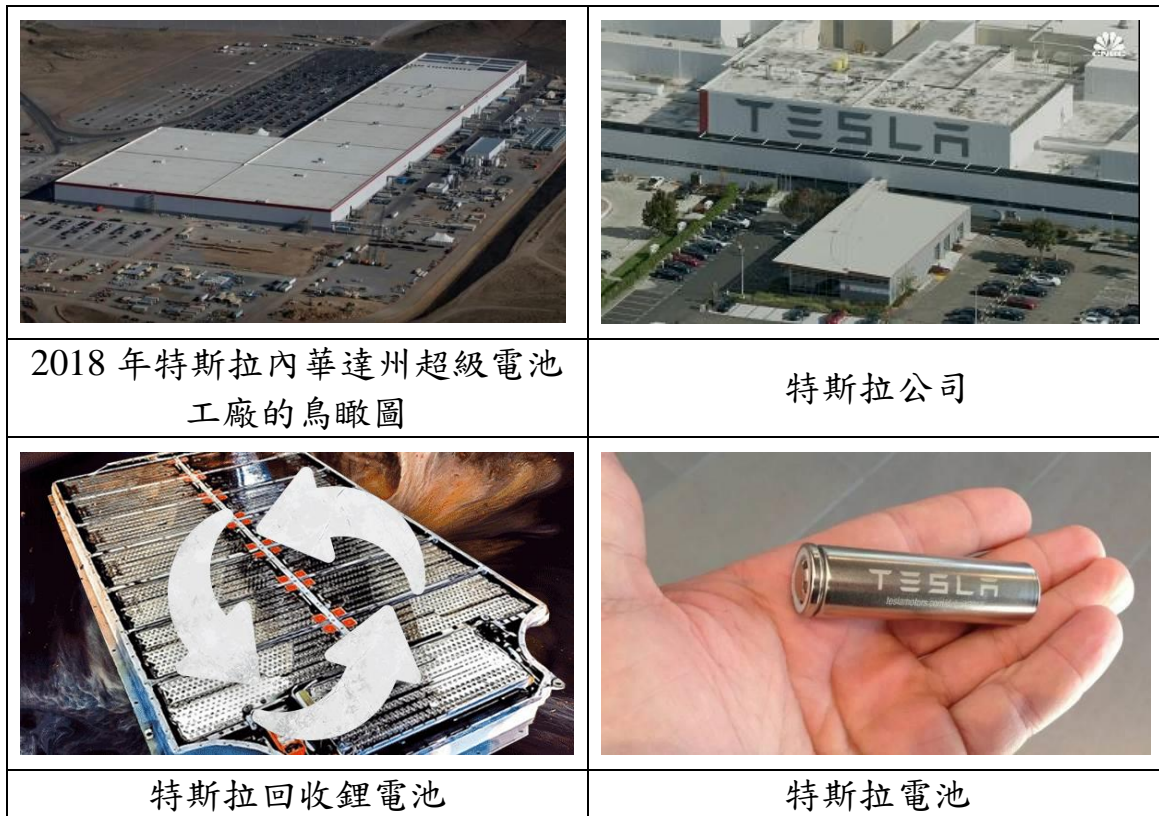
## 2. 美國特斯拉汽車公司高效率鋰電池回收技術

特斯拉汽車公司建立超級電池工廠如圖 4.4-3 所示，具備高回收率“閉環”回收系統，大幅降低鋰電池的綜合製造成本，而透過廢電池回收提取正極材料，有助於降低成本及環境影響。

超級電池工廠分為多期建設，從 2014 年到 2020 年，也只完成全部工期的 30%，2019 年特斯拉超級電池工廠生產線的回收系統尚未完全形成“閉環”，主要還是因為內華達州超級電池工廠尚未完全投產。

經專業分析特斯拉可能在回收電池後，先將電線和普通金屬直接回

收利用；其他電解質、含鋰材料等用液氮冷凍，防止化學反應；再將電池材料粉碎分離；最後將分離出來的各類元素重複利用。



資料來源：特斯拉可持續發展報告，2019。

圖 4.4-3 特斯拉公司內華達州超級電池工廠

#### 4.5 廢鋰電池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鋰電池回收及資源循環技術案例，其相關技術評析彙整如表 4.5-1 所示，廠商可依據相關技術及適用對象參考應用。

表 4.5-1 廢鋰電池回收及資源循環技術彙整

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	技術整備度 (TRL)	網頁連結/資料來源
機械處理技術	粉碎真空乾燥分離技術	電池放電後再進行拆解，而電池模塊在惰性條件(如:氮氣)中粉碎，粉碎後包含顆粒及液體電解質等液體，送進真空乾燥器。 產出粉末依顆粒大小與磁性分出乾燥的黑色粉末活性材料(含有鋰、鎳、錳、鈷及石墨)、鋁、銅及塑料。	<ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>2.再生原料與原生新材料具有同等的效能。</li> <li>3.粉碎真空乾燥分離技術，可回收電池中 95% 的原材料。</li> <li>4.從塑膠外殼及其他有機成分都可能回收。</li> </ol>	德國福斯汽車公司	9	Volkswagen 公司官網， <a href="http://www.volkswagen.com">www.volkswagen.com</a>
	破碎篩選與濕法技術	破碎篩選後，酸浸與沉澱(濕法)，主要產出 CoO、Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 。		美國 Toxco Inc.公司	9	<a href="https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=23863">https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=23863</a>
	機械破碎與濕法冶金	機械破碎與濕法冶金，主要產出石墨、電解質、鋁、鐵、銅、鈷、鎳、錳等。		德國 Duesenfeld 公司	9	<a href="https://www.duesenfeld.com/index_de.html">https://www.duesenfeld.com/index_de.html</a>
	機械破碎與焙燒處理	鋰離子電池組經過拆解、烘烤、粉碎、分類和收集。加工流程包含拆解/分選→焙燒→破碎/分選，再回收金屬銅、鋁、鎳、鋰、鈷等。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.運用水泥製造過程中產生的餘熱進行焙燒 LIB 模塊。</li> <li>2.將焙燒過程中產生的含有氟化氫氣體等的廢氣返回到水泥製造過程中，可以降低廢氣處理成本。</li> <li>3.焙燒過的 LIB 模塊可以</li> </ol>	日本太平洋水泥公司與松田產業	9	<a href="https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=34252">https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=34252</a>

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	技術整備度(TRL)	網頁連結/資料來源
			<p>根據其特性進行安全粉碎和分類，從而高效回收金屬資源。</p> <p>4.LIB 模塊金屬資源回收（破碎/分選）後的殘渣可轉化為水泥原料燃料，該處理系統可回收利用，不產生二次廢棄物。</p>			
火法冶金技術及濕法冶金技術組合	UHT 技術 (Ultra High Temperature Technology)	<p>1.結合濕法及火法之製程，分別產出合金及礦渣，其中自礦渣提煉出鋰，合金部分繼續提純至個別元素(如:鈷、鎳、銅)，並再重製為正極材料。</p> <p>2.全球最大的鋰電池和鎳氫電池回收設備。</p> <p>3.UHT 技術獨特的廢氣處理流程，符合煙道排氣標準。</p>	<p>1.適用於鋰電池和鎳氫電池，結合濕法及火法之製程，回收有價值的金屬，轉化為活性正極材料，再利用於生產新的電池；資源循環趨近零廢棄。</p> <p>2.為開發成熟之技術</p> <p>3.從爐渣中提取稀土元素與從原生礦石的處理步驟相同</p>	比利時優美科公司	9	Umicore 公司官網， <a href="https://www.umicore.com/">https://www.umicore.com/</a>
	火法與濕法冶金	火法與濕法冶金，主要產出鎳、鈷、銅、鋁及鋰。		美國 Redwood Materials 公司	9	美國 Redwood Materials 公司官網， <a href="http://www.redwoodmaterials.com">WWW .redwoodmaterials .COM</a>
濕法冶金	溶劑(酸類)溶解	1.浸漬、沉澱、溶劑萃取，鈷和鎳透過電解回收，鋰以碳酸鋰(Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )的形式析出。	<p>1.能源消耗較少。</p> <p>2.投資成本低。</p> <p>3.可從陰極、陽極材料和殼</p>	日本礦業金屬公司(JX)	9	JX 日礦公司官網， <a href="http://www.jx-kinzoku.co.jp">http://www.jx-kinzoku.co.jp</a>

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	技術整備度 (TRL)	網頁連結/資料來源
技術		2. 可提供更高純度 (純度 99.95%) 的金屬鈷和鎳外，還可回收錳(碳酸錳)和鋰(碳酸鋰)。	體金屬回收廢物的不同組分，可以分別在市場上銷售。			
	溶劑(酸類)溶解	濕法回收為主：酸浸後純化，主要產出 Co/Ni/Cu 合金		美國 Retrie Technologies 公司與美國 HOBI International 公司	9	W. Novis Smith, Scott Swoffer, Retrie Tech Inc, Recovery of lithium ion batteries
	低二氧化碳濕法冶金技術	1. 採用機械加工，將電池中的塑膠、銅與鋁分離，之後再透過低二氧化碳濕法冶金分離電池中的貴金屬。 2. 將電池材料回收率從 50% 提高到 80%，降低未來鋰、鈷等核心元素產量短缺風險，且避免廢棄電池污染環境等問題。		芬蘭 Fortum 公司	9	Fortum 公司官網， <a href="https://www.fortum.com">https://www.fortum.com</a>
	輻射式系統 (Spoke & Hub) 技術	鋰離子電池以安全高效的方式從充電狀態轉變為惰性產品。再進行濕法冶金技術產出電池級鋰、鎳、鈷等，正極和負極材料被加工成電池級最終產品。		加拿大 Li-Cycle 公司	9	加拿大 Li-Cycle 公司官網， <a href="https://li-cycle.com/technology/">https://li-cycle.com/technology/</a>

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	技術整備度(TRL)	網頁連結/資料來源
高效率回收技術	濕法冶金技術及直接循環技術	回收直接從浸出液中沉澱出NCM (111)前驅物活性材料。	1.可回收各種動力鋰電池化學進料來源，適用性佳。 2.回收的正極材料具有品質穩定的電化學性能。	美國電池資源公司	7	Battery Resourcers公司官網， <a href="https://www.batteryrsrcers.com/">https://www.batteryrsrcers.com/</a>
	高效率鋰電池回收技術	鋰電池電解質、含鋰材料等用液氮冷凍，防止化學反應；再將電池材料粉碎分離；最後將分離出來的各類元素重複利用	高回收率閉環回收系統，回收廢舊電池提取原材料大幅降低鋰電池成本，並降低環境影響。	美國特斯拉汽車公司	7	<u>美國特斯拉汽車公司</u> 官網， <a href="http://www.tesla.com">www.tesla.com</a>

## 五、關鍵物料(鈹鎢鎳)回收及資源循環技術案例

行政院環保署於 2016 年執行「永續物料管理指標檢討與環境衝擊估算及資料庫功能提升專案工作計畫」，研提「關鍵物料篩選原則」，並以「經濟重要性」、「供給風險」及「環境影響」等三大指標篩選關鍵物料，為確保優先管理之關鍵物料具代表性，排序至少二項指標皆在前 15 名者，並盤點較為關鍵之 10 項物料(詳如表 5-1)列為應優先管理之關鍵物料項目。

全球在疫情影響下，遠距工作相關產品，或居家遊戲機等加速提升鋰電池的使用量，與在各國能源政策推動下，刺激、提升電動車市占率，突顯出鋰電池在安全性、高能量密度以及充放電速度等技術能量提升之重要性。促使鋰電池材料需求與技術發展著重正極材料的技術提升，且以鎳為研發標的來取代鈷的使用比例。鎳在高溫下具有穩定性及所含比例愈高則能量密度愈大的特性，因此形成高鎳化之高克電容量材料的新技術主流趨勢。

表 5-1 優先管理之 10 項關鍵物料篩選

項次	物料名稱	經濟重要性	供給風險	環境影響
1	矽	10	14	1
2	煙煤-煉焦煤	11	18	4
3	鎂(含菱鎂礦)	21	7	5
4	銅	13	47	6
5	錫	8	26	11
6	銻	18	3	15
7	鈷	7	15	29
8	稀土元素	3	1	39
9	<u>鈹</u>	2	11	41
10	<u>鎢</u>	5	9	47

資料來源：環保署，「永續物料管理指標檢討與環境衝擊估算及資料庫功能提升專案工作計畫」，105 年 12 月。



綜合上述，銦、銻在「關鍵物料篩選原則」對於經濟重要性之排序在前五位，以及高鎳化之高克電容量材料的新技術主流趨勢，因此擬將銦、銻、鎳回收技術納入關鍵物料技術蒐集。

依據關鍵物料的應用領域、廢棄物產出形式與回收及資源循環技術，為蒐集國外資源循環技術資料之方向。銦具有較好的光滲透性與導電性，被廣泛用於生產液晶顯示器(ITO 靶材)與電子半導體(磷化銦、砷化銦鎵與碲化銦)；銻與銦皆具有半導體性質，是重要的半導體材料，多應用於纖維光纖、紅外光纖與聚合催化劑；鎳可塑性高具磁性與耐腐蝕，多被用於合金、電鍍與電池，關鍵物料(銦、銻、鎳)的應用領域與資源循環技術整理如表 5-2 所示。以下即針對本文關鍵物料(銦、銻、鎳)回收及資源循環技術進行介紹：

表 5-2 關鍵物料(銦、銻、鎳)的應用領域與資源循環技術

關鍵物料	應用領域	廢棄物來源	可行資源循環技術
銦	薄膜電晶體液晶顯示器(TFT-LCD)	ITO 廢料	乾式冶金法或濕式冶金法，純化後回收銦金屬
		LCD 蝕刻廢液	吸附廢液中金屬，再透過金屬精煉回收銦金屬
	半導體材料	廢 LCD	濕式冶金法，純化後回收銦金屬
	銅銦鎵碲太陽能電池	含銦清洗廢液	氧化還原、置換還原或電解法回收銦金屬
銻	光導纖維	廢光纖電纜	濕式冶金法，溶劑萃取，富集與鍛燒後回收銻氧化物晶體
	半導體材料	廢薄膜太陽能電池	濕式冶金法，破碎、酸溶、置換、電解回收銻金屬

表 5-2 關鍵物料(銦、鍺、鎳)的應用領域與資源循環技術(續)

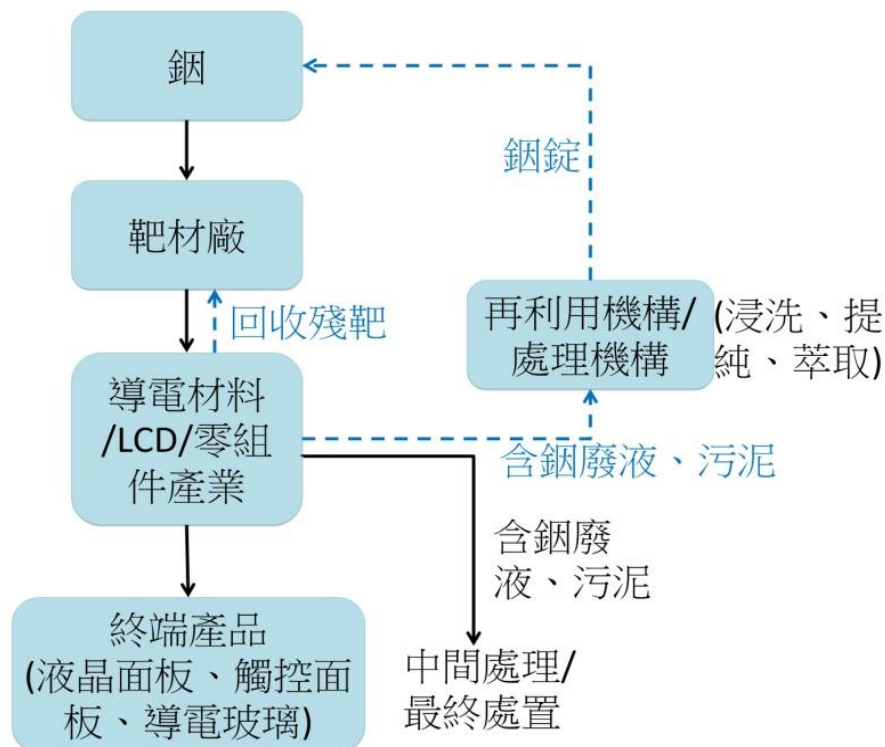
關鍵物料	應用領域	廢棄物來源	可行資源循環技術
鎳	金屬合金	含鎳廢液	以鈉鹽充當還原劑進行還原沉澱過濾乾燥燒結成塊
	正極材料(電池)	廢鎳鎘電池	分段加溫，醋酸溶解，碳酸化，電析
		廢鎳氫電池	機械清洗，把電極上可重複利用的材料與腐蝕物質分離，可以回收 95% 的材料

本表彙整自：

- 1.光電產業 ITO 廢料銦回收技術之開發，行政院環境保護署，2015 年 12 月。
- 2.鍺-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。
- 3.銦-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。
- 4.工業廢棄物清理與資源化資訊網，再生技術資料庫。

## 5.1 含銦廢料/廢液資源化技術案例

銦具有耐蝕性、耐磨耗性、耐熱性及相對強度而顯格外重要，故素有「產業維他命」之稱，廣泛應用於航太、無線電和電子工業、醫療、國防、高新技術、能源等領域。統計全球銦之產業用途，生產 ITO 靶材(用於生產液晶顯示器和平板屏幕)是銦的主要產業用途，占全球銦消費量的 70%，其次電子半導體產業，占全球消費量的 12%，焊料和合金產業佔 12%，研究行業佔 6%。銦物料流布概況如圖 5.1-1，主要回收途徑為產品製造及廢棄物回收，當中產品製造程序之回收主要來自於 ITO 廢靶材之利用及含銦廢液之回收，自溶液中回收稀有金屬的方法有樹脂交換法、溶劑萃取法與液膜回收等方法。



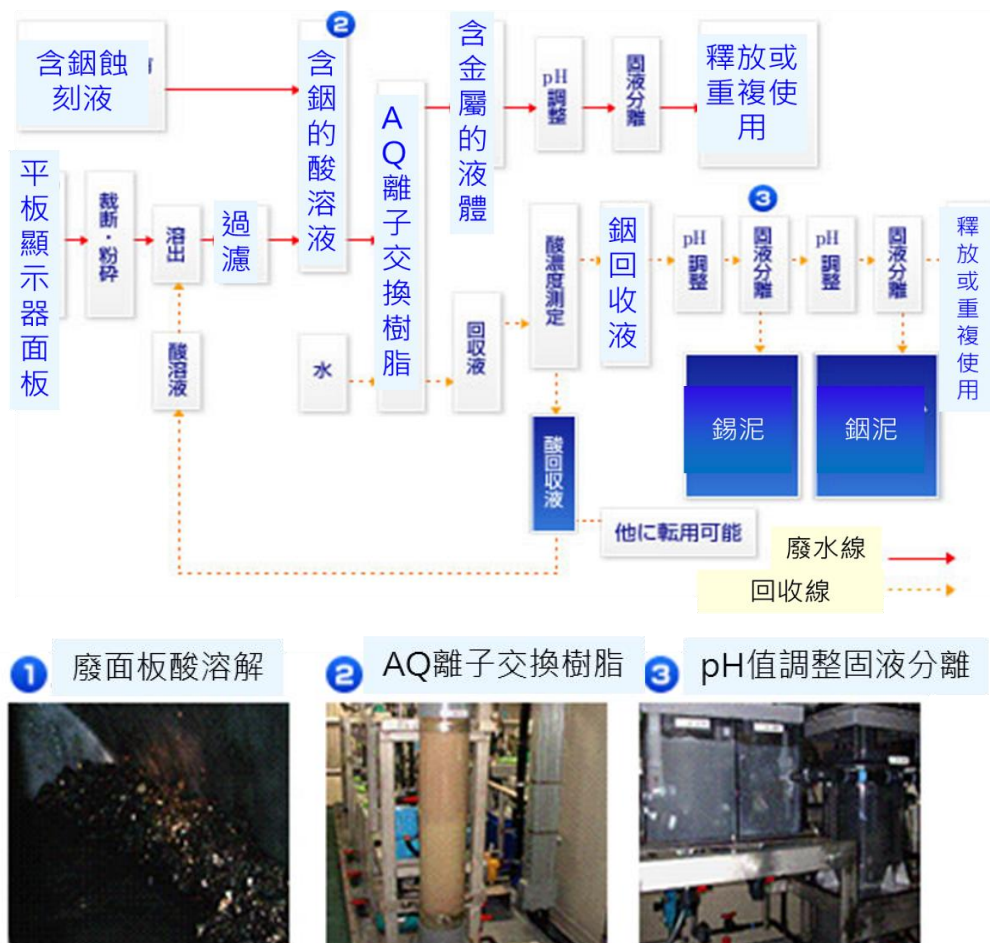
資料來源：銦-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。

圖 5.1-1 銦物料流布概況

## 1.濕法冶金技術從廢液晶面板回收銦(日本 Aquatech 株式會社)

從ITO廢料中回收銦、錫的典型流程為以鹽酸或鹽酸加硫酸的混合酸溶解ITO廢料，溶解後在惰性氣體條件下加入金屬銦，使溶液中的雜質離子銅(Cu)、鉛(Pb)、錫(Sn)等置換析出，過濾除去雜質，然後將純化液進行電解析出銦金屬。

Aquatech株式會社開發從液晶面板和酸蝕刻溶液中回收銦的技術。可有效回收溶液中低濃度銦，並在同一時間，游離酸可以分離並回收，金屬和游離酸的回收步驟是先將廢面板酸溶、經離子交換樹脂富集含銦溶液，再經pH值調整獲得錫泥與銦泥，處理流程如圖5.1-2所示。



資料來源：Aquatech 官方網站，<http://www.aqua-t.co.jp/technique/rare-metal.html>。

圖 5.1-2 Aquatech 公司回收低濃度含銦廢液流程

## 2.濕法冶金技術從 ITO 廢料回收鈹(日本 Alchem 株式會社)

Alchem Japan主要業務是稀有金屬、貴金屬、有色金屬的進出口、加工、精煉、銷售、回收再利用的研究開發，在靜岡市的工廠進行ITO廢料回收，回收精煉流程是先分析ITO廢料之鈹含量，其可回收鈹含量1%以上之ITO廢料，將其加以破碎分選後，以濕法冶金技術進行回收程序，再進行置換、電解等精製程序，可得高純度鈹錠。其回收流程如圖5.1-3所示。



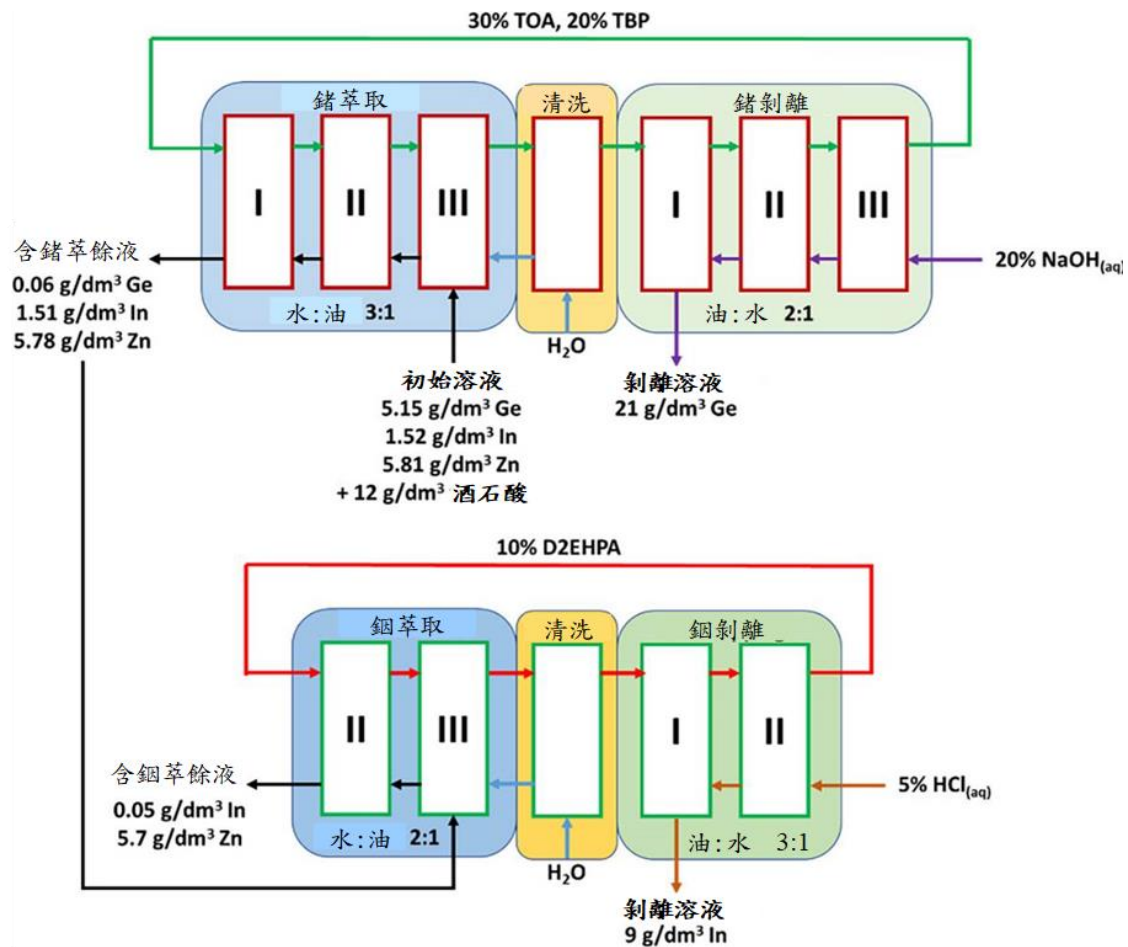
資料來源：Alchem 官方網站，<http://www.alchemjapan.com/recycle/english.html>。

圖 5.1-3 Alchem 公司濕法冶金技術回收鈹流程

## 3.溶劑萃取技術從鍍渣回收鈹(波蘭有色金屬研究所)

波蘭有色金屬研究所以溶劑萃取回收鈹，其方法在第一階段以三辛胺 (Trioctylamine, TOA)/磷酸三丁酯(Tributyl Phosphate, TBP)系統萃取，再用氫氧化鈉溶液(濃度在10~20%之間)汽提鍍。在第二階段，從鍍提取後得到的萃餘液中再回收鈹。以二-(2-乙基己基)磷酸 (Di-2-ethylhexyl phosphoric acid, DEHPA/D2EHPA)用作萃取劑，鹽酸用作剝離劑。鈹提取

和汽提產率大於98%，銻和銲可以在兩階段溶劑萃取過程中被選擇性地萃取，其流程如圖5.1-4所示。



資料來源：Michał Drzazga et al., Recovery of germanium and indium from leaching solution of germanium dross using solvent extraction with TOA, TBP and D2EHPA, , Hydrometallurgy, Volume 202, June 2021.

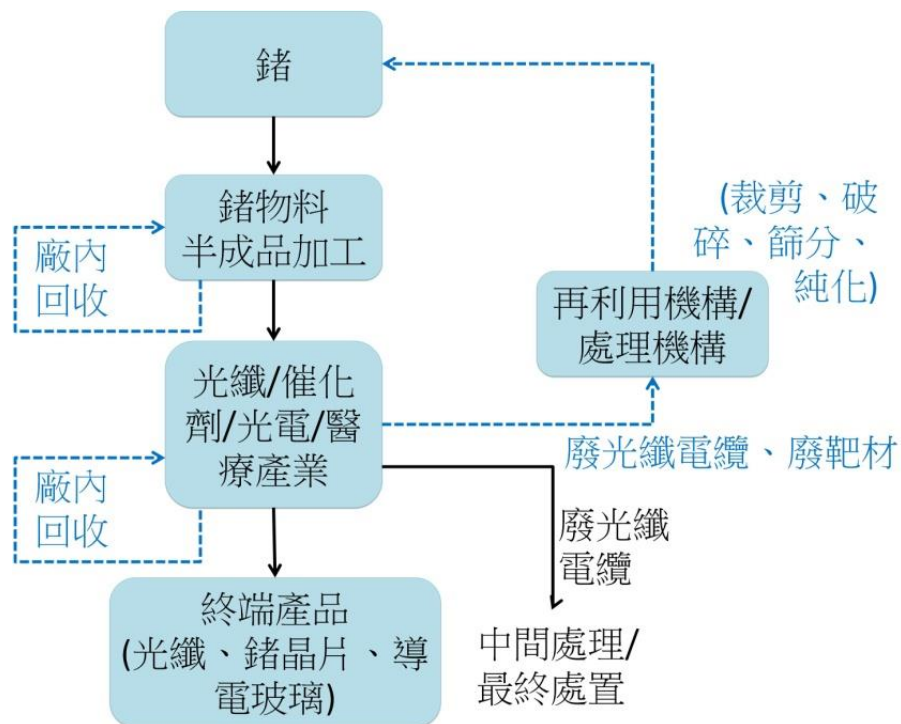
圖 5.1-4 波蘭有色金屬研究所溶劑萃取回收銲流程

## 5.2 含銻廢料資源化技術案例

銻有單向導電性是重要之半導體材料，如在玻璃光纖中摻銻可降低玻璃光纖之光損耗並提高折射指數，銻於光纖通訊、太陽能電池、生物醫學、化學催化劑、紅外光學、核子物理探測及航太測控等領域皆有廣泛之應用，於光纖市場中占約四成之應用比例。世界上銻資源十分缺乏，近年銻



金屬之價格逐年攀升，且其含量只要 20ppm 就有其回收價值。銻物料流布概況如圖 5.2-1，銻回收之主流方式區分為萃取法、離子交換法及沉澱法三類。溶劑萃取法具備如分離效果好、金屬回收率高、產品純度高、生產能力大、易於實現自動化及可連續操作等優點。然萃取劑耗費高，故需要研發更經濟之萃取劑；另鑒於萃取劑消耗較大，未來需發展更完善萃取劑的回收系統及萃取體系。離子交換法若於大規模應用則需高交換速度及高交換容量之樹脂，然因缺乏該類型樹脂故尚需克服。沉澱法以丹寧沉銻法為其主流技術，主要缺點為單寧銻於灼燒過程中損失大，產出之銻精礦品位低且污染環境。



資料來源：銻-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。

圖 5.2-1 銻物料流布概況

#### 1. 溶劑萃取技術從廢薄膜太陽能電池回收銻銻(中國格林美股份有限公司)

薄膜太陽能電池主要成份是二氧化矽、鋁、矽、聚合體、鋅與少部分的砷、鎘、鎳、銻、銻。格林美高新技術公司申請「從廢舊薄膜太陽能電



池中回收鎘、銻、銻的方法」專利，該方法採用下列步驟回收之銻、銻達純度99%。

步驟1：將粉碎的廢舊薄膜太陽能電池加入硫酸與硝酸混合液與在60~90℃溫度下反應3~10小時，以獲得含有鎘、銻、銻、銻、鎘等金屬離子的第一分離液，調整第一分離液的pH值到0.5~2.0溫度40~60℃時，加入硫化鹽和通入硫化氫，可使銅、鎘金屬離子沉澱，收集第二分離液。

步驟2：調整第二分離液的pH值到1.0~2.0、溫度50~99℃時，加入鋅粉/鋁粉/鎂粉任一，置換出第二分離液中的鎘、銻、銻、銻金屬離子，固液分離後獲得含有鎘、銻、銻、銻的濾渣。

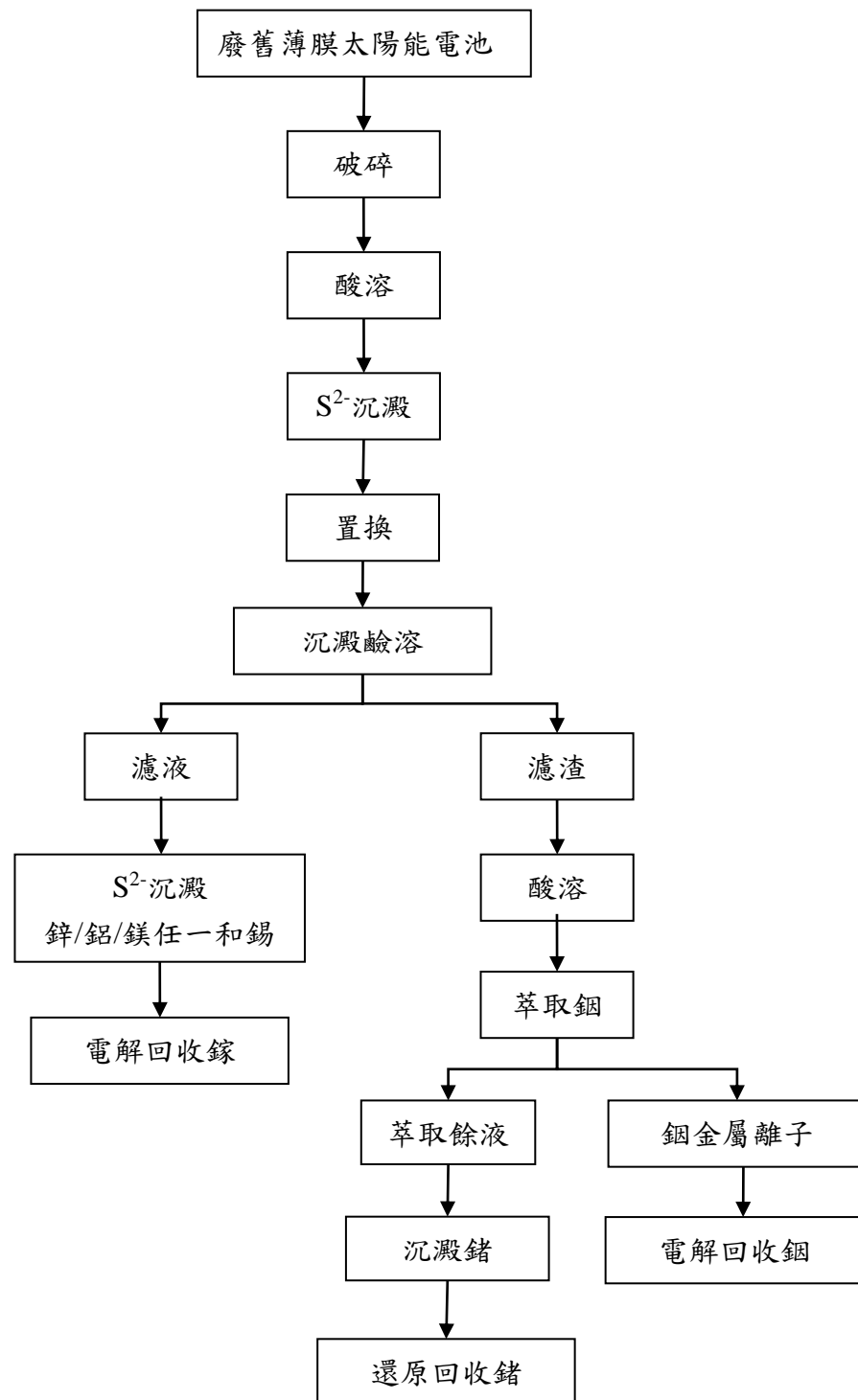
步驟3：以鹼溶液濃度2~4mol/L、溫度50~99℃條件下，溶出鎘、銻金屬離子，可獲得第四分離液和未溶於鹼溶液的銻、銻金屬固體。

步驟4：將第四分離液的溫度調到70~99℃，並加入可溶性硫化鹽和通入硫化氫，沉澱鋅/鋁/鎂和銻金屬離子，固液分離後，將含有鎘金屬的分離液進行電解回收鎘金屬。

步驟5：將未溶於鹼溶液的銻、銻金屬固體以硫酸/鹽酸溶出，再加入P204-煤油體系萃取銻金屬離子，並以硫酸/鹽酸反萃取出含銻金屬離子溶液後，電解回收銻金屬。

步驟6：調整萃取餘液的pH值到4.0~6.0，得到氫氧化銻沉澱物，氫氧化銻沉澱物經清洗、焙燒、以還原氣體還原，得到銻金屬。

格林美公司的回收銻銻流程如圖5.2-2所示。



資料來源：深圳市格林美股份有限公司,專利申請公布號 CN 103199148, 2013 年 7 月。  
本計畫整理。

圖 5.2-2 溶劑萃取技術從廢薄膜太陽能電池回收銦鍺流程示意圖

## 2.超濾分離搭配火法和濕法冶金技術回收廢棄光纖(比利時優美科與AZUR SPACE 公司)

優美科擁有火法和濕法冶金工藝來精煉和回收各種含鎘的精礦、固體、濾餅、漿料和溶液，其大約有48%的供應需求來自回收來源，鎘封閉循環回收系統如圖5.2-3所示。優美科(Umicore)與AZUR SPACE開發鎘回收流程，並設置大批量試驗工廠，如圖5.2-4所示，以超濾(Ultra Filtration, UF)技術可回收含鎘量0.5%的固體與濃度0.5g/l的液體，分離鎘與不需要的材料，再透過火法和濕法冶金技術來精煉和回收含鎘物質。優美科評估自煤礦生產原生鎘的溫室氣體排放量是從廢棄物回收鎘之十幾倍。



資料來源：Danny Hsu, 優美科介紹簡報。

圖 5.2-3 Umicore 鎘封閉循環回收系統



資料來源：

1.優美科公司網站，

<https://eom.umicore.com/en/germanium-solutions/services/recycling-services/>。

2. Fred Lu，優美科介紹簡報。

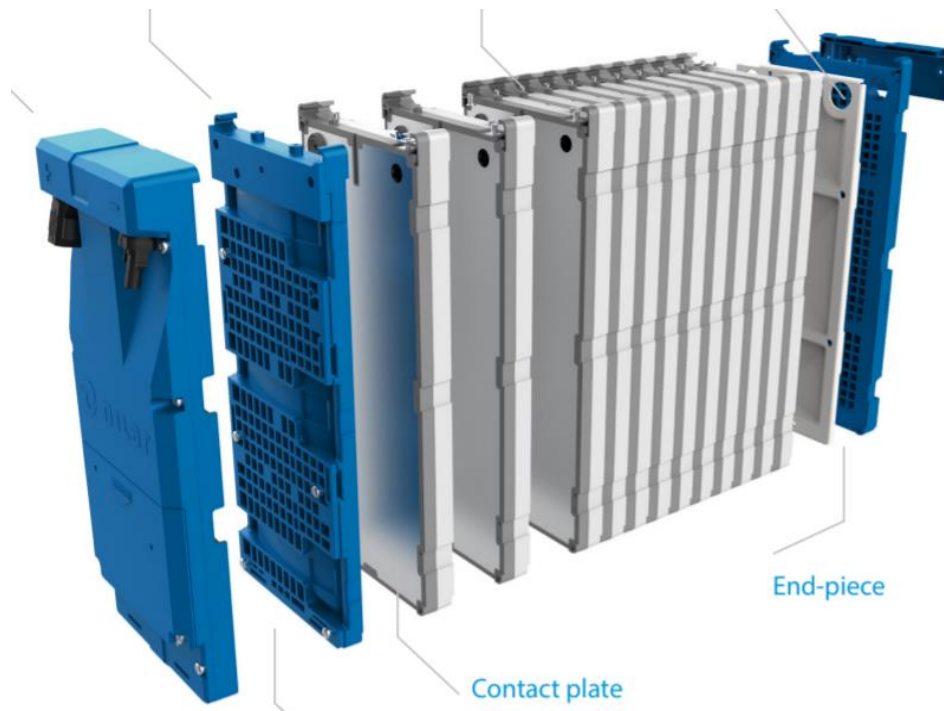
**圖 5.2-4 Umicore 與 AZUR SPACE 合作設置廢光纖回收試驗工廠**

### 5.3 含鎳廢料資源化技術案例

鎳是天然存在的，主要以氧化物、硫化物和矽酸鹽的形式存在。原生鎳被生產並用作鎳鐵、氧化鎳和其他化學品與純鎳金屬。全世界每年生產和使用超過 200 萬公噸的新鎳或原生鎳。72%應用於不鏽鋼，合金、鑄件、電鍍與電池各應用 7%。目前含鎳不鏽鋼廢料變成新不鏽鋼，或者將回收電池中的鎳用於含鎳不鏽鋼，有化學沉澱法可將廢鈹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。如何於回收再生時降低能耗及環境負荷，為各廠商技術研發著重之部分。

1.機械物理技術回收廢鎳氫電池再利用(瑞典斯德哥爾摩大學與瑞典電池製造商 Nilar AB)

瑞典斯德哥爾摩大學與瑞典電池製造商Nilar攜手推出全新的鎳氫電池(如圖5.3-1)回收方法，由於避免傳統昂貴的重熔(remelting)步驟，回收更加容易，從廢鎳氫電池中回收儲氫合金，主要採用機械(球磨或超音波處理)清洗，並把電極上可重複利用的材料與合金顆粒的外部腐蝕物質(多孔的針狀稀土氫氧化物晶體)分離，新回收方法可以回收95%的材料，甚至可以把回收材料直接用在新電池中。蓄電池或多或少都含有一些稀有材料、或是得經過複雜且昂貴步驟的材料，過去在製作電池時，需要將這些材料「活化」(active materials)才能使用，而現在可以直接使用這些材料，省下許多時間與投資。



資料來源：

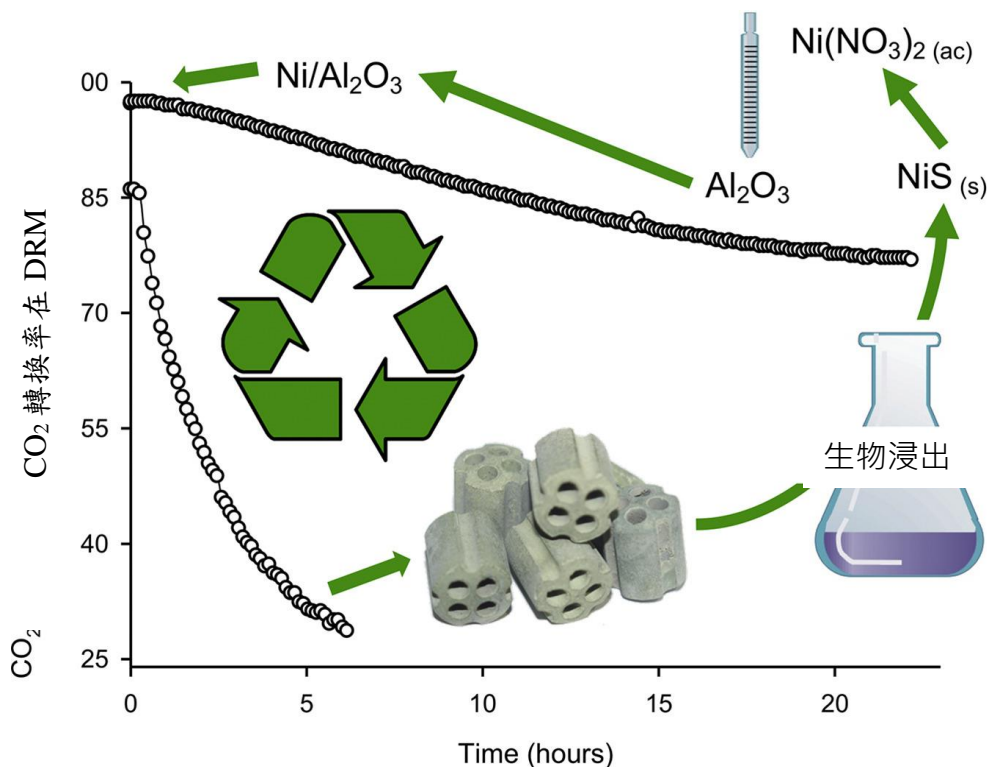
1.Nilar 產品介紹，網站：<https://www.nilar.com/wp-content/uploads/Product-Catalogue-Nilar-Energy-and-Energy-series-EN-v1.0.pdf>

2.Department of Materials and Environmental Chemistry, Upcycling of Spent NiMH Battery Material—Reconditioned Battery Alloys Show Faster Activation and Reaction Kinetics than Pristine Alloys ,Stockholm University, *Molecules* 2020, 25(10), 2338, May 2020.

圖 5.3-1 Nilar AB 的雙極鎳氫電池圖片

## 2. 生物濕法冶金技術回收商用催化劑(巴西聖保羅州立大學)

生物濕法冶金技術使用兩種嗜酸菌(氧化亞鐵硫桿菌和氧化硫硫桿菌)，並調整生物浸出模式和催化劑預處理方式。以使用氧化硫硫桿菌(是一種革蘭氏陰性、桿狀細菌，具有圓形末端)的浸出步驟，展現最高( $94.4 \pm 0.1\%$ )的鎳提取率。鎳提取率是穩定的( $85.6 \pm 3.9\%$ )，直至渣密度為 $0.05 \text{ g/ml}$ ，並且由於酸消耗，會在較高的渣密度條件時下降。透過生物浸出獲得的鎳溶液可被回收利用，通過浸漬商業氧化鋁載體製備新的 $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化劑。新催化劑在二氧化碳重組甲烷反應(Dry Reforming of Methane, DRM)中的活性提供高甲烷轉化率(99%)，並在所用實驗條件下隨時間推移具有良好的穩定性，如圖5.3-2所示。



資料來源：Institute of Chemistry, São Paulo State University, Nickel recycling through bioleaching of a  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  commercial catalyst, Hydrometallurgy, Volume 195, August 2020.

圖 5.3-2 生物濕法冶金技術回收商用催化劑示意圖



### 3.濕法冶金技術從鋰電池回收硫酸鎳與作為正極材料(日本住友金屬鑛山公司)

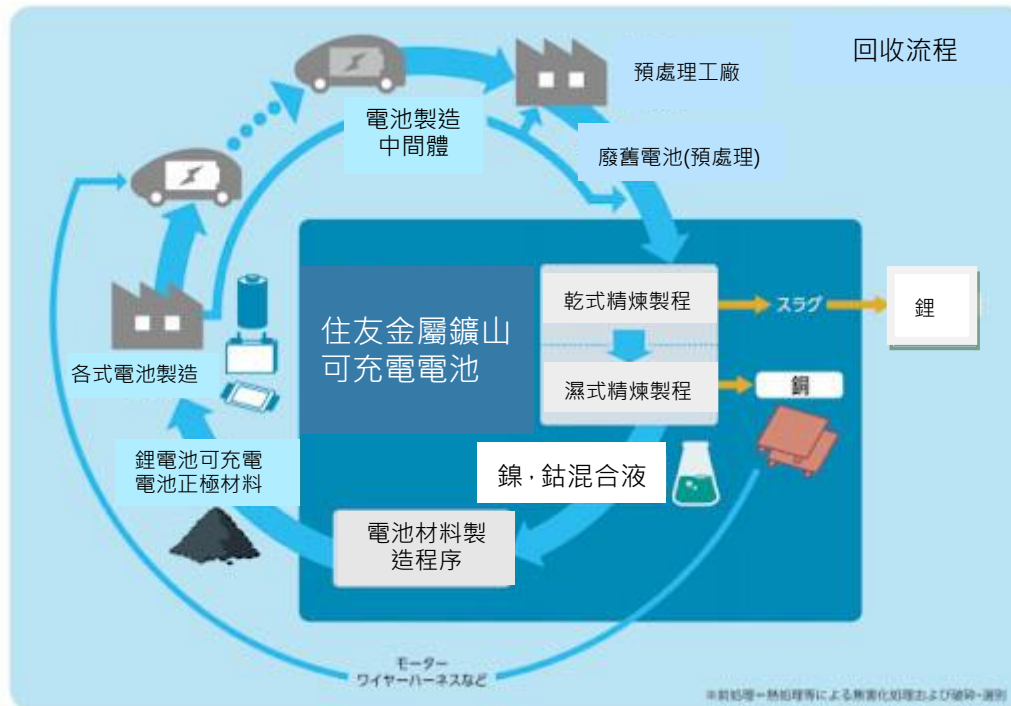
住友金屬鑛山公司從鋰離子電池(LiB)以及 LiB 製程中產生的不良品裡將銅和鎳予以回收，並再次製造電池材料之資源化處理流程。

相較於鎳氫電池，鋰離子電池中有價金屬的含量低，因此再資源化的獲利性不佳，因此要作為有價物回收的話有其困難度。住友金屬鑛山則透過管理原料中的不純物濃度，成為日本國內唯一成功回收銅與鎳之廠商。由於鎳也予以回收，經濟效率也因此大幅提高。

住友金屬鑛山公司在愛媛縣東予工廠的乾式銅製煉製程進行電解銅(Electrolytic Copper)，並於濕式鎳製煉製程中回收硫酸鎳，接著在磯浦工場加工成正極材料。目前鎳回收量換算一個月約有5~6公噸，銅則預測將有20公噸左右的處理需求。

回收流程如圖5.3-3，是由電池在高溫爐內熔解，以「乾式」製程(由熔點及比重的差異)分離出鋰金屬，以及將鎳、鈷、銅合金進行藥液處理、分離的「濕式製程」所構成。此次則透過製程的最佳化，穩定且有效率地分離出不純物質，成功地實現高純度鎳/鈷混合液的回收。進一步利用混合液製作正極材料後，確認具有與天然礦物來源的正極材料同等程度的電池性能。





資料來源：住友金屬鑛山。本計畫整理。

圖 5.3-3 濕法冶金技術回收鎳作為正極材料流程示意圖

## 5.4 關鍵物料(鈮鎳鎳)純化及資源循環技術評析彙整

本章節所蒐集彙整之國外鈮、鎳、鎳純化及資源循環技術，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參考應用。

表 5.4-1 關鍵物料(銮、鋳、鎳)資源循環技術彙整

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	技術整備度(TRL)	網頁連結/資料來源
濕法冶金技術	從廢液晶面板回收銮	將廢面板酸溶、經離子交換樹脂富集含銮溶液，再經 pH 值調整獲得錫泥與銮泥。	可於低濃度含銮溶液中回收銮。	日本 Aquatech 株式會社	9	Aquatech 官方網站， <a href="http://www.aqua-t.co.jp/technique/rare-metal.html">http://www.aqua-t.co.jp/technique/rare-metal.html</a> .
	從 ITO 廢料回收銮	將 ITO 廢料加以破碎分選後，以濕法冶金技術進行回收程序，再進行置換、電解等精製程序，可得高純度銮錠。	具回收與精煉製程，可精煉含銮溶液，獲得高純度銮錠。	日本 Alchem 株式會社	9	Alchem 官方網站， <a href="http://www.alchemjapan.com/recycle/english.html">http://www.alchemjapan.com/recycle/english.html</a> .
溶劑萃取技術	從鋳渣回收銮	兩階段溶劑萃取，在第一階段用 TOA/TBP 萃取，再用氫氧化鈉溶液汽提鋳，在第二階段以 DEHPA/D2EHPA 萃取劑，鹽酸用作剝離劑，汽提銮。	銮提取和汽提產率大於 98%	波蘭有色金屬研究所	2	Michał Drzazga et al., Recovery of germanium and indium from leaching solution of germanium dross using solvent extraction with TOA, TBP and D2EHPA, , Hydrometallurgy, Volume 202, June 2021.
	從廢薄膜太陽能電池回收銮鋳	以酸溶、沉澱、置換、鹼溶、萃取、電解等多段程序，獲得關鍵物料。	可得銮、鋳與鎳金屬	中國格林美股份有限公司	2	深圳市格林美股份有限公司, 專利申請公布號 CN 103199148, 2013 年 7 月。

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	技術整備度(TRL)	網頁連結/資料來源
超濾分離法	超濾分離回收鍺	以超濾分離鍺與不需要的材料，再透過火法和濕法冶金技術來精煉和回收含鍺物質。	可回收含鍺量 0.5% 的固體與濃度 0.5g/l 的液體	比利時優美科 (Umicore) 與 AZUR SPACE 公司	7	1.優美科官方網站， <a href="https://eom.umicore.com/en/germanium-solutions/services/recycling-services/">https://eom.umicore.com/en/germanium-solutions/services/recycling-services/</a> 。  2.Fred Lu, 優美科介紹簡報。
機械物理技術	機械物理技術回收廢鎳氫電池再利用	採用機械(球磨或超音波處理)清洗，並把電極上可重複利用的材料與合金顆粒的外部腐蝕物質分離。	可以回收 95% 的材料，且避免傳統昂貴的重熔與活化程序。	瑞典斯德哥爾摩大學與瑞典電池製造商 Nilar	2	1.Nilar 產品介紹，官方網站： <a href="https://www.nilar.com/wp-content/uploads/Product-Catalogue-Nilar-Energy-and-Energy-series-EN-v1.0.pdf">https://www.nilar.com/wp-content/uploads/Product-Catalogue-Nilar-Energy-and-Energy-series-EN-v1.0.pdf</a> 2.Department of Materials and Environmental Chemistry, Upcycling of Spent NiMH Battery Material—Reconditioned Battery Alloys Show Faster Activation and Reaction Kinetics than Pristine Alloys ,Stockholm University,

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	技術整備度(TRL)	網頁連結/資料來源
						<i>Molecules</i> 2020, 25(10), 2338, May 2020.
生物濕法冶金技術	生物濕法冶金技術回收商用催化劑	使用兩種嗜酸菌(氧化亞鐵硫桿菌和氧化硫硫桿菌)，並調整生物浸出模式和催化劑預處理方式，使鎳提取率再穩定的 ( $85.6 \pm 3.9\%$ ) 最高 ( $94.4 \pm 0.1\%$ )。	高提取率，且新催化劑在二氧化碳重組甲烷反應 (Dry Reforming of Methane, DRM) 中的活性提供了高甲烷轉化率。	巴西聖保羅州立大學	2	Institute of Chemistry, São Paulo State University, Nickel recycling through bioleaching of a Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> commercial catalyst, Hydrometallurgy, Volume 195, August 2020.
濕法冶金技術	從鋰電池回收硫酸鎳	粉碎電池後以乾式製程電解回收銅，於濕式鎳製煉製程中回收硫酸鎳，後續加工成正極材料。	成功回收銅與鎳，經濟效率大幅提高。	日本住友金屬礦山公司	9	1.化學工業日報，材料世界網編譯。 2.回收銅與鎳製成正極材料之循環再利用流程，材料世界網，刊登日期:2017/8/22。
	從鋰電池回收鎳鈷作為正極材料	電池在高溫爐內溶解，以「乾式」製程分離出鋰金屬，以「濕式」製程分離出不純物質，成功地實現高純度鎳/鈷混合液的回收，後續加工成正極材料。	可回收直接製作正極材料之鎳/鈷混合液，不需分離為單一金屬。	日本住友金屬礦山公司	7	1.日刊工業新聞，網址 <a href="https://www.nikkan.co.jp/articles/view/608758">https://www.nikkan.co.jp/articles/view/608758</a> . 2.住友金屬礦山開發廢電池金屬回收技術，可再利用於正極材料，材料世界網，刊登日期:2021/9/16。

## 六、結語

本評估報告針對廢塑膠高值化及資源循環技術、廢鋰電池回收及資源循環技術、關鍵物料(銻銻鎳)回收及資源循環技術進行評析，相關評析結果彙整如下：

### 1.廢塑膠高值化及資源循環技術包括如下：

(1)溶劑純化法：A.磁性催化劑智慧材料回收技術(荷蘭 Ionika Technologies)；B.無負擔反應條件及溶劑輔助專利技術(加拿大 Loop Industries)；C. PolyStyreneLoop 專案計畫(德國 Fraunhofer IVV 與 CreaCycle GmbH)。其共通性的特點均尚未達到商業化規模、操作溫度低，不須消耗過多能量。

### (2)化學解聚法：

- 已達商業化規模：A. BRING Technology™ (日本 JEPLAN)；B. ReNEW™專利技術(英國 PerPETual)；C. BRING Technology™ (日本 JEPLAN)；D. ECONYL® Regeneration System 技術(義大利 Aquafil)；E. regen®技術(韓國 Hyosung)；F. Sorona®技術(美國杜邦)；G. RENU®技術(日本 ITOCHU)。達商業化規模技術眾多，且針對不同廢塑膠種類進行處理，亦可大幅降低產品碳足跡。
- 尚未達商業化規模：A. VolCat 新型塑膠回收技術(美國 IBM)；B.碳再生技術及聚酯再生技術(美國 Eastman)；C. DEMETO 計畫(瑞士 gr3n)。

(3)熱能解聚法：A. ResolVe 計畫(德國 Ineos)、B.微波熱處理技術(加拿大 Pyrowave)、C. polynSPIRE 計畫(歐盟)，透過熱能或微波進行解聚，可大幅降低化石燃料使用，並能提升製程效率。

- (4)其他技術：A. SORPLAS™技術(日本 Sony)、Agilyx 技術(美國 Agilyx)、酵素降解回收技術(法國 Carbios)。其共通性的特點均強調製程流程簡單回收率高。

## 2.廢鋰電池回收及資源循環技術包括如下：

- (1)機械處理技術：A.粉碎真空乾燥分離技術(德國福斯汽車公司)；B.破碎篩選與濕法技術(美國 ToxcoInc 公司)；C.機械破碎與焙燒處理(日本太平洋水泥公司與松田產業)；D.機械破碎與濕法冶金(德國 Duesenfeld 公司)；E.機械破碎與火法冶金技術(瑞士 Batrec 公司)。其技術共同優勢是從塑膠外殼及其他有機成分都可能回收，相較其他處理技術無衍生廢棄物(如溶劑、分解氣體)產生。
- (2)火法冶金技術及濕法冶金技術組合：A.UHT 技術(Ultra High Temperature Technology)(比利時優美科公司)；B.火法冶金技術及濕法冶金技術組合(美國 Redwood Materials 公司)。適用於鋰電池和鎳氫電池，結合濕法及火法之製程，回收有價值的金屬，轉化為活性正極材料，再利用於生產新的電池；資源循環趨近零廢棄。
- (3)濕法冶金技術：A.溶劑(酸類)溶解(日本礦業金屬公司 JX、美國 Retrie Technologies 公司與美國 HOB International 公司合作)；B.低二氧化碳濕法冶金技術(芬蘭 Fortum 公司)；C.輻射式系統(Spoke & Hub)技術(加拿大 Li-Cycle 公司)；D.正極材料再生技術(美國 Retrie Technologies 公司與美國 HOB International 公司合作)，其最大優勢為能源消耗較少，投資成本低。
- (4)高效率回收技術：A.濕法冶金技術及直接循環技術(美國電池資源公司)；B.高效率鋰電池回收技術(美國特斯拉汽車公司)，其最大優勢為高效率回收正極材料，大幅降低鋰電池成本，並降低環境影響。

### 3.關鍵物料(銮鉻鎳)回收及資源循環技術包括如下：

- (1)濕法冶金技術(銮)：A.從廢液晶面板回收銮技術(日本 Aquatech 株式會社)；B.從 ITO 廢料回收銮(日本 Alchem 株式會社)。其共通點為皆已商業化。
- (2)溶劑萃取技術(銮)：A.從鉻渣回收銮技術(波蘭有色金屬研究所)；B.從廢薄膜太陽能電池回收銮鉻(中國格林美股份有限公司)。目前均仍在研發中。
- (3)超濾分離回收鉻：由比利時優美科(Umicore)與 AZUR SPACE 公司共同研發超濾分離回收鉻技術，可回收含鉻量 0.5%的固體與濃度 0.5g/l 的液體。
- (4)機械物理技術(鎳)：瑞典斯德哥爾摩大學與瑞典電池製造商 Nilar 開發機械物理技術回收廢鎳氫電池再利用技術，尚在研究階段。
- (5)生物濕法冶金技術(鎳)：巴西聖保羅州立大學開發生物濕法冶金技術回收商用催化劑技術，尚在研究階段。
- (6)濕法冶金技術(鎳)：日本住友金屬鑛山公司，開發從鋰電池回收硫酸鎳技術及從鋰電池回收鎳鈷作為正極材料技術，技術已至商業化階段。

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及設備之資料蒐集，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。



## 參考文獻

1. Chemical Recycling : State of Play , 2020.12
2. <https://www.environmentalleader.com/2018/10/178523/>
3. CreaCycle GmbH 公司網站 , <https://www.creacycle.de/en/the-process.html>
4. <https://polystyreneloop.eu/circular-economy/>
5. LCA carbon footprint summary report for Eastman carbon renewal technology , 2020.01
6. POLYESTER RENEWAL: A BIG STEP TOWARD A SMALLER FOOTPRINT
7. JEPLAN 公司網站 , <https://www.jeplan.co.jp/sustainability/>
8. Introduction to perPETual Global Technologies and Polygenta , 2017
9. gr3n 公司網站 , <https://gr3n-recycling.com/technology.html>
- 10.AQUAFIL AND SUSTAINABILITY , 2018 。
- 11.RENU 網站 , <https://renu-project.com/zh/renu-material>
- 12.Pyrowave 公司網站 ,  
<https://www.pyrowave.com/en/blog/news/pyrowave-closes-series-b-led-by-michelin-and-sofinnova-partners>
- 13.polynSPIRE 計畫網站 , <https://www.polynspire.eu/solution>
- 14.Demonstration of Innovative Technologies towards a more Efficient and Sustainable Plastic Recycling.
- 15.Sony 網站 , <https://www.sony.com.tw/zh/electronics/sorplas-recycled-plastic>

- 16.Global Chemicals Conference,2021.05
- 17.Carbios 網站，<https://www.carbios.com/en/enzymes/>
- 18.Volkswagen 公司官網，[www.volkswagen.com](http://www.volkswagen.com)
- 19.Thomas Zenger, Andreas Krebs, Huibert Jacobus Hendrik van Deutekom, Batrec Industrie, Method of and apparatus for dismantling and storage of objects comprising alkali metals, such as alkali metal containing batteries
- 20.Umicore 公司官網，<https://www.unicore.com/>
- 21.Umicore, The recycling efficiency of li-ion ev-batteries, 2013.
- 22.Lisa Brückner et al., Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes, metals, 2020.
- 23.JX 日礦公司官網，<http://www.jx-kinzokushoji.com>
- 24.Innovation boosts lithium-ion battery recycling rate to over 80% ， 2019 。
- 25.加拿大 Li-Cycle 公司官網，<https://li-cycle.com/technology/>
- 26.François Larouche et al., Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond, Materials, Feb 2020.
- 27.Battery Resourcers 公司官網，<https://www.batteryresourcers.com/>
- 28.特斯拉可持續發展報告，2019 。
- 29.W. Novis Smith, Scott Swoffer, Retrie Tech Inc, Recovery of lithium ion batteries
- 30.Fortum 公司官網，  
<https://www.fortum.com/products-and-services/fortum-battery-solutions/recycling/lithium-ion-battery-recycling-technology>

- 31.Aquatech 官方網站，<http://www.aqua-t.co.jp/technique/rare-metal.html>。
- 32.Alchem 官方網站，<http://www.alchemjapan.com/recycle/english.html>。
- 33.Michał Drzazga et al. ,Recovery of germanium and indium from leaching solution of germanium dross using solvent extraction with TOA, TBP and D2EHPA, , Hydrometallurgy, Volume 202, June 2021.
- 34.優美科公司網站，  
<https://eom.unicore.com/en/germanium-solutions/services/recycling-services/>。
- 35.Nilar 產品介紹，網站：  
<https://www.nilar.com/wp-content/uploads/Product-Catalogue-Nilar-Energy-and-Energy-series-EN-v1.0.pdf>
- 36.Department of Materials and Environmental Chemistry, Upcycling of Spent NiMH Battery Material—Reconditioned Battery Alloys Show Faster Activation and Reaction Kinetics than Pristine Alloys ,Stockholm University, Molecules 2020, 25(10), 2338, May 2020.
- 37.Institute of Chemistry, São Paulo State University, Nickel recycling through bioleaching of a Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> commercial catalyst, Hydrometallurgy, Volume 195, August 2020.
- 38.從「減少塑膠」到「再生塑膠」發展機會與挑戰，財團法人塑膠工業技術發展中心，2021 年 8 月 18 日。
- 39.陳建明，工研院材化所，廢塑膠回收再製技術趨勢發展與應用，2021.06.29
- 40.回收聚酯纖維的技術與市場趨勢&智能紡織材料的發展，產業情報站，

107 年 1 月。

41.PET 塑料化學回收再循環技術，科儀新知，109 年 12 月。

42.創新綠色鞋材與循環經濟，南寶樹脂化學工廠（股）公司，2019.01。

43.回收漁網之混煉改質與加工技術，工業材料雜誌 415 期，2021.07

44.carryin 網站，<https://www.carryin.store/blog/posts/brand-mei>

45.化學回收產業趨勢與應用(下)，工業材料雜誌 397 期，2020 年 1 月。

46.李清華等，大葉大學環境工程學系，廢車用鋰電池之回收處理，2018 年 12 月。

47.張添晉、洪毅翔，臺北科技大學環境工程與管理研究所，鋰離子電池高值化循環利用技術，2018 年。

48.李守仁、白立文，車用鋰離子電池的回收技術(下)，2018 年 9 月 8 日，材料世界網。<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=23863>

49.材料世界網網站，<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=34252>

50.德國 Duesenfeld 鋰電池回收公司，  
[https://www.duesenfeld.com/index\\_de.html](https://www.duesenfeld.com/index_de.html)

51.新聞百分百網站，<https://www.newsbfbb.com/hot/45090.html>

52.吳笙卉等，鋰電池循環經濟(上)，工業材料，2020 年 4 月

53.光電產業 ITO 廢料銻回收技術之開發，行政院環境保護署，2015 年 12 月。

54.鍍-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。

- 55.錮-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。
- 56.工業廢棄物清理與資源化資訊網，再生技術資料庫。
- 57.以分散反萃取相支撐式液態薄膜回收貴金屬，材料與技術專欄，工業材料雜誌，391 期，2019 年 7 月。
- 58.深圳市格林美股份有限公司,專利申請公布號 CN 103199148，2013 年 7 月。本計畫整理。
- 59.日本住友金屬鑛山株式會社。